

# **Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden**

Vorgelegt von M.S.

**Lichun Sui**

aus Shandong, V. R. China

Von der Fakultät VI  
Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Berlin 2002  
D 83

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dieter Lelgemann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz

Gutachter: Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Lothar Gründig

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 15. Januar 2002

## 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. Insbesondere die steigende Nachfrage nach aktuellen Digitalen Höhenmodellen erfordert Aufnahmeverfahren, die die notwendigen Höhenpunkte mit hinreichender Genauigkeit auch für große Flächen und für schwierige Waldgebiete in angemessener Zeit liefern können.

Die mit Flugzeuglaserscannern gewonnenen Daten stellen zunächst unstrukturierte und unregelmäßig verteilte Punkthaufen dar, die einer intensiven Nachbearbeitung bedürfen. Zur Nachbearbeitung von Laserpunkten ergibt sich als erste Aufgabe eine Separation der gewünschten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche (Bodenpunkte) von den nicht verwertbaren Punkten (Nichtbodenpunkte). Eine weitere Aufgabe ist die Extraktion von Strukturlinien aus Laserscannerdaten bzw. aus allgemeinen DHM-Daten.

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.

Das hier entwickelte Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien basiert auf dem Canny-Operator der Bildverarbeitungsmethoden und auf Krümmungstheorie. Das entwickelte und realisierte Verfahren besitzt hohe Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit. Es erlaubt auf einfache Weise Erweiterungen für andere Anwendungsgebiete. Dies wird anhand von zahlreichen Beispielen und Abbildungen dargestellt. Die Genauigkeit der Extraktion von Strukturlinien wird durch die Bestimmung der Subpixelposition gesteigert.

Insgesamt zeigt die Arbeit zur Extraktion von Strukturlinien, dass durch die Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden in vielen Anwendungsgebieten gute Ergebnisse erzielt werden können, ohne objektspezifisches Wissen einsetzen zu müssen. Die Arbeiten könnten durch eine Optimierung der Algorithmen und Programme sowie in einer kompletten Implementierung unter UNIX oder WINDOWS erweitert werden. Eine weitere Aufgabe besteht in der Integration von Wissen, beispielsweise von Fernerkundungsdaten oder Informationen der topographischen Karte.

## Abstract

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. As a response to the increasing demand for DEM it is anticipated to provide final products in a short time with low personal costs and with a sufficient accuracy even for large areas.

Airborne laser scanner raw data are unstructured and irregular points which need intensive post processing. The first step is the separation of valuable points which lie on the ground surface (ground points) from outliers which are located above it (non-ground points). Another task is the extraction of structure lines from laser scanner or other DEM data.

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.

The presented and developed method for the extraction of structure lines bases on the Canny-Operator and on the differential geometry of curves. This operator was initially developed for image processing and is now used in a new context. The developed and implemented methodology is open for further extension and compatibility. It is hence possible to use it in other fields of application. The accuracy of the extraction of structure lines increases due to the determination of sub-pixel positions.

The presented work shows that image processing methods yield good results for the extraction of structure lines without the need of specific knowledge of objects. Future work could focus on the optimization of algorithms and programs and on a complete implementation with UNIX or Windows. Another task would be the integration of external knowledge, e.g. from remote sensing or topographic maps.

# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>I EINFÜHRUNG IN DIE ANALYSE VON LASERSCANNERDATEN</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Methoden zur topographischen Geländeerfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Funktionsweise existierender Laserscannersysteme</b> .....	<b>2</b>
2.1 Prinzip der Laserscannermessung .....	<b>2</b>
2.2 Zick-Zack-Weise .....	<b>4</b>
2.3 Zeilen-Scan-Weise.....	<b>4</b>
2.4 Überblick über existierende Laserscannersysteme.....	<b>5</b>
<b>3 Einführung in Digitale Bildverarbeitungsmethoden</b> .....	<b>6</b>
<b>4 Überblick der existierenden Auswertungsmethoden</b> .....	<b>7</b>
4.1 Filterungsverfahren für Laserpunkte .....	<b>7</b>
4.2 Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien.....	<b>8</b>
<b>5 Aufgabenstellung</b> .....	<b>9</b>
<b>6 Inhaltsüberblick</b> .....	<b>10</b>
<b>II LASERSCANNERSYSTEME UND DIE VORVERARBEITUNG IHRER MESSDATEN</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Eigenschaften von Lasersensoren</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Komponenten von Laserscannersystemen</b> .....	<b>14</b>
2.1 Kombiniertes Laserscannersystem .....	<b>14</b>
2.2 Systemgenauigkeit.....	<b>14</b>
2.3 Ergebnis .....	<b>15</b>
<b>3 Vorverarbeitung der Meßdaten</b> .....	<b>16</b>
3.1 Datenerfassung .....	<b>16</b>
3.2 Datentransformation .....	<b>16</b>
3.3 Koordinatensystem .....	<b>16</b>
3.3.1 <i>Laser-Koordinatensystem</i> .....	<b>16</b>
3.3.2 <i>Flugzeugfestes Koordinatensystem</i> .....	<b>16</b>
3.3.3 <i>Lokales, astronomisches Horizontsystem</i> .....	<b>17</b>
3.3.4 <i>World Geodetic System 1984 – WGS 84</i> .....	<b>17</b>
3.3.5 <i>Koordinatensystem der Landesvermessung</i> .....	<b>17</b>

3.4	Systemkalibrierung.....	17
3.5	Koordinatentransformation von Lasermessungen.....	18
<b>4</b>	<b>Verwendete Materialien.....</b>	<b>18</b>
<b>III</b>	<b>MATHEMATISCHE AUSWERTUNG VON LASERSCANNERDATEN.....</b>	<b>21</b>
<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>21</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	21
1.2	Überblick über Auswertungsmethoden.....	21
1.2.1	<i>Definition.....</i>	22
1.2.2	<i>Direkte Verfahren.....</i>	22
1.2.3	<i>Getrennte Verfahren.....</i>	24
1.2.4	<i>Verwendetes Verfahren.....</i>	24
1.3	Überblick über Teil III.....	24
<b>2</b>	<b>Vorverarbeitung mittels Mathematischer Morphologie.....</b>	<b>25</b>
2.1	Vorbemerkung.....	25
2.2	Mathematisch morphologische Operatoren.....	25
2.2.1	<i>Basisoperatoren.....</i>	25
2.2.2	<i>Kombinierte Operatoren.....</i>	26
2.3	Verwirklichung der morphologischen Operation.....	28
2.3.1	<i>Konventionelle Methodik.....</i>	28
2.3.2	<i>Verbesserte Methodik.....</i>	29
2.4	Selektion der Bodenpunkthypothese.....	29
2.4.1	<i>Wahl der Bandbreite (Schwellwert).....</i>	29
2.4.2	<i>Wahl der Fenstergröße.....</i>	30
2.4.3	<i>Bandbreite als Gewichtsfunktion.....</i>	31
2.4.4	<i>Identifizierung der Bodenpunkthypothese.....</i>	31
2.5	Ergebnisse der Vorbearbeitung.....	32
<b>3</b>	<b>Weiterverarbeitung von Laserpunkten.....</b>	<b>34</b>
3.1	Einführung.....	34
3.2	Verallgemeinerung über robuste Parameterschätzung.....	35
3.3	Robuste Parameterschätzung von Laserpunkten.....	35
3.3.1	<i>Vorbemerkung.....</i>	35
3.3.2	<i>Robuste Schätzung mit kar-Modellen.....</i>	36
3.3.3	<i>Robuste Schätzung mit nar-Modellen.....</i>	39
3.3.4	<i>Robuster M-Schätzer.....</i>	41
3.4	Durchführung der Weiterbearbeitung von Laserpunkten.....	44
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Analyse der Auswertung von Laserpunkten.....</b>	<b>46</b>
4.1	Vorbemerkung.....	46
4.2	Ergebnisse der Auswertung.....	48
4.3	Analyse der Ergebnisse.....	54
<b>5</b>	<b>Genauigkeitsbetrachtung von Laserscannerdaten.....</b>	<b>55</b>
5.1	Einführung.....	55
5.2	Vergleich mit photogrammetrischen Auswertungsmethoden.....	56

5.3	Vergleich mit tachymetrischen Messungen.....	57
<b>IV</b>	<b>DHM-AUFBAU UND INTERPOLATION.....</b>	<b>58</b>
<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>58</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>59</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau digitaler Höhenmodelle (DHM).....</b>	<b>59</b>
3.1	Vorbemerkung.....	59
3.2	Dreiecks - DHM.....	59
3.3	Gitter - DHM.....	60
<b>4</b>	<b>DHM- und Grauwertinterpolation.....</b>	<b>61</b>
4.1	Vorbemerkung.....	61
4.2	Interpolation mit Gewichtsfunktionen.....	61
4.3	Polynominterpolation und Polynomapproximation.....	62
4.4	Lineare Prädiktion nach der Methode der kleinsten Quadrate.....	62
<b>5</b>	<b>Genauigkeitsbetrachtung der Interpolation.....</b>	<b>63</b>
5.1	Vorbemerkung.....	63
5.2	Kriterien der Genauigkeitsuntersuchung.....	64
5.2.1	<i>Analytische Verfahren</i> .....	64
5.2.2	<i>Empirische Verfahren</i> .....	64
5.2.2.1	Quadratischer Mittelwert - RMS.....	65
5.2.2.2	Standardabweichung - SD.....	65
5.2.2.3	Maximaler Fehler und minimaler Fehler.....	66
5.2.3	<i>Morphologische Genauigkeitsschätzung</i> .....	66
<b>6</b>	<b>Herstellung von Höhenlinien.....</b>	<b>66</b>
<b>V</b>	<b>ANALYSE VON DHM-DATEN UND AUTOMATISCHE EXTRAKTION VON STRUKTURLINIEN.....</b>	<b>68</b>
<b>1</b>	<b>Integration von DHM in raumbezogene Informationssysteme.....</b>	<b>68</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>70</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung und Begrenzung der durchzuführenden Aufgaben.....</b>	<b>72</b>
3.1	Einleitung.....	72
3.2	Begrenzung der durchzuführenden Aufgaben.....	74
<b>4</b>	<b>Strategie der Extraktion von Strukturlinien.....</b>	<b>75</b>
4.1	Definition der Strukturlinien.....	75
4.2	Anforderung und Schwierigkeit bei der Kantendetektion.....	76
4.3	Einteilung von Verfahren der Kantendetektion.....	78
4.4	Vorverarbeitung von DHM-Daten.....	79
4.4.1	<i>Umrechnung der DHM-Daten in Grauwertbild</i> .....	79
4.4.2	<i>Glättungsfilerung</i> .....	80

4.4.3	<i>Kantenerhaltende Filterung</i> .....	82
4.5	Eigenschaften von Kantendetektionsverfahren .....	85
<b>5</b>	<b>Krümmungsmaße zur Kantendetektion</b> .....	<b>87</b>
5.1	Einleitung.....	87
5.2	Maße des Krümmungsraums .....	88
5.3	Krümmungsmaße zur Kantenextraktion.....	89
<b>6</b>	<b>Kombiniertes Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien</b> .....	<b>90</b>
6.1	Vorbemerkung .....	90
6.2	Vorbereitung der Daten .....	91
6.3	Extraktion von Strukturlinien mit dem Canny-Operator .....	93
6.3.1	<i>Vorbemerkung</i> .....	93
6.3.2	<i>Grundlagen des Canny-Operators</i> .....	94
6.3.3	<i>Nachbearbeitung</i> .....	95
6.3.3.1	Non-Maxima-Suppression-Verfahren (Unterdrückung der Nicht Kantenpunkte) .....	95
6.3.3.2	Hysteresis-Threshold-Verfahren (Hysterese-Schwellwert-Verfahren) .....	96
6.3.3.3	Constraint-Thinning-Verfahren (Zwang-Verdünnungs-Verfahren).....	97
6.3.4	<i>Wahl der Schwellwerte</i> .....	97
6.3.5	<i>Bestimmung der Subposition von Kantenpunkten</i> .....	99
6.3.6	<i>Identifizierung der Kantenlinien</i> .....	100
6.3.7	<i>Ergebnisse der Extraktion von Strukturlinien</i> .....	101
6.3.7.1	Ergebnisse mit Simulationsbildern.....	101
6.3.7.2	Ergebnisse mit realen Bildern.....	103
6.3.7.3	Ergebnisse mit Luftbildern .....	104
6.3.7.4	Ergebnisse mit DHM-Daten .....	105
6.4	Extraktion von Geripplinien .....	110
6.4.1	<i>Summationsverfahren</i> .....	110
6.4.2	<i>Extraktion von Geripplinien durch Krümmungsmaße</i> .....	112
6.5	Weiterbearbeitung von Strukturlinien .....	113
6.5.1	<i>Skelettierung von Strukturlinien</i> .....	114
6.5.2	<i>Vektorisierung und Konturverfolgung von Kantenpunkten</i> .....	114
6.5.3	<i>Verbindung von extrahierten Strukturlinienpunkten</i> .....	116
6.5.3.1	Bestimmung des Suchbereiches .....	117
6.5.3.2	Punktsuche mittels Vektor-Daten.....	117
6.5.4	<i>Darstellung des Ergebnisses</i> .....	119
<b>7</b>	<b>Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung</b> .....	<b>120</b>
<b>VI</b>	<b>AUSBLICK</b> .....	<b>125</b>
	<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>126</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>127</b>

# I Einführung in die Analyse von Laserscannerdaten

## 1 Methoden zur topographischen Geländeerfassung

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.

Die vermessungstechnische Erfassung der Geländeoberfläche wird mit den Methoden zur topographischen Geländeaufnahme durchgeführt. Die in der Praxis eingeführten und seit langem angewendeten Methoden sind die *Tachymetrie* und die *Luftbildphotogrammetrie*. Bei der Tachymetrie, also der terrestrischen Aufnahme, werden die Messungen direkt am Objekt, also unmittelbar an der Geländeoberfläche vorgenommen. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist so hoch, dass die Messungen für die Anwendungen im allgemeinen als *fehlerfrei* betrachtet werden können (REISS 1985). Allerdings ist der personelle und zeitliche Aufwand erheblich, so dass diese Methode nur zur Aufnahme von kleinen Flächen eingesetzt wird. In vielen Fällen werden die Messungen durch diese Methode auch als Referenzwerte zur Genauigkeitsprüfung und –untersuchung betrachtet (REISS 1985, WILD 1983).

Bei den berührungslosen Vermessungsmethoden bieten sich photogrammetrische Verfahren — beispielsweise in weiten Bereichen der Messtechnik — als wirtschaftliche Alternative an. Die photogrammetrische Erfassung von Geländeoberflächen, sowohl an einem Stereoauswertegerät als auch durch automatische Bildzuordnungsverfahren, hat sich sehr schnell entwickelt. Die photogrammetrischen Messungen werden in Luftbildern durchgeführt. Dieses Verfahren eignet sich gut zur flächendeckenden Erfassung von Geländeoberflächen auch in unzugänglichen Gebieten.

Die photogrammetrische Erfassung einer dreidimensionalen Objektoberfläche kann im Prinzip völlig automatisch durch Bildzuordnungsverfahren und durch semiautomatische oder semimanuelle Messung erfolgen. Bei der semiautomatischen Geländeerfassung können die Messungen beispielsweise mit statischen Meßmarken (Gitterpunktmessung) oder mit dynamischen Meßmarken (Profilmessung) durchgeführt werden, wobei die Meßmarke von einem Motorantrieb kontinuierlich vorwärts bewegt und eine automatische Registrierung ausgelöst wird. Eine Alternative zur Profilmessung bei der photogrammetrischen Erfassung stellt die Messung von Punkten in Form eines regelmäßigen Gitters dar. Dadurch können Messungen von Geländekanten oder anderen geomorphologischen Informationen erfolgen. Solche geomorphologischen Informationen haben eine besondere Bedeutung für die Geländebeschreibung. Als geomorphologische Daten werden beispielsweise Strukturlinien (Kantenlinie, Tallinie und Gerippelinie usw.) verstanden. Allerdings können diese Daten im Prinzip aus den Massendaten extrahiert werden (FINSTERWALDER 1986, RIEGER 1992). Darauf soll im Rahmen dieser Arbeit als eine der wichtigsten Aufgaben weiter im Teil V eingegangen werden.

Die Bildzuordnungsverfahren bieten Möglichkeit zur automatischen Geländeerfassung. Die grauwertbasierten Bildzuordnungsverfahren sind gut für stetige Flächen geeignet. Die merkmalsbasierten Verfahren scheinen gegenüber den grauwertbasierten Ansätzen bei der Lokalisierung von Unstetigkeiten im Vorteil. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass der

Informationsgehalt der Bilder eine Extraktion von hinreichend dicht verteilten Merkmalen erlaubt (WEIDNER 1997). Andererseits sind die Begrenzungen des Einsatzes der photogrammetrischen Erfassung von Geländeoberflächen dort zu finden, wo keine Abbildung der Geländeoberfläche möglich ist, insbesondere in Waldgebieten, wo die Geländeoberfläche durch Vegetation, Bebauung oder durch andere für den DHM-Aufbau nicht relevante Objekte verdeckt ist (LINDENBERGER 1993).

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.

## 2 Funktionsweise existierender Laserscannersysteme

### 2.1 Prinzip der Laserscannermessung

Die Laserscannermessung ist ein Verfahren zur geometrischen Datenerfassung auf der Basis der Winkel- und Streckenmessungen. Für die topographische Geländeaufnahme wird flugzeuggestütztes Laserscanning eingesetzt. Ein optisches Signal wird vom Sender erzeugt. Dieses Signal wird von der Objektoberfläche zurückgestrahlt und auf die Empfangseinheit des Laserscannersystems abgebildet. Nach entsprechender Verstärkung des empfangenen Signals kann eine Auswerteeinheit die Laufzeit  $t$  zwischen dem ausgesandten und empfangenen Signal messen.

Das Prinzip der direkten Entfernungsmessung beruht darauf, dass sich kurzwellige elektromagnetische Strahlung in einem homogenen Medium mit konstanter Geschwindigkeit

$$C = \frac{C_0}{n} \quad (I.2-1)$$

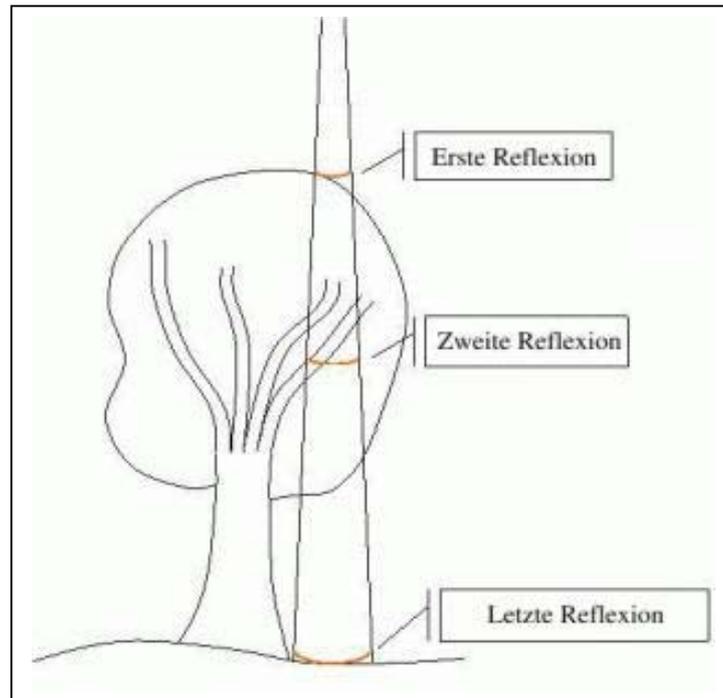
( $C_0$  Vakuumlichtgeschwindigkeit und  $n$  Brechungsindex des Mediums bedeutet)

geradlinig ausbreitet und an Grenzen zwischen verschiedenen Medien reflektiert wird. Die Laufzeit (Zeitdauer)  $t$ , um von einem Ausgangspunkt (Sensor oder Lasergerät) im Medium zur Grenzschicht (Erdoberfläche oder Objekt auf der Erdoberfläche) und von dort zurück zum Ausgangspunkt zu gelangen, ist proportional zur doppelten Entfernung  $R$  zwischen dem Ausgangspunkt und der Grenzschicht:

$$R = \frac{C}{2} t \quad (I.2-2)$$

Die Winkelmessung wird durch ein eingesetztes Messgerät durchgeführt. Es wird hier nicht diskutiert, weil das nicht unsere Aufgabe ist.

Für die Erfassung der Geländeoberfläche ist die Atmosphäre das zu durchdringende Medium. Die Oberfläche der Erde bzw. deren Bedeckungen durch Vegetation oder Gebäude ist die Reflexionsschicht. Das nach der Reflexion an der Oberfläche vom Sensor erfaßte Signal ist das Empfangssignal. Es beinhaltet sämtliche entfernungsbezogene Einflüsse: Die Entfernung zwischen Sensor und Oberfläche und — im Falle der Mehrfachreflexion — auch die Höheninformation der Oberfläche. Die Abb.I.2.1 zeigt diesen Fall schematisch.



**Abb.I.2.1:** Schematische Darstellung der Mehrfachreflexion an einer Oberfläche

Gegenüber der Photogrammetrie zeichnet sich die Laserscannermessung durch ihre Anwendbarkeit in drei Bereichen aus, in denen photogrammetrische Messungen nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen durchführbar sind:

- *Waldgebiete, in denen durch Vegetation keine Sicht auf die Geländeoberfläche gegeben ist.*
- *Gebiete, wo wegen Mangel an Textur in den Luftbildern keine Stereomessung vorgenommen werden kann oder diese sehr erschwert ist (z.B. Sand- und Schneegebiet usw.).*
- *Küstengebiete, wo eine Aerotriangulation schwer durchführbar ist.*

Durch die vollständig digitale und aktuelle Datenerfassung und die damit ermöglichte vollautomatische Datenauswertung stellt die Laserscannermessung eine moderne Methode mit Zukunftsperspektive dar. Im Vergleich zu photogrammetrischen und tachymetrischen Methoden der topographischen Geländeaufnahme besitzt die Laserscannermessung schon vergleichbare Genauigkeit (FRIESS 1998, KRAUS u.a. 1997, FRITSCH u.a. 1994, ACKERMANN u.a. 1992).

Momentan existieren zwei häufig verwendete Arten von Laserscannersystemen: Das Abtasten in *Zick-Zack-Linie* oder in *Zeilen-Scan-Weise* mit Hilfe eines Glasfaserarrays. Die

wesentlichen Prinzipien der beiden Laserscannersysteme werden hier nur auf eine schematische Darstellung beschränkt. Einzelheiten und genaue Beschreibungen wurden in zahlreichen Veröffentlichungen vorgestellt (WEHR u.a. 1999, HUG 1996, LOHR 1998, LINDENBERGER 1993, FRIESS 1998).

## 2.2 Zick-Zack-Weise

Der Laserstrahl wird bei der Zick-Zack-Weise durch den Scanner quer zur Flugrichtung abgelenkt. Die Auflösung des Lasersignals am Boden (also der Leuchtfleck am Boden) hängt von der Flughöhe usw. ab. Die Abb.I.2.2 stellt den Vorgang der Relieferfassung dar. Die Abb.I.2.3 ist eine schematische Darstellung der unqualifizierten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche bei diesem Verfahren. Dadurch wird ein Geländestreifen entlang des Flugwegs in einer Zick-Zack-Linie abgetastet. Die Entfernung zur Erdoberfläche wird über Laufzeitmessung ermittelt. Die äußere Orientierung, d.h. die Position und die Lage des Sensors im Raum, errechnet sich aus GPS- und INS-Beobachtungen. Zusammen mit den Laserwinkelmessungen und Entfernungsmessungen läßt sich die Position für jeden Reflexionspunkt des Laserimpulses auf der Geländeoberfläche ableiten.

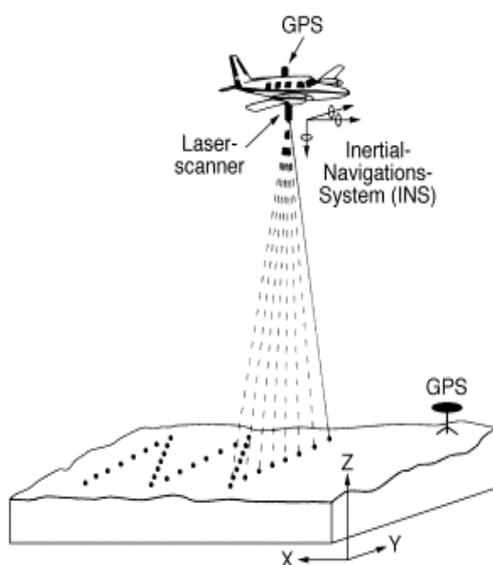


Abb.I.2.2: Laserscannersystem in Zick-Zack-Weise

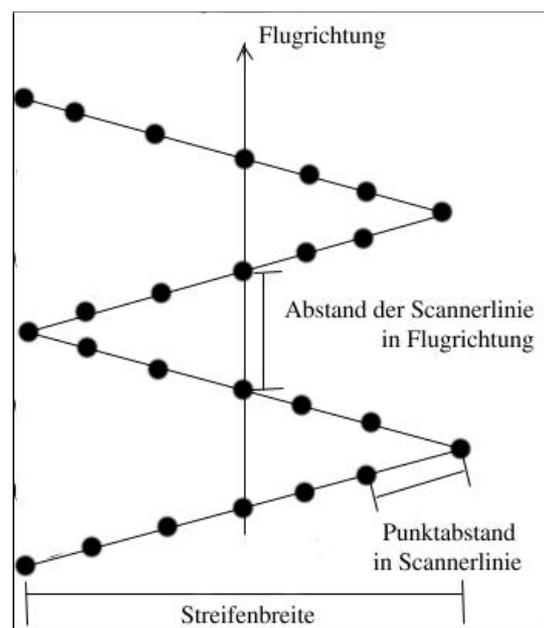
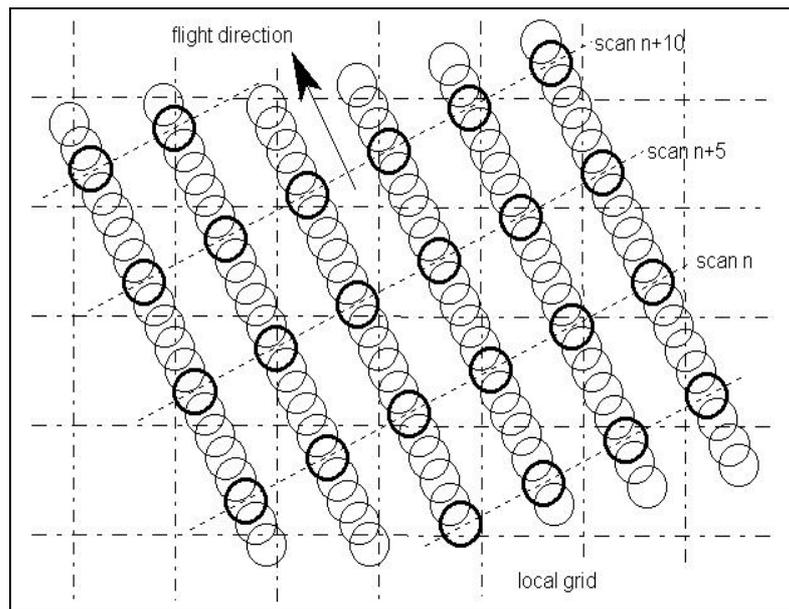


Abb.I.2.3 : Geländeerfassung in Zick-Zack-Weise

## 2.3 Zeilen-Scan-Weise

Ein anderes Laserscannersystem arbeitet nicht in Zick-Zack-Weise, sondern die Messung erfolgt durch einen Zeilen-Scan mit Hilfe eines Glasfaserarrays. Die Meßdatenerfassung erfolgt in parallelen Zeilen, wobei die Meßpunkte über die Geländeoberfläche verteilt sind. Eine genaue Beschreibung dieses Scannersystems ist auch bei WEHR u.a. (1999), HUG (1996), LOHR (1998) zu finden. Die Abb.I.2.4 stellt die Arbeitsweise von diesem Laserscannersystem dar.



**Abb.I.2.4 :** Geländeerfassung mit Zeilen-Scan-Weise (Quelle: Lohr 1998)

## 2.4 Überblick über existierende Laserscannersysteme

Die topographische Geländeaufnahme von Waldgebieten ist der Ausgangspunkt für die wissenschaftliche Beschäftigung mit Laserscanning. Der technische Aufbau von Laserscannern ist je nach Hersteller verschieden. Die gescannte Meßdichte am Boden eines Laserscannersystems ist ganz unterschiedlich, abhängig von der angewendeten *Scanweise*, der gewählten *Scanbreite*, *Flughöhe*, *Fluggeschwindigkeit* und von der *Geländeneigung*. Beispielsweise kann die Meßdichte von 0,04 bis 5 Meßpunkten pro  $m^2$  liegen (LOHR 1998).

Laserscannersysteme bieten meistens zwei unterschiedliche Methoden zur Datenerfassung: „*last pulse*“ und „*first pulse*“ Registrierung. Bei „*first pulse*“ Registrierung wird die erste Reflexion aufgezeichnet, bei „*last pulse*“ dagegen die letzte. Im Hinblick auf die verschiedenen Anwendungsgebiete eignet sich beispielsweise ein Laserscannersystem mit der last-pulse-Registrierungsweise für eine topographische Geländeaufnahme, wobei mehr Laserstrahlen trotz Vegetation oder Oberflächenbedeckung die Geländeoberfläche erreichen können, während ein System mit der first-pulse-Registrierungsweise für die Herstellung von 3D-Stadtmodellen günstiger ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt unterscheiden sich die verwendeten Systeme sowohl in den Systemkomponenten als auch in den zugrundeliegenden Aufgabenstellungen. Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen, die einen allgemeinen Überblick über existierende Laserscannersysteme beschreiben (PETZOLD et al. 1999, BLAIR et al. 1999, IRISH et al. 1999, ACKERMANN u.a. 1992, FRIESS 1998, HUG 1996, LINDENBERGER 1993, SAMBERG 1997, KOST u.a. 1997, LOHR 1998, HUISING u.a. 1998, MURAKAMI et al. 1998, FLOOD et al. 1997). Insbesondere können existierende Lasersysteme und Firmen bei BALTSAVIAS (1999b) gefunden werden, der eine Vielzahl der existierenden Laserscannersysteme auf der Welt bzw. ihre Systemparameter und Eigenschaften vorstellt.

### 3 Einführung in Digitale Bildverarbeitungsmethoden

Die Verfahren der *Digitalen Bildverarbeitung* erschließen aufgrund der immer leistungsfähiger werdenden Rechner immer neue Einsatzgebiete. Fast in allen Bereichen des täglichen Lebens werden wir direkt oder indirekt mit Verfahren oder Ergebnissen der Digitalen Bildverarbeitung konfrontiert, beispielsweise ein Fernsehgerät mit immer mehr eingebauten Bildverarbeitungsfunktionen (digitaler Filter, Farb- bzw. Grauwertkorrekturen, Bild im Bild usw.), die aufbereitete Wetterkarte von Satelliten oder die optische Überwachung von Szenen und die Analyse von Aufnahmen bis hin zu „sehenden“ Robotern.

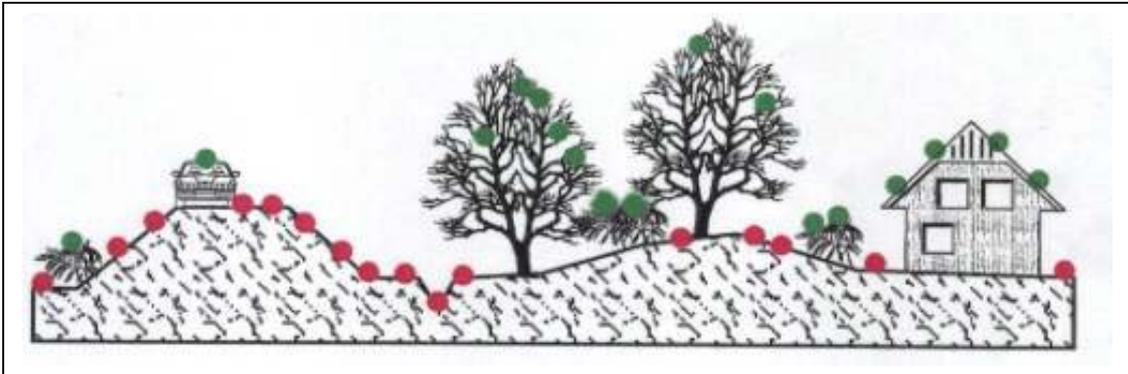
Die Anwendungsgebiete von Bildverarbeitungsmethoden werden seit Jahren von der traditionellen Bildfilterung und Bildverbesserung, Bildsegmentierung und Bildanalyse bis zum Bildverstehen erweitert. Auch in photogrammetrischen Gebieten, wie beispielsweise bei der Bildzuordnung (SCHENK 1996, FÖRSTNER 1991, SCHICKLER 1992), bei der Nahbereichsphotogrammetrie (ALBERTZ 1986), bei der Bildinterpretation und Bildverbesserung (ALBERTZ 1991, EHLERS u.a. 1982), bei dem DHM-Aufbau (AUMANN 1994, FRITSCH 1991, EBNER u.a. 1989, LINDER 1994) und bei der Architektur- und Mikrophotogrammetrie (RODEHORST 1997, WIEDEMANN 1997, HEMMLEB und ALBERTZ 1998) finden Digitale Bildverarbeitungsmethoden Anwendung. Auch in dieser Arbeit zur Auswertung und Analyse von Laserscannerdaten spielen sie eine wichtige Rolle.

Die mit Flugzeuglaserscannern gewonnenen digitalen Daten stellen zunächst unstrukturierte und unregelmäßig verteilte Punkthaufen dar, die einer intensiven Nachbearbeitung bedürfen. Zu diesem Zweck können die Originaldaten in *Höhenwerte* eines geordneten Digitalen Höhenmodells (DHM) durch Interpolation eines Rasters umgerechnet und als *Grauwerte* einer Bildmatrix interpretiert werden. Dann können zum *Erkennen* und zum *Trennen* von gemessenen Laserpunkten, für die *Gewinnung* und den *Aufbau* von Digitalen Höhenmodellen und zum *Auffinden* von Strukturlinien die für die Analyse von Bilddaten bekannten Algorithmen der Digitalen Bildverarbeitung herangezogen werden. 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 auf der Basis der Morphologie und der robusten Parameterschätzung gelöst werden. Für die Gewinnung von Digitalen Höhenmodellen sind die nicht auf der Geländeoberfläche liegenden Punkte (Dächer, Bäume, Fahrzeuge usw.) zu erkennen und zu eliminieren. Des Weiteren sollen morphologische Geländestrukturlinien möglichst automatisch gefunden und abgeleitet werden. Im Rahmen des Vorhabens sind die Möglichkeiten der Digitalen Bildverarbeitung zur Lösung dieses Problems zu erproben. Die Abb.I.3 zeigt die Verteilung der gemessenen Laserpunkte. Die Aufgabe der Punktfiltrierung liegt darin, die nicht auf der Geländeoberfläche liegenden Laserpunkte zu erkennen und zu eliminieren.

Beim Erkennen und Trennen der Bodenpunkte von den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Punkten werden Filterungsalgorithmen untersucht, getestet und entwickelt, die auf Bildverarbeitungsmethoden basieren. Bei der Extraktion von Strukturlinien werden beispielsweise verschiedene Bildverarbeitungsmethoden untersucht. So werden Geländebruchkanten als Bildkanten betrachtet und behandelt.

Die Grenze bei der Extraktion von Strukturlinien liegt darin, dass die Punktdichte am Boden manchmal nicht sehr hoch ist. Dies führt natürlich zu einer geringeren Zuverlässigkeit und

niedrigeren Genauigkeit. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Extraktion von Strukturlinien ist die Einführung der Bestimmung und Berechnung der Subpixelposition. Dies wird im Abschnitt V diskutiert. Ein optimaler Lösungsweg ist es, die Laserpunkte mit einer höheren Dichte zu messen.



**Abb.I.3:** Verteilung der gemessenen Laserpunkte (Schönemeier 1996)

## 4 Überblick der existierenden Auswertungsmethoden

### 4.1 Filterungsverfahren für Laserpunkte

Unter Auswertungsmethoden von Laserscannerdaten werden hier die Trennung bzw. Filterung der Bodenpunkte von den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Nichtbodenpunkten und die Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten verstanden. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über diese Thematik gegeben. In den kommenden Kapiteln III und V werden Verfahren zur mathematischen Auswertung von Laserscannerdaten (Filterung) und zur automatischen Extraktion von Strukturlinien (Kantenextraktion) behandelt.

Die existierenden Verfahren zur mathematischen Auswertung von Laserscannerdaten kann man in zwei Gruppen teilen. Die erste Idee geht davon aus, dass die gemessenen Laserpunkte bei der Filterungsbearbeitung zum Anfang mit gleich „genauen Beobachtungen“ eingeführt werden. Die Methoden ohne irgend eine Vorverarbeitung können hier auch als *direkte Bearbeitungsweise* bezeichnet werden. Eine solche direkte Methode wurde z.B. von VON HANSEN (1999) vorgestellt. Ein Laserpunkt wird dabei mit seinen Nachbarschaften verglichen und eine Höhendistanz (*vertikaler Abstand*) zu seinen Nachbarpunkten berechnet. Falls dieser Distanzwert einen vorgegebenen Schwellwert (*Pfeilhöhe*) überschreitet, wird der Laserpunkt als Nichtbodenpunkt identifiziert und gefiltert.

Ein anderes direktes Verfahren zur Auswertung von Laserpunkten liegt in der Einführung der Methode der kleinsten Quadrate, die in KRAUS (1997) und PFEIFER et al. (1998) vorgestellt und beschrieben wurde. Bei diesem Verfahren wird die Auswertung mit einer Ausgleichung verwirklicht, wobei man alle Laserpunkte bei der ersten Iteration der Ausgleichung als gleich genaue Beobachtungen betrachtet. Damit die „unten“ liegenden möglichen Bodenpunkte

einen größeren Einfluß auf die interpolierte Fläche ausüben als die „oben“ liegenden Nichtbodenpunkte, wird eine geeignete Gewichtsfunktion ausgewählt.

Neben diesen beiden *direkten* Bearbeitungsverfahren kommt die zweite Gruppe zur Auswertung von Laserpunkten in Betracht. Es sind sogenannte Verfahren mit *getrennter Bearbeitungsweise*. Bei diesen Verfahren wird die Auswertung in zwei Schritte eingeteilt. Als erster Schritt werden Näherungswerte von allen Laserpunkten mittels morphologischer Operatoren beschafft. Beim anschließenden zweiten Schritt wird dann die Geländeoberfläche mit Hilfe von unterschiedlichen Modellen modelliert. Je nach den ausgewählten Modellen zur Modellierung der Geländeoberfläche existieren unterschiedliche Modifizierungen, beispielsweise das Modell der autoregressiven Prozesse (*ARI-Prozesse: autoregressiver, integrierter Prozeß*) (LINDENBERGER 1993) oder die Modellierung der Geländeoberfläche durch einen *bikubischen Spline* (KILIAN et al. 1996, FRITSCH et al. 1994). Aufgrund der oben erwähnten Auswertungsideen und in Verbindung mit unserer zweiten Aufgabenstellung, also der Extraktion von Strukturlinien, wird die in zwei Bearbeitungsschritte eingeteilte Idee verfolgt.

## 4.2 Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien

Die Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten ist eine der zwei wichtigsten Aufgaben 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 Falllinien bzw. Tallinien und Bruchkanten. Über die Extraktion von Falllinien bzw. Tallinien gab es eine Vielzahl von Veröffentlichungen (KRAUS 1984, FINSTERWALDER 1986, RIEGER 1992, AUMANN 1994). Dabei können solche Forminformationen z. B. durch die Analyse von Tangentialebenen, die Krümmungsberechnung oder Summationsverfahren extrahiert werden.

Die Kantendetektion in Luftbildern hat eine lange Geschichte und in diesem Gebiet sind zahlreiche Verfahren zu finden. Die Kantendetektion mit Luftbildern kann man in Standardverfahren und statistische Verfahren einteilen (FUCHS 1998). Bei Standardverfahren zur Kantendetektion, z. B. LoG-, DoG-, Sobel-Operator oder Canny-Verfahren usw., werden die Kantenstärke, Lokalisation und die erste bzw. zweite Ableitung bestimmt und berechnet. Bei statistischen Verfahren wird dagegen die Wahrscheinlichkeits- oder Energieoptimierung betrachtet. Solche Verfahren sind meistens die globalen Detektionsverfahren. Speziell wird das Canny-Verfahren bei der Extraktion von Strukturlinien mit DHM-Daten untersucht.

Die anderen Verfahren zur Kantendetektion basieren auf den Grundlagen der Differentialgeometrie. Die Differentialgeometrie befaßt sich mit lokalen Eigenschaften von Kurven und Flächen, die mit der Flächenkrümmung im Krümmungsraum beschrieben werden können (JIANG u.a. 1997, WEIDNER 1995). Strukturlinien kennzeichnen eine größere Flächenkrümmung auf der Geländeoberfläche (WILD 1983, BILL 1999). Deshalb können Strukturlinien möglicherweise durch die Analyse der Flächenkrümmung detektiert werden.

## 5 Aufgabenstellung

Mit einem Laserscannersystem, bestehend aus *GPS* (Global Positioning System) zur Sensorpositionierung, *INS* (Inertial Navigation System) zur Sensororientierung und einem *Laserdistanzmesser* zur Messung der Geländehöhen, wird die direkte Erfassung von Punkten der topographischen Geländeoberfläche ermöglicht. Mittlerweile ist das Laserscannersystem über seine ursprüngliche Zielsetzung weit hinausgegangen. Die Anwendungsbereiche dieses Systems beschränken sich nicht mehr auf die traditionelle topographische Geländeaufnahme. Laserscannerdaten werden beispielsweise für die Bestimmung des Waldgebietsbereiches und der Baumhöhe, den Küstenschutz, die Erfassung von Überschwemmungsgebieten, den Hochwasserschutz, die Erfassung von Erosionsbereichen und den Lawinenschutz, die Ermittlung Digitaler Stadtmodelle usw. eingesetzt (BLAIR et al. 1999, NÆSSET 1998, FLUCH et al. 1997, FRIESS 1998, HAHN 1999, IRISH et al. 1999, RITCHIE et al. 1994). Neben diesen Anwendungsbereichen, bei denen die Laserscannermessung direkt genutzt wird, ist eine Integration der Daten in GIS denkbar.

Der Anwendungsbereich der Laserscannermessung wird in dieser Arbeit auf die topographische Geländeaufnahme beschränkt. Das Ergebnis einer Befliegung ist zunächst ein unstrukturierter und unregelmäßig verteilter Punkthaufen. 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, speziell Canny-Operator und Modelle des Krümmungsraums, zur Extraktion von Strukturlinien verwendet. Zur Verwirklichung der Zielsetzung können einzelne Teilaufgaben wie folgt formuliert werden:

### 1. Systemvorstellung

Bei der Vorstellung eines Laserscannersystems in Teil II werden zunächst Eigenschaften von Lasersensoren und Komponenten eines Laserscannersystems kurz erläutert. Weil eine Lasermessung ein Entfernungssignal und Winkelsignal darstellt, müssen alle aufgezeichneten Daten zusammen mit GPS- und INS-Daten vorbearbeitet werden. Dann werden die Koordinaten der Laserpunkte durch eine Reihe von Koordinatentransformationen berechnet.

### 2. Mathematische Morphologie zur Vorverarbeitung von Laserpunkten

Die gemessenen Laserpunkte enthalten damit die Punkte, die auf der topographisch aufzunehmenden Geländeoberfläche liegen und deshalb die Bodenpunkte genannt werden, darüber hinaus aber auch die auf den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Objekten (Vegetation, Gebäude, Fahrzeuge usw.) liegenden Punkte, die beispielsweise bei der Extraktion der Gebäude (HAALA 1996, WILBERT et al. 1998, HUG 1996) oder bei der Höhenmessung von Bäumen (NÆSSET 1998, RITCHIE et al. 1994) verwendet werden. Aus diesen Gründen ergibt sich als erste Aufgabe für die Auswertung von Laserscannerdaten eine Trennung der gewünschten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche von den nicht-relevanten Punkten. Diese Trennung entspricht im wesentlichen einem Filterungsprozeß. Diese Aufgabe muß entsprechend der vollständig digitalen Konzeption der Lasermessungen durch ein automatisch ablaufendes, digitales Verfahren gelöst werden. Zur Lösung dieser Aufgabe werden getrennte Verfahren angewendet und als Vorbearbeitungsphase werden die im Bildverarbeitungsbereich bekannten morphologischen Operatoren vorgestellt. Nach dieser Vorbearbeitungsphase werden Bodenpunkthypothesen und Nichtbodenpunkthypothesen ermittelt.

### **3. *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 dann identifizierte Bodenpunkte und übrige Nichtbodenpunkte. Die Bodenpunkte werden dann für den DHM-Aufbau verwendet.

### **4. *DHM- und Grauwertinterpolation***

In Bezug auf die Interpolation von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden sind zwei Teilaufgaben zu lösen. Zum einen 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 Grauwertinterpolation bei der Umrechnung von DHM-Daten in ein Grauwertbild, um dann mit Hilfe von digitalen Bildverarbeitungsmethoden Strukturlinien aus allgemeinen DHM-Daten zu extrahieren.

### **5. *Extraktion von Strukturlinien***

Strukturlinien (Bruchkante, Abflußlinie, Tallinie und Fallinie oder Gerippelinie) spielen eine wichtige Rolle beim Aufbau von präzisen Höhenmodellen. Um solche Strukturlinien aus den DHM-Daten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden zu extrahieren, müssen zunächst die unregelmäßig verteilten Punkte interpoliert werden. Durch die Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden werden dann 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.

Anhand von empirischen Untersuchungen mit verschiedenen Testgebieten werden schließlich die Untersuchungsergebnisse in unterschiedlichen Formen visualisiert und überprüft.

## **6 Inhaltsüberblick**

Zur Bearbeitung der oben erwähnten und definierten Aufgaben wird die Arbeit wie folgt untergliedert:

In Teil II werden die Komponenten eines Laserscannersystems und die Vorverarbeitung der Lasermessungen vorgestellt. Die Lasermessungen bedeuten hier Entfernungsdaten, GPS- und INS-Daten. Unter der Vorverarbeitung werden hier die kombinierte Berechnung mit GPS- und INS-Daten sowie Entfernungsdaten und Koordinatentransformationen von verschiedenen Koordinatensystemen verstanden. Weil dies nicht unsere Hauptarbeit ist und diese Arbeit sehr stark von der gewählten Systemkonfiguration abhängig ist, werden sie hier nur kurz vorgestellt.

Der Teil III beschäftigt sich mit der mathematischen Auswertung von Laserscannerdaten. In diesem Teil werden zunächst die morphologischen Operatoren vorgestellt. Danach werden robuste Schätzmodelle bei der Weiterbearbeitung von Laserpunkten beschrieben. Ziel dieses

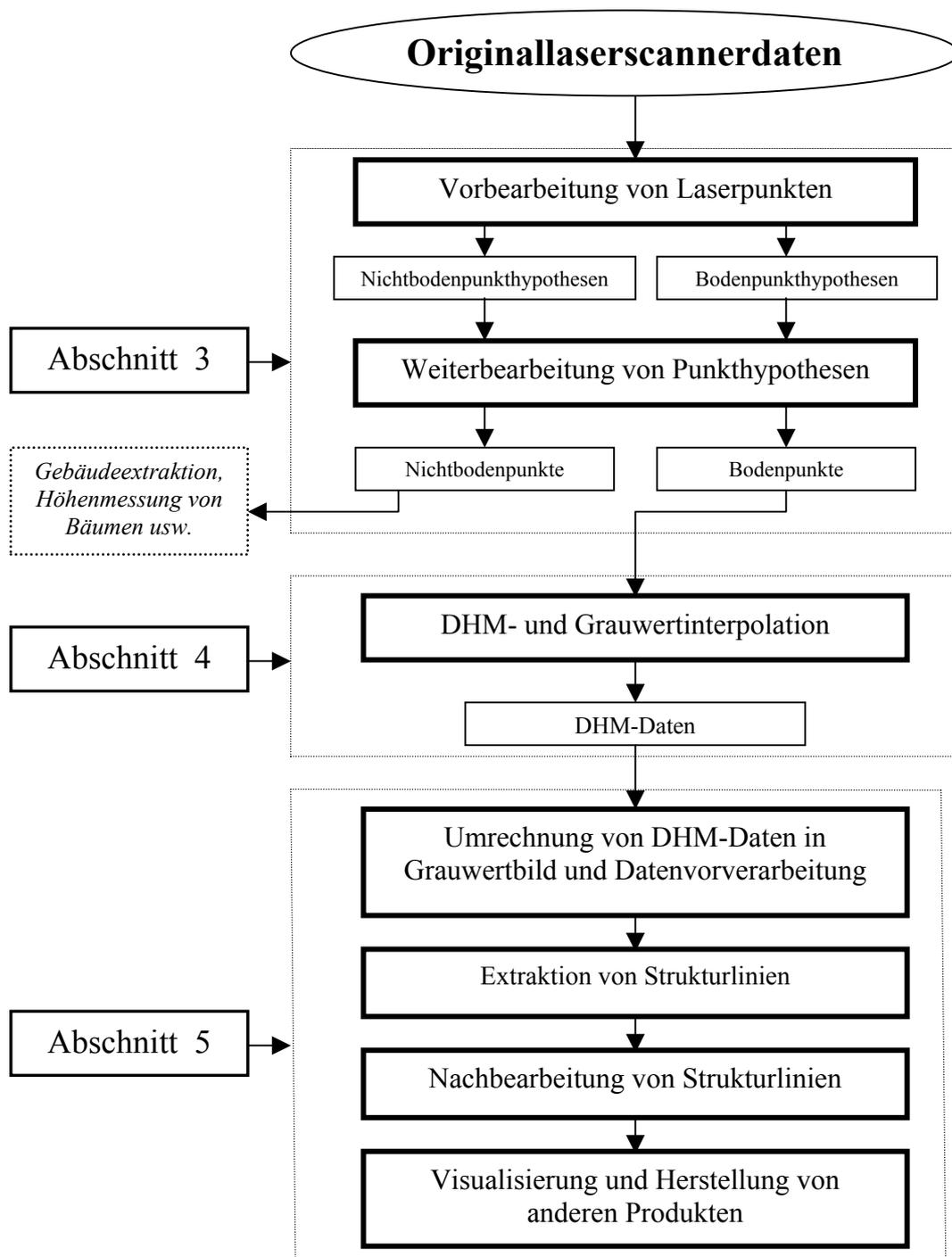
Abschnittes ist die Bearbeitung der gemessenen Laserpunkte bis zu ihrer Einführung in ein Digitales Höhenmodell im anschließenden Teil IV.

In Teil IV werden die allgemeinen Verfahren zum DHM-Aufbau vorgestellt. Dazu gehören die Grauwert- und DHM-Interpolation sowie die Herstellung und Visualisierung von Höhenlinien.

Der Teil V beschäftigt sich dann mit der Extraktion von Strukturlinien. Digitale Bildverarbeitungsmethoden liefern eine Möglichkeit zur Lösung dieser Aufgabenstellung. Die Suche nach einem geeigneten Operator zur Kantenextraktion aus DHM-Daten steht im Mittelpunkt der Ausführung dieses Teiles.

In allen beschriebenen Teilen werden die Ergebnisse zusammengefaßt und durch verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten dargestellt.

Die Abb.I.4 zeigt den Ablauf der durchzuführenden Aufgabenstellungen.



**Abb.I.4:** Ablauf der durchzuführenden Aufgabenstellungen

## II Laserscannersysteme und die Vorverarbeitung ihrer Messdaten

### 1 Eigenschaften von Lasersensoren

Die physikalischen Eigenschaften des Laserlichts unterscheiden sich wesentlich von konventionellen Lichtquellen. Die auf dem Markt angebotenen oder in der Entwicklung befindlichen Lasersensoren können in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Eine Unterscheidung kann bezüglich des Meßprinzips in *CW (Continuous Wave)* und *gepulste Laser* vorgenommen werden.

Die gepulsten Laser bieten die Möglichkeit, die erste oder letzte Reflexion des ausgesandten Signals zu messen. Bei einer Messung in Waldgebieten können Teile des ausgesandten Laserstrahls durch Lücken bis auf den Boden durchdringen und von dort reflektiert werden. Andere Teile des Laserstrahls werden aber bereits im Laubwerk reflektiert, und es ist auch möglich, dass überhaupt kein Anteil des Strahls die Erdoberfläche erreicht. Bei der Messung der letzten Reflexion des Laserstrahls können somit in Waldgebieten der tiefste gemessene Punkt und ein potentieller Bodenpunkt erfaßt werden. Unter der Vegetation in den dichten Waldgebieten können für einen einzelnen Laserimpuls mehrere Reflexionen beobachtet werden. Ein Teil der ausgesandten Laserstrahlen kann innerhalb der Vegetation, ein anderer eventuell auf der Geländeoberfläche reflektiert werden (Abb.I.2.1). Das Lasersystem kann diese Mehrfachreflexionen unterscheiden und nach Wunsch bzw. nach Wahl die erste oder die letzte Reflexion aufzeichnen. Durch die Registrierung von „ersten und letzten Reflexionen“ ist dieses gepulste Laserscannersystem vorteilhaft geeignet für die topographische Geländeaufnahme (FRITSCH 1999, KILIAN u.a. 1994). Diese Eigenschaft und Fähigkeit ermöglicht die Erfassung des Bodens in Waldgebieten.

Beim CW-Lasersystem liegt dieses Messungsprinzip nicht vor. Das CW-Laserscannersystem bezeichnet man in manchen Fällen auch als Phasendifferenzmessung (WEHR u.a. 1999). Bei diesem System wird anstelle des Pulses ein sinusförmiges Meßsignal gesendet und ein Scanspiegel um einen Winkel zur Rotationsachse montiert. Dieses Laserscannersystem ist besonders geeignet für den Einsatz bei der Erfassung von 3D-Stadtmodellen, weil es eine dichtere Punktverteilung am Boden als das gepulste System liefern kann (LOHR 1998).

Die Eigenschaften der einzelnen Komponenten GPS, INS und Laserentfernungsmesser bzw. ihre Verbindung und Synchronisation bestimmen die Eigenschaften und Genauigkeiten des gesamten Laserscannersystems. Von KATZENBEISSER u.a. (1996) wurden beide Systeme durch ihre Lasertypen, Meßverfahren, Meßgenauigkeit und Meßdauer verglichen. Eine kurze Beschreibung des Vergleichs von beiden Systemen ist auch bei WEHR u.a. (1999) zu finden. Dies wird hier nicht diskutiert, weil das nicht unsere Aufgabe ist.

Es gibt auch andere Eigenschaften der Lasersensoren, die sehr wichtig sind. Beispielsweise die *Intensität*, die *Wellenlänge* und die *Energie* des Laserstrahls, die *Reichweite* des Laserdistanzmessers, die *physikalische Stabilität* des gesamten Systems und schließlich auch die entsprechenden Meßparameter (z.B. *Scanwinkel*, *Scanfrequenz*, *Meßfrequenz* usw.). Alle Parameter sind in zahlreichen Veröffentlichungen zu finden (BALTSAVIAS 1999a und 1999b, IRISH et al. 1999, BLAIR et al. 1999, ACKERMANN u.a. 1992, KILIAN u.a. 1994, KATZENBEISSER u.a. 1996, HUG 1996).

## 2 Komponenten von Laserscannersystemen

### 2.1 Kombiniertes Laserscannersystem

Die Distanzmessung vom Flugzeug aus für topographische Anwendungen wird bei allen bekannt gewordenen und in der Praxis erprobten Systemen nach der Methode der 2-Wege-Laufzeitmessung durchgeführt. Gemessen wird die Zeit, die ein vom Lasersensor ausgesandter und vom Objekt zurückgestrahlter Lichtimpuls benötigt. Das gesamte System besteht aus *GPS*, *INS* und *Laserdistanzmesser*.

- **GPS**

GPS ist ein satellitengestütztes Positionsbestimmungs-, Navigations- und Zeitübertragungssystem. Dieses System kann einer unbegrenzten Zahl von Benutzern wetterunabhängig, zu jeder Zeit und weltweit hochgenaue dreidimensionale Positions- und Geschwindigkeitsinformationen liefern. Das gesamte System besteht aus drei Hauptkomponenten, namentlich dem Raumsegment (im Satelliten), dem Kontrollsegment (Bodenstation) und einem Benutzersegment (dem GPS-Empfänger).

- **INS**

INS ist ein inertiales Navigationssystem zur Neigungsbestimmung. Die Neigungsorientierung des Systems wird über eine Kombination von drei senkrecht zueinander angeordneten Kreiseln und Beschleunigungsmessern durch drei Winkelgrößen und Beschleunigungsparameter in drei Richtungen bestimmt.

- **Laserdistanzmesser**

Der Laserdistanzmesser ist ein Komplex, der aus mehreren Komponenten besteht. Ein Laserdistanzmesser kann in Sensoreinheit und Kontrolleinheit eingeteilt werden. Weitergehend kann eine Sensoreinheit noch in Sendeteil, Empfangsteil usw. unterteilt werden. Eine Kontrolleinheit läßt sich noch in Zeitintervallzähler, Mikroprozessor, Anzeige, Ausgabe usw. unterteilen.

### 2.2 Systemgenauigkeit

Die Entfernungsmessung mit Lasern beruht meistens auf einer Laufzeitmessung. Die Systemgenauigkeit kann auch in drei Teile eingeteilt werden, nämlich die Genauigkeit von GPS, INS und Laserdistanzmesser. Die Genauigkeit von einzelnen Komponenten und von ihrer Verbindung sowie ihrer Synchronisation bestimmen die gesamte Systemgenauigkeit.

Die relative kinematische Positionsbestimmung mit Trägerphasenbeobachtungen ist für Entfernungen bis ca. 45 km zwischen Referenzstationen in Zentimetergenauigkeit ( $\leq 3\text{ cm}$ ) und für Entfernung bis 150 km mit Dezimetergenauigkeit ( $\leq 2.5\text{ dm}$ ) möglich (LINDENBERGER 1993). Die Untersuchungen von FRIESS (1990) erbrachten eine Positionsgenauigkeit auch im Zentimeterbereich ( $\leq 4\text{ cm}$ ). Eine neuere Beschreibung über Genauigkeit von GPS/INS-System wurde beispielsweise bei WEWEL et al. (1998) vorgestellt.

Dort wurde bei den HRSC-Befliegungen ein GPS/INS-System (Modell POS/DG 310 mit IMU LR-86) angewendet. Die Genauigkeiten wurden mit  $\pm 20 \text{ cm}$  bei Flughöhe 1000m angegeben. Bei HUTTON et al. (1998) wurde die Genauigkeit zur Anwendung direkter Orientierungsdaten bei der Luftbildaufnahme vorgestellt. Es wurden Genauigkeiten von etwa 10 cm (rms) für die Position und 20" (rms) für die Orientierungswinkel im Projektionszentrum erreicht, wenn das Inertialmeßsystem als Primärsensor genutzt wurde. Dies ermöglicht die direkte Georeferenzierung aller Luftbilder — ohne Aerotriangulation — mit einer Genauigkeit von etwa 20 cm (rms) am Boden bei 1 km Flughöhe (HUTTON et al. 1998).

Die Neigungsorientierung wird durch drei Winkelgrößen angegeben, die die Orientierung des Flugzeuges gegenüber einem von den Flugbewegungen unabhängigen Koordinatensystem beschreiben. Bei Genauigkeitsanalysen werden deshalb die relative und absolute Genauigkeit unterschieden. Die relative Genauigkeit der INS-Neigungen kann sehr hoch angesetzt werden. Die absolute Genauigkeit ist dagegen schwer abzuschätzen. Zulässige Aussagen zur absoluten Genauigkeit beziehen sich auf die empirische Auswertung einer konkreten Messung und können nur nach unterschiedlichen Messungen abgeschätzt werden.

Die Meßgenauigkeit hängt nicht nur vom Meßverfahren und von der Genauigkeit der einzelnen Komponenten, sondern auch von der Oberfläche des zu vermessenden Objekts ab. Die Genauigkeit der Laserdistanzmessung und die gesamte Systemgenauigkeit sind beispielsweise auch von BALTSAVIAS (1999b), BALTSAVIAS (1999c), ACKERMANN u.a. (1992), WEHR u.a. (1999), HUG (1996), HARTL u.a. (1996), KILIAN u.a. (1994) detailliert beschrieben worden.

## 2.3 Ergebnis

Seit mehreren Jahren werden verschiedene Laserdistanzmesser von vielen Herstellerfirmen auf dem Markt angeboten. Die wesentlichen Kriterien werden angesprochen: hohe *Laserleistung*, um die Distanzmessung vom Flugzeug aus durchführen zu können, die *Fähigkeit* des Empfangsteils, um Mehrfachreflexionen an der Vegetation verarbeiten zu können, und die *Genauigkeit* der Lasermessung.

Neben der Genauigkeit ist die Reichweite der Laserdistanzmesser ein für die Anwendung wesentlicher Faktor. Die maximale Reichweite bestimmt in direkter Weise die Planung einer Laserscannerbefliegung. So muß bei geringer Reichweite und stark bewegtem Geländeverlauf die Flughöhe dem Gelände angepaßt werden.

Die Laserdistanzmessung liefert eine gemessene Distanz  $S_D$ , die zur Registrierung an den Bordcomputer des Laserscannersystems übergeben wird. In die Auswertung der Lasermessungen zur Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte geben die Meßgröße  $S_D$ , GPS-Daten, INS-Daten, Zeit usw. zusammen ein. Zur Berechnung der Laserpunkte müssen die Kalibrierungsparameter und systematischen Fehler bestimmt und berücksichtigt werden.

## **3 Vorverarbeitung der Meßdaten**

### **3.1 Datenerfassung**

Während des Aufnahmefluges werden nur die Rohdaten gesammelt und abgespeichert. Eine Verarbeitung oder Vorauswertung in Echtzeit ist aufgrund der Datenrate mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht immer möglich. Daher geschieht die Verarbeitung der Daten im „post-processing“ nach Beendigung des Aufnahmefluges (HUG 1996).

Die Datenerfassung schließt den variablen Drehwinkelwert des Ablenkspiegels, den Zeitwert eines hochgenauen Zeitgebers, den GPS-Zeitwert, die Navigationsdaten, den Meßwert des Lasermessers usw. ein.

### **3.2 Datentransformation**

Die Rohdaten beinhalten zunächst nur die Meßwerte des Lasermessers sowie Zeitmarken zur zeitlichen Synchronisation mit den Flugzeugpositionsdaten. Die Aufgabe der Datentransformation ist es, aus diesen Rohdaten und den Flugzeugpositionsdaten die geographische Position (geographische Länge, Breite, Höhe) zu bestimmen (HUG 1996). Dazu müssen zunächst Koordinatensysteme definiert werden.

### **3.3 Koordinatensystem**

Die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte erfolgt durch eine Reihe von Koordinatentransformationen, wodurch die gemessenen Laserstrecken in ein übergeordnetes, erdfestes Bezugssystem überführt werden.

Bevor die Berechnung der Laserpunktkoordinaten durchgeführt wird, sollen zunächst die einzelnen Koordinatensysteme definiert werden. Zur Auswertung einer Lasermessung werden zwei Gruppen von Koordinatensystemen herangezogen. Die bewegten Systeme sind mit dem Flugzeug verbunden und bewegen sich mit dem Flugzeug gegenüber der Erdoberfläche. Die andere Gruppe von Koordinatensystemen sind die sogenannten erdfesten Systeme. Die sind unabhängig von der Flugzeugbewegung. Von LINDENBERGER (1993) wurden fünf Koordinatensysteme eingeführt und definiert. Hier werden sie kurz mitgeteilt.

#### ***3.3.1 Laser-Koordinatensystem***

Das Laser-Koordinatensystem ist das Bezugssystem des Lasersensors. Sein Ursprung befindet sich im Nullpunkt des Laserdistanzmessers. Die genaue Beschreibung von diesem Koordinatensystem wird normalerweise von der Laserscanner-Firma vorgestellt.

#### ***3.3.2 Flugzeugfestes Koordinatensystem***

Das flugzeugfeste Koordinatensystem ist ein mit der Flugzeugstruktur fest verbundenes Koordinatensystem, das mit dem Flugzeug bewegt wird. Da alle im Flugzeug fest eingebauten

Meßinstrumente in diesem System ihre gegenseitige Position und Orientierung beibehalten, erhält das flugzeugfeste Koordinatensystem eine zentrale Bedeutung. Hier werden die Achsenrichtungen durch das eingebaute INS festgelegt. Die Neigungsmessungen beziehen sich auf das flugzeugfeste Koordinatensystem. Der Ursprung des Koordinatensystems wird in den Bezugspunkt der GPS-Messungen gelegt.

Bei LINDENBERGER (1993) wurden die Achsenrichtungen so definiert: die X-Achse ist die Flugrichtung, die dazu senkrecht stehende Y-Achse (Querachse) weist nach Steuerbord rechts und die Z-Achse zeigt in der normalen Fluglage nach unten in Richtung Erdoberfläche.

### **3.3.3 Lokales, astronomisches Horizontsystem**

Der Ursprung dieses Systems wird wie beim flugzeugfesten System in den Bezugspunkt der GPS-Messungen (GPS-Antenne) gelegt. Die Z-Achse weist nach unten. Die X-Achse zeigt nach Norden, die Y-Achse nach Osten.

### **3.3.4 World Geodetic System 1984 – WGS 84**

Das WGS 84 – Koordinatensystem ist ein erdfestes, rechtshändiges kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Massenzentrum der Erde.

### **3.3.5 Koordinatensystem der Landesvermessung**

Hierunter wird normalerweise das Gauß-Krüger-Koordinatensystem mit dem Bessel-Ellipsoid als Bezugsfläche verstanden. Für unsere Arbeit ist dieses System ein Basissystem. Die zu bearbeitenden Daten sind die (X, Y, Z)-Koordinaten.

Die Definition der Systeme, die Datenerfassung und die Datentransformation usw. beziehen sich auf die ausführenden Firmen. Die bei uns angewandten Daten sind die transformierten (X, Y, Z)-Koordinaten.

## **3.4 Systemkalibrierung**

Um ein hochgenaues Ergebnis zu erzielen, muß das Meßsystem vorher und nachher kalibriert werden. Schon eine Flugplanung muß mit den Erfordernissen der Systemkalibrierung abgestimmt werden. Weil ein Laserscannersystem aus mehreren Instrumenten besteht, ist die Kalibrierung der einzelnen Instrumente und des gesamten Systems besonders wichtig. Deshalb benötigen Laserscannersysteme eine individuelle Kalibrierung, das heißt die drei verwendeten Meßinstrumente (GPS, INS und Lasersensor) müssen individuell kalibriert werden, eine Kalibrierung der gegenseitigen Beziehungen der einzelnen Instrumente im Gesamtsystem, das heißt die Position und Orientierung des Lasersensors gegenüber dem flugzeugfesten Koordinatensystem (Exzentrizitätsparameter und Einbauwinkel des Lasers) müssen festgestellt werden. Ebenso ist eine Kalibrierung zur Korrektur systematischer Fehler des INS und GPS erforderlich.

Im Prinzip kann die Systemkalibrierung in direkter oder indirekter Weise durchgeführt werden. Bei der direkten Methode erfolgt die Kalibrierung durch direkte Messung der Kalibrierungsparameter. Bei dem indirekten Verfahren können Kalibrierungsparameter durch eine Ausgleichung über unabhängige Kontrollmessungen abgeschätzt werden. Eine detaillierte Beschreibung über die Systemkalibrierung kann bei LINDENBERGER (1993), HUG (1996) usw. gefunden werden.

### 3.5 Koordinatentransformation von Lasermessungen

Ausgehend von den im Abschnitt II.3.3 vorgestellten Koordinatensystemen und mit der Einführung der im Abschnitt II.3.4 erwähnten Kalibrierungsparameter werden folgende Koordinatentransformationen räumlich durchgeführt.

- *Vom Laser-Koordinatensystem zum flugzeugfesten Koordinatensystem*
- *Vom flugzeugfesten System zum lokalen, astronomischen System*
- *Vom lokalen, astronomischen System zum WGS 84*
- *Vom WGS 84 zum Koordinatensystem der Landesvermessung*

Diese Transformationen werden von den Firmen vor Auslieferung der Laserscannerdaten ausgeführt.

## 4 Verwendete Materialien

Das gesamte Befliegungsgebiet Müncheberg liegt ungefähr 50 km östlich von Berlin. Etwa 30% des ganzen Gebietes sind durch Wald bedeckt. Fast die ganze Stadt Müncheberg liegt im Befliegungsgebiet. Das Gebiet schließt mehrere Seen mit unterschiedlicher Größe und Wasserfläche, eine große Heide mit niedrigen Vegetationen und Rohr ein. Das Gebiet hat insgesamt eine Fläche von ca.  $64 \text{ km}^2$ . Die Daten enthalten 4240252 Punkte und der durchschnittliche Punktabstand ist ca. 4,0 Meter.

Um die entwickelten Verfahren und Programme in verschiedenen Gebieten mit unterschiedlichen Bedeckungen zu testen, werden vier Ausschnitte aus diesem Befliegungsgebiet ausgewählt. Die vier ausgewählten Testgebiete werden hier als **Müncheberg** (in der Nähe von Stadt Müncheberg), **Wald** (Das Gebiet wird meistens durch Wälder bedeckt), **Dorf** (darin liegt ein Dorf) und **Bahn** (ein Bahnhof liegt im Testgebiet). Die Abb.II.1 und Abb.II.2 stellen ein Satellitenbild und die topographische Karte des entsprechenden Gebietes dar. Die Abb.II.3 zeigt die Position dieser vier Testgebiete im gesamten Gebiet. Die Tabelle.II.1 stellt einige Daten der vier ausgewählten Testgebiete dar.

Die hier ausgewählten und erwähnten vier Testgebiete gelten nur für die mathematische Auswertung von Laserpunkten, also für Kapitel III. In Kapitel V werden andere Testdaten zur

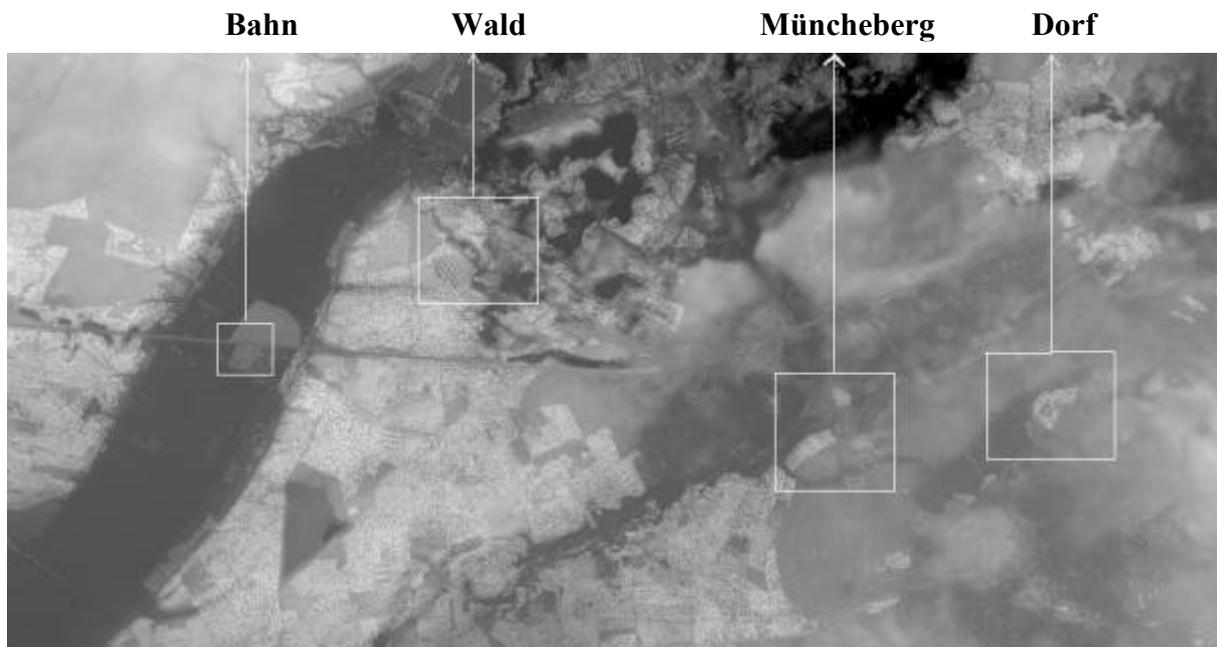
Extraktion von Strukturlinien eingeführt. Das Prinzip der Auswahl der Testgebiete in Kapitel III beruht darauf, dass unterschiedliche Bodenbedeckungen berücksichtigt werden.



**Abb. II.1:** Satellitenbild des gesamten Gebietes (Maßstab: ca. 1:50000)



**Abb. II.2:** Topographische Karte (Maßstab: ca. 1:50000)



**Abb.II.3:** Position der Testgebiete

	Testgebiet <b>Müncheberg</b>	Testgebiet <b>Wald</b>	Testgebiet <b>Dorf</b>	Testgebiet <b>Bahn</b>
Fläche X Y	1100 m 1100 m	1000 m 1000 m	1340 m 1030 m	500 m 500 m
Gemessene Punkte	75408	61301	85260	14805
Höhenunterschied	ca. 40 m	ca. 55 m	ca. 35 m	ca. 30 m
Durchschnittlicher Punktabstand	ca. 3,86 m	ca. 3,86 m	ca. 3,87 m	ca. 4,11 m
Bodenbedeckung	Gemischte Bedeckung durch Wälder, Häuser und einen kleinen See	Bedeckung durch Wälder, Vegetation und Böschung	Gemischte Bedeckung durch ein kleines Waldgebiet, einen kleinen See und Siedlung	Bahnhof und Böschungen

**Tabelle II.1:** Beschreibung der Untersuchungsgebiete

### **III Mathematische Auswertung von Laserscannerdaten**

#### **1 Einführung**

##### **1.1 Aufgabenstellung**

Die direkte Erfassung der topographischen Geländeoberfläche mit profilierenden Lasersensoren (LINDENBERGER 1993, ACKERMANN u.a. 1992) oder mit flächenhaft abtastenden Lasersensoren (BLAIR et al. 1999, IRISH et al. 1999, AXELSSON 1999, MURAKAMI et al. 1998, WEHR u.a. 1999, PETZOLD et al. 1999, PEREIRA et al. 1999, KILIAN u.a. 1994, FRITSCH u.a. 1994, KRAUS u.a. 1997 und PFEIFER u.a. 1998) hat in den vergangenen Jahren ihre Leistungsfähigkeit mehrfach unter Beweis gestellt. Diese Verfahren zur Erfassung der Geländehöhe können aus technischer Sicht als zukunftsorientiertes Vermessungsverfahren betrachtet werden.

Bei Lasermessungen und auch bei anderen automatisch ablaufenden Meßverfahren kann keine interaktiv vorgenommene Auswahl der zu messenden Punkte wie bei den herkömmlichen Verfahren der Tachymetrie erfolgen. Die gemessenen Laserpunkte enthalten somit Punkte, die auf der topographisch aufzunehmenden Geländeoberfläche liegen und Bodenpunkte genannt werden. Darüber hinaus existieren auch Punkte, die auf den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Objekten (Vegetation, Gebäude, Fahrzeugen usw.) liegen, die bei der Extraktion von Gebäuden (HAALA 1996, WILBERT et al. 1998, HUG 1996) oder bei der Höhenmessung von Bäumen (NÆSSET 1998, RITCHIE et al. 1994) verwendet werden können.

Aus dieser Tatsache ergibt sich als erste Aufgabe für die Auswertung von Laserscannerdaten eine Separation der gewünschten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche von den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Punkten. Diese Trennung entspricht im wesentlichen einem Filterungsprozeß.

Diese Aufgabe der Separation wird in zwei Schritte eingeteilt. Als erster Schritt wird die Geländeoberfläche durch mathematische Operatoren näherungsweise geschätzt. Die Ergebnisse sind die Näherungswerte von Bodenpunkten. Durch daran anschließende Parameterschätzung des zweiten Schrittes wird die Geländeoberfläche weiter modelliert. Die Ergebnisse der Parameterschätzung sind die selektierten Bodenpunkte. Diese Bodenpunkte werden dann in den DHM-Aufbau und in die Extraktion von Strukturlinien eingeführt.

##### **1.2 Überblick über Auswertungsmethoden**

Bei der DHM-Herstellung werden immer häufiger Laserscanningverfahren angewendet. Die Beschäftigung mit diesem neuen Verfahren hat im wesentlichen zwei Zielsetzungen. Zum einen soll in schwierigen Gebieten (z.B. Waldgebieten oder Küstengebieten), wo photogrammetrische Methoden problematisch sind, ein Verfahren entwickelt werden, das die unmittelbare Erfassung der Erdoberfläche gestattet. Zum anderen läßt sich durch die sich schnell entwickelnden digitalen Auswertungsmethoden ein beschleunigter Verfahrensablauf bei geringem Personaleinsatz und mit wenigem Kostenaufwand erzielen.

Zur DHM-Interpolation aus Laserscannerdaten werden nur die auf der Geländeoberfläche liegenden Meßpunkte einbezogen, hier *Bodenpunkte* genannt. Bodenpunkte können ausgehend von der Gesamtheit der gemessenen Laserpunkte durch mathematische Filterungsprozesse klassifiziert werden. Dadurch können weitestgehend alle Punkte, die auf der Vegetationsoberfläche oder auf Gebäuden liegen, ausgeschlossen werden.

Die existierenden Filterungsmethoden wurden im Abschnitt I.4.1 kurz vorgestellt und in direkte Verfahren und getrennte Verfahren eingeteilt. Die im folgenden Abschnitt III.1.2.2 beschriebenen Verfahren gehören zu den direkten Verfahren. In Abschnitt III.1.2.3 werden dann die getrennten Verfahren kurz erläutert.

### **1.2.1 Definition**

Als Vorbemerkung sollen zunächst einige fachliche Bezeichnungen begrifflich klargestellt und definiert werden, da sie Kategorien von gemessenen Punkten beschreiben und in den folgenden Kapiteln oft angewendet werden.

- **Laserpunkt**

Die Laserpunkte sind *alle* vom Laserscannersystem gemessenen Punkte. Der Laserpunkt schließt nicht nur die auf der Erdoberfläche, sondern auch die auf topographisch nicht relevanten Objekten (Vegetation, Bebauung, Fahrzeug usw.) liegenden Punkte ein.

- **Punkthypothesen**

Unter den wahrscheinlichen Punktarten (Punkthypothesen) werden zwei verschiedene Typen von Punkthypothesen verstanden. Die Punkte, die als mögliche Bodenpunkte bei der morphologischen Operation bearbeitet werden, werden hier als *Bodenpunkthypothesen* betrachtet. Die übrigen Punkte werden als *Nichtbodenpunkthypothesen* bezeichnet. Beide Punkttypen werden in ein robustes Schätzungsmodell mit unterschiedlichen Gewichten eingeführt und durch einen Hypothesentest behandelt.

- **Bodenpunkt**

Der Bodenpunkt gehört zur Menge der Laserpunkte. Er liegt auf der topographischen Erdoberfläche.

- **Nichtbodenpunkt**

Der Nichtbodenpunkt gehört auch zur Menge der Laserpunkte. Er liegt auf den topographisch nicht relevanten Objekten. Alle auf der Vegetation, der Bebauung oder auf dem Fahrzeug usw. liegenden Punkte werden hier als Nichtbodenpunkte bezeichnet.

### **1.2.2 Direkte Verfahren**

Von VON HANSEN (1999) wurden zwei Ansätze zur Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen vorgestellt. Zum einen ist es das Verfahren des *gleitenden Minimums* sowie zum anderen das Verfahren der *konvex-konkaven Hülle*. Ausgangspunkt beider Ansätze ist ein regelmäßiges Höhenraster, das aus den Original-Laserdaten abgeleitet wurde. Das heißt, die Originaldaten müssen vor der Durchführung beider Filterungsverfahren in ein regelmäßiges Höhenraster interpoliert werden. Die Grundidee dieser beiden Verfahren besteht in der Suche nach den tiefstgelegenen Punkten

(Minimalwerte) in einem *lokalen* Bereich der Höhenmatrix. Diese Minimalsuche wird in einem quadratischen Ausschnitt systematisch über die gesamte Höhenmatrix verschoben. Durch die Minimalsuche wird ein Minimalhöhenwert bestimmt. Beim Verfahren des gleitenden Minimums wurde eine Kantenlänge als einziger Parameter eingeführt. Beim HANSEN-Verfahren der konvex-konkaven Hülle wurde eine geringste Pfeilhöhe innerhalb eines betrachteten Dreiecks berechnet. Mit Hilfe dieser Pfeilhöhe läßt sich ein Punkt mit dem geringsten vertikalen Abstand extrahieren.

Das zweite Auswertungsverfahren mit dieser direkten Bearbeitungsweise basiert auf der *Methode der kleinsten Quadrate*, indem alle Laserpunkte zusammen in die Auswertung eingeführt werden (KRAUS 1997, PFEIFER et al. 1998). Bei diesem Verfahren beginnt die Bearbeitung mit einer Ausgleichung, wobei man von gleich genauen Beobachtungen ausgeht. Es wurde dabei vorgeschlagen, dass die „*unten*“ liegenden originalen Laserpunkte einen größeren Einfluß auf die zu interpolierende Fläche ausübt als die „*oben*“ liegenden Punkte. Der Einfluß wurde durch die Auswahl einer geeigneten Gewichtsfunktion verwirklicht. Die Lösung dieser Aufgabe erfolgte iterativ. Am Anfang der Ausgleichung wurden alle Laserpunkte gleich genau angenommen. Anschließend bekam für eine zweite Iteration der Ausgleichung jede Beobachtung ein Gewicht  $W_i$ . Dieser Gewichtswert  $W_i$  wurde im wesentlichen umgekehrt proportional zum Absolutbetrag der Verbesserung  $V_i$  aus der ersten Ausgleichung angesetzt. Anstelle einer symmetrischen Gewichtsfunktion (III.1-1)

$$W_i = \frac{1}{1 + (a |v_i|)^b} \quad a, b > 0 \quad (\text{III.1-1})$$

bei der Ausgleichung wurde eine asymmetrische Gewichtsfunktion (III.1-2) bei der Bearbeitung von Laserscannerdaten verwendet:

$$W_i = \frac{1}{1 + (a |v_i - g|)^b} \quad a, b > 0 \quad (\text{III.1-2})$$

Dabei ergab sich der geschätzte Wert  $h$  an der beliebig gewählten Schätzungsstelle  $P$  aus den  $n$  Stützpunkten  $P_i$  wie folgt:

$$h = [C(pp_1), C(pp_2), \dots, C(pp_n)] \begin{bmatrix} V_{ZZ} & C(p_1p_2) & C(p_1p_3) & \dots & C(p_1p_n) \\ & V_{ZZ} & C(p_2p_3) & \dots & C(p_2p_n) \\ & & \dots & & \dots \\ & & & & V_{ZZ} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.1-3})$$

Der Verschiebungsparameter  $g$  in der Gleichung (III.1-2) sorgte dafür, dass Bodenpunkte mit ihren negativen Verbesserungen nach der ersten Prädiktion große Gewichte  $W_i$  und Vegetationspunkte mit ihren möglichen positiven Verbesserungen nach der ersten Prädiktion kleine Gewichte  $W_i$  erhalten. Die genaue Beschreibung der Bestimmung und Berechnung des Verschiebungsparameters  $g$  und der anderen zwei Parameter  $a, b$  wurden zum Beispiel von

KRAUS (1997) und PFEIFER u.a. (1998) vorgestellt. Ergebnisse mit diesem Verfahren können auch dort gefunden werden.

### **1.2.3 Getrennte Verfahren**

Die oben vorgestellten zwei Verfahren gehören zur ersten Gruppe der Auswertungsmethoden. Dabei werden alle Laserpunkte in einem Bearbeitungsschritt behandelt. Neben den erwähnten beiden Methoden wurde eine andere Idee untersucht und angewendet. Diese Idee kann bei KILIAN et al. (1996), FRITSCH et al. (1994), LINDENBERGER (1993) nachgelesen werden. Dabei wurde die Auswertung von Laserpunkten in zwei Schritte eingeteilt. Beim ersten Schritt wurden Näherungswerte von Laserpunkten beschafft. Danach wurde die Geländeoberfläche durch unterschiedliche Modelle geschätzt und modelliert.

Die Beschaffung von Näherungswerten für die Geländeoberfläche ist ein notwendiger Schritt des Verfahrens. Dabei wurden alle Laserpunkte durch einen morphologischen Opening-Operator bearbeitet. Bei der Durchführung dieser Operation wurden eine Bandbreite und ein Filterfenster ausgewählt. Punkte, die auf der unteren Umhüllenden liegen, wurden als Näherungswerte der Bodenpunkte identifiziert.

Bei der Modellierung der Geländeoberfläche wurden alle beobachteten Laserpunkte eingeführt. Diese Punkte hatten in Abhängigkeit des vorherigen Schrittes der morphologischen Operation unterschiedliche Gewichte. Als Modell zu diesem Zweck der Modellierung der Geländeoberfläche wird ein bikubischer Spline verwendet (KILIAN et al. 1996, FRITSCH et al. 1994). Von LINDENBERGER (1993) wurde ein anderes Verfahren der Modellierung der Geländeoberfläche bei der Auswertung der Laserprofilmessung vorgeschlagen. Nach der Beschaffung von Näherungswerten wurde das Geländeprofil modelliert, wobei anstelle eines bikubischen Spline zur Modellierung dort das Geländeprofil mit einem autoregressiven Prozeß (ARI-Prozeß: autorergressiver, integrierter Prozeß) geschätzt wurde.

### **1.2.4 Verwendetes Verfahren**

Die Auswertung von flächenhaften Laserscannerdaten wird in der Arbeit ebenfalls in zwei Schritte eingeteilt. Im ersten Schritt wird ein *zweidimensionaler morphologischer Operator* mit variabler Fenstergröße angewendet. Dadurch werden *Punkthypothesen* erhalten. Danach kann die Geländeoberfläche durch verschiedene Methoden beschrieben und geschätzt werden. In Bezug auf unsere nächste Aufgabe der Extraktion von Strukturlinien ist es wichtig, Kanten und mögliche Strukturen bei der Filterung und der Modellierung der Geländeoberfläche auch möglichst unverändert erhalten zu können. Aus diesen Überlegungen werden in der Arbeit bei der Modellierung der Geländeoberfläche die robusten Schätzungsmodelle verwendet.

## **1.3 Überblick über Teil III**

Im folgenden Abschnitt III.2 werden zunächst einige *Operatoren* aus der Theorie der *mathematischen Morphologie* herangezogen, die sich durch ihre Robustheit auszeichnen und in der Bildverarbeitung insbesondere in der Bearbeitung von Binärbildern viel verwendet werden. Da in Waldgebieten in der Regel nur ein kleiner Teil der Laserpunkte auf der

Geländeoberfläche liegt, sich dagegen der größere Teil der Laserpunkte auf die Vegetation bezieht, würde ein Ansatz in der Modellierung des Geländeprofiles mit Originallaserpunkten versagen (LINDENBERGER 1993). Um dies möglichst zu vermeiden, wird hier zunächst eine morphologische Operation bei der Auswertung der Laserpunkte durchgeführt, damit Näherungswerte von Bodenpunkten geschaffen werden können. Mit dieser *Vorbearbeitung* können *Bodenpunkthypothesen* und *Nichtbodenpunkthypothesen* ermittelt werden. Diese beiden Teile von Punkthypothesen werden in eine anschließende Weiterbearbeitung, also in robuste Parameterschätzung des Abschnittes III.3 eingeführt.

Im Abschnitt III.3 werden verschiedene Modelle zur Modellierung der Geländeoberfläche entwickelt. Diese Modelle werden aus der Theorie der *robusten Parameterschätzung* abgeleitet.

Der daran anschließende Abschnitt III.4 beschäftigt sich mit der Darstellung und einer kurzen Analyse von Ergebnissen.

Der abschließende Abschnitt III.5 befaßt sich mit der Genauigkeitsbeschreibung von Laserscannerdaten. Es geht hier nicht um die Genauigkeitsuntersuchungen eines Lasersystems. Auf die Genauigkeit von gemessenen Laserpunkten wird wegen Mangel an günstigen Kontrolldaten auch nicht eingegangen. In diesem Abschnitt werden die Genauigkeitsangaben aus anderen Veröffentlichungen betrachtet und eigene Ergebnisse kurz analysiert.

## **2 Vorverarbeitung mittels Mathematischer Morphologie**

### **2.1 Vorbemerkung**

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 wurde 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.

### **2.2 Mathematisch morphologische Operatoren**

#### **2.2.1 Basisoperatoren**

Sei  $G$  eine Menge von Bildpunkten (Objekten),  $g(\vec{z})$  eine zweite Punktmenge (sie wird auch *Strukturelement* genannt; bei der *zweidimensionalen* Darstellung der Arbeit wird sie als

*Strukturfenster* bezeichnet) und  $f(\vec{x})$  ein Objekt (Bild). Dann werden die beiden Basisoperatoren der mathematischen Morphologie, also *Dilatation* und *Erosion* wie folgt definiert.

- **Dilatation**  $\oplus$

Die *Dilatation* eines Objektes (Bildes)  $f(\vec{x})$  durch das *Strukturelement* (*Strukturfenster*)  $g(\vec{z})$  wird definiert durch:

$$(f \oplus g) = \max_{\vec{x} \in G} \left\{ f(\vec{x} - \vec{z}) + g(\vec{z}) \right\} \quad (\text{III.2-1})$$

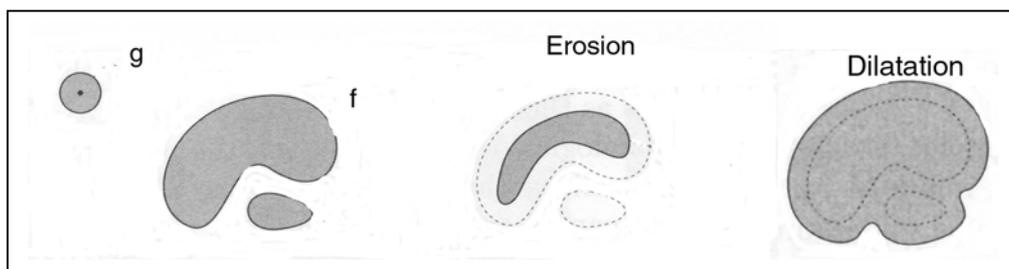
- **Erosion**  $\ominus$

Die *Erosion* eines Objektes (Bildes)  $f(\vec{x})$  durch das *Strukturelement* (*Strukturfenster*)  $g(\vec{z})$  wird definiert durch:

$$(f \ominus g) = \min_{\vec{x} \in G} \left\{ f(\vec{x} + \vec{z}) - g(\vec{z}) \right\} \quad (\text{III.2-2})$$

Das in der Binärbildverarbeitung verwendete sogenannte *Strukturelement* wird hier durch eine *strukturierende Funktion*  $g(\vec{z})$  ersetzt. Im Falle der zweidimensionalen Operation wird der Begriff *Strukturelement* durch das *Strukturfenster* ersetzt.

Die Abb.III.2.0a zeigt ein einfaches Beispiel der beiden Basisoperatoren Dilatation und Erosion mit einem Bild.



**Abb. III.2.0a:** Erosion und Dilatation (Quelle: Soille 1999)

### 2.2.2 Kombinierte Operatoren

Aus den oben erwähnten beiden Grundoperatoren 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:

$$(f \circ g) = (f \ominus g) \oplus g \quad (\text{III.2-3})$$

Einfach zu verstehen ist, dass Opening eines Objektes zunächst durch eine Erosion und danach dieses erodierte Objekt durch eine Dilatation bearbeitet wird.

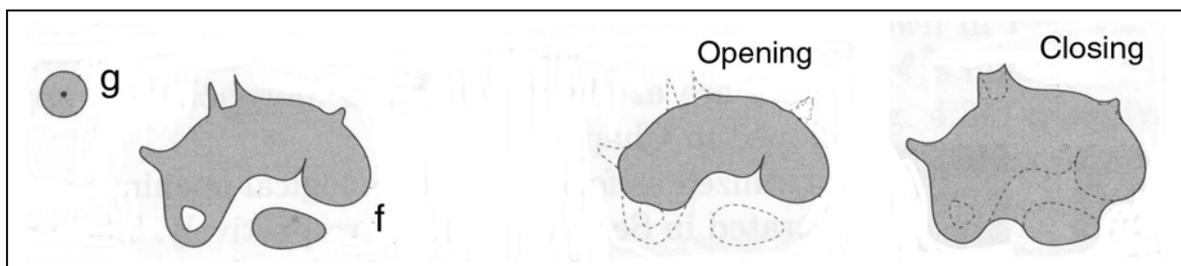
- **Closing** •

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:

$$(f \bullet g) = (f \oplus g) \ominus g \quad (\text{III.2-4})$$

Einfach zu verstehen ist, dass Closing eines Objektes zunächst durch eine Dilatation und danach dieses dilatierte Objekt durch eine Erosion bearbeitet wird.

Diese sehr sprechenden Bezeichnung für die beiden kombinierten Operatoren werden mit einem Beispiel (Abb.III.2.0b) illustriert. Opening bewirkt ein Aufbrechen von Regionen an den Stellen, wo nur ein schwacher Zusammenhang gegeben ist. Closing schließt kleine Zwischenräume und reduziert die neue Form in etwa auf die ursprüngliche Ausdehnung (PINZ 1994).



**Abb. III.2.0b:** Opening und Closing (Quelle: SOILLE 1999 )

Die Abb.III.2.0c(a) zeigt ein Simulationsprofil mit einer kontinuierlichen Funktion. Die Abb.III.2.0c(b) stellt eine Opening-Operation mit einer Kugel als Strukturelement dar. Die Abb.III.2.0c(c) zeigt das Ergebnis nach dieser Operation. Die Abb.III.2.0c(d) und Abb.III.2.0c(e) stellen die Closing-Operation dar. Mit diesen Abbildungen kann man den Effekt des Aufbrechens von Regionen und des Schließens der kleinen Zwischenräume von beiden Operatoren besser verstehen (GONZALEZ et al. 1992).

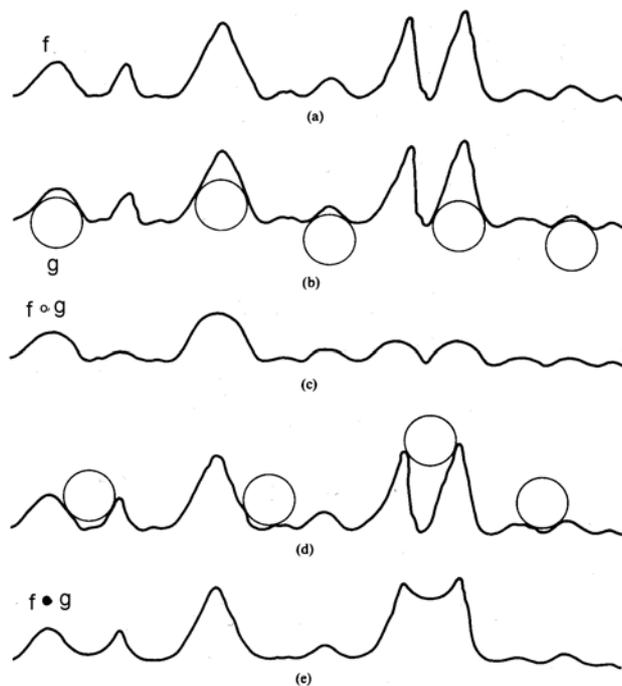


Abb. III.2.0c: Profildarstellung von Opening und Closing (Quelle: GONZALEZ 1992 )

## 2.3 Verwirklichung der morphologischen Operation

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.

### 2.3.1 Konventionelle Methodik

Die Durchführung der morphologischen Operation für die Bearbeitung von flächenhaften Laserscannerdaten kann durch ein Beispiel veranschaulicht werden. Am Beispiel eines in Laserpunkten enthaltenen Gebirges können diese vier morphologischen Operatoren wie folgt interpretiert werden: Die *Erosion* trägt die Oberschicht des Gebirges ab, während die *Dilatation* das Gebirge mit einer weiteren Oberschicht überdeckt. Deswegen beseitigt das *Opening* spitze Gipfel, während das *Closing* kleine Täler füllt.

Die konventionellen morphologischen Operatoren kommen aus der Bildverarbeitung. Zur Definition der morphologischen Operatoren für Bildverarbeitung bedarf es der Beschaffung eines Binärbildes oder Grauwertbildes als Menge. Bei herkömmlicher Anwendung der morphologischen Operatoren muß eine Interpolation von Laserpunkten vorher durchgeführt werden.

### 2.3.2 *Verbesserte Methodik*

Es wurde oben erwähnt, dass bei der konventionellen morphologischen Operation eine Interpolation durchgeführt werden muß. Wenn dies genauer untersucht wird, kann festgestellt werden, dass solch eine Interpolation von Laserpunkten nicht unbedingt gebraucht wird. Eine Interpolation vor der morphologischen Operation bringt nicht nur unvermeidbare Fehler, sondern verbraucht auch viel Zeit. Deswegen wird hier eine verbesserte, modifizierte Methode entwickelt, ohne die Laserpunkte vorher zu interpolieren. 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, muß eine Weiterverarbeitung von Punkthypothesen (Modellierung der Geländeoberfläche) und die Identifizierung der Bodenpunkte durchgeführt werden. Dies wird im Kapitel III.3 vorgestellt.

## 2.4 **Selektion der Bodenpunkthypothese**

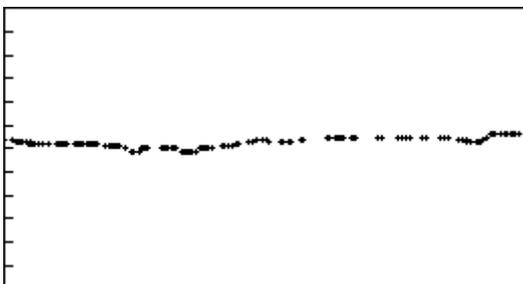
### 2.4.1 *Wahl der Bandbreite (Schwellwert)*

Bei der Bearbeitung von Lasermessungen mittels des morphologischen Operators Opening werden die unteren Umhüllenden berechnet. Ergebnisse dieser Operation sind Punkthypothesen. Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, die tatsächlich gemessenen Bodenpunkte zu identifizieren. Bei der Auswertung von Laserprofilen in LINDENBERGER (1993) wurde eine Methode der Selektion von Bodenpunkthypothesen angewendet. Diese Methode kann auch in die Auswertung von flächenhaften Laserscannerdaten eingeführt werden. Bei Lindenberger wurde zunächst ein Band mit konstanter *Bandbreite* erzeugt, indem zu dem Wert der unteren Umhüllenden eine Konstante (Bandbreite) addiert wurde. Bei diesem Verfahren liegt eine wichtige Aufgabe darin, die Bandbreite zu bestimmen.

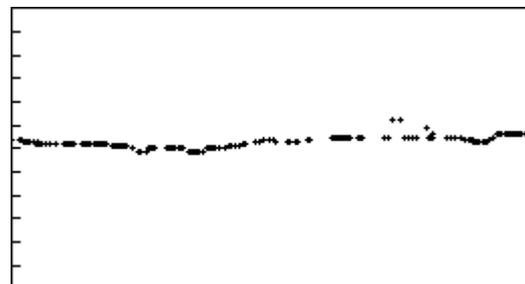
Die Wahl der Bandbreite beeinflusst wesentlich die Auswahl der Bodenpunkthypothese. Durch eine zu klein gewählte Bandbreite werden insbesondere bei den in dichter Folge vorliegenden Laserpunkten Kleinformen des Geländes nicht berücksichtigt. Andererseits ergibt sich die Gefahr bei einer zu groß gewählten Bandbreite, dass ein auf niedrigen Vegetationsformen liegender Punkt fälschlicherweise als Bodenpunkthypothese und umgekehrt, ein auf der Geländeoberfläche liegender Punkt fälschlicherweise als Nichtbodenpunkthypothese identifiziert werden kann. Um diese Gefahren möglichst zu vermindern, können zwei Maßnahmen getroffen werden. Erstens wird die Bandbreite nach der Geländeneigung berechnet und geändert, also die Bandbreite bleibt nicht konstant auf

dem ganzen Bearbeitungsgebiet. Zweitens wird eine einfache Filterung nach der morphologischen Operation durchgeführt, damit die Gefahr, ein auf niedrigen Vegetationsformen liegender Nichtbodenpunkt fälschlicherweise als Bodenpunkthypothese zu identifizieren, möglichst minimiert wird.

Um die Effekte der Bandbreite bei dem morphologischen Operator zu untersuchen, werden zwei Ergebnisse unter Verwendung von unterschiedlichen Bandbreiten abgebildet. Die Abb.III.2.1a und III.2.1b stellen zwei Höhenprofilabbildungen mit der Bandbreite von 0,2 m und 0,5 m beim konstanten Filterfenster von 20 dar. Die beiden Parameter werden durch empirische Bestimmung und Stichprobe ausgewählt. In der Abb.III.2.1b wird gezeigt, dass einige Nichtbodenpunkte bei größerer Bandbreite als Bodenpunkthypothesen identifiziert werden. Bei gleicher Fenstergröße mit niedriger Bandbreite wie in der Abb.III.2.1a sind die Identifizierungen von Bodenpunkthypothesen zufriedenstellend. Es soll daher darauf hingewiesen werden, dass die Wahl einer kleineren Bandbreite vernünftiger als die Wahl einer größeren ist.



**Abb. III.2.1a:** Höhenprofil bei Bandbreite 0,2 m ( Fenstergröße = 20 )

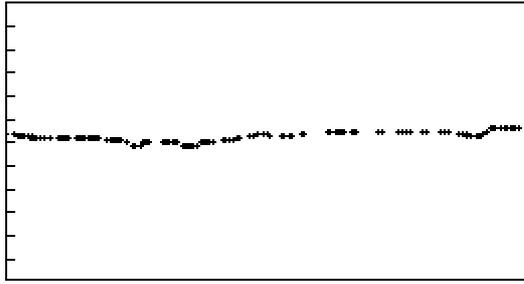


**Abb. III.2.1b:** Höhenprofil bei Bandbreite 0,5 m ( Fenstergröße = 20 )

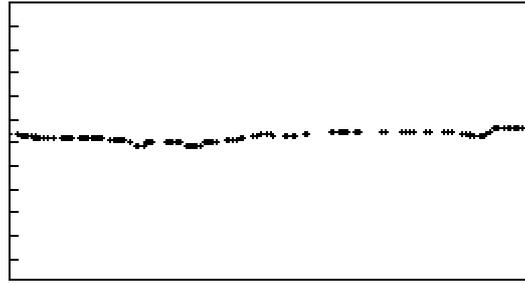
#### 2.4.2 Wahl der Fenstergröße

Ein anderer wichtiger Parameter bei der Durchführung von morphologischen Operatoren ist die *Größe des Strukturfensters*. Mit der Wahl einer zu großen Fenstergröße kann ein Bergkegel weggefiltert werden. Andererseits, wenn ein Fenster zu klein gewählt wird, kann ein auf der niedrigen Vegetation, auf dem Gebäude oder auf einem Auto liegender Punkt fälschlicherweise als Bodenpunkthypothese identifiziert werden. Deshalb sollte das Strukturfenster einerseits so klein wie möglich gewählt werden, so dass ein Bergkegel nicht eliminiert werden kann. Andererseits muß die Fenstergröße genügend groß gewählt werden, so dass die nicht verwertbaren Laserpunkte nicht als Bodenpunkthypothesen identifiziert werden. Dazu wird eine bewegliche Fenstergröße gewählt. Die Zahl der Laserpunkte innerhalb des Fensters beeinflusst die Wahl der Fenstergröße. Diese Idee kann auch bei KILIAN u.a. (1996) gefunden werden.

Um die Effekte der Fenstergröße bei dem morphologischen Operator zu untersuchen, werden zwei Ergebnisse mit der Verwendung von unterschiedlichen Fenstergrößen abgebildet. Die Abb.III.2.2a und III.2.2b zeigen zwei Höhenprofilabbildungen mit der Fenstergröße 10 und 20 bei der konstanten Bandbreite von 0,2 m. Die Wahl der Fenstergröße soll je nach den Bedingungen der Daten und des Anwendungsgebietes bestimmt werden.



**Abb. III.2.2a:** Höhenprofil bei Fenstergröße 10  
( Bandbreite = 0,2 m )



**Abb. III.2.2b:** Höhenprofil bei Fenstergröße 20  
( Bandbreite = 0,5 m )

### 2.4.3 *Bandbreite als Gewichtsfunktion*

In den vergangenen Teilen dieses Kapitels wurden Bodenpunkthypothese und Nichtbodenpunkthypothese behandelt. Die beiden Punkthypothesen sollen im folgenden noch weiterverarbeitet werden. Die selektierte Bodenpunkthypothese enthält nur eine Teilmenge aller tatsächlich gemessenen Bodenpunkte. Eine korrekte Selektion der tatsächlichen Bodenpunkte kann erst nach der folgenden Weiterbearbeitung der Parameterschätzung erfolgen. Um unterschiedliche Fenstergrößen und Bandbreiten berücksichtigen zu können, kann eine Gewichtsfunktion bei der morphologischen Operation eingeführt werden. Ein Punkt, der höher als die Bandbreite ist, bekommt ein kleineres Gewicht. Wenn ein Laserpunkt niedriger als die Bandbreite ist, kann sein Gewicht beispielsweise *eins* gesetzt werden. Nach der morphologischen Operation werden alle Laserpunkte mit ihren Gewichten in den nächsten Schritt, also in die Parameterschätzung eingeführt.

### 2.4.4 *Identifizierung der Bodenpunkthypothese*

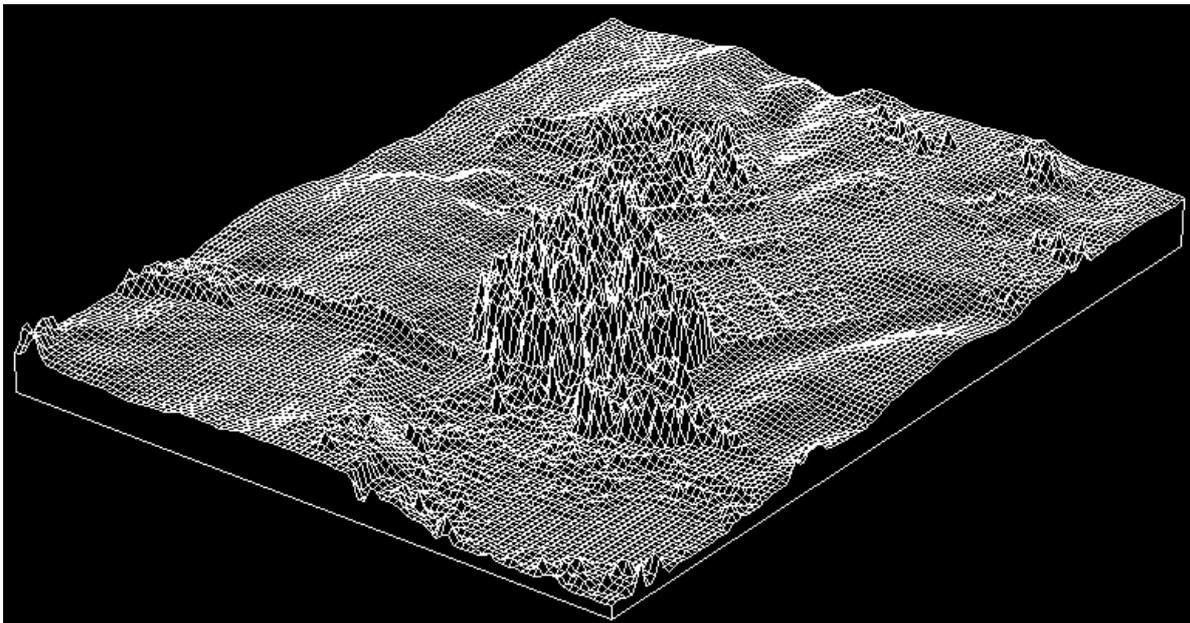
Die Identifizierung der Bodenpunkthypothese ist das Ziel der morphologischen Bearbeitung. Die beiden wichtigsten Parameter des morphologischen Openings wurden oben bereits diskutiert. Alle Laserscannerpunkte, die innerhalb der Bandbreite über den unteren Umhüllenden liegen, werden demnach als Bodenpunkthypothesen selektiert. Obwohl die Wahl der Bandbreite nur die Auswahl der Bodenpunkthypothesen und nicht die Auswahl der echten Bodenpunkte betrifft, ist die Wahl einer kleineren Bandbreite vernünftiger als die Wahl einer größeren. Eine Bodenpunkthypothese besitzt größeres Gewicht, eine Nichtbodenpunkthypothese dagegen ein kleineres.

So kann die Gefahr, einen auf niedrigen Vegetationsformen liegenden Punkt fälschlicherweise als Bodenpunkthypothese und umgekehrt, einen auf der Geländeoberfläche liegenden Punkt fälschlicherweise als Nichtbodenpunkthypothese zu identifizieren, möglicherweise vermindert werden. Bei der Untersuchung wurde eine Bandbreite von 0,2 m bis 0,5 m empirisch gewählt. Damit ließen sich zuverlässige Bodenpunkthypothesen erzielen.

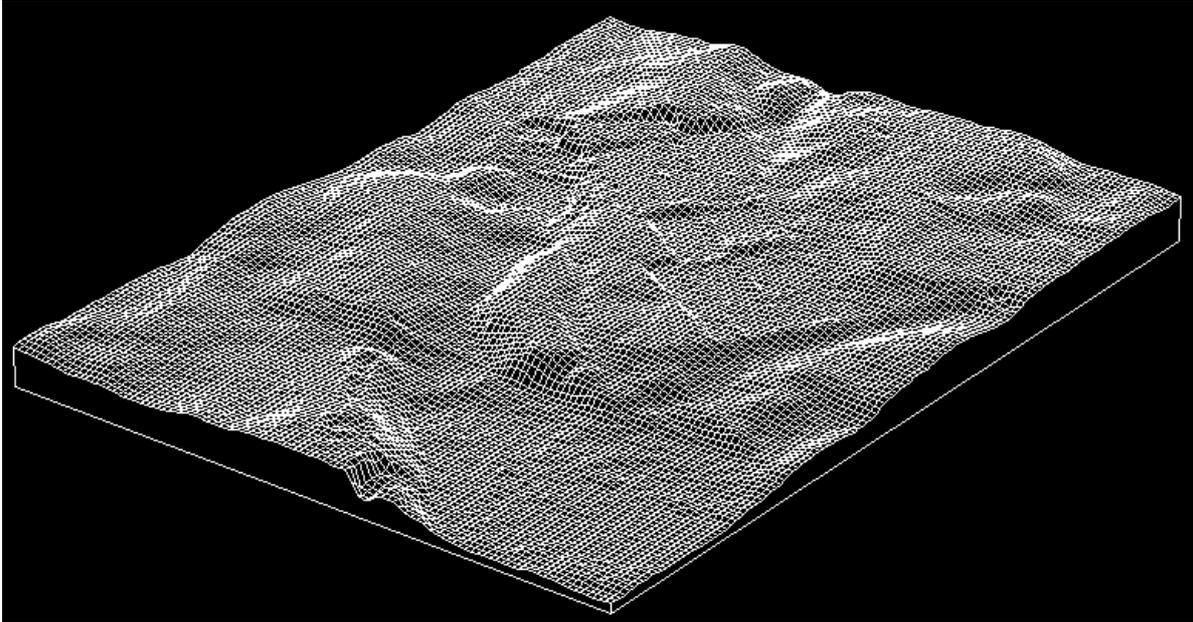
## 2.5 Ergebnisse der Vorbearbeitung

Die Vorbearbeitung wird hier mit dem morphologischen Operator Opening vorgenommen. Wenn das morphologische Opening auf der aus Laserscannerpunkten zusammengesetzten Geländeoberfläche angewendet wird, erhält man zunächst eine Näherung für die Geländeoberfläche.

Anhand einiger Beispiele sollen die Ergebnisse des morphologischen Operators Opening veranschaulicht werden. Die Abb.III.2.3a zeigt eine Perspektivansicht der Originaldaten des Testgebietes **Dorf**. Dieses Gebiet ist gemischt mit unterschiedlichen Objekten bedeckt. Ein kleiner Waldteil liegt mitten in der Abbildung. Der obere Teil zeigt eine Siedlung mit unterschiedlichen Häusern. Der untere Teil ist ein kleiner See mit Moor. Die Abb.III.2.3c zeigt das Luftbild dieses Teilgebietes. Die Abb.III.2.3b stellt die Perspektivansicht der bearbeiteten Daten mit dem Opening-Operator dar. Aus dieser Abbildung kann man erkennen, dass oben erwähnte Objekte weggefiltert werden. Beim Vergleich dieser Abbildung mit der Abbildung der Originaldaten kann man auch erkennen, dass die Geländeoberfläche bei der Filterung gut erhalten bleibt. Die Abb.III.2.4a stellt ein grauwertkodiertes Höhenbild der entsprechenden Originaldaten und die Position des Höhenprofils dar. Die Abb.III.2.4b entspricht dem Höhenprofil der Originaldaten mit allen Laserscannerpunkten innerhalb der angegebenen Profilposition.



**Abb.III.2.3a:** Perspektivansicht der Originaldaten von Ausschnitt Dorf



**Abb.III.2.3b:** Perspektivansicht der bearbeiteten Daten nach dem Opening



**Abb.III.2.3c:** Luftbild des entsprechenden Ausschnittes

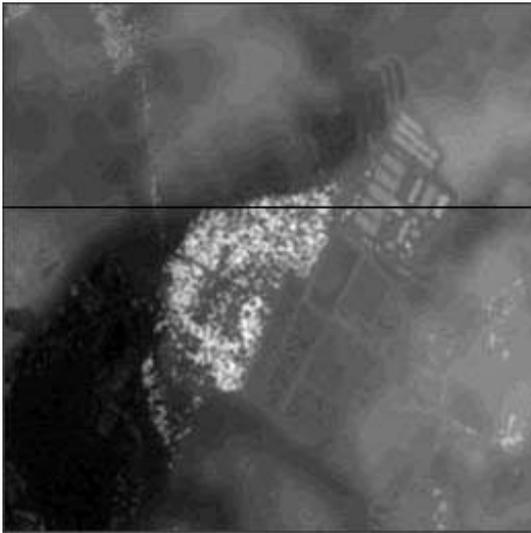


Abb. III.2.4a: Höhenwertbild und Profilposition

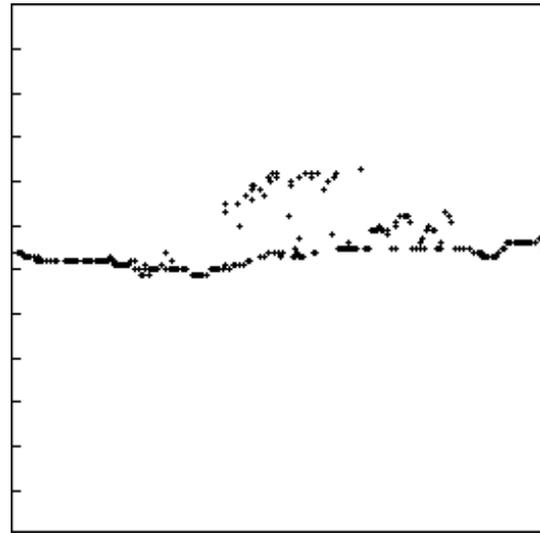


Abb. III.2.4b: Höhenprofil der Originaldaten

### 3 Weiterverarbeitung von Laserpunkten

#### 3.1 Einführung

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 sogenannte 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. Über Interpolation von digitalen Höhenmodellen ist im Teil IV noch zu diskutieren. 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. Mittels robuster Parameterschätzung werden dann alle Laserpunkte nochmals bearbeitet.

Im folgenden Abschnitt III.3.3 werden mathematische Modelle zur Modellierung der Geländeoberfläche entwickelt. Ein *nichtkausaler autoregressiver Prozeß* (abgekürzt *nar-Prozeß*) und ein *kausaler autoregressiver Prozeß* (abgekürzt *kar-Prozeß*) werden vorgestellt und angewendet. Neben diesen beiden Modellen wird auch der in der Statistik und bei der Auswertung von geodätischen Daten angewendete robuste *M-Schätzer* vorgestellt.

## 3.2 Verallgemeinerung über robuste Parameterschätzung

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. Robust wird dabei im Sinn von Ergänzung und nicht als Ersatz der Methode der kleinsten Quadrate verstanden (SUTOR 1997). Eine Schätzfunktion bezeichnet man ganz allgemein als robust, wenn ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung gegenüber kleinen Änderungen der Verteilung der Stichprobe unempfindlich ist (KOCH 1996).

Es gibt verschiedene Verfahren zur Parameterschätzung, z. B. *die beste lineare erwartungstreue Schätzung*, *die Methode der kleinsten Quadrate*, und *die Maximum-Likelihood-Schätzung* (CASPARY 1988, CASPARY 1996, KAMPMANN 1986). Unter der Voraussetzung normalverteilter Beobachtungen liefern diese Verfahren im linearen Modell identische Ergebnisse. Bei diesen Methoden wird die Quadratsumme der Residuen minimiert, was zu einer Verschmierung der groben Fehler führt. Die robusten Verfahren ersetzen die Quadrate oder Quadratsumme durch besser geeignete Funktionen. Die numerische Berechnung der robusten Schätzwerte erfolgt zweckmäßig durch iterative Gewichtung mit Hilfe der üblichen Methode der kleinsten Quadrate. Es gibt eine Vielzahl von Veröffentlichungen zur Beschreibung von robuster Parameterschätzung, zum Beispiel CASPARY (1996), BENNING (1996), KAMPMANN (1986), KOCH (1996), YANG (1997), wo die theoretischen Beschreibungen zu finden sind.

## 3.3 Robuste Parameterschätzung von Laserpunkten

### 3.3.1 Vorbemerkung

Einige Vorschläge zur Behandlung von Beobachtungen im Rahmen der robusten Schätzung laufen auf eine mehr oder weniger willkürliche Herabgewichtung der möglichen groben Beobachtungen hinaus (KOCH 1996, BENNING 1995). Nach BENNING (1995) sollte die Auswertung der Messung mit einer Diagnose durchgeführt werden. Dazu empfiehlt sich in kritischen Fällen die Einführung einer zusätzlichen „*Gewichtsmatrix*“ oder der Einsatz eines *M-Schätzers* in der Ausgleichung (CASPARY 1996). In unserem Falle erhalten wir nach der mathematisch morphologischen Operation zwei Punkthypothesen mit unterschiedlichen Gewichten. Diese beiden können in die robuste Parameterschätzung eingebracht werden.

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.

### 3.3.2 Robuste Schätzung mit kar-Modellen

Nach der Filterung mit einem morphologischen Operator kann eine robuste Parameterschätzung in linearen Modellen durchgeführt werden. Nach KOCH (1987, 1994) und SCHULTE (1987) kann die robuste Parameterschätzung nun folgendermaßen formuliert werden: Gesucht sind die konstanten Parameter  $h_k$  in dem allgemeinen linearen Ansatz:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k x_{t-k} = e_t \quad (\text{III.3-1})$$

wobei  $x_{t-i}$   $i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$  Zufallsvariablen und  $e_t \sim R(0, \sigma_e^2)$  der weiße Rauschprozeß bedeutet.

Solche eindimensionalen Modelle sind in verschiedenen Veröffentlichungen auf unterschiedlichen Gebieten zu finden. Bei der Auswertung des Laserprofils wurde das Geländeprofil mit eindimensionalen autoregressiven, integrierten Prozessen (*ARI-Prozeß*) behandelt, womit erfolgreiche Ergebnisse erzielt wurden (LINDENBERGER 1993). Hier wird ein zweidimensionales autoregressives Modell untersucht. In diesem Kapitel wird zunächst das kausale zweidimensionale autoregressive Modell bei der Bearbeitung von flächenhaften Laserpunkten entwickelt und diskutiert. Im kommenden Kapitel wird dann das nichtkausale zweidimensionale autoregressive Modell behandelt.

Ein *kausales zweidimensionales autoregressives Modell* der Ordnung  $\max(p,q)$ , abgekürzt als *kar(p,q)* geschrieben, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Zufallsvariable  $x(m,n)$  am Ort

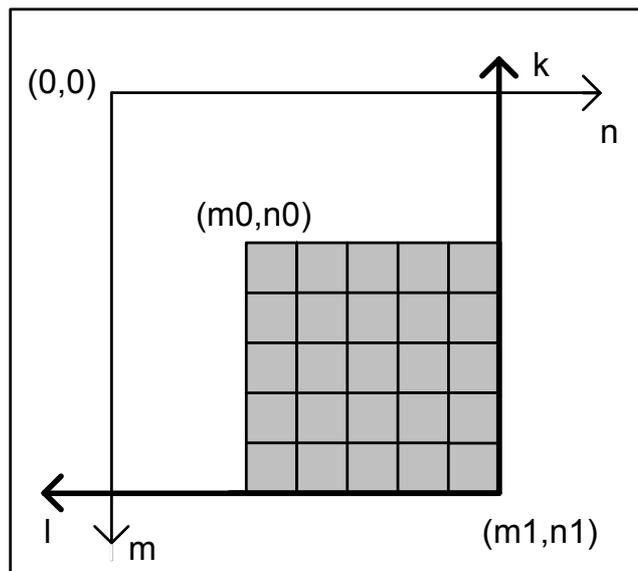
$$x(t-r) = x(m-k, n-l), \quad t-r = \{(m-k), (n-l)\}, \quad t = (m,n) \in T$$

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

$$x(m,n) = \sum_{\substack{k=0 \\ (k,l) \neq (0,0)}}^p \sum_{l=0}^q a_{kl} x(m-k, n-l) + e(m,n) \quad (\text{III.3-2})$$

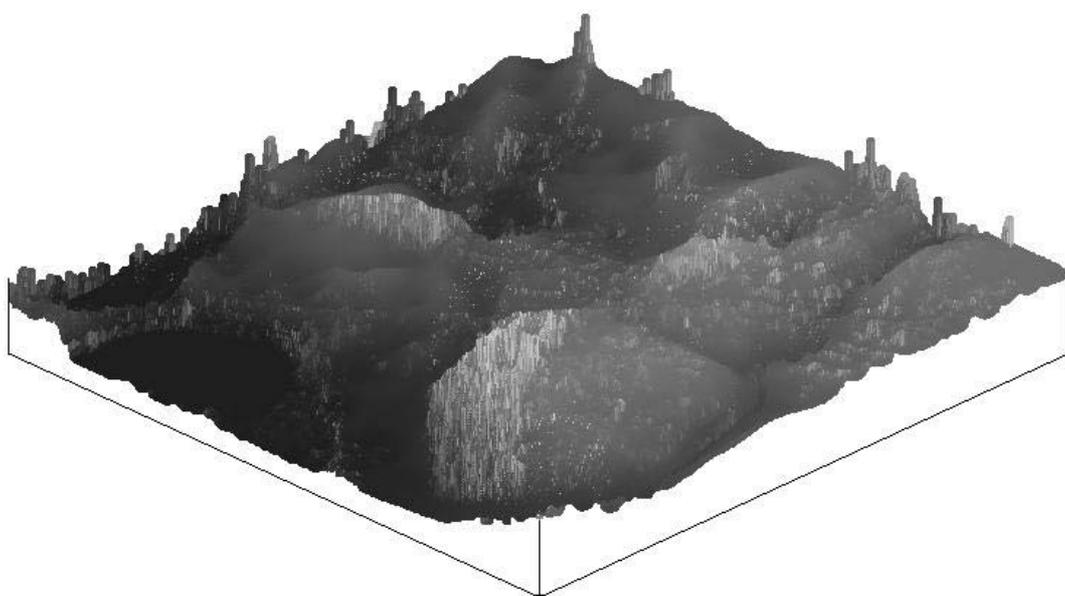
worin  $a_{kl}$  konstante Koeffizienten sind. Der Prozeß  $e(m,n)$  wird hier als stochastisches weißes Rauschen angenommen, für das der Erwartungswert  $E\{e(m,n)\}=0$  gilt (KOCH 1996, SCHULTE 1987).

Bei der Auswertung von Laserscannerdaten mit *kar-Modellen* werden für jeden Gitterpunkt die Eingangspunkte des unterlegten Bereichs benötigt. Die Abb.III.3.1 zeigt das Koordinatensystem eines kar-Modells. Das  $(m,n)$ -Koordinatensystem ist derart orientiert, dass die positive *m-Achse* nach unten und die positive *n-Achse* nach rechts zeigt. Berechnet wird der Ausgangspunkt an der Stelle  $(m=m1, n=n1)$  jeweils an den Eingangspunktswerten von  $(m0, n0)$  bis  $(m1, n1)$  des unterlegten Bereichs (KOCH 1987).

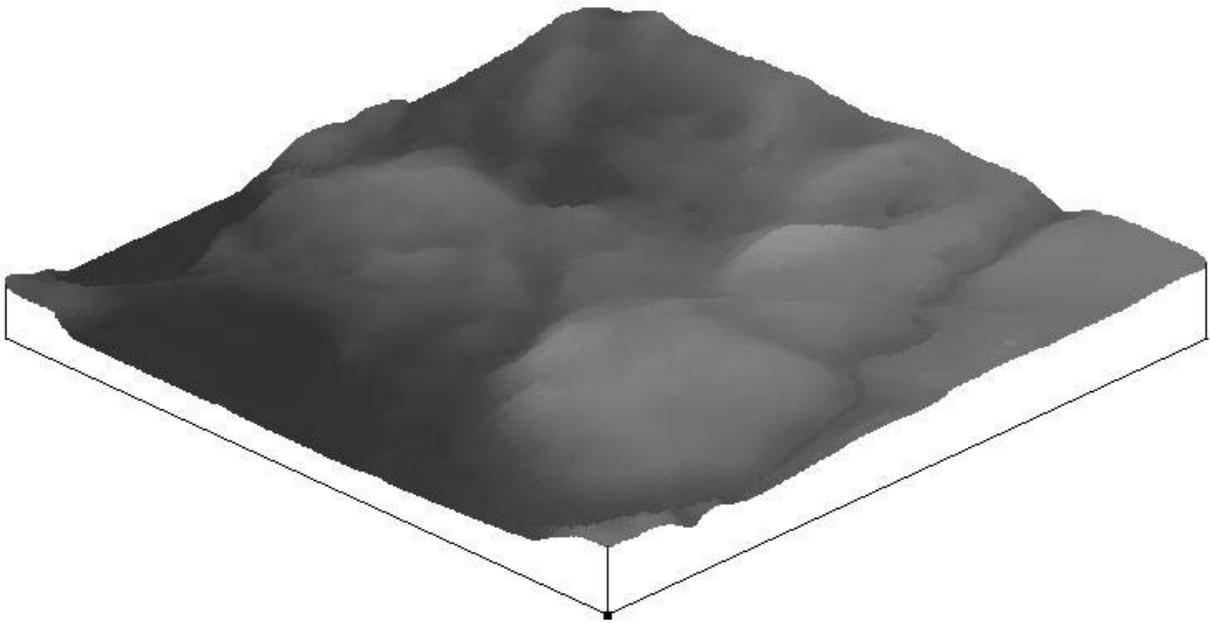


**Abb.III.3.1:** Schematische Darstellung zur kausalen Filterung

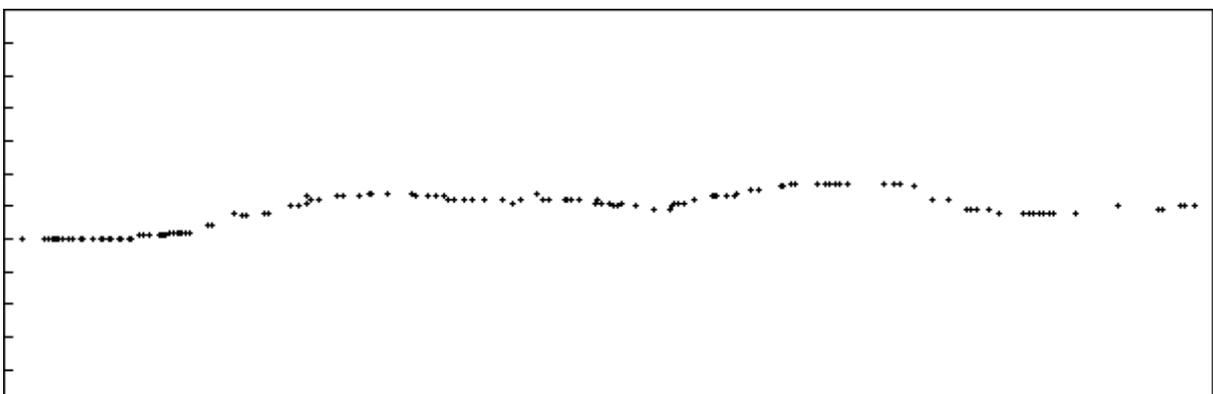
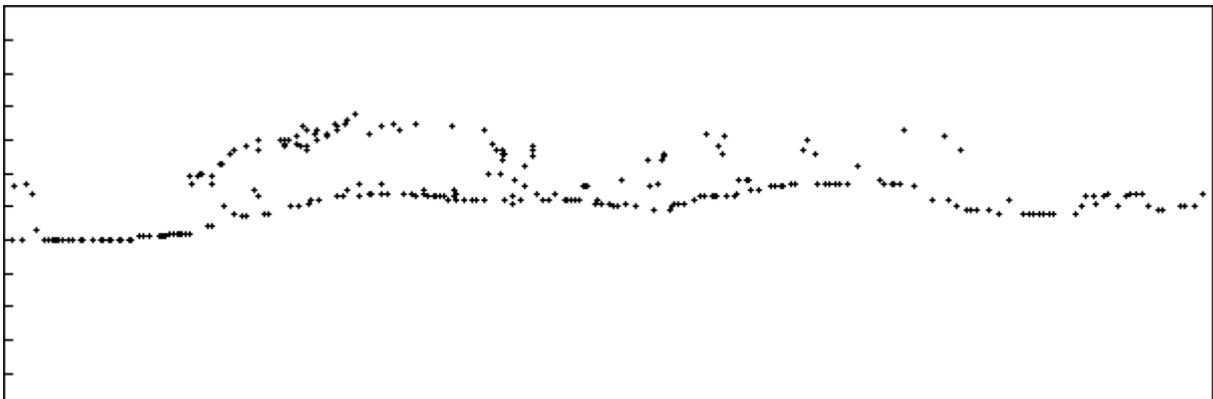
Die Abb.III.3.2a zeigt eine Perspektivansicht der Originaldaten des ausgeschnittenen Testgebietes **Müncheberg**. Die Abb.III.3.2b stellt die Perspektivansicht der bearbeiteten Daten dieses Ausschnittes mit dem *kar*-Modell der Ordnung *kar(5,5)* dar. Die Abb.III.3.2c und III.3.2d stellen zwei Höhenprofile der Originaldaten und der bearbeiteten Daten dar. Die Abb.III.3.2e und III.3.2f stellen jeweils das Luftbild und Höhenwertbild dar. 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.III.3.2a:** Perspektivansicht der Originaldaten des Ausschnitts Müncheberg



**Abb.III.3.2b:** Perspektivansicht der mit dem kar-Modell bearbeiteten Daten des Ausschnitts Müncheberg



**Abb.III.3.2d:** Höhenprofil der mit dem kar-Modell bearbeiteten Daten des Ausschnitts Müncheberg



Abb.III.3.2e: Luftbild

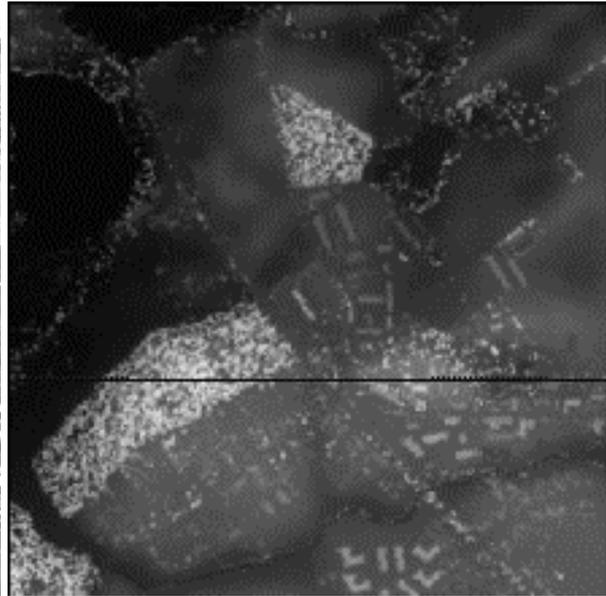


Abb.III.3.2f: Höhenwertbild und Profilposition

### 3.3.3 Robuste Schätzung mit nar-Modellen

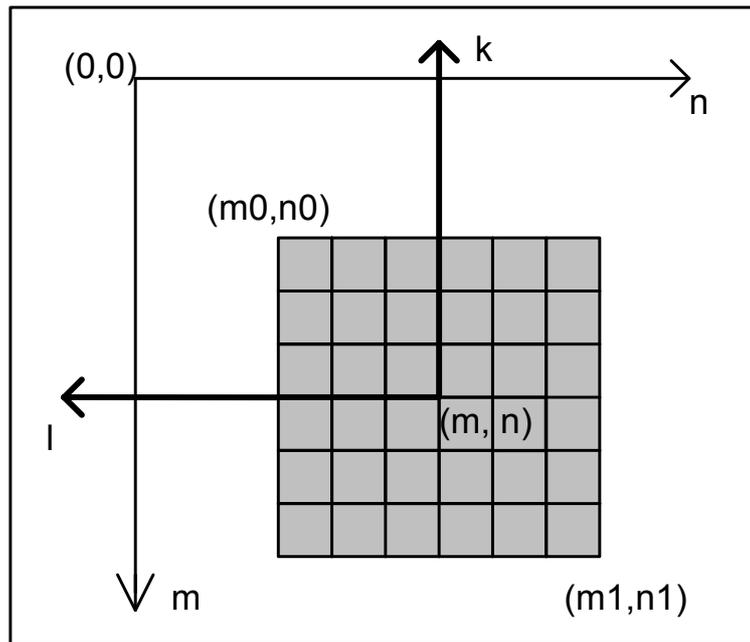
Erweitert man die Nachbarschaft in der Formel (III.3-2) in die Umgebung des betrachteten Punktes  $t=(m,n) \in T$  innerhalb eines bestimmten Bereiches (Fensters), erhält man *einen nichtkausalen zweidimensionalen autoregressiven Prozeß* der Ordnung  $\max(p,q)$ , abgekürzt *nar*( $p,q$ ),

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

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

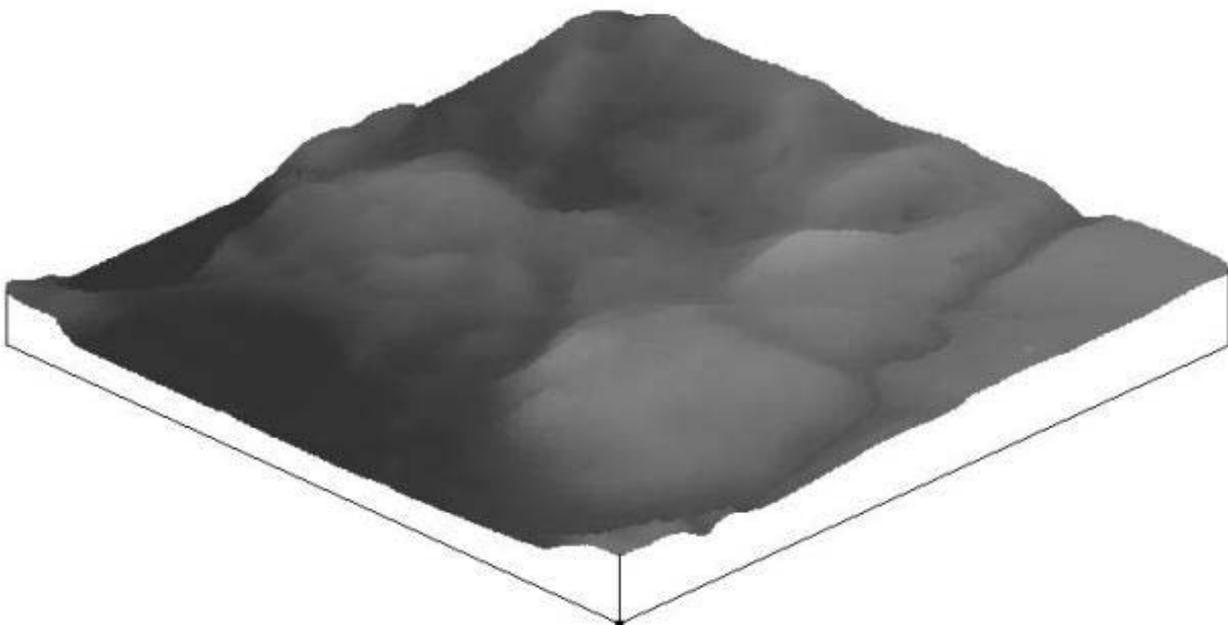
Der Bereich  $N = \{(m-k, n-l), (k,l) \in S, S = \{-p \leq k \leq p, -q \leq l \leq q\}\}$  ist die Nachbarschaft von  $(m,n)$ , die symmetrisch oder nicht symmetrisch wie in kar-Modellen sein kann. Normalerweise wird im folgenden die Nachbarschaft in nar-Modellen und auch in kar-Modellen ohne besondere Erwähnung immer als symmetrisch angenommen. Bei den kar-Prozessen ist die Nachbarschaft auf die Zufallsvariablen  $x(i,j)$  mit  $(i \leq m, j \leq n)$  beschränkt, während die Nachbarschaft bei den nar-Prozessen durch eine in Bezug auf  $x(m,n)$  symmetrisch liegende Punktanordnung gegeben ist. Zur Vereinfachung wird hier als Nachbarschaft ein Rechteck gewählt.

Bei der Auswertung von Laserscannerdaten mit nar-Modellen werden für jeden Gitterpunkt die Eingangspunkte innerhalb der Nachbarschaft eines Rechtecks von Punkt  $(m,n)$  benötigt. Die Abb.III.3.3 zeigt das Koordinatensystem eines nar-Modells. Das  $(m,n)$ -Koordinatensystem ist ebenso wie in der Abb.III.3.1 orientiert, so dass die positive  $m$ -Achse nach unten und die positive  $n$ -Achse nach rechts zeigt. Berechnet wird der Ausgangspunkt an der Stelle  $(m,n)$  bei einem nar-Modell allerdings jeweils an den Eingangspunktswerten der Nachbarschaft eines Rechtecks von Punkt  $(m_0, n_0)$  bis zu Punkt  $(m_1, n_1)$ . Die Beschreibung dieses Koordinatensystems kann man auch bei KOCH (1987) finden.

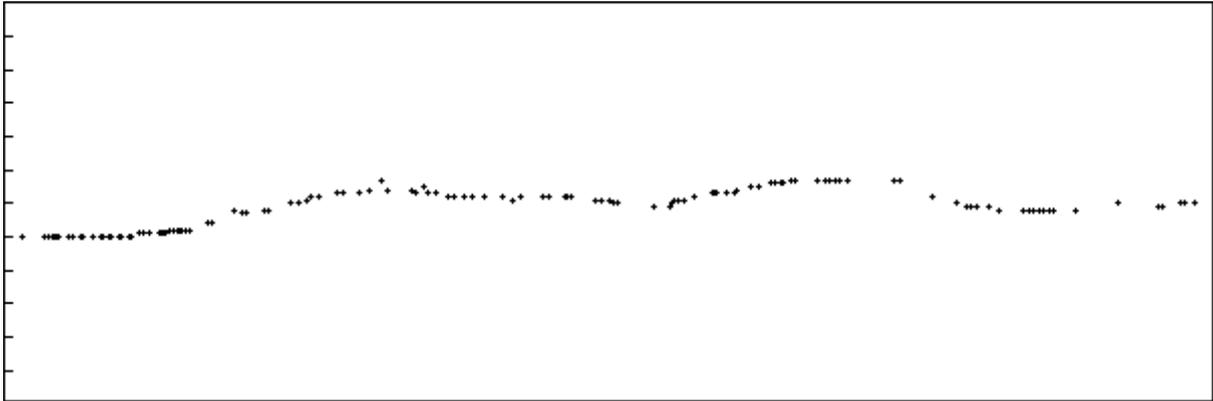


**Abb.III.3.3:** Schematische Darstellung zur nichtkausalen Filterung

Die Abb.III.3.4a und III.3.4b stellen Ergebnisse mit dem nar-Modell der Ordnung *nar(5,5)* im gleichen Testgebiet **Müncheberg** wie im Abschnitt III.3.3 dar. Die Perspektivansicht und das Höhenprofil der Originaldaten sind wie in der Abb.III.3.2a und III.3.2c dargestellt. Das Luftbild und Höhenwertbild wurden in der Abb.III.3.2e und III.3.2f ebenfalls dargestellt.



**Abb.III.3.4a:** Perspektivansicht der mit dem nar-Modell bearbeiteten Daten des Ausschnitts Müncheberg



**Abb.III.3.4b:** Höhenprofil der mit dem nar-Modell bearbeiteten Daten des Ausschnitts Müncheberg

### 3.3.4 Robuster M-Schätzer

Ein in zwei Schritten aufgeteiltes Verfahren zur Auswertung von Laserpunkten kann auch als Suche nach den groben Fehlern und Ausreißern, sowie als Prüfung der Hypothesen von Beobachtungen betrachtet werden. Die Suche nach Ausreißern im Beobachtungsmaterial besitzt eine lange Tradition in der Geodäsie und Photogrammetrie (KOCH 1983, BENNING 1978, KAMPANN 1986, YANG 1997, LI 1985, FÖRSTNER 1978). Im folgenden wird das *Maximum-Likelihood-Schätzungsverfahren*, sogenannter *M-Schätzer*, bei der Weiterbearbeitung von Laserscannerdaten vorgestellt. Dieses Verfahren wurde auch bei JIANG u.a. (1997) bei der Bearbeitung von Tiefenbildern angewendet.

Für die Parameterschätzung sollen, wie von KOCH (1996) beschrieben, voneinander unabhängige Beobachtungen mit ungleichen Gewichten angenommen werden, so dass das *Gauß-Markov-Modell*

$$\bar{X} \bar{\beta} = E(\bar{y}) = \bar{y} + \bar{e} \quad \text{mit} \quad D(\bar{y}) = \sigma^2 P^{-1} \quad (\text{III.3-4})$$

worin

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & P_2 & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & \\ & & & & P_n \end{bmatrix}$$

enthalten sein kann. Dabei bedeutet  $\bar{X}$  die  $n \times u$  Koeffizientenmatrix der Beobachtung, für die zur Vereinfachung der Ableitungen voller Spaltenrang angenommen wird,  $\bar{\beta}$  der  $u \times 1$  Vektor unbekannter Parameter,  $\bar{y}$  der  $n \times 1$  Vektor von Beobachtungen,  $\bar{e}$  der  $n \times 1$  Vektor der Fehler,  $P$  die  $n \times n$  Diagonalmatrix der Gewichte  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$  der Beobachtungen,  $\sigma^2$  die Varianz der Gewichtseinheit und  $D(\bar{y})$  die Kovarianzmatrix von  $\bar{y}$ .

Ersetzt man in der Ableitung robuster Schätzverfahren die zu minimierende Funktion durch eine geeignete Zielfunktion  $\rho(y_i, g_i(\bar{\beta}))$ , in der  $g_i(\bar{\beta})$  eine Funktion der unbekannt Parameter  $\bar{\beta}$  bedeutet, dann ergibt sich die verallgemeinerte M-Schätzung aus

$$\sum_{i=1}^n \rho(y_i, g_i(\bar{\beta})) \rightarrow \min, \quad (\text{III.3-5})$$

wobei  $\rho(\cdot)$  eine beliebige Fehlernorm repräsentiert.

Die Zielfunktion  $\rho(y_i, g_i(\bar{\beta}))$  besitzt die Ableitung

$$\psi(y_i, \bar{\beta}) = \frac{\partial}{\partial g_i(\bar{\beta})} \rho(y_i, g_i(\bar{\beta})), \quad (\text{III.3-6})$$

so dass zur Bestimmung der Schätzwerte

$$\sum_{i=1}^n \psi(y_i, \bar{\beta}) \partial g_i(\bar{\beta}) / \partial \beta_k = 0 \quad \text{für } k \in \{1, 2, \dots, u\} \quad (\text{III.3-7})$$

folgt, wobei  $\psi(y_i, \bar{\beta}) = \psi(x_i)$  auch *Verlustfunktion* oder  *$\psi$ -Funktion* genannt wird.

Die Beobachtungen  $y_i$  und die unbekannt Parameter  $\bar{\beta}$  sind durch die Beobachtungsgleichung (III.3-4) verbunden. Die unbekannt Varianz  $\sigma^2$  kann hier zunächst als bekannt vorausgesetzt werden. Führt man weiter das Gewicht ein mit

$$w_i = \psi(e_i/\sigma) / (e_i/\sigma), \quad (\text{III.3-8})$$

erhält man eine allgemeine Gleichung des M-Schätzers:

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n w_i e_i x_{ik} = 0 \quad \text{für } k \in \{1, 2, \dots, u\} \quad (\text{III.3-9})$$

Die Lösung dieses Minimierungsproblems kann beispielsweise für die Approximation einer lokalen Umgebung U durch eine lineare Flächenfunktion

$$f(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + g$$

aufgezeigt werden. Hierbei wird der Gesamtfehler

$$v = \sum_{i=1}^n \rho((ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + g - z_i) / \sigma)$$

dann minimiert, wenn die Bedingungen

$$\partial v / \partial a = \sum \psi \left( (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + g - z_i) / \sigma \right) (x_i^2 / \sigma) = 0$$

und  $\frac{\partial v}{\partial b}, \frac{\partial v}{\partial c}, \frac{\partial v}{\partial d}, \frac{\partial v}{\partial e}, \frac{\partial v}{\partial g}$  gelten. Mit der Definition einer Gewichtsfunktion (III.3-8) und dem

Ersetzen von  $\psi(e_i / \sigma) = w_i(e_i / \sigma)$  lassen sich diese Bedingungen in

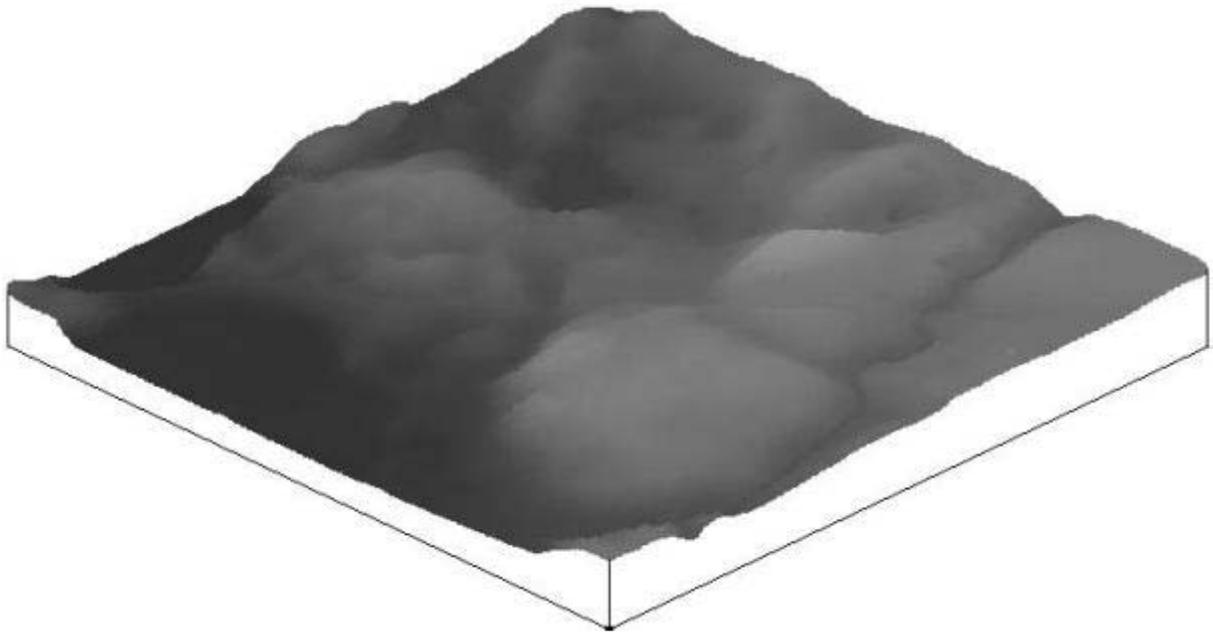
$$\begin{bmatrix} \sum w_i x_i^4 & \sum w_i x_i^3 y_i & \sum w_i x_i^2 y_i^2 & \sum w_i x_i^3 & \sum w_i x_i^2 y_i & \sum w_i x_i^2 \\ \sum w_i x_i^3 y_i & \sum w_i x_i^2 y_i^2 & \sum w_i x_i y_i^3 & \sum w_i x_i^2 y_i & \sum w_i x_i y_i^2 & \sum w_i x_i y_i \\ \sum w_i x_i^2 y_i^2 & \sum w_i x_i y_i^3 & \sum w_i y_i^4 & \sum w_i x_i y_i^2 & \sum w_i y_i^3 & \sum w_i y_i^2 \\ \sum w_i x_i^3 & \sum w_i x_i^2 y_i & \sum w_i x_i y_i^2 & \sum w_i x_i^2 & \sum w_i x_i y_i & \sum w_i x_i \\ \sum w_i x_i^2 y_i & \sum w_i x_i y_i^2 & \sum w_i y_i^3 & \sum w_i x_i y_i & \sum w_i y_i^2 & \sum w_i y_i \\ \sum w_i x_i^2 & \sum w_i x_i y_i & \sum w_i y_i^2 & \sum w_i x_i & \sum w_i y_i & \sum w_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w_i x_i^2 z_i \\ \sum w_i x_i y_i z_i \\ \sum w_i y_i^2 z_i \\ \sum w_i x_i z_i \\ \sum w_i y_i z_i \\ \sum w_i z_i \end{bmatrix}$$

umformen.

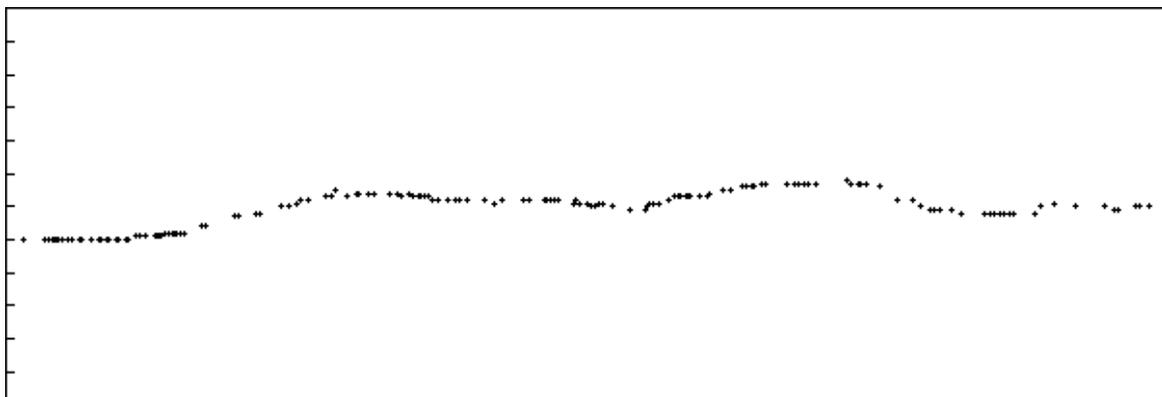
Um die Gleichung des M-Schätzers zu lösen, muß eine iterative Berechnung durch iterative Umgewichtung durchgeführt werden. In jeder Iteration werden Gewichtswerte  $w_i$  neu aufgrund der Werte von Parametern aus der letzten Iteration berechnet. Dabei wird der Skalierungsfaktor  $\sigma$  auch zusätzlich berechnet. Dieses Verfahren wurde von JIANG u.a. (1997) genau beschrieben. Dort kann man die Beschreibung, die Methode und Form der Koeffizientenmatrix zur Durchführung dieses Verfahrens finden.

Die Auswahl der  $\psi$ -Funktion spielt natürlich eine entscheidende Rolle bei der robusten Schätzung. Bei der Wahl  $\psi(x) = x$  entspricht der M-Schätzer beispielsweise der Methode der kleinsten Quadrate. Von SUTOR (1997) wurde dieses Thema der Auswahl der  $\psi$ -Funktion intensiv untersucht. Dabei wurden unterschiedliche gebräuchliche  $\psi$ -Funktionen diskutiert, beispielsweise *Huber*-, *Hampel*-, *Andrew*- und *Tukey*-Funktion usw. Von BENNING (1996), KOCH (1996) und YANG (1997) wurden auch andere  $\psi$ -Funktionen angewendet.

Die Abb.III.3.5a und III.3.5b stellen Ergebnisse mit M-Schätzern im gleichen Testgebiet **Müncheberg** wie im Abschnitt III.3.3.3 und Abschnitt III.3.3.4 dar. Die Perspektivansicht und das Höhenprofil der Originaldaten sind ebenfalls gleich wie in Abb.III.3.2a und III.3.2c gezeigt. Das Luftbild und Höhenwertbild dieses Testgebietes **Müncheberg** wurden in der Abb.III.3.2e und III.3.2f ebenfalls dargestellt.



**Abb.III.3.5a:** Perspektivansicht der mit M-Schätzer bearbeiteten Daten



**Abb.III.3.5b:** Höhenprofil der mit M-Schätzer bearbeiteten Daten

### 3.4 Durchführung der Weiterbearbeitung von Laserpunkten

In den vorangehenden Kapiteln wurden robuste Parameterschätzung und morphologische Operatoren als erfolgreiche Verfahren zur Bearbeitung von Laserscannerdaten vorgestellt. Auf diesen theoretischen Grundlagen stützen sich die Modellierung und Approximation der Geländeoberfläche aus Laserpunkten. Die algorithmische Umsetzung wurde soweit erforderlich entwickelt; die technische Realisierung wurde mit Hilfe von Computerprogrammen durchgeführt, sie soll hier jedoch nicht weiter besprochen werden. In diesem Abschnitt werden einzelne Auswertungsschritte zusammenfassend erläutert.

Die Grundidee der Durchführung dieser Auswertung ist die Einführung der digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Der Ausgangspunkt sind alle gemessenen, auf der Erdoberfläche unregelmäßig verteilten Laserpunkte mit X,Y,Z-Koordinaten. Das Endprodukt sollen Bodenpunkte sein, die zur DHM-Herstellung weiterverarbeitet werden können. Die Koordinaten der Bodenpunkte, eventuell auch der gefilterten Nichtbodenpunkte sollen nicht verändert werden. Die Trennung und Filterung der Bodenpunkte von den nicht-relevanten Punkten basieren auf zwei mathematischen Theorien, nämlich der mathematischen Morphologie und der robusten Parameterschätzung. Das ganze Verfahren setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

### ***A. Morphologische Operation***

Bei der Beschaffung der Näherungswerte von Bodenpunkten wurde nur der Operator *Opening* verwendet. In der morphologischen Bearbeitung von Laserscannerpunkten soll näherungsweise eine Bodenpunkthypothese berechnet werden. Um unterschiedliche Fenstergrößen und Bandbreiten berücksichtigen zu können, wurde eine Gewichtsfunktion eingeführt. Entweder werden allen über der Bandbreite liegenden Punkte die gleichen Gewichte gegeben, oder es wird das Gewicht eines bearbeiteten Laserpunktes, d.h. um wieviel er über der Bandbreite liegt, danach zugeordnet.

### ***B. Identifizierung der Bodenpunkthypothese***

Alle Laserscannerpunkte, die innerhalb einer gewissen Bandbreite über der unteren Umhüllenden liegen, können als Bodenpunkthypothesen identifiziert werden. Die Bodenpunkthypothese besitzt größeres Gewicht (z.B. = 1,0), während die Nichtbodenpunkthypothese ein kleineres (z.B. < 1,0) besitzt. Alle Laserpunkte mit unterschiedlichen Gewichten sind im folgenden Schritt weiter zu bearbeiten.

### ***C. Weiterverarbeitung der Laserpunkte***

Alle Laserpunkte, nicht nur Bodenpunkthypothesen sondern auch Nichtbodenpunkthypothesen, wurden zusammen für die Weiterbearbeitung herangezogen. Für die beiden Arten von Punkthypothesen wurden ungleiche Gewichte zugeordnet. Mittels robuster Parameterschätzung wurde die Geländeoberfläche geschätzt. Als Modelle wurden *kar-Prozeß*, *nar-Prozeß* und *M-Schätzer* verwendet.

Die Bearbeitung erfolgt in einem Iterationsverfahren. Es gibt zwei Möglichkeiten zur Initialisierung. Die erste Möglichkeit ist, dass alle Bodenpunkthypothesen das Gewicht **1** besitzen, während Nichtbodenpunkthypothesen das Gewicht **0** besitzen. Zweitens werden Gewichtswerte von Laserpunkten nach dem Kriterium, wie viel höher als die Bandbreite ein Punkt liegt, unterschiedlich zugeordnet. Die Gewichte aller Laserpunkte berechnen sich in den folgenden Iterationen funktional aus den Residuen der jeweils vorhergehenden Iteration. Beispielsweise mit der folgenden Gewichtsfunktion

$$w(v)=\begin{cases} 1 & |v|\leq c\sigma \\ 0 & |v|>c\sigma \end{cases} \quad c=1,0 \sim 3,0 \quad (\text{III.3-10})$$

In dem Programm sind auch andere Arten von Gewichtsfunktionen zu wählen. Es wird dadurch erreicht, dass einerseits ein fehlerhaft in der Nichtbodenpunkthypothese identifizierter Punkt wieder als Bodenpunkt identifiziert wird, andererseits ein Punkt, der

fälschlicherweise als Bodenpunkthypothese selektiert wird, von dieser Punkthypothese eliminiert werden soll.

#### **D. Darstellung von Höhenprofil**

Es gibt zwei Möglichkeiten zur Überprüfung der Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Bearbeitung von Laserpunkten, erstens einen Genauigkeitsvergleich zu dem mit anderen Verfahren, beispielsweise mit photogrammetrischem Verfahren, erzielten Ergebnis und zweitens die Perspektivdarstellung mit dem Höhenprofil oder als 3D-Perspektive. Die Genauigkeit von Laserscannerdaten wird noch im Kapitel III.5 behandelt.

## **4 Ergebnisse und Analyse der Auswertung von Laserpunkten**

### **4.1 Vorbemerkung**

Der Laserstrahl von TopScan ALTM 1020 wird durch einen Scanner quer zur Flugrichtung abgelenkt. Dadurch wird ein Geländestreifen entlang des Flugwegs mit Zick-Zack-Linie abgetastet. Die Datenaufnahme erfolgt im Lastpulse Mode. Die Grundlage der Lasertechnik und das Prinzip der Laserentfernungsmessung wurden im Kapitel II vorgestellt. Der von der Kanadischen Firma Optech gebaute Airborne Laser Terrain Mapper ALTM 1020 wird von der Firma TopScan speziell für die topographische Geländeaufnahme entwickelt. Das System arbeitet mit einer Datenrate bis zu 2000 Hz, einer Scanrate bis zu 35 Hz und ermöglicht eine variable Scanwinkel-Einstellung bis zu einem Winkel von +/- 20° (vgl. FRIESS 1998, LODDENKÄMPER 1997). Die Einstellmöglichkeiten des Systems lassen den flexiblen anwendungsorientierten Einsatz für verschiedene Fragestellungen zu. So kann bei der flächenhaften Höhenaufnahme mit einem Flugstreifen eine Fläche bis zu 700 m Breite aufgenommen werden. Für die Erfassung von schmalen Trassen können aber auch Höhenprofile mit einem geringeren Abstand der Höhenpunkte aufgenommen werden (vgl. Tabelle III.4.1 und III.4.2 aus LODDENKÄMPER 1997). Tabelle III.4.3 zeigt die Systemparameter des TopScan ALTM 1020 FRIESS (1998). Eine genaue Beschreibung und Vorstellung der entsprechenden Technik und Eigenschaften des entsprechenden Lasersystems kann man auch bei LOHR (1997), KATZENBEISSER u.a. (1996), LODDENKÄMPER (1997), RITCHIE et al. (1994), FLOOD et al. (1997), ACKERMANN u.a. (1992) und KILIAN u.a. (1994) finden.

**Tabelle III.4.1**

Punktverteilung in Abhängigkeit von der Scanrate (bei 2000 Hz Puls-Frequenz und einer Fluggeschwindigkeit von 70 m/s)				
Scanrate	Linien/Sekunde	Punkte/Sekunde	Punktabstand auf der Flugachse (m)	Punktabstand am Streifenrand (m)
1	2	1 000	35,00	70,00
5	10	200	7,00	14,00
10	20	100	3,50	7,00
20	40	50	1,75	3,50
30	60	33	1,17	2,33

**Tabelle III.4.2**

Punktverteilung auf der Scanlinie in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel				
Scanrate	Punktabstand auf Scanlinie bei Öffnungswinkel/Streifenbreite			
	5° / 182 m	10° / 365 m	15° / 546 m	20° / 730 m
1	0,2	0,4	0,5	0,7
5	0,9	1,8	2,7	3,7
10	1,8	3,7	5,5	7,3
20	3,6	7,3	10,9	14,6
30	5,5	11,0	16,4	21,9
40	7,3	14,6	21,8	29,2
50	9,1	18,3	27,3	36,5

**Tabelle III.4.3**

Reichweite des Lasers	1000 m bei 20% Reflektivität
Meßrate	65 Hz – 2000 Hz
Scanwinkel	Variabel 0° bis ± 20°
Scanfrequenz	1 Hz – 35 Hz
Streifenbreite	0 – 0,73 x Flughöhe über Grund
Entfernungsgenauigkeit	< 10 cm
Aufnahmemodi	Erster oder letzter Impuls
Winkelgenauigkeit	0,05°

**Tabelle III.4.4**

Reflektivität	Objekte am Boden
1 % - 20 %	Wasser, in Abhängigkeit von der Bewegtheit der Oberfläche und dem Scanwinkel
10 % - 30 %	Sand
30 % - 50 %	Vegetation
50 % - 80 %	Schnee und Eis

Charakteristische Eigenschaften eines Laserscannersystems sind die reflektorlose Entfernungsmessung zu fast allen natürlichen Oberflächen, die Unterscheidung von Mehrfachreflexionen und die, im Vergleich zum Bildflug, geringeren Anforderungen an die Wetterbedingungen.

- **Reflektivität**

Wie bereits in Teil I erwähnt wurde, muß der von der Objekt Oberfläche reflektierte Anteil der ausgesandten Laserenergie einen gewissen energetischen Schwellwert überschreiten, um im Empfangsteil des Laserdistanzmessers eine Messung auslösen zu können. Die Reflexion des Laserstrahls erfolgt in der Regel diffus, d.h. der Laserstrahl wird nicht gerichtet, sondern über den Raum verteilt zurückgestrahlt. Die Verteilung des

Laserstrahls und dessen Energie sind abhängig von der jeweiligen Oberfläche. Die Reflektivität der Zieloberfläche variiert für natürliche Oberflächen am Boden und beeinflusst die Reichweite des Laserdistanzmessers. Für Flächen mit geringerer Reflektivität nimmt die Reichweite ab, für Flächen mit höherer Reflektivität nimmt die Reichweite zu (FRIESS 1998, WEVER 1999). Tabelle III.4.4 zeigt die Reflektivität von TopScan (FRIESS 1998). Eine detaillierte Darstellung ist in BALSAVIAS (1999a und 1999b), LINDENBERGER (1993), ACKERMANN (1992) zu finden.

- ***Durchdringungsrate***

Für Waldgebiete und andere Vegetationsbestände wird das Verhältnis zwischen der Punktzahl auf dem Boden und der Gesamtzahl gemessener Punkte als Durchdringungsrate bezeichnet. Sie ist eine der wichtigen Parameter eines Laserscannersystems. Über Vegetation können für einen einzelnen Laserimpuls mehrere Reflexionen beobachtet werden. Das System kann diese Mehrfachreflexionen unterscheiden und nach Wunsch die erste oder die letzte Reflexion aufzeichnen. Für die topographische Geländeaufnahme von Waldgebieten ist die Fähigkeit, Laserdistanzmessungen bis zum Waldboden vornehmen zu können, von entscheidender Bedeutung. Das Ergebnis der Untersuchungen über Durchdringungsraten hängt entscheidend von der Flughöhe, dem Neigungswinkel, der Vegetationsdichte, der Jahreszeit, dem Typ der Bäume und Vegetationen usw. ab. Empirische Untersuchungen haben Durchdringungsraten zwischen 31% und 64% nachgewiesen (ACKERMANN u.a. 1992, HOSS 1997, FRIESS 1998, KRAUS u.a. 1997 und HUG 1996). In dem gesamten Gebiet unserer Untersuchung beträgt die Durchdringungsrate ca. 63%. Bei den ausgewählten vier Testgebieten **Müncheberg, Wald, Dorf und Bahn** ergaben sich Durchdringungsraten von 74%, 50%, 81% und 44%.

- ***Punktverteilung und Punktdichte***

Die Systemparameter Meßrate, Scanwinkel und Scanfrequenz sind variabel einstellbar und bestimmen die Dichte und die Verteilung der Laserpunkte auf der Erdoberfläche zusammen mit der Flughöhe über Grund, der Fluggeschwindigkeit und dem Abstand der Fluglinien. Tabelle III.4.1 und III.4.2 zeigen die Punktverteilung und den Punktabstand bei unterschiedlichen Scanner-Raten und in Abhängigkeit von unterschiedlichen Öffnungswinkeln. Die Punktverteilung und der Punktabstand am Boden sind eine Funktion von Scanwinkel, Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Scanner-Rate und Scanfrequenz. Wenn sich ein Parameter davon ändert, wird auch die Punktverteilung bzw. der Punktabstand verändert.

## **4.2 Ergebnisse der Auswertung**

In der Tabelle II.1 wurden technische Daten der vier ausgewählten Ausschnitte beschrieben. Von den Näherungswerten der getesteten Ausschnitte nach dem Opening-Operator ausgehend, werden Auswertungsergebnisse mit den im Kapitel III.3 vorgestellten robusten Parameterschätzungsmodellen zusammengestellt. Ergebnisse der morphologischen Operation wurden im Kapitel III.2.5 mit den Abbildungen verdeutlicht. Dort wurden die erzielten Ergebnisse des Ausschnittes **Dorf** abgebildet. Im Kapitel III.3 wurden unterschiedliche Ergebnisse des Ausschnittes **Müncheberg** gezeigt. Die Abb.III.4.1a, III.4.1b, III.4.2a und

III.4.2b stellen Perspektivansichten der anderen zwei Testgebiete dar. In allen fünf Zeilen der Tabelle III.4.5 sind Ergebnisse der robusten Parameterschätzung in kar(5,5), kar(9,9), nar(5,5), nar(9,9) und M-Schätzer zusammengestellt. Die in Tabelle III.4.5 verwendeten drei Fehlermodelle von Standardabweichung  $\sigma_s$ , absoluter Fehler  $\sigma_a$  und Mittelfehler  $\sigma_m$  sind wie folgt formuliert:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{V^T P V}{n-t}} \quad (\text{III.4-1})$$

$$\sigma_a = \frac{\sum |V_i|}{n} \quad (\text{III.4-2})$$

$$\sigma_m = \frac{\sum V_i}{n} \quad (\text{III.4-3})$$

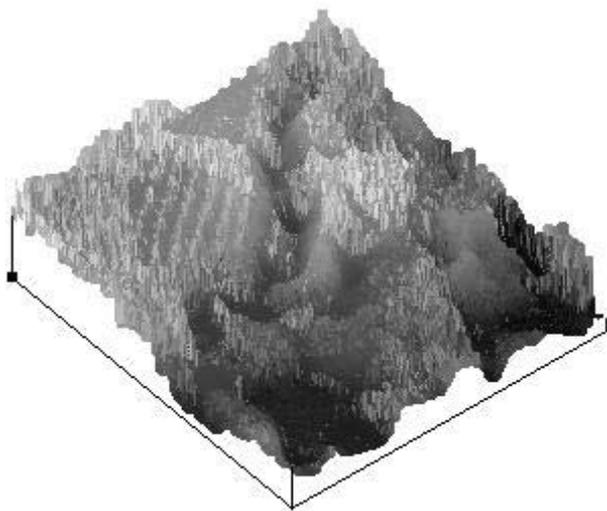
worin t die unbekannt Parameteranzahl der Schätzmodelle, n die gesamte Ausgleichungsanzahl und V der Verbesserungsvektor bedeutet.

Schätzmodell	Fehlermodell	Müncheberg	Wald	Dorf	Bahn
kar(5,5)	Standardabweichung	0,705	0,852	0,495	0,303
	Absoluter Fehler	0,574	0,759	0,334	0,174
	Mittelfehler	-0,029	-0,044	-0,005	0,002
kar(9,9)	Standardabweichung	0,691	0,825	0,497	0,303
	Absoluter Fehler	0,568	0,802	0,341	0,180
	Mittelfehler	-0,032	-0,043	0,005	0,002
nar(5,5)	Standardabweichung	0,527	0,565	0,433	0,214
	Absoluter Fehler	0,419	0,482	0,263	0,129
	Mittelfehler	-0,022	-0,007	-0,001	0,003
nar(9,9)	Standardabweichung	0,524	0,542	0,401	0,210
	Absoluter Fehler	0,421	0,521	0,278	0,128
	Mittelfehler	-0,021	-0,006	0,001	0,003
M-Schätzer	Standardabweichung	0,074	0,343	0,081	0,050
	Absoluter Fehler	0,394	0,411	0,312	0,361
	Mittelfehler	-0,375	0,333	-0,286	-0,344

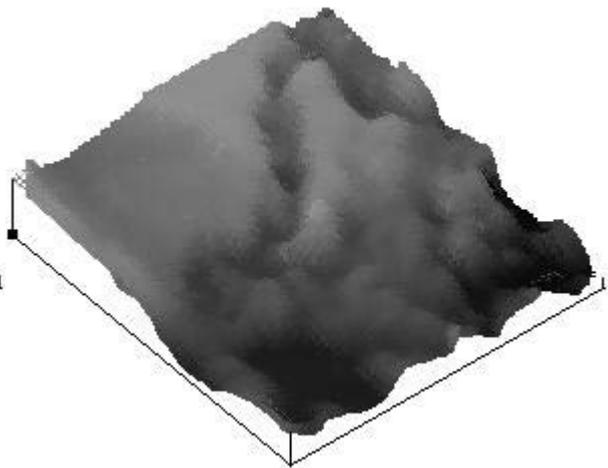
**Tabelle III.4.5:** Untersuchungsergebnisse der vier Testgebiete (Einheit: Meter)

Die Angaben dieser Ergebnisse beschreiben eine innere Genauigkeit der Modellierung für die Geländeoberfläche mit den robusten Parameterschätzungsmodellen. Diese Ergebnisse der empirischen Untersuchungen von verschiedenartigen Geländetypen haben gezeigt, dass mit den robusten Schätzmodellen eine geeignete Klasse von Modellen gefunden wurde. Das heißt, für die untersuchten Gebiete wurden mit den kar- und nar-Modellen der Ordnung (5,5) die zufriedenstellendsten Ergebnisse erzielt. Mit einer höheren Klasse von Modellen, beispielsweise die Modelle der Ordnung (9,9), ergab sich für die innere Genauigkeit keine große Änderung oder Verbesserung. Es wird jedoch mehr Rechenzeit gebraucht.

Diese Ergebnisse können auch anhand folgender Abbildungen anschaulich dargestellt werden. Die Abb.III.4.1a bis Abb.III.4.2d zeigen Perspektivansichten, Luftbilder und Höhenwertbilder von zwei Testgebieten. Die Abb.III.4.3a und III.4.3b stellen Perspektivansichten jeweils der Originaldaten und der bearbeiteten Daten vom gesamten Gebiet dar. Die Abb.III.4.4a und Abb.III.4.4b zeigen Höhenwertbilder jeweils der Originaldaten und der bearbeiteten Daten vom gesamten Gebiet.



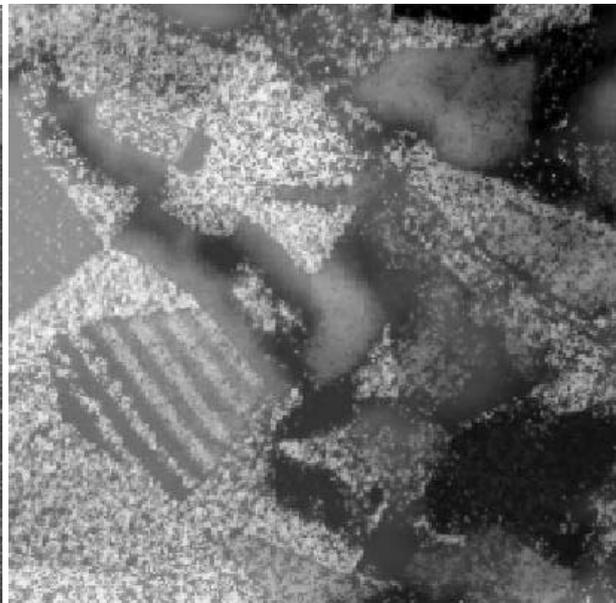
**Abb.III.4.1a:** Originaldaten von Ausschnitt **Wald**



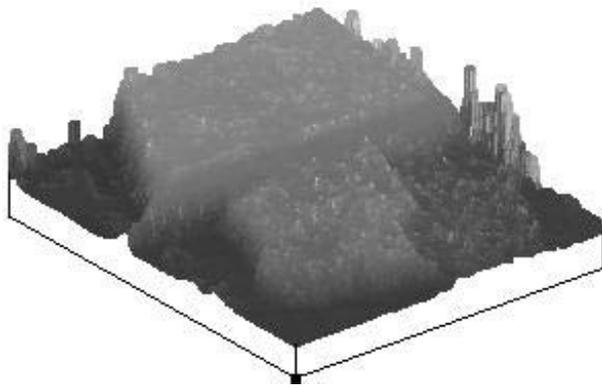
**Abb.III.4.1b:** Bearbeitete Daten von Ausschnitt **Wald**



**Abb.III.4.1c:** Luftbild von Ausschnitt **Wald**



**Abb.III.4.1d:** Höhenwertbild von Ausschnitt **Wald**



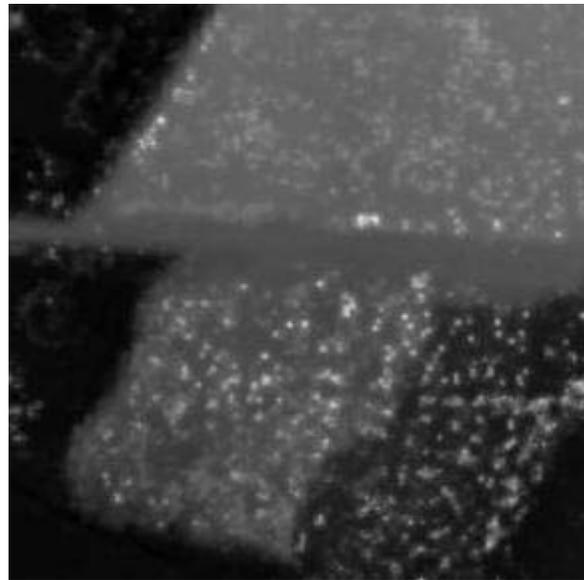
**Abb.III.4.2a:** Originaldaten von Ausschnitt **Bahn**



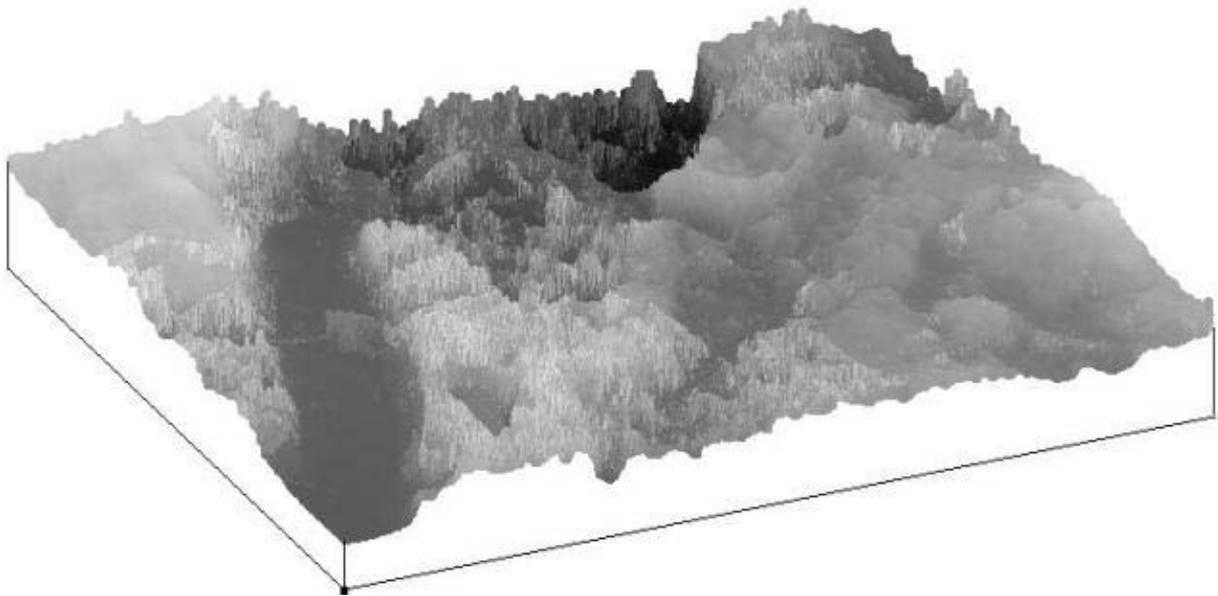
**Abb.III.4.2b:** Bearbeitete Daten von Ausschnitt **Bahn**



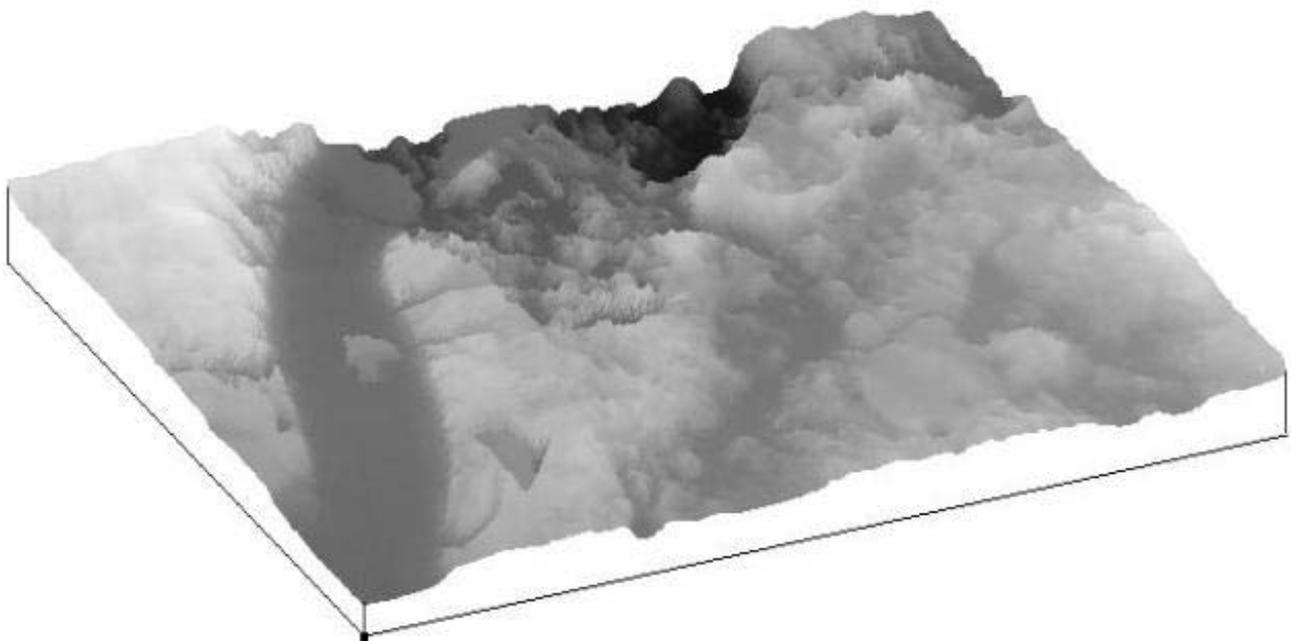
**Abb.III.4.2c:** Luftbild von Ausschnitt **Bahn**



**Abb.III.4.2d:** Höhenwertbild von Ausschnitt **Bahn**



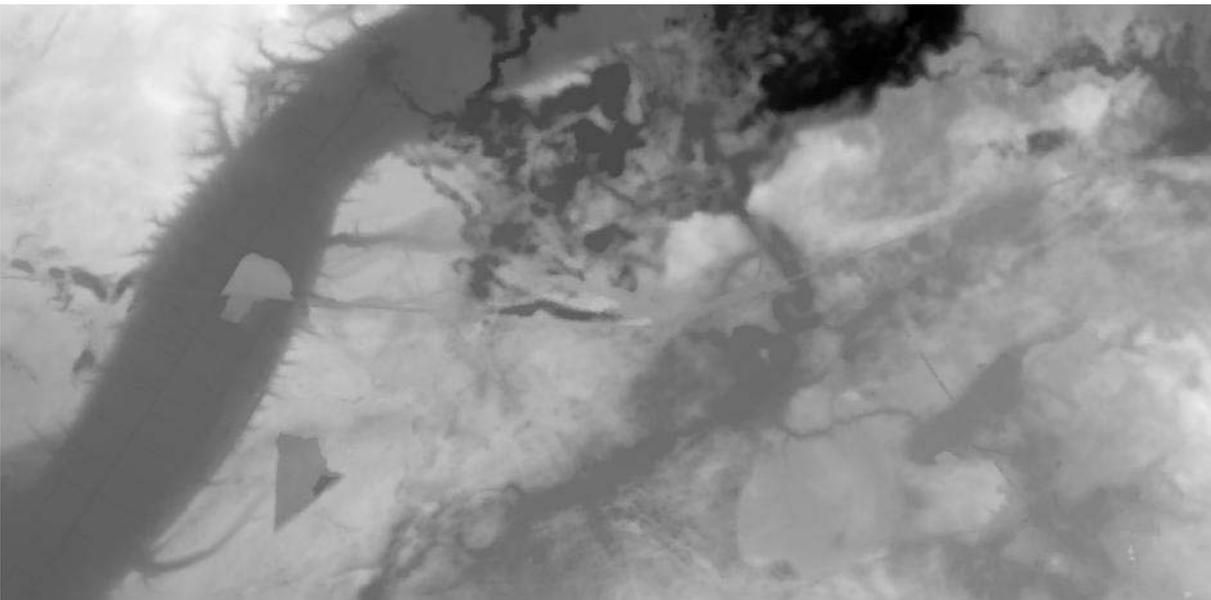
**Abb.III.4.3a:** Perspektivansicht der Originaldaten vom gesamten Gebiet



**Abb.III.4.3b:** Perspektivansicht der bearbeiteten Daten vom gesamten Gebiet



**Abb.III.4.4a:** Höhenwertbild der Originaldaten vom gesamten Gebiet



**Abb.III.4.4b:** Höhenwertbild der bearbeiteten Daten vom gesamten Gebiet

Die Analyse von Geländeprofilen mit den ähnlichen Modellen bei LINDENBERGER (1993) hat gezeigt, dass ein solcher robuster Ansatz gegenüber anderen Modellansätzen zu einem wesentlich genaueren Geländemodell führt, wie die Standardabweichung der Prädiktionsfehler ausweist. Unsere zweidimensionalen Ansätze zur Modellierung der Geländeoberfläche haben diese ähnlichen Ergebnisse auch bestätigt. Insbesondere hat sich die Vorgehensweise, morphologische Operationen zur Beschaffung einer genäherten Bodenoberfläche und anschließende Modellierung mit robusten Parameterschätzungen, als

automatisches Bearbeitungsverfahren bewährt, das keinerlei zusätzliche Eingriffe benötigte. Diese Verfahren sind auch bei schwierigen Geländeoberflächen erfolgreich verlaufen.

Die drei entwickelten Parameterschätzungsmodelle haben ähnliche Ergebnisse bei allen Testgebieten erzielt. Das nar-Modell und der M-Schätzer haben mehr Robustheit aufgewiesen. Das kar-Modell braucht jedoch weniger Rechenzeit, weil beim kar-Modell nur die halbe unbekannte Parameterzahl im Vergleich zum nar-Modell und M-Schätzer gebraucht wird. Die Anwendung von drei Modellen kann je nach unterschiedlichen Gebieten und Zielsetzungen gewählt werden.

Die Ansätze haben auch ihre Grenzen (wie die Ansätze in LINDENBERGER 1993). Es handelt sich um folgende Geländefälle:

- *Ein sehr dichtes Waldgebiet, wo auf einer großen Geländeoberfläche (z.B. mehrere hundert Quadratmeter) kein Laserstrahl auf der Erdoberfläche vorliegt,*
- *Ein Bergkegel, auf dem einerseits kein Laserstrahl auf die Erdoberfläche durchdringt, andererseits ein Fenster bei der morphologischen Operation zu groß gewählt wurde.*

Der erste Fall kommt normalerweise selten vor. Dafür kann eine Befliegung im Winter durchgeführt werden, wenn die Bäume nicht belaubt sind. Für den zweiten Fall können robuste Schätzmodelle bei der Modellierung der Geländeoberfläche angewendet werden, dadurch kann die Gefahr möglichst beseitigt oder mindestens vermindert werden. Auf alle Fälle soll ein Indikator entwickelt werden, der anzeigen kann, an welchen Stellen eine örtliche Kontrolle notwendig ist.

### 4.3 Analyse der Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse beschränkt sich hauptsächlich auf die Überprüfung der automatischen Identifikation der Bodenpunkte. Das Ergebnis der Identifikation der Bodenpunkte kann entweder stichprobenartig an verschiedenen Teilgebieten mit unterschiedlichen Bedeckungen an Hand von graphischen Darstellungen visuell oder durch einen Vergleich mit anderen Verfahren, beispielsweise der Photogrammetrie oder der Tachymetrie überprüft werden. Eine visuelle Überprüfung der automatischen Identifikation der Bodenpunkte ist in dem vergangenen Kapitel mehrmals durch Perspektivansichten und Höhenprofile vorgenommen worden. Das photogrammetrische oder tachymetrische Verfahren ist eine andere Überprüfungsmethode. Sie sollen die Stellen überprüfen und aufdecken, die bei der automatischen Identifikation Probleme und Fehler machen oder zu Schwierigkeit führen können. Es handelt sich im wesentlichen um folgende zwei Arten von Fehlern bei der automatischen Identifikation (LINDENBERGER 1993):

- ***Fälschliche Identifikation von Bodenpunkten als Nichtbodenpunkte***

Diese Art von fälschlicher Klassifizierung kommt normalerweise dann vor, wenn in einem Gebiet, in dem sehr viele Vegetationen mit differenzierten Kleinformen vorliegen, ein Strukturfenster zu groß oder bei den morphologischen Operatoren eine Bandbreite zu klein gewählt wird. Durch robuste Parameterschätzung nach der morphologischen Operation kann diese Gefahr vermindert werden.

- ***Fälschliche Identifikation von Nichtbodenpunkten als Bodenpunkte***

Im Vergleich zu der ersten fälschlichen Klassifizierung von Bodenpunkten als Nichtbodenpunkte ist diese Art der fälschlichen Identifikation viel wichtiger und bedeutender. Von LINDENBERGER (1993) wurde diese Art von Fehlern bei der Laserprofilmessung untersucht. Die fälschliche Identifikation von 5,5% in Nadelwäldern und von 9,2% in Laubwäldern haben gezeigt, dass diese Gefahr auftritt, insbesondere wo in dichten Wäldern über längere Strecken keine Durchdringung des Laserstrahls auf den Waldboden möglich ist. Bei der flächenhaften Lasermessung ist diese Gefahr vielfach vermindert. Zum einen ist die Gefahr, dass über größere Flächen keine Durchdringung des Laserstrahls auf den Waldboden erfolgt, viel geringer als bei der Laserprofilmessung. Der zweite Grund liegt darin, dass eine zweidimensionale morphologische Operation und ein zweidimensionales robustes Schätzmodell bei der Bearbeitung von Laserscannerdaten angewendet werden. Außerdem kann eine Glättung nach der Identifikation auf der klassifizierten Geländeoberfläche vorgenommen werden. Diese Tatsache und die Effekte kann man in allen Abbildungen der vergangenen Abschnitte in den Perspektivansichten und Höhenprofilen beobachten und erkennen. Die kleinen und niedrigen Vegetationen an einem kleinen See und Moor wurden ganz weg gefiltert, während die Kanten auf Waldboden und Deich dagegen unverändert blieben (Abb.III.2.3a, III.2.3b und Abb.III.3.2a, III.3.2b usw.). Aus Abb.III.4.2a und III.4.2b ist es auch gut erkennbar, dass fast alle Vegetationen und kleinformatige Störungen in einem solchen schwierigen Testgebiet weggefiltert wurden und die Kanten vom Bahnhof unverändert blieben. In allen in den vergangenen Kapiteln dargestellten Höhenprofilen kann man die Identifikation auch visuell überprüfen.

## **5 Genauigkeitsbetrachtung von Laserscannerdaten**

### **5.1 Einführung**

Bei der Genauigkeitsuntersuchung müssen sämtliche Fehlereinflüsse, die von den Systemkomponenten verursacht werden, wie auch die automatische Bearbeitung von Laserpunkten in Betracht gezogen werden. Insbesondere schließen die Genauigkeitsuntersuchungen die folgenden Teile ein:

- *Die zufälligen und systematischen Fehler der Systemkomponenten (GPS, INS und Laserdistanzmesser),*
- *Systematische Fehler der Zeitsynchronisation und der Synchronisation von Laser-, GPS- und INS-Messungen,*
- *Die Qualität der Kalibrierung der Einzelheiten und des Gesamtsystems,*
- *Die geodätische Datumstransformation,*
- *Die Ableitung der Lasermessungen auf der topographischen Geländeoberfläche.*

Die Genauigkeitsanalyse von Laserscannerdaten wird normalerweise über die berechneten Koordinaten der Laserpunkte im Bezugssystem der Landesvermessung vorgenommen. Die absolute Höhengenaugigkeit der Laserpunkte wird dabei als wichtigstes Kriterium der Genauigkeitsanalyse betrachtet. Die Vorgehensweise der Genauigkeitsanalyse soll dann nach den oben untergliederten Kriterien erfolgen. Das heißt, jeder oben aufgeführte Fehlereinfluß

aus der einzelnen Komponente soll zunächst untersucht werden. Dann werden die Synchronisationen von GPS-, INS- und Laserentfernungsmesser analysiert und untersucht. In der Systemkalibrierung werden systematische Fehler bei der GPS-Positionierungsmessung und INS-Neigungsmessung bestimmt und als Korrekturwerte in die Berechnung der Laserpunktkoordinaten im Koordinatensystem WGS 84 eingeführt. Anschließend müssen die geodätischen Datumstransformationen unter der Berücksichtigung des Geoids erfolgen.

Mit der Einführung der relativen kinematischen Positionierungsbestimmung kann die Genauigkeit von GPS zwischen Zentimeterbereich und Dezimeterbereich erreichen. Diese Angabe ist bei unterschiedlichen Entfernungen von Referenzstationen variabel.

Die Neigungsorientierung des gesamten Lasersystems wird über drei senkrecht zueinander angeordnete Kreisel bestimmt. Die Genauigkeit wird dann auch durch die Genauigkeit dieser drei Winkelgrößen angegeben. Die Genauigkeit bei INS wird durch die relative und absolute Genauigkeit beschrieben und bestimmt.

Praktische Untersuchungen zur Genauigkeit der genannten Systemkomponenten sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die genaueren Beschreibungen der Systemgenauigkeit sind beispielsweise bei BALTSAVIAS (1999b, 1999c), KATZENBEISSER u.a. (1996), ACKERMANN u.a. (1992), LINDENBERGER (1993), WEHR u.a. (1999), HUG (1996), HARTL u.a. (1996), KILIAN u.a. (1994) zu finden.

## 5.2 Vergleich mit photogrammetrischen Auswertungsmethoden

Im Abschnitt III.5.1 wurde die allgemeine Genauigkeitsbetrachtung eines Laserscannersystems beschrieben. Als Anwender interessiert man sich mehr für die absolute Genauigkeit von Laserscannerdaten. Zur Überprüfung der absoluten Genauigkeit von Laserpunkten gibt es normalerweise zwei Methoden. Erstens können die Laserpunkte mit den durch photogrammetrische Messung erfaßten Punkten verglichen werden. Zweitens kann ein Vergleich der Punkthöhen zwischen Laserscanning und Tachymetrie vorgenommen werden.

Zur Durchführung der photogrammetrischen Überprüfung werden die als Bodenpunkte identifizierten Laserpunkte verwendet. Zunächst soll ein Testgebiet ausgewählt werden. Die Luftbilder dieses Gebietes liegen ebenfalls vor. Die identifizierten Bodenpunkte werden im analytischen Plotter in der XY-Position der Laserpunkte angefahren und vom Operateur die Höhe stereoskopisch gemessen. Aus den Geländehöhen der Laserpunkte und der photogrammetrischen Kontrollmessung werden dann Differenzen berechnet und der Vergleich vorgenommen. Als Kriterien des Vergleiches und der Überprüfung können die Standardabweichung  $\sigma_s$ , absoluter Fehler  $\sigma_a$  und Mittelfehler  $\sigma_m$  wie im Abschnitt III.4.2 verwendet werden.

Von KRAUS u.a. (1997) wurde der Vergleich zwischen photogrammetrischen Messungen und Laserscannermessungen mit TopScan intensiv untersucht. Daraus wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- *Das Laserscanningverfahren hat im offenen Gelände die gleiche Genauigkeit wie ein photogrammetrisches Verfahren im offenen Gelände aus einem Bildmaßstab 1:7000,*

- *Das Laserscanningverfahren ist im Wald um ein Vielfaches besser als ein photogrammetrisches Verfahren im Wald.*

Von LINDENBERGER (1993) wurde die Höhengenaugigkeit der Lasermessung in Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen untersucht. Daraus wurde abgeschätzt, dass die Höhengenaugigkeit der Laserpunkte von der Bodenbedeckung und von der Geländeneigung abhängt. Aus vielen Veröffentlichungen kann die Genauigkeitsgröße von ca. 0,1 m bis zu 0,5 m entnommen werden. Diese ähnlichen Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen können beispielsweise bei HUISING et al. (1998), BALTSAVIAS (1999a), PETZOLD et al. (1999), PEREIRA et al. (1999), IRISH et al. (1999), AXELSSON (1999), HUG (1996), KRAUS u.a. (1997), KILIAN u.a. (1994), HARTL u.a. (1996), ACKERMANN u.a. (1992) gefunden werden.

### **5.3 Vergleich mit tachymetrischen Messungen**

Neben den photogrammetrischen Verfahren können Laserpunkte auch mit tachymetrischen Kontrollmessungen verglichen werden. Nach LINDENBERGER (1993) haben die tachymetrischen Kontrollmessungen gegenüber der photogrammetrischen Überprüfung den Vorteil, dass sie direkt in der Örtlichkeit vorgenommen werden. Neben der Überprüfung der Höhengenaugigkeit kann damit an Ort und Stelle auch entschieden werden, ob die Laserpunkte tatsächlich auf der Geländeoberfläche oder auf der niedrigeren Vegetation liegen. Allerdings sind die Nachteile der tachymetrischen Überprüfung der Höhengenaugigkeit auch ganz klar, da der personelle Aufwand und der Aufwand von Geräten erheblich hoch sind. Außerdem liegen besondere Schwierigkeiten der Überprüfung mit Tachymetrie darin, dass die Überprüfung in den meisten dicht bewaldeten Gebieten überhaupt nicht durchgeführt werden kann.

Die tachymetrische Überprüfung der Höhengenaugigkeit der Laserpunkte hat auch zu ähnlichen Ergebnissen wie mit der Photogrammetrie geführt. Die Genauigkeitsgröße liegt auch zwischen 0,1 m und 0,5 m. Sie kann beispielsweise bei LINDENBERGER (1993) und KRAUS u.a. (1997) gefunden werden.

## IV DHM-Aufbau und Interpolation

### 1 Einführung

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 mit. Auf diese Informationen kann im Bereich des amtlichen Vermessungswesens, vielen Ingenieur Anwendungen, 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 Höhenmodelle 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*
- d) *die direkte Erfassung durch Laserscanning.*

Zu a), b) und c) können auch ausgewählte Höhenpunkte gemessen werden. Dies können sein:

- *Höhenpunkte auf Geländebruchkanten*
- *Kuppen-, Mulden- und Sattelpunkte*
- *Punkte auf Gerippllinien.*

Beim Laserscanning lassen sich Punkte auf Geländekanten und Gerippllinien nicht direkt messen. Aber dieses Verfahren liefert eine Reihe von Vorteilen beispielsweise aktuelle Erfassung von beliebigen Gebieten, gute Erfassungsmöglichkeit in Waldgebieten, geringer Personaleinsatz und weniger Kostenaufwand. Außerdem kann dieses Verfahren auch sehr dichte Meßpunkte liefern, mit deren Hilfe Geländekanten extrahiert werden können. Diese Aufgabenstellung der Extraktion von Geländebruchkanten wird im kommenden Kapitel V diskutiert und behandelt.

Die *Datenaufbereitung* dient in erster Linie der Beseitigung von fehlerhaften Daten. Beim Laserscanningverfahren bedeutet dies, die Bodenpunkte von den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Nichtbodenpunkten zu trennen. Für die anderen Verfahren bedeutet die Datenaufbereitung eine Qualitätskontrolle der Daten.

Die *Approximation* hat hier zwei Aufgaben. Die erste Aufgabe ist die Beseitigung von zufälligen Meßfehlern durch eine Approximation (*Glättung*), die zweite Aufgabe ist die Bereitstellung von Rastermodellen durch eine Interpolation.

## 2 Aufgabenstellung

Die Laserscanningtechnik bietet die Möglichkeit, die Geländeoberfläche besonders in Waldgebieten *aktuell und direkt* zu messen. Die gemessenen Laserpunkte enthalten damit Punkte, die auf der topographisch aufzunehmenden Geländeoberfläche liegen, die als Bodenpunkte betrachtet und behandelt werden, darüber hinaus auch die auf den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Objekten liegenden Punkte. Die Datenaufbereitung für den DHM-Aufbau mit Laserscannerdaten wurde im Kapitel III bereits beschrieben und diskutiert. In diesem Kapitel wird der dritte Arbeitsschritt, also die Approximation beim DHM-Aufbau diskutiert.

Die erste Aufgabe, die Glättung zur Beseitigung von noch bleibenden zufälligen Meßfehlern wird im Abschnitt IV.6 und V.4.4 vorgestellt. Für die zweite Aufgabe, die DHM-Interpolation mit den unregelmäßig verteilten Laserpunkten steht eine Vielzahl von Programmen und methodischen Beschreibungen zur Verfügung.

Es soll im folgenden nicht auf ein Modell der Interpolation eingegangen werden. Da es nicht Aufgabe dieser Arbeit sein kann, einzelne Modelle zu werten, wird in diesem Teil nur ein kurzer Überblick über vorhandene Interpolationsverfahren gegeben. Danach wird ein Höhenlinienbild aus Laserpunkten dargestellt und man kann dieses Höhenlinienbild mit der topographischen Karte vergleichen.

## 3 Aufbau digitaler Höhenmodelle (DHM)

### 3.1 Vorbemerkung

Bei der Datenaufbereitung geht es im wesentlichen um eine Filterung der Primärdaten, um die kleinförmigen Störungen von DHM-Daten zu beseitigen. Für den DHM-Aufbau sind die Primärdaten zu strukturieren. Für die Strukturierung der Daten und damit auch für die Festlegung der Struktur des digitalen Höhenmodells sind derzeit drei Varianten gebräuchlich (AUMANN 1994):

- a) *Strukturierung mittels Dreiecksnetzen (Dreiecks-DHM)*
- b) *Strukturierung mittels Gitternetzen (Gitter-DHM)*
- c) *Strukturierung mittels gemischter Netze.*

### 3.2 Dreiecks - DHM

Unter einem Dreiecksnetz wird eine Menge von unregelmäßigen Dreiecken verstanden. Dabei repräsentieren die Eckpunkte der Dreiecke die erfaßten Meßdaten, womit jeder Primärdatenpunkt Knotenpunkt des resultierenden Dreiecksnetzes wird. Der Aufbau eines Dreiecksnetzes (Dreiecksvermaschung oder Triangulation) kann mittels verschiedener Algorithmen erfolgen. Um ein Dreiecksnetz aufzubauen, müssen Vorschriften angegeben

werden, nach welchen eine Dreiecksvermaschung durchzuführen ist. Eine häufig verwendete von DELAUNEY vorgeschlagene Vorschrift zur Dreiecksbildung lautet wie folgt:

- *Ein Dreieck wird dann aufgebaut, wenn der von drei Dreiecksseiten eingeschlossene Kreis keine weiteren Punkte mehr enthält.*

Es gibt viele Beschreibungen von Algorithmen und Software-Systemen zur Dreiecksvermaschung. Beispielsweise können bei REINHARDT (1991), KOCH (1985), AUMANN (1994) die genaue Beschreibung und Erweiterung der Verfahren der Dreiecksvermaschung gefunden werden.

### **3.3 Gitter - DHM**

Bei Gitter-DHM werden die gitterförmig angeordneten DHM-Punkte durch eine Interpolation oder Approximation ermittelt. In einem Gitternetz wird eine gitterförmige Anordnung der DHM-Daten nach X- und Y-Koordinaten mit vorgegebener Maschenweite geordnet. Die Maschenweite kann empirisch oder nach der Vorschrift der Landesvermessung bestimmt werden. Eine rechnerische Abschätzung der günstigen Maschenweite wird immer empfohlen. Eine Vertiefung zu diesem Thema kann man beispielsweise bei KRAUS (1984), MCCULLAGH (1988), FRITSCH (1988), BALCE (1987), BORKOWSKY (1994) finden.

Weil die Meßdaten vom Laserscanning nicht gitterförmig angeordnet sind, müssen die Höhenwerte an den Gitterpunkten durch eine Approximation bzw. eine Interpolation aus den bearbeiteten Laserbodenpunkten ermittelt werden. Zur DHM-Interpolation stehen viele Softwarepakete zur Verfügung, beispielsweise SCOP, HIFI, SURFER usw.

Neben Dreiecks- und Gitter-DHM wurde beispielsweise auch ein gemischtes Modell besprochen (EBNER u.a.1989, REINHARDT 1991, DÜSEDAU u.a.1987), die sowohl Dreiecks-DHM als auch Gitter-DHM beinhalten können. Dies nennt man auch Strukturierung mittels hybrider Netze.

Ein Vergleich der drei genannten Strukturen wurde durch AUMANN (1994) wie folgt beschrieben:

- *Dreiecksnetze ermöglichen eine gute Anpassung an die Primärdaten. Der Nachteil der Dreiecksnetze ist ihre komplizierte Struktur und Speicherung.*
- *Gitternetze weisen eine einfache Datenstruktur auf, wodurch eine sehr einfache und effektive Verwaltung möglich ist. Durch die Interpolation bzw. Approximation der Gitterpunkte ist eine exakte Anpassung an die Primärdaten nicht mehr möglich.*
- *Die gemischte Struktur ermöglicht die Vereinigung der Vorteile beider Konzepte. Der Nachteil ist eben die Datenverwaltung.*

In der vorliegenden Arbeit wird der Aufbau von DHM durch Gitternetze durchgeführt.

## 4 DHM- und Grauwertinterpolation

### 4.1 Vorbemerkung

Unabhängig vom eingesetzten Interpolationsverfahren ist eine grundlegende Aufgabenstellung das Auffinden der zu einem Gitterpunkt nächstgelegenen Stützpunkte, in der Regel nach Quadranten oder Oktanten getrennt, um eine gute räumliche Verteilung zu gewährleisten. Hierzu müßten normalerweise in jedem Gitterpunkt die Entfernungen zu allen Stützpunkten berechnet und ihre Zuordnung zum jeweiligen Quadranten oder Oktanten bestimmt werden.

### 4.2 Interpolation mit Gewichtsfunktionen

Die Untersuchung von Prädiktionmethoden mit Hilfe von Gewichtsfunktionen stützt sich auf den funktionalen Zusammenhang zwischen den Stützwerten und der Prädiktionfunktion. Gewichtsfunktionen beschreiben den Einfluß eines Stützwertes auf die Prädiktionfunktion. Sie zeigen insbesondere, welche Auswirkung die Veränderung eines Stützwertes auf die Prädiktionsfläche hat.

Die Gewichtsfunktionen lassen sich so beschreiben: Zerlegt man einen beliebigen Prädiktionwert  $H_i$  an der Stelle  $i$  in die Komponenten  $h_1$  bis  $h_n$ , mit denen die einzelnen Stützpunkte an der Bildung des prädizierten Wertes  $H_i$  beteiligt sind, so kann man  $H_i$  schreiben als

$$H_i = h_1 + h_2 + \dots + h_n . \quad (\text{IV.4-1})$$

Jede Komponente  $h_j$  ist das Produkt aus dem Stützwert  $S_j$  des dazugehörigen Stützpunktes  $j$  und dem Gewicht  $P_j$ , mit dem der Stützwert  $S_j$  zur Bildung des prädizierten Wertes  $H_i$  beiträgt. Beschreibt man das Gewicht  $P_j$  des Stützpunktes  $j$  durch die Flächenparameter  $x$  und  $y$ , so ergibt sich die Gewichtsfunktion  $P_j$  des Stützpunktes  $j$  an einer beliebigen Stelle  $(x, y)$  als

$$P_j = f_j(x, y) \quad (\text{IV.4-2})$$

Diese Gewichtsfunktion definiert für jeden Prädiktionpunkt  $i$ , mit welchem Gewicht der Stützwert des Punktes  $j$  in die Berechnung des prädizierten Wertes  $H_i$  eingeht.

Von WILD (1983) wurden unterschiedliche Gewichtsfunktionen  $P_j$  beschrieben und untersucht. In diesem Teil werden beispielsweise  $P_j = \frac{1}{1+d}$ ,  $P_j = \frac{1}{1+d^2}$ ,  $P_j = \exp(-\frac{d^2}{m^2})$ ,  $P_j = \exp(-\frac{d}{m})$ ,  $P_j = \exp(-d)$  verwendet und untersucht. Der Parameter  $d_j$  ist die Entfernung zwischen dem zu interpolierenden Punkt und dem Stützpunkt. Der Parameter  $m$  kann mittels

der maximalen Entfernung zwischen dem zu interpolierenden Punkt und den Stützpunkten bestimmt werden.

### 4.3 Polynominterpolation und Polynomapproximation

Die Verwendung von Polynomflächen als Interpolations- bzw. Approximationsfunktionen ist sehr gebräuchlich. Polynomfunktionen ergeben sich durch eine Linearkombination von Gliedern, die aus ganzzahligen, positiven Potenzen der Lageparameter  $x$  und  $y$  gebildet werden. Wenn der Vektor  $\vec{f}$  die Potenzglieder und der Vektor  $\vec{k}$  die Koeffizienten bedeuten, lautet die allgemeine Gleichung für Polynomfunktionen

$$Z = \vec{f}^T \vec{k} \quad (\text{IV.4-3})$$

mit

$$\vec{f}^T = [1 \quad x \quad y \quad xy \quad x^2 \quad y^2 \quad \dots]$$

$$\vec{k} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6 \quad \dots]$$

Bei der Verwendung von Polynomfunktionen werden bestimmte Potenzglieder ausgewählt, so dass eine Flächenschar mit den Koeffizienten  $\vec{k}$  sowohl für Stützwerte als auch für Flächenableitungen verwendet werden kann.

### 4.4 Lineare Prädiktion nach der Methode der kleinsten Quadrate

Für die Interpolation mittels der Methode der kleinsten Quadrate wie mittels anderer Verfahren ist es am wichtigsten, eine Kernfunktion zu wählen. An die Stelle der Kernfunktion tritt die Kovarianzfunktion. Sie hat beispielsweise die Form

$$Cov = C(0)e^{-\frac{d^2}{m^2}} \quad (\text{IV.4-4})$$

Bei KRAUS (1984) und WILD (1983) wurde diese Funktion genau untersucht. Diese Gauß'sche Kovarianzfunktion definiert die Kovarianz zwischen zwei Punkten mit der Entfernung  $d$ . Der Parameter  $m$  bedeutet hier die Bewegtheit der Geländeoberfläche. Dieser Parameter führt dann zu einem rascheren oder langsameren Absinken der Kovarianzen mit wachsender Entfernung  $d$ . Nach WILD (1983) wurde

$$C(0) = 1 - f^2 \quad (\text{IV.4-5})$$

gewählt. Der Parameter  $f < 1$  wird dann als Filterbetrag bezeichnet und kann auch empirisch bestimmt werden.

Nach der Festsetzung der Kovarianzfunktion wird bei der linearen Interpolation und Prädiktion nach der Methode der kleinsten Quadrate der Prädiktionswert nach folgender Formel ermittelt

$$Z_i = \vec{S}^T C_{\Sigma}^{-1} \vec{h} \quad , \quad (IV.4-6)$$

wobei der Vektor  $\vec{S}$  die Kovarianz  $Cov(k, i)$  zwischen dem zu interpolierenden Punkt und den Stützpunkten, die Matrix  $C_{\Sigma}$  die Varianz  $V$  (normalerweise gleich 1) und die Kovarianz  $Cov(k, j)$  zwischen den Stützpunkten und der Vektor  $\vec{h}$  die zentrierten Geländehöhen enthält. Vektoren und die Matrix in Gleichung (IV.4-6) können in die folgende Form umgewandelt werden:

$$\vec{S}^T = [Cov(1,i) \quad Cov(2,i) \quad \dots \quad Cov(n,i)]$$

$$C_{\Sigma} = \begin{bmatrix} V & Cov(1,2) & Cov(1,3) & \dots & Cov(1,n) \\ Cov(2,1) & V & Cov(2,3) & \dots & Cov(2,n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Cov(n,1) & Cov(n,2) & Cov(n,3) & \dots & V \end{bmatrix} \quad (IV.4-7)$$

$$\vec{h}^T = [h_1, h_2, h_3, \dots, h_n]$$

Die Parameter  $m$  und  $f$  in der Gleichung (IV.4-4) und (IV.4-5) wurden von WILD (1983) genau untersucht. Der Parameter  $m$  wird mittels der maximalen Entfernung zwischen dem zu interpolierenden Punkt und den Stützpunkten bestimmt. Der Parameter  $f$  steuert den Grad der Filterung. Bei der Auswertung von Laserscannerdaten zeigt es sich, dass bei einem relativ kleinen Parameter  $f$  gute Interpolationsergebnisse erzielt werden können.

## 5 Genauigkeitsbetrachtung der Interpolation

### 5.1 Vorbemerkung

Die Oberflächengestalt des Geländes folgt in der Regel keiner mathematischen Funktion. Es ist daher wichtig festzuhalten, dass sich unbekannte Höhen aus umgebenden bekannten Höhenwerten nicht im eigentlichen Sinn berechnen, sondern nur annähern (interpolieren) lassen. Die Genauigkeit der Interpolation, also das Maß der Übereinstimmung von tatsächlichen zu interpolierten Höhen, ist im wesentlichen abhängig von

- *Der Stützpunktdichte und -verteilung,*
- *Dem Einbeziehen morphologischer Informationen beispielsweise Bruchkanten,*
- *Der Geländeform,*
- *Dem Interpolationsverfahren sowie*
- *Der Genauigkeit der Primärdaten.*

Das Ziel des vorliegenden Arbeitsteiles liegt nicht darin, ein allgemeines Verfahren der Genauigkeitsuntersuchungen und einen allgemein gültigen Algorithmus der Interpolation zu finden. Dieser Abschnitt stellt für die DHM- oder Grauwertinterpolation, ausgehend von Laserscannerdaten, nur einen Katalog zur Beurteilung der Interpolationsqualität zusammen. Für eine allgemeine Abhandlung dieser Thematik kann dabei auf KRAUS (1984), LINDER (1994), REISS (1985), REINHARDT (1991), DÜSEDAU u.a. (1987), WILD (1983) Bezug genommen werden.

## **5.2 Kriterien der Genauigkeitsuntersuchung**

Zur greifbaren, also insbesondere quantitativen Beurteilung der Genauigkeit eines interpolierten Höhenmodells (oder Grauwertes) können mehrere Aspekte betrachtet werden, beispielsweise die Wiederholgenauigkeit in Stützpunkten, der Höhenfehler für jede interpolierte Höhe sowie der sich hieraus und aus der Geländeneigung ergebende Lagefehler abgeleiteter Höhenlinien. Ferner soll das Höhenlinienbild nicht nur geometrisch ausreichend genau sein, sondern auch in morphologischer Hinsicht die Form charakteristisch wiedergeben (FINSTERWALDER 1990, KRAUS 1991). In der vorliegenden Arbeit werden empirische Verfahren angewendet.

### **5.2.1 Analytische Verfahren**

Diese Verfahren basieren auf der Berechnung (Abschätzung) des Unterschiedes zwischen dem ursprünglichen und dem rekonstruierten Signal, welcher der Genauigkeit des DHMs entspricht. Dazu wurde beispielsweise das Konzept der Übertragungsfunktion angewendet (TEMPFLI 1982, KRAUS 1984). Diese Funktion beschreibt, wie die Amplituden eines Signals (Profils) durch ein Übertragungssystem gedämpft werden. Bei diesem Verfahren wurde das Profil durch eine Fourierreihe dargestellt. Durch die Bestimmung der Koeffizienten der Fourierreihe mit den vorgegebenen Stützpunkten kann das Leistungsspektrum (Amplitudenspektrum) berechnet werden.

Die Analyse der Fourierreihe bei der Genauigkeitsabschätzung kann man auch bei BALCE (1987) und MEIER (1988) finden. Diese Idee basiert darauf, dass die gemessene Geländeoberfläche als diskretes Signal aufgefaßt und dessen diskrete Fouriertransformierte berechnet wird. Danach wird die inverse Form der Fouriertransformierten berechnet, mit deren Hilfe das ursprüngliche Profil darstellbar ist. Damit wird eine Grenzfrequenz gefunden. Mit Hilfe dieser Grenzfrequenz kann die Rekonstruktionsgenauigkeit und ein notwendiger Digitalisierungsabstand (*Maschenweite*) ermittelt werden (FRITSCH 1988).

### **5.2.2 Empirische Verfahren**

Die Empirische Abschätzung der Interpolationsgenauigkeit basiert auf dem Verfahren der Interpolationsfläche mit den flächenhaft verteilten Kontrollpunkten. Von WILD (1983) wurde diese Frage sehr genau beschrieben und untersucht. Über die Differenzen zwischen den Kontrollpunkthöhen und den entsprechenden DHM-Höhen (Interpolationshöhen) können dann verschiedene Abschätzungsverfahren eingeführt werden.

Der Prädiktionsfehler  $Z\varepsilon$  ist als Unterschied zwischen der fehlerfreien Prädiktionsfläche  $Zs$  und der tatsächlich prädizierten Fläche  $Zp$  definiert

$$Z\varepsilon = Zs - Zp, \quad (\text{IV.5-1})$$

woraus sich die Prädiktionsgenauigkeit nach

$$\sigma\varepsilon = \sqrt{[Z\varepsilon Z\varepsilon]} \quad (\text{IV.5-2})$$

ergibt. Diese theoretische Genauigkeitsbetrachtung kann auch bei WILD (1983) und BALCE (1987) gefunden werden. Dabei müssen die Stützpunkte als fehlerfrei betrachtet werden. Im folgenden soll kurz darauf eingegangen werden, durch welche Maße die geometrische Genauigkeit von DHM aus diesen Differenzen anhand von flächenhaft verteilten Kontrollpunkten berechnet werden kann.

### 5.2.2.1 *Quadratischer Mittelwert - RMS*

Ausgehend von den Differenzen zwischen den Kontrollpunkthöhen ( $H_k$ ) und den entsprechenden DHM-Höhen ( $H_{DHM}$ ) wird in der Regel der RMS-Wert als geeignetes Maß zur Schätzung der Genauigkeit angesehen (AUMANN 1994, REINHARDT 1991, LI 1988)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum DH_i^2}{N}} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (\text{IV.5-3})$$

mit

$$DH_i = H_k - H_{DHM}.$$

### 5.2.2.2 *Standardabweichung - SD*

Neben dem RMS-Wert wird auch die Standardabweichung SD der Kontrollpunkte als Genauigkeitsmaß empfohlen

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (DH_i - \mu)^2}{N}} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (\text{IV.5-4})$$

mit

$$DH_i = H_k - H_{DHM}$$

$$\mu = \frac{\sum DH_i}{N}$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

Zu einem Genauigkeitsmaß kann wie im folgenden dargestellt werden:

$$M_{DHM} = \mu \pm SD \quad (\text{IV.5-5})$$

### 5.2.2.3 *Maximaler Fehler und minimaler Fehler*

Von REINHARDT (1991) wurden auch die Momente höherer Ordnung als Genauigkeitsmaße berechnet. Außerdem können der maximale Fehler (*Max*) und der minimale Fehler (*Min*) der DHM-Interpolation als Genauigkeitsmaße eingeführt werden.

### 5.2.3 *Morphologische Genauigkeitsschätzung*

Die oben erwähnten Verfahren können im allgemeinen als die geometrischen Qualitätskriterien für digitale Höhenmodelle betrachtet werden. Ferner soll auch in morphologischer Hinsicht die Richtigkeit und Charakteristik der Formen, also die Wiedergabe der Geländeoberfläche untersucht werden. Erwähnt sei an dieser Stelle eine bei FINSTERWALDER (1990) und KRAUS (1991) vorgeschlagene Methode, bei der die Parameter *Abstandsfehler* (Lot von Sollfläche auf Istfläche) und *Formfehler* (Winkel zwischen den Tangentialebenen in Sollfläche und Istfläche) untersucht werden. Außerdem wird ein visueller Vergleich von Ursprungshöhenlinien mit den aus dem DHM abgeleiteten Höhenlinien für die Überprüfung der *morphologischen Genauigkeit* vorgeschlagen (AUMANN 1994).

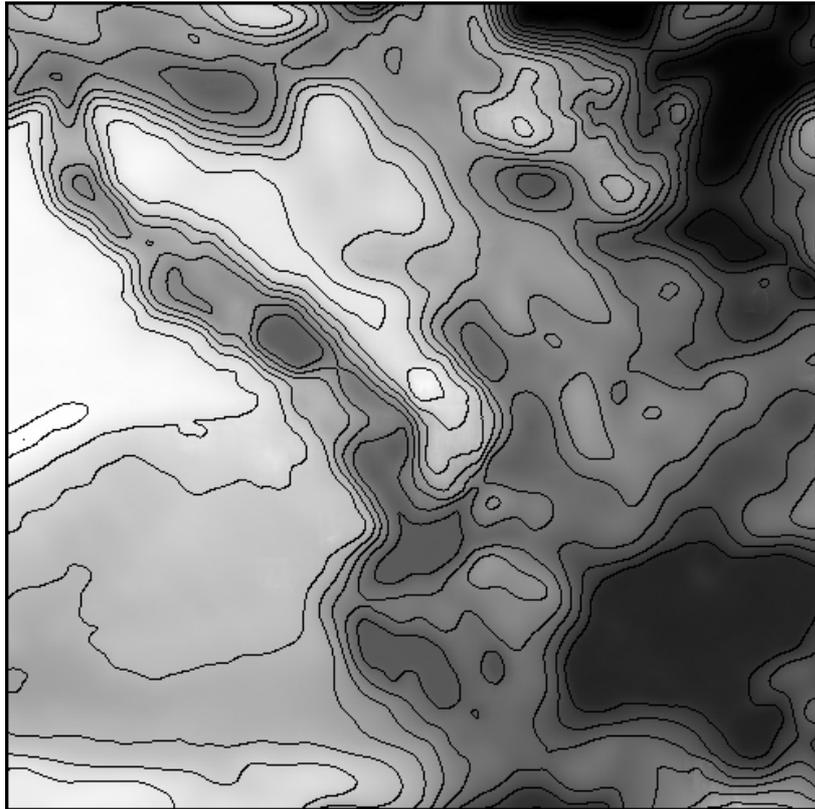
## 6 Herstellung von Höhenlinien

Das Höhenlinienbild ist eine der wichtigsten Darstellungsformen des DHMs. Das Laserscanning bietet eine aktuelle Methode dieser Darstellung. Ausgehend von bearbeiteten Laserscannerdaten kann das Höhenlinienbild entweder aus Dreiecks-DHM oder aus einem Gitter-DHM erfaßt werden. Es wurden beispielsweise auch gemischte Modelle besprochen (EBNER u.a.1989, REINHARDT 1991 und DÜSEDAU u.a.1987), die sowohl Dreiecks-DHM als auch Gitter-DHM beinhalten können. Das im folgenden dargestellte Höhenlinienbild IV.6.1 wird durch Gitter-DHM hergestellt.

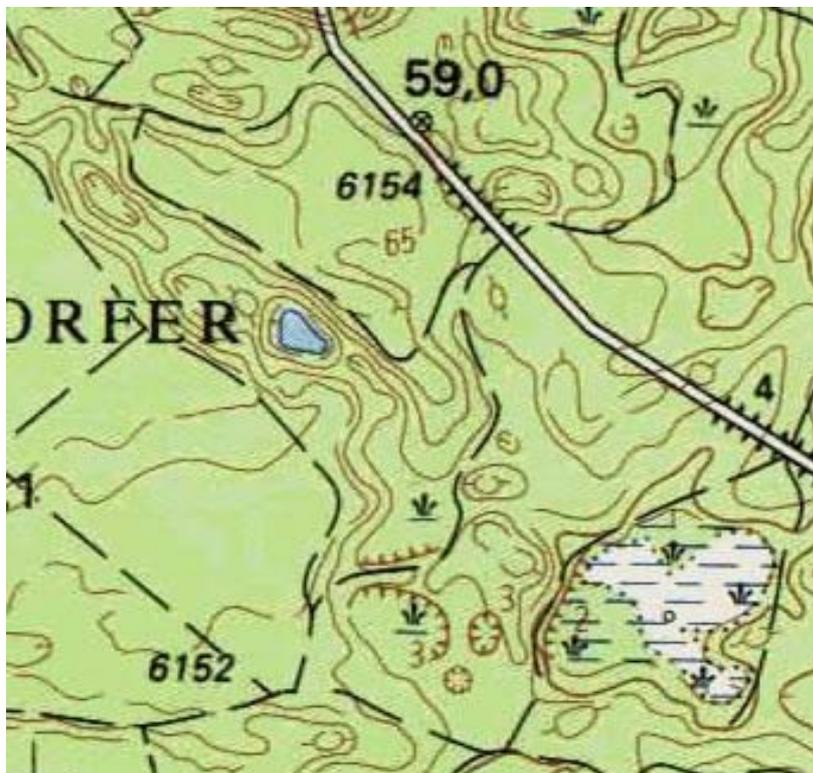
Die Vorbearbeitung von DHM-Daten spielt eine wichtige Rolle bei der Herleitung der Höhenlinien. Vorbearbeitung bedeutet im wesentlichen die Beseitigung der kleinförmigen Struktur und von kleinen Störungen. Untersuchungen der Glättung von DHM-Daten wurden von FRITSCH (1991) genau beschrieben. Dort wurden Profilglättung, Glättung von Isolinien und Glättung von Raumkurven unterschieden. *Es soll hier in der Arbeit erklärt werden, dass die Datenvorbearbeitung nach Notwendigkeit durchgeführt werden soll. Das heißt, wenn die Originaldaten Störungen enthalten, soll diese Vorbearbeitung erfolgen.*

Die Abb.IV.6.1 zeigt ein Höhenlinienbild mit Laserscannerdaten. Dieses Bild wird hier nur als ein Beispiel gezeigt. Die Herstellung von Höhenlinienbildern kann durch erfolgreiche Softwarepakete (beispielsweise SCOP) durchgeführt werden. Die Abb.IV.6.2 stellt eine topographische Karte des entsprechenden Testgebietes dar.

Die Ableitung von anderen Produkten beispielsweise Orthophoto, Profil, Perspektivansicht usw. wird hier nicht besprochen. Man kann die Beschreibung der Verfahren und der Ergebnisse in einer Vielzahl von Veröffentlichungen, Softwarebeschreibungen und Aufsätzen finden.



**Abb.IV.6.1:** Höhenlinienbild aus Laserpunkten



**Abb.IV.6.2:** Topographische Karte (Maßstab ca. 1:10000)

# V Analyse von DHM-Daten und automatische Extraktion von Strukturlinien

## 1 Integration von DHM in raumbezogene Informationssysteme

Eine geeignete Darstellung der Erdoberfläche ist ein allgemeiner Wunsch vieler Wissenschaftsbereiche. Analoge Formen dieser Darstellungen findet man z.B. in topographischen Karten. Eine fundamentale Anforderung der heutigen Zeit ist es, diese Darstellung in einer datenverarbeitungsgerechten Form zu haben.

Das Digitale (Gelände)Höhenmodell ist eine solche Form. Zum digitalen (Gelände)Höhenmodell gehören zusätzlich zu den gespeicherten dreidimensionalen Koordinaten auch die Elemente zur Strukturierung der Daten und die (Interpolations)-Algorithmen zum Übergang von den diskreten Punkten auf Kurven und Flächen.

*Digitale Höhenmodelle (DHM) oder Digitale Geländemodelle (DGM) zählen heute zu den Standardprodukten des Vermessungswesens. Sie stellen eigenständige Datenbanken dar, aus denen sich eine Vielzahl von Informationen über das Relief gewinnen läßt: u.a. Höhenlinien, Profile, Neigungsmodelle, Krümmungsmodelle, Volumen, Perspektiven, 3D-Szenen (Stadtmodelle). Die Integration von Digitalen Höhenmodellen in Geo-Informationssysteme (GIS) erweitert das Anwendungsspektrum durch die mögliche Verschneidung mit Grundrißdaten und sonstigen raumbezogenen Fachdaten.*

Der Begriff „*Digitales Geländemodell (DGM)*“ oder „*Digitales Höhenmodell (DHM)*“ war schon häufig der Gegenstand von Diskussionen. Als Digitales Höhenmodell (DHM) bezeichnet man die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objektes hinreichend repräsentieren. In den meisten Fällen wird das DHM für sich schon als DGM bezeichnet (z.B. FRITSCH 1991). In unserer Arbeit wird der Begriff DHM verwendet.

Die Abb.V.1.1 repräsentiert die Rolle eines Digitalen Höhenmodells in einem raumbezogenen Informationssystem bzw. die Beziehung und Verbindung von beiden. Offensichtlich stellt das Digitale Höhenmodell eine zentrale Komponente eines raumbezogenen Informationssystems mit dem Digitalen Grundriß dar und repräsentiert eine Grunddatenquelle für die Weiterbearbeitung und Folgeprodukte des DHMs. Die wesentlichen drei Datenerfassungsverfahren von der örtlichen Geländeaufnahme (Tachymetrie), der photogrammetrischen Bildauswertung (am Auswertegerät bzw. digital automatisch) und der Digitalisierung von Höheninformationen aus topographischen Karten liefern eine Reihe von DHM-Daten. Das Laserscanningverfahren bietet natürlich eine andere Möglichkeit zur aktuellen Datenerfassung. Diese Daten können weitgehend durch Auswertung und Nachbearbeitung der strukturierten Geländeinformationen zur Verfügung gestellt werden. Die Herstellung von Strukturlinien aus DHM-Daten steht im Mittelpunkt der Arbeit. Zur Weiterbearbeitung von Orthophotos und Entzerrung von digitalen Luft- und Satellitenbildern ist ein Digitales Höhenmodell ein wichtiges Hilfsmittel. Ein anschauliches Beispiel für das Zusammenspiel von DHM-Daten und anderen GIS-Daten stellt die Visualisierung von Geländedaten dar. Besonders mit Methoden der Digitalen Bildverarbeitung lassen sich sehr realistische Geländedarstellungen und 3D-Stadtmodelle erzeugen.

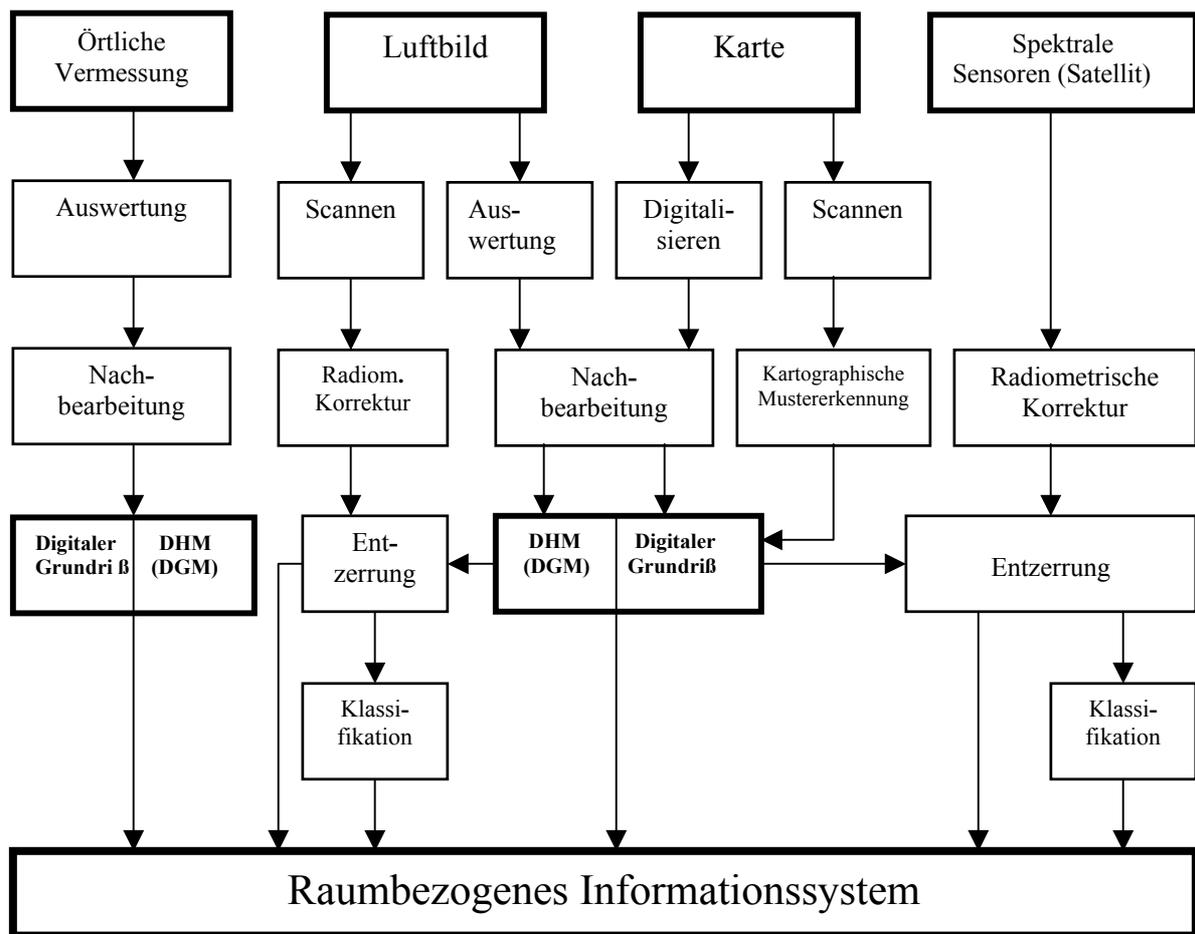


Abb.V.1.1: Digitales Höhenmodell und raumbezogenes Informationssystem (Quelle: Fritsch 1991)

Die Daten eines Digitalen Höhenmodells lassen sich nach WILD (1983) und BILL (1999) in zwei Klassen aufteilen:

- **Punktdaten mit ausschließlicher Höheninformation:** Hierzu zählen alle flächenmäßig verteilten Punkte, die ohne Bezug zur Geländecharakteristik stehen, wie z.B. Gittermessungen, Profilmessungen etc. Die gemessenen originalen Laserpunkte sind solche Punktdaten.
- **Punktdaten mit zusätzlicher Forminformation:** Solche Forminformation kann noch wie folgt eingeteilt werden:
  - *Markante Höhenpunkte* zeigen an, dass die Geländefläche in diesen Punkten eine horizontale Tangentialebene besitzt, was hauptsächlich den relativ höchsten oder tiefsten Punkten auf Kuppen bzw. in Mulden entspricht.
  - *Falllinien* geben den Verlauf der größten Flächenneigung an. Der Verlauf der Falllinie bestimmt gleichzeitig, dass senkrecht zur Linienrichtung die Geländefläche eine horizontale Flächentangente besitzt.
  - *Strukturlinien* kennzeichnen den unscharfen Übergang zwischen verschiedenen geneigten Teilflächen, wobei senkrecht zur Strukturlinie eine größere Flächenkrümmung auftritt.

- *Grat- und Tallinien* sind zugleich Fall- und Strukturlinien. Sie beschreiben das Zusammenstoßen zweier verschieden geneigter Teilflächen entlang von Falllinien.
- *Bruchlinien* bestimmen Unstetigkeitsstellen in der Geländefläche. 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 Bruchlinien.

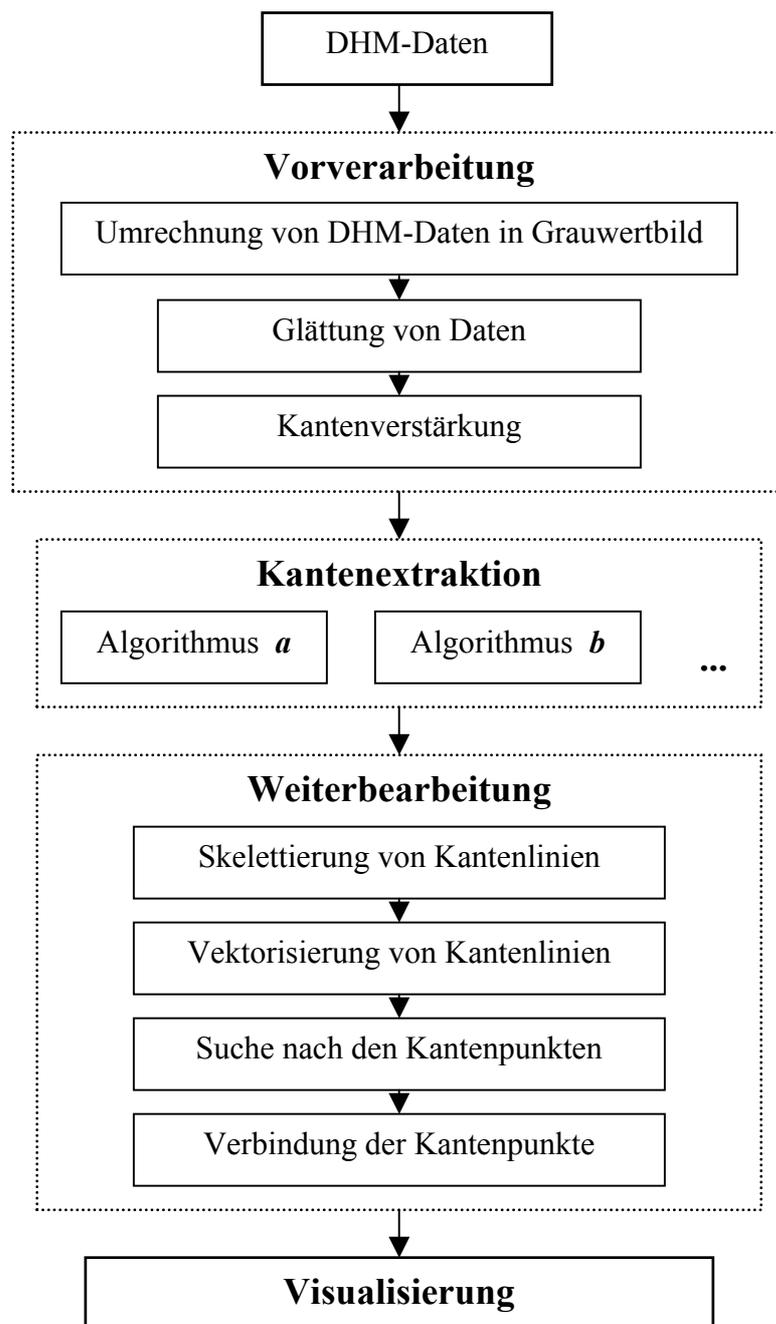
Die flächenhaft erfaßten originalen Laserpunkte liefern eigentlich nur die unstrukturierten Punktdaten. Das heißt, sie besitzen keine zusätzlichen Forminformationen. Sie gehören zu den ersten Punktdaten mit ausschließlicher Höheninformation. Das Ziel der DHM-Analyse besteht darin, dass durch die Weiterbearbeitung von Laserscannerdaten die zusätzlichen Forminformationen abgeleitet werden. Dadurch kann ein Digitales Höhenmodell z.B. auf den Höhen eines regelmäßigen Gitters aufbauen, welches eventuell noch durch Geländekanten, Randlinien und markante Höhenpunkte ergänzt sein kann.

## 2 Aufgabenstellung

Es wird heute allgemein vom visuellen Zeitalter gesprochen. Gegenüber der traditionellen CAD-basierten Visualisierung werden bei der GIS-gestützten Visualisierung die 3D-Objekte in einem automatisierten Prozeß aus einem raumbezogenen GIS (Datenbank) abgeleitet. Während heutzutage Geographische Informationssysteme (GIS) höchstens 3D-Gittermodelle rechnen konnten, ist die Darstellung schattierter Oberflächenmodelle inzwischen zum Standard geworden. Zusätzlich kann über das Oberflächenmodell auch Bildinformation wie z.B. digitale Karten oder Fernerkundungsdaten gelegt werden. Von LANGE (1999) wurden Digitale Visualisierungstechniken bei der Extraktion von Gelände, Gebäude, Vegetation sowie echter Raumdarstellung diskutiert. Die Grundlage bildet das Digitale Höhenmodell mit hinreichender Auflösung, genügender Dichte und zusätzlicher Forminformation.

Um zusätzliche Forminformationen zu extrahieren, können digitale Fernerkundungsdaten oder digitale topographische Karten durch Auswertung und Strukturierung angewendet werden. Eine teil-automatische Extraktion von genauen Informationen geometrischer und inhaltlicher Art auf der Grundlage von digitalen Fernerkundungsdaten ist bisher nur eingeschränkt möglich (LANGE 1999, SHETTIGARA et al. 1995). Es gab schon einige Untersuchungen bei der Extraktion von Strukturinformationen mit den gescannten Grundrissen der topographischen Karten, wobei ihre Lage aus dem Grundriß und die Höhe aus den Laserdaten entnommen wurden. Leider lag ein Nachteil darin, dass die Grundrisse — bedingt durch ihre Entstehungsart — nicht überall geometrisch einwandfrei und nicht immer aktuell waren HAHN (1999).

In der vorliegenden Arbeit wird die Extraktion von Strukturlinien als wichtigste Aufgabe behandelt. Nach den Definitionen von verschiedenen Strukturlinien werden unterschiedliche Modelle eingeführt und untersucht. Alle in der Arbeit angewendeten Verfahren basieren auf digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Dazu werden Originaldaten in Höhenwerte eines geordneten digitalen Höhenmodells (DHM) umgerechnet und als Grauwert einer Bildmatrix interpretiert. Dann können zum Auffinden von Strukturlinien die für die Bearbeitung von Bilddaten bekannten digitalen Bildverarbeitungsalgorithmen herangezogen und weiterentwickelt werden.



**Abb.V.2.1:** Ablauf der Extraktion von Strukturlinien

Es ist wichtig, ein allgemeines Verfahren zur Analyse von DHM-Daten und zur automatischen Extraktion von Strukturlinien aus den allgemeinen DHM-Daten zu entwickeln. Aus diesem Grund kann das Verfahren der automatischen Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten wie in der Abb.V.2.1 ablaufen.

Die erste Aufgabe zur Extraktion von Strukturlinien ist die Vorverarbeitung von Daten. Die Vorverarbeitung bedeutet hier eine Umrechnung der Originaldaten in Höhenwerte eines geordneten digitalen Höhenmodells (DHM) und in eine Grauwertbildmatrix, sowie

anschließend eine Filterung. Des Weiteren sollen die kleinen in Originaldaten enthaltenen Störungen möglichst noch vor der Kantenextraktion beseitigt werden, damit keine unwichtigen Informationen als Strukturlinien extrahiert werden. Für manche Anwendungen, wie z.B. bei der Herstellung eines muldenfreien digitalen Höhenmodells als Grundlage der Flußlinien- und Einzugsgebietsermittlung, ist es wichtig, solche kleine Störungen zu beseitigen. Wichtig ist, auch darauf zu achten, dass ein kantenerhaltendes Filterungsverfahren angewendet wird, damit die in den Daten enthaltenen Kanten- und Strukturinformationen möglichst bei der Vorverarbeitung erhalten werden bzw. der Filterungsprozeß die Daten nicht negativ beeinflusst. Die Datenfilterung ist allerdings nach Notwendigkeit durchzuführen. Wenn die Originaldaten keine Störungen enthalten, wird diese Filterung auch nicht angewendet. Zur Kantenextraktion werden verschiedene Modelle und Verfahren untersucht. Traditionelle Algorithmen der Bildverarbeitung werden speziell weiter entwickelt.

Das Ergebnis der ersten Verarbeitung der Kantenextraktion ist eine in Rasterform dargestellte Bildmatrix. Dazu muß die Kantenlinie in manchen Fällen noch skelettiert werden. Eine andere wichtige Aufgabe ist in diesem Nachbearbeitungsteil, Kantenlinien zu vektorisieren und die Kantenpunkte in einer rasterförmig dargestellten Bildmatrix zu suchen und zu verbinden.

Das Endergebnis der Extraktion von Strukturlinien kann mittels der tachymetrischen Vermessung oder durch unterschiedliche Visualisierungsmethoden überprüft werden. Unter den vorliegenden Bedingungen wird hier nur eine visuelle Überprüfung durchgeführt.

### **3 Einleitung und Begrenzung der durchzuführenden Aufgaben**

#### **3.1 Einleitung**

Das Prinzip der Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden wurde in Teil I kurz besprochen. Die erste Aufgabe der Separation von Laserpunkten wurde in Teil III genau untersucht und beschrieben. In diesem Abschnitt geht es speziell um die Analyse von DHM-Daten und die automatische Extraktion von Strukturlinien.

Unter der automatischen rechnerischen Bildanalyse (manchmal auch Mustererkennung genannt) wird die Aufgabe verstanden, die gleichen oder ähnlichen strukturellen Bildeigenschaften auf ganz andere Weise zu erfassen. Meist werden Verfahren der Segmentierung und Merkmalsgewinnung eingesetzt, um aus der Fülle der Ausgangsdaten die für eine bestimmte Aufgabe relevanten Informationen zu extrahieren ALBERTZ (1999).

Bei der Interpretation von Höheninformationen (beispielsweise Gebäudestruktur oder Geländestrukturlinie) ist die Anwendung von digitalen Höhendaten leichter als die Anwendung von digitalen Bilddaten, weil die Höhendaten bereits dreidimensionale Information darstellen. In direktem Zusammenhang damit steht auch die Unempfindlichkeit eines Höhendatenbildes (in JIANG als Tiefenbild genannt) gegenüber Faktoren wie Beleuchtung, Schattenwurf und Beschädigung oder Verschmutzung von Objektoberflächen, welche die Analyse von Grauwertbildern erheblich erschweren (FÖRSTNER 1996, JIANG u.a. 1997). Von den Möglichkeiten zur Objektbeschreibung kommen der *Objektform* und der *Objektstruktur* besondere Stellenwerte zu, da sie weniger empfindlich gegenüber Änderung in der Beleuchtung und der Perspektive sind. Durch die Extraktion geometrischer und

struktureller Bildeigenschaften erfolgt der Übergang von einer rasterhaften Bildbeschreibung auf eine symbolische und strukturelle Bildbeschreibung. Dabei kann die Bildanalyse in drei Stufen eingeteilt werden: nämlich die *Bildvorverarbeitung* (Low-Level-Prozesse), die *Bildsegmentierung* (Mid-Level-Prozesse) und die *Bildinterpretation* (High-Level-Prozesse) (FUCHS 1998).

Innerhalb unserer Arbeit zur Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten, befaßt sich die Bild(Daten)*vorverarbeitung* mit der Vorverarbeitung von Daten, die beispielsweise die *Umrechnung* von DHM-Daten in ein Grauwertbild und die *Glättung*, sowie die *Kantenverstärkung* von Bildern einschließt. Die Bild(Daten)segmentierung entspricht der Kantenextraktion. In der Abb.V.2.1 wurde diese Aufgabe in zwei Stufen eingeteilt: die Kantendetektion in *Rasterform* und die Nachbearbeitung der Kantenpunkte zu komplexeren Gebilden, die im wesentlichen in *Vektorform* erfolgen kann. Das Ergebnis der Strukturlinienextraktion besteht dann aus der Menge sämtlicher strukturbeschreibender, im zweidimensionalen Bildraum dargestellter Gebilde.

Zur Darstellung der extrahierten Strukturlinien werden innerhalb der Arbeit folgende Repräsentationsstrukturen benötigt:

- **Mengen:**

$E = \{E_1, \dots, E_n\}$  bezeichnet eine Menge von  $n$  voneinander verschiedenen Elementen  $E_i$ . Zur Beschreibung der Eigenschaften der Extraktion wird beispielsweise der Begriff der Menge von markanten Punkten, Geriplinien und Bruchkantenlinien usw. benötigt.

- **Listen:**

Liste  $L = \{ [P_1, \dots, P_k] \mid E_i : i=1, \dots, n \}$  bezeichnet eine Folge von  $n$  Elementen. In der Arbeit kann eine Liste als eine Vektorform einer Strukturlinie  $E_i$  betrachtet werden. Die Liste  $\{ [P_1, \dots, P_k] \mid E_i \}$  stellt dann  $k$  Kantenpunkte dieser Strukturlinie  $E_i$  dar.

- **Merkmal:**

$M = (A, L, E)$  bezeichnet ein Attribut der Elemente  $E_i$  mit der Liste  $L_i$ . Dies ist eine Aufgabe der Interpretation, wenn zusätzliche Informationen beispielsweise topographische Karten und/oder Bildinformation eingeführt werden, damit interpretiert werden kann, zu welcher Menge die Strukturlinie gehört.

Die Darstellung der extrahierten Strukturlinien kann wie folgt erfolgen:

- **Darstellung im diskreten Bildraum (Rasterform)**

Zur Berechnung und Darstellung der Punkt- und Linienmerkmale auf dem Bildraster wird das Pixel als kleinste räumliche Bezugseinheit des digitalen Bildes benutzt. Bei der Definition des Pixels als kleinster Bezugseinheit wird ein Punkt als ein Punktpixel  $P$  dargestellt.

- **Darstellung im kontinuierlichen Bildraum (Vektorform)**

Eine Linie kann ebenso im kontinuierlichen Bildraum dargestellt werden. Hier können beispielsweise Kantenlinien durch eine analytische Funktion angenähert und symbolisch

dargestellt werden (Approximation). So können beispielsweise  $n$  extrahierte Linien eines Bildes durch die Vektorform  $\vec{L} = \left\{ L_i [r_k : k \in (0, \dots, 7)]; i = 1, \dots, n \right\}$  von Freemann-Kettencode-Verfahren dargestellt werden.

### 3.2 Begrenzung der durchzuführenden Aufgaben

In der Photogrammetrie spielt die Extraktion der Strukturinformationen eine große Rolle. Automatische Extraktion von Merkmal und Textur, wie z.B. Straßennetze, Wegeläufe, Gewässer, Bahndämme, Hausgrundrisse u.a. ist eine noch nicht gelöste und momentan sehr wichtige und immer mehr nachgefragte Aufgabe, insbesondere bei Geoinformationssystemen (GIS).

Die vorliegende Arbeit der Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten basiert auf der Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Eingangsdaten für diese Analyse sind die regelmäßig verteilten Raster-DHM-Daten. Diese Daten können aus irgendeinem Verfahren abgeleitet werden, wie z.B. aus Laserscanning, aus topographischen Karten oder mittels der Photogrammetrie.

In der Arbeit zur Extraktion von Strukturinformationen aus Laserscannerdaten ohne Einführung von zusätzlichen Informationen und Wissen beschränken sich die Anwendung, Fähigkeit und Zuverlässigkeit auf bestimmte Bedingungen wegen folgender Gründe:

- ***Nutzung von zusätzlichem Wissen***

Obwohl digitale Höhendaten bei der Extraktion von Höheninformationen viel günstiger als digitale Bilddaten sind, konnten diese Informationen mit niedrigerer Punktdichte nicht für eine zutreffende Geländestrukturlinienextraktion ausreichend sein. Durch die Überlagerung von Grundrissen bzw. zusätzlichen Bilddaten konnte die Möglichkeit der Extraktion von Strukturlinien verbessert werden. Leider haben Grundrisse der topographischen Karte einen Nachteil: Diese Grundrisse sind nicht immer aktuell HAHN (1999). Die im folgenden verwendeten Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien basieren nur auf der Nutzung von DHM-Daten und integrieren keine zusätzlichen Informationen über Strukturlinien aus anderen Datenquellen, wie beispielsweise topographischen Karten oder Bildern.

- ***Einfluß der Datenauflösung***

Bei beschränkter Datenauflösung können Klassenübergänge innerhalb der räumlichen Objekte auftreten, die zu topologischen Veränderungen der Strukturlinien führen. Eine schmale Straße oder eine Böschung mit oberer und unterer Kante könnte bei einer kleinmaßstäbigen Abbildung (höherer Punktabstand am Boden oder größere DHM-Maschenweite) zu einem flächenlosen Objekt führen und so in *eine* Linie oder Kante übergehen FUCHS (1998). Bei der Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten ist die Datenauflösung von wichtiger Bedeutung.

- ***Fähigkeit von Algorithmen zur Kantenextraktion***

Digitale Bildverarbeitungsmethoden liefern eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Interpretation von Strukturen aus Bilddaten. Eine Bewertung der existierenden Verfahren

ist grundsätzlich schwierig, da Ziele, Anforderungen, Aufwand, Schnittstellen und Gesamtkonzeptionen berücksichtigt werden müssen. Die Begrenzung der existierenden Verfahren kann deshalb jeweils nur für Teilaspekte erfolgen. Es ist bisher schwierig, ein allmächtiges, vollautomatisches Verfahren zur Kantendetektion zu entwickeln. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die in Bildverarbeitungsbereichen bekannten Verfahren untersucht, um daraus ein geeignetes Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien zu entwickeln.

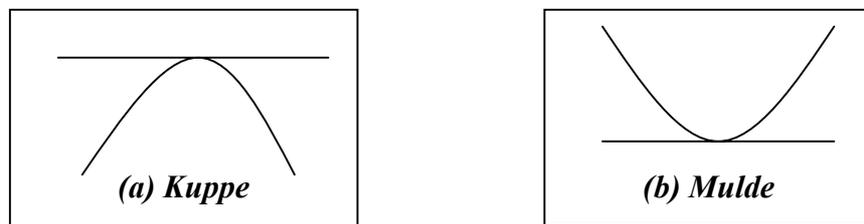
## 4 Strategie der Extraktion von Strukturlinien

### 4.1 Definition der Strukturlinien

In der Arbeit werden zur Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten folgende Arten von Forminformationen definiert:

- **Markante Punkte**

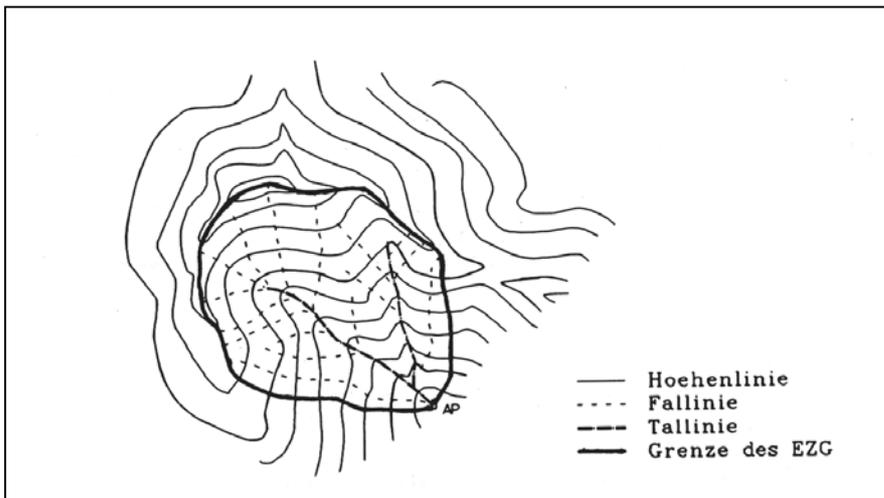
Die Punkte auf den Geländekuppen bzw. in den Geländemulden besitzen eine horizontale Tangentialebene (Abb.V.4.1). Die auf Kuppen liegenden Punkte können als relativ höchste markante Punkte und die in Mulden liegenden Punkte können als relativ tiefste markante Punkte betrachtet werden.



**Abb.V.4.1:** Kuppe und Mulde

- **Falllinien und Tallinien**

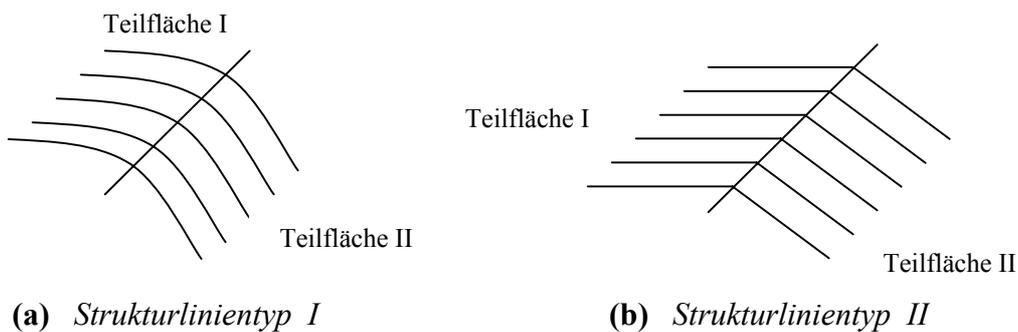
Falllinien geben den Verlauf der größten Flächenneigung an. Im Bereich eines Tales verlaufen die Abflußlinien zueinander, sie konvergieren. Im Bereich von Kämmen laufen dagegen die Abflußlinien auseinander, sie divergieren (RIEGER 1992). Der Verlauf der Falllinie bestimmt gleichzeitig, dass senkrecht zur Linienrichtung die Gelände fläche eine horizontale Flächentangente besitzt. Diese Arten von Strukturlinien wurden von KRAUS (1984, 1991), FINSTERWALDER (1986), RIEGER (1992), AUMANN (1994), REINHARDT (1991) genau beschrieben, untersucht und behandelt. In der Arbeit werden alle solchen Linien zusammen als Abflußlinien bezeichnet.



**Abb.V.4.2:**  
 Falllinien und Tallinien in einem Wassereinzugsgebiet (EZG)  
 (Quelle: Rieger 1992)

- **Strukturlinien**

Strukturlinien kennzeichnen einen Übergang zwischen verschiedenen geneigten Teilflächen, wobei senkrecht zur Strukturlinie eine größere Flächenkrümmung auftritt. Entsprechend werden zwei Typen von Strukturlinien besprochen. Bei Typ I handelt es sich um eine ausgerundete Flächenkante und Typ II bezieht sich auf eine Unstetigkeitsstelle in der Geländefläche. Es wurde bei WILD (1983) bestätigt, dass die Geländefläche in den Strukturlinien einen raschen Neigungswechsel vollzieht und eine durch zwei Schrägebenen gebildete Dachform beschrieben werden kann, die entlang der Strukturlinie zusammenstoßen. Die Bruchkantenlinie, Unstetigkeit u.a. werden in der Arbeit zusammen als Strukturlinie bezeichnet und behandelt. In der vorliegenden Arbeit bildet die Extraktion von Bruchkanten das Hauptthema.



**Abb.V.4.3:** Strukturlinien

## 4.2 Anforderung und Schwierigkeit bei der Kantendetektion

Kanten bei physikalischen Körpern lassen sich leicht beschreiben. Es werden hierbei in der Regel die Objektgrenzen, abrupte Änderungen der Oberflächennormalen oder einfach Änderungen der Materialeigenschaften verstanden. Als Kante bezeichnet man die *Grenze* zwischen homogenen Flächen im Bild. In der Bildverarbeitung werden Objekte in den

Aufnahmen durch unterschiedlich intensive Grau-/Farbwerte dargestellt. Eine Kante ist dann eine Diskontinuität im Verlauf dieser Intensitätswerte. Dieser durch die Beleuchtung und Aufnahmeansicht geprägte Fall tritt bei der Behandlung von DHM-Daten nicht auf. Im Vergleich zur Verarbeitung von realen Bildern haben DHM-Daten zwar den Vorteil, dass beispielsweise Schatten, ungünstige Beleuchtungen usw. nicht auftreten. Der Nachteil ist auch klar, dass bei DHM-Daten die Kantenform nicht einfach definiert werden kann. Die entstehenden Kantenlinien sind meist glatte Kantenformen.

Mittels der Umrechnung von DHM-Daten in Form der Höhenwerte in eine Bildmatrix mit Grauwerten lassen sich die Änderungen der Höhenwerte in DHM-Daten durch die Änderungen der Intensitätswerte darstellen. Eine Bruchkante in DHM-Daten kann dann in der Bildverarbeitung als eine Bildkante behandelt werden.

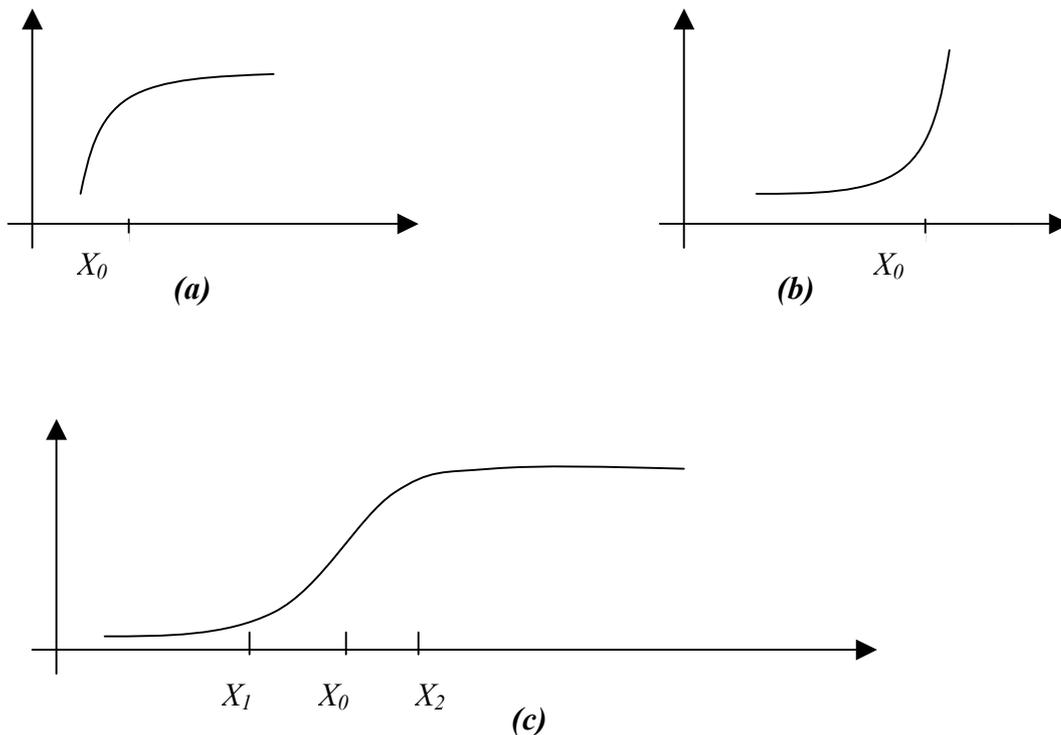
Die Anforderungen der Kantendetektion eines Höhenbildes bestehen darin, dass zum einen die tatsächlichen Kantenlinien erkannt werden sollten und zum zweiten die Linien, die keine echten Kantenlinien sind, nicht als solche identifiziert werden sollten. Dies entspricht der *Zuverlässigkeit* der Kantenextraktion. Weiterhin ist es auch sehr wichtig, Kanten möglichst an ihrer wirklichen Position extrahieren zu können. Dies ist die *Lokalisation*. Die dritte wichtige Anforderung ist der *Verschmierungeffekt*. Das bedeutet, dass auf eine Kante nur eine Antwort kommt und ein Verschmieren möglichst vermieden werden sollte. Eine andere Eigenschaft bei der Kantenextraktion ist die *Genauigkeit*. Bei unterschiedlichen Anwendungen ergeben sich entsprechend der Aufgabenstellung unterschiedliche Genauigkeitsforderungen.

Neben diesen vier Anforderungen spielen beispielsweise die schnelle *Berechenbarkeit*, die *Anwendbarkeit* und *Erweiterbarkeit* bei unterschiedlichen Daten und die *Robustheit* gegen Rauschen bei den Anforderungen an Kantendetektoren zusätzlich auch eine wichtige Rolle.

Für die idealen Kantenformen wie Stufenkanten oder Schnittkanten ist die Kantendetektion einfach zu definieren und durchzuführen. Bei realen Kanten wie in den Abb.V.4.4 sind diese Definitionen nicht so einfach. Diese Typen von Kanten entstehen normalerweise beim Zusammenstoßen zweier Flächen oder durch eine Überlagerung von mehreren einfachen Kanten. Die Abb.V.4.4(c) zeigt eine reale Kante. Der genaue Ort der Kantenlinien läßt sich bei gestörten Kantenformen nicht so einfach definieren. Die Kantenform in DHM-Daten kann durch eine Böschung mit oberer und unterer Kantenlinie dargestellt werden. In diesem Fall sollen die Kantenpunkte  $X_1$  und  $X_2$  extrahiert werden.

Bei der Betrachtung der Kanten handelt es sich eigentlich um hochfrequente Bildanteile im Ortsfrequenzraum. Die Schwierigkeit besteht darin, zu unterscheiden, welche Hochfrequenzen durch Rauschen verursacht werden und welche als tatsächliche Kantenanteile behandelt werden sollen.

Die Anforderungen und Schwierigkeiten stehen immer einander gegenüber. Die noch schwierigere Aufgabe ist natürlich die Erfüllung aller Anforderungen. Es ist oben erwähnt, dass es schwierig ist, ein allmächtiges, vollautomatisches Verfahren zur Kantendetektion zu entwickeln. Das heißt, es ist unmöglich, ein Verfahren zu entwickeln, das alle Anforderungen unter solchen Schwierigkeiten erfüllen kann. Normalerweise liegt die Aufgabe in der Suche nach einem Kompromiß zwischen allen Anforderungen von *Lokalisation*, *Zuverlässigkeit*, *Verschmierungeffekt* und *Genauigkeit* usw., was eine Optimierungsaufgabe darstellt.



**Abb.V.4.4:** Unterschiedliche Kantenformen bei DHM-Daten

### 4.3 Einteilung von Verfahren der Kantendetektion

Nach STEINBRECHER (1993) lassen sich Kantendetektionsverfahren in der digitalen Bildverarbeitung grob in zwei Klassen unterteilen: die der *parallelen* Verfahren und die der *sequentiellen* Verfahren. Die parallelen Verfahren stellen auch oft eine Vorstufe für die sequentiellen dar. Entsprechend können die sequentiellen Verfahren auch als Nachbearbeitung eines parallelen Verfahrens betrachtet werden.

Die parallelen Verfahren beschäftigen sich mit der Analyse von *lokalen* Eigenschaften der Bildpunkte, wie z.B. der Kantenstärke, Kantenrichtung oder Maße der Kante. Bei diesen Verfahren kann man eine einzelne Eigenschaft oder mehrere Eigenschaften berücksichtigen. Die sequentiellen Verfahren beruhen meistens auf *regionalen oder globalen* Eigenschaften der Bildpunkte, wie z.B. auf der Nachbarschaft und manchmal kann Vorwissen über den Bildinhalt ausgenutzt werden. In der Regel bauen die sequentiellen Verfahren auf den Ergebnissen der parallelen Verfahren auf. Sie werden daher auch gelegentlich als Verfahren zur Kanten-Nachbearbeitung bezeichnet.

Die existierenden Verfahren können auch in *Standardverfahren* und *statistische Verfahren* eingeteilt werden FUCHS (1998). Als Standardverfahren zur Kantendetektion können z.B. LoG-, DoG-, Prewitt-, Sobel-, und Canny-Operator usw. verstanden werden. Die Standardverfahren beschäftigen sich mit der Analyse der Kantenstärke und Kantenrichtung. Relativ groß ist die Anzahl statistischer Verfahren als Wahrscheinlichkeits- oder Energieoptimierung. Die meisten statistischen Verfahren setzen auf der diskreten

Bildrepräsentation auf (LECHTHALER 1991, BUSCH 1992, VITULANO et al. 1996, ACKAH-MIEZAN et al.1993, ÅSTRÖM et al.1996a ).

Eine Möglichkeit ist die Einführung des Maßstabsraumes. Die Modelle der Maßstabsräume zur Kantendetektion können in lineare und inhomogene Maßstabsräume eingeteilt werden. Sie können in einer Vielzahl von Veröffentlichungen gefunden werden (CAELLI et al. 1998, LINDEBERG et al. 1993, LINDEBERG 1994, LINDEBERG 1996a, LINDEBERG 1996b, MORALES et al. 1992, ÅSTRÖM et al. 1996b). Eine Erweiterung in morphologische Maßstabsräume kann auch zur Kantendetektion angewendet werden (SAID et al. 1996, MORALES et al. 1992, FOLTYNIEWITZ 1996, ZHUANG 1992, KÖTHE 1997). Mit diesen erweiterten morphologischen Verfahren des Maßstabsraumes wurden bei der Gebäudeextraktion gute Ergebnisse erzielt (MAYER u.a.1998, WEIDNER 1996, WEIDNER 1997, BRUNN et al.1997).

Eine andere Idee kommt aus den Grundlagen der Differentialgeometrie. Die Differentialgeometrie befaßt sich mit lokalen Eigenschaften von Kurven und Flächen, die vom Verhalten der Kurve oder Fläche in der Umgebung eines Punktes abhängen (JIANG u.a. 1997). Wie in Abschnitt V.1 und V.2 erwähnt, kennzeichnen Strukturlinien einen scharfen bzw. unscharfen Übergang zwischen verschiedenen geneigten Teilflächen, wobei senkrecht zu Strukturlinien eine größere Flächenkrümmung auftritt. Deshalb können Strukturlinien durch Analyse der Flächenkrümmung im Krümmungsraum untersucht und beschrieben werden.

Aufgrund der existierenden Verfahren zur Kantendetektion in Bilddaten wird in der Arbeit die Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten behandelt. Dabei wird ein anwendungsbasiertes Konzept untersucht und entsprechende Programme werden entwickelt. Die Idee basiert auf den existierenden digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Eingangsdaten können die identifizierten, unregelmäßig verteilten Laserbodenpunkte oder allgemeine DHM-Daten sein. Bei unregelmäßig verteilten Laserbodenpunkten ist zunächst eine Interpolation durchzuführen. Bei allgemeinen DHM-Daten ist nur eine Umrechnung in eine Grauwertbildmatrix notwendig. Die entwickelten Verfahren und die implementierten Programme lassen sich auch für die Kantendetektion von Bilddaten anwenden. Dabei werden die entsprechenden Ergebnisse dargestellt.

## 4.4 Vorverarbeitung von DHM-Daten

### 4.4.1 Umrechnung der DHM-Daten in Grauwertbild

Falls die identifizierten, unregelmäßig verteilten Laserbodenpunkte als Eingangsdaten verwendet werden, müssen diese Punkte zunächst interpoliert werden. Diese Aufgabe wurde im Abschnitt IV diskutiert. In diesem Abschnitt nehmen wir an, dass rasterförmige DHM-Daten als Höhenwerte vorhanden sind. Deshalb können diese Daten einfach in die Form von Grauwerten umgerechnet werden. Dabei kann man eine einfache Umrechnungsform verwenden:

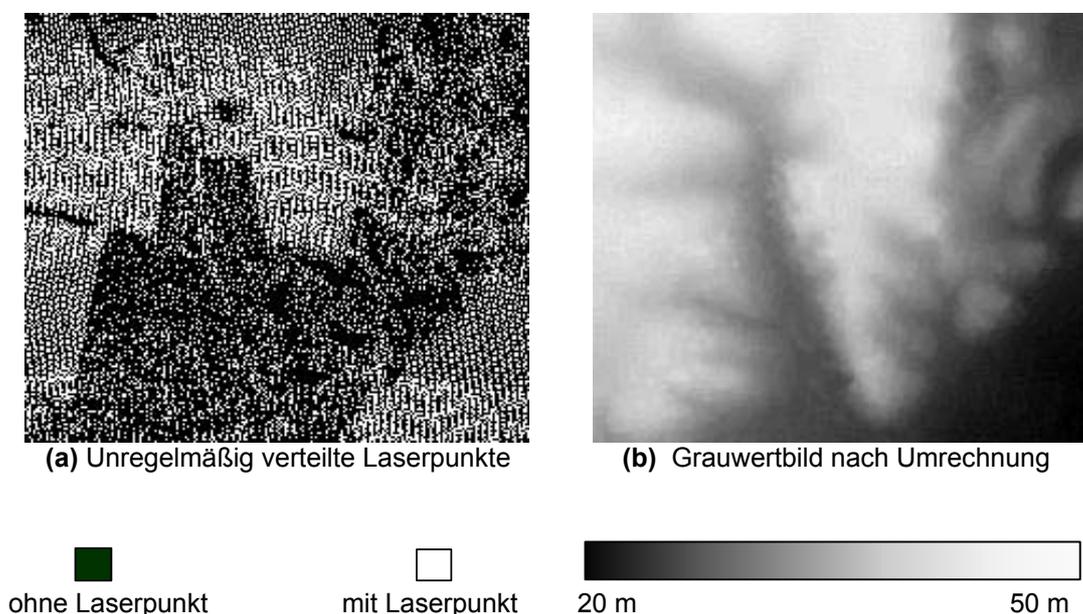
$$G_i = \frac{255}{H_{\max} - H_{\min}} * (H_i - H_{\min}) \quad (\text{V.4-1})$$

wobei  $H_{\max}$  und  $H_{\min}$  den höchsten und tiefsten Höhenwert innerhalb der DHM-Daten darstellen.

Bei der Untersuchung ist der Höhenunterschied des gesamten Gebietes nicht sehr groß. Falls der Höhenunterschied sehr groß ist, kann man die Gleichung (V.4-1) mit der Gleichung (V.4-1') oder überhaupt mit dem *reellen Zahlen-Format* ersetzen, was mehr Speicherplätze braucht.

$$G_i = \frac{65535}{H_{\max} - H_{\min}} * (H_i - H_{\min}) \quad (\text{V.4-1}')$$

Die Abb.V.4.5(a) stellt Originallaserpunkte dar. Auf dem Bild ist es gar nicht zu erkennen, was eigentlich mit dem Laserscanner erfasst wird. Die Abb.V.4.5(b) zeigt das gleiche Gebiet, das schon interpoliert wurde. Auf diesem Bild kann man erkennen, welche Geländeformen dargestellt werden.



**Abb.V.4.5:** Umrechnung von Laserpunkten in ein Grauwertbild

#### 4.4.2 Glättungsfilterung

Im allgemeinen sind Höhenbilder reale, mit Rauschen behaftete Szenen, was nicht zuletzt Auswirkung auf die Bestimmung charakteristischer Flächenmerkmale hat. Daher wird häufig eine Glättung vorgenommen, um das Rauschen soweit wie möglich zu reduzieren. Da Rauschen typischerweise hochfrequenter Natur ist, entspricht eine Glättung einem Tiefpaßfilter, was zur Folge hat, dass neben dem Rauschen auch feine Flächenstrukturen im Tiefenbild beeinflusst werden. Es wurde in Kapitel IV erwähnt, dass die Datenvorbereitung nach der Notwendigkeit durchgeführt werden soll. Die hier vorgestellten Verfahren der Glättungsfilterung und der kantenerhaltenden Filterung im Kapitel V.4.4.3 liefern einen Überblick. *Die Durchführung der Filterung von Daten soll ebenfalls nach der Notwendigkeit erfolgen.* Folgende Glättungsfiler können angewendet werden:

- **Bewegte und gewichtete Mittelwertfilterung**

Ein bewegter und gewichteter Filter haben ähnliche Eigenschaften. Ein modifiziertes Verfahren der Glättung mit dem bewegten Mittelwert ist dann der sogenannte gewichtete Mittelwert. Die Grundidee hierbei ist, diejenigen Nachbarpunkte der Umgebung des aktuellen Bildpunktes  $Z_{ij}$ , die mit ziemlicher Sicherheit zur gleichen Bildregion wie  $Z_{ij}$  gehören, bei der Mittelwertbildung stärker zu gewichten als diejenigen Nachbarpunkte, die mit ziemlicher Sicherheit zu einer anderen Bildregion gehören. Er kann wie folgt dargestellt werden:

$$Z_{ij} = \frac{1}{m^2} \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{m-1} S(i+k-u, j+k-v) h(u, v) \quad (\text{V.4-2})$$

wobei  $m$  die Größe der Maske  $h$  angibt. Für den Parameter  $k$  gilt:  $k = \frac{m-1}{2}$ .

- **Morphologische Glättung**

Zu den zahlreichen Anwendungen der mathematischen Morphologie gehört auch die Bildglättung. Zur Glättung von DHM-Daten werden normalerweise Kombinationen der morphologischen Operatoren Opening und Closing durch OPENCLOSE bzw. CLOSEOPEN verwendet. Die beiden Operatoren wurden im Abschnitt III genau vorgestellt.

- **Binomialfilterung**

Die Binomialfilterung ist eine lineare Filterung zur Glättung durch gewichtete Mittelwertbildung, wobei die Gewichte aus den Binomialkoeffizienten abgeleitet werden. Konkret wird die Filterungsmaske einer  $N \times N$  Binomialfilterung durch eine Zerlegung der zweidimensionalen Form in zwei eindimensionale Formen wie folgt definiert:

$$\frac{1}{2^{N-1}} \begin{bmatrix} B_{N-1}^0 \\ B_{N-1}^1 \\ \dots \\ B_{N-1}^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2^{N-1}} [B_{N-1}^0 \ B_{N-1}^1 \ \dots \ B_{N-1}^{N-1}] \quad (\text{V.4-3})$$

Dadurch wird der Bedarf an Grundoperationen von  $O(N^2)$  bei einer direkten Ausführung auf  $O(N)$  reduziert, was vor allem bei großen Masken eine beachtliche Beschleunigung bedeutet.

- **Gaußsche Glättung**

Die Methode der Gaußschen Glättung benutzt eine Filterungsmaske, die der Funktion

$$g(x, y) = e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{V.4-4})$$

entspricht. Hierbei wird mit dem Parameter  $\sigma$  der Wirkungsbereich der Filterung festgelegt, der idealerweise groß genug sein sollte, um das Rauschen wirksam zu unterdrücken. Da auf der anderen Seite große Werte von  $\sigma$  aber Bildunschärfe und Detailverlust verursachen, ist in der Praxis ein Kompromiß zu treffen.

Eine diskrete Ausführung der Gaußschen Filterung mit großen Masken bringt einen enormen Rechenaufwand mit sich. So können wir eine Eigenschaft der Gaußschen Funktion ausnutzen, um die Rechenzeit zu senken. Die zweidimensionale Gaußsche Filterung kann dann nach

$$g(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} * e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{V.4-5})$$

wie in Gleichung (V.4-3) separat durch zwei eindimensionale Gaußsche Filterungen durchgeführt werden.

#### 4.4.3 Kantenerhaltende Filterung

Die Glättung und Kantenverstärkung von Bildern bilden zusammen die Bildverbesserung. Wie im vorangegangenen Abschnitt V.4.4.2 erwähnt, kann der Glättungsprozeß dazu führen, dass Kanten verschmieren und damit die Güte der Lokalisation verschlechtert wird. Um den Einfluß der Kantenverschmierung durch die Glättungsfilterung auf die nachfolgende Bearbeitung der Kantendetektion möglichst zu vermindern, ist ein Verstärkungsprozeß durchzuführen. Dabei stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder wird eine Hochpaßfilterung nach der Glättung durchgeführt oder es kann ein kantenerhaltendes Verfahren zur Filterung und Verbesserung der Originaldaten verwendet werden. Dieser Prozeß verstärkt dann die Diskontinuität der Kanten wieder.

Bei linearen Filterungen handelt es sich grundsätzlich um eine gewichtete Mittelwertbildung. Falls diese Gewichtung unabhängig von den Pixeln konstante Werte hat, was z.B. bei der Gaußschen Filterung oder der Binomialfilterung der Fall ist, werden stärkere Glättungseffekte erzielt. Diese Vorgehensweise hat den Nachteil, dass die Diskontinuität zwischen beiden unterschiedlichen Teilflächen verwischt wird. Dieser Effekt ist offensichtlich nicht erwünscht. Eine mögliche Lösung dieses Problems besteht darin, dass bei der Bildfilterung die Gewichtung nach den Bilddaten angepaßt wird. Oder man kann die Oberfläche mit einer Funktion approximieren, so dass eine angepaßte Teilfläche bei der Beschreibung der sich um den aktuellen Punkt umgehenden Nachbarschaft gefunden wird.

Die Auswahl der Gewichtung entscheidet das Filterungsmaß. Aus den Publikationen können folgende Methoden der kantenerhaltenden Filterung gewählt werden.

- **Adaptiver Gradient zur Filterung**

Normalerweise können alle abnehmenden Funktionen  $g^*$  als Filterungsgewichtung angewendet werden. Die Funktion  $g^*$  soll die Eigenschaften  $g^*(d(x,y)) = 1$  bei  $d(x,y) = 0$  und  $g^*(d(x,y)) \rightarrow 0$  mit zunehmendem  $d(x,y)$  besitzen. Für dieses allgemeine Gewichtungskriterium sind viele Funktionen denkbar. Unter der Voraussetzung, dass die Bildfunktion  $f(x,y)$  idealerweise stückweise konstante Werte annimmt, wird eine Filterung nach der folgenden Form vorgenommen (SMITH 1996):

$$\bar{f}(x,y) = \frac{\sum \frac{f(x+u,y+v)}{\max\left\{\frac{1}{2}, |f(x+u,y+v) - f(x,y)|\right\}}}{\sum \frac{1}{\max\left\{\frac{1}{2}, |f(x+u,y+v) - f(x,y)|\right\}}} \quad (\text{V.4-6})$$

wobei  $f(x,y)$  der Originalwert bedeutet.

Eine andere Möglichkeit der kantenerhaltenden Filterung wurde beispielsweise von JIANG u.a. (1997) wie folgt angegeben

$$\bar{f}(x,y) = \frac{\sum_{u=-k}^k \sum_{v=-k}^k f(x+u,y+v) \cdot g(x+u,y+v)}{\sum_{u=-k}^k \sum_{v=-k}^k g(x+u,y+v)} \quad (\text{V.4-7})$$

mit der Gewichtungsfunktion

$$g(x,y) = g^*(d(x,y)) = e^{-\frac{(d(x,y))^2}{2\sigma^2}}$$

Die Funktion  $d(x,y)$  kann entweder wie folgt

$$d(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x,y)}{\partial y}\right)^2}$$

oder

$$d(x,y) = \left| \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right|$$

definiert sein.

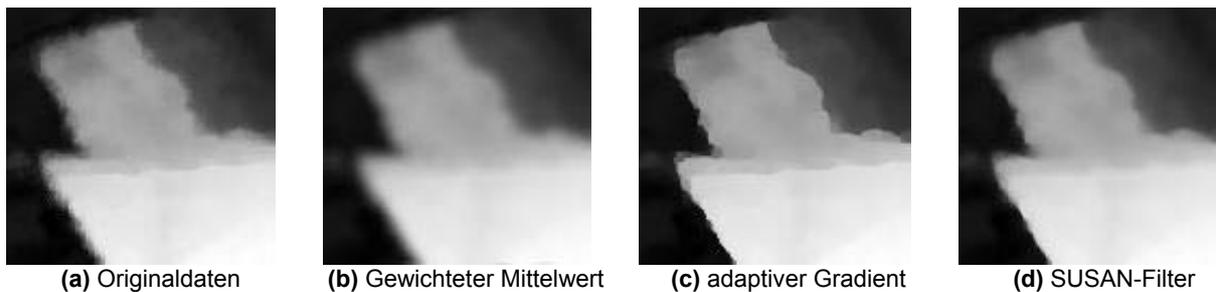
- **SUSAN Filterungsalgorithmus (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus)**

Von SMITH (1996) wurde ein anderer kantenerhaltender Filterungsalgorithmus vorgestellt. Dieses Verfahren ist ähnlich den adaptiven Gradienten mit Gaußscher Funktion. Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden ist die Auswirkung des lokal zentralen Bildpunktes. Beim SUSAN Filter wird der zentrale Pixelpunkt nicht an der Integrationssumme beteiligt, während normalerweise bei Gaußscher Filterung der zentrale Pixel immer eine entscheidende Rolle spielt. So kann eine Integrationsberechnung nach dem SUSAN Filter wie folgt durchgeführt werden:

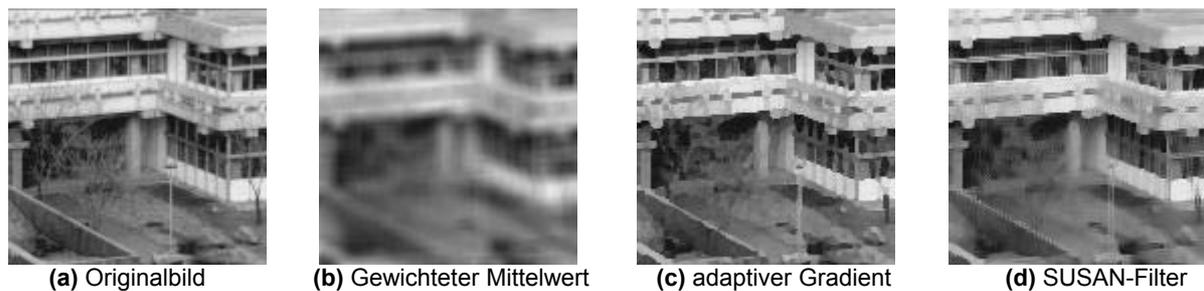
$$\bar{f}(x, y) = \frac{\sum_{(u,v) \neq (0,0)} f(x+u, y+v) \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2} - \frac{(f(x+u, y+v) - f(x, y))^2}{t^2}}}{\sum_{(u,v) \neq (0,0)} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2} - \frac{(f(x+u, y+v) - f(x, y))^2}{t^2}}} \quad (\text{V.4-8})$$

wobei  $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\sigma$  die Skala und  $t$  den Heiligkeitsschwellwert darstellt.

Die Abb.V.4.6a und Abb.V.4.6b stellen zwei Gruppen von Bildern mit unterschiedlichen Filterungsmethoden dar. Die Bilder (a) von Abb.V.4.6a und Abb.V.4.6b sind Originaldaten ohne Filterung. Die übrigen sechs Bilder (b), (c) und (d) der beiden Gruppen geben Ergebnisse der vorgestellten Filterungsmethoden der *gewichteten Mittelwertglättung*, des *adaptiven Gradienten* und des *SUSAN-Filters* wieder. Aus den Abbildungen kann man erkennen, dass die Methoden des adaptiven Gradienten und SUSAN-Filters bei der kantenerhaltenden Filterung ein besseres Ergebnis erzielen können als die einfache gewichtete Mittelwertglättung.



**Abb.V.4.6a:** Daten-Filterung mit Laserscannerdaten

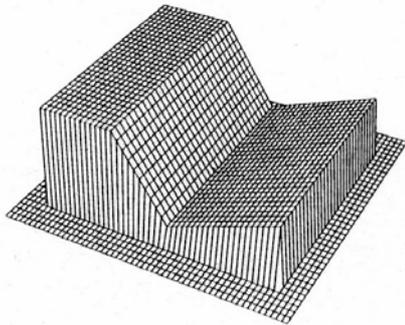


**Abb.V.4.6b:** Daten-Filterung mit Normalbild (Originalbild aus JÄHNE)

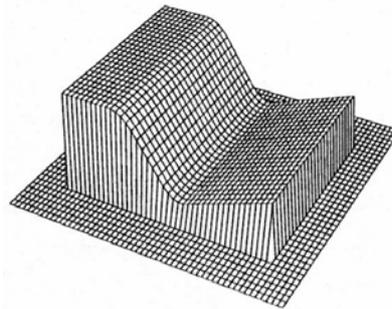
- **Selektive Approximationsfläche**

Ein anderes Verfahren der kantenerhaltenden Bildverbesserung wurde von JIANG u.a. (1997) vorgestellt. Das Verfahren basiert auf der robusten Flächenapproximation. Dazu kann auch eine Gewichtsfunktion berücksichtigt werden. Der Hintergrund der Einführung einer robusten Approximationsfläche liegt darin, dass bei einer Flächenapproximation mehrere Datenverteilungen oder Diskontinuitätsflächen gleichzeitig vorliegen. In all diesen

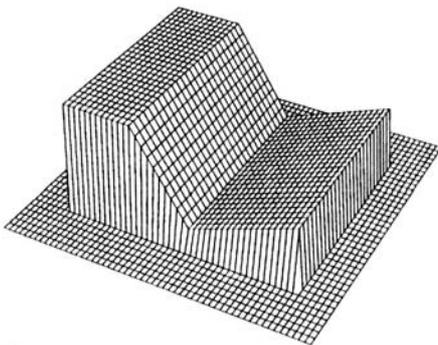
Situationen könnte die konventionelle Methode der kleinsten Quadrate versagen. Dieses Verfahren der selektiven Approximationsfläche wurde bei JIANG u.a. (1997) anhand von zahlreichen Beispielen dargestellt (vgl. Abb.V.4.7).



**Abb.V.4.7a:** Originaltiefenbild



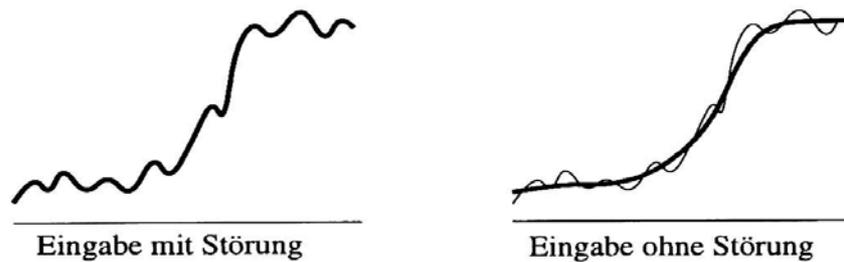
**Abb.V. 4.7b:** Ergebnis nach der Methode der kleinsten Quadrate



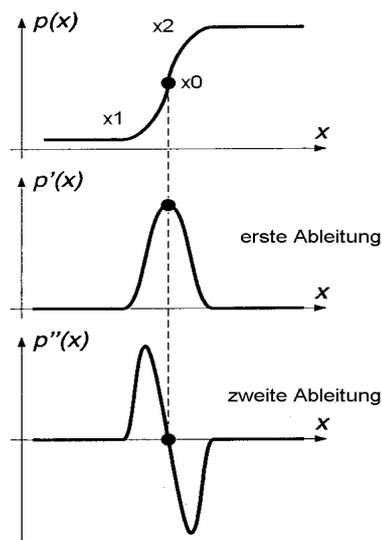
**Abb.V.4.7c:** Ergebnis nach dem Verfahren der selektiven Approximationsfläche

#### 4.5 Eigenschaften von Kantendetektionsverfahren

Glättungsfilter unterdrücken hohe Frequenzen. Die Detektion von Kanten erfordert dagegen eine Filteroperation, die Grauwertveränderungen verstärkt und Bereiche konstanter Grauwerte unterdrückt. Die Abb.V.4.8(a) links zeigt eine verrauschte originale Grauwertkante und rechts die gleiche Kante nach der Glättung. Die Abb.V.4.8(b) stellt die Eigenschaft der ersten und zweiten Ableitung der Ableitungsoperation dar. Die erste Ableitung hat an einer Kante ein Maximum, die zweite Ableitung einen Nulldurchgang dort, wo die Kante ihren steilsten Abfall oder Anstieg hat. Also wird durch die Bestimmung des Maximums bei der ersten Ableitung bzw. die Bestimmung des Nulldurchgangs bei der zweiten Ableitung der Kantenpunkt  $x_0$  in der Abb.V.4.8(b) extrahiert. Für eine Stufenkante ist der Punkt  $x_0$  ein richtig zu detektierender Kantenpunkt. In den meisten Fällen sollen die Kantenpunkte  $x_1$  und  $x_2$  extrahiert werden. Dies entspricht dem Fall einer realen Böschung beispielsweise mit oberer und unterer Kante. Deswegen sollen beide Typen von Kanten, also Stufenkanten und reale glatte Kanten bei der Extraktion berücksichtigt werden.



(a) (Quelle: Klette u.a. 1996)



(b) (Quelle : Pinz 1994 )

**Abb.V.4.8:** Wirkung eines Glättungsfilters und Kantendetektion

Nach JÄHNE (1997) sollten folgende Eigenschaften bei der Kantendetektion berücksichtigt werden:

- ***Verschiebungsfreiheit***

Die erste Eigenschaft ist die sogenannte *Verschiebungsfreiheit*. Bei der Kantendetektion dürfen keine Verschiebungen der Objektposition auftreten. Diese Eigenschaft bezeichnet man auch als die Lokalisation der Kantendetektion. Dies ist die wichtigste Eigenschaft eines Ableitungsoperators.

- ***Unterdrückung des Mittelwertes***

Ein „guter“ Kantendetektor sollte die Eigenschaft besitzen, keine Antwort auf konstante Grauwerte zu zeigen. Dies ist auch die *Antworteigenschaft* der Kantenerkennung. Ein zweiter Ableitungsfilter sollte auch nicht auf konstante Steigungen reagieren.

- ***Symmetrie***

Im allgemeinen kann man die Berechnung der Faltungsfaltung vereinfacht schreiben als

$$f'_n = \sum_{m=1}^k h_m (f_{n-m} - f_{n+m})$$

wobei sich  $2k + 1$  Koeffizienten beispielsweise für eine 1D-Maske ergeben. Dabei kann die Symmetrie-Eigenschaft gewährleistet werden.

- **Isotropie**

Für einen „guten“ Kantenoperator ist es auch wichtig, dass die Operationsantwort nicht von der Kantenrichtung abhängt. Dies entspricht der Eigenschaft der *Isotropie*. Soll ein Operator möglichst richtungsunabhängig sein, so muß eine punktsymmetrische Maske verwendet werden.

## 5 Krümmungsmaße zur Kantendetektion

### 5.1 Einleitung

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. Dieser Abschnitt beinhaltet eine Zusammenfassung von differentialgeometrischen Grundlagen und von Möglichkeiten zur Berechnung von Krümmungsmaßen für solche durch diskrete Punkte gegebene Flächen. Für einen umfassenden Überblick über die Differentialgeometrie sei auf allgemeine Lehrbücher verwiesen. Nach JIANG u.a. (1997) und WEIDNER (1995) ist eine reguläre differenzierbare Fläche eine Vektorfunktion

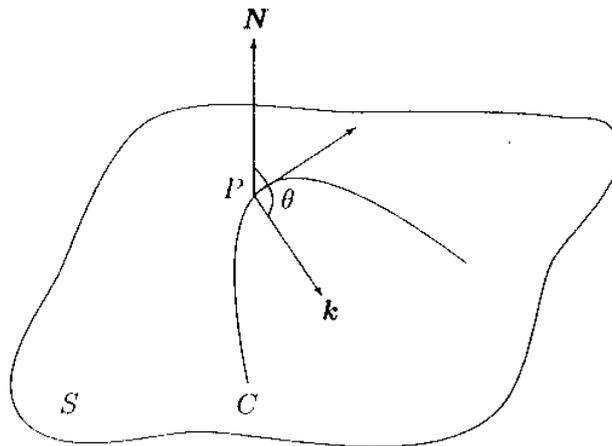
$$\chi(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)), \quad (u, v) \in U \quad (\text{V.5-1})$$

mit der Bedingung  $\chi_u \times \chi_v \neq 0$  und wobei  $\chi_u = (\partial x(u, v)/\partial u, \partial y(u, v)/\partial u, \partial z(u, v)/\partial u)$  und  $\chi_v = (\partial x(u, v)/\partial v, \partial y(u, v)/\partial v, \partial z(u, v)/\partial v)$  für alle  $(u, v) \in U$ , die eine offene Menge  $U$  der reellen Ebene  $\mathfrak{R}^2$  in den Raum  $\mathfrak{R}^3$  abbildet. Für einen Punkt  $P$  auf der Fläche heißt die Ebene, die durch  $P$  und parallel zu  $\chi_u$  und  $\chi_v$  verläuft, die Tangentialebene in  $P$ . Sie wird mit  $T_p$  bezeichnet.

Die Abb.V.5.1 zeigt eine Fläche und ihre Normalkrümmung. Den Vektor

$$N = \frac{\chi_u \times \chi_v}{\|\chi_u \times \chi_v\|} \quad (\text{V.5-2})$$

nennt man den Einheitsnormalenvektor in  $P$ . Die Bedingung  $\chi_u \times \chi_v \neq 0$  garantiert, dass die Normale, also die Gerade durch  $P$  und senkrecht zu  $T_p$ , überall definiert ist.



**Abb.V.5.1:** Normalkrümmung einer Fläche (Quelle: JIANG u.a. 1997)

## 5.2 Maße des Krümmungsraums

Die Anwendung der Krümmungsmaße zur Extraktion von Strukturlinien kann basierend auf unterschiedlichen Modellen erfolgen. Dazu gehören beispielsweise die *Hauptkrümmung*, die *Gaußsche Krümmung* und *mittlere Krümmung*. Unter den Normalkrümmungen aller möglichen Richtungen in der Ebene  $T_p$  werden die *maximale Normalkrümmung*  $k_1$  und die *minimale Krümmung*  $k_2$  als die *Hauptkrümmungen* bezeichnet. Hauptkrümmungen sind also Extrema der Normalkrümmung (JIANG u.a. 1997, WEIDNER 1995). Die zugehörigen Richtungen der Hauptkrümmungen werden dann als die Hauptkrümmungsrichtungen bezeichnet. Die Gaußsche Krümmung  $K$  und die mittlere Krümmung  $H$  können dann mit

$$K = k_1 * k_2, H = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (\text{V.5-3})$$

und

$$k_{1,2} = H \pm \sqrt{H^2 - K} \quad (\text{V.5-4})$$

definiert werden. Die Berechnung von  $K$  und  $H$  erfolgt aus der ersten und zweiten Fundamentalform der Oberfläche, die durch räumliche Koordinaten  $(x, y, z)$  einer Menge von Flächenpunkten definiert wird.

Die in den Gleichungen (V.5-3) und (V.5-4) definierten vier Krümmungsmaße und ihre Kombinationen beschreiben die verschiedenen Oberflächenformen und repräsentieren unterschiedliche Eigenschaften der Oberfläche. Mit Hilfe der Hauptkrümmungen  $k_1$  und  $k_2$  ( $k_{1,2}$ ) können sechs Oberflächentypen unterschieden werden (Abb.V.5.2). Mit der Gaußschen Krümmung  $K$  und der mittleren Krümmung  $H$  können ferner acht verschiedene Flächentypen (Abb.V.5.3) unterteilt werden (Kuppe, Mulde, Rücken, Sattel, Sattlrücken, Sattelkehle, Ebene und Minimalfläche) (JIANG u.a. 1997, WEIDNER 1995, HAALA 1997).

	$k_1 < 0$	$k_1 = 0$	$k_1 > 0$
$k_2 < 0$	Konvexes Ellipsoid	Konvexer Zylinder	Sattelfläche
$k_2 = 0$	Konvexer Zylinder	Ebene	Konkaver Zylinder
$k_2 > 0$	Sattelfläche	Konkaver Zylinder	Konkaves Ellipsoid

**Abb.V.5.2:** Klassifikation nach Hauptkrümmungen

	$K > 0$	$K = 0$	$K < 0$
$H < 0$	Kuppe	Rücken	Sattelrücken
$H = 0$	Undefiniert	Ebene	Minimalfläche
$H > 0$	Mulde	Tal	Satteltal

**Abb.V.5.3:** Klassifikation nach der Gaußschen und mittleren Krümmung

### 5.3 Krümmungsmaße zur Kantenextraktion

Zur Berechnung der oben erwähnten Krümmungsmaße werden in den meisten Fällen zwei Parametrisierungen verwendet, es sollen also zwei Flächendarstellungen berücksichtigt werden. 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. Das Digitale Höhenmodell kann beispielsweise durch

$$\chi = (\chi_1, \chi_2, \chi_3) \quad (\text{V.5-5})$$

gegeben sein. Durch diese Repräsentation vereinfachen sich die oben angegebenen Gleichungen der differentialgeometrischen Größen. Die ersten Ableitungen nach den Flächenkoordinaten  $(u,v)$  sind dann durch

$$\begin{aligned} \chi_u &= (1, 0, \chi_{3,u}) \\ \chi_v &= (0, 1, \chi_{3,v}) \end{aligned} \quad (\text{V.5-6})$$

gegeben, wobei man den Flächennormalenvektor als

$$N = \frac{\chi_u \times \chi_v}{\|\chi_u \times \chi_v\|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \chi_{3,u}^2 + \chi_{3,v}^2}} \begin{pmatrix} -\chi_{3,u} \\ -\chi_{3,v} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{V.5-7})$$

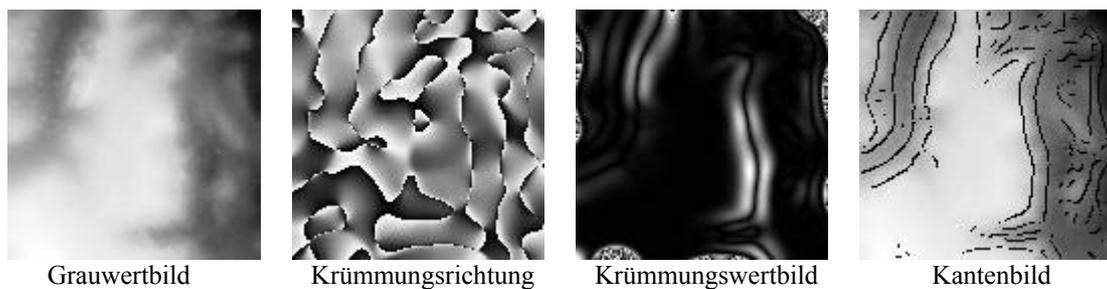
erhält. Die zweiten Ableitungen ergeben sich dann

$$\begin{aligned}
\chi_{uu} &= (0, 0, \chi_{3,uu}) \\
\chi_{uv} &= (0, 0, \chi_{3,uv}) \\
\chi_{vv} &= (0, 0, \chi_{3,vv})
\end{aligned}
\tag{V.5-8}$$

Basierend auf diesen Gleichungen und bei der Berücksichtigung der Gleichung (V.5-3) können die Gaußsche und mittlere Krümmung wie folgt dargestellt werden:

$$\begin{aligned}
K &= \frac{\chi_{3,uu} \chi_{3,vv} - \chi_{3,uv}^2}{(1 + \chi_{3,u}^2 + \chi_{3,v}^2)^2} \\
H &= \frac{(1 + \chi_{3,v}^2) \chi_{3,uu} + (1 + \chi_{3,u}^2) \chi_{3,vv} - 2 \chi_{3,u} \chi_{3,v} \chi_{3,uv}}{2 (1 + \chi_{3,u}^2 + \chi_{3,v}^2)^{\frac{3}{2}}}
\end{aligned}
\tag{V.5-9}$$

Die Hauptkrümmungen  $k_1$  und  $k_2$  ergeben sich dann aus der Gleichung (V.5-4).



**Abb.V.5.4:** Kantendetektion des Krümmungsraumes

In der Analyse von DHM-Daten kann auch die bei WEIDNER (1994) oder WILD & KRZYSTEK (1996) definierte Hessesche Matrix verwendet werden. Neben den oben definierten Krümmungsmaßen wurden von JIANG u.a. (1997) auch andere Repräsentationen untersucht, beispielsweise die durchschnittliche Krümmung und das Krümmungsverhältnis usw. Die Abb.V.5.4 stellt einige Ergebnisse der Kantenextraktion durch Krümmungsmaße dar. Die anderen Ergebnisse von Krümmungsmaßen bei der Extraktion von Gerippllinien werden im nächsten Abschnitt noch diskutiert.

## 6 Kombiniertes Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien

### 6.1 Vorbemerkung

Im Abschnitt V.1 wurden Definitionen der unterschiedlichen zusätzlichen Forminformationen vorgestellt. In dieser Arbeit werden diese Forminformationen in drei Teile eingeteilt: nämlich *markante Punkte*, *Bruchkanten* und *Gerippllinien (Abflußlinien)*. *Markante Punkte*

beschreiben die relativ höchsten oder tiefsten Punkte auf Kuppen bzw. in Mulden. Solche Forminformationen können durch die alleinstehenden *Kantenpunkte* oder/und kurzen *Kantenlinien* repräsentiert werden. Wie in den vergangenen Abschnitten erwähnt, werden die markanten Punkte in der Arbeit nicht als Hauptaufgabe behandelt und deshalb werden sie hier auch nicht diskutiert.

Die zweite Gruppe der zusätzlichen Forminformationen sind die zu extrahierenden Kantenlinien, die in der Arbeit zusammen mit Tallinien, Fallinien und Abflußlinien usw. als *Gerippllinien* bezeichnet werden. Sie beschreiben das Zusammenstoßen zweier verschieden geneigter Teilflächen entlang von Fallinien. Solche Kantenlinien wurden beispielsweise von KRAUS (1984, 1991), FINSTERWALDER (1986), RIEGER (1992), AUMANN (1994) genau diskutiert. Bei KRAUS (1984) und FINSTERWALDER (1986) wurden *Gerippllinien* durch die Bestimmung der Richtung der Tangentialebenen gewonnen. Von RIEGER (1992) wurde ein Summationsverfahren zur Extraktion von Gerippllinien entwickelt. Im Abschnitt V.6.4 wird die Extraktion von Gerippllinien mittels verschiedener Modelle behandelt und kurz diskutiert.

Neben den oben erwähnten Typen von zusätzlichen Forminformationen werden alle übrigen Arten von Kantenlinien als *Strukturlinien* bezeichnet. Die wichtigste Aufgabe der Arbeit in diesem Abschnitt liegt in der Extraktion von solchen Kantenlinien. Die künstlichen Böschungskanten sowie Unstetigkeiten der Geländehöhe bei Flächensprüngen und künstlichen Bauwerken werden in der Arbeit ebenfalls als Strukturlinien behandelt. Sie sind ebenso bei der Beschreibung der Geländeoberfläche bedeutsam.

Wie im Abschnitt V.4.4 gezeigt, spielt die Datenvorverarbeitung eine wichtige Rolle. Wichtig ist es, ein kantenerhaltendes (informationserhaltendes) Modell zu verwenden. Diese Idee wurde zum Beispiel auch von FÖRSTNER (1991) behandelt. Der Ausgangspunkt ist es einerseits, die kleinförmigen Störungen in Originaldaten bei der Extraktion von Strukturlinien möglichst noch vor der Kantenextraktion zu beseitigen. Andererseits sollten Kanteninformationen bei der Datenvorverarbeitung erhalten werden.

Die Geländeoberfläche in der Natur ist ganz unterschiedlich. Deswegen werden in dieser Arbeit die in Bildverarbeitungsbereichen bekannten Verfahren untersucht und daraus wird 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.

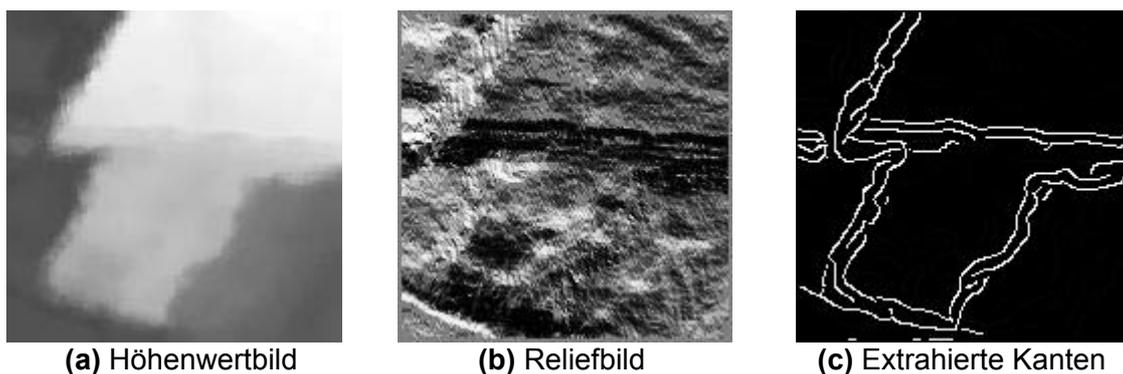
## 6.2 Vorbereitung der Daten

Im Abschnitt V.4.4 wurde die Datenvorverarbeitung erläutert. Dabei wurden Modelle zur Datenfilterung diskutiert. Die Filterung der beobachteten Bildfunktion zur Elimination des Rauschens und die Extraktion von markanten Punkten bzw. Kantenlinien sind zwei wichtige Fragestellungen der Bildanalyse. Im Abschnitt V.4.4 wurden Filterungsmodelle verglichen. Die Glättung und Kantenverstärkung von Bildern bilden zusammen die Bildverbesserung. Es wurde gezeigt, dass mit der linearen Filterung, beispielsweise der bewegten

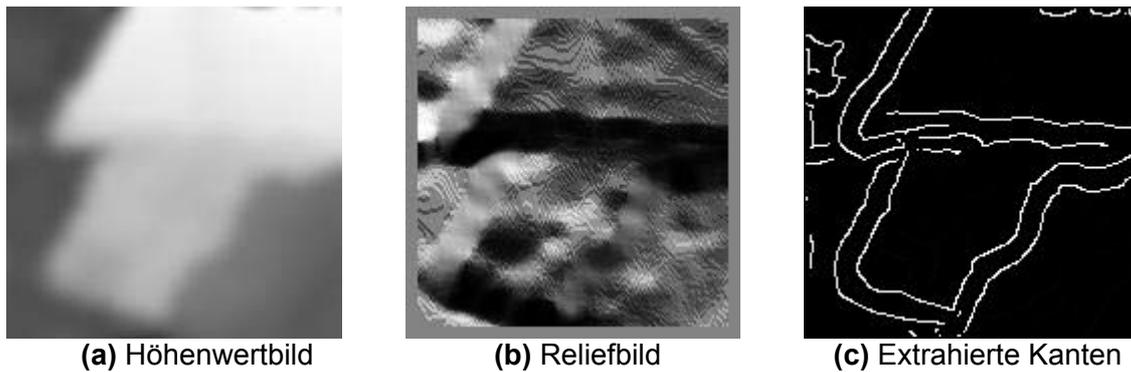
Mittelwertfilterung, der gewichteten Mittelwertfilterung, der Medianfilterung und der Gaußschen Filterung usw., die Daten bzw. die Bilder mehr geglättet und Kanten verschmiert werden und damit die Güte der Lokalisation verschlechtert werden kann.

Dieser Nachteil ist offensichtlich nicht erwünscht. Für unsere Aufgabe der Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten ist es notwendig und wichtig, ein kantenerhaltendes Verfahren zur Datenfilterung zu suchen. Der kantenerhaltende Filter greift auf die Texturmerkmale zu und kann so in Gebieten mit flacher Bildfunktion stark glätten, während er entlang von Kanten und an isolierten Punkten oder Ecken nicht glättet FÖRSTNER (1991). Aus den im Abschnitt V.4.4 dargestellten Abbildungen kann ersehen werden, dass der adaptive Gradient, der SUSAN Filterungsalgorithmus und die selektive Approximationsfläche die Kanten erhalten können. Gegenüber linearen Filtern, bei denen die Filtermatrix über das ganze Bild konstant ist, wird bei der kantenerhaltenden Filterung in Abhängigkeit von der Textur die Filtermatrix angepaßt. Damit wird erreicht, dass Kanten erhalten bleiben und nur in Gebieten mit theoretisch konstanter Bildfunktion stark geglättet wird FÖRSTNER (1991).

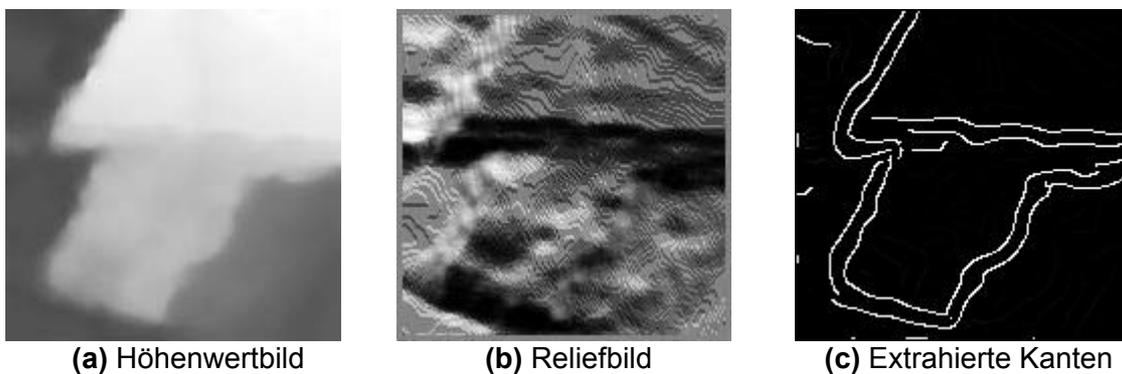
Der Effekt der kantenerhaltenden Filterung wurde im Abschnitt V.4.4 durch die Abb.V.4.6a, V.4.6b und V.4.7 dargestellt. Die Abb.V.6.2.1, V.6.2.2 und V.6.2.3 zeigen den Effekt der Filterung durch andere Darstellungstypen. Die Abb.V.6.2.1 zeigt ein Höhenwertbild, ein Reliefbild und ein extrahiertes Kantenlinienbild. Aus der Abb.V.6.2.1(b) kann man ersehen, dass das Originalbild Störungen enthält. Die extrahierten Kantenlinien (vgl. Abb.V.6.2.1(c) ) sind auch nicht sehr zufriedenstellend. Die Abb.V.6.2.2 zeigt Ergebnisse mit der bewegten Mittelwertfilterung. Die Kantenlinien sind zwar gut detektiert, die Daten sind aber stark geglättet und die Diskontinuitätsgrenzen sind verschmiert. Die Abb.V.6.2.3 stellt Ergebnisse mit dem adaptiven Gradienten dar. Diese Ergebnisse sind besser als die der Abb.V.6.2.1 und V.6.2.2. *Allerdings soll die Durchführung dieser Vorbearbeitung von Daten ebenfalls nach der Notwendigkeit erfolgen. Das heißt, nur wenn Rauschen wirklich enthalten ist, soll die Vorbearbeitung durchgeführt werden.*



**Abb.V.6.2.1:** Originaldaten ohne Filterung



**Abb.V.6.2.2:** Datenfilterung mit bewegtem Mittelwert



**Abb.V.6.2.3:** Datenfilterung mit dem adaptiven Gradienten

## 6.3 Extraktion von Strukturlinien mit dem Canny-Operator

### 6.3.1 Vorbemerkung

Die einfachen Standardverfahren zur Kantendetektion, wie zum Beispiel der LoG- oder DoG-Operator usw., basieren lediglich auf den offensichtlichen Eigenschaften von Kanten, nämlich der Kantenstärke, der Ableitung am Ort der Kanten bzw. der Homogenität der Gebiete zu beiden Seiten der Kanten. Mit diesen Verfahren kann ein gutes Ergebnis bei der Detektion der Bildkanten erzielt werden. Insbesondere sind LoG- und DoG-Operator sehr bekannt. Durch die Nulldurchgangssuche wird die Lokalisierung der Kanten bestimmt. Bei der speziellen Anwendung der Strukturlinienextraktion von DHM-Daten sind diese Verfahren noch zu untersuchen, weil dabei der genaue Ort der Kantenlinien nicht so einfach definiert ist wie bei den idealen Kanten und in vielen Fällen die Form von Kanten in DHM-Daten durch eine Böschung mit oberer und unterer Kantenlinie dargestellt wird. Unter diesem Umstand sollen Kantenpunkte  $X_1$  und  $X_2$  beispielsweise in der Abb.V.4.4(c) und Abb.V.4.8(b) extrahiert werden. Für die Extraktion solcher realen Strukturlinien von DHM-Daten sind die einfachen Standardverfahren nicht sehr geeignet. Die Modelle des Krümmungsraums sind eine gute Alternative zur Strukturlinienextraktion für DHM-Daten. Aber mit diesem Verfahren ist die Geschlossenheit der detektierten Linien nicht sehr zufriedenstellend (vgl. Abb.V.5.4).

Ein anderer Kantenoperator ist der sehr bekannte *Canny-Operator*. Dieser Operator wurde z.B. in CANNY (1983, 1986) und DERICHE (1987) genau vorgestellt und in den zahlreichen Lehrbüchern der Bildverarbeitung als Standardverfahren zur Kantendetektion beschrieben (NEVATION 1986, HABERÄCKER 1995, STEINBRECHER 1993, HUISSAIN 1991). Der Deriche-Operator stellt eine Weiterentwicklung des Canny-Operators dar. Die Ergebnisse der Kantendetektion von Deriche-Operator und Canny-Operator sind nahezu identisch. Weitere Informationen und Beschreibungen zum Deriche-Operator kann man z.B. bei KLETTE u.a. (1995) finden. In der vorliegenden Arbeit wird der Canny-Operator eingeführt und bei der Extraktion von Strukturlinien mit DHM-Daten intensiv untersucht und weiterentwickelt. Natürlich gibt es keinen absolut optimalen Operator. Es handelt sich immer um eine bedingte Optimalität. Um dieses Verfahren bei der Extraktion von Strukturlinien mit DHM-Daten anzuwenden, wird es hier zunächst kurz beschrieben und danach werden die mit diesem Verfahren extrahierten Strukturlinien durch Abbildungen dargestellt.

### 6.3.2 Grundlagen des Canny-Operators

Der Canny-Operator gehört zu einem sogenannten „optimalen“ Kantenoperator. Bei diesem Operator zur Detektion von Stufenkanten werden einige grundsätzliche Annahmen und Kriterien vorgeschrieben. Die drei angenommenen Kriterien sind:

- *Gute Detektion, also Robustheit gegen Rauschen (good detection)*
- *Gute Lokalisierungsqualität (good localization) und*
- *Nur eine Filterantwort auf eine einzige Kante (uniqueness of response).*

Um diese drei Kriterien möglichst zu erfüllen, ist die wichtigste Aufgabe die Wahl einer Antwortfunktion  $h(x)$ . Als eine Auswahl von  $h(x)$  kann man die normierte zweidimensionale Gaußsche Funktion

$$G_{\sigma}(x, y) = e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{V.6-1})$$

einführen und anwenden.

Der Parameter  $\sigma$  entspricht dem Skalenparameter oder der Standardabweichung. Durch die Erhöhung dieses Parameters wird eine stärkere Glättung erreicht. Der Nachteil ist dann, dass eine Verschmierung der Kante eingeführt und die Lokalisation der Kantenlinien verschlechtert wird. In Anlehnung an die klassische Vorstellung eines Kantenoperators, bestehend aus Glättungsfilter und Ableitungsoperator, wird daher die Bildfunktion in kontinuierlicher Form  $f(x, y)$  mit den Richtungsableitungen der Gaußschen Funktion in x- und y-Richtung gefaltet:

$$\begin{aligned} D_x(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} (G_{\sigma}(x, y) * f(x, y)) = \frac{\partial G_{\sigma}(x, y)}{\partial x} * f(x, y) \\ D_y(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} (G_{\sigma}(x, y) * f(x, y)) = \frac{\partial G_{\sigma}(x, y)}{\partial y} * f(x, y) \end{aligned} \quad (\text{V.6-2})$$

Die ersten Ableitungen in X- bzw. Y-Richtung ergeben sich aus der Gleichung (V.6-3) und der Gradient  $D(x, y)$  der geglätteten Bildfunktion und die Orientierung der Kantenlinien an der Stelle  $(x, y)$  aus der Gleichung (V.6-4).

$$\frac{\partial G_{\sigma}(x, y)}{\partial x} = -\frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$

$$\frac{\partial G_{\sigma}(x, y)}{\partial y} = -\frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$
(V.6-3)

$$D(x, y) = \sqrt{(D_x(x, y))^2 + (D_y(x, y))^2}$$

$$\Phi(x, y) = \arctan(D_y(x, y)/D_x(x, y))$$
(V.6-4)

Unter Orientierung versteht man die Richtung der Tangente an der Kontur, die durch die einzelnen Kantenelemente beschrieben wird. Der Gradient  $D(x, y)$  zeigt immer in Richtung des stärksten Anstieges und steht damit immer senkrecht zur Kantenrichtung am untersuchten Punkt  $(x, y)$ . Der Skalenparameter (Standardabweichung)  $\sigma$  bestimmt die Glättungsstärke. Beim Canny-Operator ist er ein wichtiger Parameter der verwendeten Filterfunktion. Durch die Vergrößerung des Parameters und der Filtermasken kann eine größere Glättungswirkung erzielt werden, was den Nachteil einer schlechten Lokalisation der Kante mit sich bringen kann. Darüber hinaus ergeben sich mehrere feine Punkte oder alleinstehende kürzere Linien innerhalb einer Kantenlinie, falls dieser Parameter zu klein gewählt wird. Um beide Nachteile möglichst zu vermeiden, wird beim Canny-Operator eine Kanten-Nachbearbeitung ausgenutzt, die aus dem Prozeß der *Non-Maxima-Supression* 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. Im folgenden werden drei Nachbearbeitungsschritte kurz erläutert.

### 6.3.3 Nachbearbeitung

#### 6.3.3.1 *Non-Maxima-Supression-Verfahren (Unterdrückung der Nicht-Kantenpunkte)*

Eine Kanten-Nachbearbeitung beim Canny-Operator ist die *Non-Maxima-Supression*. Dabei sollen mögliche Kantenpunkte durch die Unterdrückung der Nicht-Kantenpunkte verstärkt werden. Dieses Verfahren zur Kanten-Nachbearbeitung setzt auf die Informationen der potentiellen Kantenpunkte und der Kantenrichtung bzw. Kantenstärke auf. Als eine Alternative soll dieses Verfahren viel besser funktionieren als ein einfaches Schwellwertverfahren. Beim einfachen Schwellwertverfahren wird die Kantenrichtung nicht berücksichtigt und nur ein globaler Schwellwert eingesetzt. Mit diesem Wert werden alle berechneten Kantenpunktbeträge verglichen, ob an dieser Stelle eine Kante vorliegt oder nicht. Auf diese Weise ergeben sich je nach Kantenform und Kantenverlauf keine Kantenlinien, sondern Kantenflächen. Danach soll eine Skelettierung durchgeführt werden, um mögliche Kantenlinien zu detektieren.

Das Verfahren der *Non-Maxima-Supression* liefert eine bessere Möglichkeit zur Kanten-Nachbearbeitung. Eines davon ist das einfache *Non-Maxima-Supression-Verfahren*. Bei

diesem Verfahren wird ein aktueller Punkt mit seinen Nachbarn verglichen. Falls der Betragsgradient dieses aktuellen Punktes im betreffenden Pixel ein lokales Maximum zeigt, wird dieser Punkt als Kantenpunkt betrachtet. Ansonsten wird dieser Punkt als Nicht-Kantenpunkt gelöscht.

Es kann auch ein verbessertes Verfahren verwendet werden. Dabei wird der aktuelle Gradientenwert mit zwei angrenzend liegenden Gradientenwerten verglichen, die in Gradientenrichtung, aber auf verschiedenen Seiten des aktuellen betrachteten Punktes liegen. Alle Gradientenpunkte sollen mit ihren zwei Nachbargradientenwerten verglichen werden. Falls dieser Punkt ein lokales Maximum besitzt, wird er dann als ein Kantenpunkt identifiziert. Ansonsten wird dieser Punkt als Nicht-Kantenpunkt gelöscht.

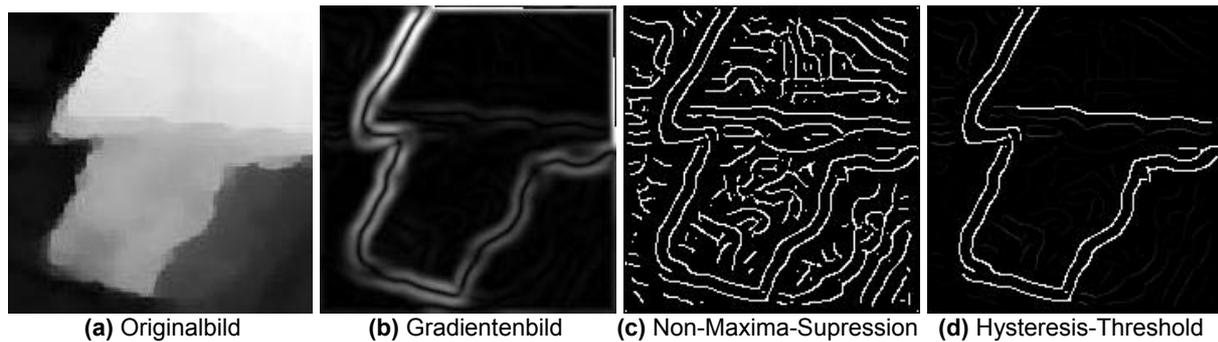
Von STEINBRECHER (1993) wurde auch ein anderes verbessertes Verfahren der Non-Maxima-Suppression vorgestellt. Dieses Verfahren geht davon aus, dass die Gradientenrichtung im allgemeinen nicht genau in Richtung eines Gitterpunktes aus den 8-Punkt-Umgebungen zeigt. Die Kantenrichtung muß dabei angenähert und interpoliert werden. Nach der Annäherungsberechnung der Gradientenrichtung werden dann alle Punkte mit ihren zwei angenäherten auf verschiedenen Seiten liegenden Gradientenwerten verglichen. Falls dieser Punkt ein lokales Maximum darstellt, wird er als ein Kantenpunkt bezeichnet. Ist dies nicht der Fall, wird dieser Punkt als Nicht-Kantenpunkt gelöscht.

### 6.3.3.2 *Hysteresis-Threshold-Verfahren (Hysterese-Schwelwert-Verfahren)*

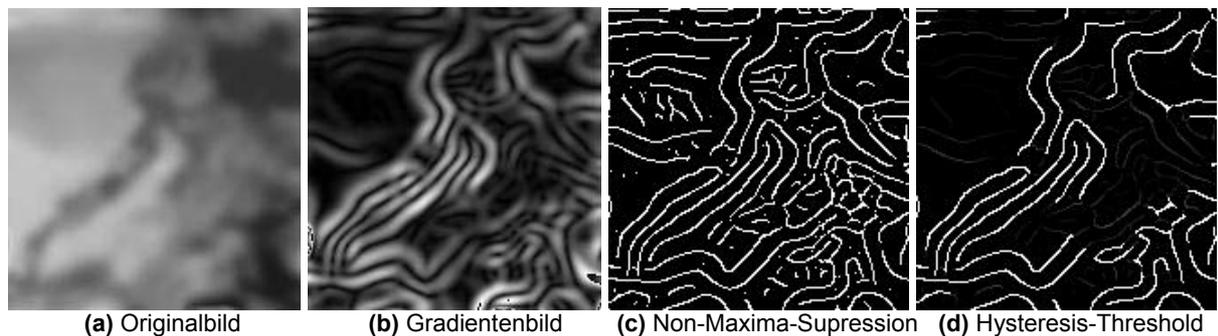
Die Abb.V.6.3.1(b) zeigt ein Ergebnis des Gradientenbetrages der ersten Testdaten. Die Abb.V.6.3.1(c) stellt das Ergebnis nach dem Non-Maxima-Suppression-Verfahren dar. Aus diesem Bild kann man erkennen, dass die Anzahl der potentiellen Kantenpunkte erheblich reduziert wird. Aus diesem Ergebnis nach der Non-Maxima-Suppression kann es dann durch eine geeignete Schwellwertbildung einfach entschieden werden, ob es sich bei einem Punkt aufgrund seines Gradientenwertes um einen Kantenpunkt handelt oder nicht.

Man kann natürlich auch ein einfaches Schwellwertverfahren anwenden. Beim Canny-Operator wird aber nicht ein einziger Schwellwert, sondern ein *Schwellwertintervall* verwendet. Dabei werden ein hoher Schwellwert  $TH_{high}$  und ein niedrigerer Schwellwert  $TH_{low}$  eingesetzt. Punkte, an denen der Gradientenbetrag diesen hohen Schwellwert  $TH_{high}$  überschreitet, werden verwendet, um neue Konturen zu beginnen, während Punkte mit Gradientenbeträgen über dem niedrigeren Schwellwert  $TH_{low}$  der Fortsetzung dienen. Die Kantenpunkte und Konturen unter dem Schwellwert  $TH_{low}$  werden dann gelöscht. Die Wahl und Bestimmung beider Schwellwerte entspricht dem *Hysteresis-Threshold-Verfahren*. Die Wahl der beiden Schwellwerte muß nach unterschiedlichen Daten bzw. Bildern entschieden werden.

Normalerweise kann man die Schwellwerte interaktiv auswählen. Sinnvoll ist es natürlich, ein quantitatives Verfahren zur Auswahl der Schwellwerte zu entwickeln. Dazu wird es im nächsten Abschnitt noch diskutiert. Die Abb.V.6.3.1(d) stellt ein Ergebnis nach dem Hysteresis-Threshold-Verfahren dar. Die Abb.V.6.3.2 zeigt dann die entsprechenden Ergebnisse von anderen DHM-Daten. Wie in den vergangenen Abschnitten erläutert, sollen die extrahierten Kantenlinien im nächsten Abschnitt V.6.5 noch weiter bearbeitet werden, um die alleinstehenden Kantenpunkte bzw. kurzen Kantenlinien zu eliminieren.



**Abb.V.6.3.1:** Nachbearbeitungsschritte der Testdaten I



**Abb.V.6.3.2:** Nachbearbeitungsschritte der Testdaten II

### 6.3.3.3 *Constraint-Thinning-Verfahren (Zwang-Verdünnungs-Verfahren)*

Der Grund der Einführung vom *Constraint-Thinning-Verfahren* liegt darin, dass es in Kombination mit dem Non-Maximum-Suppression-Verfahren manchmal zu Fehlern kommt, wenn sich mehrere Kanten im Einzugsbereich des Operators befinden. Um solche Fehler möglichst zu beseitigen, kann beim Canny-Operator ein Constraint-Thinning-Verfahren nach dem Hysteresis-Threshold-Verfahren eingesetzt werden. Zur Durchführung dieses Verfahrens wird zunächst wieder auf das Gradientenbild zurückgegriffen, welches mit einer einfachen Schwellwertbildung binarisiert und skelettiert werden soll. Falls es notwendig ist und auf den mit dem Hysteresis-Threshold-Verfahren extrahierten Kantenlinien die Lücken wirklich verbleiben, können sie dann mit diesem Binärbild ergänzt werden. Durch STEINBRECHER (1993) wurde dieses Verfahren genau vorgestellt und beschrieben.

### 6.3.4 *Wahl der Schwellwerte*

Eine wichtige Aufgabe der Nachbearbeitung mit dem Canny-Operator ist die Bestimmung des Schwellwertintervalls beim Hysteresis-Threshold-Verfahren. Dabei sollen ein hoher Schwellwert  $TH_{high}$  und ein niedrigerer Schwellwert  $TH_{low}$  bestimmt werden. Die Bestimmung zweier Schwellwerte beeinflusst wesentlich die Anzahl der extrahierten Kantenpunkte bzw. Kantenlinien. In der Arbeit wird zunächst ein Schwellwert näherungsweise bestimmt, aus dem die beiden Schwellwerte dann berechnet werden. Zur Bestimmung zweier Schwellwerte  $TH_{high}$  und  $TH_{low}$  sind beispielsweise folgende Methoden zu verwenden:

- **Empirische Methode:**

Beim Non-Maxima-Suppression-Verfahren wird zunächst ein Mittelwert des Gradientenbetrages  $TH_{mittel}$  berechnet. Dieser Mittelwert liefert nur einen Näherungswert. Aus diesem Mittelwert werden dann beide Schwellwerte visuell folgendermaßen bestimmt:

$$\begin{pmatrix} TH_{high} \\ TH_{low} \end{pmatrix} = TH_{mittel} \begin{pmatrix} + \Delta TH1 \\ - \Delta TH2 \end{pmatrix} \quad TH_{high} \leq 255 \text{ und } TH_{low} \geq 0 \quad (\text{V.6-5})$$

Die Werte  $\Delta TH1$  und  $\Delta TH2$  sollen visuell interaktiv festgelegt und eingeführt werden. Die Abb.V.6.3.3(a) und (b) stellen zwei Kantenbilder dar, wobei der Mittelwert des Gradientenbetrages  $TH_{mittel}$  gleich 85 ist und verschiedene  $\Delta TH1$  und  $\Delta TH2$  Werte gegeben sind.



(a) Schwellwerte :  $TH_{mittel} = 85$ .  
 $TH_{low} = 75$  und  $TH_{high} = 95$

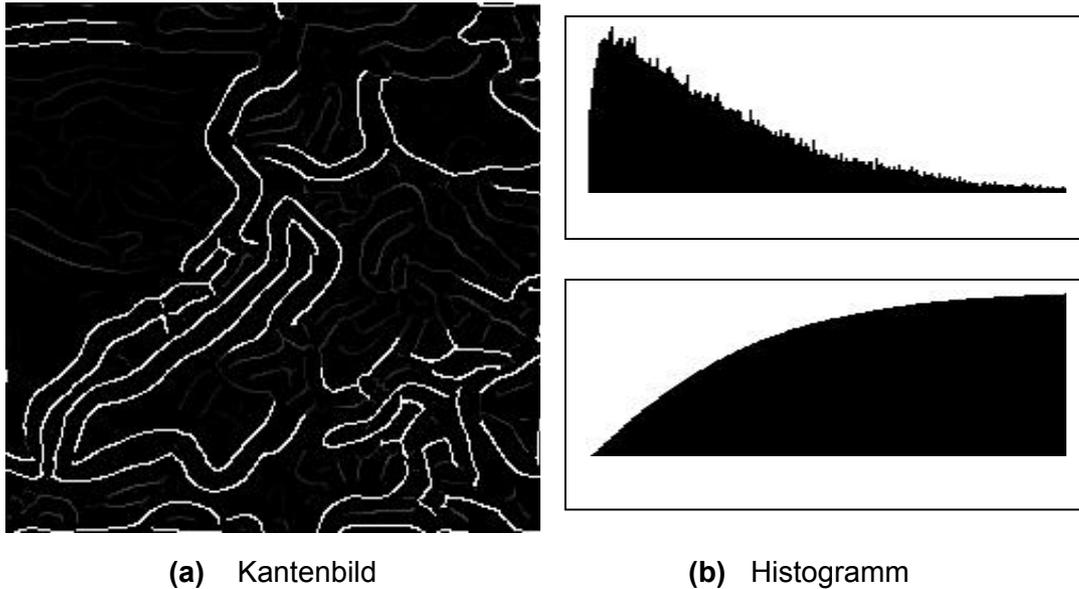


(b) Schwellwerte :  $TH_{mittel} = 85$ .  
 $TH_{low} = 80$  und  $TH_{high} = 125$

**Abb.V.6.3.3:** Empirische Methode zur Bestimmung der Schwellwerte

- **Histogramm-Verfahren**

Ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Näherungswerte von beiden Schwellwerten  $TH_{high}$  und  $TH_{low}$  kann mit Hilfe der Berechnung des Histogramms nach dem Non-Maxima-Suppression-Verfahren durchgeführt werden. Von LI (1990) wurde ein Histogramm-Verfahren zur Bestimmung des Schwellwertes vorgestellt. Dabei wurde die gesamte Fläche des Histogrammbildes in zwei Teilflächen unterteilt. Die Fläche  $S^-$  macht p% der gesamten Fläche unter der Histogrammkurve aus. Der andere Teil  $S^+$  ist (100-p)% der gesamten Fläche. Der Parameter p ist ein vorgegebener Prozentsatz. Sollte man aus Erfahrungen diesen Prozentsatz bereits kennen, kann der Schwellwert  $w$  bestimmt werden.



**Abb.V.6.3.4:** Histogramm-Verfahren zur Bestimmung der Schwellwerte  
( Signifikanzniveau  $p = 5$  )

Zur Herleitung der Schwellwerte wird die Schwellwertaufgabe als Hypothesentest formuliert. Aufgrund der Form des Histogramms können Entscheidungen über günstige Schwellwerte zur Segmentierung getroffen werden. In der Arbeit kann der Schwellwert  $TH_{high}$  durch Histogrammkurven berechnet werden. Dabei soll ein *Signifikanzniveau*  $p$  eingeführt werden. Die mit diesem Wert ausgemachte Fläche kann dann als Schwellwert  $TH_{high}$  betrachtet werden. Der Schwellwert  $TH_{low}$  kann mittels eines empirischen Verfahrens bestimmt werden. Die Abb.V.6.3.4 zeigt Ergebnisse der Bestimmung von Schwellwerten. Die Abb.V.6.3.4(a) zeigt ein Kantenbild. Die Abb.V.6.3.4(b) zeigt zwei Histogrammkurven. Die obere ist eine Histogrammkurve beim Non-Maxima-Suppression-Verfahren. Die untere stellt das kumulative Histogramm ebenfalls beim Non-Maxima-Suppression-Verfahren dar. Dabei ist das Signifikanzniveau  $p$  mit 5 gegeben. Die durch dieses Verfahren bestimmten Schwellwerte werden als Näherungswerte betrachtet. Die richtige Wahl zweier Schwellwerte  $TH_{low}$  und  $TH_{high}$  wird dann ebenfalls visuell interaktiv durchgeführt.

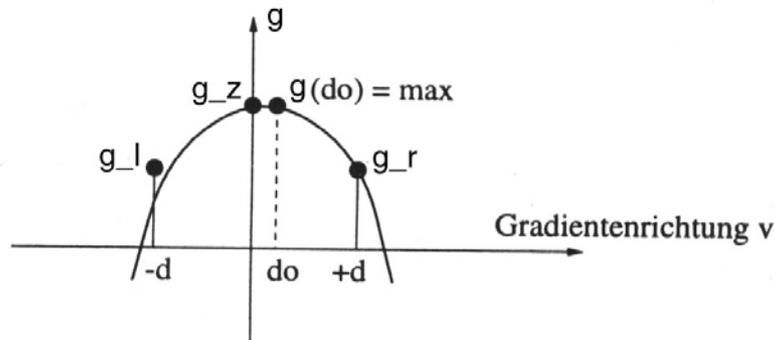
- ***Automatisches Verfahren***

Von LI (1990) wurden auch ein automatisches und ein dynamisches Verfahren vorgestellt. Das automatische Verfahren beruht auf der Berücksichtigung der Trennbarkeit zweier Gruppen von Daten. Dabei wurde der Schwellwert durch die Varianzanalyse des Histogramms bestimmt. Beim dynamischen Verfahren wurde der Schwellwert durch die Berechnung des Grauwertmittelwertes innerhalb eines Bildfensters des aktuellen Punktes definiert.

### **6.3.5 Bestimmung der Subposition von Kantenpunkten**

Die Kantenpunktllokalisierung kann auf Subpixelgenauigkeit gesteigert werden, indem durch die drei auf der Gradientenrichtung liegenden Gradientenwerte eine ausgleichende Parabel

gelegt wird. Diese Berechnung der Subposition von Kantenpunkten ist besonders von Bedeutung, wenn die Maschenweite (der DHM-Gitterabstand) von DHM-Daten sehr groß ist.



**Abb.V.6.3.5:** Bestimmung der Subposition des Kantenpunktes

Angenommen, dass  $g_l, g_z$  und  $g_r$  die drei auf der Gradientenrichtung liegenden Gradientenwerte sind (vgl. Abb.V.6.3.5). Die unbekannt drei Parameter  $a, b$  und  $c$  der Parabelgleichung  $g = av^2 + bv + c$  lassen sich aus den drei Gradientenwerten eindeutig bestimmen, wobei ein  $u-v$ -Koordinatensystem als lokales Liniensystem eingeführt wird:  $u$  liegt in Kantenlinienrichtung und  $v$  senkrecht dazu, also in Gradientenrichtung. Die optimale Subposition eines Kantenpunktes liegt beim Maximum der ausgleichenden Parabel bei  $v_0 = d_0$ . Die gesuchte Subposition eines Kantenpunktes ergibt sich dann aus

$$x_0 = x - \frac{g_r - g_l}{2(g_r - 2g_z + g_l)} \cos \varphi$$

und

$$y_0 = y - \frac{g_r - g_l}{2(g_r - 2g_z + g_l)} \sin \varphi$$

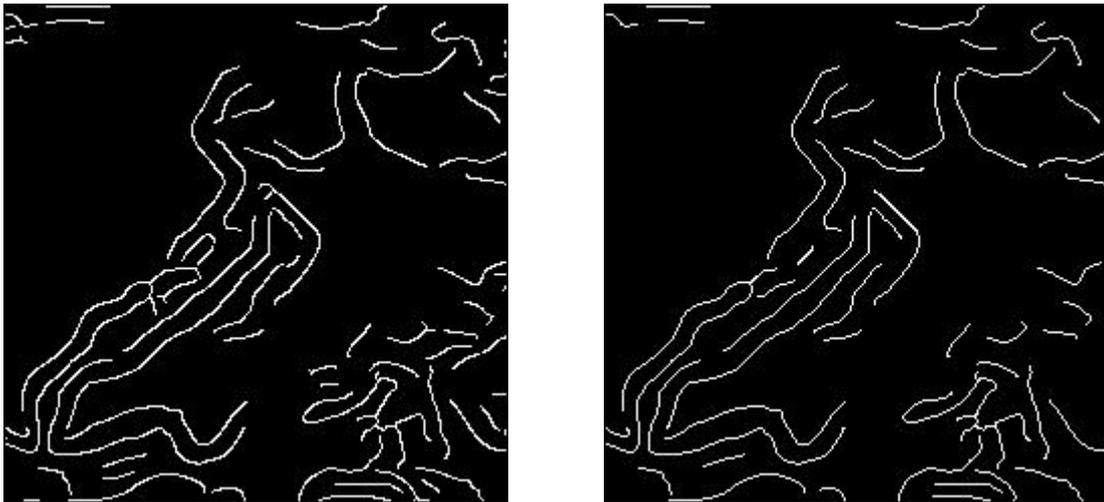
(V.6-6)

wobei  $\varphi$  die Gradientenrichtung und  $(x, y)$  die originale Kantenpunktposition darstellt (vgl. FUCHS 1998).

### 6.3.6 Identifizierung der Kantenlinien

Nach dem Hysteresis-Threshold-Verfahren können extrahierte Kantenlinien normalerweise schon als *richtige* Kantenlinien bezeichnet werden. Allerdings sollten für manche Anwendungen solche Kantenlinienkandidaten noch nachbearbeitet werden. Es kommt vor, dass *alleinstehende* Kantenpunkte bzw. *kürzere* Kantenlinien beim extrahierten Kantenbild vorliegen. *Wenn es nötig ist*, können solche Kantenpunkte bzw. kürzere Kantenlinien noch eliminiert werden. Als Kriterium kann die *Länge* der Kantenlinien eingeführt werden. Falls

ein extrahierter Kantenlinienkandidat die vorgegebene Kantenlinienlänge (den Schwellwert) nicht überschreitet, wird er eliminiert. Allerdings ist diese Nachbearbeitung je nach der *Notwendigkeit* durchzuführen. Die Abb.V.6.3.6 zeigt ein Ergebnis dieser Identifizierung. Das linke Bild zeigt extrahierte Kantenlinienkandidaten. Das rechte Bild stellt ein nach diesem Verfahren ausgewertetes Kantenlinienbild dar. In diesem Fall wird der Schwellwert der Kantenlinienlänge mit 10 Pixel vorgegeben, was der Länge von 40 m am Boden entspricht.



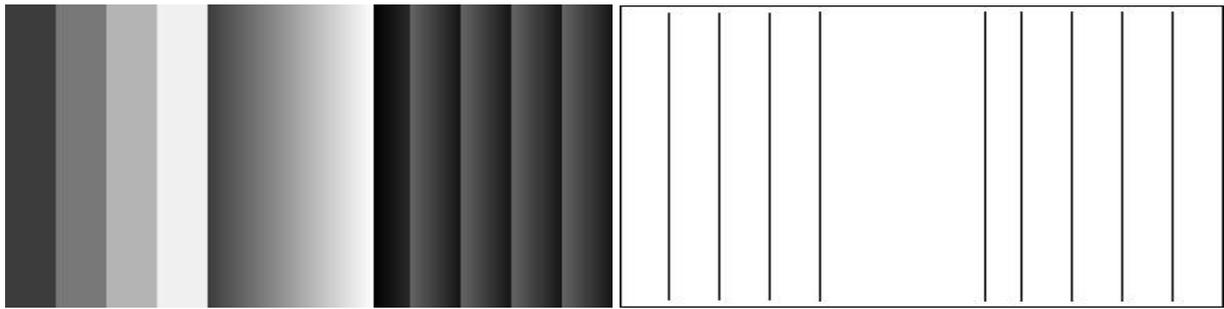
**Abb.V.6.3.6:** Identifizierung nach Länge der Kantenlinie  
(Originaldaten : 250 x 250 Pixel, DHM-Abstand: 4 m)

### **6.3.7 Ergebnisse der Extraktion von Strukturlinien**

Im folgenden werden einige Ergebnisse mit unterschiedlichen Beispielen von Daten und Bildern dargestellt. Dabei werden zunächst einige Simulationsbilder herangezogen. Im Abschnitt 6.3.7.2 werden einige reale Photos bei der Kantendetektion getestet. Anschließend werden einige Luftbilder beim Test der Extraktion von Gebäudeumrissen und Straßenlinien angewendet. Zur Extraktion von Strukturlinien werden DHM-Daten im Abschnitt 6.3.7.4 herangezogen. Dabei wird nur die Extraktion von Bruchkantenlinien dargestellt. Die Extraktion von Geripplinien wird im Abschnitt V.6.4 vorgestellt.

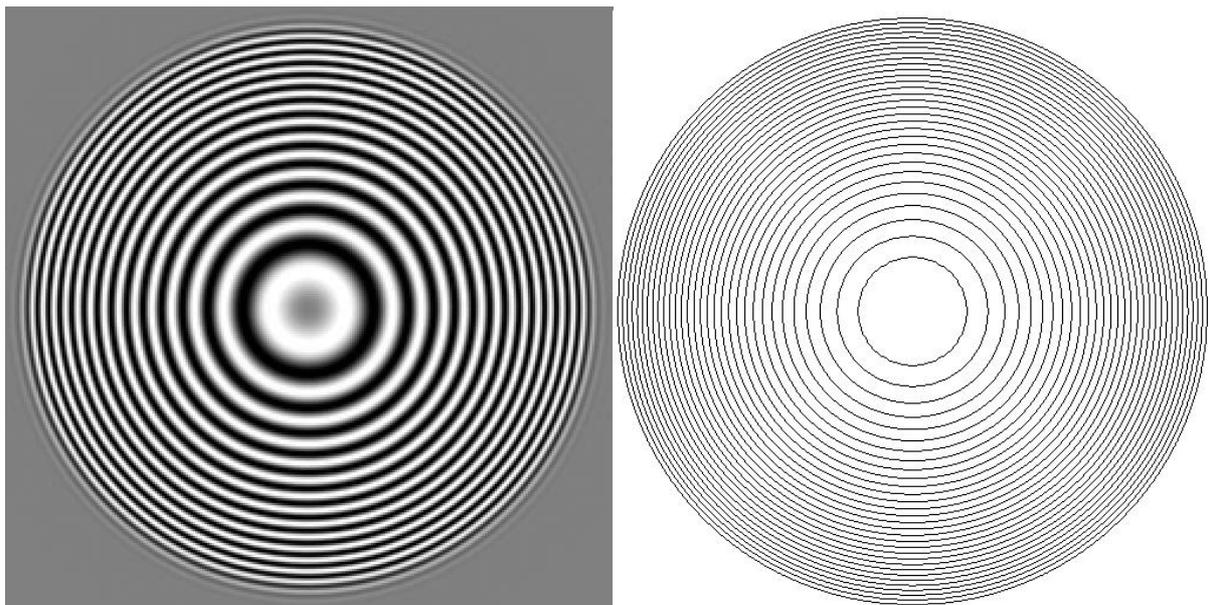
#### **6.3.7.1 Ergebnisse mit Simulationsbildern**

Die Abb.V.6.3.7(a) zeigt ein Simulationsbild (links) und ein detektiertes Kantenbild (rechts). Für solche ideale Kantenlinien hat der Canny-Operator ähnliche Ergebnisse wie die einfachen Standardverfahren, beispielsweise Sobel-Operator oder LoG-Operator, erzielt.



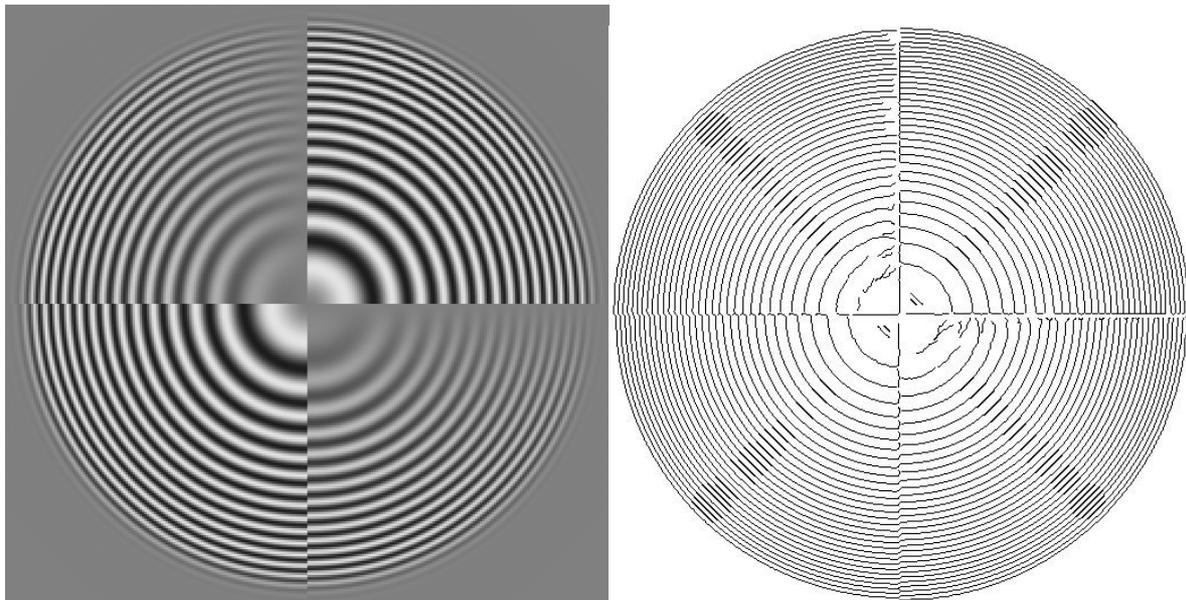
**Abb.V.6.3.7(a):** Kantendetektion mit Simulationsdaten (Originalbild : 300 x 150 Pixel)

Ein anderes Ergebnis wird in der Abb.V.6.3.7(b) dargestellt. Die Abb.V.6.3.7(b) links ist ein Originalbild. Dieses Bild besitzt mehrere Kreisbahnen mit unterschiedlichen Breiten. Das rechte Bild ist ein detektiertes Kantenbild. Aus diesem Kantenbild kann man erkennen, dass mit dem Canny-Operator bei unterschiedlichen Kantenbreiten und verschiedenen Kantenrichtungen die Kantenlinien richtig detektiert werden können.



**Abb.V.6.3.7(b):** Kantendetektion mit Simulationsdaten (Originalbild aus JÄHNE)  
(Originalbild : 512 x 512 Pixel)

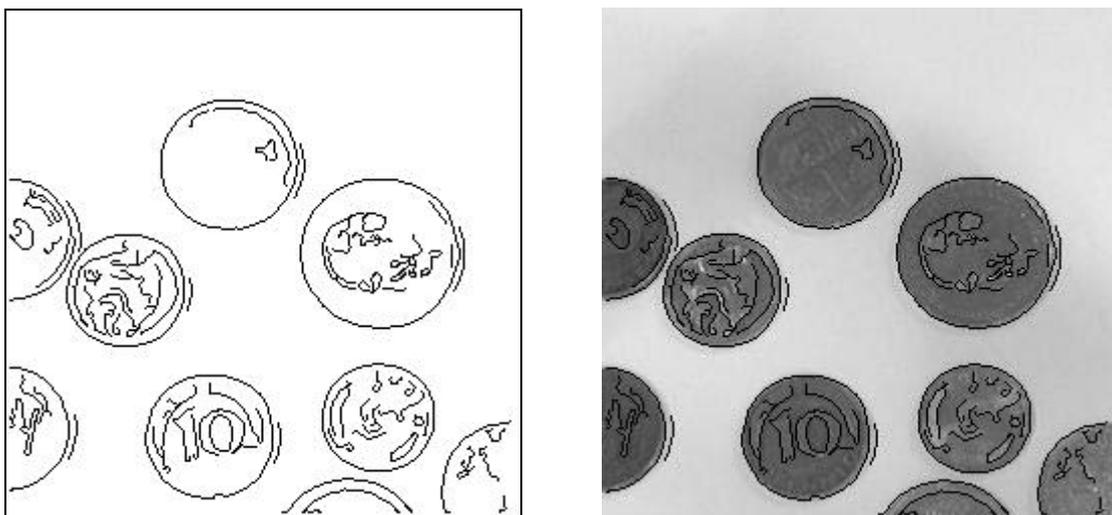
Ein interessanteres Ergebnis wird in der Abb.V.6.3.7(c) dargestellt. Dieses Bild zeigt ein inhomogenes Smoothing. Die gegenüberliegenden Sektoren links oben und rechts unten werden durch einen inhomogenen Rauschteil gestört. Die schwarzweißen Kreisbahnen haben auch eine Verschiebung gegen die anderen Sektoren erfahren. Das rechte Bild zeigt ebenfalls das detektierte Kantenbild. Aus diesem Kantenbild kann man erkennen, dass mit dem Canny-Operator bei solchen durch Rauschen gestörten Bildern die Kantenlinien auch richtig detektiert werden können.



**Abb.V.6.3.7(c):** Kantendetektion mit Simulationsdaten (Originalbild aus JÄHNE)  
(Originalbild : 512 x 512 Pixel)

### 6.3.7.2 *Ergebnisse mit realen Bildern*

Im Abschnitt V.6.3.7.1 wurden einige Ergebnisse mit Simulationsdaten dargestellt. Bei solchen Simulationsdaten liegen normalerweise ideale Kantenformen vor. Die Verfahren müssen noch mit realen Daten untersucht werden. In diesem Abschnitt und in den nächsten Abschnitten werden verschiedene reale Datentypen herangezogen und untersucht.



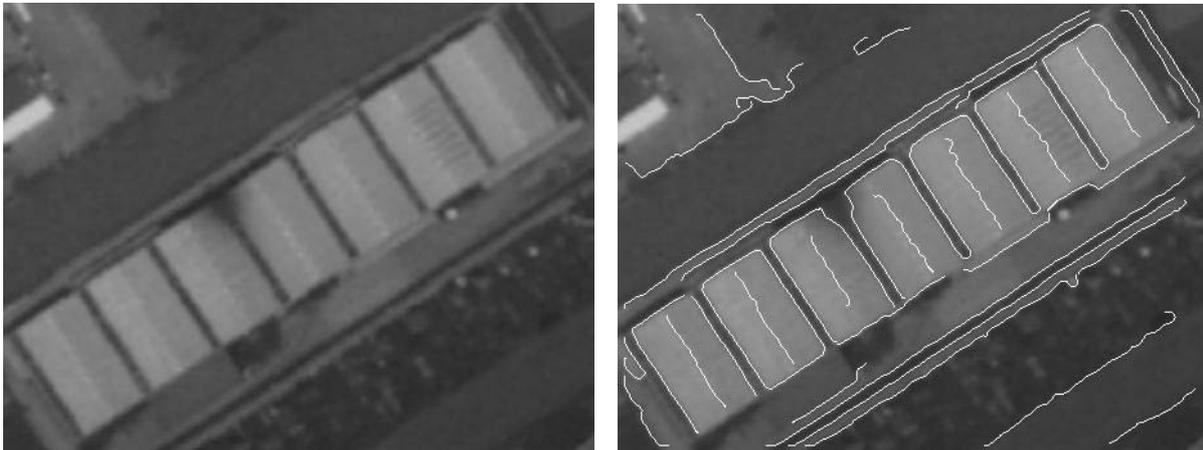
**Abb.V.6.3.8:** Kantendetektion mit einem realen Bild (Originalbild aus JÄHNE)  
(Originalbild : 256 x 256 Pixel)

Ein wichtiger Arbeitszweig der Digitalen Bildverarbeitung ist die sogenannte Mustererkennung. Bei der Mustererkennung sollten Bilder zunächst vorverarbeitet und

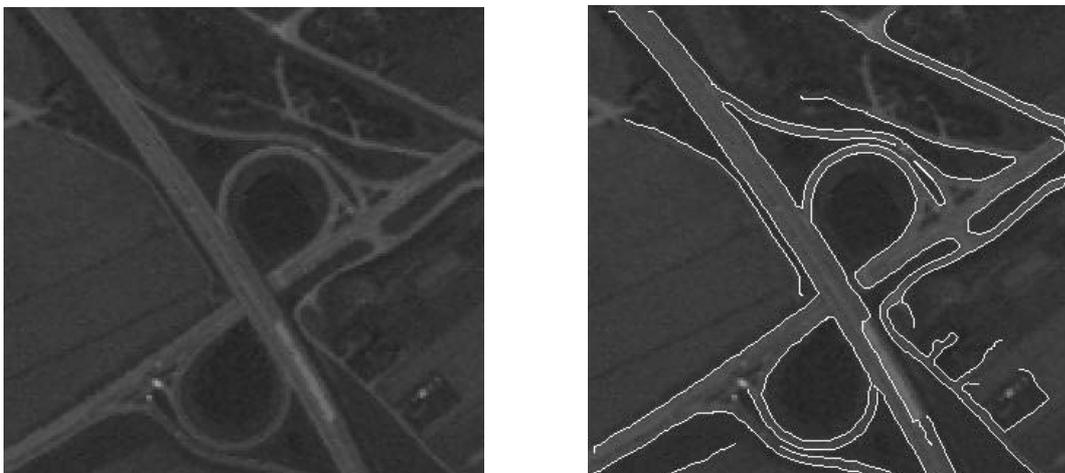
segmentiert werden und anschließend werden Objekte durch die extrahierten Merkmale und Kantenlinien bzw. Umfang und Umrisse beschrieben. Die zentrale Aufgabe dabei ist die Extraktion von Umfanglinien (Kantenlinien). Die Abb.V.6.3.8 zeigt ein Ergebnis der Extraktion von Kantenlinien mit einem realen Bild.

### 6.3.7.3 *Ergebnisse mit Luftbildern*

Die Abb.V.6.3.9(a) und (b) zeigen einige Ergebnisse mit Daten *flugzeuggetragener Abtastsysteme (Scanbild)*. Die Originaldaten werden nicht entzerrt und die Auflösung beträgt 2,5 m am Boden. Die linken Bilder der Abb.V.6.3.9(a) und (b) sind Originaldaten. Die rechten Bilder sind mit den extrahierten Strukturlinien überlagert. Die Abb.V.6.3.9(a) zeigt das Ergebnis der Extraktion der Umrisse von Gebäuden. Die Abb.V.6.3.9(b) stellt das Ergebnis der Extraktion von Straßenlinien dar. Diese Abbildungen haben gezeigt, dass der Canny-Operator bei der Extraktion von Strukturlinien mit Luftbildern oder Scanbildern auch gute Ergebnisse erzielen kann.



**Abb.V.6.3.9(a):** Kantendetektion mit *Scanbild* (Originaldaten : 456 x 350 Pixel)



**Abb.V.6.3.9(b):** Kantendetektion mit *Scanbild* (Originaldaten : 330 x 325 Pixel)

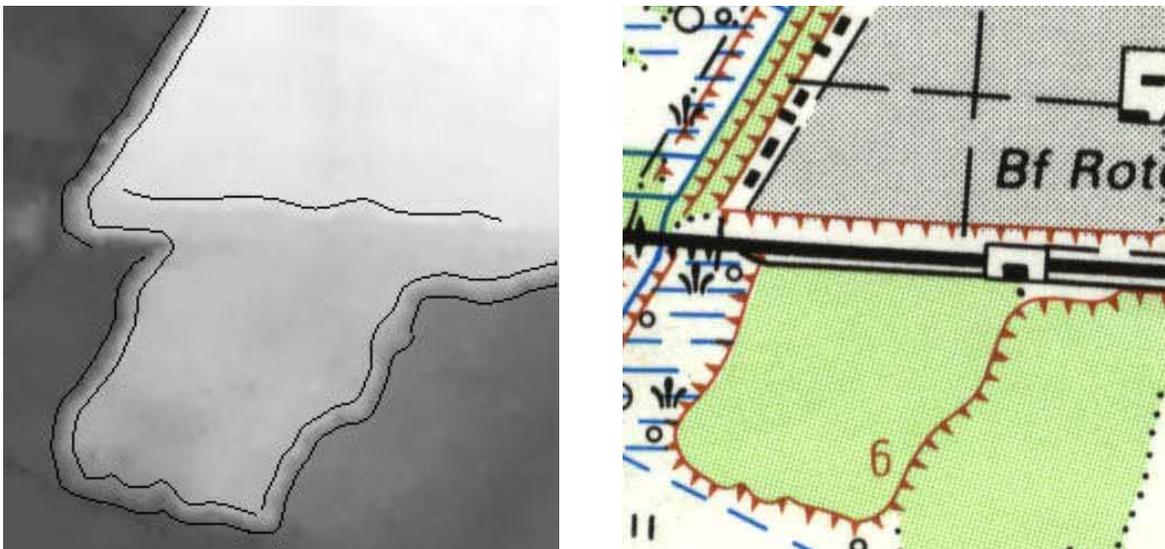
#### 6.3.7.4 *Ergebnisse mit DHM-Daten*

Die oben dargestellten Ergebnisse werden hier als Test des Verfahrens betrachtet. Eine wichtige Aufgabe der Arbeit ist es, Strukturlinien aus *Laserscannerdaten* bzw. aus allgemeinen *DHM-Daten* zu extrahieren. In diesem Abschnitt werden einige Ergebnisse der Extraktion von Strukturlinien gezeigt.

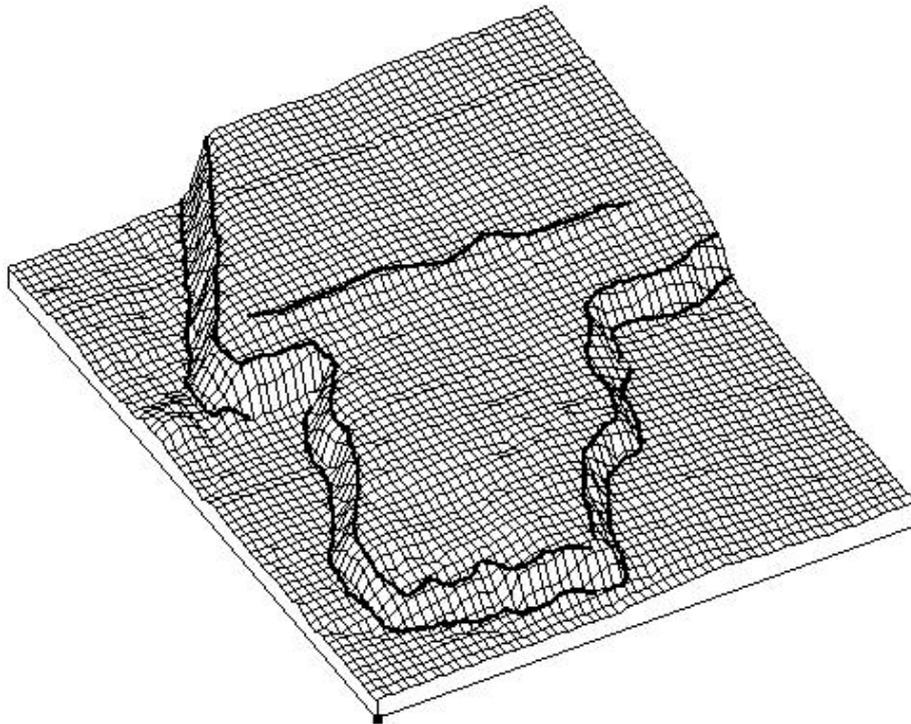
Die Extraktion von geomorphologischen Forminformationen wurde in den vergangenen Abschnitten behandelt. Solche Forminformationen wurden in Strukturlinien (die hier als Gelände-Bruchkantenlinien betrachtet werden) und Geripplinen untergliedert. In diesem Abschnitt werden einige Ergebnisse zur Extraktion von Strukturlinien dargestellt. Die Extraktion von Geripplinen wird im Abschnitt V.6.4 vorgestellt.

Um das Verfahren bzw. den Operator bei der Extraktion von Strukturlinien mit DHM-Daten zu untersuchen, werden verschiedene Testgebiete ausgewählt. Die hier ausgewählten Testgebiete besitzen unterschiedliche Formen von Strukturlinien. Die in diesem Abschnitt dargestellten Abbildungen zeigen Ergebnisse der Extraktion von Strukturlinien mit DHM-Daten.

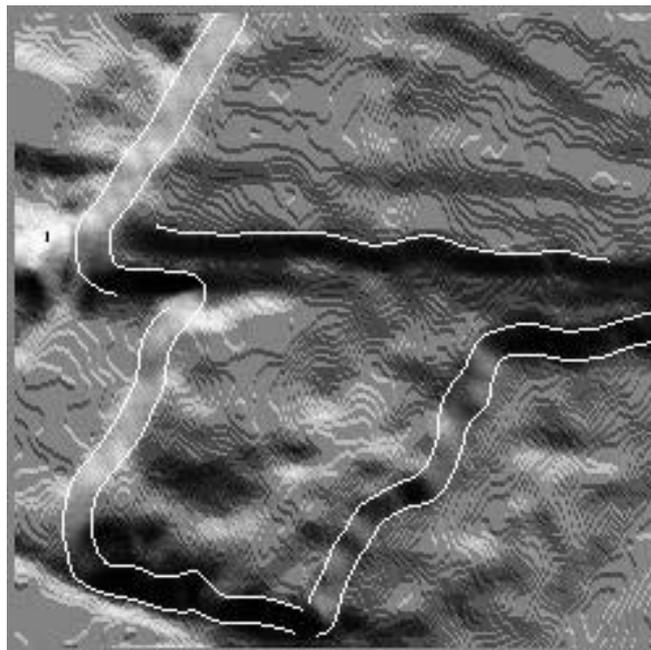
Die Abb.V.6.3.10(a) zeigt ein Ergebnis der Extraktion von Bruchkanten der ersten Testdaten. Das rechte Bild zeigt die digitalisierte topographische Karte. Das linke Bild stellt das Ergebnis von extrahierten Strukturlinien dar. Der verwendete Maßstabsparameter  $\sigma$  beträgt 2,5. Die Abb.V.6.3.10(b) zeigt eine Perspektivansicht der entsprechenden Testdaten, die Abb.V.6.3.10(c) eine Reliefdarstellung.



**Abb.V.6.3.10(a):** Kantendetektion der Testdaten I  
(Linke Originaldaten : 250 x 250 Pixel, DHM- Maschenweite: 2 m)

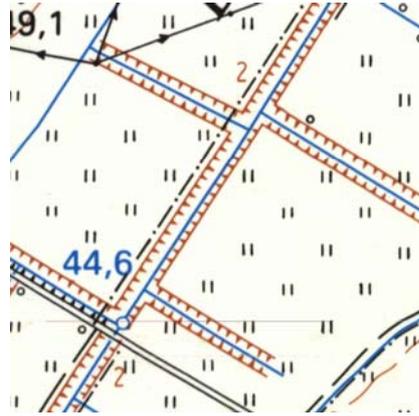
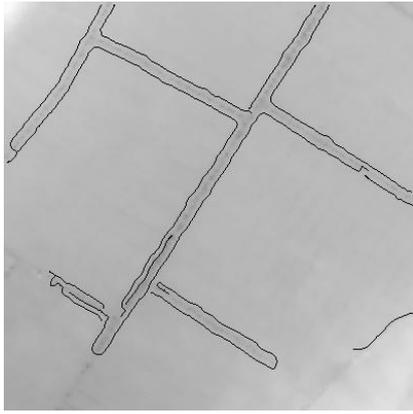


**Abb.V.6.3.10(b):** Perspektivansicht der Testdaten I

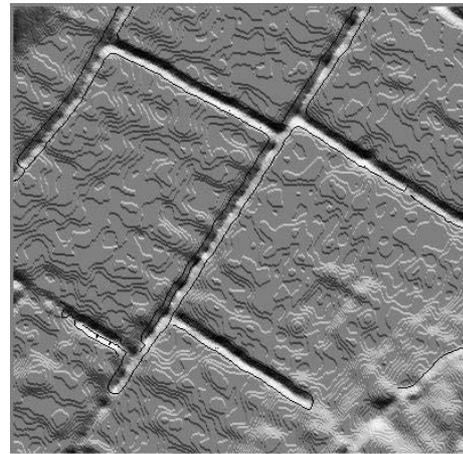
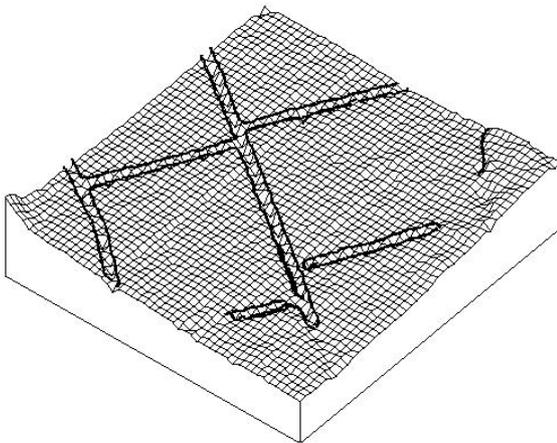


**Abb.V.6.3.10(c):** Reliefbild der Testdaten I

Die Abb.V.6.3.11 stellt einige Ergebnisse der Extraktion von Strukturlinien der Testdaten II vor. Das rechte Bild der Abb.V.6.3.11(a) zeigt wiederum die digitalisierte topographische Karte. In diesem Gebiet liegen einige Wasserläufe mit Böschungen vor. Die Abb.V.6.3.11(a) links stellt das entsprechende Ergebnis von extrahierten Strukturlinien dar. Die Abb.V.6.3.11(b) zeigt ein Reliefbild und eine Perspektivansicht der entsprechenden Testdaten. Der Maßstabsparameter  $\sigma$  beträgt 2,0. Dabei kann erkannt werden, dass Böschungen gut detektiert werden.

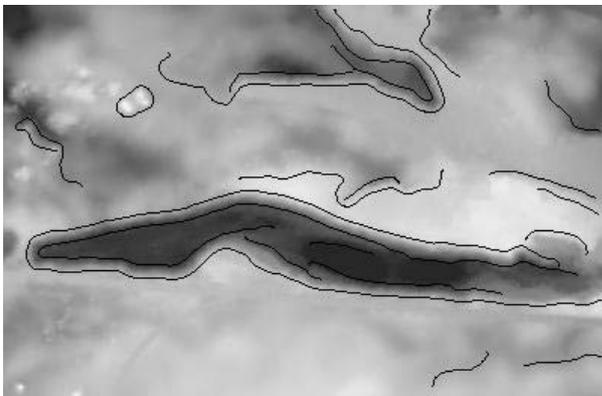


**Abb.V.6.3.11(a):** Kantendetektion der Testdaten II  
 (Linke Originaldaten : 400 x 400 Pixel, DHM- Maschenweite: 2 m)



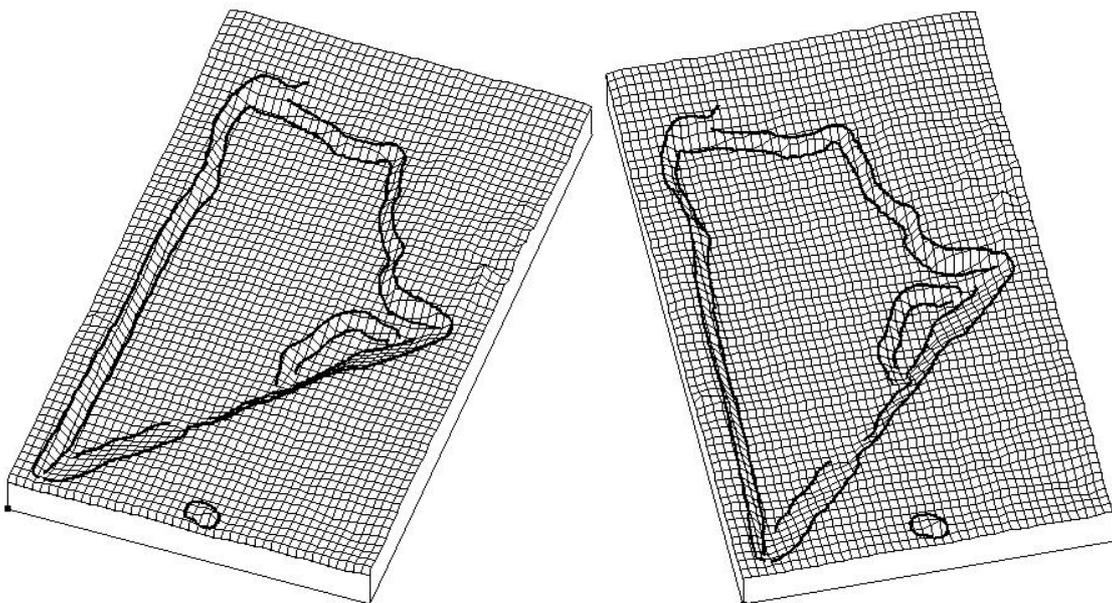
**Abb.V.6.3.11(b):** Perspektivansicht und Reliefbild der Testdaten II

Die anschließende Abb.V.6.3.12 beschreibt ein Ergebnis der Testdaten III. Das rechte Bild der Abb.V.6.3.12 zeigt ebenso die digitalisierte topographische Karte. In diesem Gebiet liegen einige Böschungen und zwei kleine Teiche vor. Die Abb.V.6.3.12 links stellt das entsprechende Ergebnis von extrahierten Strukturlinien dar. Der Maßstabsparameter  $\sigma$  beträgt hier 2,5.



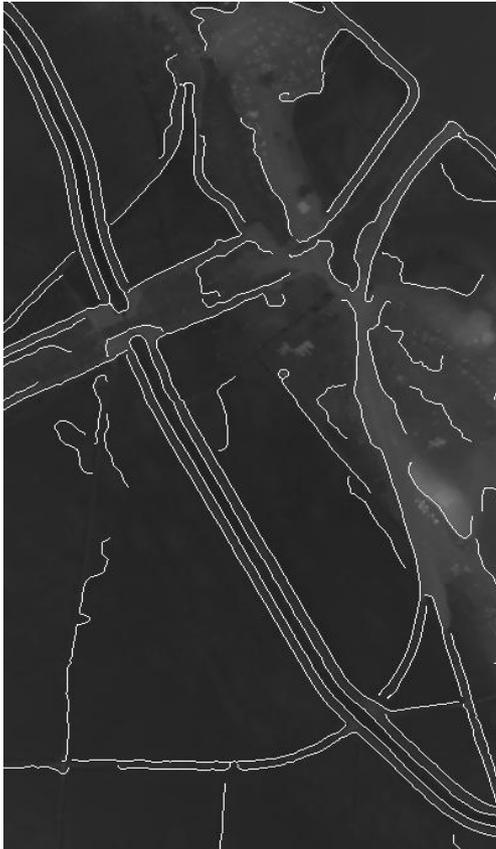
**Abb.V.6.3.12:** Kantendetektion der Testdaten III  
 (Linke Originaldaten : 400 x 266 Pixel, DHM- Maschenweite: 3 m)

Die Abb.V.6.3.13 beschreibt einige Ergebnisse der Testdaten IV. In diesem Gebiet befinden sich ebenso mehrere Böschungen mit relativer Höhenangabe. Darin steht auch ein kleines Teilgebiet mit Nadelwald. Der Maßstabsparameter  $\sigma$  wurde hier mit 3,0 festgelegt. Die Abb.V.6.3.13(b) stellt zwei Perspektivansichten dieser Testdaten dar.



**Abb.V.6.3.13(b):** Perspektivansichten der Testdaten IV

Die abschließende Abb.V.6.3.14 beschreibt ein Ergebnis der Testdaten V innerhalb der topographischen Karte TK 25 Blatt 2833. Die Abb.V.6.3.14(a) zeigt einen Teil der extrahierten Kantenlinien des ganzen Gebietes. Die breiten *Fluß- und Straßenlinien* werden gut detektiert, vor allem auch die Ober- und Unterkanten der Böschungen am Wasserlauf. Die Abb.V.6.3.14(b) zeigt ein Orthophotobild dieses entsprechenden Teilgebietes.



**Abb.V.6.3.14(a):** Kantenbild des Testdaten V  
(400 x 760 Pixel, DHM- Maschenweite: 4 m)



**Abb.V.6.3.14(b):** Orthophotobild des Teilgebietes

Als ein zusätzliches Beispiel zeigt die Abb.V.6.3.15 einige andere Ergebnisse der Kantenextraktion mit Laserscannerdaten im Nahbereich. Laserscanner bilden eine neue Datenquelle für die Dokumentation historischer Stätten und Denkmäler. Die als Testobjekt für einen Nahbereichs-Laserscanner dienende Relieffläche ist ca. 2,7 m hoch und 1,0 m breit. Der Punktabstand auf dem Objekt liegt zwischen 2 und 3 mm. Die Abb.V.6.3.15(a) zeigt ein Grauwertbild dieses Objektes, das durch gemessene Laserpunkte interpoliert wird. Die Abb.V.6.3.15(b) zeigt ein Kantenbild, das durch den oben vorgestellten Operator detektiert wird. Die Abb.V.6.3.15(c) stellt eine Überlagerung von Kantenbild und Reliefbild dar.



**Abb.V.6.3.15:** Kantendetektion der Testdaten VI  
 (Originaldaten : 337 x 910 Pixel, Pixelgröße: 2 - 3 mm)

## 6.4 Extraktion von Geripplinien

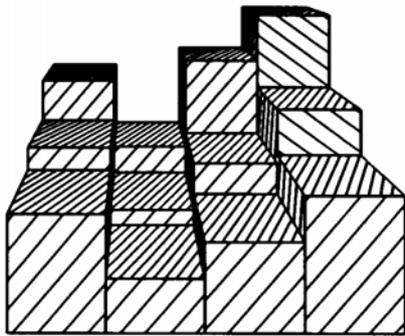
### 6.4.1 *Summationsverfahren*

Die Extraktion von Strukturlinien wurde in den vergangenen Abschnitten genau untersucht. In diesem Abschnitt soll die Extraktion von Geripplinien vorgestellt werden. Wie bereits erwähnt, stellt diese zweite Gruppe der zusätzlichen Forminformationen diejenigen zu extrahierenden Kantenlinien dar, die durch Tallinien, Fallinien und Abflußlinien usw. zusammengesetzt werden.

Die Fallinien als die Richtungen der stärksten Geländeneigung spielen eine überragende Rolle bei hydrologischen Untersuchungen eines Geländes, da sie weitestgehend mit der Abflußlinie des Wassers an der Oberfläche zusammenfallen. Von Bedeutung sind sie u.a. zur Flußlinienermittlung, zur Ermittlung von Einzugsgebieten und zur Bestimmung der Abflußlinie von einem gewissen Punkt oder Bereich (Ausbreitung von Hochwasser). Darüber

hinaus spielen sie eine wichtige Rolle im Agrarbereich zur Planung und Festlegung der Bebauungsrichtung in geneigtem Gelände und im Straßenbau zur Bestimmung des Verhaltens von Kaltluft in Nebelbecken RIEGER (1992).

Von RIEGER (1992) wurde ein Verfahren zur Extraktion solcher Abflußlinien untersucht. Der dort angewendete Ansatz ersetzte die Oberfläche durch diskrete Flächenelemente. Die Höhe jedes Rasterpunktes wurde als die mittlere Höhe einer ihn umgebenden Rastermasche angesehen. Die Abb.V.6.4.1 zeigt ein Blockbild der dort verwendeten Flächendefinition. Die Flächendarstellung erlaubt eine einfache Formulierung von Übergängen zu den Nachbarn. Das Wasser kann durch die vier Seiten bzw. acht Seiten zu den Nachbarmaschen überfließen, wobei die Seitenlängen der Grenzen sowie die Entfernung zu jeder Nachbarmasche gleiche Größe aufweisen (im Quadratraster). Die Extraktion von Abflußlinien kann mittels der Berechnung der Krümmung durchgeführt werden. Die Krümmung einer Fläche im Bereich von Stützpunkten läßt sich aus den Höhenunterschieden des Standpunktes zu den umliegenden Punkten erkennen. In einer schrägen Ebene beispielsweise ist der Höhenunterschied zu den Unterliegern in Summe etwa gleich dem – negativen – Höhenunterschied zu den Oberliegern. In einem Talbereich ist zu erwarten, dass der Höhenunterschied zu den Unterliegern in Summe den negativen zu den Oberliegern übersteigt, für Kammpunkte gilt die Umkehrung. Aus diesen Betrachtungen wurde von RIEGER (1992) ein sogenanntes *Summationsverfahren* zur Extraktion von Abflußlinien entwickelt. Dieses Verfahren wird hier kurz vorgestellt.



**Abb.V.6.4.1:**

Blockbild der Flächendefinition  
(Quelle : Rieger 1992)

Der Wasserabfluß soll in Abhängigkeit von den lokalen Höhenunterschieden der Rastermaschen geschätzt werden. Daraus wurde die entsendete Wassermenge eines Punktes durch die Berechnung der Höhenunterschiede zu den Nachbarn ermittelt. Es wurden zunächst einige Parameter eingeführt: Es sei  $R_0$  die Rastermasche,  $h_0$  die Höhe des aktuellen Punktes und  $W_0$  die vorhandene Wassermenge. Die Wassermenge, die  $R_0$  an den Nachbarn  $R_i$  mit der Höhe  $h_i$  entsendet, sei  $W_i$ . Das Wasser in  $R_i$  wurde vollständig auf die tiefliegenden Nachbarn verteilt, wobei die Aufteilung proportional zu den Höhenunterschieden erfolgte. Es galt dann:

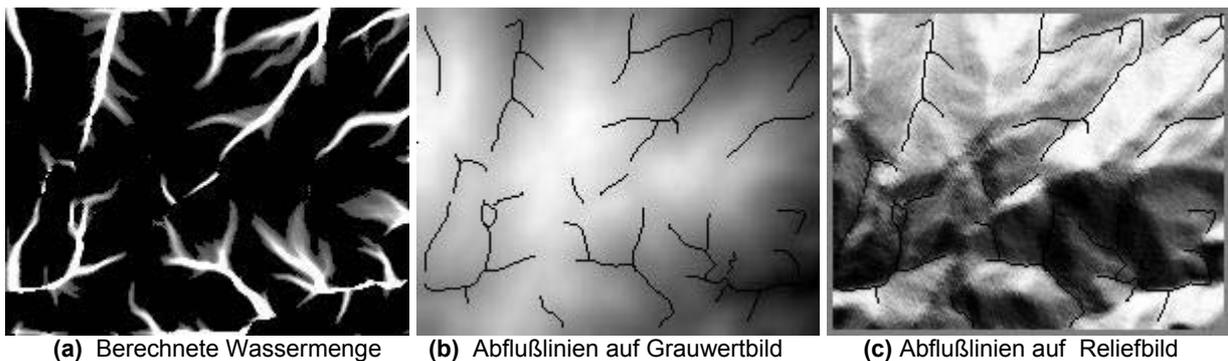
$$W_i = W_0 \cdot \Delta h_i / h$$

mit  $\Delta h_i = \begin{cases} h_0 - h_i & \text{für } h_0 > h_i \\ 0 & \text{für } h_0 \leq h_i \end{cases}$

und  $h = \sum_{i=1}^4 \Delta h_i \quad 1 \leq i \leq 4, h > 0 \text{ für 4 Nachbarschaften}$  (V.6-7)

sowie  $h = \sum_{i=1}^8 \Delta h_i \quad 1 \leq i \leq 8, h > 0 \text{ für 8 Nachbarschaften}$

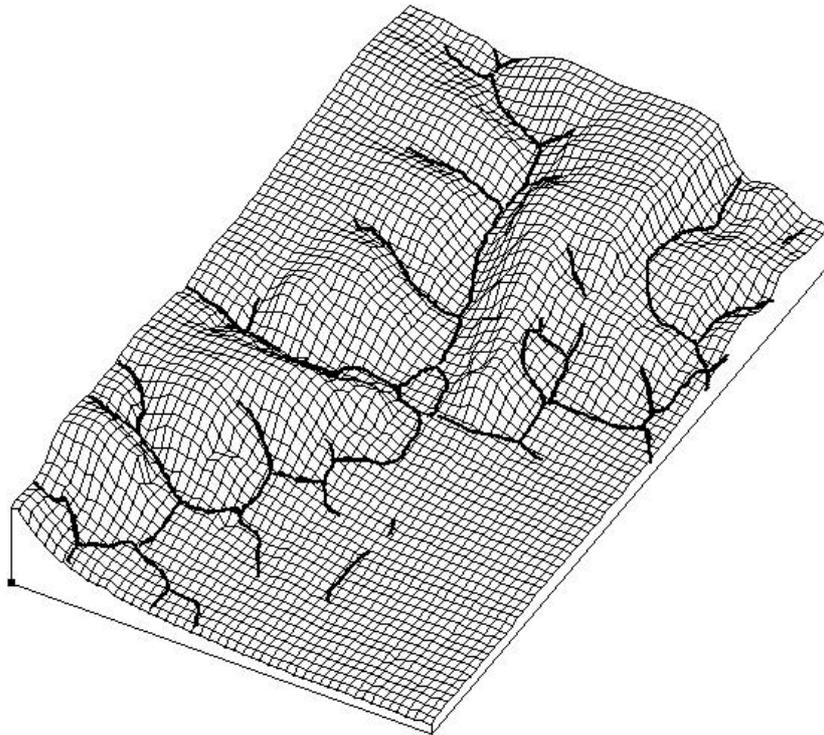
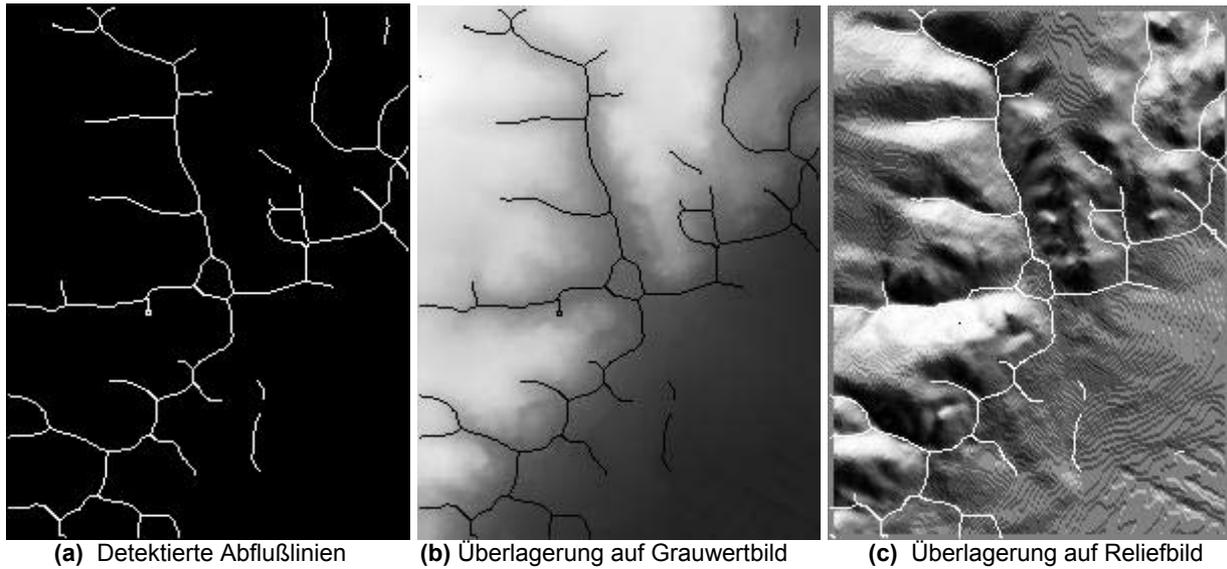
Die Durchführung dieses Verfahrens geht davon aus, dass die Berechnung der Wassermenge von einer Rastermasche jeweils zum niedrigeren Nachbarn fortgesetzt wird. Die Abflußlinie ergibt sich, indem man vom Startpunkt ausgehend, der die Wassermenge  $I$  erhalte, jeweils zu dem niedrigeren Nachbarn mit dem größten Summationswert schreitet. Die Berechnung erfolgt von oben (höherem Punkt) nach unten (niedrigerem Punkt), bis alle Punkte berechnet sind. Die Abb.V.6.4.2 stellt einige Ergebnisse der Extraktion von Abflußlinien mit dem Summationsverfahren dar.



**Abb.V.6.4.2:** Extraktion von Abflußlinien mit Summationsverfahren

### 6.4.2 Extraktion von Gerippllinien durch Krümmungsmaße

Im Abschnitt V.1 und V.6.4.1 wurden Definitionen von Gerippllinien und ihre Eigenschaften vorgestellt. Im Krümmungsraum zeigen Gerippllinien eine größte Flächenneigung der Geländeoberfläche. Also stellt eine Gerippllinie einen positiven bzw. negativen Maximalkrümmungswert dar. Im Bereich eines Tales konvergieren die Wasser zueinander bzw. divergieren auseinander im Bereich von Kämmen. Wegen dieser Eigenschaften des Verlaufs der größten Flächenneigung von Gerippllinien können die in den vergangenen Abschnitten vorgestellten unterschiedlichen Krümmungsmaße zur Extraktion von Gerippllinien eingesetzt werden. Im Fall von DHM-Daten werden die Bildkoordinaten  $(x, y, z(x,y))$  als Parameter verwendet, also die Bestimmung von Krümmungsmaßen wird aus diskreten Flächenpunkten eines Rasters durchgeführt. Als Beispiel werden folgende Abbildungen von extrahierten Gerippllinien dargestellt.



**Abb.V.6.4.3:** Extraktion von Geripplinen durch Krümmungsmaße

## 6.5 Weiterbearbeitung von Strukturlinien

Wie zum Anfang dieses Abschnittes erwähnt, kann die Extraktion von Strukturlinien in *Datenvorverarbeitung*, *Kantenextraktion* und *Weiterbearbeitung* eingeteilt werden. Ferner kann die Kantenextraktion noch in zwei Stufen untergliedert werden: die sogenannte *Kantendetektion* in *Rasterform* und die *Gruppierung* der Kantenpunkte zu komplexeren

Gebilden, die im wesentlichen in *Vektorform* erfolgen kann. Aus den oben beschriebenen Kantendetektionsverfahren werden Kantenlinien in Rasterform erhalten. Die detektierten Kantenlinien sollten dabei möglichst genau die einzelnen Gebiete (Umrisse der Objekte) umschließen. Einige Kantenoperatoren liefern jedoch mehrere Pixel breite Kanten, wie z.B. der Prewitt- und Sobel-Operator. Dies führt zu einer Weiterbearbeitung anhand einer *Skelettierung*. Eine andere Aufgabe der Weiterbearbeitung von detektierten Kantenpunkten bzw. Kantenlinien wird hier unter der *Vektorisierung* verstanden.

Eine Art der Weiterbearbeitung wurde im Abschnitt V.6.3.6 bei *Identifizierung der Kantenlinien* kurz erläutert. Ist es der Fall, dass *alleinstehende* Kantenpunkte bzw. *kürzere* Kantenlinien im extrahierten Kantenbild vorliegen, so können solche Kantenpunkte bzw. kürzere Kantenlinien eliminiert werden. Dabei wurde die *Länge* der Kantenlinien als Kriterium eingeführt. Beispielhaft wurde dieser Schritt im Abschnitt V.6.3.6 dargestellt. Im folgenden werden die *Skelettierung* und *Vektorisierung* von den detektierten Kantenpunkten bzw. Kantenlinien für die Weiterbearbeitung betrachtet und diskutiert.

### **6.5.1 Skelettierung von Strukturlinien**

Beim Canny-Operator wird eine Nachbearbeitung der Non-Maxima-Suppression durchgeführt. Dabei werden die möglichen Kantenpunkte durch die Unterdrückung der Nicht-Kantenpunkte verstärkt. Mit dem Canny-Operator werden Kantenlinien mit *1* Pixelbreite detektiert, damit die Skelettierung (Thinning) nicht durchgeführt werden muß.

Bei manchen Operatoren ergeben sich je nach Kantenform und Kantenverlauf keine Kantenlinien, sondern "Kantenflächen". Dabei muß eine Skelettierung durchgeführt werden, um möglichst dünne Kantenlinien zu extrahieren.

Die Berechnung solch eines Skeletts geschieht theoretisch durch die Berechnung der Entfernung von Punkten innerhalb der Kante zum Rand hin. Es steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, wie z.B. Verfahren mit 3x3-Masken, morphologisches Verfahren, Kontur-Folge-Verfahren oder das Verfahren durch Mittelachsenberechnung usw. In unserer Arbeit wird nur der *Zhang/Suen-Algorithmus* zur Skelettierung von Kantenlinien angewendet.

Bei diesem Verfahren wird zunächst eine 3x3-Maske aufgebaut. Dann wird der Kantenpunkt mit seinen 8 Nachbarn der Umgebung verglichen und danach entschieden, ob es sich um einen möglichen Skelettpunkt handelt oder nicht. Die genauen Informationen dieses Verfahrens und die Vorstellung der anderen Verfahren können bei STEINBRECHER (1993), KLETTE & ZAMPERONI (1995) nachgelesen werden.

### **6.5.2 Vektorisierung und Konturverfolgung von Kantenpunkten**

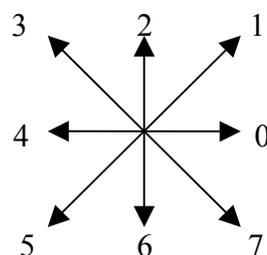
Nach der Kantendetektion und Skelettierung erhält man Kantenlinien. Die Dateninhalte sind dann auf die wichtigsten Informationen beschränkt. Trotzdem sind diese Informationen noch in Rasterform dargestellt und die reduzierte Menge an relevanten Bildpunkten ist noch groß. Aus den detektierten Kantenpunkten bzw. Kantenlinien müssen daher durch Zusammenfassung der Bildpunkte komplexere Objekte gebildet werden. Für diese

Zusammenfassung ist die *Vektorisierung* von detektierten Kantenpunkten bzw. Kantenlinien ein wichtiger Schritt.

Die Vektorisierung geht von den binären Bildpunkten aus, die in Rasterform dargestellt sind und zu einer Linie bzw. einem Vektor mit Anfangs- und Endpunkt zusammengefaßt werden. Das resultierende Vektorbild kann zur Suche nach komplexeren Strukturen weiter verwendet werden. Zur Vektorisierung und Konturverfolgung stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Dazu gehören beispielsweise das Verfahren nach dem Freeman-Kettenkode, Verfahren nach Hough-Transformation oder ein direktes Vektorisierungsverfahren. In der Arbeit wird das Freeman-Kettenkode-Verfahren angewendet. Die anderen Verfahren zur Vektorisierung und Konturverfolgung wurden beispielsweise von STEINBRECHER (1993), KLETTE & ZAMPERONI (1995), ZIMMER u.a. (1996) genau beschrieben.

Ein Binärbild (Kantenbild) kann mit einer Menge  $E = \{E_1, \dots, E_n\}$  mit  $n$  voneinander verschiedenen Elementen  $E_i$  dargestellt werden. In Rasterform kann die Menge in modifizierter Form  $E = \{E_{i,j} \mid (i=0, \dots, m; j=0, \dots, n)\}$  beschrieben werden, wobei  $E_{i,j}=0$  Hintergrundpunkt und  $E_{i,j}=1$  Objektpunkt darstellt. Eine Strukturlinie in Vektorform wird mit einer Liste in Form  $L = \{[P_1, \dots, P_k] \mid E_i : i=1, \dots, n\}$  beschrieben, wobei  $\{[P_1, \dots, P_k] \mid E_i\}$  als Kantenpunkte dieser Strukturlinie  $E_i$  (Elemente) betrachtet werden können.

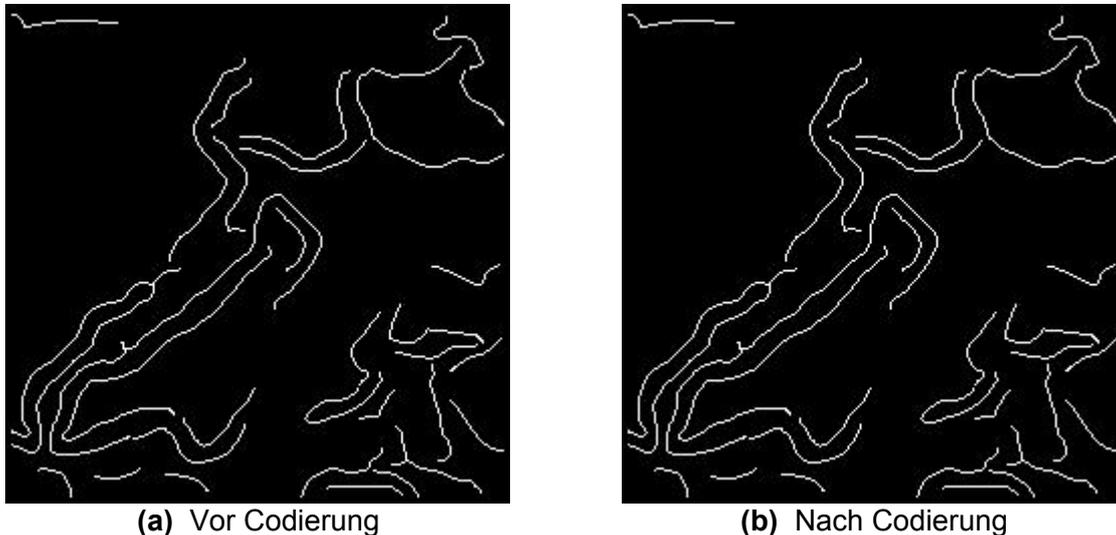
Beim Freeman-Kettencode-Verfahren ist eine Kantenlinie eines Binärbildes die Menge aller Kantenpunkte, die normalerweise 8-Nachbarn besitzen. Verfolgt man die Kantenlinie von einem Ausgangspunkt (normalerweise Anfangspunkt) an bis zum Endpunkt, so erhält man eine Folge von Schritten, jeder Schritt geht in eine aus acht möglichen Richtungen (einen aus 8 benachbarten Punkten bestehenden Pfad). Die Nachbarschaft dieses Punktes wird getestet und die Richtung, in der der nächste Nachbarpunkt liegt, mit der zugehörigen Richtungszahl kodiert. Die Richtung der Schritte kann durch die Zeilen 0 bis 7, z.B. wie in der Abb.V.6.5.1, angegeben und dargestellt werden. Somit kann eine Kantenlinie  $L$  durch eine Zahlenfolge in Vektorform  $\vec{L} = \{r_i [r_k : k \in (0, \dots, 7)]; i=1, \dots, n\}$  beschrieben werden. Die zusätzliche Angabe der absoluten Koordinaten eines Kantenpunktes (z.B. des Anfangspunktes) erlaubt es, auch die Lage der Kantenlinie im Bildraster zu spezifizieren.



**Abb.V.6.5.1:** Codierung in einer 8-Nachbarschaft

Der gesamte Vorgang der Bestimmung des Kantenliniencodes besteht aus zwei Phasen, der Kantenlinienfindung und der Kantenlinienverfolgung. In der ersten Phase wird das Kantenbild zeilenweise bis zur Findung eines zuverlässigen Kantenlinienanfangspunktes

abgesucht. In der zweiten Phase wird die Linie verfolgt und als Zahlenfolge in einem Speicherbereich abgelegt. Als zusätzliche Angabe werden die absoluten Koordinaten  $(x,y)$  des Anfangspunktes und die Länge (Pixelzahl) jeder gefundenen Kantenlinie mit den Zahlenfolgen der Kantenlinien zusammen in die Ergebnisdatei abgelegt.



**Abb.V.6.5.2:** Codierung nach Freeman-Kettencode-Verfahren

Die Abb.V.6.5.2 zeigt ein Ergebnis der Codierung nach dem Freeman-Kettencode-Verfahren. Die Abb.V.6.5.2(a) ist ein Originalkantenbild nach der Kantenextraktion. Dieses Bild wird als Ausgangsbild bei der Codierung nach dem Freeman-Kettencode-Verfahren eingeführt und getestet. Die Abb.V.6.5.2(b) stellt das Ergebnis der Wiedergabe des selben Kantenbildes nach der Codierung dar.

### 6.5.3 *Verbindung von extrahierten Strukturlinienpunkten*

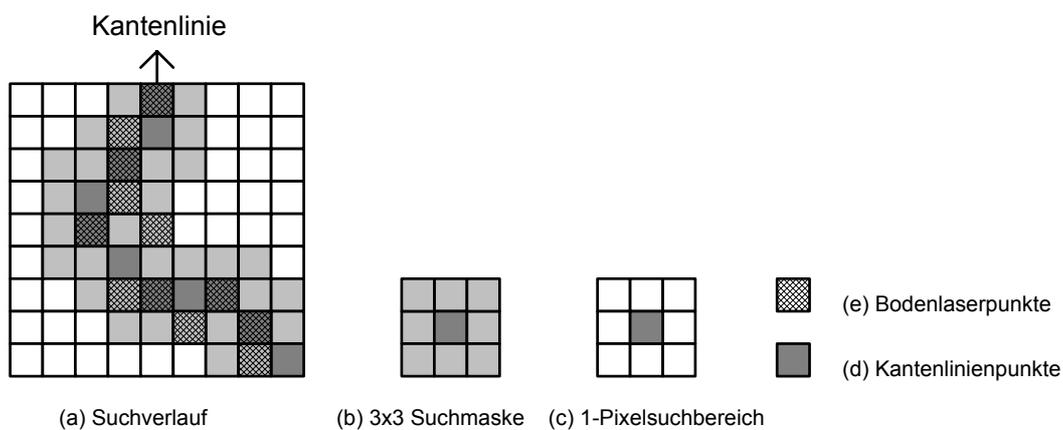
Die extrahierten, in Vektorform dargestellten Kantenpunkte bzw. Kantenlinien können als zusätzliche Forminformationen betrachtet und beim Aufbau von präzisen DHM angewendet werden. Das heißt, die extrahierten Kantenlinien werden Punkt für Punkt in eine Ergebnisdatei abgelegt. Solche Punkte bzw. Linien sind schon interpoliert und keine *Originallaserpunkte*. Wenn man die *Laserpunkte* behalten will, müssen die originalen ausgewerteten *Bodenlaserdaten* eingeführt und die zu behaltenden *Bodenlaserpunkte* innerhalb eines Suchbereiches aufgrund der extrahierten Linien gesucht werden. Danach werden die gefundenen originalen Bodenlaserpunkte gespeichert. Beide Möglichkeiten der Speicherung von extrahierten *Kantenlinien* (interpoliert) und von gefundenen *Bodenlaserpunkten* (original) können mit gleicher Form in eine Ergebnisdatei abgelegt werden.

Im folgenden werden zwei Verfahren bei der Suche nach den interpolierten DHM-Punkten bzw. originalen ausgewerteten *Bodenlaserpunkten* vorgestellt.

### 6.5.3.1 Bestimmung des Suchbereiches

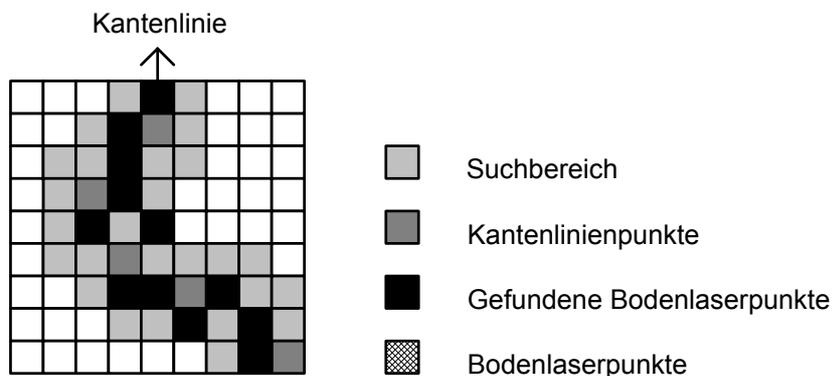
Wenn man *nur* die extrahierten Kantenlinien bzw. Kantenpunkte punktweise behalten will, entsteht keine Aufgabe zur Bestimmung des Suchbereiches. Die extrahierten Kantenlinien bzw. Kantenlinienpunkte werden einfach in einer geeigneten Form gespeichert (vgl. Abb.V.6.5.3(a)). Sollen die *Bodenlaserpunkte* enthalten sein, muß zunächst ein Suchbereich bestimmt werden.

Die Suche nach den originalen ausgewerteten *Bodenlaserpunkten* kann beispielsweise in einer 3x3 Maske oder nur in einem 1-Pixelbereich durchgeführt werden. Die Abb.V.6.5.3(b) zeigt eine 3x3 Suchmaske. Die Abb.V.6.5.3(c) zeigt einen 1-Pixelbereich.



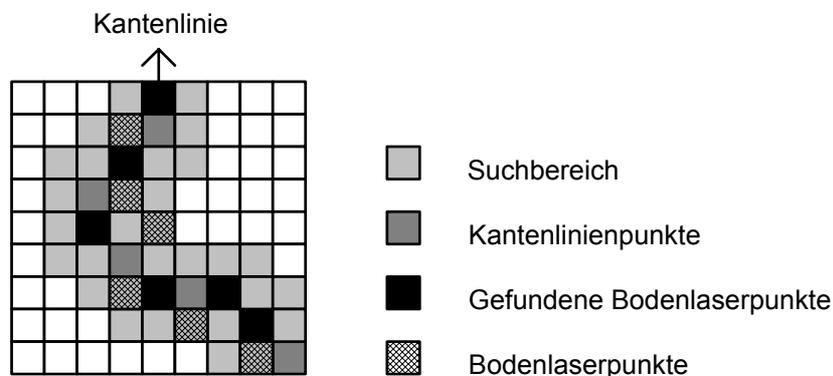
### 6.5.3.2 Punktsuche mittels Vektor-Daten

Um solche Bodenlaserpunkte zu suchen, wird die in Vektorform dargestellte Datei eingeführt und die Suche nach den Bodenlaserpunkten durchgeführt. Die Abb.V.6.5.4 zeigt die Punktsuche mit 3x3 Suchmaske. Man kann genau ersehen, dass mit einer 3x3 Suchmaske viele gefundene Bodenlaserpunkte nicht auf der extrahierten Kantenlinie liegen.



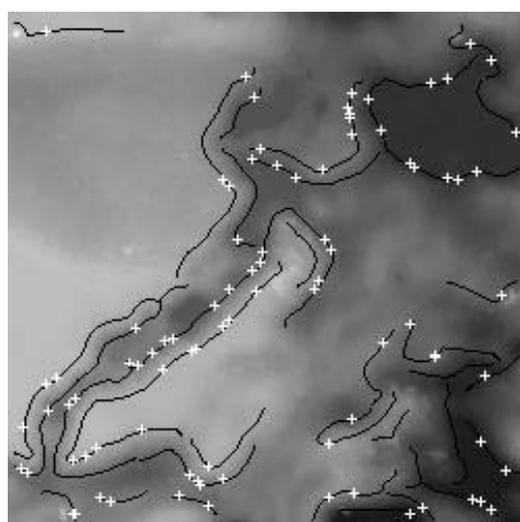
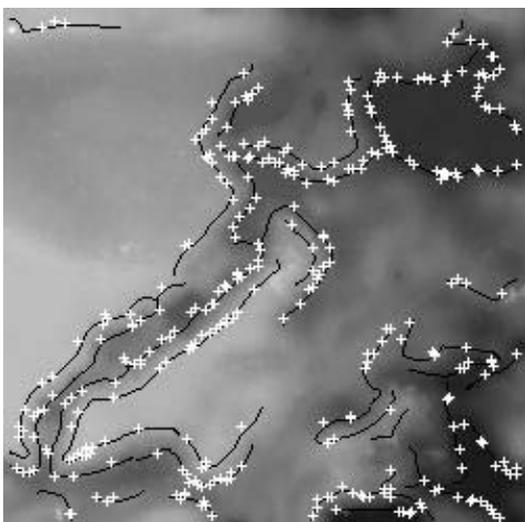
**Abb.V.6.5.4:** Punktsuche mit 3x3 Suchmaske

Um dies zu vermeiden, kann der Suchbereich verkleinert werden. Die Abb.V.6.5.5 zeigt die Punktsuche innerhalb des 1-Pixelsuchbereiches. Alle gefundenen Bodenlaserpunkte liegen auf der extrahierten Kantenlinie. Jedoch werden wenige Bodenlaserpunkte dabei gespeichert.



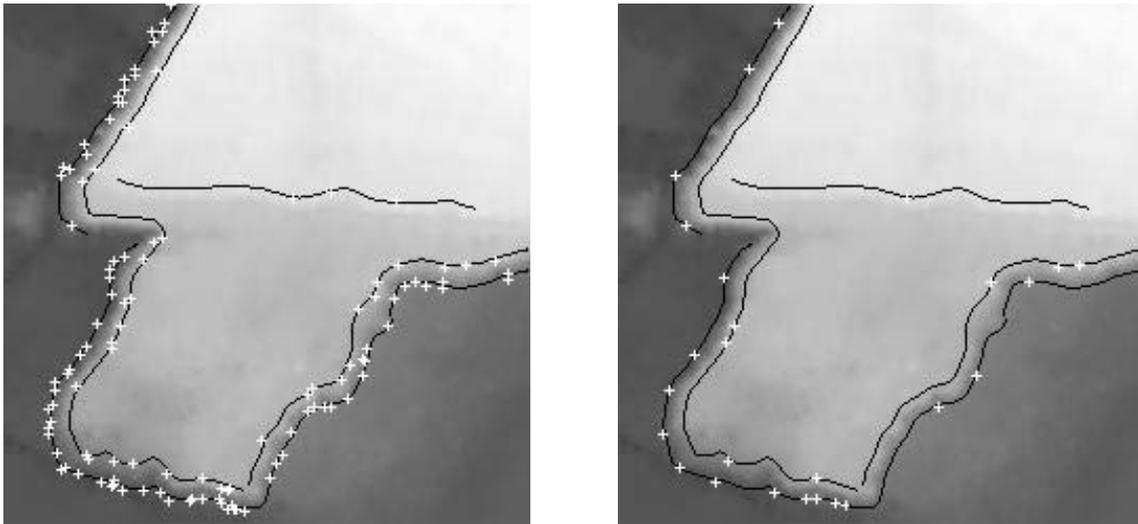
**Abb.V.6.5.5:** Punktsuche mit 1-Pixelsuchbereich

Die Abb.V.6.5.6 zeigt einige Ergebnisse mit Hilfe des unterschiedlichen Suchbereiches. Das Bild(a) stellt ein Ergebnis dar, das mit einer 3x3 Suchmaske erzielt wird. Das zweite Bild(b) zeigt das Ergebnis innerhalb eines 1-Pixelsuchbereiches. Bei der Anwendung kann die Auswahl des Suchbereiches normalerweise je nach der DHM-Maschenweite (dem DHM-Gitterabstand), der Zielsetzung und Aufgabenstellung usw. bestimmt werden.



**(a)** Ergebnis mit 3x3 Suchmaske

**(b)** Ergebnis mit 1-Pixelsuchbereich  
(DHM-Gitterabstand: 4m, Datengröße: 250x250 Pixel)



(c) Ergebnis mit 3x3 Suchmaske                      (d) Ergebnis mit 1-Pixelsuchbereich  
(DHM-Gitterabstand: 2m, Datengröße: 250x250 Pixel)

**Abb.V.6.5.6:** Ergebnisse der Suche nach Bodenlaserpunkten

Bei den meisten Anwendungen können normalerweise die extrahierten Kantenlinien bzw. Kantenlinienpunkte direkt gespeichert und angewendet werden. In diesem Fall sind die Einführung des Suchbereiches und die Suche nach den Bodenlaserpunkten unnötig. Dabei werden zunächst die extrahierten Kantenlinienpunkte in die Höhenwerte umgerechnet und dann diese umgerechneten Höhenwerte in einer geeigneten Form gespeichert. In den vier Bildern der Abb.V.6.5.6 stellen die *schwarzen* Linien und die *weißen* Punkte jeweils die extrahierten Kantenlinien und die gefundenen originalen Bodenlaserpunkte dar. Die beiden Typen von Punkten bzw. Linien können in Vektorform in einer Ergebnisdatei abgelegt werden. Die Abb.V.6.5.6(a) und (b) zeigen Ergebnisse eines Testgebietes, wobei der DHM-Gitterabstand 4 m beträgt. Die Abb.V.6.5.6(c) und (d) zeigen Ergebnisse eines zweiten Testgebietes, wobei jedoch der DHM-Gitterabstand 2 m ist.

#### 6.5.4 Darstellung des Ergebnisses

Die Darstellung von extrahierten Strukturlinien kann in einer diskreten Rasterform erfolgen. Alle in den vergangenen Abschnitten dargestellten Abbildungen waren in dieser digitalen Rasterform. Zur Darstellung der Punkt- und Linienmerkmale auf dem Bildraster wird das Pixel als kleinste räumliche Bezugseinheit des digitalen Bildes benutzt. Bei der Definition des Pixels als kleinste Bezugseinheit wird ein Punkt als ein Punktpixel  $P$  dargestellt. Diese digitale Rasterform ist bei der Datenverarbeitung von Vorteil.

Die Darstellung von extrahierten Kantenlinien kann auch in Vektorform erfolgen. Als Ausgangsdaten dienen die extrahierten Kantenbilder. Ein Beispiel kann wie in der Abb.V.6.5.7 folgt gespeichert werden. Dabei beschreibt  $(xp, yp)$  die Koordinatenposition des Anfangspunktes einer Strukturlinie. Der Parameter  $(num)$  beschreibt die Länge einer Strukturlinie in Pixel. Der Parameter  $(R_0)$  beschreibt die Zahlenfolge des ersten Pixelpunktes dieser Strukturlinie. Die Zahlenfolge jeder Kantenlinie wird in einer Reihenfolge gespeichert. Am Ende erfolgt eine bestimmte Zahl (z.B. -9) als Symbol des Endes einer Dateimenge.

```

(xp  yp  num  R0)
8   110  192  0
5445445445444444 ... 554434444444444454454544544
...
28  90   116   3
510000000000777 ... 6777707077
-9

```

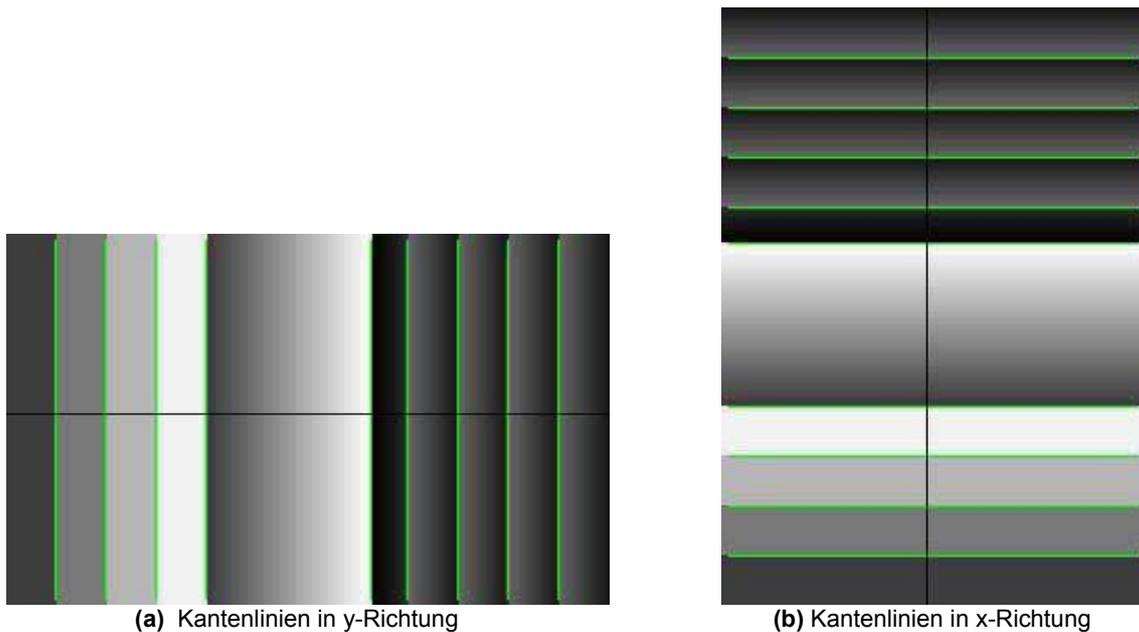
**Abb.V.6.5.7:** Beispiel einer Vektordatei mit Freeman-Kettencode

Eine andere Darstellung von gefundenen Kantenlinienpunkten bzw. einer Kantenlinie kann mittels einer Reihe von (X,Y,Z)-Koordinaten erfolgen. Jede Kantenlinie beginnt mit der gefundenen Kantenlinienanzahl und anschließend folgen (X,Y,Z)-Koordinaten. Die Datei endet beispielsweise auch mit einer vorgegebenen Zahl.

## 7 Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung

In der Photogrammetrie, insbesondere in der Digitalen Photogrammetrie ist die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsuntersuchung seit langem ein aktuelles Thema. Von FÖRSTNER (1991) wurde dieses Thema intensiv untersucht. Dort wurden unterschiedliche Kriterien erstellt. Diese Kriterien bestimmten die Lokalisierung und Zuverlässigkeit der Extraktion markanter Punkte. Dabei wurde die Genauigkeit auch durch diese Kriterien beeinflusst. Im Abschnitt V.4.2 wurde erläutert, dass die Aufgabe in der Suche nach einem Kompromiß zwischen allen Anforderungen von *Lokalisation, Zuverlässigkeit, Verschmierungseffekt und Genauigkeit* usw. lag, was unter der Optimierungsbedingung funktionierte. Es ist schwierig, alle Anforderungen zu erfüllen. Die wichtigste Aufgabe besteht darin, unter der Erfüllung der Anforderungen an die *Lokalisation und Zuverlässigkeit die Genauigkeit möglichst steigern und die Verschmierung von Kantenpunkten-bzw. Kantenlinien vermeiden zu können.*

Die Anforderung an die Genauigkeit der Kantenextraktion ist je nach den entsprechenden Aufgabenstellungen unterschiedlich. Die Genauigkeit kann auch durch unterschiedliche Kriterien beschrieben werden (vgl. FÖRSTNER 1991, FUCHS 1998). Die meisten Verfahren von Kantenoperatoren liefern die Genauigkeit im Pixelbereich. Die Genauigkeitssteigerung ist durch die Bestimmung der Subpixelposition möglich. Die Anwendung dieses Verfahrens bei der Genauigkeitssteigerung in der Digitalen Photogrammetrie und Digitalen Bildverarbeitung kann auch gefunden werden bei CASOTT u.a.(1999), SCHICKLER (1992). Die folgenden Beispiele und Abbildungen stellen einige Ergebnisse der Untersuchung von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsbetrachtung der Kantenextraktion dar. Dabei zeigt die Abb.V.7.1 zwei Ergebnisse mit Simulationsdaten. Die Abb.V.7.3 und V.7.4 zeigen einige Ergebnisse mit DHM-Daten. Jeweils werden beide Daten durch unterschiedliche Richtung der Kantenlinien präsentiert. Die Abb.V.7.2 stellt das Prinzip der Lokalisation der Kantenlinien und der Subpixelbestimmung dar.



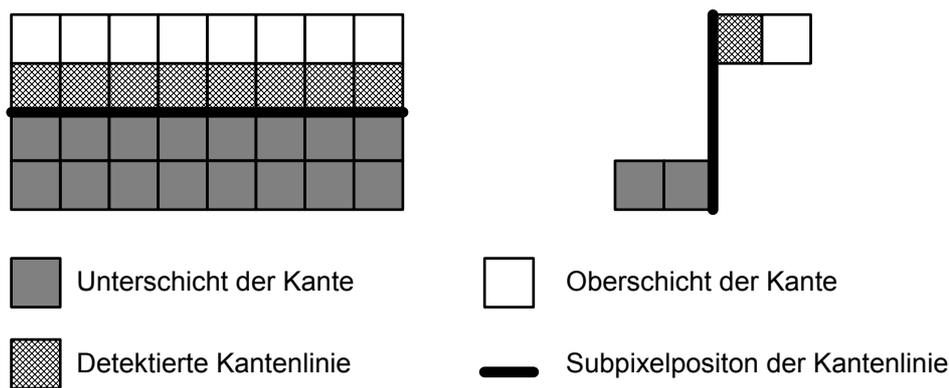
**Abb.V.7.1:** Lokalisation der Kantenlinien mit Simulationsdaten

Die Abb.V.7.1 zeigt zwei Ergebnisse der Lokalisation von Kantenlinien jeweils in y-Richtung (a) und x-Richtung (b) mit Simulationsdaten. Wir beobachten zunächst die Abb.V.7.1(a). Die detektierten Kantenlinien besitzen eine **1-Pixelbreite** und liegen gerade im rechten Rand der Kante. Man kann daraus ersehen, dass die Genauigkeit **ein Pixel** erreicht. Durch das im Abschnitt V.6.3.5 vorgestellte Verfahren (vgl. Formel V.6-6) der Subpositionsbestimmung von Kantenpunkten werden Kantenpunktkorrekturen in x- und y-Richtung jeweils  $RMS_x = 0,4878$  und  $RMS_y = 0,0$  Pixel (RMS-Wert nach der Gleichung V.6-6) berechnet. Die theoretische Position von detektierten Kantenlinien liegen in der Mitte zwischen der linken und rechten Kantenlinie, also der Soll-Wert  $RMS_{soll}$  beträgt immer 0,5 Pixel in der y-Richtung bzw. der x-Richtung (vgl. Abb.V.7.1 und Abb.V.7.2). Daraus kann man bestimmen, dass die Genauigkeit der Kantendetektion den Subpixelbereich erreichen kann (nach der Gleichung:  $M_x = \sqrt{RMS_{soll}^2 - RMS_x^2} = 0,11$  Pixel).  $M_x$ -Wert entspricht dann der Genauigkeit der Kantendetektion nach der Subpositionsbestimmung. Ähnliche Ergebnisse in den x-Richtungskantenlinien sind in der Abb.V.7.1(b) dargestellt ( $RMS_y = 0,4878$  und  $RMS_x = 0,0$ ). In diesem Fall wird die Genauigkeit in y-Richtung auf den Subpixelbereich gesteigert.

Beide Abbildungen haben gezeigt, dass die Kantenverschmierung bei Simulationsdaten nicht entsteht. Detektierte Kantenpunkte bzw. Kantenlinien werden gerade in der Pixelmitte lokalisiert. So kann auch festgestellt werden, dass die Zuverlässigkeit mit Simulationsdaten sichergestellt wird.

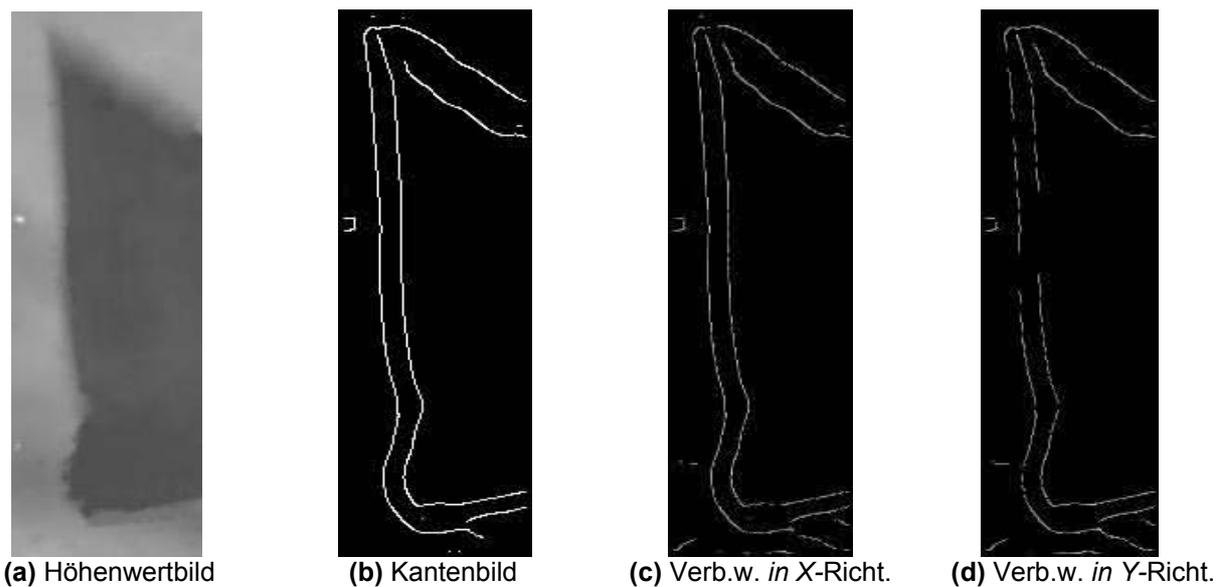
Die Lokalisation der Kantenlinien und die Subpixelbestimmung können durch folgende Abb.V.7.2 erklärt werden. Die detektierten *Kantenlinien* liegen innerhalb eines Pixels auf der Oberschicht einer Kante (möglicherweise auch auf der Unterschicht) bei einer idealen Stufenkante. In diesem Fall besitzt eine *Kantenlinie* eine **1-Pixelbreite**. Das heißt der Punkt ist

nicht null-, sondern zweidimensional. Die kleinste Einheit ist das Pixel (Bildelement), welches im Gelände einer Quadratfläche entspricht. Bei einem abstrakten euklidischen Raum soll eine *Linie bzw. ein Punkt eindimensional bzw. nulldimensional* sein, also die Linie besitzt keine Breite und der Punkt keine Fläche. Ein typisches Beispiel ist die Herstellung von Höhenlinien mit DHM-Daten, wobei die Gitterpunkte immer als nulldimensional betrachtet werden. Die Maschenweite entspricht dann dem Abstand beider nulldimensionalen Gitterpunkte. Um dies zu erreichen, muß man das Verfahren der Bestimmung der Subpixelposition einführen. Die theoretische Position einer Kantenlinie liegt beispielsweise in der Mitte zwischen Oberschicht und Unterschicht einer Kante. Die Genauigkeit wird entsprechend auf den *Subpixelbereich* gesteigert (vgl. Abb.V.7.2 rechts oben).

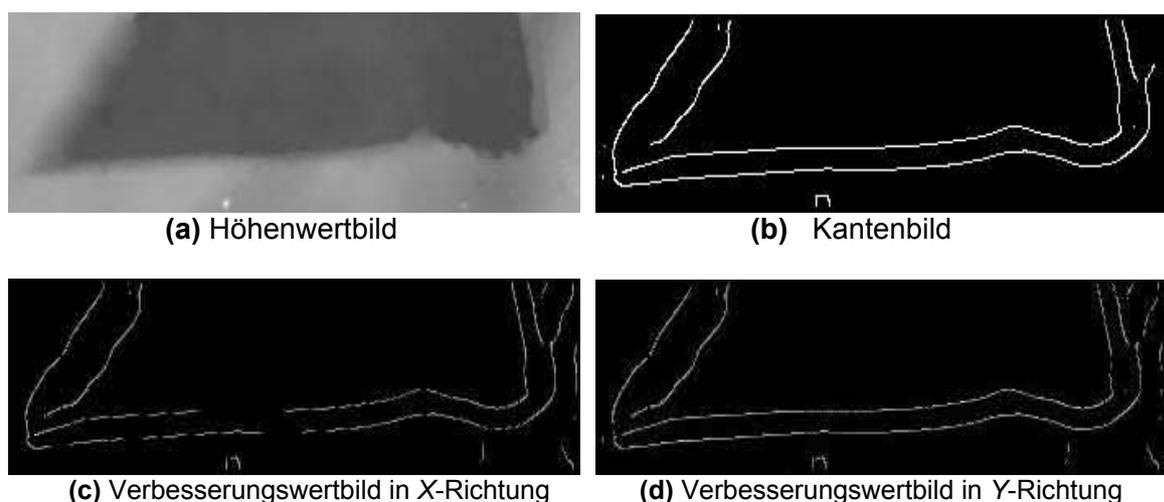


**Abb.V.7.2:** Lokalisation der Kantenlinie und Subpixelbestimmung

Einige Ergebnisse mit realen Daten werden in Abb.V.7.3 und V.7.4 dargestellt. Die Abb.V.7.3 stellt ein reales Bild dar, wobei die Kantenlinien meistens in Y-Richtung liegen. Die Kantenlinien in der Abb.V.7.4 stehen meistens in X-Richtung. Beide Bilder (a) der beiden Abbildungen sind Höhenwertbilder. Beide Bilder (b) sind extrahierte Kantenbilder. Die Bilder (c) und (d) der beiden Abbildungen zeigen berechnete Verbesserungswerte der Subpixelposition je in der X- und Y-Richtung. Zunächst betrachten wir die Abb.V.7.3. Die Standardabweichungen der Verbesserungswerte in der X- und Y-Richtung sind  $M_x = 0,2350 \text{ Pixel}$  und  $M_y = 0,1606 \text{ Pixel}$ . Aus den Bildern (c) und (d) kann man auch erkennen, dass die Verbesserungswerte in X-Richtung größer als die in der Y-Richtung sind, weil die meisten Kantenlinien in Y-Richtung liegen. Einige ähnliche Ergebnisse zeigt auch die Abb.V.7.4, wobei die Verbesserungswerte in der Y-Richtung größer als die in X-Richtung sind ( $M_x = 0,1605 \text{ Pixel}$  und  $M_y = 0,2352 \text{ Pixel}$ ). In diesem Fall liegen die meisten Kantenlinien in der X-Richtung.



**Abb.V.7.3:** Genauigkeitsbetrachtung von Testdaten I



**Abb.V.7.4:** Genauigkeitsbetrachtung von Testdaten II

Durch alle oben dargestellten Ergebnisse und Abbildungen werden die Kriterien der Genauigkeitsbetrachtung von Kantenextraktionen veranschaulicht. Die *Zuverlässigkeit* mit den entwickelten Verfahren kann sichergestellt werden. Dies kann nicht nur durch die oben gezeigten Abbildungen, sondern auch durch die zahlreichen Ergebnisse von den Abb.V.6.3.10(a) und (b) bis zu den Abb.V.6.3.13(a) und (b) festgestellt werden. Sicher kann man auch feststellen, dass die extrahierten Kantenlinien mehr sind als die Anzahl von Kantenlinien, die auf der topographischen Karte existieren. Einerseits ist es eine Tatsache, dass wegen der Begrenzung des Maßstabes manche Kantenlinien auf kleinmaßstäbigen Karten nicht dargestellt werden können. Andererseits geht es darum, dass die topographische Karte nicht so aktuell ist wie das Laserscanning.

Eine *Kantenverschmierung* kann bei manchen Gebieten vorkommen, wo die Geländeoberfläche einen *glatten* Übergang zeigt und die gemessenen Laserpunkte *nicht genügend dicht* verteilt auf der Geländeoberfläche sind. In diesem Fall kann eine Vorbearbeitung der Kantenverstärkung von DHM-Daten eingeführt werden. Am sichersten ist es, die gemessene Laserpunktdichte zu steigern.

Die *Lokalisation* und die *Genauigkeit* der Kantenposition sind natürlich zwei andere wichtige Anforderungen und Aufgaben. Durch die Bestimmung der Subpixelposition wird die Lokalisation besser gewährleistet und die Genauigkeit auf den Subpixelbereich gesteigert. Dies kann durch die in den vergangenen Abschnitten dargestellten Ergebnisse und Abbildungen nachgewiesen werden.

## VI Ausblick

Die Motivation der Arbeit bestand in der Analyse von Laserscannerdaten, aus denen zum einen die Bodenpunkte von Nichtbodenpunkten getrennt werden, und zum anderen in der Erarbeitung eines allgemeinen Verfahrens der Strukturlinienextraktion, das den vielseitigen Anforderungen für eine automatisierte Extraktion von Strukturlinien über weite Anwendungsbereiche genügt.

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. Die Modelle der morphologischen Operatoren beschäftigten sich mit der Näherung der Geländeoberfläche mit gemessenen Laserpunkten. Mit dem anschließenden Hypothesentest wurden echte Bodenpunkte identifiziert. Die Brauchbarkeit der entwickelten Ansätze und ihre Realisierung in einem Computerprogramm wurde anhand von zahlreichen Testgebieten überprüft.

**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.

**Erweiterbarkeit:** Bei der Konzeption der Kantenlinienextraktion (vgl. Kapitel V.6.3) wurden einige Ergebnisse zur Anwendung auf andere Datentypen dargestellt. Die Einführung bzw. die Ergänzung durch Wissen erlaubt die weitere Erweiterung von Verfahren. Dies ist allerdings zukünftige Arbeit.

**Übertragbarkeit:** Durch Darstellungen und Beispiele in Kapitel V.6.3 wurde die Übertragbarkeit ebenfalls nachgewiesen. Das entwickelte Verfahren galt für die Anwendung der Extraktion von Umrissenlinien mit Luftbildern, kann aber auch für den Mustererkennungszweck mit Panoramabildern usw. eingesetzt werden.

**Lokalisation, Zuverlässigkeit und Genauigkeit:** Sie sind wichtige Kriterien zur Überprüfung und Beurteilung der Extraktion von Strukturlinien. Durch die Bestimmung der Subpixelposition hat die Genauigkeit des Verfahrens den Subpixelbereich erreicht. Gleichzeitig wurde die Qualität der Lokalisation und der Zuverlässigkeit gesteigert.

**Grenzen:** Es ist schwierig, ein allmächtiges, vollautomatisches Verfahren zur Kantendetektion zu entwickeln. Die weitere Entwicklung und Verbesserung des Verfahrens kann in der Einführung von Informationen einer topographischen Karte und von Fernerkundungsdaten als Ergänzung liegen. Eine andere Möglichkeit ist die Steigerung der Datenauflösung.

## Danksagung

Ich habe vielen zu danken, die mir auf unterschiedliche Weise geholfen haben und möchte einige davon hier nennen:

Herrn Prof. Dr. Jörg Albertz, dem Leiter des Fachgebietes Photogrammetrie und Kartographie und meinem Doktorvater, der das Entstehen dieser Arbeit überhaupt erst ermöglichte, das Hauptreferat übernommen hat und mir viele wertvolle anwendungsorientierte Hinweise gab. Diese Arbeit hätte nicht ohne seine tatkräftige Hilfe und Unterstützung entstehen können. Dafür möchte ich ganz herzlich danken.

Herrn Prof. Dr. Lothar Gründig, der das Koreferat übernommen hat und mir wichtige Ratschläge gab, danke ich ebenso.

Meinen Dank möchte ich Herrn Dr. Eckhardt Seyfert, dem Abteilungsleiter im Landesvermessungsamt Brandenburg, für die Bereitstellung von zahlreichen Materialien von Laserscannerdaten, topographischen Karten sowie Luftbildern, aussprechen, der das dritte Referat übernommen hat.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Inform. Volker Rodehorst für anregende Diskussionen bei der Durchführung der Arbeit und bei der Entwicklung mancher wichtiger Algorithmen. Insbesondere bedanke ich mich für seine freundliche Hilfe bei der Korrektur der Dissertation. Dieser Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Michael Breuer für seine Hilfe bei der Englischen Zusammenfassung.

Weiterhin danke ich Herrn Dipl.-Ing. Albert Wiedemann, Dr.-Ing. Matthias Hemmleb, Dipl.-Inform. Gerhard König für Ihre Unterstützung, Hilfe, wichtigen Ratschläge und hilfreichen Diskussionen. Mein Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebietes Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin.

Bei der Otto-Lacmann-Stiftung der TU Berlin, der von Humboldt-Ritter-Penck-Stiftung der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin und der Hegemann-Stiftung der TU Berlin, die mir durch finanzielle Unterstützung die Möglichkeit gegeben haben, an der TU Berlin zu promovieren, bedanke ich mich ebenfalls ganz herzlich.

Schließlich danke ich meiner Frau Hongling Li und meinen Eltern für ihr großes Verständnis. Dank schulde ich auch meiner lieben Tochter Yi Sui, um die ich mich in ihren Schultagen nicht kümmern kann.

# Literaturverzeichnis

- ABMAYR Wolfgang (1994) : Einführung in die digitale Bildverarbeitung.  
B. G. Teubner Stuttgart 1994
- ACKAH-MIEZAN, A. and GAGALOWICZ, A. (1993) : Discrete models for energy – minimizing segmentation. Fourth International Conference on Computer Vision, May 11-14 1993, Berlin
- ACKERMANN, F., LINDENBERGER, J. und SCHADE, H. (1992) : Kinematische Positionsbestimmung mit GPS für die Laser-Profilmessung. ZfV 1/1992
- ACKERMANN, F. (1997) : Airborne laser scanning – A brief status review.  
3<sup>rd</sup> EARSel Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, Tallinn, Estonia
- ALBERTZ, J. & G. HELL (1976) : Digitale Filterung korrelierter Daten von Zeilenabtastern.  
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft 216, München
- ALBERTZ, J. (1986) : Digitale Bildverarbeitung in der Nahphotogrammetrie –  
Neue Möglichkeiten und Aufgaben. BuL 54(1986) Heft 2
- ALBERTZ, J. (1991) : Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern,  
Eine Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft
- ALBERTZ, J. (1999) : Methoden der Mustererkennung, Rundgespräche der Kommission für Ökologie.  
Band 17 “Fernerkundung und Ökosystem-Analyse“, S. 37-51
- ÅSTRÖM, K. and HEYDEN, A. (1996a) : Stochastic modelling and analysis of sub-pixel edge detection.  
Proceedings of ICPR’96
- ÅSTRÖM, K. and HEYDEN, A. (1996b) : Stochastic analysis of scale-space smoothing.  
Proceedings of ICPR’96
- AUMANN, G. (1994) : Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien.  
DGK Reihe C, Heft Nr. 411
- AXELSSON, P. (1999) : Processing of laser scanner data – algorithms and applications.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 138-147
- BALCE, A.E. (1987) : Determination of optimum sampling interval in grid digital elevation models  
(DEM) data acquisition. PE&RS, Vol. 53, No.3
- BALTSAVIAS, E.P., MASON, S. and STALLMANN, D. (1995) : Use of DTMs/DSMs and orthoimages to  
support building extraction. Automatic Extraction of Man – Made objects from Aerial and  
Space Images, Monte Verità, 1995, Birkhäuser Verlag Basel
- BALTSAVIAS, E.P. (1999a) : A comparison between photogrammetry and laser scanning.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 83-94
- BALTSAVIAS, E.P. (1999b) : Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 164-198
- BALTSAVIAS, E.P. (1999c) : Airborne laser scanning: basic relations and formulas.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 199-214
- BAARDA, W. (1968) : A Testing procedure for use in geodetic networks.  
Publications on Geodesy, Vol. 2, Nr. 50, Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- BÄSSMANN, H., BESSLICH, Ph. W. (1989) : Konturorientierte Verfahren in der digitalen  
Bildverarbeitung. Springer Verlag
- BENNING, W. (1978) : Zur Auswertung geodätischer Messungen mit automatisierter Fehlersuche.  
AVN 1/1978

- BENNING, W. (1995) : Vergleich dreier Lp-Schätzer zur Fehlersuche in hybriden Lagenetzen.  
ZfV 120, 606-617
- BENNING, W. (1996) : Alternative zur Robusten Parameterschätzung nach Huber. AVN 8-9/1996
- BILL, R. (1999) : Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2, Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen, 2., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag
- BLAIR, J.B., D.L. RABINE, M. A. HOFTON (1999) : The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 115-122
- BORKOWSKI, A. (1994) : Stochastisch-geometrische Beschreibung, Filterung und Präsentation des Reliefs. DGK Reihe C, Heft Nr. 431
- BRUNN, A. und U. WEIDNER (1997) : "3D-Reconstruction and Modelling of Topographic Objects". ISPRS, Vol. 32, Part 3-4 W2, Stuttgart
- BUSCH, A. (1992) : Bayes-Statistik und Markoff-Felder für die Restaurierung digitaler Bilder. DGK Reihe C, Heft Nr. 396
- CAELLI, T., STASSOPOULOU, A. & RAMIREZ, R. (1998) : Adaptive multi-scale variance models for image segmentation and feature extraction. ISPRS Commission III, Working Group 3 Symposium, July 6-10, 1998, Columbus, Ohio
- CANNY, J.(1983) : Finding Edges and Lines in Images. Technical Report 720, MIT Artificial Laboratory, Massachusetts
- CANNY, J.(1986) : A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 8 (1986), Heft 6
- CASOTT, N. and PRENTING, J. (1999) : Genauigkeitssteigerung beim Korrelationsverfahren in der digitalen Bildverarbeitung. PFG 2/1999
- CASPARY, W. (1988) : Fehlerverteilungen, Methode der kleinsten Quadrate und robuste Alternativen. ZfV 3/1988
- CASPARY, W. (1996) : Anmerkungen zum robusten Schätzen. AVN 7/1996
- DERICHE, R.: (1987) : Using Canny's Criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. International Journal of Computer Vision 1 (1987), Heft 2, S. 167-187
- DENKER, H.: (1989) : A New Gravimetric Quasigeoid for the Federal Republic of Germany. DGK Reihe B, Heft 291, München
- DÜSEDAU, G., HÖSSLER, R., REINHARDT, W. und THIEMANN, R. (1987) : Digitale Geländemodelle – Neue Entwicklungen und Möglichkeiten. BuL 55 (1987), Heft 5
- EBNER, H. (1979) : Zwei neue Interpolationsverfahren und Beispiele für ihre Anwendung. BuL 47(1979)
- EBNER, H., REINHARDT, W. und TANG, L. (1989) : Beiträge der Rasterdatenverarbeitung zum Aufbau digitaler Geländemodelle. ZfV 6/1989
- EBNER, H., R. HÖBLER und R. WÜRLÄNDER (1990) : Integration von Digitalen Geländemodellen in Geoinformationssysteme – Konzept und Realisierung. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Heft Nr. 105
- ECKSTEIN, W. and MUNKELT, O. (1995) : Extracting objects from digital terrain models. In: Remote Sensing and Reconstruction for three Dimensional Objects and Scenes. Toni F. Schenk (Editor), Proc, Spie
- ECKSTEIN, W. (1996) : Segmentation and texture analysis. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXL, Part B3, Vienna

- EHLERS, M und P. LOZHMANN (1982) : Digitale Bildverbesserung von verrauschten Abtasterdaten. BuL (50) Heft 5
- ERIK NÆSSET (1998) : Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52 (1997) 49-56
- FINSTERWALDER, R. (1986) : Zur Bestimmung von Tal- und Kammlinien. ZfV 5/1986, 184 - 189
- FINSTERWALDER, R. (1990) : Neue Genauigkeitsmaße für Geländeerfassung durch digitale Geländemodelle. ZfV, 115. Jahrgang, Heft 10
- FLOOD, M. & GUTELIUS . (1997) : Commercial Implications of Topographic Terrain Mapping Using Scanning Airborne Laser Radar. PE&RS April 1997, P. 327 - 366
- FLUCH, M. & REIL, W. (1997) : Airborne Laser Scanning - Ein Anwendungsbeispiel zur Bestimmung der Geländehöhen bei seismischen Vermessungen. Vermessungsingenieur 1/1997, S. 1 – 7
- FOLTYNIEWICZ, R. (1996) : Automatic face recognition via wavelets and mathematical morphology. Proceedings of ICPR'96
- FÖRSTNER, W. (1978) : Die Suche nach groben Fehlern in photogrammetrischen Lageblöcken. DGK Reihe C, Heft Nr. 240
- FÖRSTNER, W. (1991) : Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und –vermessung. DGK Reihe C, Heft Nr. 370
- FÖRSTNER, W. (1996) : Automatische 3D-Objekterfassung und –erkennung. Vortrag anlässlich der Ringvorlesung 'Bildverarbeitung und Mustererkennung an der Universität Bonn'
- FRIEB, P. (1990) : Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulationssystem. DGK Reihe C, Heft Nr. 359
- FRIEB, P. (1998) : Laserscannermessung – Basisdaten für Geoinformationssysteme. DVW Schriftreihe 33
- FRITSCH, D. (1988) : Some experience with the determination of the optimum sampling density. ISPRS Volume 27, B11, pp. III 493-504, Kyoto
- FRITSCH, D. (1991) : Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle. DGK Reihe C, Heft Nr. 369
- FRITSCH, D. and KILIAN, J. (1994) : Filtering and calibration of laser scanner measurements. ISPRS Commission III Symposium Munich, WG III/1
- FRITSCH, D. (1999) : Laser-Scanning. GIS, 2/99
- FUCHS, C. (1998) : Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. DGK Reihe C, Heft Nr. 502
- GONZALEZ, C. Rafael and WOODS, E. Richard (1992) : Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company.
- HAALA, N. (1996) : Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten. DGK Reihe C, Heft Nr. 460
- HAALA, N. (1997) : Qualifikation von städtischen Gebäudehöhenmodellen. Publikationen der DGPF, Band 5
- HABERÄCKER, P. (1995) : Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Carl Hanser Verlag, München, Wien
- HAHN, H. (1999) : LGN Hannover: Erfahrungsbericht zum Laser-Scanning-Verfahren. GIS 2/99
- HARALICK, M., (1984) : Digital step edges from zero-crossing of second directional derivatives. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence

- HARALICK, M., CHEN, S. and KANUNGO, T. (1992) : Recursive opening transform.  
IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,  
June 15-18 1992, Champaign Illinois
- HARTL, P., HUG, C., KÄLBERER, U., WEHR, A. (1996) : Integriertes Laser-/Radar zur  
Erfassung von Geländeoberflächen. AVN 2/1996
- HECK, B. : (1987) : Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung.  
Wichmann Verlag, Karlsruhe
- HEITZINGER, D., KAGER, H. (1998) : Hochwertige Geländemodelle aus Höhenlinien durch  
wissensbasierte Klassifikation von Problemgebieten. ISPRS, Vol. 32, Part 4, Stuttgart
- HEMMLEB, M., ALBERTZ, J. (1998) : Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer  
Bilder - Grundlagen und praktische Anwendungen. PFG 1998, Heft 1, S. 5-16
- HOSS, H. (1997) : Einsatz des Laserscanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen  
Geländehöhenmodells (DGM) in Baden-Württemberg. PFG 2/1997
- HUG, C. (1996) : Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugeinsatz  
unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens.  
DGK Reihe C, Heft Nr. 457
- HUISING, E.J. and L.M. GOMES PEREIRA (1998) : Errors and Accuracy Estimates of Laser  
Data Acquired by Various Laser Scanning Systems for Topographic Applications.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53 (1998) 245-261
- HUSSAIN, Z. (1991) : Digital Image Processing.  
Practical Applications of Parallel Processing Techniques, Ellis Horwood Limited, 1991
- HUTTON, J. & LITHOPOULOS, E. (1998) : Airborne Photogrammetry Using Direct Camera  
Orientation Measurements. PFG 6/1998, S. 363 - 370
- IRISH, J. L., W. J. LILLYCROP (1999) : Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS  
system. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 123-129
- JÄHNE, B. (1997) : Digitale Bildverarbeitung, 4., völlig Neubearbeitete Auflage. Springer Verlag
- JIANG, X. und BUNKE, H. (1997) : Dreidimensionales Computersehen - Gewinnung und  
Analyse von Tiefenbildern. Springer-Verlag 1997, Berlin, Heidelberg und New York
- KAMPMANN, G. (1986) : Robuster Ausreißertest mit Hilfe der L1-Norm-Methode. AVN 4/1986
- KATZENBEISSER R. und LÖFFLER, G. (1996) : DHM-Erfassung mit Laserscannern. AVN 10/1996
- KILIAN, J. und ENGLICH, M. (1994) : Topographische Geländeerfassung mit flächenhaft abtastenden  
Lasersystemen. ZPF 6/1994
- KILIAN, J. , HAALA, N. and ENGLICH, M. (1996) : Capture and evaluation of airborne laser scanner  
data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,  
Vol. XXXI, Part B3. Vienna
- KLETTE, R., und ZAMPERONI, P. (1995) : Handbuch der Operatoren für die Bildverarbeitung.  
Vieweg Braunschweig/Wiesbaden
- KLETTE, R., KOSCHAN, A. und SCHLÜNS, K. (1996) : Computer Vision, Räumliche Information aus  
digitalen Bildern. Vieweg Technik
- KNABENSCHUH, M. (1999) : Einsatz der Laserscanning - Technologie für den Aufbau digitaler  
Geländemodelle. GIS 2/99
- KOCH, K.-R. (1983) : Ausreißertests und Zuverlässigkeitsmaße.  
Vermessungswesen und Raumordnung, 45 : 400-411
- KOCH, K.-R. (1985) : Digitales Geländemodell mittels Dreiecksvermaschung.  
Vermessungswesen und Raumordnung 47, Heft 3 + 4

- KOCH, K.-R. (1987) : Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen.  
Dümmler Verlag, Bonn
- KOCH, K.-R. (1994) : Deterministische und stochastische Signale. Dümmler Verlag, Bonn
- KOCH, K.-R. (1996) : Robuste Parameterschätzung. AVN 1/1996
- KOST, W., M. LODDENKEMPER, J. PETRING (1997) : Airbone laser scanning – A new remote sensing method for mapping terrain.  
3<sup>rd</sup> EARSeL Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, Tallinn, Estonia
- KÖTHE, U. (1997) : Parameterfreie Merkmalsextraktion durch automatische Skalenselektion.  
Publikation der DGPF, Band 5
- KRARUP, T., J. Juhl, KUBIK, K. (1980) : Götterdämmerung over Least Squares Adjustment.  
IAP, Vol. 23, Teil B3, Hamburg
- KRAUS, K. (1984) : Photogrammetrie Band 2, Theorie und Praxis der Auswertesysteme.  
Dümmler Verlag, Bonn
- KRAUS, K. (1991) : Anmerkungen zum Aufsatz von R. Finsterwalder über die Genauigkeit digitaler Geländemodelle. ZfV 1/1991
- KRAUS, K. (1997) : Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. VGI 1/97
- KRAUS, K., HYNST, E., BELADA, P., & REITER T. (1997) : Topographische Daten in bewaldeten Gebieten - Ein Pilotprojekt mit Laser-Scanner-Daten. VGI 3/1997, S. 174 - 181
- LANG, T. (1969) : Rules for Robot Draughtsmen. Geographical Magazine, Vol. XLII, No. 1
- LANGE, E. (1999) : Von der analogen zur GIS-gestützten 3D-Visualisierung bei der Planung von Landschaften. GIS 2/99
- LECHTHALER, M. (1991) : Entropiekonzept und Geländeoberfläche.  
Studienrichtung Vermessungswesen TU Wien, Kartographische Forschungen und anwendungsorientierte Entwicklungen, Heft 39
- LELGEMANN, D., D. EHLERT, H. HANCK : (1981) : Eine astro-gravimetrische Berechnung des Quasigeoids für die Bundesrepublik Deutschland. DGK Reihe A, Heft 92, München
- LEMMENS, Mathias J.P.M. (1996) : Structure-based edge detection, Delineation of Boundaries in Aerial and Space Images
- LI, D. (1985) : Theorie und Untersuchung der Trennbarkeit von groben Paßpunktfehlern und systematischen Bildfehlern bei der photogrammetrischen Punktbestimmung.  
Dissertationsschrift, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart
- LI, D. and SHAO, J. (1994) : House extraction with multiresolution analysis and information fusion.  
In: Proceedings of ISPRS Commission III Symposium on spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, München
- LI, R. (1990) : Erfassung unstetiger Oberflächen aus digitalen Bilddaten durch Flächen- und Kantenzuordnung. DGK Reihe C, Heft Nr. 364
- LI, Z. (1988) : On the measure of digital terrain model accuracy. Photogrammetric Record, 12(72)
- LINDENBERGER, J. (1993) : Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme.  
DGK Reihe C, Heft Nr. 400
- LINDEBERG, T. and GÄRDING, J. (1993) : Shape from texture from a multi-scale perspective.  
Fourth International Conference on Computer Vision, May 11-14 1993, Berlin
- LINDEBERG, T. (1994) : Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales.  
Journal of Applied Statistics, Vol. 21, No.2, pp. 225-270

- LINDBERG, T. (1996a) : Scale-space: A framework for handling image structures at multiple scales.  
In: Proc. CERN school of Computing, Egmond aan Zee, The Netherlands
- LINDBERG, T. (1996b) : Edge detection and ridge detection with automatic scale selection.  
IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,  
June 18-20, 1996, San Francisco, California
- LINDER, W. (1994) : Interpolation und Auswertung digitaler Geländemodelle mit Methoden der  
digitalen Bildverarbeitung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen  
der Universität Hannover, Nr. 198
- LODDENKÄMPER, M. (1997) : Airborne Laser Scanning aus der Sicht eines Daten-Providers.  
Publikation der DGPF Band 5
- LOHR, U. (1997) : DEM Generation by Laserscanning. TopoSys GmbH, Ravensburg  
Publikation der DGPF Band 5
- LOHR, U. (1998) : DGM-Erstellung durch Laserscanning. Publikation der DGPF Band 6
- MARR, D. (1980) : Vision: A computational investigation into the human representation and  
processing of visual information. W. H. Freeman & Co., San Francisco
- MARR, D. and HILDRETH, E. (1980) : Theory of edge detection.  
In Proceedings of the Royal Society London B 207, volume B, p. 187-217
- MAYER, H., STEGER, C. (1998) : Scale-space events and their link to abstraction for road extraction.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53
- MAYER, H., (1998) : Maßstabsräume: Theorie und Modellgeneralisierung von Gebäudeumrissen.  
Publikation der DGPF, Band 6
- MC CULLAGH, M. J. , (1988) : Terrain and Surface Modelling Systems: Theory and Practice.  
Photogrammetric Record, 12 (72)
- MEIER, S. (1988) : Zweidimensionale Filterverfahren und ihre Eigenschaften, Teil I: Grundlagen,  
Vermessungstechnik. 36. Jahrgang (1988) Heft 6
- MORALES, A. and ACHARYA, R. (1992) : Non-linear multiscale filtering using mathematical  
morphology. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern  
Recognition, June 15-18 1992, Champaign Illinois
- MURAKAMI, H. and NAKAGAWA, K. (1998) : Potential of an airborne laser scanner system for change  
detection of urban features and orthoimage development.  
IAPRS, Vol. 32, Part 4 „GIS Between Visions and Applications“, Stuttgart
- NEVATION, R. (1986) : Handbook of Pattern Recognition and Image Processing.  
Edited by TZAY Y. Young, KING-SUN FU, Academic Press, INC
- PAN, Y. (1994) : Autoregressive Modelle für die Texturanalyse in digitalen Bildern.  
DGK Reihe C, Heft Nr. 430
- PEREIRA, L. M. G. and R. J. WICHERSON (1999) : Suitability of laser data for deriving  
geographical information, A case study in the context of management of fluvial zones.  
ISPRS Journal of Phtogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 105-114
- PETZOLD, B., P. REISS and W. STÖSSEL (1999) : Laser scanning-surveying and mapping  
agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models.  
ISPRS Journal of Phtogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 95-104
- PFEIFER, N., KÖSTLI, A. and KRAUS, K. (1998) : Interpolation of laser scanner data - implementation  
and first results. ISPRS Commission III Symposium, Working Group III/2, Columbus, Ohio
- PINZ, Axel (1994): Bildverstehen. Springer-Verlag, Wien New York
- REINHARDT, W. (1991) : Interaktiver Aufbau hochqualitativer digitaler Geländemodelle an  
photogrammetrischen Stereosystemen. DGK Reihe C, Heft Nr. 381

- REIB, P. (1985) : Aufbau digitaler Höhenmodelle auf der Grundlage einfacher finiter Elemente. DGK Reihe C, Heft Nr. 315
- RIEGER, W. (1992) : Hydrologische Anwendung des digitalen Geländemodelles. Studienrichtung Vermessungswesen, TU Wien, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 39
- RITCHIE J. C. et al. (1994) : Remote sensing studies using an airborne laser altimeter. Presented at the first International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France
- RODEHORST, V. (1997) : Digitale Bildanalyse in der Architekturphotogrammetrie. In: Architekturphotogrammetrie gestern-heute-morgen, Hrsg.: J. Albertz & A. Wiedemann
- SAID, J.N., CHERIET, M. and SUEN, C.Y. (1996) : Dynamical morphological Processing: A fast method for base line extraction. Proceedings of ICPR'96
- SAMBERG, A. (1997) : What laser scanning can do today: current techniques. 3<sup>rd</sup> EARSeL Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, Tallinn, Estonia
- SCHENK, T. and KRUPNIK A (1996) : Ein Verfahren zur hierarchischen Mehrfachbildzuordnung im Objektraum. ZPF, 1/96
- SCHICKLER W. (1992) : Merkmalsextraktion für Meßaufgaben in der digitalen Photogrammetrie. ZPF 4/1992
- SCHÖNEMEIER P. (1996) : ATKIS-DGM5 mit Laser-Scanning. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
- SCHÖNEMEIER P. (1997) : Einsatz des Laserscannings beim Aufbau des niedersächsische Digitalen-Gelände- Höhenmodells (DGM5). Publikation der DGPF Band 5
- SCHULTE, S. (1987) : Modellierung von Beobachtungsreihen durch ein erweitertes autoregressives Modell. DGK Reihe C, Heft Nr. 327
- SERRA, J. (1982) : Image Analysis and Mathematical Morphology. Academic Press
- SHETTIGARA, V.K., S.G. KEMPINGER, R. AITCHISON (1995) : Semi Automatic Detection and Extraction of Man-Made Objects in Multispectral Aerial and Satellite Images. In Grün, O. Kübler und P. Agouris (Hrsg.): Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Satellite Images. Birkhäuser, Basel, 63-72
- SMITH, S.M. (1996) : Flexible filter neighbourhood designation. Proceedings of ICPR'96
- SOILLE, P. (1999) : Morphological Image Analysis, Principles and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- STEINBRECHER, R. (1993) : Bildverarbeitung in der Praxis. Oldenbourg
- SUTOR, T. (1997) : Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Spektralbereich. Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München, Schriftreihe Heft 56
- SUI, Lichun (1998) : Topographische Geländeerfassung mit Laserscanner — Untersuchung und erstes Ergebnis (unveröffentlicht). Seminararbeit des Fachgebietes Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin, Nov. 1998
- SUI, Lichun (1999) : Pilotprojert zur Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden — im Auftrag des Landesvermessungsamtes Brandenburg (unveröffentlicht). Abschlußbericht des Fachgebietes Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin, Juli. 1999
- TEMPFLI, K. : (1982) : Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse. Geowissenschaftliche Mitteilungen der TU Wien, Heft 22
- VITULANO, S., NAPPI, M., VITULANO, D. and MASTROVITO, C. (1996) : Edge detection using a new definition of entropy. Proceedings of ICPR'96

- VON HANSEN, W. & VÖGTLE, T. (1999) : Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen.  
PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation Jahrgang 1999, Heft 4
- WEHR, A. and U. LOHR (1999) : Airborne laser scanning - an introduction and overview.  
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999) 68-82
- WEIDNER, U. (1994) : Information-preserving surface restoration and feature extraction for digital elevation models. In: Proceedings of ISPRS Commission III, Symposium on Spatial Information from Digital Phtogrammetry and Computer Vision, München
- WEIDNER, U. (1995) : Krümmungsmaße. Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn
- WEIDNER, U. (1996) : Building extraction from digital elevation models.  
Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn
- WEIDNER, U. (1997) : Gebäudeerfassung aus Digitalen Oberflächenmodellen.  
DGK Reihe C, Heft Nr. 474
- WEVER, C. (1999) : Laserscannermessungen – ein Verfahren setzt sich durch. GIS, 2/99
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G. und ALBERTZ, J. (1998) : Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC - Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. PFG 6/1998, S. 337-348
- WIEDEMANN, A. (1997) : Orthophototechnik in der Architekturphotogrammetrie – Möglichkeiten und Grenzen. Architekturphotogrammetrie gestern-heute-morgen,  
Hrsg: J. Albertz & A. Wiedemann, TU Berlin
- WILBERT Wouters and ARDIS Bollweg (1998) : A Detailed Elevation Model Using Airborne Laser Altimetry. GEO Informatics
- WILD, E. (1983) : Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. DGK Reihe C, Heft Nr. 277
- WILD, D., KRZYSZEK, P. (1996) : Automatic breakline detection using an edge preserving filter.  
International Archives of Phtogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXL, Part B3, Vienna
- WITKIN, A. P.(1983) : Sacale-Space Filterung.  
Proc. Intl. Join Conf. On Artificial Intelligence, Karlsruhe, Germany
- YANG, Y. (1997) : Estimators of Covariance Matrix at Robust Estimation based on Influence Functions. ZfV 4/1997
- ZHUANG, X. (1992) : Morphological structuring function decomposition. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Champaign Illinois
- ZIMMER/BONZ. (1996) : Objektorientierte Bildverarbeitung – Datenstrukturen und Anwendungen in C++. Carl Hanser Verlag