



Institut für Photogrammetrie  
und GeoInformation  
Leibniz Universität Hannover

# **KFKI - Projekt „Laserscan“**

Abschlussbericht

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke  
Dr.-Ing. Peter Lohmann

Dipl.-Ing. Alexander Brzank  
Dipl.-Ing. Jens Göpfert

Hannover, Mai 2008

# Abschlussbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Hannover  Institut für Photogrammetrie und GeoInformation IPI	<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>03KIS050</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b>  <b>LASERSCAN</b> <b>Entwicklung regional angepasster Verfahren und Werkzeuge zur Bearbeitung von Laserscannermessungen von Inselgebieten, Watten und Vorländern</b>	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2005 bis 31.12.2007	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2005 bis 31.12.2007	

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke  
Dr.-Ing. Peter Lohmann

Dipl.-Ing. Alexander Brzank  
Dipl.-Ing. Jens Göpfert

Hannover, Mai 2008

## **Vorwort**

Gemäß Nr.6 ANBest-P/GK als Bestandteil des Zuwendungsbescheides vom 23.07.2004 mit dem Förderkennzeichen 03KIS050 ist der Zuwendungsbegünstigte verpflichtet, der projektbegleitenden Gruppe einen Abschlussbericht über die durchgeführten Arbeiten vorzulegen.

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt: Im Abschnitt 1 werden die dem Projekt zugrunde liegenden Aufgabenstellung, die Planung und der Ablauf, die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen sowie die Kooperation mit anderen Stellen kurz dargestellt. Anschließend erfolgt eine Vorstellung der in der gesamten Projektlaufzeit durchgeführten Arbeiten bzgl. der einzelnen Schwerpunkte. Dazu werden die entwickelten Algorithmen und Methoden übersichtlich beschrieben und mit erzielten Beispielen unterlegt. Zusätzlich werden die erzeugten Softwaretools vorgestellt. Ferner werden die veröffentlichten und geplanten Publikationen aufgelistet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	5
1.1	Vorhabensbeschreibung .....	5
1.2	Voraussetzungen .....	5
1.3	Planung und Ablauf.....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	10
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b> .....	11
2.1	Erzielte Ergebnisse .....	11
2.1.1	Extraktion von Bruchkanten aus Laserhöhendaten von Inselgebieten, Watten und Vorländern .....	11
2.1.2	Klassifizierung von Wasserflächen aus Laserscannerdaten.....	12
2.1.3	Klassifizierung von Vegetationsflächen bezüglich der Genauigkeit der Laserdaten.....	14
2.1.4	Datenkompression und -reduktion .....	17
2.1.5	Erstellung prototypischer Software .....	20
2.2	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	22
2.3	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	22
2.3.1	Full-Waveform .....	23
2.3.2	Verwendung der Intensität .....	23
2.4	Geplante und erfolgte Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	23
<b>3</b>	<b>Anlagen</b> .....	26
3.1	Erfolgskontrollbericht .....	26
3.1.1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen.....	26
3.1.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens .....	26
3.1.3	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	26
3.1.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	26
3.1.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer .....	26
3.1.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.....	27
3.2	Kurzfassung (Berichtsblatt).....	28
3.3	Veröffentlichungen 2008.....	29

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorhabensbeschreibung

Durch eine stetige Verbesserung der Laserscanner-Technik wird zunehmend die Möglichkeit in Erwägung gezogen, insbesondere die Peilung oder terrestrische Vermessung von schwer zugänglichen Wattflächen durch die Methode des Airborne Laserscanning zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Das Forschungsvorhaben setzte sich daher zum Ziel, Algorithmen und Werkzeuge zur topographisch morphologischen Geländebeschreibung inklusive der Verwendung von Zusatzinformation (GIS, Multispektraldaten), sowie Methoden und Prozeduren zur Dokumentation von verfahrensbedingten Genauigkeitsbudgets und Datenreduktionsmöglichkeiten zur schnelleren Bearbeitung für den praktischen Einsatz in den Fachverwaltungen/-institutionen zu erarbeiten und zu entwickeln. Auf der Grundlage von verschiedenen Befliegungen und gleichzeitig aufgenommenen Kontrollmessungen sollten die Methoden entworfen und anschließend verifiziert werden. Die Ergebnisse und erstellten Werkzeuge sollten in der Praxis bei den zuständigen Behörden Anwendung finden.

## 1.2 Voraussetzungen

Grundvoraussetzung für alle Teile der zu entwickelnden Methoden war die Verfügbarkeit von hochauflösenden Laserscannerdaten (Höheninformation im „first“ und „last“ echo, Intensitätsinformation) in Verbindung mit optischen Multispektraldaten. Daneben waren für das Untersuchungsgebiet aktuelle GIS-Daten notwendig. Die Laserhöhendaten sollten inhaltlich nicht vorverarbeitet und nicht gefiltert sein (unregelmäßig verteilte Rohdaten), um jeglichen mit der Vorverarbeitung ggf. in Verbindung stehenden Informationsverlust auszuschließen. Die Daten müssen im Landeskoordinatensystem und die Bilddaten als geokodierte Orthophotos vorliegen. Als Basis für diese Untersuchungen sollen verschiedene marktgängige Laserscanner eingesetzt werden, um eine System- bzw. Anbieterabhängigkeit auszuschließen. Die Laserscannerdaten werden durch die Befliegung von problemorientiert ausgewählten Testgebieten an der Niedersächsischen und der Schleswig-Holsteinischen Küste erfasst, welche durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz (NLWK), das Amt für ländliche Räume (ALR) und die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD-NW) koordiniert werden. Parallel hierzu sind Referenzmessungen mittels terrestrischer Vermessung und Peilung durch die drei Dienststellen vorgesehen, um die Qualität der erzeugten Laserscannerdaten in Bezug auf die definierten Fragestellungen verifizieren zu können.

## 1.3 Planung und Ablauf

Das Forschungsprojekt war auf die Dauer von 3 Jahren ausgelegt und wurde wissenschaftlich von der Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) begleitet. Um das Projekt erfolgreich durchführen zu können, war eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, dem ALR Husum, dem NLWK Norden und der WSD Nordwest Aurich vorgesehen und zwar nicht nur, was den Datenaustausch betrifft, sondern vor allem auch in der gegenseitigen fachlichen Beratung.

Die folgenden Arbeitspakete (AP), die hier in kurzer Form beschrieben werden, waren Bestandteil des Arbeitsplans:

## **AP 100 Vorbereitende Untersuchungen**

- Analyse unterschiedlicher Methoden für die Interpolation beim Übergang der unregelmäßig verteilten Laserpunkte in ein regelmäßiges Raster bezüglich des Einflusses auf die Methoden der anderen Arbeitspakete

## **AP 200 Laserdatenerfassung in den Testgebieten und Durchführung von hydrographischen Vergleichs- und terrestrischen Referenzmessungen**

- Die Befliegungen sollten in jedem Fall jeweils im Frühjahr bzw. Herbst durchgeführt werden. Die Durchführung der Referenzmessungen (Tachymeter, GPS, Peilungen, Vegetationsaufnahmen etc.) wurden möglichst parallel zur Befliegung vorgenommen (Abstand  $\pm$  ca. 2 Wochen) und erfolgte durch Personal von ALR, NLWK und WSD mit Unterstützung durch das IPI. Es wurde u.a. auch eine Dokumentation von Oberflächentypen/-eigenschaften mit einer Digitalkamera durchgeführt. Folgende Datenerfassungskampagnen waren geplant:

**AP201** Laserflüge NLWK, Frühjahr 2004

**AP202** Laserflug WSA Bremerhaven, Herbst 2004

**AP203** Laserflug ALR, Herbst 2004

**AP204** Laserflug NLWK, Frühjahr 2005

**AP205** Laserflug Herbst 2005, WSA Bremerhaven ( siehe AP 202)

**AP206** Laserflug Herbst 2005, ALR (siehe AP203)

## **AP 300 Topographisch morphologische Geländebeschreibung aus Laserscannerdaten**

- Ziel dieses Arbeitspakets war es, die Unzulänglichkeiten, die derzeit bei der Filterung von Objekten im Inselraum, Watten und Vorländern bestehen, zu analysieren und bei den zu entwickelnden Verfahren insbesondere der speziellen Natur der dort vorliegenden topographischen Objekte gerecht zu werden. Hauptsächlich sollten der Einfluss verschiedener Vegetationsarten auf die Genauigkeit des digitalen Geländemodells sowie die Möglichkeiten der Entfernung von Laserpunkten, die durch Reflektionen an der Oberfläche aufstehender Wasserflächen entstanden sind, untersucht werden.

## **AP 400 Dokumentation und Beschreibung von verfahrensbedingten Genauigkeiten**

- Ziel der Untersuchungen war es sicherzustellen, dass die eingesetzten Methodiken und Verfahren reproduzierbar und Fehler in Bezug auf die Daten rückverfolgbar sind. Die Genauigkeit und alle sie beeinflussenden Faktoren sollen durch eine Archivierung von Protokoll- und Metadaten transparent werden.

## **AP 500 Datenkompression und –reduktion**

- Laserhöhendaten liegen in der Regel als Rohdaten in einer unregelmäßigen Punktverteilung vor. Es hat sich gezeigt, dass für viele Anwendungen die Generierung einer gitterförmigen Datenstruktur vorteilhaft ist. Dies gilt für die Bearbeitungsmethodik und -geschwindigkeit. Allerdings müssen Nachteile (Informationsverluste) bei der Interpolation in Kauf genommen werden. Dafür lassen sich gitterförmige Datenstrukturen sehr viel leichter und schneller mit herkömmlichen Kompressionsverfahren reduzieren. Die Verfahren zur Kodierung und Datenreduktion

mit der Quantifizierung des damit verbundenen objektbezogenen Informationsverlustes sollten hier untersucht werden. Der Projektpartner WSD NW stellte im Einvernehmen mit der BfG die Software HyDAP zur Verfügung.

#### **AP 600 Praxisbezogene Projektbegleitung, Erprobung der prototypischen Software und Entwicklung einer den Ansprüchen der Praxis gerechten graphischen Benutzeroberfläche**

- Während der gesamten Projektlaufzeit war die praxisbezogene Erprobung der prototypischen Software gemessen an den realen Bedürfnissen der beteiligten Küsteninstitutionen vorgesehen. Hierzu war in gegenseitiger Abstimmung die Einsatzfähigkeit und Nützlichkeit neuer Entwicklungen kritisch zu erproben. Änderungsanforderungen waren zu formulieren und in gegenseitiger Abstimmung die entstehende Software darauf anzupassen.

#### **AP 700 Berichte**

- Die Ergebnisse sollten in Form von jährlichen Fortschrittsberichten und einem Abschlussbericht dokumentiert werden. Daneben waren regelmäßige Treffen mit den Projektpartnern und der einzurichtenden projektbegleitenden Beratergruppe im halbjährlichen Abstand zur Projektsteuerung vorgesehen.

### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Mit der Verfügbarkeit von scannenden Lasersensoren und der Möglichkeit zur hochgenauen Positionierung mittels GPS/IMU ist seit Mitte der 90'er Jahre eine Alternative zu den klassischen Methoden der topographischen Höhenmessung zur Erstellung von Digitalen Oberflächen- und Geländemodellen (DOM und DGM) entstanden. Seitdem wird diese Technik zunehmend in diversen Anwendungsprojekten zur Erstellung von DOM eingesetzt. Um aus den Oberflächenmodellen ein DGM zu generieren, bedarf es der Identifizierung und Klassifizierung von Laserpunkten in solche, die echte Bodenpunkte sind und andere, die auf Vegetation, Gebäuden und anderen nicht zum Gelände gehörenden Objekten liegen, sowie ihrer Beseitigung (Filterung). Des Weiteren benötigt man zur topographisch richtigen Beschreibung der Erdoberfläche Bruchkanten und Formlinien. Die Filterung und Bruchkantendetektion ist daher seit einiger Zeit Gegenstand der Forschung.

Kraus und Pfeifer (1997, 1998) wendeten die Methode der iterativen, linearen Prädiktion auf unregelmäßig verteilte Laserdaten an, um in bewaldeten Gebieten zu filtern. Diese Methode wurde dann auf die Filterung von Gebäuden und Bäumen in städtischen Bereichen ausgedehnt (Pfeifer et al., 2001). Die iterative lineare Prädiktion mit einer gewichteten Kovarianzfunktion geht von einem stochastischen Prozess aus und erfordert die Abspaltung einer Trendfunktion von den gemessenen Höhenwerten über eine gleitende Schrägebene oder ein Flächenpolynom niedrigen Grades an der jeweils betrachteten Stelle. Die erforderliche ergodische Eigenschaft eines reinen stochastischen Prozesses ist jedoch in städtischen Gebieten mit signifikanten anthropogenen Einflüssen nur schwer zu erreichen. Daher eignet sich dieses Verfahren eher für offene Landschaften und bewaldete Gebiete. Das Verfahren wird erweitert auf die Verwendung von Datenpyramiden (Kraus und Pfeifer, 2001) mit dem Vorteil, dass nun auch Punkte in großen, dichten Waldgebieten und auch auf großflächigen Gebäuden eliminiert werden.

Vosselman (2000) schlägt ein neigungsbasiertes Filter vor, das die Steigung des Geländes in der Nachbarschaft eines Laserpunktes benutzt, um über einen Schwellwert innerhalb eines

Suchradius Bodenpunkte zu finden. Je niedriger der Schwellwert angesetzt wird, desto mehr Punkte werden gefiltert. Die Methode erzielt gute Resultate bei a priori Kenntnis der Geländestruktur, die z.B. über Trainingsgebiete gewonnen werden kann. Andere Ansätze zur Neigungs-basierten Filterung finden sich bei Roggero (2001) und Sithole (2001).

Neben der Geländesteigung benutzen Haugerud und Harding (2001) die lokale Geländekrümmung, um Laserpunkte in einer Dreiecksvermaschung (TIN-Struktur) zu filtern. Axelsson (2000) schlägt die Verwendung von adaptiven TIN-Strukturen vor, um in einem iterativen Prozess in urbanen Gebieten Bodenpunkte zu klassifizieren. Das Problem bei dieser Methode besteht in dem Umstand, dass unterschiedliche Schwellwerte für unterschiedliche Oberflächentypen vorgegeben werden müssen.

Verfahren der mathematischen Morphologie angewandt auf Grauwertkodierte Höhenbilder werden von einer Gruppe anderer Autoren bevorzugt (z.B. Kilian et al. 1996, Schiewe 2000, Zhang et al. 2003). Ein Problem bei der Anwendung morphologischer Filter ist die Wahl einer geeigneten Filtergröße, die möglichst dem Objekt angepasst sein sollte. Dies wird z.B. von Zhang et al. (2003) durch ein schrittweises Verfahren gelöst, indem allmählich sowohl die Maske für das Opening als auch der Schwellwert für Höhendifferenzen angepasst werden.

Schiewe (2000) benutzt ein Verfahren, welches auf der Grauwertmorphologie aufsetzt („constrained opening“), um sowohl Nicht-Geländepunkte zu filtern als auch Bruchkanten zu erhalten und zu detektieren. Das Verfahren vermeidet z.B. an Böschungen so die sonst übliche verfahrensbedingte „Abrundung“ von Kanten und erlaubt daher die Detektion von Bruchkanten an der Sollposition. Das Verfahren geht allerdings davon aus, dass die Höhendaten in einer Gitterstruktur vorhanden sind.

Bruchkanten dienen nicht nur zur morphologisch korrekten Berechnung von Digitalen Geländemodellen (Petzold et al., 1999), sondern können auch helfen, in ihrer Eigenschaft als Unstetigkeitsstellen des Geländes die Aufgabe der Datenreduktion zu unterstützen. Dies kann z.B. durch eine Konvertierung von Raster- bzw. Dreieckstrukturen in Vektorstrukturen geschehen, was eine Art Informationsverdichtung darstellt (Weidner, 1994). Hierbei werden die implizit in einem Raster oder TIN enthaltenen Informationen in explizite Oberflächenbeschreibungen in Form von Vektorstrukturen (Bruchkanten, Kamm- oder Tallinien) transformiert. Laserhöhendaten können im Kontext einer Segmentierung von Entfernungsbildern in kontinuierliche Regionen und Unstetigkeitsstellen eingeteilt werden. Dadurch eignen sich auch besonders kanten- oder regionenbasierte Verfahren zur Oberflächensegmentierung.

Gomes-Pereira und Wicherson (1999) nutzen die erste Ableitung der Daten zur Extraktion von Bruchkanten, die allerdings eher eine zerstückelte Struktur haben. Kantendetektoren haben generell die Eigenschaft, das Messrauschen in den Daten zu verstärken (Gomes-Pereira und Janssen, 1999). Dies kann mit dem „Laplace of Gaussian“ Operator gemindert werden, wie Chakreyavanich (1991) untersucht. Verfahren, die mit den Oberflächenkrümmungen und Methoden der Bildverarbeitung Bruchkanten ableiten, zeigt Sui (2002) auf. Weidner (1994) schlägt einen Algorithmus zur parameterfreien Informationserhaltenden Oberflächenbeschreibung vor, indem er die Signal- und Rauschkomponenten simultan durch Varianzkomponentenschätzung bestimmt und diese Information dann zur Filterung benutzt. Auf diese Art und Weise bleiben Unstetigkeitsstellen in den Daten erhalten. Eine ähnliche Vorgehensweise wird von Wild und Krzystek (1996) für die automatische Ableitung eines DGM aus Stereoluftbildern vorgeschlagen. Brügelmann (2000) baut auf einem Vorschlag von Förstner (1998) zur Bruchkantendetektion mit den zweiten Ableitungen und den Hauptkrümmungen in einem Punkt (Besl, 1986) und einem Hypothesentest auf, wobei alle Pixel mit einem signifikanten Homogenitätsmaß (Summe der quadratischen Hauptkrümmungen) als potentielle Kantenpixel betrachtet werden. Dies führt zu relativ breiten Bruchkantenregionen, die mit Hilfe des Schwellwertverfahrens „Nonmaxima-Suppression“ auf Pixelbreite skelettiert und in Vektorform konvertiert werden. Das Verfahren



zeigt recht gute Ergebnisse, die anhand von Bruchkanten auf Deichkronen mit Zuwegungen dargestellt werden. Kraus und Pfeifer stellen 2001 ein Verfahren zur Bruchkantenextraktion aus Laserscannerdaten vor, welches Vorwissen über die ungefähre Lage einer Bruchkante, z.B. aus GIS-Daten, nutzt und dann über eine stückweise kleinste Quadrate Ausgleichung versucht, mittels Schnitt von Flächenstücken Punkte der Bruchkante zu bestimmen und diese dann über 3D Splines in ein hybrides DGM mit Raster- und Vektordaten zu integrieren.

Da die Laserscannerdaten in der Regel nicht in Gitterstruktur erhoben werden, ergibt sich die Frage nach einem Informationsverlust durch die Interpolation von unregelmäßig verteilten Punkten in ein regelmäßiges Gitter. Auf die bei der Interpolation entstehenden Nachteile wird insbesondere bei Vosselman (2000) und Schenk und Csathó (2002) hingewiesen. Derzeit gibt es aber keine detaillierte Untersuchung, die sich genauer mit dieser Frage beschäftigt. Ein wesentlicher Vorteil beim Übergang auf ein regelmäßiges Gitter besteht hauptsächlich darin, dass bekannte Methoden der Bildverarbeitung für die Filterung und Bruchkantenextraktion eingesetzt werden können und diese Vorgehensweise eine wesentliche Beschleunigung der Rechenoperationen bewirkt (Sithole et al. 2003).

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die verschiedenen Autoren jeweils für die Landbedeckung (Wald, städtisches Gebiet, usw.) angepasste Verfahren zur Bearbeitung der Laserscannerdaten entwickelt haben. Für die hier anzugehenden Fragen bzgl. Watt, Vorland und Dünen sind den Antragstellern keine geeigneten Ansätze bekannt. Insbesondere die adaptive Bearbeitung sowie die Berücksichtigung von geomorphologischen Informationen stecken trotz einiger interessanter Forschungsansätze noch in den Anfängen, dies gilt erst recht für die automatische Trennung der verschiedenen Landbedeckungen mit Hilfe einer Kombination von Höhen- und Intensitätsdaten. Vor diesem Hintergrund behandelt das beantragte Projekt nicht nur aus Sicht der Anwendung sondern auch aus Forschungssicht sehr innovative Ansätze.

#### Literatur:

- Axelsson, P. , 2000, "DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, pp. 85-92.
- Besl, P. , 1986, "Surfaces in Range Image Understanding", Springer.
- Brügelmann, R., 2000 , "Automatic breakline detection from airborne laser range data", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol XXXIII, Part B3, Amsterdam, pp. 109-116.
- Förstner, W., 1998, "Image processing for feature extraction in digital intensity, color and range images", Proc. of the International summer School on 'Data Analysis and Statistical Foundations of Geomatics', Greece, Springer Lecture notes on Earth Sciences.
- Gomes-Pereira, L., Janssen, L., 1999, "Suitability of laser data for DTM generation: A case study in the context of road-planning and design.", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53, , pp. 244-253.
- Gomes-Pereira, L., Wicherson, R. , 1999, "Suitability of laser data for deriving geographical information – a case study in the context of management of fluvial zones", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53 (2-3), pp. 105-114.
- Haugerud R. A. and Harding, D. J. , 2001, "Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, Part 3/W4, pp. 211-218.
- 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, pp. 383-388.
- Kraus, K. and Pfeifer N. , 1997, "A new method for surface reconstruction from laser scanner data", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXII, Part 3-2W3.
- Kraus, K. and Pfeifer N., 2001, "Advanced DTM Generation from Lidar Data", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV-3/W4, Anapolis, Maryland, , pp. 23-30.
- Kraus, K. and Pfeifer N., 1998, "Determination of terrain models in wood areas with airborne laser scanner data," *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 53, pp. 193-203.
- Petzold, B. Reiss, P. Stössel, W. , 1999, "Laser scanning – surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54(2-3), pp. 95-104.

- Pfeifer, N., Stadler, P., and Briese C. , 2001, "Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment," presented at OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, Stockholm.
- Roggero, M., 2001, "Airborne laser scanning: clustering in raw data," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, Part 3/W4, pp. 227-232.
- Schenk, T., Csathó, B., 2002, "Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for a More Complete Surface Description", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, Part 3, ISSN 1682-1750, September 9 - 13, Graz, Austria, p. A-310 ff.
- Schieve, J. , 2000, "Combining geometrical and semantical image information for the improvement of Digital Terrain Models". in: Buchroithner, M.F. (Ed.): A Decade of Trans-European Remote Sensing cooperation, Proceedings of the 20th EARSEL-Symposium, A. A. Balkema Publishers: pp. 175-180.
- Sithole, G. , 2001, "Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, Part 3/W4, pp. 203-210.
- Sithole, G., Vosselman, G., 2003 "Automatic Structure Detection in a Point-Cloud of an Urban Landscape", Proc. 2<sup>nd</sup> GRSS/ISPRS Joint workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas", Berlin, pp. 67-71.
- Sui, L. , 2002, "Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden", Dissertation, Technische Universität Berlin, D 83
- Vosselman, G. , 2000, "Slope based filtering of laser altimetry data," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam, pp. 958-964.
- Weidner, U. , 1994, "Information-preserving surface restoration and feature extraction for digital elevation models", Proc. ISPRS Commission III Symposium 'Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision', Munich.
- Wild, D., Krzystek, P. , 1996, "Automatic breakline detection using edge preserving filter", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B3, Wien, pp.946-952.
- Zhang, K., Chen, S-C., Whitman, D. Shyu, M-L., Yan, J., and Zhang, C., 2003, "A Progressive Morphological Filter for Removing Non-Ground Measurements from Airborne LIDAR Data" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, Issue 4, pp. 872-882

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Antragsteller, das Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI) der Leibniz Universität Hannover, sowie die drei Partner aus dem Anwendungs- und Nutzerbereich, namentlich das NLWKN in Norden, das ALR in Husum und die WSD Nordwest in Aurich, führten die im Projekt anfallenden Arbeiten in enger Kooperation durch. Das Arbeitspaket AP 200 (Datenbeschaffung) wurde komplett im Unterauftrag an die beteiligten Projektpartner aus der Praxis vergeben. Die Arbeitspakete AP 400 (Dokumentation) und AP 600 (Praktische Projektbegleitung) wurden gemeinsam von allen Partnern bearbeitet. AP 400 wurde vom IPI geleitet, AP 600 von den Projektpartnern.

Für das gesamte Projekt und insbesondere zu den Arbeitspaketen (AP) 600 und 601 wurde auf Arbeitsebene eine Gruppe benannt, die bei den Projektpartnern als ständiger Ansprechpartner vor Ort zur Verfügung stand. Weiterhin wurde die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die große Erfahrungen mit der algorithmischen Plausibilisierung und Reduzierung von Massendaten hat, beteiligt.

Daneben wurde eine projektbegleitende Gruppe gebildet, die sich aus Vertretern der KFKI-Dienststellen zusammensetzte und das Projekt ebenfalls regelmäßig beriet.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 Extraktion von Bruchkanten aus Laserhöhendaten von Inselgebieten, Watten und Vorländern

Viele morphologische Objekte in Watten und Vorländern enthalten Formlinien und Bruchkanten. So lässt sich zum Beispiel ein Priel durch zwei Böschungsober- und Böschungsunterkanten eingehend beschreiben. Morphologische Veränderungen von Objekten können mit Hilfe abgeleiteter Formlinien und Bruchkanten optimal beschrieben werden. Zudem kann die Genauigkeit des abgeleiteten DGM durch das Einfügen von Bruchkanten erhöht werden.

Der im Rahmen des Projektes entwickelte Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien basiert auf einer Oberflächenrekonstruktion. Die Methode geht von der Annahme aus, dass Strukturlinien in den Watten immer paarweise vorkommen. So treten an Prielen, Vorlandgräben und Dünen je Seite jeweils eine Böschungsober- und eine Böschungsunterkante auf. Die Geländeoberfläche wird in der Umgebung paarweise auftretender Strukturlinien durch die Tangens hyperbolicus Funktion stückweise rekonstruiert. Je nach Verlauf des Linienpaares wird entweder eine geradlinige oder eine kreisförmige Realisierung verwendet. Aus den Parametern der jeweiligen Funktion können anschließend für jede Recheneinheit zwei korrespondierende Punkte des Linienpaares entnommen werden. Durch eine Splineinterpolation verknüpft man anschließend die Punkte zu vollständigen Linien. Der Algorithmus benötigt eine 2D-Näherung der Mittelachse zwischen den zugehörigen Strukturlinien, die durch Anwendung von Kantenoperatoren gewonnen wird (siehe Abbildung 2.1).

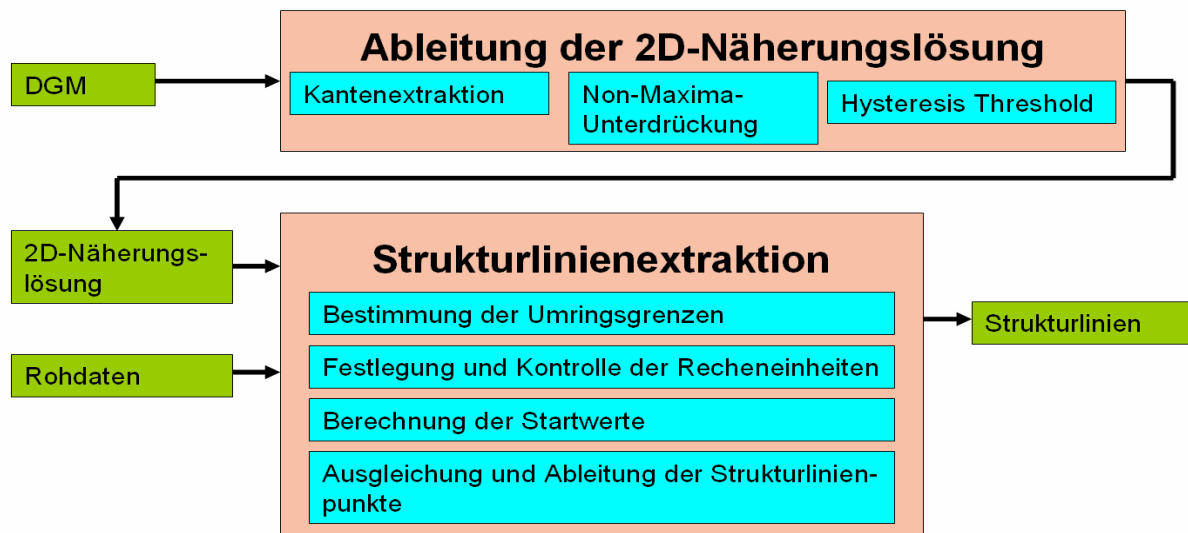
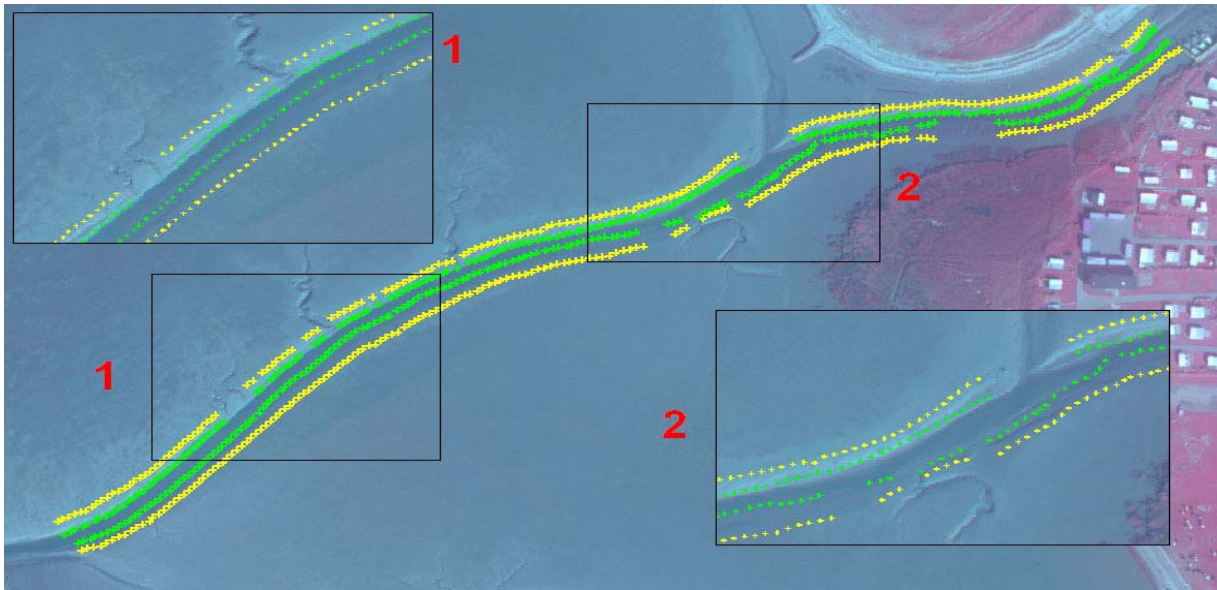


Abbildung 2.1: Flussdiagramm des Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien

Die Abbildung 2.2 visualisiert die extrahierten Strukturlinien anhand eines ausgewählten Beispiels.



**Abbildung 2.2:** Befliegung „Außenweser 2004“ – extrahierte Formlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt.

### 2.1.2 Klassifizierung von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

Laserscannerbefliegungen im Wattbereich werden im Allgemeinen bei Tideniedrigwasser ausgeführt, damit möglichst das gesamte Untersuchungsgebiet trocken gefallen ist. Jedoch verbleiben in Prielen sowie Senken oft Wasserflächen. Da der Laserscanner nicht in der Lage ist, diese Flächen zu durchdringen, entsprechen die gemessenen Laserscannerpunkte im Wasserbereich der Wasseroberfläche. Diese Punkte gehören nicht zur gesuchten Geländeoberfläche und müssen somit klassifiziert und entfernt werden.

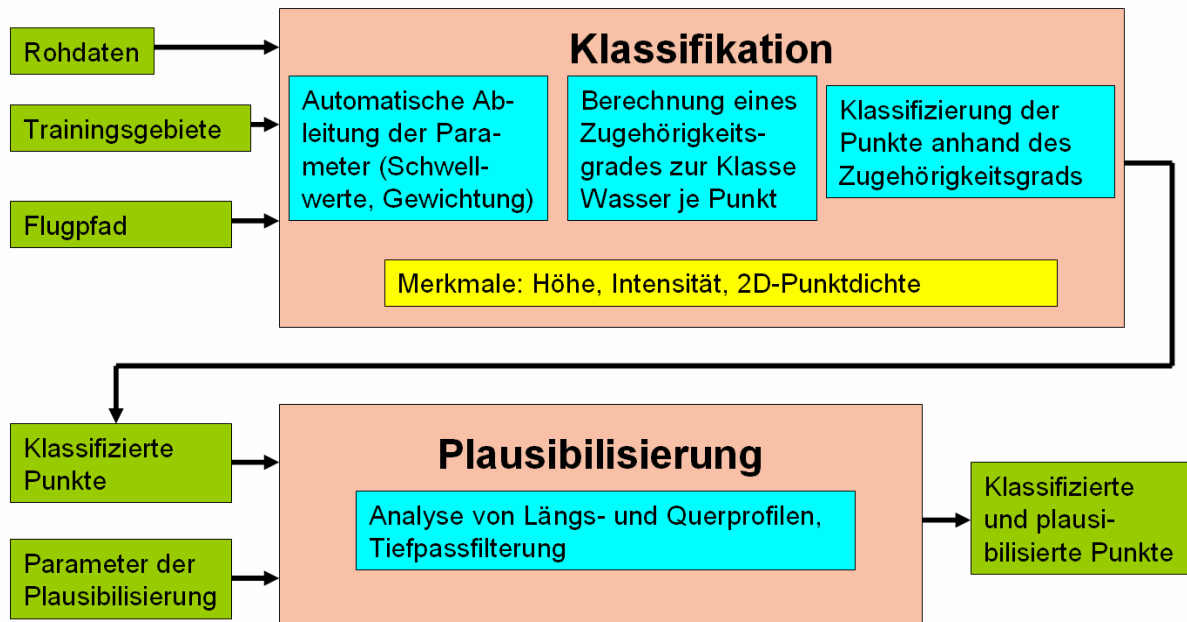
Der entwickelte Klassifikationsansatz (siehe Abbildung 2.3) basiert auf der Analyse der Merkmale Höhe  $\mathbf{H}$ , Intensität  $\mathbf{I}$  und 2D-Punktdichte  $\mathbf{P}$ , welche jeweils aus den Rohdaten direkt bzw. indirekt gewonnen werden können, mit Hilfe eines aus der Fuzzy-Control entlehnten Konzeptes<sup>1</sup>. Jeder Flugstreifen wird dabei getrennt klassifiziert, um Höhengsprünge innerhalb zusammenhängender Wasserflächen auszuschließen. Die Klassifikation erfolgt entsprechend der Aufnahme für jeden einzelnen Massenpunkt. Dazu wird für jeden Punkt  $\mathbf{x}$  der Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“  $\mu(\mathbf{H}_x, \mathbf{I}_x, \mathbf{P}_x, \beta_x)$  aus den Zugehörigkeitsgraden je Merkmal  $\mu_i$  sowie einem zugeordneten Gewicht  $\delta_i$ , welches die Trennbarkeit der beiden Klassen für dieses Merkmal ausdrückt, durch gewichtete Mittelbildung bestimmt (Gleichung 2.1). Im Anschluss wird jeder Punkt mit Hilfe eines Schwellwertes klassifiziert. Alle notwendigen Klassifikationsparameter werden automatisch aus Trainingsgebieten abgeleitet. Der Klassifizierung folgen mehrere zusätzliche Kontroll- und Verbesserungsschritte, die als Plausibilisierung zusammengefasst sind. Das Ziel ist eine innere Kontrolle des Ergebnisses, um Fehlklassifikationen zu lokalisieren und zu beseitigen.

$$\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x) = \frac{[\delta_H \mu_H(H_x) + \delta_I(\beta_x) \mu_I(I_x, \beta_x) + \delta_P(\beta_x) \mu_P(P_x, \beta_x)]}{[\delta_H + \delta_I(\beta_x) + \delta_P(\beta_x)]} \quad (2.1)$$

<sup>1</sup> Der Algorithmus ist eine Weiterentwicklung eines vorläufigen Ansatzes von Brzank und Heipke (2006).

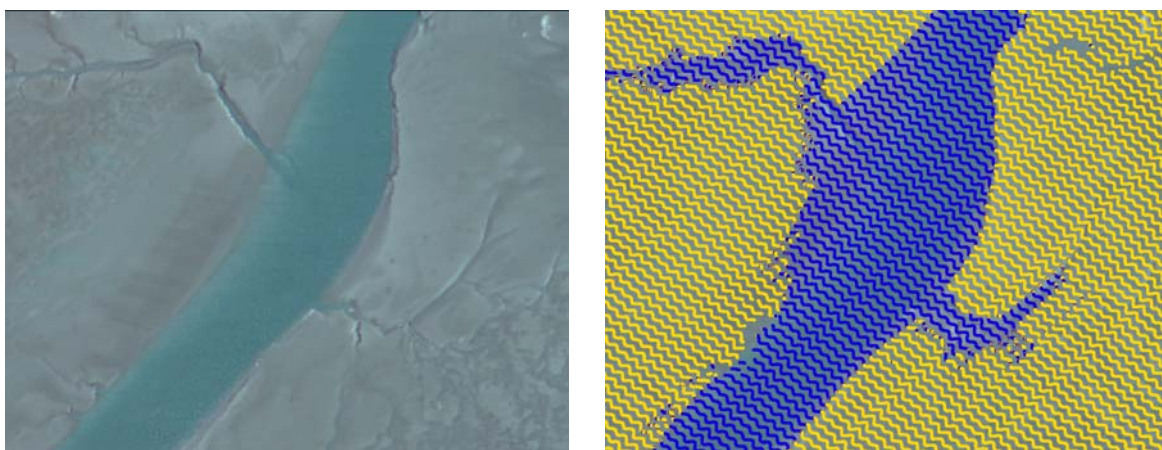
mit

$H_x, I_x, P_x, \beta_x$	Höhe, Intensität, 2D-Punktdichte und Inzidenzwinkel des Punktes $x$
$\delta_H, \delta_I(\beta_x), \delta_P(\beta_x)$	Gewicht der Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte des Punktes $x$
$\mu_H(H_x), \mu_I(I_x, \beta_x), \mu_P(P_x, \beta_x)$	Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ je Merkmal des Punktes $x$
$\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x)$	Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ des Punktes $x$



**Abbildung 2.3:** Flussdiagramm des Algorithmus zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

Die Abbildung 2.4 visualisiert das Klassifikationsergebnis eines ausgewählten Beispiels.



**Abbildung 2.4:** Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – Klassifizierung von Laserscannerdaten in Wasser- und Landpunkte

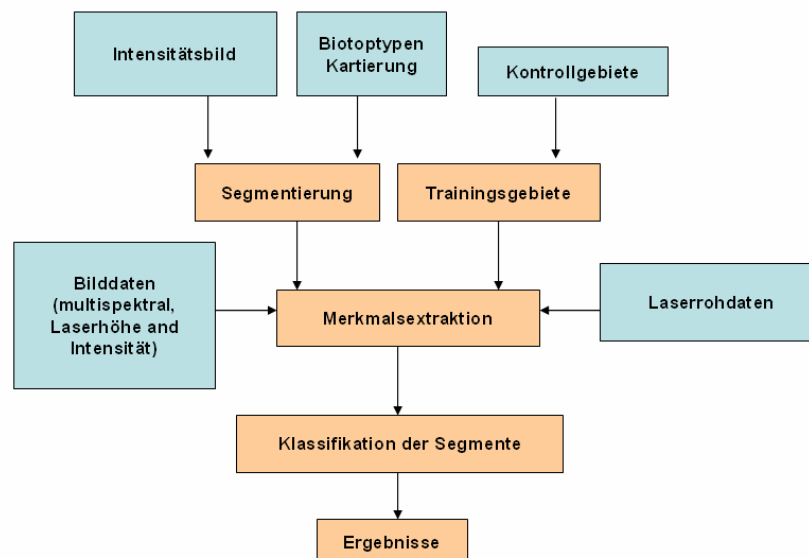
### **2.1.3 Klassifizierung von Vegetationsflächen bezüglich der Genauigkeit der Laserdaten**

Verschiedene küstentypische Vegetationsarten, die in ihrer Dichte und Höhe stark variieren, beeinflussen den vom Flugzeug ausgesandten Laserstrahl dergestalt, dass ein großer Teil der Strahlungsenergie vor der eigentlichen Erdoberfläche reflektiert wird. Abhängig vom Vegetationstyp ergeben sich somit gravierende Unterschiede in Bezug auf Reflexionsgrad und Durchdringungsrate des Laserpulses. Dies führt bei einigen Beständen, wie z.B. Kartoffelrose, zu einem Höhenoffset im aus Laserdaten erstellten Geländemodell. Für Praxis bezogene Arbeiten im Küsteningenieurwesen liegt der Schwerpunkt auf der Generierung von exakten Geländemodellen zum einen für Dünenflächen und zum anderen für die Übergangsbereiche zwischen Land und Wasser. Speziell die Überwachung der verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen erfordert sehr genaue Geländeinformationen und somit die Beseitigung oder zumindest eine Abschätzung der möglichen Fehler im DGM. Vegetationsbedingte Fehler können durch verschiedene Filteralgorithmen reduziert werden. Aufgrund der niedrigen Bodendichte und der geringen Höhenunterschiede zwischen Vegetationsoberfläche und Boden (Vegetation befindet sich oft in Dünentälern) ist die Filterung aber schwierig und es verbleiben Vegetationspunkte bei der DGM - Generierung. Der dadurch verursachte Höhenoffset wird für einzelne Vegetationsarten in diesem Teilprojekt untersucht.

Ausgehend von einem Vergleich bodengebundener Erhebungsdaten mit den Laserscannermessungen (laublose Periode) wurden zunächst Problembereiche bezüglich der Genauigkeit in den Datensätzen erkannt und dokumentiert. Dafür wurden zeitnah zu den planmäßigen Befliegungen terrestrische Kontrollmessungen und Untersuchungen der auftretenden Vegetationstypen durchgeführt. Die Auswertungen der Befliegungen wurden hauptsächlich 2005 und durch die Verzögerungen bei der Datenübergabe der Befliegungen von 2005 in den ersten Monaten des Jahres 2006 durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse findet sich im Statusbericht vom Mai 2006. Die sich aus dem Vergleich von Referenzmessungen und Laserdaten ergebenden Höhenabweichungen wurden in Abhängigkeit von Vegetationsart, -höhe und -dichte analysiert. Für alle Vegetationsarten liegt das Laser-DGM durchschnittlich höher als die terrestrischen Kontrollpunkte (Mittelwerte der Testgebiete: 8 – 24cm). Diese Aussage deckt sich auch mit den theoretischen Überlegungen, da der Laserpuls nicht alle Vegetationsschichten gleichermaßen durchdringt und somit vor der Erdoberfläche reflektiert wird oder zumindest ein Mischsignal die Messung verfälscht. Die Mittelwerte der Abweichungen für die Testgebiete mit gleicher Vegetationsart unterscheiden sich maximal um 5 cm. Somit scheint ein bestimmter Vegetationstyp einen klar definierten Einfluss auf die Laserscannermessung auszuüben. Bei detaillierteren Untersuchungen einer Vegetationsart ergaben sich aber starke Abhängigkeiten der Höhenabweichungen von Vegetationshöhe und Vegetationsdichte, die während der Kontrollmessungen mit erfasst wurden. Für eine automatische Klassifizierung der Vegetationsflächen in verschiedene Genauigkeitsbereiche wurden für diejenigen Vegetationsattribute, die einen Einfluss auf die Höhengenaugkeit haben, repräsentative Merkmale in den Laser- und Multispektraldaten bestimmt. Zu den Merkmalen, für die ein Zusammenhang zu den Höhenabweichungen nachgewiesen werden konnte, gehören unter anderen die mit den Laserpunkten gespeicherten Intensitätswerte, die Variationen der Laserhöhen in einer lokalen Umgebung sowie die Verteilung von Mehrfachechos in höheren Vegetationsbereichen. Weniger ausgeprägt waren die Abhängigkeiten des Höhenoffsets zu Merkmalen, die nicht direkt mit den Laserdaten verknüpft sind, wie beispielsweise die Grauwerte der Multispektralkanäle. Im Laufe des Projektes wurden drei Algorithmen entwickelt, welche für die Laserdaten anhand der beschriebenen Merkmale in Abhängigkeit von der auftretenden Vegetation die



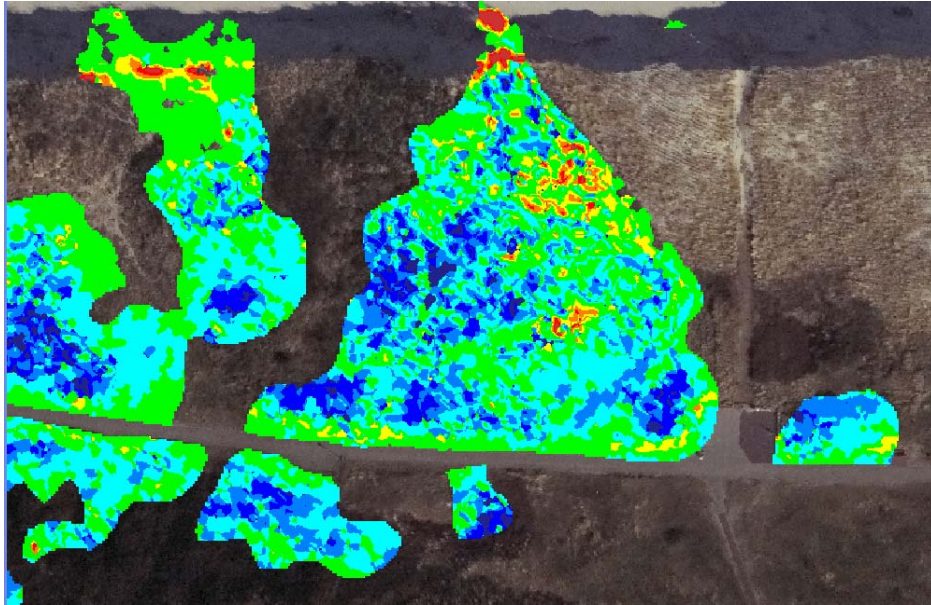
Höhenabweichungen schätzen. Die jeweiligen neuen Ansätze stützten sich dabei auf die Erkenntnisse ihrer Vorgänger, um deren vorhandene Nachteile zu kompensieren. Die erste Methode (Abbildung 2.5) basiert auf einer überwachten Klassifizierung der Laserscannerdaten in unterschiedliche Genauigkeitsbereiche. Dabei werden sowohl Merkmale aus Multispektral- als auch aus den originären Laserdaten extrahiert. Die Laserhöhen und Intensitätswerte werden in ein regelmäßiges Raster überführt und als zusätzliche Kanäle bei der multispektralen Klassifizierung verwendet. Zur Generierung von Trainingsgebieten wird ein Differenzmodell zwischen den terrestrisch ermittelten Kontrollhöhen und den Laserhöhen berechnet. Das in ein 8bit-Grauwertbild umgewandelte Differenzmodell wird durch Schwellwerte in Regionen unterschiedlicher Genauigkeit unterteilt, die als Trainingsgebiete fungieren. Nach der Segmentierung des zu klassifizierenden Bereiches mittels einer Wasserscheidentransformation des Intensitätsbildes werden für die Trainingsgebiete und Segmente diejenigen Merkmale extrahiert, die für die Klassifizierung herangezogen werden sollen. Mit einem Minimum-Distanz-Klassifikator werden die Segmente anhand ihrer Merkmalsvektoren den unterschiedlichen Genauigkeitsklassen, die durch die Trainingsgebiete definiert wurden, zugeordnet.



**Abbildung 2.5:** Klassifizierungsablauf für Vegetationsflächen

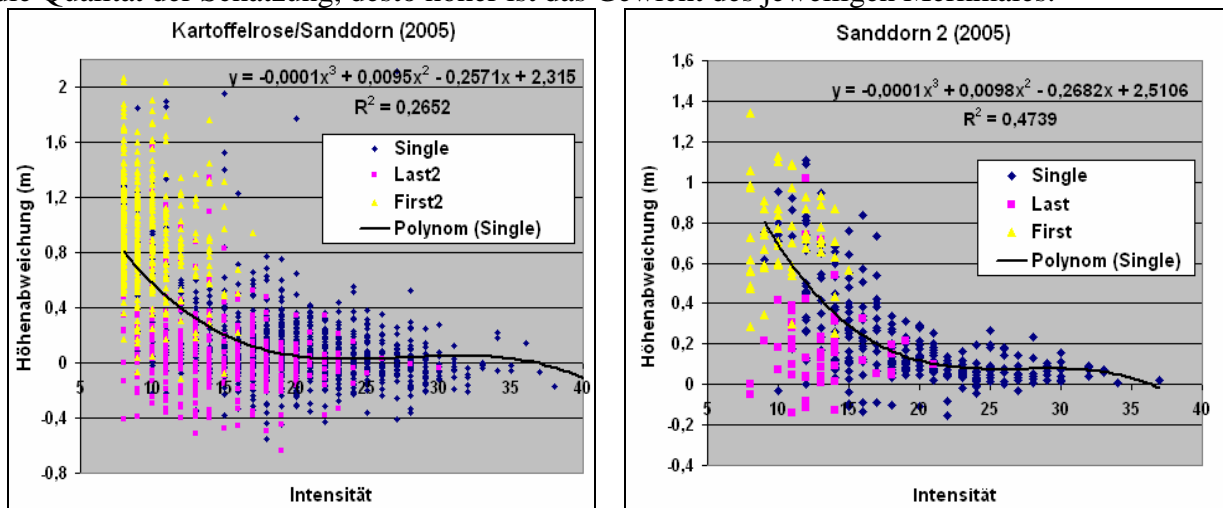
Da die Einflussgrößen sowie die Merkmale nur für die ungefilterten Daten repräsentativ sind, ist nach der Klassifizierung ein Übergang von der Genauigkeit des Oberflächenmodells (Last Echo) zur Genauigkeit des Digitalen Geländemodells notwendig. Dies kann erfolgen, indem die Differenzen zwischen DOM und DGM von den Grenzen der Genauigkeitsklassen subtrahiert werden. Abbildung 2.6 zeigt das Ergebnis einer Klassifizierung mit anschließender Reduktion auf das DGM für einen Bereich der Insel Langeoog.

Bei diesem ersten Ansatz traten hauptsächlich zwei Probleme auf, die als Motivation für eine neue Entwicklung dienten. Zum einen können die Echos der Laserpulse in allen Ebenen der Vegetation entstehen, so dass prinzipiell jede Höhenabweichung bezüglich der wahren Geländeoberfläche vorkommen kann, die sich innerhalb der Vegetationshöhe befindet. Damit funktionieren Klassifizierungsalgorithmen nur unzureichend, die auf einer Unterteilung des Merkmalsraumes in trennbare Cluster basieren, weil die Höhenabweichungen sowie die zugehörigen Merkmale für eine Vegetationsart einen eher kontinuierlichen Verlauf aufweisen. Somit entstehen fließende Übergänge zwischen den Genauigkeitsklassen und folglich eine schlechte Trennbarkeit. Deswegen wurde im zweiten Ansatz versucht, die Abhängigkeiten



**Abbildung 2.6:** Karte der präzidierten DGM-Genauigkeiten (Grün - DGM korrekt, Blautöne – DGM zu hoch, Gelb bis Rot – DGM zu niedrig) (Testgebiet Langeoog 2005)

zwischen den Höhenabweichungen der Laserdaten und den Merkmalen über kontinuierliche Funktionen zu modellieren (Abbildung 2.7). Dabei wird für jedes Merkmal eine Funktion geschätzt, welche die Verbindung zur Höhenabweichung der Laserpunkte in den Trainingsgebieten herstellt. Pro Merkmal kann über die zugehörige Funktion eine Höhenabweichung für diejenigen Laserpunkte, die nicht in den Kontrollflächen liegen, bestimmt werden. Über ein gewichtetes Mittel dieser einzelnen Abweichungen wird dann eine Schätzung für die Höhe des Laserpunktes über dem wahren Gelände ermittelt. Die Gewichte orientieren sich dabei an den Standardabweichungen der geschätzten Funktionen. Je besser die Qualität der Schätzung, desto höher ist das Gewicht des jeweiligen Merkmals.



**Abbildung 2.7:** Funktionen für die Verknüpfung von Höhenabweichung und Intensität für zwei Testgebiete unterschiedlicher Ausdehnung : links 217, rechts 1183 Single Echos

Der zweite Nachteil der ersten Methode lag darin, dass sich die Signifikanz der Merkmale aus den Laserdaten für die Klassifizierung aufgrund des Überganges auf ein regelmäßiges Raster durch Interpolationseffekte verringert. Im zweiten Ansatz werden die Merkmale daher entweder aus den unregelmäßig verteilten Laserpunkten einer definierten Nachbarschaft (bspw. Höhenkontrast) berechnet oder sind wie die Intensitätswerte direkt dem zu



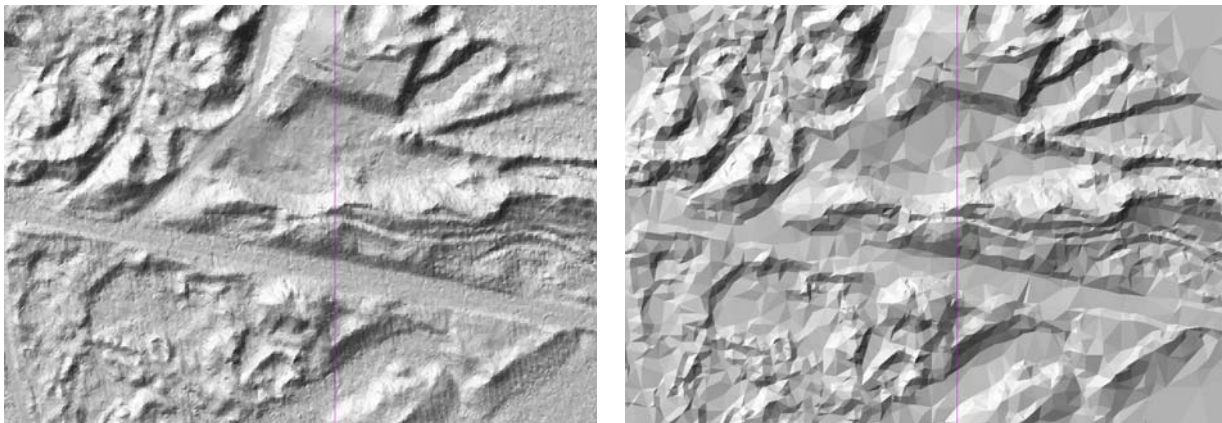
klassifizierenden Laserpunkt zugeordnet. Weiterer Vorteil des zweiten Algorithmus ist, dass die Höhenabweichungen für jeden einzelnen Laserpunkt ermittelt werden und nicht nur für bestimmte Regionen, die Segmente, eine Genauigkeitsaussage getroffen wird.

Aber auch die zweite Methode enthält einige Nachteile. So sind einerseits aufwendige großflächige Kontrollmessungen für die unterschiedlichen Vegetationsarten notwendig, um robuste Funktionen zu schätzen und somit die Übertragbarkeit in andere Regionen zu gewährleisten. Andererseits sinkt die Signifikanz der Merkmale mit größeren Trainingsgebieten, da sie stark von der Homogenität der Vegetation bezüglich Höhe und Dichte beeinflusst wird. Je inhomogener die Vegetation in den Trainingsgebieten, desto größer werden die Verbesserungen bezüglich der einzelnen geschätzten Funktionen, und die Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Höhenabweichungen können nicht mehr repräsentativ modelliert werden (Abbildung 2.7). Eine weitere Schwachstelle des zweiten Algorithmus liegt darin begründet, dass die Laserhöhen nur als ein gleichberechtigtes Merkmal neben den anderen in den Algorithmus einfließen. Wenn beispielsweise für die Intensitätswerte im Zuge der Funktionsmodellierung dominante Gewichte festgelegt werden, kann es zu dem unerwünschten Effekt kommen, dass die geschätzte Geländeoberfläche (Laserhöhen minus ermittelte Höhenabweichungen) sehr stark von den ursprünglichen Laserhöhen abweicht. In einem dritten Ansatz wird deswegen eine iterative Schätzung einer Fläche erster oder zweiter Ordnung in einem lokalen Fenster durchgeführt, für die nur die Laserhöhen als direkte Beobachtungen eingehen. Andere Merkmale, wie die Intensitätswerte oder die Echoverteilungen, werden nur für die Berechnung der Gewichte, mit denen die einzelnen Laserhöhen in der Ausgleichung berücksichtigt werden, verwendet. Grundlage dieses Ansatzes ist die Robuste Filterung nach Kraus und Pfeifer (1998). Das Prinzip beruht auf der Annahme, dass Echos, die oberhalb einer ersten geschätzten Oberfläche liegen, eher zur Vegetation und Echos, die sich unterhalb befinden, eher zum Boden gehören. Dementsprechend werden für die nächste Iteration die Gewichte der Laserpunkte aus den Verbesserungen der ersten Schätzung abgeleitet. In unserem Ansatz wird zusätzlich eine zweite Gewichtskomponente aus der Modellierung des Zusammenhangs zwischen Intensitätswerten bzw. Echoverteilungen und den Höhenabweichungen eingeführt, um die Flächenschätzung durch radiometrische Eigenschaften der Laserechos zu unterstützen. Aufgrund der oben beschriebenen Abhängigkeit der Signifikanz der Merkmale von der Homogenität der Vegetation wird diese Modellierung ebenfalls in einer repräsentativen Nachbarschaft des aktuellen Laserpunktes durchgeführt. Die Ergebnisse in den Trainingsgebieten für verschiedene Gebüschstrukturen (Kartoffelrose, Sanddorn, Kriechweide) zeigen, dass durch die Einführung zusätzlicher Merkmale in die iterative Flächenschätzung über die Gewichte eine Genauigkeitssteigerung erzielt werden konnte. Zu untersuchen wäre noch, ob diese Erkenntnisse auch für andere Vegetationsarten (Bäume) bezüglich Laserscannerbefliegungen innerhalb laubloser Befliegungszeiträume bestätigt werden können.

#### **2.1.4 Datenkompression und -reduktion**

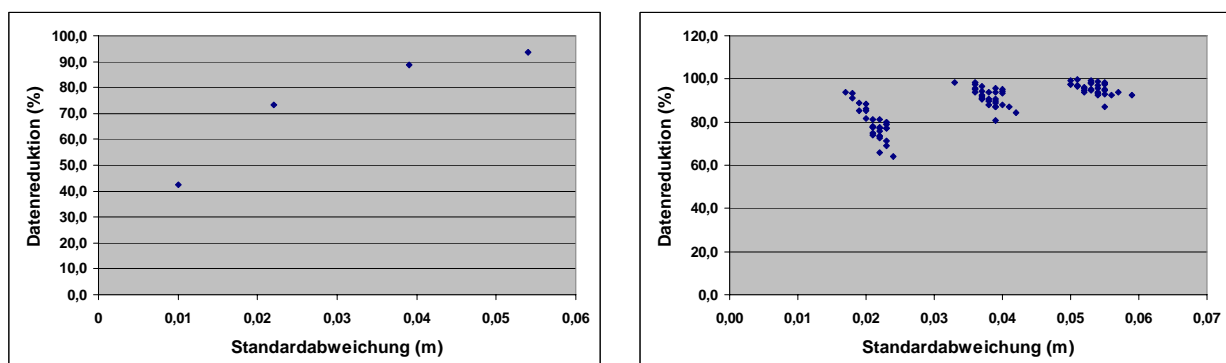
Mit der Methode des Airborne Laserscanning können für größere Gebiete flächendeckend Geländepunkte in geringen Abständen (typische Punktdichten: 3 Punkte/m<sup>2</sup>) aufgenommen werden. Dies führt sowohl für die Rohdaten als auch für die abgeleiteten 1m-Raster zu sehr großen Datenmengen, welche für die verschiedenen Anwendungen nur schwer zu nutzen sind. Deswegen wird in diesem Arbeitspaket untersucht, wie sich eine stufenweise Reduktion der Daten für verschiedene Geländetypen auf die Genauigkeit der Höheninformation auswirkt. Mit den Projektpartnern wurde vereinbart, für dieses Arbeitspaket die Möglichkeiten, welche die Software HyDAP der Bundesanstalt für Gewässerkunde bereitstellt, zu nutzen. Neben

Funktionen der Datenvisualisierung und Überprüfung der Rohdaten, wie beispielsweise der Kontrolle der bei der Befliegung realisierten Punktdichte und verschiedenen Möglichkeiten zur Aufdeckung grober Fehler stellt die Software Algorithmen zur Filterung der Daten sowie zur Datenreduktion und Geländemodellierung zur Verfügung. Zum einen kann mittels verschiedener modellbildender Funktionen aus den Rohdaten ein regelmäßiges Raster erzeugt werden und anhand verschiedener Rasterweiten die Datenreduktion beeinflusst werden. Diese Methode berücksichtigt aber die verschiedenen Geländerauhigkeiten nicht. Besser geeignet für die Datenreduktion erscheint ein TIN (Abbildung 2.8). Dabei werden ausgehend von einem das betreffende Gebiet umschließenden Dreieck dem Netzwerk Punkte hinzugefügt, die am weitesten oberhalb oder unterhalb der Dreiecksfläche liegen. Dieser Vorgang wird solange fortgeführt, bis alle noch nicht verwendeten Punkte nicht mehr als einen festzulegenden Schwellwert von der zugehörigen Dreiecksfläche abweichen. Es wurden Tests mit verschiedenen Schwellwerten und unterschiedlichen Datenblöcken durchgeführt. Abbildung 2.8 zeigt einen Ausschnitt einer Szene mit einer Datenreduktionsrate von 42,5 % (Schwellwert 2cm) und 93,6 % (15cm).



**Abbildung 2.8:** Datenreduktion mit der Software HyDAP: linkes Bild - max. Abstand zum ursprünglichen Raster 2cm, rechtes Bild - 15cm

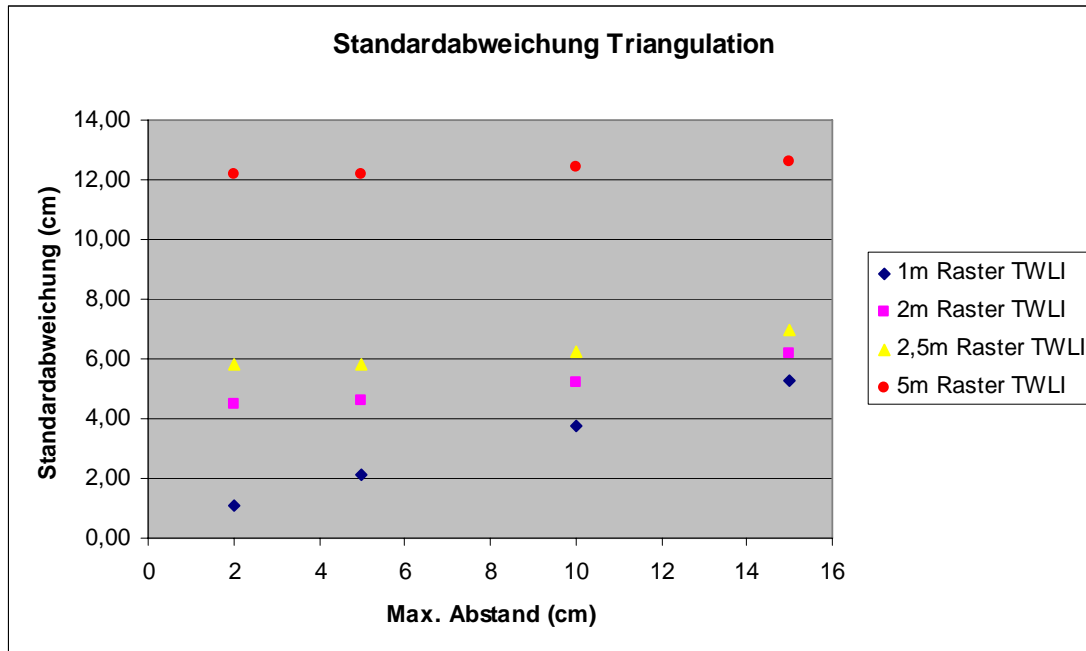
In Abbildung 2.9 ist die Datenreduktionsrate der Standardabweichung bezüglich des ursprünglichen Rasters für verschiedene Datensätze gegenübergestellt. Schon bei relativ geringen erlaubten Höhenunterschieden zum Ausgangsdatsatz, beispielsweise 5cm, ergeben sich je nach Geländerauhigkeit Reduktionsraten von 64 bis 93 %.



**Abbildung 2.9:** Datenreduktion bei unterschiedlichen Genauigkeiten (Links: Schwellwerte 2, 5, 10, 15 cm, Rechts: 5, 10, 15 cm für verschiedene 1 km Quadrate)

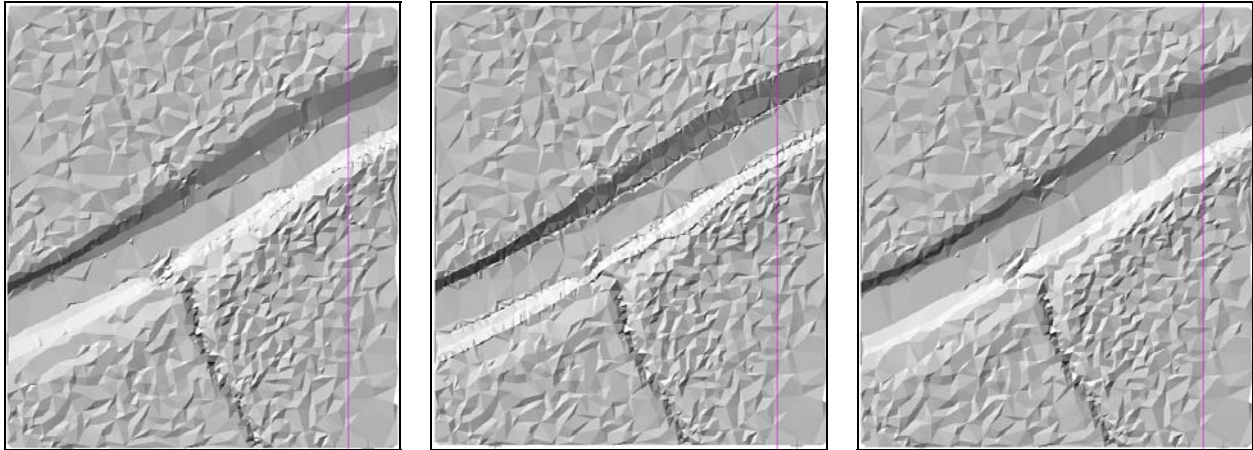
Für Abbildung 2.10 wurde ein Datensatz (1m Raster) mit HyDAP unter verschiedenen Genauigkeitsvorgaben ausgedünnt und anschließend erneut ein Raster mit unterschiedlichem Punktabstand erstellt. Deutlich zu sehen ist, dass bei sehr großen Rasterweiten (5m) die

Genauigkeitsvorgaben bei der Datenreduktion kaum noch Auswirkungen auf die Qualität des DGM haben, da sie von den Interpolationseffekten überstrahlt werden, während für kleinere Rasterweiten eine starke Abhängigkeit zu beobachten ist. Dementsprechend ist bei der vorzugebenden Genauigkeit für die Datenreduktion immer die letztendliche Zielstellung für Laserdaten zu berücksichtigen.



**Abbildung 2.10:** Genauigkeit nach Datenreduktion mit unterschiedlichen Genauigkeitsvorgaben (Schwellwerte 2, 5, 10, 15 cm) und anschließender Erstellung eines Rasters mit unterschiedlichem Punktabstand (1m, 2m, 2,5m, 5m)

Ein interessanter Punkt bei der Datenreduktion ist die Einbindung von markanten Geländeformen. Während der Untersuchungen zeigte sich, dass der in HyDAP realisierte Algorithmus durch die schrittweise Integration derjenigen Punkte, die den größten Abstand zur vorangegangenen Flächenapproximation besitzen, die markanten Geländestrukturen relativ gut erhält. In dem Beispiel in Abbildung 2.11 wurde eine Datenreduktion mit HyDAP durchgeführt. Beim Einfügen von Formlinien- (Abb. 2.11 links) und Bruchkantenpunkten (Mitte), die aus dem Verfahren in Kapitel 1.1 stammen, werden generell mehr Punkte benötigt, um die Fläche mit der vorgegebenen Genauigkeit zu approximieren. Die Speicherung dieser expliziten Strukturlinieninformation ist allerdings wichtig, wenn nur regelmäßige Raster der Daten mit größerem Maschenabstand (bessere Kompression möglich als beim TIN) aufgehoben werden sollen, da sich die größten Fehler des Rasters bezüglich des ursprünglichen Datensatzes an den markanten Geländeformen befinden.



**Abbildung 2.11:** Einbindung von Geländeformen in die TIN-Struktur: links: mit Formlinien, Mitte: mit Bruchkanten, rechts: ohne

### 2.1.5 Erstellung prototypischer Software

Im Rahmen des Projektes sollen die geforderten Methoden und Algorithmen nicht nur entwickelt und hinreichend beschrieben werden, sondern auch in prototypische Software (AP 300 in Verbindung mit AP 600) umgesetzt werden. Auf diese Weise soll es den Projektpartnern ermöglicht werden, die Verfahren praktisch einzusetzen und einen messbaren Nutzwert daraus zu ziehen.

Generell erfolgt die Erstellung der Software innerhalb der Entwicklungsumgebung Visual Studio.Net 2003. Die verwendete Programmiersprache ist C++. Die einzelnen Teilaufgaben werden jeweils getrennt in einer eigenständigen Software bearbeitet. Hintergrund ist, dass die Problemstellungen zwar generell alle mit Ziel der Genauigkeitssteigerung des DGM verknüpft sind, im speziellen aber sehr unterschiedlich gelagert sind. So erscheint eine Verknüpfung aller Werkzeuge innerhalb einer prototypischen Software nicht sinnvoll und wurde deshalb verworfen.

#### **ExStruct**

Die Software „ExStruct“ enthält als Kernelement den Algorithmus zur Ableitung von Strukturlinien aus Laserscannerdaten. Dem Anwender steht zur besseren Anschauung ein graphisches Interaktionsfenster zur Verfügung, in dem die Zwischen- und Endergebnisse visualisiert werden (siehe Abbildung 2.12). Innerhalb des linear aufgebauten Workflows können die Strukturlinien extrahiert werden. Zusätzlich zur Software wurde eine umfassende Anleitung mit ausführlicher Beschreibung des Algorithmus sowie der Bedienung des Programms (86 Seiten) erstellt, die den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurde.

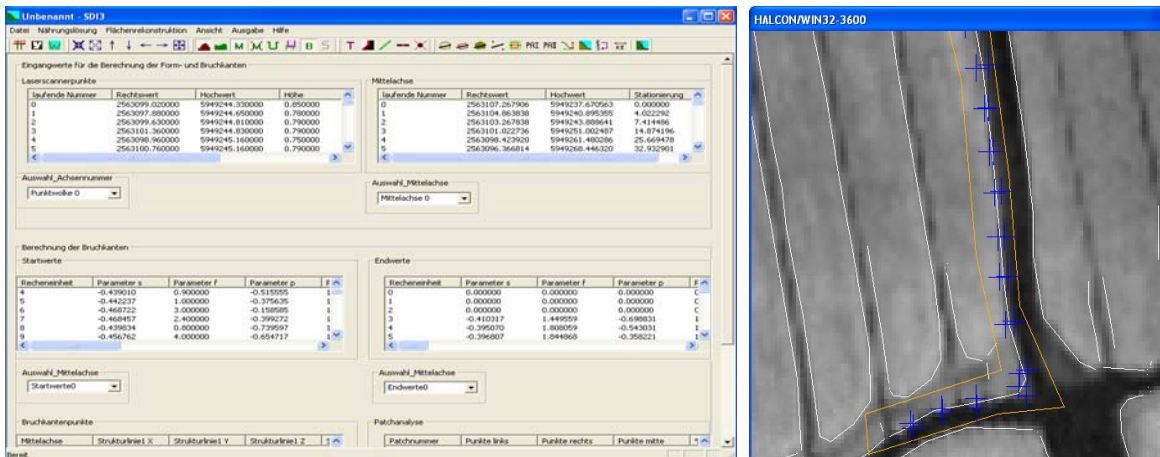


Abbildung 2.12: erstellte Softwarelösung „ExStruct“

### ClaWa

Bei der Entwicklung der Software „ClaWa“ (siehe Abbildung 2.13) wurde darauf geachtet, dass möglichst viele Elemente der Software „ExStruct“ verwendet werden. Dies hat zwei entscheidende Vorteile. Zum einen fällt dem Nutzer die Bedienung der Software leichter, da bekannte Symbole und Elemente enthalten sind. Zum anderen beschleunigte der Transfer von Modulen die Entwicklung der Software. Wiederum wurde eine ausführliche Anleitung (79 Seiten) erstellt, die dem Anwender einen umfassenden Einblick in Prinzip und Anwendung eröffnet.

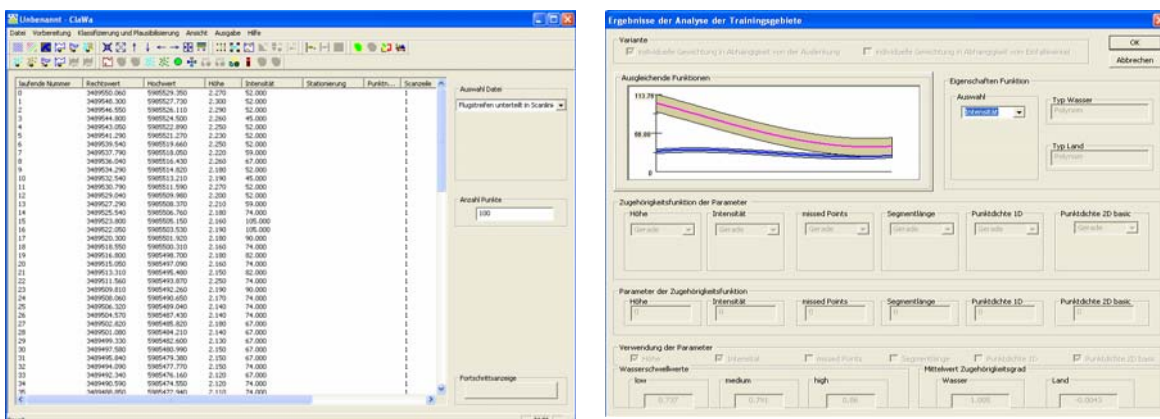


Abbildung 2.13: erstellte Softwarelösung „ClaWa“

### ElVeg

Die drei entwickelten Varianten zur Bearbeitung von Laserscannerdaten in Vegetationsbereichen sind im Programm „ElVeg“ (Abbildung 2.14) implementiert. Es bietet die Möglichkeit, auf Rasterbasis anhand von Trainingsgebieten und extrahierten Merkmalen in Abhängigkeit von der auftretenden Vegetation eine Qualitätskarte zu erstellen, die Laserrohdaten mittels Funktionen, welche die Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Höhenfehler modellieren, zu klassifizieren oder eine Filterung unter Berücksichtigung von Intensität und Echoverteilung durchzuführen. Eine ausführliche Anleitung (57 Seiten) existiert für den rasterbasierten Teil der Software.



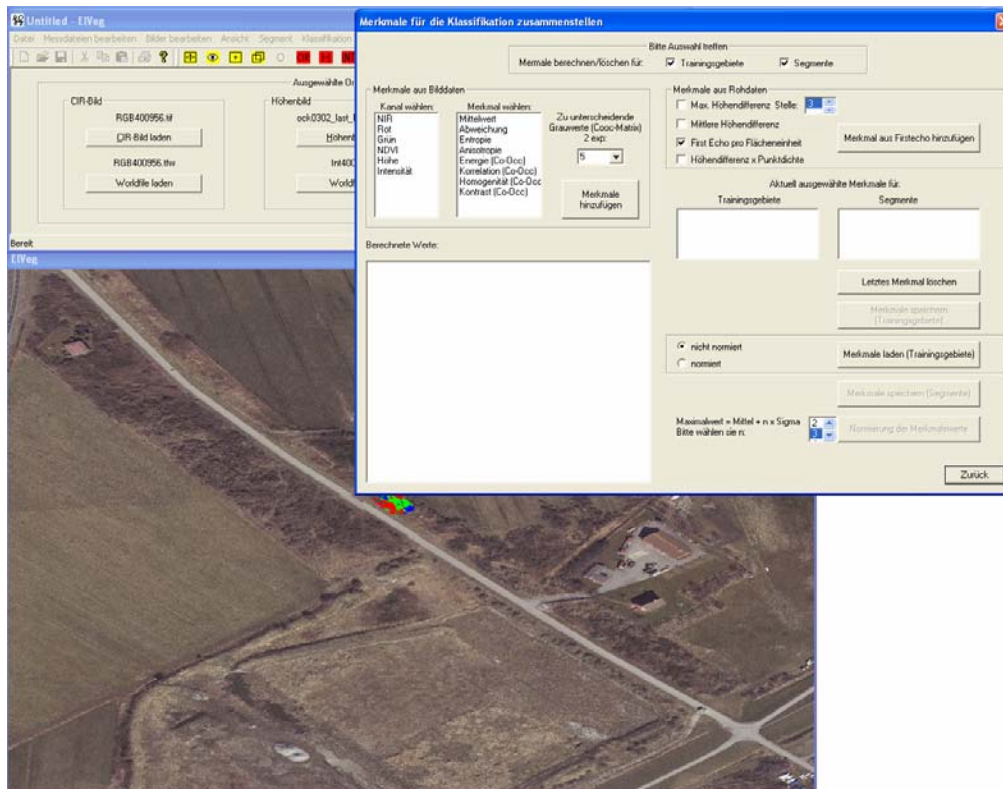


Abbildung 2.14: erstellte Softwarelösung „ElVeg“

## 2.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erstellten Algorithmen mündeten in mehrere Softwarewerkzeuge, die den Partnerämtern zur Verfügung stehen. Sie sollen im Rahmen der DGM-Erstellung in den praktischen Einsatz kommen. Diesbezüglich wurden durch das NLWK Norden sowie das WSA parallel zur Entwicklung der Software praktische Tests durchgeführt. Die Ergebnisse flossen in die Fehlerbehebung und Verbesserung der Software ein. Aktuell führt das WSA Bremerhaven im Zusammenhang mit der FH Oldenburg darüber hinaus eine Diplomarbeit durch, welche die Einsatzmöglichkeit der Software „Clawa“ im operativen Geschäft evaluieren soll.

Ferner zeigen Firmen, die im Bereich DGM-Modellierung aus Laserscannerdaten tätig sind, Interesse an den Forschungsergebnissen sowie den Softwarewerkzeugen. Diesbezüglich wird in naher Zukunft ein erstes Treffen am IPI stattfinden, welches Möglichkeiten zur Kooperation und Weiterentwicklung ausloten wird.

## 2.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während die DGM-Erstellung ein wichtiger Forschungsbereich der Laserscan-Community darstellt, sind die Problemstellungen im Wattbereich sehr speziell und örtlich begrenzt, sodass im direkten Vorhabensbereich keine weiteren zusätzlichen Forschungsvorhaben durch andere Institutionen durchgeführt wurden. Dennoch sind Fortschritte in für die Untersuchung relevanten Bereichen erzielt worden, die im Rahmen der Entwicklungen – sofern möglich – eingeflochten wurden.

### 2.3.1 Full-Waveform

Die Laserscanner der neuen Generation sind in der Lage, das gesamte rückgestreute Signal zu erfassen und zu digitalisieren. Dies eröffnet neue Dimensionen in der Klassifikation und Detektion der Rückstreuer. Bisher extrahierten die auf dem Markt tätigen Firmen selbstständig aus dem jeweiligen Signal den oder die Rückstreuer mit verschiedenen, dem Nutzer in der Regel unbekanntem Prinzipien, wodurch der Informationsgehalt stark herabgesetzt wurde.

Leider konnten innerhalb des Projektes trotz intensiver Bemühungen durch das IPI keine Full-Waveform-Daten erhoben werden, sodass die extrahierten Algorithmen auf dem bisherigen Output – die Punktwolke – aufsetzen.

### 2.3.2 Verwendung der Intensität

Während Airborne Laserscannerdaten in der Praxis bisher vorrangig für die Bestimmung der Geländeoberfläche eingesetzt wurden, verstärken sich die Bestrebungen innerhalb der Forschung, auch eine Klassifikation der illuminierten Oberfläche vorzunehmen. Die Intensität, welche der Stärke des rückgestreuten Signals entspricht, wird dafür häufig verwendet.

Die relevanten wissenschaftlichen Publikationen über die Intensität sowie Klassifikationsmethoden mit Berücksichtigung der Intensität sind bei der Erstellung der Algorithmen berücksichtigt worden.

## 2.4 Geplante und erfolgte Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Rahmen des Projektes wurden im Zeitraum Januar 2004 bis Juli 2008 zehn Publikationen veröffentlicht. Mit Ausnahme des Zeitschriftenartikels wurde das eingereichte Paper entweder in einer Postersession oder durch einen Fachvortrag präsentiert. Die Veröffentlichungen sind auf der Homepage des IPI unter folgender Adresse abrufbar: <http://www.ipi.uni-hannover.de/>.

### Zeitschriftenartikel

**Brzank, A.; Heipke, C.; Göpfert, J.; Sörgel, U.:** Aspects of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar–water classification and structure line extraction. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (2008), doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.02.002.

### Begutachtete Tagungsbeiträge

**Göpfert, J.; Sörgel, U.:** Estimation of the Lidar Height Offset in Coastal Vegetated Areas: IntArchPhRS XXXVI. Band 3/W52. Espoo, 2007, S. 156-161.

**Brzank, A.; Heipke, C.:** Supervised classification of water regions from lidar data in the Wadden Sea using a fuzzy logic concept: IntArchPhRS XXXVI. Band 3/W52. Espoo, 2007, S. 90-95.

**Göpfert, J.; Heipke, C.:** Assessment of Lidar DTM accuracy in coastal vegetated areas: IntArchPhRS. Band XXXVI/3. Bonn, 2006, S. 79-85.

**Brzank, A.; Heipke, C.:** Classification of Lidar Data into water and land points in coastal areas: IntArchPhRS. Band XXXVI/3. Bonn, 2006, S. 197-202.

**Brzank, A.; Lohmann, P.; Heipke, C.:** Automated extraction of pair wise structure lines using airborne laserscanner data in coastal areas: IntArchPhRS. Band XXXVI, 3/W19. Enschede, 2005, S. 36-41.

### **Weitere Tagungsbeiträge**

**Göpfert, J.; Sörgel, U.; Heipke, C.; Brzank, A.:** An approach for filtering lidar data in coastal vegetated areas using intensity information and multiple echos: Band XXXVII 3/W3. Peking, 2008, 7S., CD.

**Brzank, A.; Göpfert, J.; Heipke, C.:** Morphologic change detection in the Wadden Sea from lidar data: InArchPhRS. Band XXXVII 8/W6. Peking, 2008, 6S., CD.

**Brzank, A.; Göpfert, J.; Lohmann, P.:** Aspects of Lidar Processing in Coastal Areas: InArchPhRS. Band XXXVI 1/W3. Hannover, 2005, 6S., CD.

**Brzank, A.; Lohmann, P.:** Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen im Küstenbereich aus Laserscannermessungen. In: Eckhard Seyfert (Hrsg.): Publikationen der DGPF. Band 13. Halle, 2004, S. 203-210.

Zusätzlich wurden im Jahr 2008 zwei extended Abstracts in der Zeitschrift „KFKI aktuell“ veröffentlicht. Darüber hinaus ist eine weitere ausführliche Präsentation der Ziele und Ergebnisse des Projektes in Form eines Zeitschriftenartikels in „Die Küste“ geplant.

Weiterhin wurden die Arbeiten, Ziele und Ergebnisse durch Fachvorträge national und international vorgestellt. Dazu zählen insbesondere folgende Veranstaltungen (siehe Tabelle 2.1):



<b>Veranstaltung</b>	<b>Datum</b>	<b>Thema</b>
Arbeitskreistreffen Fernerkundung Küste 2008	15.04.2008	Erstellung von Digitalen Geländemodellen im Wattenmeer aus Laserscannerdaten
KFKI-Seminar 2007	10.10.2007	Nachweis morphologischer Veränderungen im Wattenmeer anhand von Laserscannermessungen
KFKI-Seminar 2007	10.10.2007	Airborne Laserscanning in küstennahen Vegetationsgebieten – Fehlerabschätzung und Klassifizierungsansätze
Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein	06.12.2006	Ableitung hochgenauer Digitaler Geländemodelle im Watt- und Küstenbereich aus Airborne Laserscannermessungen
LIDAR WORKSHOP - Laser Scanner for Aerial and Terrestrial Applications	06.11.2006	Laser Scanning for Accurate DTM Generation in Coastal Areas
KFKI-Seminar 2006	01.11.2006	Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laserscannermessungen im Watt- und Küstenbereich
Landesvermessungsamt Niedersachsen	05.12.2005	Projekt „KFKI Laserscan“

**Tabelle 2.1:** Fachvorträge im Rahmen des Projektes

# 3 Anlagen

## 3.1 Erfolgskontrollbericht

### 3.1.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Mit Hilfe der entwickelten Methoden und der zugehörigen Software wird die Berechnung hochgenauer Digitaler Geländemodelle (DGM) aus Airborne Laserscannerdaten sowie deren Evaluation ermöglicht. Somit liefert das Projekt „Laserscan“ einen bedeutenden Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des KFKI – „Forschungskonzept für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen 2001“ Abschnitt 3.2. Dort werden die Algorithmengewinnung für neuartige Fernerkundungsmethoden sowie die Bedeutung Digitaler Geländemodelle als Basisinformation herausgestellt. Ferner leisten die Ergebnisse und Erkenntnisse einen wertvollen Beitrag zu den Programmen und Konzepten des BMBF bzgl. des Küsteningenieurwesens und der Meeresüberwachungstechnik - „Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert“ Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2.

### 3.1.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Im Rahmen des Projektes wurde jeweils ein neuartiges Verfahren für drei Aspekte bei der Erstellung und Evaluierung von Digitalen Geländemodellen (DGM) aus Airborne Laserscannerdaten im Wattenmeer entwickelt. Diese sind: Klassifikation von Wasserflächen, Strukturlinienextraktion, Evaluierung der Genauigkeit in Abhängigkeit von der auftretenden Vegetation. Für jeden Algorithmus wurde eine eigenständige Software mit Windowsmenüführung erstellt.

Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung befindet sich in Kapitel 2.1 des Schlussberichtes.

### 3.1.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Durch die Einbindung der Algorithmen in leistungsstarke und anwenderfreundliche Software können die beteiligten Landes- und Bundesbehörden im Wattenmeer und den angrenzenden Küstenbereichen hochgenaue Digitale Geländemodelle aus Laserscannerdaten ableiten sowie deren Genauigkeit evaluieren.

Die Algorithmen lassen sich jedoch darüber hinaus auch für weitere Fragestellungen innerhalb des Küstenschutzes einsetzen. So können mit Hilfe der Strukturlinienextraktion morphologische Veränderungen im Wattenmeer nachgewiesen werden. Ferner besteht die Möglichkeit, die Erkenntnisse aus der Evaluation des DGM in Abhängigkeit vom Bewuchs mit der Klassifikation der Wasserflächen zu kombinieren, um ein neues, innovatives Verfahren zur Filterung von Laserscannerdaten zu entwickeln.

### 3.1.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Für alle relevanten Fragestellungen konnten Lösungskonzepte entwickelt werden.

### 3.1.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Algorithmen und Ergebnisse eignen sich für vielseitige Präsentationszwecke. So werden auf der Intergeo 2008 die Resultate am Stand der Wasser- und Schifffahrtsdirektion vorgestellt. Darüber hinaus finden die Ergebnisse

Verwendung bei nationalen und internationalen Präsentationen des IPI sowie bei aktuellen und zukünftigen Forschungsanträgen.

### **3.1.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Aufgrund zeitlicher Verzögerung der Datenlieferung (Laserscannerdaten sowie zugehörige Orthophotos) um zum Teil mehr als 6 Monate durch die beauftragten Firmen war die Zeitplanung, welche eine aktive Bearbeitung im Zeitraum von Januar 2005 bis März 2007 vorsah, nicht mehr einzuhalten. Deshalb wurde im Jahr 08.06.2006 eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes auf Ende 2007 beantragt, welche mit dem Änderungsbescheid vom 10.08.2006 bestätigt wurde.

Die Ausgabenplanung verlief im Einklang mit dem aufgestellten und bewilligten Kostenplan gemäß Änderungsbescheid vom 10.08.2006.

## 3.2 Kurzfassung (Berichtsblatt)

### Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>	
3. Titel <b>Abschlussbericht – Förderkennzeichen 03KIS050</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <b>Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke</b> <b>Dr.-Ing. Peter Lohmann</b> <b>Dipl.-Ing. Alexander Brzank</b> <b>Dipl.-Ing. Jens Göpfert</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>Dezember 2007</b>	6. Veröffentlichungsdatum <b>Juni 2008</b>
	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover</b>	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)</b>  <b>53170 Bonn</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	10. Förderkennzeichen *) <b>03KIS050</b>
	11. Seitenzahl <b>28</b>	
	12. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Das Projekt „Laserscan“ hat das Ziel, spezielle Aspekte bei der Erstellung von Digitalen Geländemodellen (DGM) aus Airborne Laserscannerdaten im Wattenmeer zu untersuchen und geeignete Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, um die Genauigkeit zu steigern. Die Untersuchung umfasst sowohl die Wattflächen als auch die küstennahen Bereiche und die Inseln. Im Ergebnis konnten neuartige Algorithmen für die Teilbereiche Klassifikation von Wasserflächen, Strukturlinienextraktion und Evaluierung der Genauigkeit in Abhängigkeit von der auftretenden Vegetation entwickelt werden. Für jeden Ansatz wurde eine prototypische Software erstellt. Diese Werkzeuge können bei der DGM-Modellierung, Evaluierung der DGM-Güte sowie für die Detektion von geomorphologischen Veränderungen eingesetzt werden und führen zu einer signifikanten Steigerung der Genauigkeit.		
19. Schlagwörter <b>Airborne Laserscanning, Lidar, DGM, Wattenmeer</b>		
20. Verlag	21. Preis	

