

Alexander Brzank

**Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten
aus Laserscannerdaten**

München 2008

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5031-0

**Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 274, Hannover 2008**



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 622

Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten aus Laserscannerdaten

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Alexander Brzank
geboren am 27.02.1977 in Stralsund

München 2008

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5031-0

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 274, Hannover 2008

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München
Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 -1283 / - 1100
e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller
Korreferenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Pfeifer
Dr.-Ing. Claus Brenner

Tag der mündlichen Prüfung: 20.06.2008

© 2008 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5031-0

Zusammenfassung

Hochgenaue Digitale Geländemodelle (DGM) der Watten stellen eine essentielle Datenquelle für eine Fülle von Aufgaben und Anwendungen im Rahmen des Küstenschutzes sowie der Meeresforschung dar. Traditionell gestaltete sich jedoch die Erhebung der Messdaten insbesondere für die Erstellung großflächiger Modelle aufgrund der periodischen Überflutung schwierig. Deshalb mussten bei der Erzeugung eines DGM im Allgemeinen Einschränkungen hinsichtlich Genauigkeit und Aktualität in Kauf genommen werden. Mit Hilfe des luftgestützten Laserscannings ist man in der Lage, die Wattoberfläche großräumig, hochgenau und innerhalb eines kurzen Zeitfensters zu erfassen. Im Folgenden kann auf der Grundlage dieser Messungen ein präzises DGM generiert werden, sofern die spezifischen Beschränkungen des Messverfahrens innerhalb des Untersuchungsgebietes berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit wird ein neuer Arbeitsablauf zur Erstellung eines DGM in den Watten aus Airborne Laserscannerdaten entworfen. Für zwei entscheidende Schritte, namentlich die Klassifikation von Wasserpunkten und die Strukturlinienextraktion, wird darüber hinaus jeweils ein Algorithmus entwickelt und getestet.

Die Klassifikation von Wasserpunkten ist ein zentraler Schritt in der Berechnung des DGM. Sie ist notwendig, da die Laserpunktwolke im Regelfall sowohl Wasser- als auch Wattpunkte umfasst. Alle Klassifikationsparameter werden aus Trainingsgebieten automatisch abgeleitet. Die entwickelte überwachte Methode basiert auf der Fuzzy-Logik und wird für jeden Flugstreifen separat durchgeführt. Für jeden Punkt wird ein Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ berechnet und anschließend anhand eines Schwellwertes entweder als Wasser- oder Wattpunkt klassifiziert. Die verwendeten Merkmale sind Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte. Anhand eines individuellen Gewichtes wird die Trennbarkeit beider Klassen bezüglich des spezifischen Merkmals ausgedrückt. Die Abhängigkeit der Ausprägung der Intensität und der 2D-Punktdichte vom Inzidenzwinkel des Laserstrahls wird aus den Trainingsdaten geschätzt und in der Gewichtung berücksichtigt. Nachfolgend werden die klassifizierten Punkte anhand mehrerer Schritte aufgrund definierter Regeln kontrolliert und eine Tiefpassfilterung durchgeführt.

Die Strukturlinienextraktion ist ein weiterer entscheidender Schritt im Hinblick auf die Erstellung eines hochgenauen DGM. Durch die Ableitung von markanten Linien der Wattoberfläche aus der unregelmäßigen Punktwolke können diese nachfolgend zusammen mit den Punkten bei der Modellierung des DGM verwendet werden, wodurch insbesondere im Bereich der Strukturlinien die Genauigkeit erhöht wird. Der vorgestellte Ansatz basiert auf der stückweisen Rekonstruktion der Geländeoberfläche im Bereich von paarweise auftretenden Strukturlinien mit der Tangens hyperbolicus Funktion. Dabei können durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Realisierungen sowohl geradlinige als auch gekrümmte Bereiche approximiert werden. Aus den innerhalb einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzten Parametern wird nachfolgend für jede Recheneinheit je ein Punkt jeder Strukturlinie extrahiert. Anschließend werden korrespondierende Punkte einer Strukturlinie mit Hilfe einer Besselsplineinterpolation verknüpft, wodurch nicht gelöste Recheneinheiten überbrückt werden und eine kontinuierliche Linie ermittelt wird.

Anhand von mehreren Beispielen werden die beiden Algorithmen ausgiebig getestet. Die Resultate der Evaluation zeigen, dass die vorgestellten Verfahren präzise und zuverlässige Ergebnisse liefern. Es wird festgestellt, dass die Vollständigkeit und Richtigkeit der Klassifikation von der Trennbarkeit beider Klassen anhand der Merkmale sowie der Größe der Übergangsbereiche abhängig ist. Die Güte der Extraktion der Strukturlinien hängt wiederum hauptsächlich von der Übereinstimmung des angesetzten Oberflächenmodells mit der Wirklichkeit ab.

Stichworte: Laserscanning, DGM, Klassifikation

Summary

High precise Digital Terrain Models (DTM) of the Wadden Sea are an essential data source for various tasks and applications in the field of coast protection and oceanography. However, the acquisition of height data used to be difficult in the past especially for the generation of extensive areas due to the cyclic flooding. Therefore, in regard to accuracy and timeliness limitations of the derived DTM had to be accepted. Nowadays, Light Detection and Ranging (Lidar) allows obtaining high accurate height data of the mudflat surface for large areas within a short time period. Based on the measurements a precise DTM can be determined as far as specific limitations of the method within the area of interest are considered.

A new workflow to generate a DTM in the Wadden Sea from Lidar is presented in this study. For each of the two major steps – namely classification of water points and the extraction of structure lines – an innovative algorithm is developed and evaluated.

The classification of water points is a key step of the generation of the DTM. It is necessary, because the Lidar point cloud includes water and mudflat points. All classification parameters are derived automatically from training areas. The developed supervised method is based on the fuzzy logic and is performed for every flight strip separately. An entire membership value of class “water” is calculated for each point, which is classified either as “water” or “mudflat” afterwards using a threshold. The applied features are height, intensity and 2D point density. The separability of both classes is expressed by an individual weight related to a specific feature. The dependency of the intensity and 2D point density with respect to the angle of incidence is estimated from the training data and considered within the weighting. Afterwards, the classified points are checked based on defined rules and a low pass filtering is performed.

The extraction of structure lines is another important step regarding the generation of a high precise DTM. The derived structure lines of the mudflat surface can be considered in the modelling of the DTM, which result in a higher accuracy especially in the vicinity of the structure lines. The proposed algorithm is based on the piecewise reconstruction of the mudflat surface in the area of a structure line pair with the hyperbolic tangent function. Straight as well as curved areas can be approximated due to two implemented different versions of this function. The parameters of the function are determined by a least squares adjustment for each patch. Subsequently, one point of each structure line is extracted from every approximated function. Afterwards, corresponding points of one structure line are linked by a Bessel spline interpolation, which allows bridging not successfully solved patches and result in a continuous line.

Both algorithms are extensively tested on the basis of several examples. The evaluations prove that the presented methods deliver precise and reliable results. It is shown that the correctness and completeness of the classification depends on the separability of both classes by the used features and the size of the transition zone between water and mudflat. The quality of the extraction is influenced by the conformity of the used surface model and the reality.

Keywords: Lidar, DTM, classification

Inhalt

1	Einleitung und Motivation.....	7
1.1	Ziele der Arbeit.....	8
1.2	Gliederung der Arbeit.....	9
2	Grundlagen	10
2.1	Airborne Laserscanning.....	10
2.1.1	Physikalische Grundlagen der Laserentfernungsmessung.....	10
2.1.1.1	Eigenschaften der Laserstrahlung.....	11
2.1.1.2	Radargleichung.....	11
2.1.1.3	Modellierung des Rückstreuquerschnitts.....	13
2.1.1.4	Intensität.....	15
2.1.2	Reflexions- und Absorptionsverhalten des Laserpulses in Wattgebieten.....	16
2.1.3	Bestandteile eines Airborne Laserscanner Systems.....	19
2.1.4	Ableitung Digitaler Geländemodelle aus Laserscannerdaten.....	19
2.1.4.1	Zusammenführung der Messdaten und Transformation in das Zielkoordinatensystem.....	19
2.1.4.2	Streifenanpassung.....	20
2.1.4.3	Filterung.....	21
2.1.4.4	Interpolation des Digitalen Geländemodells.....	21
2.2	Verfahren und Methoden der Wattvermessung.....	22
2.2.1	Terrestrische Vermessung.....	22
2.2.2	Photogrammetrie.....	22
2.2.3	Radar.....	22
2.2.4	Single und Multi Beam Echolotung.....	23
2.3	Vergleich der Methoden mit Airborne Laserscanning.....	24
2.3.1	Aufwand der Datenerhebung.....	24
2.3.2	Aufwand der Datenprozessierung.....	24
2.3.3	Genauigkeit der Stützpunkte.....	24
2.3.4	Dichte und Verteilung der Stützpunkte.....	25
2.3.5	Eignung des jeweiligen Verfahrens.....	25
2.4	Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Control.....	26
3	Stand der Forschung.....	28
3.1	Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten.....	28
3.1.1	Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten in Watt- und Küstengebieten.....	28
3.1.2	Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten in Flussgebieten.....	29
3.1.3	Evaluation der Ansätze zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten.....	30
3.2	Extraktion von Strukturlinien.....	32
3.2.1	Rasterbasierte Ansätze.....	32
3.2.2	Punktbasierte Ansätze.....	33
3.2.3	Evaluation der Ansätze zur Extraktion von Strukturlinien.....	36
4	Eine Methode zur Erzeugung konsistenter Digitaler Geländemodelle in Watten.....	39
4.1	Klassifikation von Wasserflächen.....	39
4.1.1	Klassifikationsmerkmale.....	40
4.1.2	Gewichtung der Merkmale.....	41

4.1.3	Korrektion der Intensität und 2D-Punktdichte.....	41
4.1.4	Arbeitsablauf des Algorithmus	42
4.1.5	Automatische Ableitung der Klassifikationsparameter aus den Trainingsgebieten.....	42
4.1.5.1	Vorbereitung.....	43
4.1.5.2	Bestimmung der Schwellwerte	43
4.1.5.3	Bestimmung der Gewichte	43
4.1.5.4	Bestimmung des Wasserschwelwertes	44
4.1.6	Verwendung mehrerer Trainingssets	45
4.1.7	Plausibilisierung	46
4.1.7.1	Kontrolle der Scanzeilen.....	46
4.1.7.2	Kontrolle von künstlichen Profilen in Flugachsenrichtung.....	46
4.1.7.3	Tiefpassfilterung des Klassifizierungsergebnisses.....	46
4.1.8	Eigenschaften des Algorithmus	46
4.2	Extraktion von Strukturlinien	47
4.2.1	1D-tanh-Funktion und Ableitung der Strukturlinienpunkte	48
4.2.2	2D-Flächentypen der tanh-Funktion.....	49
4.2.3	Ableitung der Näherungslösung	51
4.2.4	Bestimmung der Umringgrenzen.....	51
4.2.5	Festlegung und Kontrolle der Recheneinheiten.....	51
4.2.6	Berechnung der Startwerte	52
4.2.6.1	Basisversion.....	52
4.2.6.2	Kreisversion.....	53
4.2.7	Ausgleichung und Ableitung der Strukturlinienpunkte	53
4.2.8	Eigenschaften des Algorithmus	53
5	Praktische Tests der vorgestellten Ansätze und Verfahren	55
5.1	Konzept der Evaluation	55
5.1.1	Evaluation der Klassifikation von Wasserflächen.....	55
5.1.2	Evaluation der Extraktion von Strukturlinien.....	55
5.2	Klassifikation von Wasserflächen	56
5.2.1	Vorstellung der Klassifikationsbeispiele	56
5.2.2	Durchführung der Klassifikation	58
5.2.3	Evaluation der Klassifikationsgüte	62
5.2.4	Allgemeine Bewertung der Anwendbarkeit der Klassifikation	67
5.3	Extraktion von Strukturlinien	67
5.3.1	Vorstellung der Extraktionsbeispiele.....	67
5.3.2	Extraktion der Strukturlinien	69
5.3.3	Evaluation der Extraktionsgüte.....	72
5.3.4	Allgemeine Bewertung der Anwendbarkeit der Extraktion.....	75
5.4	Erstellung konsistenter Digitaler Geländemodelle	77
6	Bewertung und Ausblick	82
	Literaturverzeichnis.....	84
	Danke.....	88
	Lebenslauf.....	89

1 Einleitung und Motivation

Das Wattenmeer der Nordsee ist ein besonderer Landschaftsraum. Es ist durch den Einfluss der Gezeiten geprägt. Zweimal am Tag wird das Gebiet vom Wasser der Nordsee überflutet und fällt anschließend wieder trocken. Es erstreckt sich von Den Helder (Niederlande) im Westen bis Esbjerg (Dänemark) im Norden. Das ca. 450km lange und bis zu 20km breite Wattenmeer hat eine Größe von etwa 8000km² (Reineck, 1982). Davon befindet sich der größte Teil im Hoheitsgebiet Deutschlands. Aufgrund der zyklischen Bedeckung durch Wasser entwickelte sich ein in dieser Form und Größe einzigartiger Landschaftsraum mit einer Vielzahl von Pflanzen- und Tierarten. Ein Großteil der auftretenden Spezies ist nur im Wattenmeer verbreitet. In Folge ihrer Anpassung an die speziellen Umweltbedingungen ist der Erhalt dieser Arten direkt mit dem Fortbestand des Wattenmeers verbunden (Henke, 1999).

Das Watt bildet nicht nur den Lebensraum für zahlreiche Pflanzen- und Tierarten sondern dient auch dem Menschen als wichtige Nahrungs- und Rohstoffquelle. Mit dem Beginn der Besiedelung des Küstenraums nutzten die Bewohner die sich bietenden Ressourcen wie Fisch, Reet und Torf. Darüber hinaus war im Mittelalter die Salzgewinnung weit verbreitet und ermöglichte einen gewissen Wohlstand (Kohlus, 1998). Dennoch bildete die Fischerei die wichtigste Lebensgrundlage der Küstenbewohner bis hinein ins 20. Jahrhundert. Das Fanggut diente nicht nur der eigenen Ernährung, sondern wurde auch im Tausch gegen andere Güter gehandelt. Gerade die im 12. Jahrhundert entstandene Hanse sorgte für einen Anstieg des Seehandels. Dadurch entwickelten sich so bedeutende Städte wie Bremen und Hamburg und erlebten eine Zeit wirtschaftlicher Blüte.

Auch heutzutage hat das Wattenmeer insbesondere als Rohstoffquelle eine große wirtschaftliche Bedeutung. So befinden sich im Dithmarschen Wattenmeer die größten Erdölvorkommen der Bundesrepublik Deutschland mit geschätzten 87 Millionen Tonnen (Kohlus, 1998). Derzeit werden täglich ca. 1800t durch die Bohrinselform Mittelplate gefördert. Darüber hinaus werden dem Wattenmeer Kies, Sand und Klei in erheblichem Umfang entnommen, die als Baumaterial Verwendung finden. Ein weiterer aktueller Aspekt der wirtschaftlichen Bedeutung des Wattes ist die Nutzung der Windkraft. Mit dem Aufstieg der regenerativen Energiegewinnung wurden erste Offshore-Windparks angelegt. Darüber hinaus existieren vielseitige Planungen zur Installation weiterer Windkraftanlagen. Ihre Standorte befinden sich nicht nur im offenen Bereich der Nordsee sondern auch im Wattenmeer. Eine zentrale wirtschaftliche Bedeutung insbesondere für die Küstenbewohner spielt heutzutage der Tourismus. Im Laufe der letzten Jahrzehnte entwickelte sich dieser Zweig zu einer der wichtigsten Quellen des wirtschaftlichen Aufschwunges. In Abhängigkeit von der Attraktivität und Lage der jeweiligen Region beträgt der Anteil der Bruttowertschöpfung teilweise mehr als 50% (Kohlus, 1998).

In Deutschland leben mehrere Millionen Menschen in den Küstenregionen der Nordsee. Die Sicherung ihrer Lebens- und Arbeitsräume ist das Hauptziel des Küstenschutzes. Jedes Jahr stellt der Bund dafür in Zusammenarbeit mit den Anrainerländern Bremen, Niedersachsen, Hamburg und Schleswig-Holstein mehrere Millionen Euro bereit (Heyken, 2007). Um den Lebens- und Arbeitsraum der im Einflussbereich der Nordsee wohnenden Menschen zu schützen, aber auch die wirtschaftliche Funktion des Wattes für die Schifffahrt sicherzustellen, bedarf es umfangreicher Vermessungen zur Erhebung von Geodaten. Ohne ausreichende Vermessung kann ein zielgerichteter Einsatz der Geldmittel im Rahmen des Küstenschutzes nicht gewährleistet werden. Ebenso müssen Veränderungen (z.B. Versandung) von bedeutenden Schifffahrtswegen erfasst werden, um den reibungslosen Schiffsverkehr (insbesondere der großen Tanker und Containerschiffe) der deutschen Seehäfen sicherzustellen.

Digitale Geländemodelle (DGM) sind unverzichtbare Datenquelle und Arbeitsgrundlage im Küstenschutz. Basierend auf der Analyse von DGM verschiedener Epochen können Küstenschutzanlagen überwacht und hinsichtlich relevanter Änderungen untersucht werden (Brügelmann, 2000). Ebenso können Lage- und Höhenänderungen küstenmorphologisch bedeutsamer Objekte, wie Priele und Dünen, aufgedeckt werden. Weiterhin dienen DGM als Planungsgrundlage für Instandsetzung und Neubau von Küstenschutzanlagen sowie Massenberechnungen. Sie sind unverzichtbar für die Gefahrenanalyse von Flutungen. Des Weiteren bilden sie die Grundlage für eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen und Aktivitäten wie Windmodellierung, Sedimenttransport, numerische Strömungs- und Wellenmodellierung etc. (Prandle et al., 2000).

Alle diese Anwendungen benötigen ein hochgenaues DGM der Watten. Für dessen Erzeugung eignet sich insbesondere das Messverfahren Airborne Laserscanning. Diese vergleichsweise neue, aber dennoch schon sehr gebräuchliche Methode bietet viele Vorteile. Es handelt sich um ein aktives, luftgestütztes, berührungsloses Messverfahren. Innerhalb kurzer Zeit können große Flächen mit einer Punktdichte von mehreren Punkten pro m² erfasst werden. Die durchschnittlich erreichte Lage- und Höhengenaugigkeit von $\sigma_x = \sigma_y = 0,5\text{m}$ bzw. $\sigma_z = 0,15\text{m}$ ermöglicht eine für die oben aufgeführten Anwendungsbereiche hinreichend genaue Geländemodellierung. Das Messverfahren ist in der Praxis weit verbreitet und hat sich als Standardverfahren zur Erhebung von 3D-Geländeeinformationen im Wattbereich durchgesetzt. Dennoch treten bei der Geländemodellierung in den Watten spezifische Schwierigkeiten auf, welche die Genauigkeit der abgeleiteten DGM negativ beeinflussen und somit deren Verwendbarkeit beeinträchtigen.

Die Hauptfehlerquelle bei der Modellierung von DGM in Watten sind die in den Rohdaten enthaltenen Wasserpunkte. Trotz der Tatsache, dass die Befliegung bei Tideniedrigwasser durchgeführt wird, sind einige Bereiche des Wattes mit Wasser überflutet. Besonders in den Prielen verbleibt Restwasser. Die jeweilige Wassertiefe schwankt zwischen wenigen

Zentimetern und mehreren Metern. Der Laserscannerstrahl, der sich bei gängigen Standardsystemen (z.B. Falcon II, ALTM 3100, LMS-Q560 etc.) im Wellenlängenbereich von 1 – 1,5µm befindet, durchdringt das Wasser nicht bis zum Meeresgrund, sondern wird in unterschiedlichen Anteilen an der Wasseroberfläche reflektiert (Zissis, 1993). Die aus diesen Entfernungsmessungen abgeleiteten Punkte entsprechen nicht der Geländeoberfläche¹. Um jedoch ein DGM erstellen zu können, welches den Verlauf des trockenen Watts genau wiedergibt, müssen Wasserpunkte analog zu Vegetationspunkten auf dem Festland klassifiziert und entfernt werden.

Für die mit Wasser gefüllten Gebiete stehen nach der Klassifikation keine Stützpunkte aus der Laserscannerbefliegung zur Verfügung. Um trotzdem ein lückenloses DGM erstellen zu können, müssen diese Bereiche durch entsprechende Stützpunkte anderer Herkunft gefüllt werden. Dafür bieten sich bathymetrische Messungen, insbesondere Fächerecholotmessungen an. Jedoch beeinflussen die unterschiedlichen Genauigkeiten beider Verfahren sowie mögliche morphologische Veränderungen der beobachteten Wattfläche aufgrund des Zeitversatzes zwischen den Messungen die Qualität des aus den verschnittenen Rohdaten erzeugten DGM.

Eine Alternative zur Verwendung von Echolotmessungen stellt das so genannte bathymetrische Laserscanning dar, welches Pulse im Bereich des nahen Infrarots und zusätzlich im Bereich des sichtbaren Lichtes (z.B. Shoal-System – 1064nm und 532nm) aussendet. Während das infrarote Signal an der Wasseroberfläche reflektiert wird, durchdringt der Puls im Bereich des sichtbaren Lichtes das Wasser bis zum Meeresboden (Irish and Lillycrop, 1999). Dadurch ist es möglich, die Topographie sowohl für trockene als auch überflutete Gebiete zu erfassen, wobei die Durchdringung des Wassers abhängig von der Trübung ist. Da das Wasser der Nordsee jedoch insbesondere im Bereich des Wattenmeeres einen hohen Sedimentanteil aufweist, können sehr häufig schon Bereiche mit einer Wassertiefe von einem Meter nicht mehr erfasst werden, weshalb dieses Verfahren keine Verwendung findet (Aarup, 2002).

In den Watten treten an morphologischen Objekten wie Prielen und Platen Strukturlinien² auf. Sofern diese linienförmigen Objekte in die Berechnung des DGM einfließen, kann die Genauigkeit des erzeugten DGM zusätzlich gesteigert werden. Jedoch werden aufgrund des Messprinzips nur Massenpunkte und keine speziell an morphologischen Objekten ausgerichteten Punkte bestimmt. Will man auf den Einsatz anderer aufwändiger Erfassungsmethoden verzichten, so müssen die Formlinien und Bruchkanten direkt aus den Laserrohdaten ermittelt werden.

1.1 Ziele der Arbeit

Diese Arbeit hat zum Ziel, den Weg aufzuzeigen und detailliert zu beschreiben, wie aus Airborne Laserscannerdaten hochgenaue DGM in Watten erzeugt werden können. Dabei sollen insbesondere zwei spezifische Teilschritte – namentlich die Klassifikation der Wasserpunkte sowie die Strukturlinienextraktion – analysiert und umfassend gelöst werden. Diesbezüglich liegt die Priorität der Arbeit darin, geeignete Algorithmen zu entwickeln und ausführlich zu testen. Dabei wird vorausgesetzt, dass für die Bearbeitung die 3D-Massenpunkte (Rohdaten) aus der Befliegung vorliegen, wie sie im Allgemeinen von den Laserscanfirmen geliefert werden. Somit liegen die Daten in einem einheitlichen Bezugssystem (in der Regel das jeweilige Landeskoordinatensystem) vor und sämtliche vorher notwendigen Arbeitsschritte wie Grobfehlersuche, Streifenanpassung und Transformation sind bereits durchgeführt. Weiterhin ist es nicht das Ziel der Arbeit, verschiedene Interpolations- und Modellierungsverfahren zu vergleichen beziehungsweise dafür neue geeignete Methoden zu entwickeln. Vielmehr konzentriert sich diese Arbeit auf die beiden ausgewählten Zwischenschritte, die im Rahmen der Geländemodellierung im Wattbereich notwendig sind.

Das Kernproblem bei der Ableitung eines DGM in den Watten ist die Trennung von Wasser- und Wattpunkten (Filterung von Wasserpunkten) aus den Laserscannerdaten. Ein entscheidendes Ziel ist es daher, ein Klassifizierungsverfahren zu entwickeln, welches zuverlässig und genau Laserscannerpunkte in Wasser- und Wattpunkte unterteilt. Der Filteralgorithmus soll nur auf Grundlage der Laserscannerdaten arbeiten und somit keine zusätzlichen Datenquellen wie Multispektraldaten benötigen.

Das Berücksichtigen von Formlinien und Bruchkanten innerhalb der Modellierung führt zu einer höheren Genauigkeit des DGM. Da beim Laserscanning nicht gezielt einzelne Details des Geländes direkt bestimmt, sondern flächenhaft verteilte Massenpunkte ermittelt werden, stehen diese Strukturlinien explizit nicht zur Verfügung. Deshalb ist ein weiteres Ziel der Arbeit, ein Verfahren zu entwickeln, welches Formlinien und Bruchkanten aus Laserscannerdaten in Watten ableitet, um sie anschließend in den Modellierungsprozess des DGM zu integrieren und eine Genauigkeitssteigerung herbeizuführen.

¹ In dieser Arbeit wird dann von einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) gesprochen, wenn ein Höhenmodell aus Laserscannerdaten im Wattbereich berechnet wurde, welches Wasserflächen enthält.

² Die Strukturlinie wird innerhalb dieser Arbeit als Sammelbegriff für morphologisch bedeutsame Geländelinien verwendet. Diese untergliedern sich in Bruchkanten und Formlinien. Sie unterscheiden sich dahingehend, dass Bruchkanten quer zur Ausbreitungsrichtung nicht stetig differenzierbar sind, während Formlinien in derselben Richtung eine maximale Krümmung aufweisen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Nach der Einführung in die Thematik sowie Erläuterung der Ziele der Arbeit im ersten Kapitel werden im zweiten Abschnitt theoretische und praktische Grundlagen behandelt. Zuerst erfolgt die Vorstellung des Messverfahrens Airborne Laserscanning, wobei insbesondere die theoretischen Grundlagen sowie die Interaktion des Laserpulses mit den Watten betrachtet werden. Zusätzlich wird der allgemeine Arbeitsablauf zur Erstellung eines DGM aus Laserscannerdaten vorgestellt. Im Kapitel 2.2 werden andere Standardverfahren zur Wattvermessung dargestellt. Anschließend erfolgt im Kapitel 2.3 der Vergleich dieser Methoden mit dem Airborne Laserscanning. Der Abschnitt schließt mit einer Einführung in Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Klassifizierung. Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand der Forschung hinsichtlich der Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten sowie der Ableitung von Formlinien und Bruchkanten. Dabei werden die einschlägigen Ansätze vorgestellt und miteinander verglichen, wobei insbesondere die Schwächen herausgearbeitet werden, welche die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Verfahren begründen. Das vierte Kapitel beinhaltet die vom Autor vorgeschlagenen neuen Modelle und Strategien zur Ableitung konsistenter DGM in Watten. Einführend wird der erweiterte Arbeitsablauf vorgestellt, der die zusätzlichen Teilschritte umfasst. Dann wird jeweils der Algorithmus zur Lösung der beiden im Fokus stehenden Teilaufgaben ausführlich erläutert. Das fünfte Kapitel beschreibt die durchgeführten praktischen Tests sowie die sich darauf gründende Evaluation der Ergebnisse. Die Genauigkeitsanalyse beider Methoden erfolgt dabei anhand mehrerer Beispiele getrennt voneinander. Ferner wird ausgehend von den Evaluationsergebnissen die Anwendbarkeit der Methoden näher beleuchtet. Nachfolgend wird für ein großflächiges Gebiet anhand des erweiterten Arbeitsablaufes das zugehörige DGM abgeleitet. Die Arbeit schließt mit einer Bewertung und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

2 Grundlagen

2.1 Airborne Laserscanning

Das Airborne Laserscanning ist eine moderne Technologie zur Bestimmung dreidimensionaler Oberflächenpunkte. Es handelt sich um ein aktives Messverfahren auf Grundlage der Lasertechnologie³. Kernbestandteil eines solchen Systems ist der Laserentfernungsmesser, welcher anhand der Laufzeit eines ausgesandten Pulses die Streckenlänge ableitet. Mit diesem Verfahren kann innerhalb kurzer Zeit eine große Anzahl von 3D-Objektpunkten bestimmt werden. Besonders hervorzuheben ist die hohe erzielbare Genauigkeit und der hohe Automationsgrad dieser Messmethode (Schenk, 2001). In Abhängigkeit vom eingesetzten Scannersystem sowie den Flugparametern beträgt die Höhengenaugigkeit eines gemessenen Punktes 0,15-0,25m (Verschlechterung der Genauigkeit mit steigender Geländeneigung) und die Lagegenauigkeit 0,3-1m bei einer Flughöhe unter 2km (Sithole, 2005). Dabei erreichen moderne Laserscannersysteme eine Punktdichte von mehreren Punkten pro Quadratmeter.

Im Ergebnis erhält man aus Laserscannermessungen undifferenzierte 3D-Massenpunkte. Aus diesen lassen sich verschiedene Produkte berechnen. Im Allgemeinen leitet man aus den 3D-Punkten ein DGM ab. Dazu müssen alle Punkte, welche nicht zur Geländeoberfläche zählen, mittels Filterung entfernt werden. Im Folgenden kann das DGM durch den Einsatz eines geeigneten Interpolationsverfahrens gewonnen werden. Sofern keine Filterung durchgeführt wird, kann man durch Interpolation das Digitale Oberflächenmodell (DOM) berechnen. Zieht man das DGM vom DOM ab, so erhält man ein Differenzmodell, welches aufstehende Vegetation und Gebäude beinhaltet.

2.1.1 Physikalische Grundlagen der Laserentfernungsmessung

Das Wort Laser ist ein Akronym für „light amplification by stimulated emission of radiation“. Ins Deutsche übersetzt bedeutet es: „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“. Die Übersetzung liefert schon eine gewisse Vorstellung, was sich hinter dem Akronym verbirgt. Der Laser ist eine künstliche Strahlungsquelle, wobei die Lichtstrahlung durch stimulierte Emission erzeugt wird. Aufgrund der Verstärkung können sehr hohe Leistungen erreicht werden.

Laserstrahlung unterscheidet sich stark von emittierter Strahlung natürlicher Lichtquellen. Die Ursache liegt in der unterschiedlichen Entstehung der jeweiligen Strahlung. Herkömmliche Lichtquellen emittieren Strahlung aufgrund spontaner Emission (Abbildung 2.1 links). Dabei wechselt ein Elektron von einem energiereichen Zustand E_h in einen energieärmeren Zustand E_l . Die Energiedifferenz wird dabei in Form eines Lichtteilchens (Photon) abgegeben. Kennzeichnend für die spontane Emission ist, dass sowohl der Zeitpunkt als auch die Richtung, in die das Photon ausgestrahlt wird, zufällig sind. Laserstrahlung hingegen entsteht durch die so genannte stimulierte Emission (Abbildung 2.1 rechts). Dabei trifft ein Photon auf ein Atom und stimuliert die Abgabe eines weiteren Photons. Voraussetzung für diesen Prozess ist, dass die Energie des einfallenden Photons ungefähr der Energie entspricht, die das Atom verliert, wenn ein Elektron vom hohen Energieniveau auf das niedrige fällt. Zudem muss sich das Elektron bereits bei dem Auftreffen des Photons auf dem hohen Energieniveau befinden. Das auf diese Weise emittierte Photon hat exakt die gleiche Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung. Im Ergebnis erreicht man durch die Emission eines identischen Photons eine Verstärkung des Lichtes. (Wagner et al., 2003)

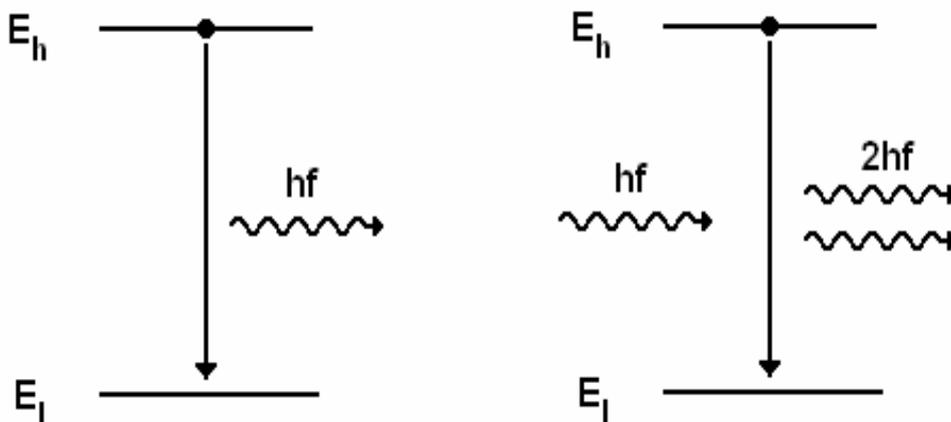


Abbildung 2.1: spontane Emission (links), stimulierte Emission (rechts) (Wagner et al., 2003)

³ In der englischsprachigen Literatur wird das Akronym LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) oft ersetzt durch den Begriff LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

2.1.1.1 Eigenschaften der Laserstrahlung

Aufgrund der Erzeugung durch stimulierte Emission zeichnet sich die Laserstrahlung durch mehrere charakteristische Eigenschaften aus, welche die Strahlung natürlicher Lichtquellen im Allgemeinen nicht aufweist. So erzeugt der Laser kohärente Strahlung, also Strahlung gleicher Phasenlage. Zudem bewegt sich die emittierte Strahlung innerhalb eines engen Frequenzbandes. Man spricht auch von monochromatischem bzw. schmalbandigem Licht. Die emittierte Hauptfrequenz hängt vom aktiven Medium ab (z.B. Helium-Neon-Laser: 632,8nm, Stickstofflaser: 337,1nm etc.). Die Breite des Frequenzbandes ist abhängig von der Pulslänge. Es gilt: Je kürzer die Pulslänge, umso größer ist die Bandbreite des emittierten Pulses. Die theoretische Grundlage dieses Phänomens bildet das Zeit-Bandbreite-Produkt (Gleichung 2.1). So ist das Produkt aus Bandbreite ω_{gr} und Pulsdauer t_D genähert gleich 1. Möchte man im Folgenden einen Puls mit geringer Bandbreite erzeugen, so verlängert sich die Pulslänge. Ein streng monochromatisches Signal kann deshalb nur theoretisch bei unendlicher Pulsdauer erzeugt werden. Umgekehrt kann ein Diracstoß, also ein Puls ohne Zeitausdehnung, nur durch ein unendliches Frequenzbandspektrum realisiert werden.

$$t_D * \omega_{gr} \approx 1 \quad (2.1)$$

Weiterhin emittiert der Laser elektromagnetische Strahlung nur in eine Ausbreitungsrichtung im Gegensatz zu natürlichen Lichtquellen.

2.1.1.2 Radargleichung

Nach der Erzeugung des Pulses wird dieser vom Sender emittiert. Danach durchläuft der Puls die Erdatmosphäre und trifft anschließend auf den Streukörper. An diesem wird er je nach Beschaffenheit und Material in unterschiedlichen Anteilen absorbiert und reflektiert. Wiederum durchläuft der reflektierte Puls die Atmosphäre und gelangt zum Empfänger (Abbildung 2.2). Dort wird die empfangene Leistung P_E bestimmt.

Die dabei auftretenden Beziehungen zwischen dem ausgesandten Laserpuls, dem beleuchteten Objekt sowie dem empfangenen Laserpuls können durch die Radargleichung (Gleichung 2.2) beschrieben werden, da die Messverfahren Lidar und Radar auf den gleichen physikalischen Prinzipien beruhen (Jelalian et al., 1992).

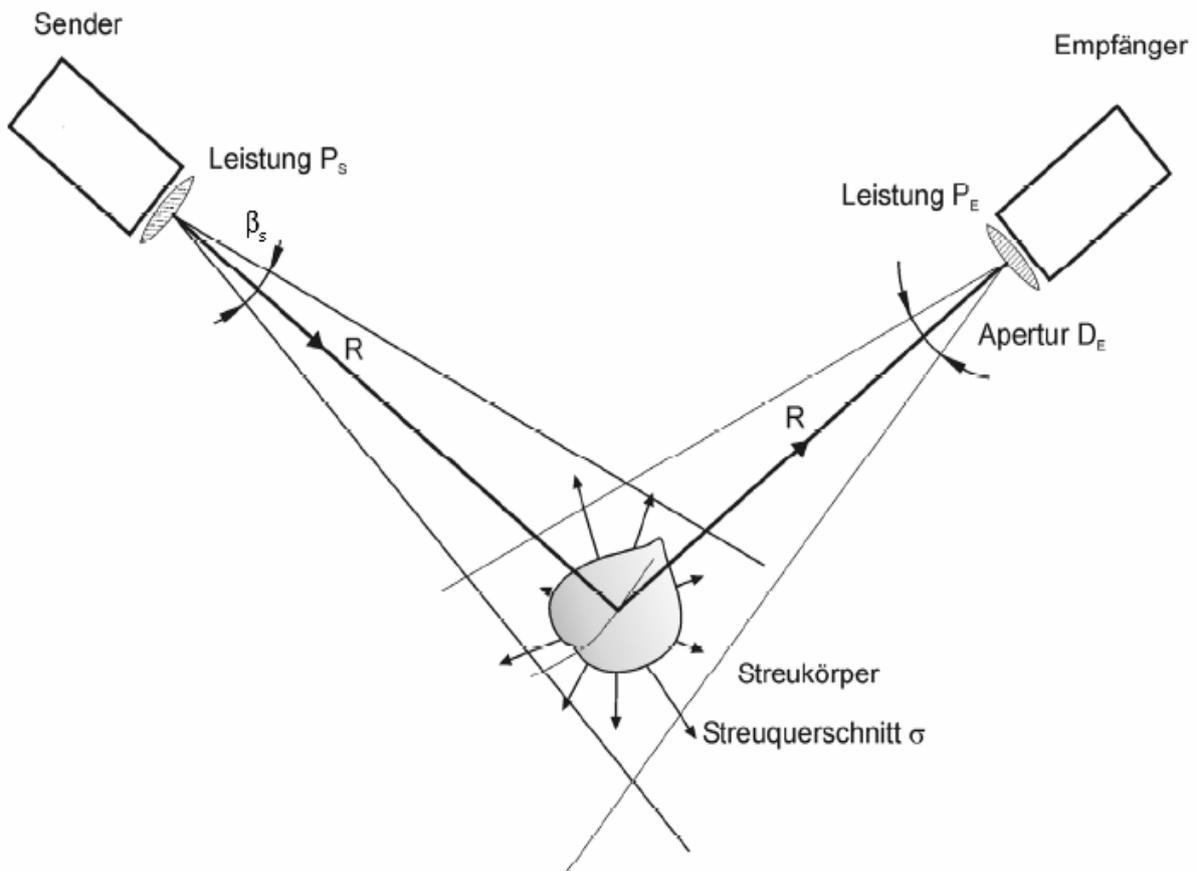


Abbildung 2.2: Geometrie und Einflussgrößen der Radargleichung (Wagner et al., 2003, verändert)

Unter der Annahme, dass der Puls kegelförmig ausgesendet wird und die Leistung innerhalb des Kegels pro Raumwinkel konstant ist, lässt sich die Radargleichung wie folgt aufstellen (Ulaby et al., 1982):

$$P_E = \frac{P_S D_E^2}{4\pi R^4 \beta_S^2} \eta_{sys} \eta_{Atm} \sigma \quad (2.2)$$

mit:

P_S	ausgesandte Leistung	P_E	empfangene Leistung
R	Distanz zwischen Sender und Streukörper	D_E	Aperturdurchmesser des Empfängers
β_S	Öffnungswinkel des Senders	η_{sys}	Wirkungsgrad des Laserscanners
η_{Atm}	Transmissionsfaktor der Atmosphäre	σ	Rückstreuequerschnitt

Die Radargleichung (Gleichung 2.2) zeigt, dass die empfangene Leistung P_E direkt proportional zur ausgesandten Leistung P_S , des quadrierten Aperturdurchmessers des Empfängers D_E , dem Wirkungsgrad des Laserscanners η_{sys} , dem Transmissionsfaktor η_{Atm} der Atmosphäre sowie dem Rückstreuequerschnitt σ (siehe Kapitel 2.1.1.3) ist. Hingegen verhält sich die empfangene Leistung indirekt proportional zur 4. Potenz der Entfernung R sowie zur 2. Potenz des Öffnungswinkels des Senders β_S .

Berücksichtigt man ferner, dass der ausgesandte Puls eine diskrete räumliche Ausdehnung besitzt, wobei die Leistung $P_S(t)$ in Abhängigkeit von der Zeit variiert, so ist ebenfalls die empfangene Leistung $P_E(t)$ zeitabhängig. Handelt es sich bei dem Rückstreukörper um einen Punktstreuer (in guter Näherung auch für gegenüber dem Laserstrahl nicht geneigte, ebene Flächen gültig), so ist das empfangene Signal $P_E(t)$ theoretisch eine um einen konstanten Faktor reduzierte Kopie des ausgesandten Signals $P_S(t)$. Der zeitliche Verschiebungsbetrag Δt resultiert aus der Entfernung R und der Gruppengeschwindigkeit des Signals v_g gemäß der Beziehung $\Delta t = 2R/v_g$. Somit ergibt sich für die Radargleichung folgende Beziehung (Wagner et al., 2006):

$$P_E(t) = \frac{D_E^2}{4\pi R^4 \beta_S^2} P_S \left(t - \frac{2R}{v_g} \right) \eta_{sys} \eta_{Atm} \sigma \quad (2.3)$$

Im Allgemeinen illuminiert der Laserstrahl nicht nur ein einzelnes Objekt sondern mehrere, die jeweils einen Rückstreuequerschnitt σ_i besitzen. Jedes Objekt erzeugt dabei ein eigenes Echo. In Abhängigkeit von der Entfernungsauflösung des Systems werden die Echos zweier Objekte entweder überlagert oder getrennt empfangen.⁴ Ferner besitzt jedes Einzelobjekt in Bezug zur Pulsausbreitungsrichtung eine gewisse räumliche Ausdehnung ΔR_i , wodurch der zugehörige Rückstreuequerschnitt $\sigma_i(R)$ abhängig von der Entfernung R ist. Um die empfangene Leistung $P_{E,i}(t)$, die aus der Interaktion mit dem jeweiligen Objekt i resultiert, zu bestimmen, muss das Integral der ausgesandten Leistung über den gesamten Rückstreuequerschnitt gebildet werden (siehe Gleichung 2.4). Aufgrund der mittleren Entfernung R_i des Objektes vom Sender ergeben sich die Integrationsgrenzen zu $[R_i - (\Delta R_i/2), R_i + (\Delta R_i/2)]$ (Wagner et al., 2006).

$$P_{E,i}(t) = \frac{D_E^2 \eta_{sys} \eta_{Atm}}{4\pi \beta_S^2} \int_{R_i - \frac{\Delta R_i}{2}}^{R_i + \frac{\Delta R_i}{2}} \frac{1}{R^4} P_S \left(t - \frac{2R}{v_g} \right) \sigma_i(R) dR \quad (2.4)$$

Geht man davon aus, dass die räumliche Ausdehnung des Rückstreuers ΔR_i gegenüber der Entfernung zum Sender R sehr klein ist und stellt den Rückstreuequerschnitt $\sigma_i(R)$ in Abhängigkeit von der Zeit $\sigma'_i(t)$ dar, so kann die Interaktion des Laserstrahls mit dem Rückstreuer in guter Näherung als Faltung dargestellt werden. Das am Empfänger ankommende Signal wird wiederum durch die Receiverimpulsfunktion $\Gamma(t)$ gefaltet. Somit ergibt sich folgende Beziehung (siehe Gleichung 2.5) (Wagner et al., 2006):

$$P_{E,i}(t) \approx \frac{D_E^2}{4\pi R_i^4 \beta_S^2} P_S(t) * \sigma'_i(t) * \Gamma(t) \quad (2.5)$$

Zur Bestimmung der empfangenen Leistung P_E aller illuminierten Streukörper N muss die Summe aller Einzelechos aus Gleichung 2.5 gebildet werden.

⁴ Die Entfernungsauflösung entspricht dem Produkt aus Gruppengeschwindigkeit des Laserpulses v_g und der Plusdauer τ des Signals geteilt durch zwei. Ist der Abstand ΔR zwischen zwei Objekten kleiner, so wird ein Mischecho empfangen.

2.1.1.3 Modellierung des Rückstreuquerschnitts

Der Rückstreuquerschnitt σ wird zur Beschreibung des illuminierten Streukörpers verwendet. Er ist definiert als Verhältnis der pro Einheitsraumwinkel vom Objekt zum Empfänger gestreuten Leistung zu der auf das Objekt einfallenden Flächenleistungsdichte (Klausing und Holpp, 2000). Der Rückstreuquerschnitt ist abhängig von den Eigenschaften der einfallenden Strahlung sowie der Fläche dA und dem Reflexionsverhalten des beleuchteten Objekts. Im Allgemeinen erfolgt die Streuung gerichtet, so dass der Rückstreuquerschnitt abhängig von der Betrachtungsrichtung ist. Geht man vereinfachend davon aus, dass die reflektierte Strahlung gleichmäßig in einen Raumwinkel Ω emittiert wird, so beträgt der Rückstreuquerschnitt (Jelalian, 1992):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho dA \quad \text{innerhalb des Streukegels} \quad (2.6a)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{außerhalb des Streukegels} \quad (2.6b)$$

Der Reflexionsgrad ρ der beleuchteten Oberfläche (oft auch als Albedo bezeichnet) ist der Quotient aus der Abstrahlungsstärke H_r und der einfallenden Bestrahlungsstärke H_i (Gleichung 2.7). Er ist abhängig von der Wellenlänge λ und der Polarisation \mathbf{P} der einfallenden Strahlung sowie dem jeweiligen Material des Rückstreuers und dessen Eigenschaften. Für die Bestimmung des Reflexionsgrades ρ wird die gesamte in den Halbraum reflektierte Strahlung berücksichtigt. Im Allgemeinen ändert sich der Reflexionsgrad ρ einer Fläche in Abhängigkeit vom Inzidenzwinkel θ_i der einfallenden Strahlung (siehe Abbildung 2.3).

$$\rho = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.7)$$

Für die Bestimmung des Rückstreuquerschnitts σ ist zu beachten, dass das Reflexionsverhalten des Streukörpers für verschiedene Richtungen (θ_i, φ_i) variiert. Eine in der Fernerkundung gebräuchliche Größe zur Beschreibung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion ist der gerichtete Reflexionsgrad r . Er beschreibt das Reflexionsverhalten für eine feste Strahlungsimmersion aus dem gesamten Halbraum in die jeweilige Richtung (θ_r, φ_r) , wobei die Strahldichte L_i aus der jeweiligen Einfallrichtung unterschiedlich sein kann. Der gerichtete Reflexionsgrad r ergibt sich als Quotient der reflektierten Strahldichte L_r in die jeweilige Ausstrahlungsrichtung und der reflektierten Strahldichte eines idealen (verlustfreien), diffusen Reflektors L_0 . Voraussetzung ist, dass gleiche Bedingungen (Wellenlänge λ , Polarisation \mathbf{P} und Richtung der einfallenden Strahlung (θ_i, φ_i)) herrschen. Durch Erweiterung mit dem Faktor π entspricht der Nenner der einfallenden Bestrahlungsstärke H_i (Gleichung 2.8).

$$r(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi L_r(\theta_r, \varphi_r)}{H_i} \quad (2.8)$$

Der gerichtete Reflexionsgrad r kann je nach Ausstrahlungsrichtung zwischen null und unendlich liegen. Ein Wert größer eins impliziert eine gerichtete Reflexion. Sofern der gerichtete Reflexionsgrad r über den gesamten Halbraum vorliegt kann durch Integration der Reflexionsgrad ρ bestimmt werden.

$$\rho = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} (r(\theta_r, \varphi_r) \cos \theta) d\Omega_r \quad (2.9)$$

Für die Beschreibung des Reflexionsverhaltens von Oberflächen bezüglich der Immission von Strahlung aus einer einzelnen Richtung (θ_i, φ_i) statt einer festen Immission aus dem gesamten Halbraum führt Jelalian (1992) den bidirektionalen Reflexionsgrad ρ' ein und zeigt dessen Abhängigkeit von der Richtung (θ_i, φ_i) , der Wellenlänge λ und Polarisation \mathbf{P} der einfallenden Strahlung sowie der jeweiligen Reflexionsrichtung (θ_r, φ_r) .

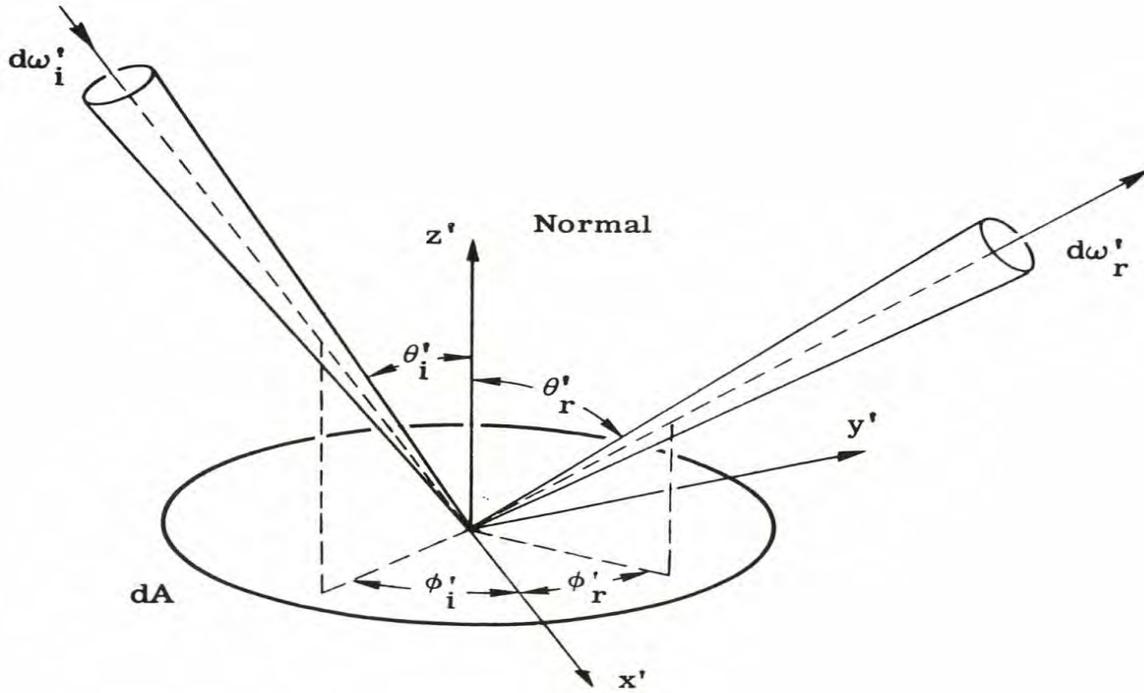


Abbildung 2.3: Geometrie und Einflussgrößen des bidirektionalen Reflexionsgrades ρ' (Jelalian, 1992, verändert)

Die Abbildung 2.3 verdeutlicht den bidirektionalen Reflexionsgrad ρ' . In Abhängigkeit von der Orientierung der einfallenden Strahlung (θ_i, φ_i) , den Eigenschaften des Pulses (Polarisation \mathbf{P} und Wellenlänge λ) sowie den Materialeigenschaften der beleuchteten Fläche $d\mathbf{A}$ ist der bidirektionale Reflexionsgrad ρ' in die jeweilige Richtung (θ_r, φ_r) unterschiedlich groß. Ändert sich der bidirektionale Reflexionsgrad ρ' , so verändert sich ebenfalls der Rückstreuquerschnitt σ . Geht man von einem üblichen Laserscanner aus, so befinden sich Sender und Empfänger genähert an der gleichen Position. Somit entsprechen sich die Winkel der einfallenden (θ_i, φ_i) und der reflektierten Strahlung (θ_r, φ_r) . Betrachtet man den bidirektionalen Reflexionsgrad für $\theta_i = \theta_r$ und $\varphi_i = \varphi_r$, so sinkt dieser im Allgemeinen mit steigendem Inzidenzwinkel θ_i . Besonders deutlich macht sich dieser Effekt bemerkbar, je mehr die Reflexion gerichtet erfolgt. Dies kann dazu führen, dass bei glatten Flächen der bidirektionale Reflexionsgrad so klein wird, dass die Signalstärke des zum Empfänger zurückgestreuten Pulses im Bereich des Rauschens liegt und kein Echo detektiert wird.

Für die Beschreibung des bidirektionalen Reflexionsgrades in einer mathematischen Form verwendet man die so genannte bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (engl. Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF). Sie beschreibt das Verhältnis aus reflektierter Strahlendichte $d\mathbf{L}_r$ in eine bestimmte Raumrichtung (θ_r, φ_r) zur einfallenden Bestrahlstärke $d\mathbf{H}_i$ aus der Richtung (θ_i, φ_i) (Gleichung 2.10) (Nicodemus et al., 1977).

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos(\theta_i) d\Omega_i} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dH_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2.10)^5$$

Da die BRDF über infinitesimal kleine Raumwinkel definiert ist, kann sie durch praktische Messungen nur genähert bestimmt werden. Häufig verwendet man stattdessen den gerichteten Reflexionsgrad \mathbf{r} (Gleichung 2.8). Sofern die BRDF bekannt ist, kann diese gemäß Gleichung 2.11 durch Integration über den gesamten Halbraum in den gerichteten Reflexionsgrad überführt werden.

$$r(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi L_r(\theta_r, \varphi_r)}{H_i} = \frac{\int_{\Omega_i} \pi BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega_i}{\int_{\Omega_i} L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega_i} \quad (2.11)$$

Sofern \mathbf{r} (entweder aus der BRDF abgeleitet oder durch empirische Messung bestimmt) bekannt ist, kann der Rückstreuquerschnitt σ unter Berücksichtigung des jeweiligen Reflexionsverhaltens berechnet werden. Dazu ermittelt man den Anteil der Albedo ρ_{part} , der innerhalb des Kegels mit dem Raumwinkel Ψ liegt, welcher durch die Receiverfläche mit

⁵ Nicodemus et al. (1977) unterscheidet zwischen den Variablen ω und Ω . Während ω dem jeweiligen Raumwinkel in Richtung (θ, φ) entspricht, wird Ω als verebneter Raumwinkel gemäß der Vorschrift $d\Omega = \cos(\theta)\omega$ eingeführt. Dies deckt sich nicht mit der Bezeichnung durch Jelalian (1992) in Gleichung 2.6. Um einer doppelten Bezeichnung vorzubeugen, wird in dieser Arbeit ausschließlich $d\Omega$ verwendet, welches dem Raumwinkel (ohne Verebnung) entspricht.

dem Durchmesser \mathbf{d} sowie die Position des Rückstreuers definiert ist. Die Größe von ρ_{part} hängt dabei direkt von Ψ ab. Mit steigender Entfernung \mathbf{R} zwischen Reflektor und Empfänger verringert sich Ψ wodurch ebenfalls ρ_{part} kleiner wird.

$$\rho_{\text{part}} = \frac{1}{\pi} \int_{\Psi} r(\theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\Omega_r \quad (2.12)$$

Durch Einfügen in Gleichung 2.6 erhält man als effektiven Rückstreuquerschnitt σ_{eff} für einen Reflektor der Größe \mathbf{dA} die Gleichung 2.13. Er beruht im Gegensatz zur Gleichung 2.6 nicht auf unrealistischen Annahmen über das Reflexionsverhalten (gleichmäßige und vollständige Reflexion in einen Strahlenkegel der Größe Ω), sondern auf der BRDF beziehungsweise auf \mathbf{r} .

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{4\pi}{\Psi} \rho_{\text{part}} dA = \frac{4dA}{\Psi} \int_{\Psi} r(\theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\Omega_r \quad (2.13)$$

2.1.1.4 Intensität

Neben den Koordinaten $[\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}]^T$ eines aus den Messdaten abgeleiteten Punktes wird im Allgemeinen ein zusätzlicher Intensitätswert \mathbf{I} bestimmt. Er ermöglicht dem Nutzer, die Stärke des Echos einzuschätzen. Aufgrund der zurückhaltenden Informationspolitik der Systemhersteller ist jedoch nur beschränkt bekannt, was genau unter dieser Größe zu verstehen ist und wie sie bestimmt wird. Hinzu kommt häufig die fehlende Kenntnis der physikalischen und messtechnischen Grundlagen der Aufnahme seitens des Nutzers, die zu falschen Annahmen über die Intensität führen können.

Die physikalische Größe Intensität ist mehrfach definiert. In der Radiometrie drückt sie das Verhältnis von Strahlungsfluss \mathbf{P}^6 pro Raumwinkel Ω aus (Gleichung 2.14) (Janza, 1975).

$$I = \frac{dP}{d\Omega} \quad (2.14)$$

In der Elektrotechnik wird sie anhand des Verhältnisses von Leistung \mathbf{P} pro Fläche \mathbf{A} definiert (Gleichung 2.15) (Kuchling, 2004).

$$I = \frac{dP}{dA} \quad (2.15)$$

Beide drücken somit die Leistungsdichte in Relation auf eine (jeweils unterschiedliche) Bezugsgröße aus und beziehen sich auf einen speziellen Zeitpunkt t_i . Die Analyse von Höfle und Pfeifer (2007) sowie öffentliche aber nicht dokumentierte Aussagen seitens des Herstellers Leica⁷ belegen, dass der dem jeweiligen Laserpunkt zugeordnete Intensitätswert mit der Amplitude des zugehörigen Echos korrespondiert. Unterstellt man unter Vernachlässigung zufälliger Fehler, dass sich die empfangene Leistung \mathbf{P}_{Max} direkt proportional zur Amplitude verhält, so entspricht \mathbf{I} der um einen konstanten Faktor skalierten maximalen Leistung des zugehörigen Echos.

In der Praxis findet die Intensität bisher wenig Verwendung. Jedoch existieren erste Algorithmen, z.B. Clode und Rottensteiner (2005) sowie Göpfert und Sörgel (2007), welche diese Größe für Klassifikationen der Laserpunktwolke benutzen. Zudem gibt es Bestrebungen, die Intensität als zusätzliche Information bei der Filterung zu verwenden.

Um die Messwerte von \mathbf{I} untereinander vergleichbar zu machen, müssen sie kalibriert werden. Dies kann sowohl durch daten- als auch modellgetriebene Ansätze erfolgen. Während die datengetriebenen Methoden auf geeignete mathematische Funktionen zurückgreifen, um den Einfluss entscheidender Größen wie der Entfernung \mathbf{R} zu berücksichtigen, orientiert sich die modellgetriebene Kalibrierung an den physikalischen Grundlagen der Messung. Da die empfangene Leistung \mathbf{P}_E theoretisch direkt proportional zur Intensität \mathbf{I} ist, basiert die Korrektur auf der Radargleichung (Gleichung 2.2). Höfle und Pfeifer (2007) unterteilen die Einflussfaktoren in vier Komponenten: emittierte Energie, sphärischer Verlust sowie topographische und atmosphärische Korrektur. Unter den Annahmen, dass a) der Rückstreuer ein Lambertscher Flächenstrahler ist, b) die Oberflächenorientierung mit Hilfe der Nachbarpunkte bestimmt werden kann, c) die atmosphärischen Bedingungen bekannt und konstant sind, d) die ausgesandte Leistung \mathbf{P}_S konstant ist bzw. Änderungen

⁶ In der Fernerkundung wird statt der Leistung \mathbf{P} der Strahlungsfluss Φ verwendet. Die Größen entsprechen einander. Im Hinblick auf die Lesbarkeit der Arbeit wird nur das Formelzeichen \mathbf{P} benutzt.

⁷ Die Aussage wurde im Rahmen des ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007 durch den Chef der zuständigen Abteilung für Airborne Laserscannersysteme der Firma Leica getätigt.

über die Zeit bekannt sind und e) die empfangene Leistung P_E direkt proportional zur gespeicherten Intensität I ist, verhält sich P_E zu folgendem Term (Gleichung 2.16) direkt proportional.

$$P_E(R) \propto \frac{\rho}{R^2} 10^{\frac{-2Ra}{10000}} \frac{C \cos \beta}{f_{\text{sys}}} \quad (2.16)$$

mit:

P_E	empfangene Leistung	ρ	Reflexionsgrad
R	Distanz zwischen Sender und Streukörper	β	Inzidenzwinkel
a	Korrekturfaktor für atmosphärische Einflüsse ⁸	f_{sys}	Korrekturfaktor der emittierten Leistung
C	Korrekturfaktor für die Summe der Sensorparameter		

Daraus lässt sich die Korrektionsformel zur Kalibrierung gemessener Intensitätswerte ableiten (Gleichung 2.17). Die Kalibrierung erfolgt im Allgemeinen auf die Referenzentfernung R_S von 1000m.

$$I_K(R_S, \beta) = I \frac{R^2}{R_S^2} 10^{\frac{2aR}{10000}} \frac{f_{\text{sys}}}{C \cos \beta} \quad (2.17)$$

mit:

I	Intensität	I_K	kalibrierte Intensität
-----	------------	-------	------------------------

Höfle und Pfeifer (2007) zeigen in ihren Untersuchungen, dass sowohl daten- als auch modellgetriebene Ansätze vergleichbare Ergebnisse liefern. Für den in der Analyse verwendeten empirischen Algorithmus werden jedoch für homogene Bereiche mehrere Messungen aus unterschiedlichen Flughöhen benötigt, die bei der Flugplanung berücksichtigt werden müssten und zu ungleichen Flugstreifen (Höhe, Punktdichte- und abstand etc.) führen. Deshalb wird der modellgetriebene Ansatz grundsätzlich favorisiert. Dieser ist jedoch nur anwendbar, wenn das Reflexionsverhalten des illuminierten Körpers vollständig bekannt ist.

2.1.2 Reflexions- und Absorptionsverhalten des Laserpulses in Wattgebieten

Das Reflexions- und Absorptionsverhalten von Watt und Wasser bezüglich einfallender Laserstrahlung ist von mehreren Faktoren abhängig. Diese lassen sich in Eigenschaften des illuminierten Objektes sowie der einfallenden Strahlung unterteilen. Zentrale Bedeutung für das Objekt haben die Oberflächenrauigkeit sowie die chemische Zusammensetzung. Die entscheidenden Faktoren der einfallenden Strahlung sind insbesondere die Wellenlänge und die Richtung. Während die Oberflächenrauigkeit σ_h verantwortlich für das generelle Reflexionsverhalten (diffus vs. gerichtet) ist, beeinflussen die anderen Faktoren hauptsächlich die Anteile der absorbierten und reflektierten Strahlung. In Bezug auf die Entfernungsmessung durch den Scanner ist zu berücksichtigen, dass nur der reflektierte Anteil von Bedeutung ist, der in Richtung des einfallenden Pulses zurückgestreut wird.

Das Watt hat generell eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit. Diese sinkt noch weiter ab, wenn in Folge eines sehr hohen Durchfeuchtungsgrades die Wattoberfläche mit einem dünnen Wasserfilm überzogen ist. Die Oberflächenrauigkeit von überfluteten Flächen ist abhängig von Wellengang, Wind sowie Strömung. Insbesondere offene Meeresbereiche erreichen Oberflächenrauigkeiten im Bereich mehrerer Dezimeter und darüber hinaus. Aufstehende Restwasserflächen im Wattbereich sind hingegen im Allgemeinen sehr glatt.

Generell erfolgt die Reflexion immer mehr gerichtet, je größer die Wellenlänge und je kleiner die Oberflächenrauigkeit ist (Kraus, 1988). Eine Oberfläche wird als glatt bezeichnet, wenn die Reflexion gerichtet erfolgt. Raue Oberflächen streuen hingegen die Strahlung diffus zurück. Anhand des Rayleigh-Kriteriums (Gleichung 2.18) kann eine Unterteilung hinsichtlich glatter und rauer Oberflächen vorgenommen werden. Eine Oberfläche gilt als glatt, wenn ihre Rauigkeit kleiner als der aus der Wellenlänge und dem Einfallswinkel gebildete Term ist.

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{8 \cos(\vartheta)} \quad (2.18)$$

⁸ Der Faktor 10000 ergibt sich aufgrund der Wahl von Dezibel als Einheit von a .

Anhand des Rayleigh-Kriteriums kann gezeigt werden, dass die Wattoberfläche und besonders die ruhige Wasseroberfläche als eher glatt anzusehen sind. Insbesondere bei steigendem Inzidenzwinkel tritt für sich in Ruhe befindende Wasserbereiche häufig keine diffuse, sondern gerichtete Reflexion auf (Eisner et al., 1962).

Das Watt wird im Allgemeinen in die Klassen Sandwatt, Schlickwatt und Mischwatt eingeteilt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung und Korngrößenverteilung. Das Sandwatt besteht überwiegend aus Feinsanden mit einem geringen Anteil Schluff und Ton (0-5%) sowie Mittelsand (<10%), wobei die Bestandteile gut sortiert⁹ sind. Das Schlickwatt ist dagegen schlecht sortiert. Der Sandanteil liegt generell unter 50%. Das Mischwatt stellt eine Zwischenstufe von Sand- und Schlickwatt dar (Reineck, 1982).¹⁰ Die chemische Zusammensetzung des Wassers der Nordsee ist beeinflusst durch Salzgehalt, Schwebstoffe sowie biotische Anteile in Form von Plankton. Darüber hinaus finden sich auch in Abhängigkeit vom Einfluss des Menschen weitere Bestandteile wie zum Beispiel Schwermetalle (Reineck, 1982).

Mit Hilfe des Absorptionskoeffizienten k_a lässt sich das Absorptionsverhalten von Strahlung beim Durchgang durch Materie beschreiben (Kraus, 1988). Gemäß Gleichung 2.19 sinkt der Strahlungsfluss entlang der Wegstrecke dx in Ausbreitungsrichtung um den Betrag dP .

$$dP = -k_a P(x) dx \quad (2.19)$$

Durch Integration erhält man das Lambert-Beer-Gesetz, welches für ein homogenes Medium die Berechnung der transmittierten Strahlung $P(x)$ in der Tiefe x in Abhängigkeit von der eintretenden Strahlung $P(0)$ und dem Absorptionskoeffizienten k_a ermöglicht (Gleichung 2.20).

$$P(x) = P(0)e^{-k_a x} \quad (2.20)$$

Der Absorptionskoeffizient für Sand- und Schlickwatt im Bereich des nahen Infrarots ist sehr hoch, so dass die in die Wattoberfläche eindringende Strahlung sehr stark absorbiert wird. Der Absorptionskoeffizient von Meerwasser unterscheidet sich deutlich zwischen dem Bereich des sichtbaren Lichtes und des nahen Infrarots (siehe Abbildung 2.4). Während das Meerwasser für Wellenlängen größer $1\mu m$ praktisch nicht durchdringbar ist, kann Strahlung im Bereich des blauen und grünen Lichtes in große Tiefen vordringen. Diesen Umstand nutzen bathymetrische Laserscanner, die neben dem infraroten Signal ein zweites im Bereich des grünen sichtbaren Lichtes aussenden.

Der Reflexionsgrad von Sandwatt ist im Bereich von $1\mu m$ bis $1,6\mu m$ generell größer als für Schlickwatt (siehe Abbildungen 2.5 und 2.6). Er beträgt jedoch nicht mehr als 0,2. Schlickwatt erreicht nur einen durchschnittlichen Reflexionsgrad von ca. 0,1. Mit Zunahme der Durchfeuchtung sinkt für beide Wattformen der Reflexionsgrad weiter ab. Aufgrund der Tatsache, dass Sandwatt eine größere Wasserdurchlässigkeit als Schlickwatt besitzt, weisen im Falle benachbarter Flächen die Sandbereiche im Allgemeinen einen geringeren Durchfeuchtungsgrad und somit einen deutlich höheren Reflexionsgrad auf (Stelzer, 1998) sowie (Konecny, 1979).

Wie in Abschnitt 2.1.1.3 erläutert, ist der Reflexionsgrad ρ unter anderem abhängig von der Richtung der einfallenden Strahlung (θ_i, φ_i) . Trifft Strahlung im nahen und mittleren Infrarot auf eine Wasserfläche, so steigt der Reflexionsgrad deutlich mit wachsendem Einfallswinkel. Während dieser zum Beispiel bei einer Wellenlänge von $1,5\mu m$ bei senkrechtem Einfall bei ca. 0,02 liegt, beträgt er bei einem Inzidenzwinkel von 80 Grad rund 0,35 (Zissis, 1993). Berücksichtigt man aber, dass die Reflexion für glatte Wasseroberflächen gerichtet erfolgt, so sinkt dennoch der Anteil der zum Empfänger zurück gestreuten Strahlung mit wachsendem Einfallswinkel. Beide Effekte überlagern sich und bewirken eine systematische Abhängigkeit der empfangenden Leistung P_E vom Einfallswinkel des Laserpulses. Dabei zeigte sich bei der Analyse mehrerer Datensätze, dass P_E im Allgemeinen mit wachsendem Einfallswinkel sinkt (Brzank und Heipke, 2007).

⁹ Die Sortierung bezeichnet die Güte der Trennung nach der mineralogischen Zusammensetzung und der Korngrößen in den jeweiligen Schichten der Sedimentation (Bahlburg und Breikreuz, 2008).

¹⁰ Weitere Informationen hinsichtlich Genese, Sedimentbestandteilen und chemischer Zusammensetzung finden sich in Reineck (1982).

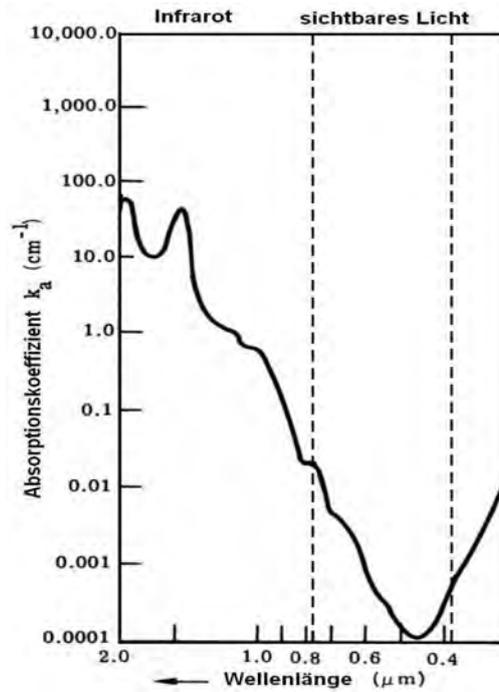


Abbildung 2.4: Absorptionskoeffizient k_a für Meerwasser im Wellenlängenbereich $0,3\mu\text{m}$ bis $2\mu\text{m}$ (Zissis, 1993, verändert)

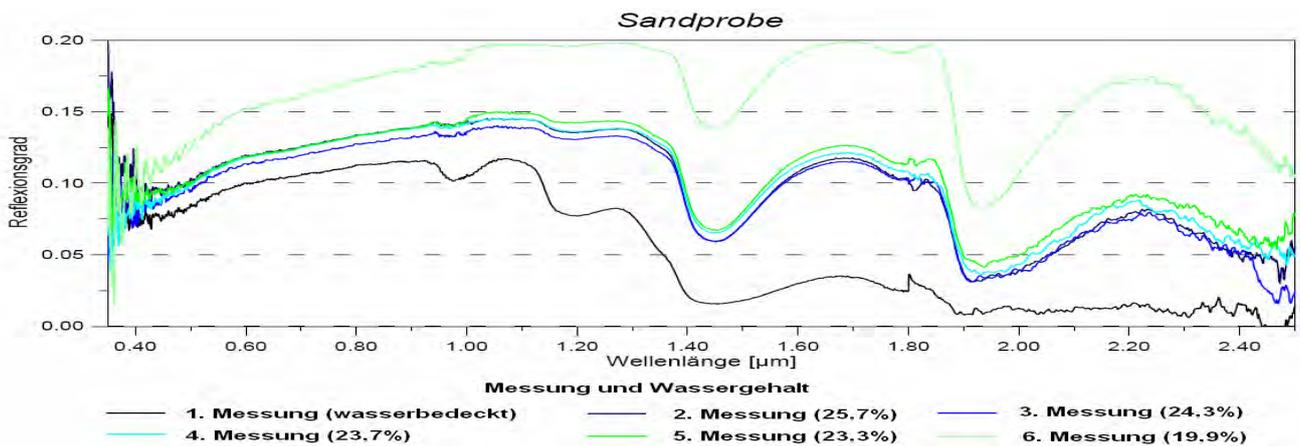


Abbildung 2.5: Reflexionsgrad von Sandwatt in Abhängigkeit vom Durchfeuchtungsgrad im Wellenlängenbereich $0,35\mu\text{m}$ bis $2,5\mu\text{m}$. Die Messungen erfolgten nach einem festen Zeitplan. 1. Messung – 0min, 2. Messung – 1min, 3. Messung – 10min, 4. Messung – 2h, 5. Messung – 5h, 6. Messung – 24h (Stelzer, 1998, verändert)

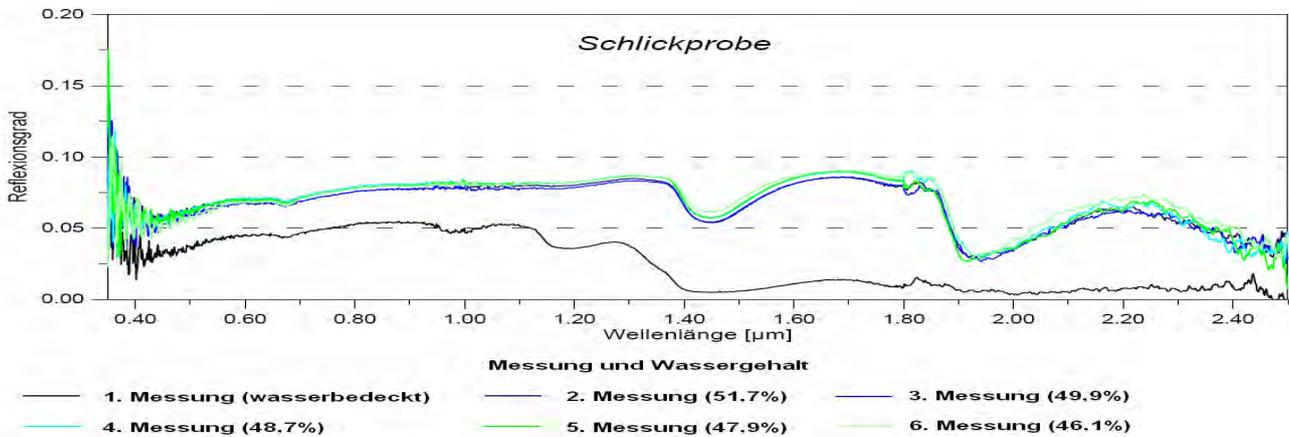


Abbildung 2.6: Reflexionsgrad von Schlickwatt in Abhängigkeit vom Durchfeuchtungsgrad im Wellenlängenbereich $0,35\mu\text{m}$ bis $2,5\mu\text{m}$. Die Messungen erfolgten nach einem festen Zeitplan. 1. Messung – 0min, 2. Messung – 1min, 3. Messung – 10min, 4. Messung – 2h, 5. Messung – 5h, 6. Messung – 24h (Stelzer, 1998, verändert)

2.1.3 Bestandteile eines Airborne Laserscanner Systems

Das Airborne Laserscanner System besteht aus folgenden Hauptkomponenten (Baltsavias, 1999b):

1. Laserentfernungsmesser
2. GPS-System
3. Inertiales Navigationssystem (INS)
4. Computereinheit
5. Speichereinheit

Der Laserentfernungsmesser beinhaltet die opto-mechanischen Bauteile zum Erzeugen, Aussenden und Empfangen des Laserpulses. Nahezu alle derzeit auf dem Markt befindlichen kommerziellen Systeme verwenden einen gepulsten Laserentfernungsmesser. Dabei werden sehr kurze Pulse (ca. 3 – 10ns) erzeugt und ausgesandt. Über die Messung der Laufzeit des Pulses kann die Entfernung zwischen Scanner und Ziel gemäß Gleichung 2.21 berechnet werden (Baltsavias, 1999a).

$$2s = c \cdot t \quad (2.21)$$

mit:

- s** Entfernung zwischen Laserentfernungsmesser und illuminiertem Objekt
c Lichtgeschwindigkeit
t Laufzeit des Pulses

Für die Bestimmung der absoluten 3D-Position der Flugplattform wird ein GPS-System eingesetzt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit der 3D-Position zu erzielen, verwendet man mindestens einen weiteren GPS-Empfänger, der im Messgebiet zeitgleich zum Einsatz kommt. Durch die Verwendung von differentiellen GPS- Auswertestrategien kann im Postprocessing eine Genauigkeit von 5 – 15cm erreicht werden (Cramer, 2001). Um die 3D-Orientierung der Flugplattform zu bestimmen, verwendet man ein Inertiales Navigationssystem (INS). Im Gegensatz zur Messrate des GPS-Empfängers (z.B. 1Hz) besitzen gängige INS Messraten von 50 – 200Hz. Ausgehend von der GPS-Messung können aus den gemessenen Beschleunigungen und Kreismessungen die 3D-Koordinaten und die Raumorientierung ermittelt werden. Um die Datenerhebung von Laserentfernungsmesser, GPS-Empfänger und Inertialsystem koordinieren und zueinander synchronisieren zu können, wird eine Computereinheit benötigt. Diese ist verbunden mit einer Speichereinheit, welche die gemessenen Daten sichert (Baltsavias, 1999b).

2.1.4 Ableitung Digitaler Geländemodelle aus Laserscannerdaten

Als Ergebnis der Befliegung liegen die Rohdaten des Laserscanners, des GPS-Empfängers sowie des Inertialen Navigationssystems vor. Im Folgenden müssen die Rohdaten miteinander kombiniert werden, um daraus die 3D-Masspunkte in einem einheitlichen Bezugssystem abzuleiten. Im Anschluss soll aus den Laserpunkten ein Digitales Geländemodell generiert werden. Folgende Arbeitsschritte sind dafür notwendig:

2.1.4.1 Zusammenführung der Messdaten und Transformation in das Zielkoordinatensystem

Die Messung von 3D-Masspunkten erfolgt beim Laserscanning nicht direkt. Vielmehr werden verschiedene Daten während des Fluges akquiriert. Dazu zählen: die Entfernung r zwischen Plattform und beleuchtetem Objekt, die Orientierungswinkel der Plattform \mathbf{o} – bestehend aus Roll (r), Pitch (p) und Heading (h) – sowie die Position des Flugzeugs \mathbf{t}_{GPS} im Koordinatensystem WGS84. Die Spiegelauslenkung τ_i wird in der Regel nicht direkt gemessen, sondern aus der Beziehung zwischen der jeweiligen Pulsnummer i und der gesamten Anzahl an ausgesandten Pulsen pro Zeile ermittelt (Schenk, 2001) und (Vaughn et al., 1996).

Um die unterschiedlichen Rohdaten miteinander zu vereinen, werden drei plattformbezogene, kartesische Koordinatensysteme definiert. Diese sind: das Laser-Koordinatensystem (Laser-KS), das lokale Inertialsystem (INS-KS) und das lokale nordorientierte Koordinatensystem (LNO-KS). Das Laser-KS ist das Referenzsystem für den Laserscanner. Der Ursprung fällt mit dem Nullpunkt der Streckenmessung des Scanners zusammen. Die x-Achse zeigt in Flugrichtung, die z-Achse weist in Nadirrichtung bezüglich des Scanners. Somit ist die sich ergebende y-z-Ebene identisch zur Scannebene. Der Ursprung des INS-KS befindet sich im Schwerpunkt des INS-Systems. Analog zum Laser-KS zeigt die x-Achse in Flugrichtung und die z-Achse ist identisch zur Nadirrichtung. Der Ursprung des LNO-KS liegt im Nullpunkt der GPS-Antenne. Die Achsen des LNO-Systems orientieren sich an der astronomischen Position der GPS-Antenne. Die x-Achse zeigt in Richtung Nord, während die y-Achse in Richtung Ost weist. Um Messungen von einem System in ein anderes transformieren zu können, benötigt man die Transformationsparameter. Ein Großteil dieser Parameter, wie die Translationsvektoren \mathbf{t}_L zwischen Laserscanner und INS sowie \mathbf{t}_G zwischen GPS-Antenne und INS als auch die Rotation \mathbf{R}_M zwischen dem Laser-KS und dem INS-KS, werden durch Kalibrierung bestimmt. Sie werden deshalb auch als

Kalibrierungsparameter bezeichnet. Alle weiteren notwendigen Transformationsparameter können aus den jeweiligen Rohdaten abgeleitet werden.

Ausgehend von den gemessenen Rohdaten, den definierten Koordinatensystemen sowie den Kalibrierungsparametern kann jeder 3D-Massenpunkt \mathbf{p}_Z im WGS84 durch Anwendung der Gleichung 2.22 ermittelt werden (Schenk, 2001).

$$\mathbf{p}_Z = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_N (\mathbf{R}_M \mathbf{R}_L \mathbf{r} + \mathbf{t}_L + \mathbf{t}_G) + \mathbf{t}_{GPS} \quad (2.22)$$

mit:

\mathbf{r}	gemessene Entfernung
\mathbf{t}_{GPS}	Position der GPS-Antenne im WGS84
\mathbf{t}_L	Translationsvektor zwischen dem Laser-KS und dem INS-KS
\mathbf{t}_G	Translationsvektor zwischen dem LNO-KS und dem INS-KS
\mathbf{R}_Z	Rotationsmatrix zum Übergang von LNO-System in das WGS84
\mathbf{R}_N	Rotationsmatrix zum Übergang vom INS-KS in das LNO-KS, enthält die Rotationswinkel Pitch (p), Roll (r) und Heading (h)
\mathbf{R}_L	Rotationsmatrix zur Überführung von Entfernung \mathbf{r} und Spiegelauslenkung $\boldsymbol{\tau}_i$ in das Laser-KS
\mathbf{R}_M	Rotationsmatrix zum Übergang vom Laser-KS in das INS-KS

Im Allgemeinen erfolgt die Auswertung der Laserscannerdaten nicht im WGS84 sondern in einem verebneten System des lokal bestangepassten Ellipsoids. Es schließen sich somit im Regelfall eine Transformation und Abbildung (z.B. Gauß-Krüger) in eine Projektionsfläche an. Ausführliche Beschreibungen gängiger Abbildungen können Heck (2003) entnommen werden.

2.1.4.2 Streifenanpassung

In der Regel ist das zu befliegende Gebiet so groß, dass mehrere Flugstreifen aufgenommen werden müssen. Im Rahmen der Bildflugplanung werden die Streifen so angeordnet, dass sie sich gegenseitig überlappen. Auf diese Weise versucht man zu verhindern, dass einzelne Teilflächen durch die Laserscannermessung nicht abgedeckt werden. Die Abdeckung des Untersuchungsgebiets erfolgt im Allgemeinen durch mehrere Längsstreifen und gegebenenfalls wenige Querstreifen. Im Folgenden müssen die Laserscannerpunkte je Flugstreifen miteinander verknüpft werden, um einen konsistenten Datensatz zu erhalten. Aufgrund der begrenzten Genauigkeitsbestimmung der äußeren Orientierung basierend auf den GPS/INS-Messungen sowie systematischer Fehler dieser Messsysteme kommt es zu Verkippungen der einzelnen Streifen gegeneinander. Ziel der Streifenanpassung ist es, den Lage- und Höhenunterschied zwischen den einzelnen Streifen möglichst vollständig zu beseitigen.

Gemäß Pfeifer et al. (2005) können die Ansätze zur Streifenanpassung in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe korrigiert jeden Laserscannerpunkt $\mathbf{p}_{i,j} = [\mathbf{x}_{i,j}, \mathbf{y}_{i,j}, \mathbf{z}_{i,j}]^T$ anhand einer geeigneten Korrektionsfunktion $\mathbf{c}_j(\mathbf{p}_{i,j})$ (Gleichung 2.23)¹¹.

$$\mathbf{p}'_{i,j} = \mathbf{p}_{i,j} + \mathbf{c}_j(\mathbf{p}_{i,j}) \quad (2.23)$$

mit:

i	Ordnungsnummer des Punktes	j	Nummer des Flugstreifens
-----	----------------------------	-----	--------------------------

Je nach Art der Korrektionsfunktion wird im einfachsten Fall nur ein konstanter Betrag $\mathbf{c}_j = [\Delta \mathbf{x}_j, \Delta \mathbf{y}_j, \Delta \mathbf{z}_j]^T$ auf jeden Punkt des j -ten Streifens addiert. Oft finden aber auch höhere Polynomfunktionen Verwendung, um Verkippungen zu berücksichtigen. Die zweite Gruppe korrigiert die originären Beobachtungen, aus welchen jeder Punkt $\mathbf{p}_{i,j}$ berechnet wurde. Zu den originären Beobachtungen zählen: die Position $\mathbf{O}(t_i)$, die Orientierung $\mathbf{R}(t_i)$, die Laserentfernung r_i , die Spiegelauslenkung $\boldsymbol{\alpha}_i$ sowie weitere Systemparameter \mathbf{s} . Die Position und die Orientierung weisen eine Abhängigkeit von der Zeit t_i auf. Anhand der Gleichung 2.24 kann im Folgenden der jeweilige korrigierte Punkt $\mathbf{p}'_{i,j}$ berechnet werden (Pfeifer et al., 2005).

$$\mathbf{p}'_{i,j} = f(\mathbf{O}(t_i) + \Delta \mathbf{O}, \mathbf{R}(t_i) + \Delta \mathbf{R}, r_i + \Delta r, \boldsymbol{\alpha}_i + \Delta \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{s} + \Delta \mathbf{s}) \quad (2.24)$$

Um die Korrektionsfunktion \mathbf{c}_j (Gruppe 1) beziehungsweise die Korrekturen der ursprünglichen Beobachtungen $\Delta \mathbf{O}$, $\Delta \mathbf{R}$, Δr , $\Delta \boldsymbol{\alpha}$ und $\Delta \mathbf{s}$ (Gruppe 2) bestimmen zu können, müssen die Unterschiede zwischen den einzelnen Streifen gemessen

¹¹ Der Index i ist eine Laufvariable, welche die aktuelle Nummer des Punktes in Bezug auf die Gesamtanzahl im jeweiligen Streifen j angibt.

werden. Im Gegensatz zu Verknüpfungspunkten im Zuge der Bündelblockausgleichung lassen sich keine homologen Punkte innerhalb des Überlappungsbereiches zweier Flugstreifen finden, da die einzelnen Laserscannerpunkte nur beliebigen Massenpunkten entsprechen. Um dennoch die Unterschiede bestimmen zu können, berechnet man in einem Streifen ein Oberflächenmodell und bestimmt den Abstand der Punkte des anderen Streifens bezüglich des Oberflächenmodells. Alternativ können auch homologe Oberflächenelemente verwendet werden. Es handelt sich dabei um eindeutig identifizierbare Objekte, die durch mehrere Laserscannerpunkte repräsentiert werden und in beiden Flugstreifen auftreten. In der Regel werden Ebenen als homologe Oberflächenelemente in beiden Streifen gesucht.

2.1.4.3 Filterung

Die Interpolation des DGM aus den 3D-Massenpunkten setzt voraus, dass alle Punkte Teil der Geländeoberfläche sind. Im Allgemeinen werden jedoch ebenfalls Echos detektiert, die sowohl durch aufstehende Gebäude als auch durch Vegetation hervorgerufen werden. Diese Punkte gehören nicht zur Geländeoberfläche und würden bei Verwendung innerhalb der DGM-Erstellung wie grobe Fehler wirken und somit das Ergebnis verfälschen. Deshalb müssen die Geländepunkte von den Nichtgeländepunkten getrennt werden. Dieser Klassifizierungsprozess wird als Filterung bezeichnet.

Es existiert eine Reihe von verschiedenen Filterungsalgorithmen. Sie lassen sich hinsichtlich verschiedener Kriterien wie Datenstruktur (Raster vs. unregelmäßig), Erkennung von Diskontinuitäten, Filterkonzept, Anzahl der Iterationen etc. klassifizieren (Sithole, 2005). Trotz teilweise stark verschiedener Konzepte beruht das Erkennen von Nichtgeländepunkten auf der Vermutung, dass diese Punkte eine größere Höhe aufweisen, als die sich in direkter Nachbarschaft befindlichen Geländepunkte. Klassische Filteransätze wie die robuste Filterung mit linearer Prädiktion (Kraus und Pfeifer, 1998) oder die morphologische Filterung mit einem Strukturelement (Vosselman, 2000) haben deshalb im bewegten Gelände Schwierigkeiten mit aufstehender Vegetation (bzw. Gebäuden), bei großflächigen Gebäuden sowie Brücken. Aktuelle Methoden beinhalten deshalb zusätzlich eine Segmentierung bzw. Gruppierung der Punkte (Tovari und Pfeifer, 2005 sowie Sithole und Vosselman, 2005).

2.1.4.4 Interpolation des Digitalen Geländemodells

Die gefilterten Laserscannerpunkte repräsentieren die Geländeoberfläche. Da die Anzahl dieser Punkte sehr groß ist, verwendet man im Allgemeinen nicht die ursprünglich gemessenen und unregelmäßig verteilten Punkte, sondern leitet aus diesen ein DGM in Form eines regelmäßigen Rasters ab. Dabei reduziert sich die Anzahl der Punkte in Abhängigkeit von der Rasterweite. Die Berechnung der Gitterpunkte erfolgt durch Interpolation mit einem geeigneten Verfahren anhand der umgebenden Stützpunkte. Sofern zusätzlich Formlinien und Bruchkanten vorhanden sind, können diese bei der Modellierung explizit berücksichtigt werden. Dadurch erhält man gewöhnlich ein DGM mit höherer Genauigkeit. Kraus (2000) gibt einen Überblick über die gebräuchlichen Ansätze zur Flächeninterpolation. Diese sind: Polynominterpolation, Dreiecksvermaschung sowie Interpolation mit Berücksichtigung der Erhaltensneigung.

Eine einfache und weit verbreitete Methode ist die Polynominterpolation. Anhand einer diskreten Anzahl von Stützpunkten werden die Parameter des angesetzten Polynoms bestimmt. Jedoch neigen Polynome mit steigendem Grad in Bereichen ohne Stützpunkte zum Ausschlagen. Dieser Effekt kann abgemildert (aber nicht behoben) werden, indem man für jeden zu interpolierenden Punkt die Polynomparameter neu berechnet und die Stützpunkte entsprechend ihres Abstandes zur Interpolationsstelle gewichtet. Man bezeichnet diesen Ansatz als Interpolation mit gleitenden Polynomflächen.

Bei der Dreiecksvermaschung (Triangulation) werden die Stützpunkte durch Dreiecke miteinander verbunden. Dabei dürfen sich die Dreiecke nicht überschneiden. Es existieren verschiedene Methoden zur Erzeugung der Dreiecke (Shewchuk, 1997). Im Allgemeinen wird die Delaunay-Triangulation verwendet, da die so gebildeten Dreiecke hinsichtlich der Geländemodellierung optimal sind. Die gesuchten Rasterpunkthöhen entsprechen der Höhe des jeweils gültigen Delaunay-Dreiecks an dieser Stelle.

Sowohl Polynominterpolation als auch Triangulation sind Interpolationsverfahren die systematische Abhängigkeiten zwischen den Stützpunkten nicht explizit im Ansatz berücksichtigen. Prinzipiell sind jedoch gemessene, benachbarte Stützpunkte systematisch korreliert. Die statistische Abhängigkeit kann durch die Autokovarianzfunktion beziehungsweise Autokorrelationsfunktion (Niemeier, 2002) beschrieben werden. Die Interpolationsansätze *Kollokation* (Moritz, 1972) sowie die in großem Maße identische *Interpolation nach kleinsten Quadraten* (Kraus, 1974) nutzen die aus den Daten empirisch ermittelte Autokovarianzfunktion zur Prädiktion von Werten an der jeweiligen Interpolationsstelle. Dabei muss zuvor der Trend innerhalb der Daten zum Beispiel durch eine Polynominterpolation von den Stützpunkten abgespalten werden. Ein weiteres, weit verbreitetes Verfahren, welches die statistischen Abhängigkeiten der Stützpunkte untereinander nutzt, ist das so genannte *Kriging* (Dutter, 1985), welches nach dem südafrikanischen Geostatistiker D.G. Krige benannt wurde. Im Gegensatz zur Kollokation und Interpolation nach kleinsten Quadraten nutzt dieses Verfahren die so genannte Variogramm-Funktion, welche komplementär zur Kovarianzfunktion ist. Kraus (2000) zeigt, dass die Grundgleichung der Interpolation nach kleinsten Quadraten in die Grundgleichung des Krige-Schätzers überführt werden kann. Weiterhin zeigt er, dass der universelle Krige-Schätzer der Kollokation entspricht.

2.2 Verfahren und Methoden der Wattvermessung

Die Wattvermessung ist ein entscheidender Bestandteil der Watt- und Küstenforschung (Wegener, 1979). Sie bildet die Grundlage für Untersuchungen der Watten hinsichtlich morphologischer Veränderungen wie Abtrag, Transport und Anlagerung von Sedimenten sowie deren Einfluss auf Flora und Fauna. Aber auch für die erheblichen wirtschaftlichen Nutzungen (z.B. Schifffahrt, Fischfang, Öl- und Gasgewinnung) sowie die Bedeutung als Lebens- und Arbeitsraum des Menschen sind Geodaten unerlässlich. Um Veränderungen in den Watten feststellen zu können, muss das Gelände großflächig vermessen werden. Die erhobenen Masspunkte werden dabei in der Regel zu einem Geländemodell zusammengefasst.

2.2.1 Terrestrische Vermessung

Die terrestrische Vermessung war lange Zeit die Standardmethode zur Erfassung von Geländeinformationen im Watt. Dabei kamen anfänglich klassische Messgeräte wie Theodolit, Maßband sowie Nivelliertachymeter zum Einsatz. Mit dem Aufkommen von elektrooptischen Distanzmessern ab ca. 1975 konnte eine deutlich höhere Punktzahl pro Zeiteinheit gemessen werden. Heute wird standardmäßig das satellitengestützte RTK-Verfahren eingesetzt. Mit diesem Verfahren konnte nochmals die Effizienz signifikant erhöht werden.

Die direkte örtliche Vermessung der Watten ist mit großen Schwierigkeiten verbunden. Aufgrund des weichen Untergrundes ist ein Einsinken der Vermessungsgeräte unvermeidlich. Die große räumliche Ausdehnung der Watten und die Gezeiten verringern das Zeitfenster für die gezielte Vermessung bestimmter Bereiche. Zudem stellen wasserführende Priele sowie Treibsandzonen eine nicht zu unterschätzende Gefahr dar. Deshalb ist oft der Einsatz von Booten erforderlich. Aufgrund der schwierigen Bedingungen, des Einsatzes von zusätzlichem Material und Transportmitteln sowie des durch die Gezeiten eingeschränkten Zeitfensters ist die örtliche Erhebung von Geodaten mit hohem personellen Aufwand und Kosten verbunden (Grundey und Hake, 1980).

Mit den klassischen Messgeräten wurden hauptsächlich Profile gemessen. Erst mit dem Einsatz leistungsstarker elektrooptischer Distanzmesser konnten auch flächenhafte topographische Geländeaufnahmen wirtschaftlich durchgeführt werden. Dennoch wurden auch weiterhin zumeist Profilmessungen verwendet. Dabei wurden identische Profile in einem festen Rhythmus wiederholt gemessen, um Veränderungen der Morphologie bestimmen zu können.

2.2.2 Photogrammetrie

Aufgrund des Einflusses der Gezeiten, der räumlichen Ausdehnung sowie der Beschaffenheit des Untergrundes ist eine direkte Vermessung nur in kleinen Teilen möglich. Um trotzdem morphologische Veränderungen großräumig messen und nachweisen zu können, sind insbesondere berührungslose Verfahren geeignet. Ein klassisches Verfahren ist die Photogrammetrie.

Um Geländemodelle großflächig abzuleiten, können theoretisch sowohl photogrammetrische Aufnahmen aus der Luft als auch aus dem Weltraum verwendet werden. In der Praxis kommt jedoch nur die Luftbildphotogrammetrie zum Einsatz, da der Flug (im Gegensatz zur Bahn des Satelliten) direkt auf die Gezeiten sowie die Wetterbedingungen abgestimmt werden kann. Die Auswertung der Luftbilder ist schwierig, da Passpunkte im Watt kaum vorhanden sind und die Wattoberfläche eine sehr geringe Textur besitzt. Die stereoskopische Auswertung sowie die Methoden der automatischen Bildzuordnung können deshalb nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden. Um trotz der schwierigen Bedingungen ein genaues Geländemodell zu erstellen, wurde ab ca. 1960 das Wasserlinienverfahren eingesetzt. Das Wasserlinienverfahren ist eine Methode zur Ableitung eines Geländemodells der trocken fallenden Wattfläche. Im Verlaufe einer Halbtide wird das Untersuchungsgebiet mehrfach befliegen und es werden jeweils Luftbilder aufgenommen. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Wasserlinien in den jeweiligen Bildern durch Digitalisierung. Da das Wasser zu- oder abfließt, ist die Höhe einer Wasserlinie nicht konstant. Im Folgenden werden einzelne Punkte der extrahierten Wasserlinien über die Verknüpfung mit Pegelmessungen und Höhenpasspunkten in das jeweilige Höhenbezugssystem überführt (Beschickung). Anschließend wird ausgehend von den beschickten Punkten einer Wasserlinie die Höhe der sonstigen Punkte dieser Linie durch Interpolation bestimmt. Das Verfahren wurde insbesondere im Zeitraum von 1960 bis 1980 verstärkt angewendet. Die Methode bietet den Vorteil, dass die Datenerfassung für ein großes Gebiet innerhalb einer Halbtide erfolgt. Dadurch können Verfälschungen der Messungen durch sich verändernde Morphologie ausgeschlossen werden. Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich mit diesem Verfahren z.B. (Wegener, 1979) und (Schneider, 1969).

2.2.3 Radar

Radar ist ein aktives Verfahren, bei dem elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich ausgesandt werden. Anhand der Laufzeit kann die Entfernung zwischen Sender und Reflektor bestimmt werden. Dabei gelten grundsätzlich die

gleichen Messprinzipien wie beim Laserscanning. Aufgrund der größeren Wellenlänge muss jedoch die Aufnahme in Schrägsicht erfolgen. Dafür ist das Verfahren generell wetterunabhängig.

Es existieren verschiedene Methoden zum Einsatz der Radartechnologie. In der Vermessung findet insbesondere das Synthetic Aperture Radar (SAR) Anwendung, da im Gegensatz zum Real Aperture Radar (RAR) die Auflösung in Flugrichtung (Azimut) wesentlich höher ist. Eine spezielle Methode ist das interferometrische SAR (InSAR), welches durch die Messung von Phasenunterschieden zwischen zwei Signalen verschiedener Antennen eine Ableitung hochgenauer Geländemodelle mit einer Standardabweichung von wenigen Zentimetern ermöglicht (Schwäbisch und Moreira, 1999). Jedoch hat sich dieses Verfahren in der Wattvermessung bisher nicht durchsetzen können und wird praktisch nicht eingesetzt.

Analog zu Luftbildern findet jedoch das Wasserlinienverfahren basierend auf mehreren SAR-Bildern eines Jahres Anwendung. So ermittelt Dannenberg (2004) die jeweilige Wasserlinie durch eine Kantenextraktion. Die Extraktion beruht auf einem skalenadaptiven Verfahren nach einer Wavelet-Transformation. Anschließend werden die bestimmten Wasserlinien durch Pegelmessungen sowie ein Wasserstandsmodell beschickt. Ausgehend von den beschickten Wasserlinien kann durch Interpolation ein DGM berechnet werden.

Das Verfahren eignet sich insbesondere zur Ableitung großräumiger Geländemodelle, da das gesamte Wattenmeer durch Aufnahmen des Satelliten ERS-2 abgedeckt wurde. Jedoch ist die Genauigkeit geringer als beim Wasserlinienverfahren mit optischen Daten. So stammen die verwendeten SAR-Bilder nicht aus einer Halbtide, da der Satellit in der Regel nur innerhalb eines längeren Zeitraums (ERS-2 ca. 35 Tage) den gleichen Bereich überstreicht. Deshalb verfälschen morphologische Veränderungen in dieser Zeitepoche das berechnete DGM. Zudem ist der zeitliche Unterschied der Aufnahme zum mittleren Tidehochwasser nicht beeinflussbar. In ungünstigen Fällen liegen Aufnahmen verschiedener Zeitpunkte bezüglich des Tidehochwassers nahe beieinander. Weiterhin wird die Ableitung der Wasserlinie durch den Einfluss von Speckle-Rauschen erschwert.

2.2.4 Single und Multi Beam Echolotung

Die Single bzw. Multi Beam Echolotung ist ebenfalls ein aktives Messverfahren bei dem ein Schallimpuls ausgesendet wird. Wiederum kann anhand der Laufzeit die Entfernung zwischen Sender und Reflektor bestimmt werden. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Messmethoden ist dieses Verfahren jedoch in der Lage, die Wattoberfläche bei aufstehendem Wasser zu bestimmen. Da die Schallgeschwindigkeit im Wasser hauptsächlich von Temperatur und Salzgehalt abhängig ist, müssen diese Größen vor und während der Messung ermittelt werden.

Bei der Single Beam Echolotung (siehe Abbildung 2.7 links) wird ein Schallimpuls in Nadirrichtung ausgestrahlt. Aufgrund der Eigenbewegung des Schiffes wird der Untergrund im Allgemeinen in Profilen vermessen. Gebräuchliche Abstände liegen bei 25m. Die Single Beam Echolotung ist mit hohen Kosten verbunden, da nur einzeln gepilt wird. Zudem ist eine homogene Erfassung des Wattes aufgrund des in der Praxis großen Profilabstandes nur eingeschränkt gegeben. Multi Beam Echolote können die Nachteile zu einem hohen Maße ausgleichen. Sie senden gleichzeitig mehrere Schallimpulse aus. Man unterscheidet zwischen Ausleger- (Abbildung 2.7 Mitte) und Fächerecholotsystemen. Auslegersysteme bestehen aus zwei Auslegearmen, die an Back- und Steuerbord des Schiffes montiert und ausklappbar sind. Jeder Arm trägt mehrere Einzelschwinger, wobei jeder Einzelschwinger in Nadirrichtung peilt. So wird der Untergrund rasterförmig erfasst. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Auslegearme sehr reparaturanfällig sind und die Manövrierfähigkeit des Peilschiffes stark eingeschränkt ist. Bei Fächerecholotsystemen (Abbildung 2.7 rechts) sind am Bug des Schiffes ein oder zwei (je nach Hersteller) Schwingerköpfe montiert. Diese sind in der Lage, mehrere Messstrahlen fächerförmig auszusenden. Im Gegensatz zum Auslegersystem werden die Schallwellen schräg abgestrahlt. Dadurch ist die abgetastete Fläche abhängig von der Wassertiefe sowie dem Auslenkbereich. Fächerecholotsysteme bieten im Gegensatz zu den Auslegersystemen den Vorteil, dass aufgrund der fächerförmigen Ausstrahlung auch Messungen unterhalb von Schiffen, Pontons etc. möglich sind. Zudem bleibt das Schiff voll manövrierfähig. Nachteilig wirkt sich jedoch die unterschiedliche Größe des Footprintes in Abhängigkeit von der Auslenkung aus (Wenz, 2005 und Krüger, 2005).

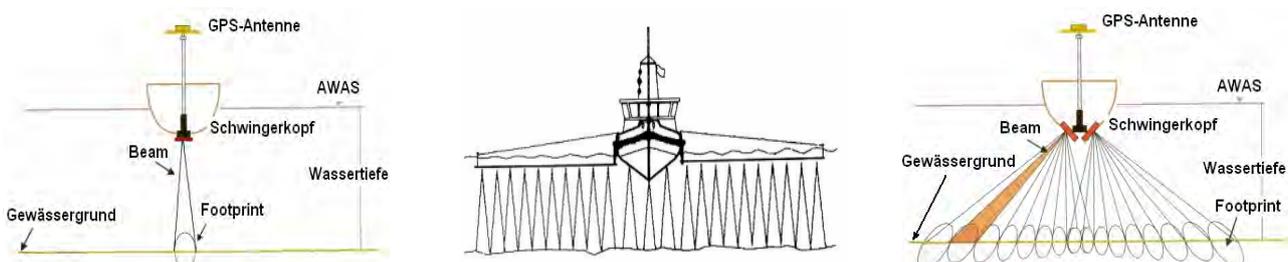


Abbildung 2.7: Prinzip der Echolotung – Single Beam (links), Multi Beam Auslegersystem (Mitte), Fächerecholot (rechts) (Krüger, 2005)

2.3 Vergleich der Methoden mit Airborne Laserscanning

Die im Kapitel 2.2 vorgestellten Methoden zur Wattvermessung ermöglichen die Ableitung von 3D-Geländeeinformationen. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften jedes Verfahrens besitzen sie gegenüber dem Airborne Laserscanning sowohl individuelle Vor- als auch Nachteile. Einen zusammenfassenden Überblick gibt die Tabelle 2.1.

2.3.1 Aufwand der Datenerhebung

Der Aufwand für die Erhebung von 3D-Geländeeinformationen ist generell höher als im Festlandbereich. Dies liegt zum Einen an dem schwer zugänglichen Gelände als auch an dem Einfluss der Tide. Gerade für die Erfassung von größeren Gebieten steigen die Kosten bei terrestrischer Vermessung stark an, so dass dieses Verfahren nur für kleinere, küstennahe Bereiche erwägenswert ist. Auch die Erhebung durch Echolotverfahren ist für größere Flächen nicht wirtschaftlich. Hier kann zwar der Einsatz von Multi Beam Echolotsystemen die Kosten senken. Jedoch besitzen die Trägerschiffe im Allgemeinen einen größeren Tiefgang und sind somit nicht im Flachwasserbereich einsetzbar.

Vorteile besitzen die luft- bzw. satellitengestützten Verfahren für großflächige Modellierungen. Insbesondere die Kosten für den Erwerb von Satellitendaten (sowohl optische als auch Radardaten) sind im Allgemeinen moderat, da keine eigenständige Befliegung notwendig ist. Die Daten können in der Regel problemlos beim jeweiligen Provider erworben werden. Für die Erhebung von Airborne Laserscannerdaten ist dagegen eine eigenständige Befliegung notwendig.

2.3.2 Aufwand der Datenprozessierung

Je nach Art der Datenerhebung müssen verschiedene, teilweise zeit- und somit kostenintensive Schritte unternommen werden, um aus den Daten das gewünschte DGM zu erzeugen. Den geringsten Aufwand benötigen terrestrisch erhobene Daten, da die Stützpunkte nach Abschluss der Messung im einheitlichen Bezugssystem vorliegen. Zudem können schon parallel zur Erhebung im Gelände Plausibilitätskontrollen durchgeführt werden. Die Bestimmung von Stützpunkten mit Hilfe des Wasserlinienverfahrens (sowohl mittels Radar als auch Photogrammetrie) erfordert dagegen einen hohen Aufwand. So müssen die Wasserlinien mit geeigneten Mitteln aus den Bilddaten extrahiert und anschließend beschickt werden. Erst danach können die Stützpunkte abgeleitet werden. Der hohe zeitliche Aufwand bei der Prozessierung von Echolot- als auch Laserscannerdaten begründet sich aus der Verknüpfung der jeweiligen Rohdaten mit GPS- und INS-Messungen, um 3D-Stützpunkte im ETRS89 zu erhalten. Insbesondere bei Laserscannerdaten wird dieser Arbeitsschritt durch den Datenprovider durchgeführt.

2.3.3 Genauigkeit der Stützpunkte

Die erzielbare Lage- und Höhengenaugkeit des einzelnen Stützpunktes sind bezüglich des jeweilsverwendeten Verfahrens unterschiedlich. Die terrestrische Vermessung kann generell Stützpunkte mit einer Standardabweichung in Lage und Höhe unterhalb eines cm liefern. Zu berücksichtigen ist jedoch das Einsinken von Stativen aufgrund des schlammigen Untergrundes sowie das Überführen der Lage und Höhe in das Messgebiet, so dass die Standardabweichung der Höhe in der Regel über einem cm liegt.

Die Genauigkeit von Echolotmessungen wird durch die Transformation (Beschickung) der Stützpunkte in das jeweilige Bezugssystem begrenzt. Mehrere Einflussgrößen verhindern eine Standardabweichung im cm-Bereich. So können zum Beispiel die Bewegungen der Schwinger, insbesondere bei Verwendung von Auslegersystemen, nur eingeschränkt erfasst und berücksichtigt werden. Die Beschickung kann entweder über Pegel oder mittels GPS erfolgen. Prinzipiell liefert die Beschickung der Echolotdaten durch GPS genauere Ergebnisse und ist zu bevorzugen. In der einschlägigen Literatur finden sich keine Angaben hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit. Jedoch enthält der Sonderbericht **SP44** der International Hydrographic Organisation (IHO) Genauigkeitsanforderungen, die realistisch zu erzielen sind. Für Häfen und für die Schifffahrt bedeutende küstennahe Bereiche werden eine Horizontalgenauigkeit von 2m sowie eine Tiefengenaugkeit (beschickt) von 0,25m bei 5m Wassertiefe mit je einem Vertrauensbereich von 95% angegeben.

Die Horizontalgenauigkeit beim photogrammetrischen Wasserlinienverfahren ist hauptsächlich durch die Erfassungsgenaugkeit der Wasserlinie beschränkt. Insbesondere bei flach ansteigendem Gelände sowie Einfluss von Wind und Wellen sinkt die zu erzielende Horizontalgenauigkeit. Wegener (1979) zeigt, dass für die Digitalisierung der Wasserlinien durch einen erfahrenen Auswerter die Standardabweichung in der Lage bei 2m liegt. Die Höhengenaugkeit ist begrenzt durch die Art der Beschickung. Die kleinste Standardabweichung von 2cm wird für direkt durch tachymetrische Aufnahme beschickte Punkte erreicht. Eine höhere Standardabweichung von 7cm ergibt sich für durch Pegel beschickte Punkte (Wegener, 1979). Die ermittelten Standardabweichungen setzen jedoch voraus, dass eine Beschickung durch Tachymetrie oder Pegel möglich ist. Diese Voraussetzungen sind aber nur in küstennahen Bereichen gegeben. Mit steigendem Abstand zu den Pegeln ist aufgrund des Interpolationsfehlers von einer wesentlich schlechteren Höhengenaugkeit auszugehen.

Verwendet man SAR-Daten für das Wasserlinienverfahren, so ist wiederum die Erfassungsgenauigkeit der Wasserlinie der begrenzende Faktor der Lagegenauigkeit. Das durch Dannenberg (2004) entwickelte Verfahren zur automatischen Ableitung der Wasserlinie basiert auf SAR-Bildern mit einer Pixelgröße von 25m. Anhand mehrerer Validierungen zeigte sich, dass die Abweichung der durch Kantenextraktion ermittelten Wasserlinien in der Größenordnung von 2 Pixel liegt. Die Höhengenaugkeit sinkt durch den Lagefehler je nach Geländeneigung. Zudem ist die Standardabweichung der Höhe durch die Güte der Beschickung begrenzt. Da sich der Ansatz auf die Erstellung eines DGM für den fast vollständigen Raum des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres bezieht und nur vergleichsweise wenige Pegelmessungen (<15) mit ungünstiger Verteilung zur Verfügung stehen, liegt die Höhengenaugkeit der Beschickung nur im dm-Bereich. Anhand parallel erhobener Peildaten, welche als Referenz genutzt wurden, konnten die mittlere Differenz und die Standardabweichung bestimmt werden. Für das Jahr 1996 beträgt die mittlere Differenz 0,2m bei einer Standardabweichung von 0,37m sowie für das Jahr 1999 eine mittlere Differenz von 0,21m mit einer Standardabweichung von 0,45m.

Die Lage- und Höhengenaugkeit von Massenpunkten aus Laserscannermessungen beträgt $\sigma_x = \sigma_y = 0,5\text{m}$ bzw. $\sigma_z = 0,15\text{m}$. Die schlechtere Lagegenauigkeit resultiert aus der Tatsache, dass sich Orientierungsfehler aus der Kombination von GPS- und INS-Messungen insbesondere auf diese Komponente auswirken. Die Genauigkeit der Laserscannerpunkte liegt somit in etwa im Niveau des Wasserlinienverfahrens aus photogrammetrischen Bildern. Nur terrestrisch ermittelte Massenpunkte weisen eine deutlich höhere Genauigkeit auf.

2.3.4 Dichte und Verteilung der Stützpunkte

Bei der terrestrischen Messung wird die Dichte und Verteilung der Punkte im Allgemeinen so durch den Messtrupp festgelegt, dass die Morphologie hinreichend genau erfasst werden kann. Insbesondere werden morphologisch bedeutsame Objekte wie Priele, Sandbänke etc. direkt aufgemessen. Dies ist ein großer Vorteil im Rahmen der Modellierung. Alle sonstigen besprochenen Verfahren erzeugen lediglich undifferenzierte Massenpunkte.

Die Dichte und Verteilung der Stützpunkte für Echolotmessungen sind abhängig vom eingesetzten System und dessen Parametern, der Trajektorie des Schiffes sowie für Fächerecholote zusätzlich von der Wassertiefe. Die Verteilung der Punkte ist insbesondere für Single Echolotung im Allgemeinen ungünstig. Der Punktabstand in Fahrtrichtung ist deutlich kleiner als 1m, während die Profile Abstände von mehreren Metern aufweisen. Eine bessere Verteilung und besonders eine höhere Punktdichte werden durch Multi Beam Verfahren erzielt. Je nach Wahl der Parameter werden Punktdichten von deutlich mehr als 1 Punkt/m² erreicht. Aufgrund der hohen Kosten wird jedoch in den meisten Fällen eine wesentlich geringere Punktdichte angestrebt.

Die Dichte und Verteilung von Stützpunkten aus Laserscannermessungen ist ebenfalls abhängig vom eingesetzten System, den Flugparametern sowie der Trajektorie der Plattform. Insbesondere die Wahl des Systems bestimmt das am Boden realisierte Scanmuster. Dabei sind Punktdichten von mehr als 1 Punkt/m² Standard. Zwar steigen auch hier die Kosten mit wachsender Punktdichte an, doch sind die Kosten pro gemessenem Punkt im Allgemeinen geringer als bei der Echolotmessung.

Beim Wasserlinienverfahren werden prinzipiell keine Punkte sondern Linien bestimmt. Die Verteilung der Linien ist abhängig von der Anzahl der verwendeten Bilder, der Geländemorphologie sowie dem jeweiligen Wasserstand. Es bleibt zu beachten, dass Bereiche, die entweder permanent überflutet oder trocken sind, nicht erfasst werden. Im Gegensatz zum luftgestützten, photogrammetrischen Verfahren können bei Verwendung von Satellitendaten die Zeitpunkte des Überflugs nicht individuell festgelegt werden, da sich diese durch die Bahnparameter des Satelliten ergeben. Dies kann je nach Untersuchungsgebiet eine ungünstige Verteilung der Wasserlinien bewirken. Jedoch können auch die Wasserlinien aus photogrammetrischen Aufnahmen eine suboptimale Konfiguration aufweisen, da die Wasserlinien von der Geländemorphologie abhängig sind.

2.3.5 Eignung des jeweiligen Verfahrens

Die vorgestellten Verfahren besitzen jeweils individuelle Vor- und Nachteile, die sie je nach Lage und Größe des Untersuchungsgebietes sowie vorgegebener Genauigkeit als Datenerfassungsmethode präferieren oder ausschließen. Für kleinräumige, begehbare und küstennahe Gebiete bietet sich die terrestrische Vermessung an. Dieses Verfahren liefert eine an die Morphologie angepasste Verteilung der Punkte mit hoher Genauigkeit. Jedoch steigen die Kosten mit wachsender Größe so sehr, dass eine Aufnahme wirtschaftlich nicht mehr tragbar ist. Hier bieten sich Echolotungen an. Insbesondere für nicht zugängliche, wasserführende Bereiche ist dieses Verfahren geeignet. Mit weiter steigender Größe des Untersuchungsgebietes sind besonders das Laserscanning und die photogrammetrische Bestimmung der Wasserlinie geeignet. Da sich das Laserscanning durch eine höhere Punktdichte sowie günstigere Punktverteilung bei gleichzeitig geringeren Kosten auszeichnet, hat es das Wasserlinienverfahren mittels photogrammetrischer Bilder vollständig verdrängt und ist mittlerweile das Standardverfahren zur Ermittlung hochgenauer Digitaler Geländemodelle in den Watten. Die

Anwendung des Wasserlinienverfahrens mittels SAR-Bildern eignet sich aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der Bilder nur für großflächige Aufgabenstellungen mit mittleren Genauigkeitsanforderungen.

Tabelle 2.1: Methoden der Wattvermessung sowie deren Vor- und Nachteile

Methode	Aufwand Daten-erhebung	Aufwand Datenpro-zessierung	Genauigkeit der Stützpunkte	Dichte und Verteilung der Stützpunkte	Vor- und Nachteile
Terrest-riche Vermessung	---	+	+++	+++	+ Hochgenaues Verfahren + Direkte Messung von morphologischen Objekten - Sehr hoher Personalaufwand - Begehbarkeit muss gewährleistet sein
Photo-grammetrie	-	--	+	--	+ Datenerfassung innerhalb einer Halbtide + Geeignet zur Erstellung von großräumigen DGM - Hohe Kosten für Datenerhebung aufgrund mehrfachen Überflugs - Nur eingeschränkte Genauigkeit, aufgrund Beschickung sowie Interpolation
Radar	+	--	--	--	+ Wetterunabhängig + Geeignet zur Erstellung von großräumigen DGM - Verwendung von mehreren SAR-Bildern über einen langen Aufnahmezeitraum (z.B. ein Jahr) notwendig - Einfluss von Speckle auf die Ableitung der Wasserlinien - Beschickung aufgrund ungünstiger Pegelverteilung ungenau
Echolotung	--	--	0	+	+ Direkte, berührungslose Bestimmung von 3D-Punkten durch Einsatz von Echolot, GPS und INS + Messung der Morphologie trotz aufstehendem Wasser - Keine Vermessung von Flachwasserbereichen möglich
Laser-scanning	0	--	+	++	+ Direkte, berührungslose Bestimmung von 3D-Punkten durch Einsatz von Laserscanner, GPS und INS + Erfassung großer Bereiche innerhalb kurzer Zeit - Große Datenmenge, hoher Prozessierungsaufwand - Keine Durchdringung von Wasserflächen

In der Praxis werden heutzutage von den zuständigen Behörden nur die Verfahren Terrestrische Vermessung, Echolotung und Laserscanning eingesetzt. Insbesondere für großräumige Aufnahmen trocken fallender Wattbereiche hat sich dabei das Laserscanning dank seiner Vorteile (geringe Kosten pro Punkt, hohe Punktdichte, große Flächenabdeckung, hohe Genauigkeit) als die Standardmethode etabliert.

2.4 Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Control

In der klassischen Logik ist ein Objekt entweder Element oder kein Element einer Menge. Basierend auf dieser Einteilung sind Verknüpfungoperationen wie Durchschnitt, Vereinigung, Differenz etc. definiert, die solche Mengen miteinander verbinden. Im Ergebnis besitzt auch die entstehende Menge Elemente, die zu ihr gehören. Alle anderen Objekte zählen nicht zur Menge. Es gibt also zwei Zustände, die oft versinnbildlicht werden durch: ja oder nein, schwarz oder weiß, Licht/Strom an bzw. Licht/Strom aus. Unschärfe Mengen wie warm, kalt, schnell, langsam lassen sich dagegen mit dieser Logik nicht erschließend beschreiben.

Die von L.A. Zadeh (1965) entwickelte Fuzzy-Logik erweitert die klassische Logik und Mengenlehre. Sie geht von unscharfen Mengen aus. Dabei hat jedes Element, welches zu einer Menge gehört, zusätzlich einen so genannten Zugehörigkeitsgrad. Dieser Zugehörigkeitsgrad liegt zwischen 0 und 1. Er beschreibt die Zugehörigkeit des jeweiligen Elements zur unscharfen Menge. Je größer der Zugehörigkeitsgrad wird, umso mehr ist dieses Element der unscharfen Menge zugehörig. Die bisherige duale Aussage der Zugehörigkeit zur Menge (ja oder nein) wird somit durch eine unendliche Anzahl an Zwischenstufen erweitert. Analog zur klassischen Logik können alle logischen Operationen von Mengen auch mit unscharfen Mengen durchgeführt werden.¹²

Für die Darstellung von Beziehungen und Sachverhalten in Forschung und Technik eignet sich die Fuzzy-Logik. Zwar gibt es durchaus in der Wissenschaft Vorbehalte, dass die Fuzzy-Logik nur ein unvollkommenes Mittel ist, um die Sachverhalte

¹² Eine gute Einführung in die Thematik liefern Mayer et al. (1993) sowie Träger (1994).

zu beschreiben und adäquater durch Wahrscheinlichkeit bzw. wahrscheinlichkeitsbezogene Ansätze erklärt werden kann¹³. Dennoch zeigt nicht zuletzt die weite Anwendung in der Praxis, dass Fuzzy-Konzepte ein probates Instrument zur Beschreibung von Sachverhalten sind.

Eine besonders gebräuchliche Methode ist das Fuzzy-Control (Träger, 1994). Es wird eingesetzt, um komplexe Prozesse (z.B. chemische Reaktionen, physikalische Vorgänge) zu beschreiben und zu steuern. Man unterscheidet drei Phasen – Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung. In der ersten Phase werden die eingehenden Messgrößen in das Fuzzy-System transformiert. Dazu steht für jede unscharfe Ausgangsmenge eine Zugehörigkeitsfunktion bereit, mit deren Hilfe der scharfe Messwert in einen Zugehörigkeitsgrad der jeweiligen unscharfen Menge überführt werden kann. Im zweiten Schritt erfolgt die Verknüpfung der unscharfen Mengen mit Hilfe logischer Operatoren. Dabei erhält man als Ergebnis je einen Zugehörigkeitsgrad für die unscharfen Mengen der Zielgröße. Im letzten Teilschritt, der Defuzzifizierung, erfolgt die Ableitung der Zielgröße durch eine Umwandlung der Zugehörigkeitsgrade der unscharfen Ergebnismengen.

Der Vorteil des Fuzzy-Controls ist die Möglichkeit, komplexe Interaktionen verschiedener Größen auf einfache Art zu beschreiben (Träger, 1994). Anhand des Ergebnisses (die Zielgröße) lassen sich zudem die im Fuzzy-Control angenommenen Beziehungen evaluieren und gegebenenfalls korrigieren. Insbesondere eignet sich diese Methode zur automatischen Überwachung und Steuerung von Prozessen, ohne zusätzliches manuelles Eingreifen. Im Vorfeld müssen die Verknüpfungsregeln der unscharfen Eingangsmengen für den Teilschritt Inferenz definiert werden. Je nach Anzahl der verwendeten Eingangsgrößen n sowie der Anzahl unscharfer Eingangsmengen r_i je Parameter steigt die Anzahl der notwendigen Verknüpfungsregeln N (Gleichung 2.25).

$$N = \prod_{i=1}^n r_i \quad (2.25)$$

¹³ Eine gelungene Darstellung der Unterschiede zwischen Fuzzy-Logik und wahrscheinlichkeitsbezogenen Ansätzen liefert Bezdek (1994).

3 Stand der Forschung

3.1 Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

Gleichwohl die Ableitung eines DGM in Watt- und Küstengebieten sowie Flüssen und deren Umgebung basierend auf Laserscannermessungen eine in der Praxis aktuelle und komplexe Aufgabe darstellt, ist die Anzahl bisher publizierter Methoden und Algorithmen überschaubar. Als Hauptgrund ist die übliche getrennte Betrachtung der „trockenen“ und „nassen“ Bereiche der Erde zu nennen, die sich in verschiedenen Bezugssystemen, Auswertemethoden und Zuständigkeiten der jeweiligen Behörde manifestiert hat. Je nach Fokus der Vermessungsaufgabe wurde eine entsprechend geeignete Messmethode verwendet. Das Laserscanning wurde in diesem Zusammenhang zur Bestimmung der Landbereiche eingesetzt. Im Hinblick auf ein ganzheitliches Monitoring von Watt-, Küsten- und Flussgebieten besteht ein hoher Bedarf an neuen Strategien zur integrierten Erstellung von DGM.

3.1.1 Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten in Watt- und Küstengebieten

In Ermangelung geeigneter Verfahren und Methoden wurden die Wasserflächen bei den für den Watt- und Küstenschutz zuständigen Behörden auf vereinfachtem Wege abgeleitet. Ausgehend von den Laserscannerdaten eines begrenzten Gebietes (z.B. 1km x 1km) berechnet man ein DOM. Aufgrund externen Wissens über die Wasserhöhe im Untersuchungsgebiet werden alle Stützpunkte unterhalb eines Schwellwertes als Wasserpunkte markiert. Der Schwellwert entspricht der Summe aus vermuteter Wasserhöhe und einem Zuschlag, welcher der Unsicherheit der vermuteten Wasserhöhe sowie dem Einfluss weiterer Faktoren (Wind, Zu- bzw. Ablauf von Wasser etc.) Rechnung trägt. Die Wasserhöhe wird entweder durch zeitgleiche, örtliche Vermessung oder über die Interpolation zwischen mehreren Pegelmessungen bestimmt.

Brzank und Lohmann (2004) entwickelten einen Algorithmus (Abbildung 3.1), der neben der Höhe auch das Merkmal Intensität nutzt. Als Ausgangsdaten werden jeweils ein interpoliertes Höhen- und Intensitätsraster verwendet. Der Ansatz fußt auf der Annahme, dass die Intensitätswerte im Bereich der Wasserflächen signifikant geringer sind als für Wattflächen (siehe Kapitel 2.1.2). Durch die Extraktion von lokalen Minima aus dem Digitalen Oberflächenmodell mit Hilfe der Wasserscheidentransformation (Wegner et al., 1995) werden potentielle Wasserquellbereiche gefunden. Liegt der jeweilige Mittelwert der Intensität des Quellbereiches unterhalb eines a priori festgelegten Schwellwertes, so wird die Region als Wasserfläche erkannt. Aufgrund der zufälligen Messfehler, Wind und Gezeitenwirkung entsprechen die Quellbereiche nicht der gesamten gesuchten Wasserfläche. Deshalb wird ein iteratives, durch Überwachung der Höhen- und Intensitätswerte gesteuertes Regionenwachstum durchgeführt, welches die gesamte, zusammenhängende Wasserfläche extrahiert. Dazu wird aus den Höhenwerten der Wasserregion eine ausgleichende Ebene berechnet. Anschließend dehnt man die Region durch Dilatation mit einem Kreis als Strukturelement so aus, dass die Region sich in alle Richtungen um jeweils ein Pixel ausbreitet. Nachfolgend wird jedes Randpixel anhand seines jeweiligen Abstandes zur ausgleichenden Ebene sowie des Intensitätswertes in die Klassen „Wasser“ oder „Watt“ eingeteilt. Ein Pixel wird als Wasser klassifiziert, wenn der Abstand zur ausgleichenden Ebene kleiner als ein vorgegebener Schwellwert h und der Intensitätswert kleiner als ein vorgegebener Schwellwert i ist. Alle klassifizierte Landpunkte werden von der dilatierten Region entfernt. Sofern eine dilatierte Region ein anderes lokales Minimum überlappt, wird dieses Bestandteil dieser Region. Der iterative Prozess aus Dilatation und Klassifizierung der Randpunkte erfolgt solange, bis alle Randpunkte als Land klassifiziert wurden.

In praktischen Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass dieser Ansatz nur eingeschränkt nutzbar ist. Ein wesentliches Problem besteht in der Tatsache, dass das zu klassifizierende DOM im Allgemeinen aus Daten verschiedener Flugstreifen gebildet wird. Da die Wasserhöhe innerhalb eines tidebeeinflussten Gebietes zeitlich nicht konstant ist und die Flugstreifen nacheinander gemessen werden, treten in den Überlappungsbereichen Höhengsprünge innerhalb von zusammenhängenden Wasserflächen auf. Zudem verhindert die Verwendung von interpolierten Gitterdaten die Berücksichtigung der Punkteverteilung der originären Laserdaten.

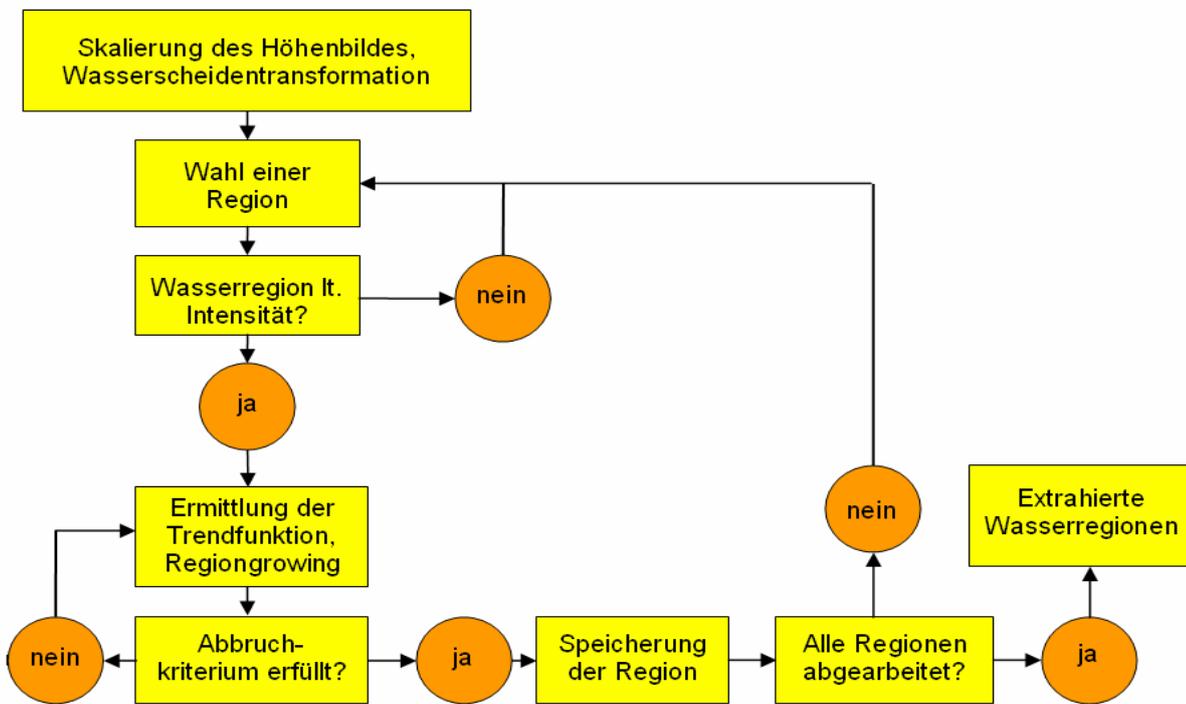


Abbildung 3.1: Flussdiagramm zur Extraktion von Wasserflächen mit Höhen- und Intensitätsdaten (Brzank und Lohmann, 2004)

3.1.2 Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten in Flussgebieten

Im Hinblick auf vermehrt auftretende Überflutungen im mitteleuropäischen Raum gibt es zahlreiche Bestrebungen, zusammenhängende DGM für die Flussbetten sowie angrenzende Gebiete zu erstellen. Mit Ausnahme des bathymetrischen Lidar, welches aufgrund starker Trübung der Flüsse nur begrenzt einsetzbar ist, gibt es kein Verfahren, welches die Wasser- und Landgebiete zusammenhängend aufmessen kann. Im Allgemeinen wird für die Erfassung des Flussbettes das Echolotverfahren und für die umgebenden Landbereiche das Laserscanning eingesetzt. Im Folgenden müssen die Daten beider Methoden vereinigt werden, um das DGM abzuleiten. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Datensätze hinreichend überlappen, um Extrapolation zu vermeiden. Brügelmann und Bollweg (2004) betonten, dass insbesondere bei der Erstellung von DGM für Flüsse und deren Umgebung nicht gemessene Zonen am Uferrand auftreten können, da die Echolotmessung aufgrund des Tiefgangs des Messbootes eine Mindestwasserhöhe erfordert.

Brockmann und Mandlbürger (2001) entwickelten einen zweistufigen Ansatz (Abbildung 3.2), der die Begrenzungslinie eines Flusses aus Laserscanner- und Echolotdaten ableiten kann. Dazu werden ausgehend von der bekannten Gewässerachse innerhalb eines Bandes (Beispiel Oder – 60m Breite) alle Laserscannerpunkte ermittelt, in das Profilkordinatensystem des Flusses (Querabstand, Kilometrierung, Höhe) transformiert und nach aufsteigender Kilometrierung geordnet. Durch Mittelbildung bestimmt man anschließend alle 100m 1D-Wasserspiegellagen, welche durch ein Interpolationsverfahren in ein digitales Modell der Wasseroberfläche (DWM) überführt werden. Im Folgenden startet die erste Stufe des Ansatzes mit der Bestimmung eines DGM aus allen Laserscannerpunkten einschließlich der Wasseroberfläche (DGM-Laser). Anschließend wird ein Differenzmodell aus dem DGM-Laser und dem DWM berechnet. Die 20cm-Höhenlinie des Differenzmodells auf beiden Seiten des Flusses dient als vorläufige Wasserliniengrenze (WLG). In der zweiten Stufe wird die bisherige Lösung hinsichtlich der Lagegenauigkeit verbessert. Dazu werden alle Laserpunkte innerhalb der vorläufigen WLG eliminiert. Anschließend ersetzt man diese durch die Echolotdaten innerhalb der vorläufigen WLG. Nun wird ein vorläufiges Geländemodell DGM-W, welches ebenfalls das Gewässerbett beinhaltet, aus den zusammengeführten Daten bestimmt. Wiederum wird ein Differenzmodell aus dem vorläufigen DGM-W und dem DWM gebildet. Die 0m-Höhenlinie auf beiden Seiten entspricht der gesuchten WLG. Diese kann nachfolgend verwendet werden, um das DGM-W aus den Laserscannerdaten außerhalb sowie den Echolotdaten innerhalb der WLG zu berechnen.

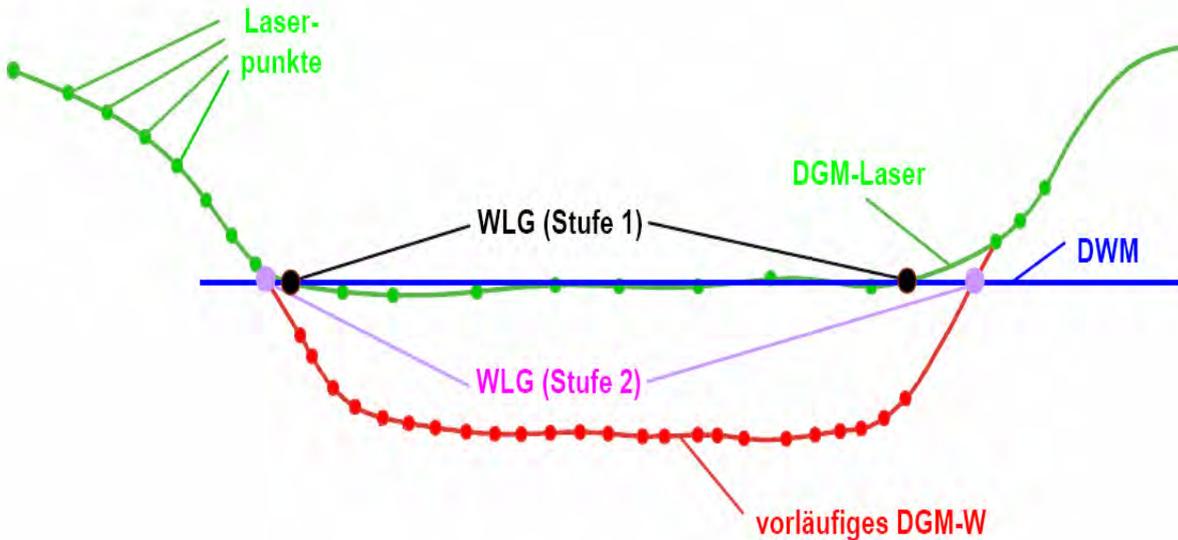


Abbildung 3.2: Ableitung der Wasser-Land-Grenze (Brockmann und Mandlbürger, 2001, verändert)

Mandlbürger (2006) entwickelte einen weiteren Ansatz zur Ableitung der Wasser-Land-Grenze. Im Gegensatz zum bisherigen Verfahren werden keine Daten des Gewässerbetts benötigt. Der Algorithmus startet mit der Selektion aller Laserpunkte des Flussbereiches inklusive der Uferböschung. Anschließend werden alle Punkte in das Profilkordinatensystem transformiert und die Punkte nach aufsteigender Stationierung s geordnet. Dann wird die Punktwolke in Abschnitte mit fester Stationierungslänge l zerlegt, wobei jedes Teilstück i alle Punkte eines Intervalls $[s_i - 0.5l, s_i + 0.5l]$ umfasst. Durch die robuste Filterung mit linearer Prädiktion (Kraus und Pfeifer, 1998) können die Vegetationspunkte eliminiert werden. Anschließend entfernt man alle Laserpunkte auf der Wasseroberfläche ausgehend vom DWM, welches analog zum bestehenden Algorithmus aus den Laserscannerdaten sowie der Flussachse abgeleitet wird. Alle Laserpunkte innerhalb eines Hörschwelwertes bezüglich des DWM werden als Wasserpunkte klassifiziert. Für jedes Segment wird nun aus den Punkten der linken und rechten Uferböschung jeweils eine ausgleichende Gerade bestimmt. Diese werden mit dem DWM verschnitten, so dass für jede Uferseite jeweils ein Schnittpunkt, welcher der WLG entspricht, entnommen werden kann. Im Anschluss werden die Schnittpunkte vom Profil- in das Projektkordinatensystem transformiert und entsprechend der Anordnung der Segmente miteinander verknüpft. Gegebenenfalls können die Wasserlinienpunkte in Abhängigkeit von der Krümmung des Gewässerlaufs verdichtet bzw. ausgedünnt werden.

Eine weitere Variante zur Ableitung der Wasserflächen entwickelten Cobby et al. (2001). Der Algorithmus stützt sich auf die Annahme, dass innerhalb von Wasserflächen aufgrund gerichteter Reflexion kaum Echos empfangen werden. Im ersten Schritt werden die Laserpunkte in ein regelmäßiges Gitter (in genannter Publikation – Gitterweite: 2m) einsortiert. Nachfolgend werden alle Zellen mit mindestens einem Laserpunkt durch Dilatation mit einem geeigneten Strukturelement vergrößert. Dieses muss so gewählt werden, dass einerseits auftretende Lücken innerhalb des Landes geschlossen werden aber andererseits sich bezüglich des Flusses gegenüberliegende Zellen nicht vereinigen. Anschließend erfolgt eine morphologische Erosion der Zellen. Alle leeren Gitterelemente zwischen benachbarten Regionen bilden die vorläufig extrahierte Wasserfläche. Da jedoch im Allgemeinen auch im Wasser vereinzelt Laserpunkte aufgrund eines kleinen Inzidenzwinkels (Senkrechtmessung) oder turbulentem Wasser (Huising und Gomes Pereira, 1998) gemessen werden, zielt ein weiterer Schritt auf die Entfernung der dadurch entstehenden Lücken im extrahierten Wasserkörper. Dazu wird die vorläufig extrahierte Wasserfläche erneut dilatiert, um diese Lücken zu schließen, und anschließend erodiert.

3.1.3 Evaluation der Ansätze zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

Die im Kapitel 3.1.2 vorgestellten Verfahren sind Ansätze zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten. Sie basieren teilweise auf stark unterschiedlichen Ideen, die auf verschiedenen Voraussetzungen beruhen und in individuelle Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 3.1) münden. Im Hinblick auf die Entwicklung eines geeigneten Algorithmus müssen diese Merkmale analysiert und bewertet werden.

Tabelle 3.1: Methoden zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten – Vor- und Nachteile

Verfahren	Voraussetzungen	Vor- und Nachteile
Wasserhöhe aus externem Wissen	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten oder -gitter ○ Wasserhöhe 	<ul style="list-style-type: none"> + Einfaches Verfahren - Im Allgemeinen fehlerhaftes Ergebnis, da Wasserhöhe aufgrund der Extrapolation sehr ungenau ist - Berücksichtigung von Windeinflüssen sowie unterschiedlichen Wasserhöhen schlecht möglich - Keine Verwendung reflexionsbeschreibender Merkmale (z.B. Intensität, Punktdichte etc.)
Lokale Minima und Intensität (Brzank und Lohmann, 2004)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Interpoliertes Höhen- und Intensitätsraster ○ Schwellwerte für Klassifizierung 	<ul style="list-style-type: none"> + Verwendung von Höhe und Intensität + Extraktion von Wasserflächen unterschiedlicher Höhe - Keine Berücksichtigung der systematischen Abhängigkeit der Intensität vom Inzidenzwinkel - Fehlerhaftes Ergebnis bei der Klassifikation eines DOM, welches aus mehreren Flugstreifen gebildet wurde, aufgrund von Höhensprüngen innerhalb zusammenhängender Wasserflächen - Klassifikationsparameter müssen a priori bekannt sein
Verschneidung von bathymetrischen und Laserscannerdaten (Brockmann und Mandlbürger, 2001)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bathymetrische und Laserrohdaten ○ Gewässerachse 	<ul style="list-style-type: none"> + Genaues Verfahren - Bathymetrische Daten sowie Gewässerachse benötigt - Keine Verwendung reflexionsbeschreibender Merkmale (z.B. Intensität, Punktdichte etc.)
Verschneidung der Uferböschung mit Wasserspiegel (Mandlbürger, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten ○ Gewässerachse 	<ul style="list-style-type: none"> + Keine bathymetrischen Daten benötigt - Ungenaue Lösung im Falle flacher Uferböschungen - Keine Verwendung reflexionsbeschreibender Merkmale (z.B. Intensität, Punktdichte etc.)
Dilatation und Erosion (Cobby et al., 2001)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten ○ Geschätzte Gewässerbreite 	<ul style="list-style-type: none"> + Einfaches Verfahren mit geringen Voraussetzungen - Geringe bis keine Punktmessungen im Wasserbereich sind Voraussetzung - Unzureichende Verwendung reflexionsbeschreibender Merkmale (z.B. Intensität etc.)

Das einfachste Verfahren ist die Klassifikation mittels externen Wissens über die Wasserhöhe. Das Ergebnis ist jedoch nur bedingt genau. Um Einflüssen wie Wind sowie Wasserzu- und -ablauf Rechnung zu tragen, wird die Wasserhöhe um einen zusätzlichen Puffer erhöht, so dass tendenziell zu viele Wasserpunkte klassifiziert werden. Zudem ist die Wasserhöhe, die gewöhnlich über Pegelmessungen mit anschließender Inter-/Extrapolation gewonnen wird, zumeist sehr ungenau. Weiterhin werden höher gelegene Wasserflächen nicht erkannt.

Die Klassifikation der Wasserflächen basierend auf der Extraktion von lokalen Höhenminima mit geringer durchschnittlicher Intensität (Brzank und Lohmann, 2004) beseitigt einen Großteil der bestehenden Nachteile. Neben der Höhe findet zusätzlich der Parameter Intensität Verwendung, der als Entscheidungskriterium genutzt wird. Zudem können Wasserflächen verschiedener Höhen (aufgrund der Extraktion von lokalen Minima) ermittelt und Zu- und Ablauf von Wasser (Schrägebene) berücksichtigt werden. Jedoch führen Höhensprünge innerhalb zusammenhängender Wasserflächen aufgrund der Erstellung des DOM aus mehreren Flugstreifen unterschiedlicher Aufnahmezeit zu einer fehlerhaften Klassifikation. Dieser Effekt kann vermieden werden, indem jedes DOM nur aus den Daten eines Flugstreifens gebildet wird. Dennoch ist diese Methode nur eingeschränkt anwendbar, da die systematische Abhängigkeit der Intensität vom Inzidenzwinkel nicht modelliert wird. Ferner wird das Merkmal Punktdichte nicht eingesetzt. Zudem müssen die benötigten Schwellwerte für die Klassifikation bekannt sein.

Das Verfahren zur Ableitung der Wasser-Land-Grenze durch Verschneidung von Laserscanner- und bathymetrischen Daten (Brockmann und Mandlbürger, 2001) ist für die Klassifikation von Wattbereichen kaum geeignet, da sowohl die Achsen aller zu diesem Zeitpunkt wasserführenden Priele als auch die zugehörigen bathymetrischen Daten der Prielsohlen benötigt werden. Diese sind in der Regel insbesondere mit wachsender Größe des Untersuchungsgebietes nicht vorhanden. Ebenso ist die Methode der Verschneidung von Uferböschungen mit dem Wasserspiegel (Mandlbürger, 2006) nicht geeignet. Zwar benötigt dieses Verfahren keine bathymetrischen Daten, jedoch müssen wiederum die Gewässerachsen bekannt sein, um das DWM bilden zu können. Ferner müssen die wasserflächenbegrenzenden Böschungen eine gewisse Neigung aufweisen, damit der Schnittpunkt zwischen Böschung und Wasserfläche eine signifikante Lagegenauigkeit aufweist. Davon kann man jedoch für große Teile des Wattes nicht ausgehen.

Die Methode der Dilatation und Erosion der Laserpunktzellen (Cobby et al., 2001) ist ein einfaches, dennoch sehr effektives Verfahren zur Ableitung der Wasserflächen. Der Ansatz benötigt neben den Laserscannerdaten nur die Gewässerbreite für die Bestimmung der Größe des Strukturlinienelementes. Jedoch versagt dieser Ansatz, wenn die Grundannahme – kaum/keine Punktmessungen im Bereich von Wasserflächen – nicht erfüllt ist. Zudem ist mit einem fehlerhaften Klassifikationsergebnis zu rechnen, wenn im Untersuchungsgebiet Wasserflächen unterschiedlicher Breite (z.B. ein breiter Hauptpriel mit mehreren kleinen Seitenpriele) auftreten oder benachbarte Wasserflächen zu dicht beieinander liegen.

3.2 Extraktion von Strukturlinien

Die Extraktion von Strukturlinien aus Laserscannerdaten war und ist ein wichtiges Forschungsgebiet, wobei insbesondere die Bruchkanten von großem Interesse sind. Die hohe Bedeutung ergibt sich aus der Tatsache, dass das interpolierte DGM speziell im Bereich von auftretenden Bruchkanten die größten Höhenabweichungen aufweist. Berücksichtigt man die Bruchkanten innerhalb der Modellierung des DGM, so kann eine beträchtliche Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Zudem werden sie benötigt, um Laserscannerdaten im Hinblick auf die Geländestruktur zu reduzieren (Brügelmann, 2000). Weiterhin sind Bruchkanten und Formlinien charakteristische und objektbeschreibende Strukturen, die als direkte Indikatoren für Elemente (z.B. Dämme, Gräben, Häuser etc.) im DGM dienen. Eine Extraktion dieser Linien ermöglicht prinzipiell eine Erkennung und Extraktion der sie beinhaltenden Objekte.

Da die Begriffe Bruchkante, Formlinie und Strukturlinie durchaus unterschiedlich verwendet werden, sollen diese hier für den weiteren Verlauf der Arbeit kurz definiert werden. Bruchkanten sind 3D-Linien der Geländeoberfläche. Quer zur Ausbreitungsrichtung tritt ein Neigungssprung auf. Die Neigung (entspricht der ersten Ableitung) setzt sich nicht stetig fort, weshalb an dieser Stelle keine Krümmung berechnet werden kann. Formlinien sind ebenfalls 3D-Linien der Geländeoberfläche. Im Gegensatz zu Bruchkanten setzt sich die Neigung quer zur Linie kontinuierlich fort, wobei der Betrag der Krümmung an der Stelle der Formlinie maximal wird. Die Strukturlinie fungiert als Oberbegriff. Sie beinhaltet sowohl die Bruchkante als auch die Formlinie.

In der Literatur finden sich bisher nahezu ausschließlich Ansätze, die sich mit der Extraktion von Bruchkanten beschäftigen. Jedoch können diese prinzipiell auch zur Bestimmung von Formlinien eingesetzt werden, da sich beide Linienformen aus einer stützpunktbefahenen Darstellung der Geländeoberfläche (z.B. unregelmäßige Laserpunktwolke) praktisch nicht unterscheiden lassen. Die Ansätze können bezüglich ihrer Herangehensweise in zwei Gruppen eingeteilt werden. Dieses sind der rasterbasierte sowie der punktbasierte Ansatz. Rasterbasierte Methoden nutzen für die Extraktion aus den unregelmäßigen Punkten gewonnene Gitterstrukturen. Im Allgemeinen handelt es sich um adaptierte Methoden der Bildverarbeitung. Punktbasierte Ansätze hingegen bedienen sich der direkt gemessenen Punktwolke. Im Allgemeinen haben diese Verfahren den Vorteil, dass kein Genauigkeitsverlust aufgrund des Übergangs zu einem regelmäßigen Raster auftritt.

3.2.1 Rasterbasierte Ansätze

Gomes-Pereira und Wicherson (1999) entwickelten einen Algorithmus zur Ableitung von Bruchkanten in Flusslandschaften. Dabei konzentrieren sie sich insbesondere auf typische morphologische Elemente wie Deiche. Dem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass Bruchkanten dort auftreten, wo das Gelände vom horizontalen in einen geneigten Zustand übergeht. Mit Hilfe des Prewitt Kantenoperators wird ein Neigungsbild aus dem Höhengitter abgeleitet (siehe Abbildung 3.3). Ausgehend von einem durch den Nutzer a priori zu bestimmenden Schwellwert werden die Pixel in ebene und geneigte Elemente unterteilt. Anschließend erfolgt für jedes geneigte Pixel eine Analyse, ob es sich um einen Bruchkantenpunkt handelt. Sofern für ein geneigtes Element in seiner direkten 8-Punkt-Nachbarschaft mindestens ein ebenes sowie ein geneigtes Pixel liegen, wird es als Bruchkantenpunkt klassifiziert. Alle zusammengehörigen Punkte werden im Folgenden in Vektorlinien überführt.

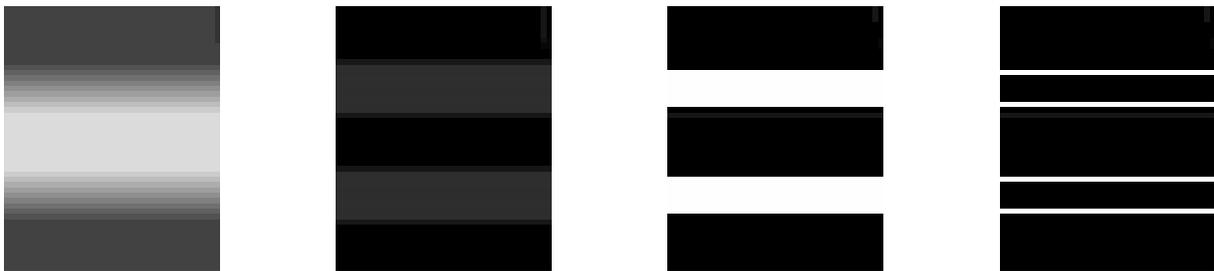


Abbildung 3.3: Ableitung von Bruchkanten an einem Damm mit dem Prewitt Kantenoperator: Höhenraster des Damms (links außen), Neigungsraster durch Anwendung des Prewitt Kantenoperator (links), ebene und geneigte Bereiche (rechts), extrahierte Bruchkanten (rechts außen)

Brügelmann (2000) entwarf einen Ansatz, der auf der Bestimmung der zweiten Ableitung in Verbindung mit einem nachfolgenden Hypothesentest fußt. Die Grundannahme ist, dass Bruchkanten die Grenzen homogener Regionen bilden. Mit Hilfe eines Homogenitätskriteriums, z.B. der zweiten Ableitung, können deshalb Punkte der Kante bestimmt werden. Basierend auf den Untersuchungen von Förstner (1998) wird ein Pixel als potentielles Bruchkantenelement klassifiziert, sofern die Testgröße \mathbf{z}_2 , gebildet aus den quadrierten Elementen der zweiten Ableitungen - \mathbf{d}_{cc} , \mathbf{d}_{cr} und \mathbf{d}_{rr} - jeweils geteilt durch die quadrierten zweiten Ableitungen des Bildrauschens - σ_{ncc} , σ_{nrc} und σ_{nrr} -, größer ist als das Quantil $\chi^2_{3,\alpha}$ mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α (Gleichung 3.1).

$$z_2 = \frac{d_{cc}^2}{\sigma_{n_{cc}}^2} + \frac{d_{cr}^2}{\sigma_{n_{cr}}^2} + \frac{d_{rr}^2}{\sigma_{n_{rr}}^2} \quad (3.1)$$

Da mit jeder zusätzlichen Ableitung der Rauschanteil steigt, ist es ratsam, das Höhengitter vorher zu glätten. Mit Hilfe des Gauss-Operators können die zweiten Ableitungen bei gleichzeitiger Glättung bestimmt werden (Gleichungen 3.2a-c).

$$\frac{\partial^2}{\partial c^2} G_s(c, r) = \frac{c^2 - s^2}{s^4} G_s(c, r) \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial c \partial r} G_s(c, r) = \frac{cr}{s^4} G_s(c, r) \quad (3.2b)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} G_s(c, r) = \frac{r^2 - s^2}{s^4} G_s(c, r) \quad (3.2c)$$

mit

$G_s(\mathbf{c}, \mathbf{r})$ Gauss-Operator

s

Standardabweichung des Gauss-Operators

Die zweiten Ableitungen des Bildrauschens können direkt aus der Standardabweichung des Bildrauschens σ_n , welche aus horizontalen Bereichen des Höhengitters ermittelt werden kann (Förstner, 1998), berechnet werden (Gleichungen 3.3a-b).

$$\sigma_{n_{cc}}^2 = \sigma_{n_{rr}}^2 = \frac{3}{16\pi s^6} \sigma_n^2 \quad (3.3a)$$

$$\sigma_{n_{cr}}^2 = \sigma_{n_{rc}}^2 = \frac{1}{16\pi s^6} \sigma_n^2 \quad (3.3b)$$

Nach erfolgtem Hypothesentest entstehen gewöhnlich größere Regionen, welche die gesuchten Bruchkanten beinhalten (siehe Abbildung 3.4 links). Analog zum Ansatz von Gomes-Pereira und Wicherson (1999) müssen die Regionen durch ein Ausdünnungsverfahren in Pixelketten umgewandelt werden. Brügelmann (2000) verwendet eine Non-Maxima-Suppression, welche die Richtung der maximalen Krümmung berücksichtigt. Ein Bruchkantenpixel wird genau dort klassifiziert, wo das lokale Maximum der Testgröße z_2 auftritt. Anschließend verbindet man alle zusammengehörigen Punkte zu Bruchkantenketten. Die Höhe eines jeden Punktes ergibt sich aus dem leicht geglätteten Höhenraster, um den Einfluss von Rauschen zu reduzieren. Im letzten Schritt werden die Pixelketten in 3D-Vektorpolygone transformiert, welche anschließend durch eine kubische Splineinterpolation geglättet werden.



Abbildung 3.4: Ableitung von Bruchkanten an einem Damm mit dem Gauss-Operator in Verbindung mit einem Hypothesentest (Brügelmann, 2000): Testgröße z_2 (links außen), Bruchkantenregionen nach dem Hypothesentest (links), Bruchkantenpunkte nach Non-Maxima-Suppression (rechts), interpolierte Vektorbruchkanten (rechts außen)

In der Literatur finden sich weitere Ansätze, mit denen Bruchkanten durch den Einsatz von Bildverarbeitungsoperatoren aus Rasterbildern abgeleitet werden. So verwenden Gomes-Pereira und Jansen (1999) den Laplace-Operator und Sui (2002) den Canny-Operator. Da das zugrunde liegende Prinzip sich von Brügelmann (2000) nur unwesentlich unterscheidet, wird auf eine weiterführende Betrachtung verzichtet.

3.2.2 Punktbasierte Ansätze

Die meisten punktbasierten Ansätze beruhen auf der Oberflächenrekonstruktion der Bruchkantenumgebung mit anschließender Ableitung der 3D-Bruchkante. Das Ziel ist die möglichst genaue Rekonstruktion der Geländeoberfläche innerhalb der Bruchkantenumgebung aus den Laserscannerpunkten mittels einer oder mehrerer geeigneter mathematischer Funktionen. Dazu wird ein Modell definiert, welches a priori die Anzahl der gesuchten Bruchkanten sowie die Oberflächenform in der unmittelbaren Umgebung beschreibt. Nachdem die Parameter der Funktion geschätzt wurden, kann die 3D-Bruchkante mit Hilfe einer geeigneten Vorschrift aus diesen abgeleitet werden. Brzank (2001) geht in seinem Modell von einer Bruchkante aus. Diese wird durch den Schnitt zweier Flächen gebildet. Für die Approximation der beiden

Flächen verwendet man je eine Ebene (Abbildung 3.5 links). Anhand einer zwingend notwendigen Näherung der Bruchkante im Grundriss können die Laserscannerpunkte der jeweiligen Ebene zugeordnet werden. Diese ist entweder aus Vorwissen bekannt oder kann durch den Einsatz von Kantenoperatoren aus einem interpolierten DGM abgeleitet werden. Innerhalb einer iterativen Kleinste-Quadrate-Ausgleichung (Gleichungen 3.4a-c) werden die Parameter der Ebenen solange bestimmt, bis die erneute Zuordnung der Laserscannerpunkte anhand der Schnittlinie der beiden Ebenen keine Veränderungen hervorruft oder eine vorher definierte maximale Iterationsanzahl erreicht ist. Da die Approximationsgüte der jeweiligen Oberflächenseite durch jede mathematisch festgelegte Funktion mit steigender Flächengröße immer geringer wird, zerlegt man die 2D-Bruchkantennäherung in einzelne sich überlappende Teilstücke (Abbildung 3.5 rechts). Für jede so genannte Recheneinheit werden die Ebenenparameter berechnet. Je Recheneinheit wird genau ein 3D-Punkt der jeweiligen Schnittgeraden extrahiert. Er ergibt sich als Schnittpunkt zwischen der extrahierten Schnittgerade sowie einer Ebene, welche senkrecht auf der Schnittgeraden steht und den Schwerpunkt aller Laserpunkte der Recheneinheit beinhaltet. Die gesuchte Bruchkante ergibt sich als Folge dieser extrahierten Punkte. Gegebenenfalls erfolgt die Berechnung eines Splines anhand der Stützpunkte.

$$r_{i,l} = \underline{a}_l X_{i,l} + \underline{b}_l Y_{i,l} + \underline{c}_l - Z_{i,l} \quad (3.4a)$$

$$r_{i,r} = \underline{a}_r X_{i,r} + \underline{b}_r Y_{i,r} + \underline{c}_r - Z_{i,r} \quad (3.4b)$$

$$r_i = \underline{a}_l X_{i,l} + \underline{b}_l Y_{i,l} + \underline{c}_l - \underline{a}_r X_{i,r} - \underline{b}_r Y_{i,r} - \underline{c}_r \quad (3.4c)$$

mit:

$\underline{a}_l, \underline{b}_l, \underline{c}_l$	Parameter der linken Ebene	$\underline{a}_r, \underline{b}_r, \underline{c}_r$	Parameter der rechten Ebene
i	Punktindex	$r_{i,l}, r_{i,r}, r_i$	Verbesserungen aus der Ausgleichung

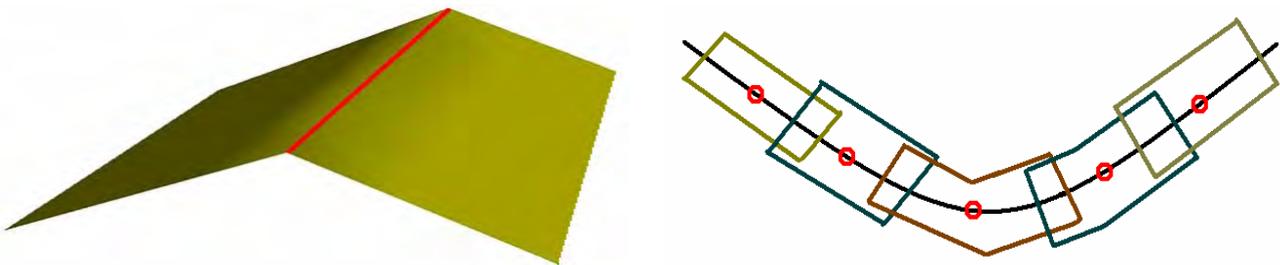


Abbildung 3.5: Flächenrekonstruktion mit einem Ebenenpaar: schneidendes Ebenenpaar mit Bruchkante (links), überlappende Recheneinheiten mit abgeleiteten Bruchkantenpunkten und daraus gebildetem Spline (rechts)

Briese (2004) griff den Ansatz auf und implementierte eine robuste Filterung. Bei der iterativen Bestimmung der Parameter des Ebenenpaars werden die ursprünglichen Beobachtungen der i . Ausgleichung in Abhängigkeit von der zugehörigen Verbesserung aus der Ausgleichung $i-1$ gewichtet (Kraus und Pfeifer, 1998). Dadurch kann der Algorithmus auch in Gebieten mit Vegetation eingesetzt werden, ohne die Laserscannerdaten vorher zu filtern. Zudem sinkt der Einfluss grober Fehler in den Beobachtungsdaten.

Briese (2004) beschäftigte sich ebenfalls mit der Ableitung der a priori benötigten 2D-Bruchkantennäherung. Statt selbige vorher z.B. durch Bildverarbeitung zu generieren, benötigt die verbesserte Variante nur die Näherung für eine Startrecheneinheit. Die aus dieser Recheneinheit gewonnene Bruchkantenlösung wird sukzessive über das Ende der Recheneinheit extrapoliert und für die Initialisierung der Folgenden benutzt. Der Prozess aus Lösung der jeweiligen Recheneinheit und Extrapolation der Schnittlinie wird solange durchgeführt, bis die Ebenen des letzten Paares genähert parallel zueinander sind. Als Kriterium dient der Schnittwinkel des bestimmten Ebenenpaares, der sich um einen vorgegebenen Betrag von 180° unterscheiden muss. Eine zweite Variante benötigt statt eines Startsegmentes lediglich einen Startpunkt auf der Bruchkante. Dazu bestimmt man die Parameter einer Quadrik (allgemeine Fläche zweiter Ordnung) der Startrecheneinheit (Gleichungen 3.5a und 3.5b) durch vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Im Folgenden werden die Eigenvektoren sowie die zugehörigen Eigenwerte der Matrix A bestimmt. Der Eigenvektor mit dem kleinsten Eigenwert zeigt in Richtung der Bruchkante. Sofern die verwendeten Punkte von zwei sich schneidenden Ebenen stammen und frei von Rauschen sind, wird der kleinste Eigenwert zu 0.

$$q(\underline{x}) = \underline{x}^T \underline{A} \underline{x} + 2 \underline{L}^T \underline{x} + c \quad (3.5a)$$

$$q(\underline{x}) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + 2 \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + c = \sum_{i,j=1}^3 a_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 l_i x_i + c \quad (3.5b)$$

Problematisch erweist sich bei allen Ansätzen, welche a priori festgelegte mathematische Funktionen verwenden, die Approximation für größere Bereiche. So muss die Recheneinheit sowohl in Längs- als auch Querrichtung in Bezug zur Bruchkante begrenzt werden. Borkowski (2004) löst das Problem auf bemerkenswert einfache Art und Weise. Analog zu Briese (2004) geht er in seinem Modell von einer gesuchten Bruchkante $[\mathbf{x}(s), \mathbf{y}(s), \mathbf{z}(s)]^T$ aus, die durch den Schnitt zweier Flächen $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}(s), \mathbf{y}(s))$ gebildet wird. Doch statt des Ansatzes mathematischer Funktionen wie zum Beispiel zweier Ebenen, wird jede Fläche einzeln mit einem Interpolationsverfahren berechnet. Prinzipiell kann jedes Interpolationsverfahren verwendet werden, welches über gute Approximations- und Extrapolationseigenschaften verfügt. Die Schnittlinie zwischen beiden interpolierten Flächen entspricht der gesuchten Bruchkante. Die Punkte der Schnittlinie erfüllen Gleichung 3.6.

$$F(x(s), y(s)) := f_2(x(s), y(s)) - f_1(x(s), y(s)) = 0 \quad (3.6)$$

Borkowski verwendet für die Interpolation je ein Spline minimaler Krümmung (Gleichung 3.7) nach Duchon (1976), welches in der Literatur als Thin plate spline (TPS) bekannt ist.

$$\Phi(z(x, y)) = \iint_{\Omega} (z_{xx}^2 + 2z_{xy}^2 + z_{yy}^2) dx dy + \sum_{i=1}^n \alpha (z(x_i, y_i) - w_i)^2 \rightarrow \min \quad (3.7)$$

Die Schnittlinie wird anschließend durch einen Verfolgungsalgorithmus gewonnen. Die Gleichung 3.6 kann auch als Differentialgleichung

$$\frac{d}{ds} F(x(s), y(s)) = F_x(x(s), y(s)) \frac{dx}{ds} + F_y(x(s), y(s)) \frac{dy}{ds} = 0 \quad (3.8)$$

formuliert werden. Daraus folgt:

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{F_x(x, y)}{F_y(x, y)} \quad F_y \neq 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{dx}{dy} = - \frac{F_y(x, y)}{F_x(x, y)} \quad F_x \neq 0 \quad (3.10)$$

Ausgehend von einem Anfangspunkt $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)^T$ kann die Schnittlinie im Grundriss durch Lösung der Differentialgleichung (3.8) gemäß (3.9) bzw. (3.10) ermittelt werden. Der jeweils zugehörige Höhenwert ergibt sich durch Einsetzen in die Funktionsgleichung \mathbf{f}_1 bzw. \mathbf{f}_2 .

Borkowski (2004) zeigt ebenfalls, dass Snakes geeignet sind, um Bruchkanten zu bestimmen. Er verwendet den klassischen Ansatz (Kass et al., 1987), wobei die äußere Energie E_{ext} proportional zu den vertikalen Abständen der beiden Flächen bezüglich der aktuellen Lage der aktiven Kontur ist. Zusätzlich wird die äußere Energie E_{ext} mit einem Gewichtungskoeffizienten μ skaliert (Gleichung 3.11).

$$E_{\text{ext}} \propto \frac{\mu}{2} (z_2 - z_1)^2 \quad (3.11)$$

Ausgehend von den beiden interpolierten Flächen wird unweit der 2D-Näherungslösung die zweidimensionale aktive Kontur \mathbf{S}_0 initialisiert. Von dieser Anfangslage verändert die aktive Kontur durch die Minimierung der inneren und äußeren Energie ihre Position bis zu einem Optimum (Abbildung 3.6).

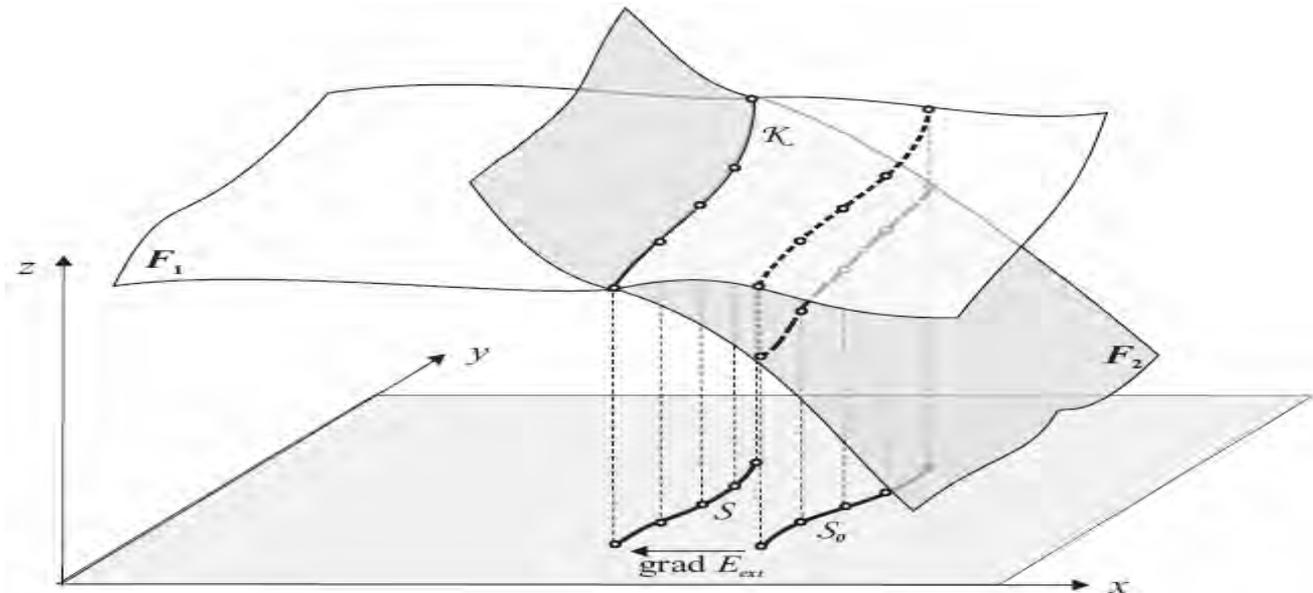


Abbildung 3.6: Berechnung der Bruchkante \mathbf{K} durch Schnitt zweier Oberflächen und Einsatz einer aktiven Kontur \mathbf{S} (Borkowski, 2004)

Liu et al. (2007) präsentierten einen zweistufigen Ansatz zur Ableitung der Böschungskanten an Steilküsten aus Laserscanner- und Bilddaten. Zuerst erfolgt eine Medianfilterung der Laserpunkte, um Ausreißer zu entfernen und das Datenmaterial zu glätten. Ausgehend von einer a priori bekannten Küstenlinie (z.B. aus früheren terrestrischen Vermessungen) werden dann Querprofile in einem regelmäßigen Abstand erzeugt. Anschließend werden die Laserpunkte dem betreffenden Profil zugeordnet. Aus diesen Punkten ermittelt man durch Interpolation neue Punkte, die sich um einen festen Betrag \mathbf{d} unterscheiden. Anschließend lässt sich die Neigung für jeden Punkt \mathbf{i} sowie verschiedene Maßstäbe \mathbf{j} gemäß Gleichung 3.12 bestimmen:

$$Slope_i^j = \frac{H_{i+1} - H_{i-j+1}}{jd} \quad (3.12)$$

Die Auswertung der Neigung beschränkt sich jedoch auf einen a priori festgelegten Maßstab \mathbf{j} . Nachfolgend werden auf dem oberen Plateau befindliche Gebäude sowie Bäume durch die Analyse der Neigung von der Land- zur Seeseite bestimmt. Dabei geht man davon aus, dass die aufstehenden Objekte symmetrisch sind. Anschließend sucht man nach dem Punkt \mathbf{A} , für den die Neigung erst stark ansteigt (entspricht dem Überschreiten eines a priori festgelegten Schwellwertes \mathbf{T}), sowie dem Mittelpunkt \mathbf{B} , für den die Neigung wieder auf 0 fällt. Alle Punkte innerhalb der Strecke $\mathbf{2AB}$ gelten nachfolgend als Teil aufstehender Objekte und werden bei der Bestimmung der Bruchkantenpunkte ignoriert. Als mögliche Kantenpunkte der oberen Bruchlinie gelten alle Rasterpunkte \mathbf{P}_i , die eine Neigung größer als ein Viertel der maximalen Neigung (= Schwellwert \mathbf{SC}) innerhalb des Profils aufweisen, sofern der nachfolgende Punkt \mathbf{P}_{i+1} eine geringere Neigung besitzt. Von diesen extrahierten Punkten wird derjenige als Bruchpunkt deklariert, der die größte Höhe aufweist. Die Bestimmung des Bruchpunktes der unteren Linie erfolgt nach dem gleichen Prinzip, nachdem die Punkthöhen mit der Gleichung 3.13 umgekehrt wurden.

$$H' = |H - H_{max}| \quad (3.13)$$

Die aus den Querprofilen gewonnenen Punkte der beiden Linien werden jeweils miteinander verbunden. In nachfolgenden Schritten werden die beiden Bruchkanten ebenfalls aus den Bilddaten durch Verwendung der Mean Shift Segmentation (Comaniciu and Meer, 2002), einer Rauschreduzierung durch eine Oberflächenrekonstruktion (Kovesi, 2003) und anschließender Kantenextraktion mit dem Canny-Operator extrahiert. Danach verwendet man den Iterative Closest Point Algorithmus (Besl und McKay, 1992), um die Bruchkantenpunkte aus der Analyse der Laserscannerdaten an die entsprechende Linie aus den Bilddaten anzufeldern.

3.2.3 Evaluation der Ansätze zur Extraktion von Strukturlinien

In Kapitel 3.2.2 wurden eine Reihe von Algorithmen zur Extraktion von Bruchkanten vorgestellt. Es ist zu beachten, dass die jeweiligen Ansätze in der Regel für einen konkreten Anwendungshorizont konzipiert wurden, so dass eine allgemeine Vergleichbarkeit sowie Übertragbarkeit der Methode nicht immer gewährleistet ist. Die Evaluation berücksichtigt neben einer allgemeinen Einschätzung bezüglich der Voraussetzungen, Robustheit, Güte der extrahierten Ergebnisse etc. ebenfalls die Übertragbarkeit des jeweiligen Ansatzes zur Ableitung von Bruchkanten und Formlinien in Watten (siehe Tabelle 3.2).

Gomes und Pereira (1999) entwickelten einen Algorithmus zur Extraktion von Bruchkanten in flachen, küstennahen Gebieten. Die Annahme ist, dass Bruchkanten an Übergängen vom horizontalen zum geneigten Gelände auftreten. Aufgrund der geringen Anforderungen sowie dem einfach strukturierten Verfahren können Bruchkanten schnell extrahiert werden. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Grundannahme zwar für das Einsatzgebiet nicht falsch ist, dennoch mit der eigentlichen Definition einer Bruchkante nicht übereinstimmt. So können keine Bruchkanten innerhalb geneigter Flächen sowie Stufenkanten abgeleitet werden. Ebenso kann aus einem Übergang von horizontalem zu geneigtem Gelände anhand eines Schwellwertes nicht auf die Krümmung und somit das entscheidende Merkmal zurück geschlossen werden.

Brügelmann (2000) definiert Bruchkanten als Linien mit maximaler Krümmung und verwendet deshalb den Gauss-Operator, um für die einzelnen Gitterpunkte die Krümmung zu bestimmen. Dieser Ansatz ist theoretisch in der Lage, sowohl alle Bruchkantentypen als auch Formlinien zu finden. Jedoch ist die abgeleitete Krümmung stark rauschanfällig. Die durchgeführte Unterdrückung des Rauschens mindert zwar diesen Effekt, verschlechtert aber im gleichen Zuge die Genauigkeit der extrahierten Kanten. Zudem werden zusammenhängende Bruchkanten häufig nur in kleinen Recheneinheiten extrahiert, so dass nachfolgend eine zeitaufwändige Verknüpfung durchgeführt werden muss. Es existieren zwar verschiedene automatische Ansätze, dennoch ist eine manuelle Nachbearbeitung in den meisten Fällen erforderlich.

Die stückweise Flächenrekonstruktion in der Bruchkantenumgebung durch ein Ebenenpaar (Brzank, 2001 sowie Briese, 2004) ist ein flexibler, in der praktischen Arbeit bewährter Ansatz. Er orientiert sich streng an der Definition der Bruchkante. Durch die Erweiterungen von Briese (2004) erfolgt die Ableitung der Flächenparameter robust. Zudem ist im Allgemeinen ein Startpunkt der Bruchkante für die Bestimmung ausreichend. Aufgrund der stückweisen Rekonstruktion des Geländes werden jedoch nur einzelne Punkte extrahiert, die nachfolgend geeignet verknüpft werden müssen. Der entscheidende begrenzende Faktor ist die zwingend hinreichend genaue Übereinstimmung von verwendetem Flächentyp und der wahren Geländeoberfläche. Ist die Ausprägung des Geländes zu komplex, so ist die Ebene für eine Approximation nicht geeignet mit der Folge, dass die extrahierten Bruchkantenpunkte ungenau sind. Aus diesem Grund werden im bewegten Gelände oft Recheneinheiten mit geringerer Ausdehnung verwendet, um diesem Effekt entgegenzuwirken.

Die Rekonstruktion der beiden Flächen, welche die Bruchkante bilden, durch einen allgemeinen Interpolationsansatz mit anschließender Verfolgung der Schnittlinie durch Borkowski (2004) ist die konsequente Weiterentwicklung des Ebenenpaaransatzes von Brzank (2001). Durch die Verwendung eines allgemeinen Interpolationsverfahrens lassen sich generell alle Flächen unabhängig von ihrer Ausprägung beschreiben. Zudem kann die Schnittlinie kontinuierlich abgeleitet werden. Der Ansatz benötigt jedoch einen Startpunkt der Schnittlinie für den Verfolgungsalgorithmus. Zudem verzichtet die Methode auf eine iterative Verbesserung der Schnittlinie, was bei einer ungenauen Näherung der a priori benötigten 2D-Bruchkante zu einem falschen Ergebnis führen kann. Die Verwendung eines Snakes (Borkowski, 2004) hat im Gegensatz zur Linienverfolgung neben den genannten Vorteilen noch den Vorzug, dass kein Startpunkt der Bruchkante notwendig ist. Die aktive Kontur verwendet die Höhenunterschiede zwischen den beiden interpolierten Flächen zur Detektion der Schnittlinie. Je nach Wahl der Steuerparameter kann jedoch die aktive Kontur in ihrer endgültigen Lage deutlich variieren.

Die Extraktion von Bruchkanten an Steilküsten nach Liu et al. (2007) nutzt sowohl Bild- als auch Laserscannerdaten. Die Kanten werden jeweils unabhängig voneinander abgeleitet, so dass theoretisch auch eine Bestimmung mit nur einer vorhandenen Datenquelle denkbar ist. Die Ableitung der Linien mit Laserdaten stützt sich analog zu Gomes-Pereira und Wicherson (1999) auf die These, dass sich die Bruchpunkte an den Übergängen zwischen geneigten und horizontalen Flächen befinden. Dies trifft zwar genähert für diesen konkreten Fall durchaus zu, geht aber nicht mit der allgemeinen Definition konform (siehe oben), so dass das Einsatzgebiet beschränkt ist. Die Autoren sprechen davon, einen Multiskalenansatz für die Bestimmung der Neigung zu verwenden. Dies trifft aber praktisch nicht zu, da sie sich generell auf einen Maßstab j beschränken. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Parameter Punktabstand d , Maßstab j , Schwellwert zur Extraktion aufstehender Objekte T sowie der Schwellwert für das Auftreten geneigter Objekte SC nicht automatisch abgeleitet, sondern durch den Nutzer festgelegt werden müssen. Weiterhin wird die Neigung unverständlicherweise nicht symmetrisch zum jeweiligen Punkt i berechnet (siehe Gleichung 3.12). Zudem wird durch die Verwendung interpolierter Punkte die Genauigkeit des Ergebnisses herabgesetzt.

Die Ansätze von Borkowski (2004) sind für die Bestimmung der Bruchkanten optimal geeignet, sofern eine 2D-Näherung sowie eine genügend hohe Punktzahl je Seite vorhanden sind, um die genaue Interpolation zu ermöglichen. In den Watten beträgt jedoch der Abstand der paarweise auftretenden Strukturlinien (Böschungsober- und Böschungsunterkante) häufig weniger als 1m, so dass die Anzahl der Punkte oft so gering ist, dass eine getrennte Approximation der Zwischenfläche nicht sinnvoll ist, da diese sehr ungenau wäre. Dadurch kann im Folgenden die Genauigkeit der ermittelten Trennlinien sinken. Auch die Ableitung der Bruchkantennäherungen gestaltet sich schwierig, da diese generell nicht aus anderen Quellen (z.B. GIS) entnommen werden können. Folglich müssen sie aus den Laserdaten ermittelt werden. Dies erfolgt oft durch ein rasterbasiertes Verfahren z.B. nach Brügelmann (2000). Der Einsatz von Kantenoperatoren der zweiten Ableitung bewirkt jedoch eine hohe Rauschanfälligkeit. Dies führt häufig zu unvollständig extrahierten Näherungen, die aufwändig miteinander verknüpft werden müssen.

Tabelle 3.2: Methoden zur Extraktion von Bruchkanten – Vor- und Nachteile

Verfahren	Voraussetzungen	Vor- und Nachteile
Bruchkanten im Übergang zwischen horizontalen und geneigten Flächen (Gomes-Pereira und Wicherson, 1999)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Höhenraster ○ Schwellwert horizontal/geneigt 	<ul style="list-style-type: none"> + Einfaches Verfahren - Genauigkeitsverlust aufgrund Interpolation des Höhengitters - Keine Ableitung von Stufenkanten - Keine Ableitung von Bruchkanten innerhalb geneigter Flächen
Gauss-Operator in Verbindung mit einem Hypothesentest (Brügelmann, 2000)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Höhenraster ○ Filtergröße des Gauss-Operators ○ Irrtumswahrscheinlichkeit α 	<ul style="list-style-type: none"> + Ansatz orientiert sich an Definition der Bruchkante - Genauigkeitsverlust aufgrund Interpolation des Höhengitters - Rauschanfällig aufgrund Verwendung der zweiten Ableitung
Flächenrekonstruktion durch Ebenenpaar (Brzank, 2001) und (Briese, 2004)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten ○ 2D-Bruchkantennäherung 	<ul style="list-style-type: none"> + Verwendung der originären Laserpunkte + Ansatz orientiert sich an Definition der Bruchkante + Robustes Verfahren - Modelloberfläche und wahre Geländeform müssen sich hinreichend genau entsprechen - Stückweise Extraktion von Bruchkantenpunkten
Schnitt zweier interpolierter Flächen und Linienverfolgung (Borkowski, 2004)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten ○ 2D-Bruchkantennäherung 	<ul style="list-style-type: none"> + Verwendung der originären Laserpunkte + Allgemeine Flächenmodellierung + Kontinuierliche Bruchkantenlösung - Keine iterative Verbesserung der Bruchkantennäherung - Startpunkt notwendig - Keine Ableitung von Stufenkanten
Schnitt zweier interpolierter Flächen und Einsatz eines Snakes (Borkowski, 2004)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten ○ 2D-Bruchkantennäherung ○ Steuerparameter des Snakes 	<ul style="list-style-type: none"> + Verwendung der originären Laserpunkte + Allgemeine Flächenmodellierung + Kontinuierliche Bruchkantenlösung - Keine iterative Verbesserung der Bruchkantennäherung - Keine Ableitung von Stufenkanten
Extraktion von Steilkanten aus Laser- und Bilddaten (Liu et al., 2007)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Laserrohdaten ○ Bilddaten ○ 2D-Küstenlinie 	<ul style="list-style-type: none"> + Kombination von Laser- und Bilddaten + Ableitung der Bruchkanten sowohl ausschließlich aus Laser- als auch Bilddaten möglich - Ableitung der Bruchkanten aus Laserdaten orientiert sich nicht an der Definition der Bruchkante - Keine automatische Bestimmung der Schwellwerte - Keine Ableitung von Stufenkanten - Genauigkeitsverlust aufgrund Interpolation der Zwischenpunkte

4 Eine Methode zur Erzeugung konsistenter Digitaler Geländemodelle in Watten

Die Erstellung eines DGM ist die Hauptanwendung für Airborne Laserscannerdaten. Dabei umfasst der Prozess von der Aufnahme des Geländes bis zur Modellierung des DGM mehrere Arbeitsschritte. In der Praxis hat sich der Arbeitsablauf gemäß Abbildung 4.1 (siehe auch Kapitel 2.1.4) durchgesetzt. Der Prozess ist auf die Ableitung eines DGM im Binnenbereich ausgerichtet. Aufgrund der speziellen Umweltbedingungen im Watt ist der Arbeitsablauf jedoch für diesen Bereich unzureichend geeignet.



Abbildung 4.1: Klassischer Arbeitsablauf zur Ableitung eines DGM aus Laserscannerdaten

Die Hauptschwierigkeit stellen aufstehende Wasserflächen in Prielen und Senken dar, die von dem Laserstrahl nicht durchdrungen werden können. Da die Wasserpunkte nicht zur gesuchten Geländeoberfläche gehören, müssen die Laserpunkte in die Klassen „Wasser“ und „Watt“ unterteilt werden. Im Gegenzug ist im Regelfall eine klassische Filterung der Daten in Boden und Nichtboden nicht notwendig, da der Wattbereich fast vollständig frei von Vegetation sowie künstlichen Anlagen ist. Anschließend werden Daten aus bathymetrischen Vermessungen verwendet, um die entstandenen Lücken im Bereich der Wasserflächen zu füllen. Nachfolgend leitet man die Strukturlinien aus dem vereinigten Datensatz ab, welche dem anschließenden Modellierungsprozess zugeführt werden. Daraus ergibt sich der neue, angepasste Arbeitsablauf für die Modellierung von Laserscannerdaten in Watten (Abbildung 4.2).

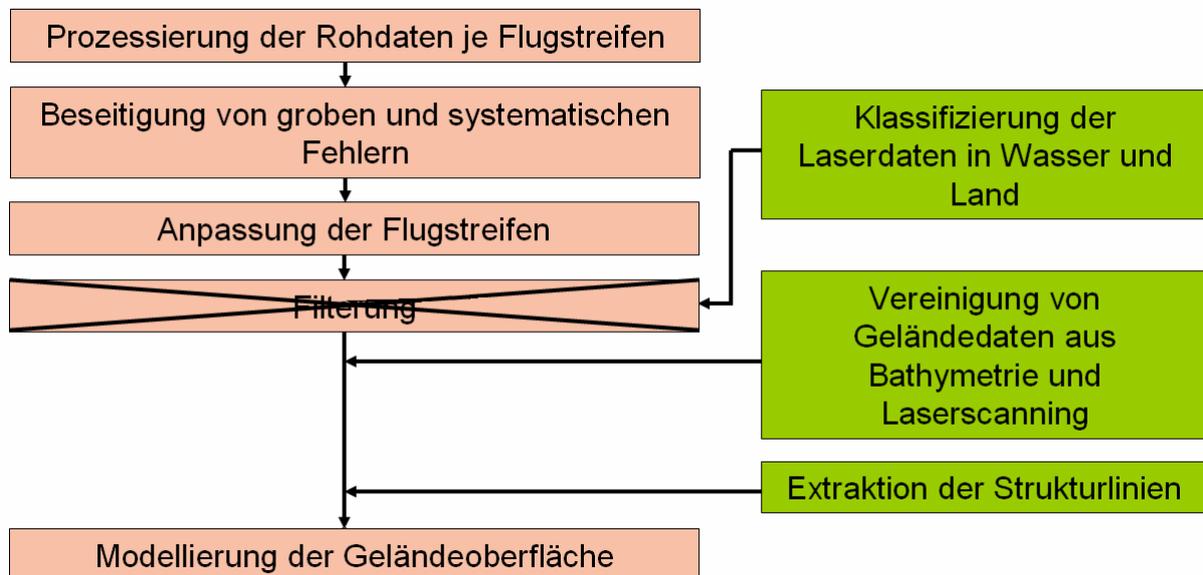


Abbildung 4.2: Optimierter Arbeitsablauf zur Ableitung eines DGM aus Laserscannerdaten in Watten

4.1 Klassifikation von Wasserflächen

In dieser Arbeit beruht die Klassifikation auf der Analyse der Merkmale Höhe **H**, Intensität **I** und 2D-Punktdichte **P**, welche jeweils aus den Rohdaten direkt bzw. indirekt gewonnen werden können, mit Hilfe eines aus der Fuzzy-Control

entlehnten Konzeptes¹⁴. 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 μ_i sowie einem zugeordneten Gewicht δ_i , welches die Trennbarkeit der beiden Klassen für dieses Merkmal ausdrückt, durch gewichtete Mittelbildung bestimmt (Gleichung 4.1). 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 (siehe Abbildung 4.3).

$$\mu(\mathbf{H}_x, \mathbf{I}_x, \mathbf{P}_x, \beta_x) = \frac{[\delta_H \mu_H(\mathbf{H}_x) + \delta_I(\beta_x) \mu_I(\mathbf{I}_x, \beta_x) + \delta_P(\beta_x) \mu_P(\mathbf{P}_x, \beta_x)]}{[\delta_H + \delta_I(\beta_x) + \delta_P(\beta_x)]} \quad (4.1)$$

mit

$\mathbf{H}_x, \mathbf{I}_x, \mathbf{P}_x, \beta_x$ Höhe, Intensität, 2D-Punktdichte und Inzidenzwinkel des Punktes \mathbf{x}
 $\delta_H, \delta_I(\beta_x), \delta_P(\beta_x)$ Gewicht der Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte des Punktes \mathbf{x}
 $\mu_H(\mathbf{H}_x), \mu_I(\mathbf{I}_x, \beta_x), \mu_P(\mathbf{P}_x, \beta_x)$ Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ je Merkmal des Punktes \mathbf{x}
 $\mu(\mathbf{H}_x, \mathbf{I}_x, \mathbf{P}_x, \beta_x)$ Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ des Punktes \mathbf{x}

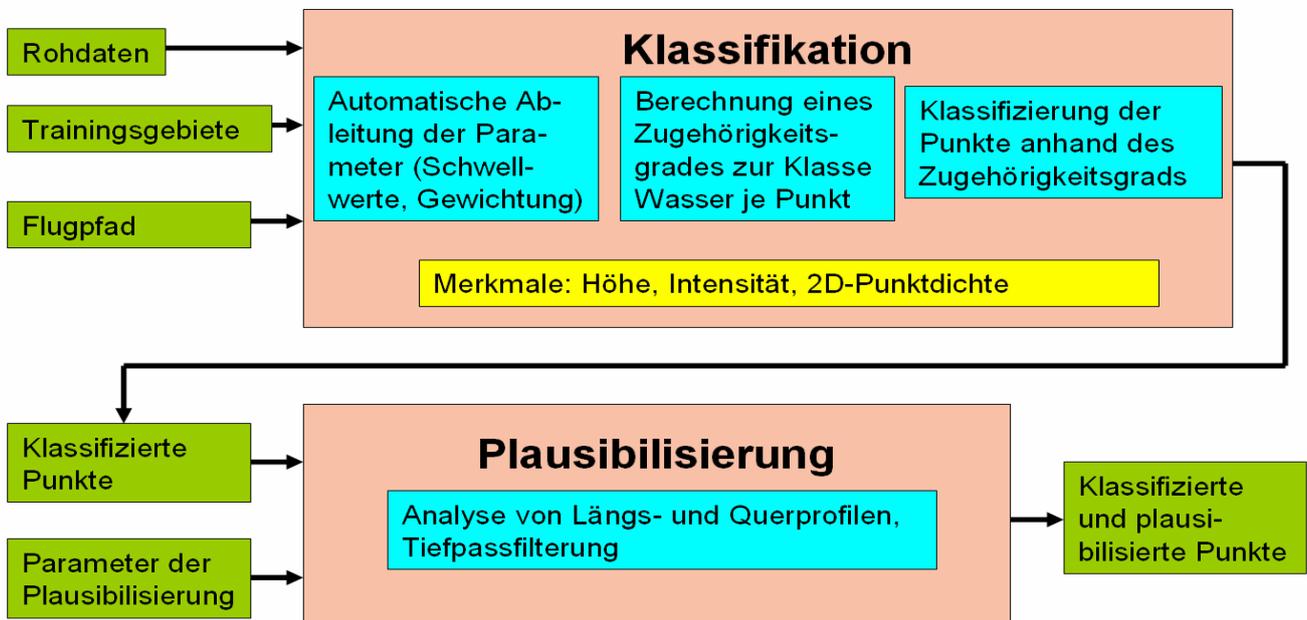


Abbildung 4.3: Flussdiagramm des Algorithmus zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

4.1.1 Klassifikationsmerkmale

Um die Laserscannerpunkte in die Klassen „Wasser“ und „Watt“ einzuteilen, müssen aus den Daten Merkmale extrahiert werden, welche eine Unterscheidung ermöglichen. Die Merkmale müssen sich hinsichtlich ihrer Ausprägung bezüglich beider Klassen - physikalisch begründbar - signifikant voneinander unterscheiden. Durch Analyse der Beziehung zwischen Wasser und Watt sowie der Interaktion des Laserstrahls mit beiden Geländeoberflächen (Kapitel 2.1.2) lassen sich die drei Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte für die Klassifikation verwenden.

Höhe: Die Höhe¹⁵ \mathbf{H} gibt den senkrechten Abstand des jeweiligen Laserpunktes von der Bezugsfläche an. Der zugehörige Wert lässt sich direkt aus den Punktkoordinaten entnehmen. Das Wasser hat generell das Bestreben, einen Zustand geringster möglicher potentieller Energie E_{pot} anzunehmen. Solange dieser Zustand nicht erreicht ist und das Wasser die Möglichkeit besitzt, die eigene potentielle Energie zu verringern, erfolgt ein Fließprozess. Ansonsten befindet es sich in Ruhe (bei Vernachlässigung anderer äußerer Kräfte wie z.B. Wind). Im Falle einer ruhigen, geschlossenen Wasserfläche weisen alle umliegenden Wattpunkte mindestens die gleiche, im Allgemeinen jedoch eine größere Höhe auf. Deshalb kann man prinzipiell davon ausgehen, dass mit steigender Höhe die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Wasser sinkt. Da die

¹⁴ Der Algorithmus ist eine Weiterentwicklung eines vorläufigen Ansatzes von Brzank und Heipke (2006).

¹⁵ Der Einfluss der Erdschwere, der für die allgemeine Definition von Höhensystemen notwendig ist, wird an dieser Stelle vernachlässigt.

Fuzzy-Logik in der Klassifikation verwendet wird, sinkt mit steigender Höhe der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ entsprechend.

Intensität: Die Intensität I (siehe Kapitel 2.1.1.4) ist eine physikalische Größe, welche der Leistung pro Fläche beziehungsweise pro Raumwinkel entspricht. Sie wird auch als Energiefluss bezeichnet. Für jeden Laserpunkt wird ein Intensitätswert aufgezeichnet, der angibt, wie stark das empfangene Echo für den jeweiligen Laserpuls ausgefallen ist. Im Allgemeinen geben die Laserscannerhersteller keine Auskunft, wie dieser Wert genau bestimmt wird. Generell ist er jedoch direkt proportional zur empfangenen Leistung P_E . Diese ist unter anderem abhängig (siehe Gleichung 2.2 in Verbindung mit Gleichung 2.6) vom Reflexionsgrad ρ der Geländeoberfläche. Mit steigendem Wassergehalt sinkt ρ und demzufolge auch P_E und I . Im Allgemeinen ist also der Intensitätswert im Wattbereich höher. Deshalb steigt mit sinkender Intensität der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“.

2D-Punktdichte: Die 2D-Punktdichte P ist ein Verhältnis, welches aus der Anzahl aller Punkte innerhalb eines vorgegebenen Polygons, das im Schwerpunkt des analysierten Punktes x gelagert ist, geteilt durch dessen Größe, gebildet wird. Es beschreibt die Vollständigkeit der in der direkten Nachbarschaft des Punktes x durchgeführten Messungen. Für die Bestimmung werden zusätzlich die benachbarten Laserscanzeilen herangezogen.

Die jeweilige Messung kann nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn das empfangene Echo eine eindeutig vom Rauschen differenzierbare Leistung P_E aufweist. Da mit steigendem Wassergehalt P_E sinkt, verringert sich generell auch die Anzahl der erfolgreichen Messungen und nachfolgend die 2D-Punktdichte. Deshalb steigt mit sinkender 2D-Punktdichte der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“. Im Allgemeinen sind die 2D-Punktdichte und die Intensität positiv korreliert, da mit Abnahme der Signalstärke die Echodetektion schwieriger wird.

4.1.2 Gewichtung der Merkmale

Hinsichtlich der Interaktion des Wassers mit der Geländeoberfläche sowie der physikalischen Beschreibung des Messvorgangs besteht für jedes verwendete Merkmal theoretisch ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der jeweiligen Ausprägung zwischen der Klasse „Wasser“ und „Watt“. Bei der Analyse realer Daten zeigt sich jedoch häufig, dass sich die Merkmalswerte kaum oder gar nicht signifikant voneinander unterscheiden. Je geringer sich das Signifikanzniveau für ein Merkmal ausprägt, umso schwieriger lassen sich die Punkte anhand dieses Merkmals klassifizieren. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, besitzt jedes Merkmal i ein eigenes Gewicht δ_i , welches ausdrückt, wie gut sich die Punkte anhand des zugehörigen Merkmals unterscheiden lassen. Das Gewicht kann den Wertebereich von 0 bis 1 annehmen, wobei ein steigendes Gewicht eine höhere Trennbarkeit bedeutet.

4.1.3 Korrektur der Intensität und 2D-Punktdichte

Wie in Kapitel 2.1.1.4 ausgeführt, ist die gemessene Intensität I abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren. Aufgrund der Korrelation zwischen Intensität und 2D-Punktdichte besteht zudem ebenfalls ein Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der 2D-Punktdichte. Um die Merkmale in der Klassifikation zu verwenden, müssen sie entweder vorher kalibriert oder die systematischen Verzerrungen innerhalb des Algorithmus berücksichtigt werden. Die Kalibrierung ist jedoch nur für klassenunabhängige Einflussfaktoren wie die Entfernung R möglich. Das Reflexionsverhalten ist aber für die Klassen „Watt“ und „Wasser“ unterschiedlich. Für diese Korrektur wird somit ein Modell der Reflexion der jeweils beleuchteten Oberfläche (z.B. in Form der BRDF oder des gerichteten Reflexionsgrades) benötigt. Dieses kann theoretisch aus den Trainingsgebieten durch empirische Modellfunktionen in Abhängigkeit vom Inzidenzwinkel β ermittelt werden. Praktisch ist diese Methode aber nicht verwendbar, da für die Korrektur die Klassenzugehörigkeit des jeweiligen Punktes bekannt sein muss. Diese Zugehörigkeit stellt aber das eigentliche Ziel der Klassifikation dar und ist somit vorher nicht verfügbar.

Deshalb wird die systematische Verzerrung der Intensität und der 2D-Punktdichte, die insbesondere auf die gerichtete Reflexion der Watt- und Wasserflächen zurückzuführen ist, innerhalb der Klassifikation berücksichtigt. Die Änderung der Merkmalswerte kann für die Klassen „Wasser“ sowie „Watt“ generell unterschiedlich stark erfolgen. Das heißt, dass die Trennbarkeit der beiden Klassen für die Merkmale Intensität sowie 2D-Punktdichte abhängig von β ist. Da die Gewichte $\delta_I(\beta_x)$ und $\delta_P(\beta_x)$ diese Trennbarkeit widerspiegeln, sind sie ebenfalls von β abhängig.

Um den Inzidenzwinkel für den jeweiligen Punkt zu bestimmen, muss aus der aktuellen Position der Flugplattform und den Punktkoordinaten die Abstrahlrichtung bestimmt werden. Der Inzidenzwinkel entspricht dem Winkel zwischen der Abstrahlrichtung und der Flächennormale des Punktes. Die Bestimmung der Flächennormalen ist in der Regel aufwändig sowie rauschanfällig, da aus den umliegenden Punkten die Geländeoberfläche modelliert werden muss. Geht man vereinfachend davon aus, dass die Oberfläche horizontal verläuft, so stimmt β mit dem Abstrahlwinkel α überein, der dem eingeschlossenen Winkel aus Nadir und Abstrahlrichtung entspricht (siehe Abbildung 4.4).

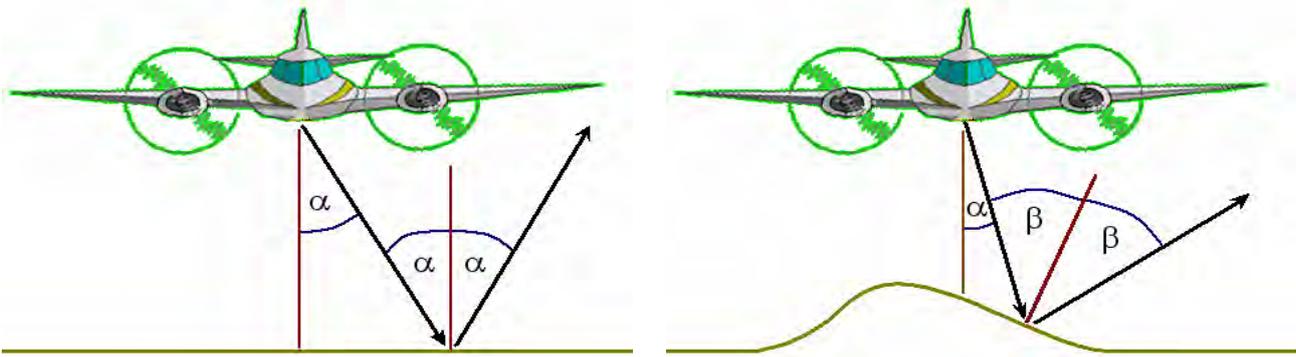


Abbildung 4.4: Abstrahlwinkel α (links), Inzidenzwinkel β (rechts)

4.1.4 Arbeitsablauf des Algorithmus

Die Klassifizierung beginnt mit dem Einlesen des Pfades der Laserscannerpunkte eines Flugstreifens. Dabei müssen die Punkte in der Reihenfolge gespeichert sein, in der sie auch gemessen wurden. Anschließend erfolgt eine automatische Bildung der Scanzeilen, wobei die Änderung des Azimuts aufeinander folgender Laserpunkte als Kriterium dient. Nachfolgend werden alle benötigten Klassifikationsparameter automatisch aus den Laserpunkten innerhalb der Trainingsgebiete abgeleitet (siehe Abschnitt 4.1.5). Die Umringe der Trainingsgebiete können dabei sowohl aus Vorwissen stammen als auch direkt mit Hilfe eines aus den Laserdaten berechneten DGM bzw. eines zeitgleich aufgemessenen Orthophotos digitalisiert werden. Um die Abhängigkeit der Merkmale Intensität und 2D-Punktdichte bezüglich des Inzidenzwinkels zu berücksichtigen, benötigt man zusätzlich die Trajektorie der Flugplattform. Mit Hilfe der Klassifikationsparameter kann man dann für jeden Punkt den Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ $\mu(\mathbf{H}_x, \mathbf{I}_x, \mathbf{P}_x, \beta_x)$ bestimmen und anschließend in die Klassen „Wasser“ oder „Watt“ unterscheiden. Die klassifizierten Punkte werden nachfolgend zusammen mit zusätzlichen Parametern, welche für die Plausibilisierung benötigt werden, in die Analyse eingebracht. Ziel dieser Prozesskette ist die Aufdeckung von Klassifizierungswidersprüchen. Ein Klassifizierungswiderspruch tritt auf, wenn an einer Klassengrenze der dem Wattpunkt benachbarte Wasserpunkt eine größere Höhe besitzt. In diesem Fall werden die beteiligten Punkte erneut klassifiziert.

4.1.5 Automatische Ableitung der Klassifikationsparameter aus den Trainingsgebieten

Für die Durchführung der Klassifikation werden mehrere Parameter benötigt, die automatisch aus den Trainingsgebieten abgeleitet werden. Diese sind in Tabelle 4.1 aufgeführt:

Tabelle 4.1: Klassifikationsparameter und ihre Funktion

Klassifikationsparameter	Funktion
konstante Hörschwellwerte \mathbf{T}_{H_low} und \mathbf{T}_{H_high}	Transformation des jeweiligen Höhenwerts in einen unscharfen Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“
je zwei variable Intensitäts- sowie 2D-Punktdichteschwellwerte $\mathbf{T}_{I_low}(\beta)$, $\mathbf{T}_{I_high}(\beta)$, $\mathbf{T}_{P_low}(\beta)$ und $\mathbf{T}_{P_high}(\beta)$	Transformation des jeweiligen Intensitäts- bzw. 2D-Punktdichteschwerts in einen unscharfen Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“
konstantes Gewicht des Merkmals Höhe δ_H	Beschreibt, wie gut sich die Klassen anhand des Merkmals Höhe unterscheiden lassen
variables Gewicht für die Merkmale Intensität $\delta_I(\beta)$ und 2D-Punktdichte $\delta_P(\beta)$	Beschreibt, wie gut sich die Klassen anhand des Merkmals Intensität bzw. 2D-Punktdichte unterscheiden lassen
Wasserschwellewert \mathbf{T}_{Wasser}	Klassifikation des jeweiligen Punktes anhand seines Gesamtzugehörigkeitsgrades zur Klasse „Wasser“

Die Schwellwerte \mathbf{T}_{H_low} , \mathbf{T}_{H_high} , $\mathbf{T}_{I_low}(\beta)$, $\mathbf{T}_{I_high}(\beta)$, $\mathbf{T}_{P_low}(\beta)$ und $\mathbf{T}_{P_high}(\beta)$ teilen den Definitionsbereich jeweils in drei Regionen. Unterhalb des unteren bzw. oberhalb des oberen Schwellwertes liegt der Zugehörigkeitsgrad entweder bei 0 oder bei 1. Dies ist abhängig von der Korrelation zwischen dem jeweiligen Merkmal und dem Auftreten von Wasser. Der Zwischenbereich beschreibt die Zone des Übergangs von Wasser zu Watt. Als Zugehörigkeitsfunktion kann prinzipiell jede Funktion verwendet werden, die diesen Übergang hinreichend genau beschreibt. Der hier verwendete Algorithmus nutzt ausschließlich lineare Funktionen. Die Parameter ergeben sich durch das Festlegen der Schwellwerte je Merkmal.

4.1.5.1 Vorbereitung

Zu Beginn werden die Laserpunkte innerhalb der definierten Trainingsgebiete ermittelt. Im Folgenden bestimmt man für alle Punkte die jeweiligen Werte der Merkmale sowie den zugehörigen Inzidenzwinkel. Für die Berechnung der Klassifikationsparameter werden der Mittelwert und die Standardabweichung je Merkmal und Klasse benötigt. Diese können aus den Merkmalswerten bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Mittelwert je Klasse für die Höhe konstant, für die Intensität sowie die 2D-Punktdichte jedoch abhängig vom Inzidenzwinkel ist. Diese Abhängigkeit kann mit Hilfe einer Funktion $f(\beta)$ ausgedrückt werden, die gegebenenfalls weitere Einflussparameter berücksichtigt. Dabei ist prinzipiell jede Funktion geeignet, die – möglichst physikalisch begründbar – diese Beziehung modellieren kann und wenig Parameter besitzt. Da für die Klassen „Wasser“ und „Watt“ jeweils keine theoretische Beschreibung des Reflexionsverhaltens vorliegt, wurde eine Funktion mit vier Parametern (Gleichung 4.2) empirisch gewählt, die von Kraus und Pfeifer (1998) als Gewichtsfunktion bei der linearen Prädiktion mit robuster Filterung verwendet wurde. Sie zeichnet sich durch eine geringe Parameteranzahl und ein monoton sinkendes Verhalten bei wachsendem β aus. Durch vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate werden anschließend die Parameter der Funktion aus den Wertepaaren (Inzidenzwinkel, Merkmalswert) berechnet.

$$f(\beta) = \frac{c}{(1 + (a\beta)^b)} + d \quad (4.2)$$

mit:

a	Halbwertsbreite	b	Neigung an der Halbwertsbreite
c	Maßstabsfaktor in z-Richtung	d	Verschiebung in z-Richtung

Der Mittelwert des jeweiligen Merkmals pro Klasse entspricht dem Wert aus der zugehörigen ausgleichenden Funktion durch Einsetzen des zugehörigen Inzidenzwinkels. Die Verbesserungen einer ausgeglichenen Funktion werden verwendet, um die jeweils zugehörige Standardabweichung zu bestimmen (siehe Abbildung 4.5).

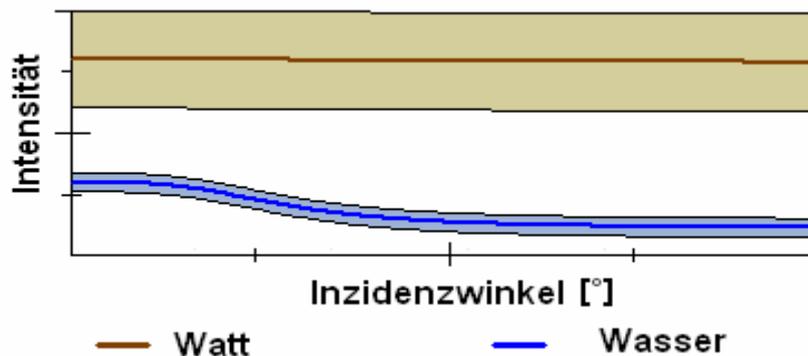


Abbildung 4.5: Ausgleichende Funktionen des Merkmals Intensität mit Standardabweichung der Verbesserungen für die Klassen „Wasser“ und „Watt“

4.1.5.2 Bestimmung der Schwellwerte

Die Schwellwerte entsprechen dem jeweiligen Mittelwert der Merkmale für die einzelnen Klassen. So ist T_{H_low} gleich der mittleren Höhe des Trainingsgebietes der Klasse „Wasser“ und T_{H_high} identisch zum Mittelwert der Höhe der Klasse „Watt“. Die Schwellwerte $T_{I_low}(\beta)$, $T_{I_high}(\beta)$, $T_{P_low}(\beta)$ und $T_{P_high}(\beta)$ sind abhängig von β . Durch Einsetzen in die jeweils zugehörige ausgeglichene Funktion werden die Schwellwerte ermittelt.

4.1.5.3 Bestimmung der Gewichte

Die Gewichte δ_H , $\delta_I(\beta_x)$ und $\delta_P(\beta_x)$ drücken die Trennbarkeit der beiden Klassen für das jeweilige Merkmal aus. Diese Trennbarkeit zwischen Wasser und Watt kann durch die Analyse der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen je Merkmal ermittelt werden. Dabei geht man von folgender Annahme aus: Je stärker sich beide Verteilungen überlappen, umso weniger ist dieses Merkmal für die Klassifizierung geeignet, da die Trennbarkeit abnimmt. Folglich muss das daraus abgeleitete Gewicht sinken.

Als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird die Gauss-Verteilung angesetzt. Im Folgenden wird das Signifikanzniveau für die Annahme bestimmt, dass die beiden Verteilungen voneinander verschieden sind (also $\mu_{i_Wasser} \neq \mu_{i_Watt}$). Dazu führt man einen t-Test durch. Die Testgröße t_f ergibt sich zu:

$$t_f = \frac{\bar{x}_{Watt} - \bar{x}_{Wasser}}{\sqrt{s_{Watt}^2 + s_{Wasser}^2}} = \frac{d}{s_d} \quad (4.3)$$

mit:

\bar{x}_{Watt}	Mittelwert des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Watt“
\bar{x}_{Wasser}	Mittelwert des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Wasser“
s_{Watt}	Standardabweichung des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Watt“
s_{Wasser}	Standardabweichung des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Wasser“

Aus der Standardnormalverteilungsfunktion $F(\mathbf{x})$ wird anschließend das zugehörige Quantil (Freiheitsgrade f , Signifikanzniveau γ ¹⁶) bestimmt, welches mit der Testgröße identisch ist. Aus dem Signifikanzniveau γ wird das Gewicht abgeleitet. Dabei gilt folgende Festlegung: Beträgt das Signifikanzniveau der Trennbarkeit 0,5 oder weniger, so ist eine Unterscheidung nicht möglich. Das Gewicht ist folglich 0. Beträgt γ mehr als 0,5, so kann zwischen beiden Verteilungen unterschieden werden. Mit steigendem Signifikanzniveau wächst auch das Gewicht. Bei einem γ von 1 beträgt das Gewicht 1. Die Berechnung des Gewichtes im Bereich von 0,5 bis 1 erfolgt durch lineare Interpolation.

Für das Merkmal Höhe werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Abbildung 4.6) aus Mittelwert und Standardabweichung der Höhen im Trainingsgebiet „Wasser“ bzw. „Watt“ gebildet. Die Parameter für die Größen Intensität und 2D-Punktdichte ergeben sich aus der jeweils zugehörigen ausgeglichenen Funktion (siehe Gleichung 4.2).

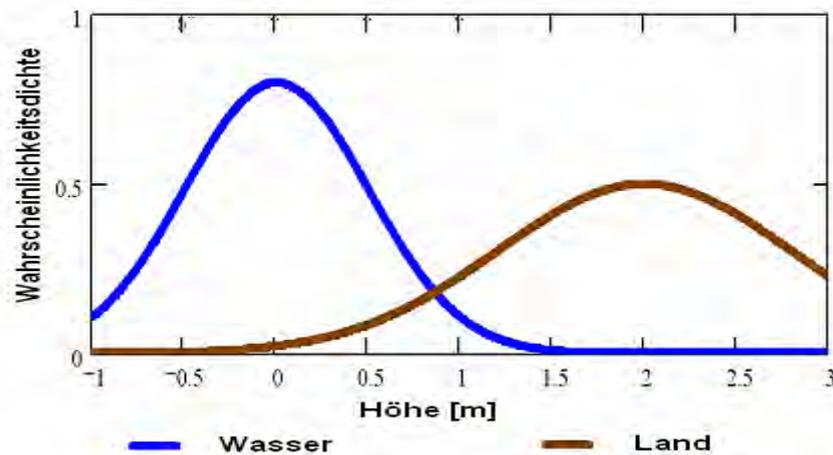


Abbildung 4.6: Ableitung des Gewichtes anhand des Signifikanzniveaus der Trennbarkeit beider Verteilungen

4.1.5.4 Bestimmung des Wasserschwelwertes

Nachdem die Gewichte ermittelt sind, kann für jeden Punkt der Gesamtzugehörigkeitsgrad bestimmt werden. Aus der Summe aller Punkte der Trainingsgebiete „Watt“ bzw. „Wasser“ berechnet man nachfolgend den zugehörigen Mittelwert sowie die Standardabweichung. Daraus können – unter der Annahme des Vorliegens der Normalverteilung – die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klassen „Wasser“ und „Watt“ gebildet werden. Der Wasserschwelwert entspricht dem Zugehörigkeitsgrad, für den die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wasser und Watt identisch ist. Der Schnittpunkt beider Verteilungen markiert diesen Punkt (siehe Abbildung 4.7).

Bemerkung: Generell kann ein Zugehörigkeitsgrad nur im Bereich von 0 bis 1 liegen. Deshalb werden die Schwellwerte T_{H_low} , T_{H_high} , $T_{L_low}(\beta)$, $T_{L_high}(\beta)$, $T_{P_low}(\beta)$ und $T_{P_high}(\beta)$ ermittelt, um die jeweilige Zugehörigkeitsfunktion zu begrenzen. Alle Punkte mit einem Merkmalswert außerhalb dieses Bereiches erhalten im Falle der Klassifikation je nach Lage einen Zugehörigkeitsgrad von 0 oder 1. Im Rahmen der Bestimmung der Klassifikationsparameter jedoch wird die Zugehörigkeitsfunktion nicht durch die beiden korrespondierenden Schwellwerte begrenzt. Somit ergeben sich außerhalb dieses Bereiches Zugehörigkeitsgrade größer 1 bzw. kleiner 0. Dies ist notwendig, um Mittelwert und Standardabweichung der beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades korrekt zu bestimmen.

¹⁶ Das Signifikanzniveau ergibt sich durch Subtraktion der Irrtumswahrscheinlichkeit α von dem Wert 1.

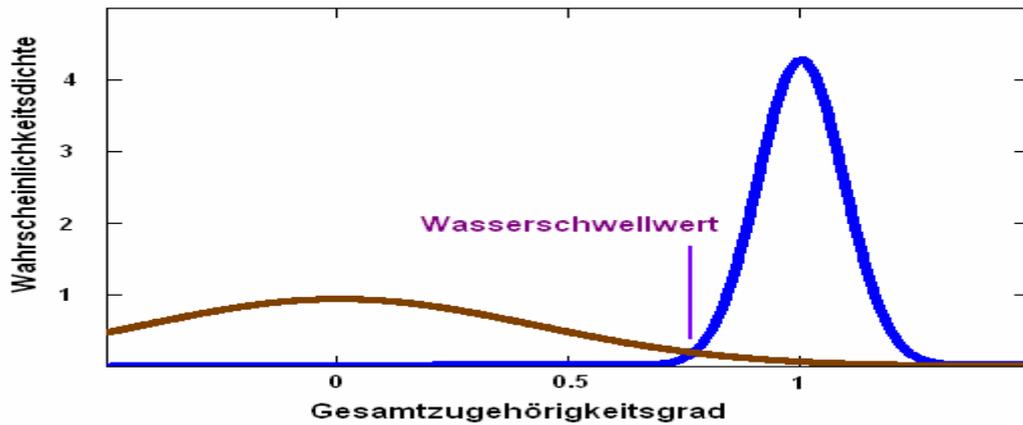


Abbildung 4.7: Ableitung des Klassifizierungsschwellwertes aus den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades

4.1.6 Verwendung mehrerer Trainingssets

Je nach Größe des Untersuchungsgebietes kann die Länge eines Flugstreifens mehrere Kilometer betragen. Dabei können sich die Ausprägungen der Merkmale Höhe, Intensität sowie 2D-Punktdichte aufgrund der Variabilität des Wasserstandes, der chemischen Zusammensetzung des Watts, der Einflüsse äußerer Kräfte (z.B. Wind) ändern. Somit sinkt mit steigendem Abstand der zu klassifizierenden Punkte von den Trainingsgebieten deren Repräsentativität für beide Klassen, wodurch sich ebenfalls die Klassifikationsgüte verschlechtert. Deshalb besteht die Möglichkeit, mehrere so genannte Trainingssets über den Flugstreifen zu verteilen. Jedes Trainingsset besteht jeweils aus mindestens einem Trainingsgebiet pro Klasse und ist repräsentativ für die nähere Umgebung.

Prinzipiell ergeben sich verschiedene mögliche Varianten der Verkettung, wobei zwei Ansätze favorisiert werden. Im ersten Fall verwendet man nur das jeweils am dichtesten gelegene Trainingsset für die Klassifizierung. Nach Bestimmung der Klassifikationsparameter für alle definierten Trainingssets ermittelt man für jede Laserzeile das jeweils nächste Trainingsset und nutzt dieses für die Klassifikation. Im zweiten Fall verwendet man jeweils die beiden dichtesten Trainingssets, sofern die aktuelle Zeile zwischen diesen liegt. Dabei wird die Zeile jeweils mit beiden Sets klassifiziert. Dadurch erhält man für jeden Punkt zwei Zugehörigkeitsgrade zur Klasse „Wasser“. Diese werden nun mit Hilfe des jeweiligen Abstandes zu ihren Trainingssets gewichtet gemittelt. Analog erfolgt die Ableitung des Klassifizierungsschwellwertes. Im Folgenden kann jeder Punkt der Zeile mit Hilfe des abstandsgewichteten Schwellwertes klassifiziert werden. Für den Anfangs- sowie Endbereich des Flugstreifens wird nur je ein Set verwendet.

Die Abbildung 4.8 verdeutlicht die Möglichkeiten. In der linken Grafik ist der Umring (rotes Polygon) eines zu klassifizierenden Flugstreifens abgebildet. Weiterhin sind drei Trainingssets, welche je aus einer Wasserfläche (hellblaues Polygon) und einer Wattfläche (violette Polygon) bestehen, visualisiert. Verwendet man jeweils nur das Trainingsset mit dem kürzesten Abstand (Abbildung 4.8 mitte), so teilt sich der Flugstreifen in drei Bereiche: A, B und C. Im Teil A wird das erste, im Teil B das zweite und im Teil C das dritte Trainingsset für die Klassifikation verwendet. Sofern die Klassifikation abstandsgewichtet erfolgt (Abbildung 4.8 rechts), teilt sich das Beispiel in vier Abschnitte. Während die Bereiche A und D nur mit dem Trainingsset 1 bzw. 3 klassifiziert werden, kommen im Bereich B und C jeweils die Sets 1 und 2 bzw. 2 und 3 zur Anwendung.

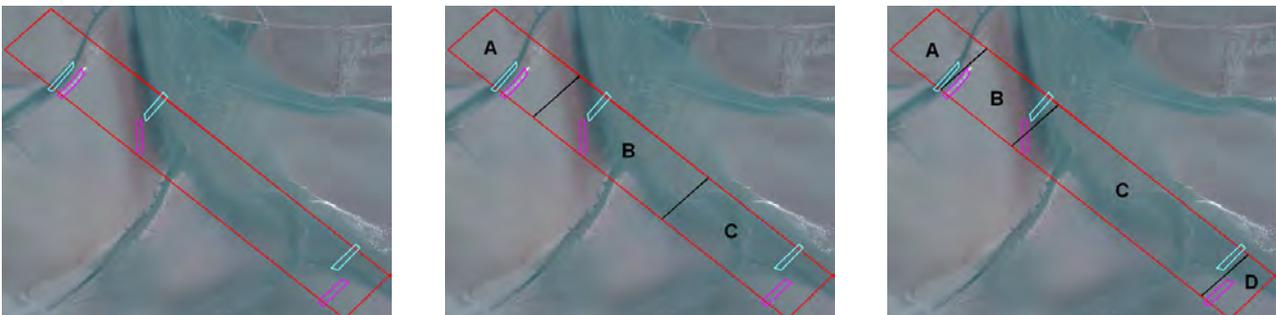


Abbildung 4.8: Klassifikation mit mehreren Trainingssets: Flugstreifen mit drei Trainingssets (links), Auswahl nach kürzestem Abstand (mitte), Abstandsgewichtung (rechts)

4.1.7 Plausibilisierung

Als Ergebnis der Klassifizierung liegt für jeden Punkt eine Entscheidung hinsichtlich der Klassenzugehörigkeit vor. Wie bei jeder Klassifizierung ist die Zuordnung (z.B. abhängig von der Auswahl der Trainingsgebiete sowie Rauschen in den Daten) in der Regel nicht zu 100% richtig. Um möglichst viele Fehlklassifizierungen aufzudecken und zu korrigieren, wurden mehrere Arbeitsschritte unter dem Oberbegriff „Plausibilisierung“ zusammengefasst.

4.1.7.1 Kontrolle der Scanzeilen

In jeder Scanzeile wird überprüft, ob ein Klassifizierungswechsel auftritt. Werden ein oder mehrere Wechsel festgestellt, so wird überprüft, ob der jeweilige Wasserpunkt eine geringere Höhe aufweist als der benachbarte Wattpunkt. Ist dies nicht der Fall, tritt ein Klassifizierungswiderspruch auf. Dann werden die jeweiligen Gesamtzugehörigkeitsgrade zur Klasse „Wasser“ beider Punkte gemittelt und eine einheitliche Klassifikation für beide Punkte anhand des Mittelwertes durchgeführt.

Treten im Untersuchungsgebiet Wellen auf, so kann es durchaus vorkommen, dass Wasserpunkte eine größere Höhe aufweisen als benachbarte Wattpunkte. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit nicht nur die Wasserhöhe eines Punktes zu verwenden, sondern die mittlere Wasserhöhe innerhalb eines gewissen Einflussbereichs. Analog zum direkten Vergleich zweier Punkthöhen wird nun die Höhe des Wattpunktes mit der mittleren Höhe der benachbarten Wasserpunkte verglichen.

Sofern mindestens ein Klassifizierungswiderspruch gefunden wurde, wird dieser entfernt und eine erneute Kontrolle der Scanzeile durchgeführt. Die Kontrolle einer Scanzeile ist beendet, wenn entweder kein Widerspruch mehr gefunden wird oder eine a priori festgelegte maximale Anzahl an Durchläufen abgearbeitet wurde.

4.1.7.2 Kontrolle von künstlichen Profilen in Flugachsenrichtung

Im Abschnitt 4.1.7.1 wurde die Kontrolle der Höhe bei Klassifizierungsübergängen innerhalb einer Scanzeile vorgestellt. Das gleiche Prinzip wird ebenfalls für Profile in Flugrichtung angewendet. Im Gegensatz zu der jeweiligen Laserscanzeile liegen a priori keine Profile in Flugachsenrichtung vor. Diese müssen erst gebildet werden. Im Folgenden verläuft die Aufdeckung und Beseitigung von Klassifizierungswidersprüchen analog.

4.1.7.3 Tiefpassfilterung des Klassifizierungsergebnisses

Da die Klassifizierung auf Basis der Rohdaten erfolgt und wir im Folgenden für jeden Punkt eine Zuordnung zur Klasse „Wasser“ oder „Watt“ erhalten, treten besonders an Klassifizierungsgrenzen sowie in schwierig zu klassifizierenden Bereichen wie bei Wellen oder stark durchfeuchteten Wattflächen vermehrt kleinräumige Wechsel der Klassifizierung auf. Um ein homogenes Klassifizierungsergebnis zu erhalten, empfiehlt es sich, hochfrequente Klassifizierungswechsel zu unterdrücken. Dazu werden alle klassifizierte Segmente (= hintereinander folgende Punkte einer Klasse) unterhalb einer gewissen Größe S_1 innerhalb der Scanzeile der jeweils anderen Klasse zugeordnet. Analog erfolgt die Tiefpassfilterung in Flugrichtung anhand künstlich erzeugter Profile mit dem Schwellwert S_2 .

4.1.8 Eigenschaften des Algorithmus

a) Ableitung der Wasserflächen ausschließlich aus Laserscannerdaten

Die Wasserflächenextraktion beschränkt sich ausschließlich auf die Verwendung der Laserscannerdaten für die Klassifizierung. Es werden keine zusätzlichen Daten wie Orthophotos, bathymetrische Vermessungen oder GIS-Informationen benötigt. Damit wird der Algorithmus den praktischen Anforderungen der Küstenschutzbehörden gerecht, welche aufgrund des Kostendruckes oft nur eine Erhebung von Laserscannerdaten vorsehen. Dennoch ist eine Klassifikation der so erhobenen Daten möglich.

b) Automatische Bestimmung aller Klassifikationsparameter (überwachte Klassifizierung)

Durch die automatische Ableitung aller Klassifikationsparameter aus a priori definierten Trainingsgebieten wird dem Auswerter die Klassifikation bedeutend erleichtert. Zusätzliches Nutzerwissen wird lediglich für die Vorgabe der Plausibilisierungsparameter benötigt. Dadurch lässt sich der Algorithmus auch ohne tief greifende Kenntnis des Prinzips durch den Nutzer anwenden.

- c) Berücksichtigung des unterschiedlichen Reflexionsverhaltens der Klassen „Wasser“ und „Watt“ anhand der Merkmale Intensität und Punktdichte

Aufgrund des Einflusses von äußeren Kräften (z.B. Wind, Wellen und Strömung) sowie dem Auftreten von isolierten Wasserflächen kann eine Klassifikation, welche sich nur auf das Merkmal Höhe stützt, zu fehlerhaften Zuordnungen führen. Um eine gesicherte Entscheidung zwischen den Klassen „Wasser“ und „Watt“ zu treffen, müssen zusätzliche höhenunabhängige Merkmale verwendet werden.

Die Klassifikation nutzt die Merkmale Intensität und Punktdichte, welche durch das Reflexionsverhalten der illuminierten Oberfläche entscheidend geprägt werden. Da sich das Reflexionsverhalten grundsätzlich zwischen „Wasser“ und „Watt“ unterscheidet, sind diese Merkmale geeignet, um beide Klassen voneinander zu trennen.

- d) Berücksichtigung der Abhängigkeit der Merkmale Intensität und Punktdichte von dem Inzidenzwinkel des Laserstrahls

Wie in Abschnitt 4.1.3 erläutert, besteht eine Abhängigkeit zwischen dem Inzidenzwinkel sowie den Merkmalen Intensität und 2D-Punktdichte. Diese wird durch die Modellierung mit einer geeigneten Funktion nach der Methode der kleinsten Quadrate und daraus abgeleiteten Schwellwerten sowie Gewichten berücksichtigt. Eine Kalibrierung der Merkmalswerte für Intensität und Punktdichte findet nicht statt, da das Reflexionsverhalten zwischen beiden Klassen differiert. Folglich kann eine Kalibrierung nur erfolgen, wenn die Klassenzugehörigkeit vor der Klassifikation bekannt ist.

- e) Modifizierung der Fuzzy-Control

Für die Steuerung eines Prozesses anhand der Fuzzy-Control (siehe Kapitel 2.4) müssen im Rahmen der Inferenz die Verknüpfungsregeln der verschiedenen Eingangsmengen festgelegt werden. An dieser Stelle geht das Wissen des Fachmanns über den Prozess ein. Mit steigender Anzahl der Eingangsgrößen sowie der unscharfen Eingangsmengen je Parameter erhöht sich die Anzahl der zu definierenden Verknüpfungsregeln (siehe Gleichung 2.25) überproportional mit entsprechender Auswirkung auf die benötigte Zeit für deren Aufstellung. Zudem sind die Regeln nur für das jeweilige System gültig. Bei Änderung der Systembedingungen (in Bezug auf die Klassifikation: Scannertyp, Flugparameter, chemische Zusammensetzung und Durchfeuchtungsgrad des Bodens etc.) ist eine Anpassung notwendig, deren Umfang wiederum von der Anzahl der Verknüpfungsregeln abhängt.

Das vorgestellte Verfahren verzichtet auf die Definition unscharfer Eingangsmengen und transformiert die Eingangsmessgrößen direkt in Zugehörigkeitsgrade der Zielmenge. Auf diese Weise umgeht man die zeitraubende Aufstellung aller Verknüpfungsregeln sowie notwendige Anpassungen bei sich ändernden Systembedingungen.

- f) Plausibilisierung des Klassifikationsergebnisses

Nach erfolgter Klassifikation wird das Ergebnis durch mehrere Kontrollschritte plausibilisiert. Dadurch können Klassifikationswidersprüche aufgedeckt und beseitigt werden. Somit erhält man im Ergebnis eine bessere Klassifikation. Zusätzlich wird das Resultat tiefpassgefiltert, um homogene Klassifizierungsübergänge zu gewährleisten.

- g) Moderater Zeitaufwand aufgrund sequentieller Klassifikation und Plausibilisierung

Sowohl die Klassifikation als auch die Plausibilisierung verwenden immer nur eine ausgewählte Anzahl an Scanzeilen, welche in Form eines Arrays zusammengefasst sind. Die Anzahl der Zeilen im Array ergibt sich im Falle der Klassifikation aufgrund der Größe des Polygons für die Bestimmung der 2D-Punktdichte, für die Plausibilisierung aus den Parametern der Tiefpassfilterung. Das Array wird wie ein Fenster über den gesamten Flugstreifen geschoben. So wird nach Klassifikation der mittleren Zeile, die Zeile mit der kleinsten Ordnungsnummer gelöscht und anschließend eine weitere Zeile dem Array hinzugefügt.

Diese sequentielle Bearbeitung der Laserdaten hat den Vorteil, dass für die Analyse immer nur ein kleiner, räumlich zusammenhängender Teil der Punkte betrachtet wird. Dadurch kann der Algorithmus theoretisch einen Flugstreifen mit unendlicher Länge klassifizieren. Die Bearbeitungszeit steigt dabei linear mit der Anzahl der Scanlinien.

4.2 Extraktion von Strukturlinien

Der im Rahmen der Arbeit vorgestellte Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien basiert auf einer Weiterentwicklung der Flächenrekonstruktionsansätze von Brzank (2001) und Briese (2004). 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 4.9).

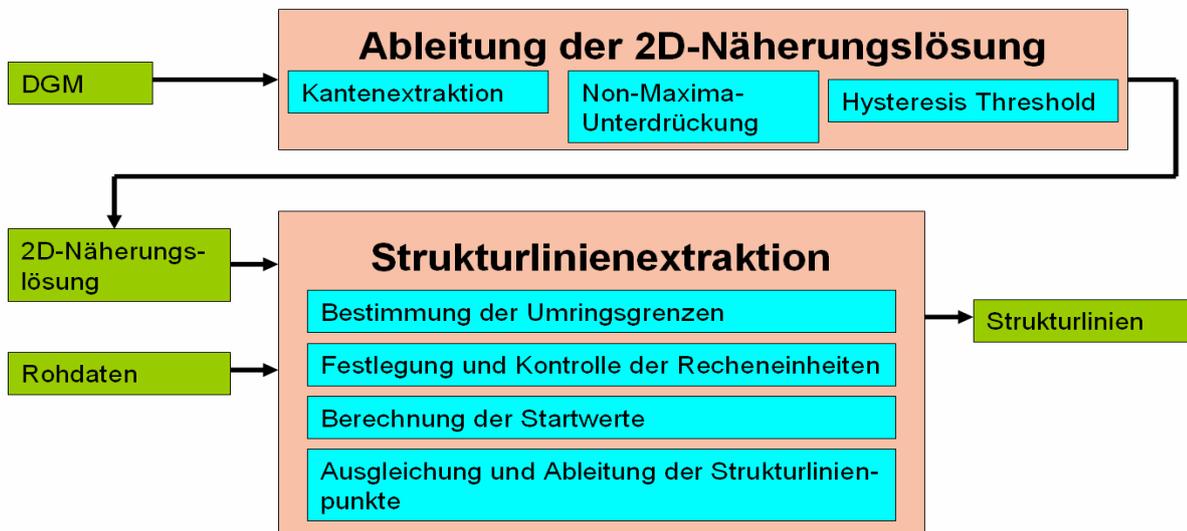


Abbildung 4.9: Flussdiagramm des Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien

4.2.1 1D-tanh-Funktion und Ableitung der Strukturlinienpunkte

Im Wattbereich treten die Strukturlinien generell paarweise auf. So finden sich an Prielen jeweils zwei zusammengehörende Linienpaare – Böschungsober- und Böschungsunterkante. Das Profil einer solchen Grabenseite lässt sich im Allgemeinen hinreichend genau durch eine Tangens hyperbolicus Funktion¹⁷ approximieren (Gleichung 4.4 und Abbildung 4.10).

$$z(v) = s \tanh(f(v + p)) + k \quad (4.4)$$

mit:

- s** Skalierungsfaktor - entspricht dem zweifachen Höhenunterschied zwischen dem oberen und dem unteren Plateau
- f** bestimmt den Abstand der Krümmungmaxima im Grundriss - je größer der Wert umso geringer der Abstand
- p** Verschiebung der tanh-Funktion in v-Richtung (quer zur Bruchkantenrichtung)
- k** Verschiebung der tanh-Funktion in z-Richtung

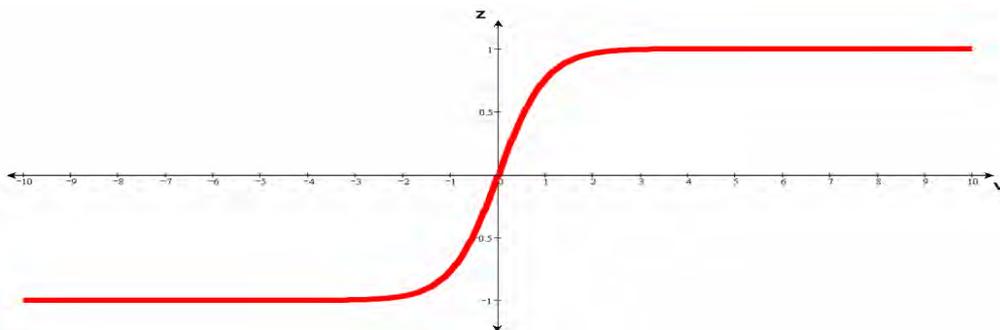


Abbildung 4.10: 1D-Tangens hyperbolicus Funktion

¹⁷ Nalwa und Binford (1986) nutzten diese Funktion, um in Bildern lineare Kantenstrukturen zu detektieren. Ihre Untersuchungen zeigen, dass die Funktion trotz geringer Anzahl an zu schätzenden Parametern geeignet ist, um Kantenstrukturen zu approximieren.

Sofern die vier Parameter der Funktion bekannt sind, kann je ein Strukturlinienpunkt für das korrespondierende Linienpaar ermittelt werden. Der Nutzer muss dafür a priori ein Kantenmodell vorgeben. Zur Auswahl stehen: Formlinienpaar, Rampenkante und Stufenkante (Abbildung 4.11 links, mitte, rechts). Das Formlinienpaar entspricht zwei korrespondierenden Formlinien, die durch Bestimmung der Krümmungsmaxima ermittelt werden. Die Krümmung eines Wertes $z(v)$ ergibt sich aus der Gleichung 4.5.

$$\kappa = \left| \frac{z''(v)}{(1 + z'(v)^2)^{3/2}} \right| \quad (4.5)$$

Die Krümmungsmaxima (Gleichungen 4.6a und 4.6b) lassen sich durch Bestimmung der Nullstellen der ersten Ableitung der Gleichung 4.5 berechnen. Die zugehörigen Höhen (Gleichungen 4.7a und 4.7b) ergeben sich durch das Einsetzen der Krümmungsmaxima in die Tangens hyperbolicus Funktion (Gleichung 4.4).

$$v_l \approx \frac{-0.919}{f} - p \quad (4.6a) \quad v_r \approx \frac{0.919}{f} - p \quad (4.6b)$$

$$z(v_l) \approx -0.725s+k \quad (4.7a) \quad z(v_r) \approx 0.725s+k \quad (4.7b)$$

Die extrahierten Punkte liegen somit zwischen den Plateaus h_u und h_o . Die Rampenkante wird durch die Konstruktion dreier Geraden gebildet. Dazu werden horizontale Linien durch die Plateaus h_u sowie h_o gelegt und mit einer Geraden durch den Wendepunkt mit dem Anstieg der Tangens hyperbolicus Funktion in diesem Punkt geschnitten. Die Definitionswerte dieser Punkte sind (Gleichungen 4.8a und 4.8b):

$$v_l = \frac{-1}{f} - p \quad (4.8a) \quad v_r = \frac{1}{f} - p \quad (4.8b)$$

Die jeweiligen Höhen betragen (Gleichung 4.9a und 4.9b):

$$z(v_l) = -s+k \quad (4.9a) \quad z(v_r) = s+k \quad (4.9b)$$

Sofern die Stufenkante angesetzt wird, schneidet man die beiden Plateaus mit einer senkrechten Linie durch den Wendepunkt. Somit ergeben sich die Bruchkantenpunkte zu $v_l = v_r = -p$. Die Höhen lassen sich analog zum Rampenkantenmodell gemäß den Gleichungen 4.9a und 4.9b berechnen.

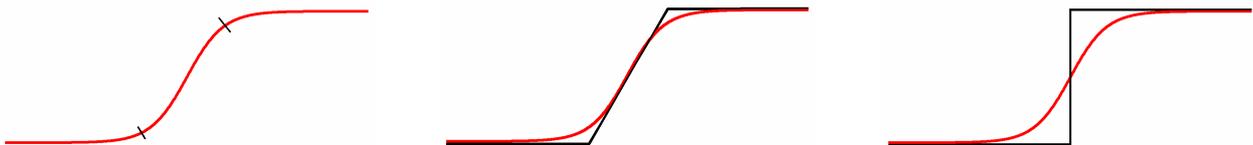


Abbildung 4.11: Ableitung der Strukturlinienpunkte: Formlinienpaar (links), Rampenkante (mitte), Stufenkante (rechts)

4.2.2 2D-Flächentypen der tanh-Funktion

Im Kapitel 4.2.1 wurde die Ableitung von Strukturlinienpunkten in Abhängigkeit vom angesetzten Kantenmodell nur eindimensional betrachtet. Da jedoch nicht nur Punkte, sondern Linien extrahiert werden sollen, muss das Modell um eine Dimension erweitert werden. Diesbezüglich sind die Richtung des Linienpaares sowie ihre Änderung zu berücksichtigen. Dabei sollen identische 1D-tanh-Profile entsprechend der Ausbreitungsrichtung aneinander gereiht werden.

Der Ansatz stützt sich auf zwei 2D-Flächentypen, wodurch sowohl gerade als auch gekrümmte Linienstücke approximiert werden können. Die Basisversion (Abbildung 4.12) ist geeignet, um gerade Strukturen zu rekonstruieren. Sie besitzt sechs Parameter (Gleichungen 4.10a-c). Neben den vier Parametern s , f , k und p sind zusätzlich der Verdrehungswinkel α sowie der Anstiegswinkel t integriert. α entspricht der Verdrehung zwischen dem übergeordneten (x,y) -Koordinatensystem $\mathbf{KS}(x,y)$ sowie dem strukturlinienbezogenen (u,v) -Koordinatensystem $\mathbf{KS}(u,v)$. Der Parameter t modelliert einen linearen Anstieg der Höhe in Ausbreitungsrichtung. Die aneinander gereihten Profile setzen sich in eine feste Azimutrichtung fort. Korrespondierende Strukturpunkte einer Linie verschmelzen dabei zu einer Geraden.

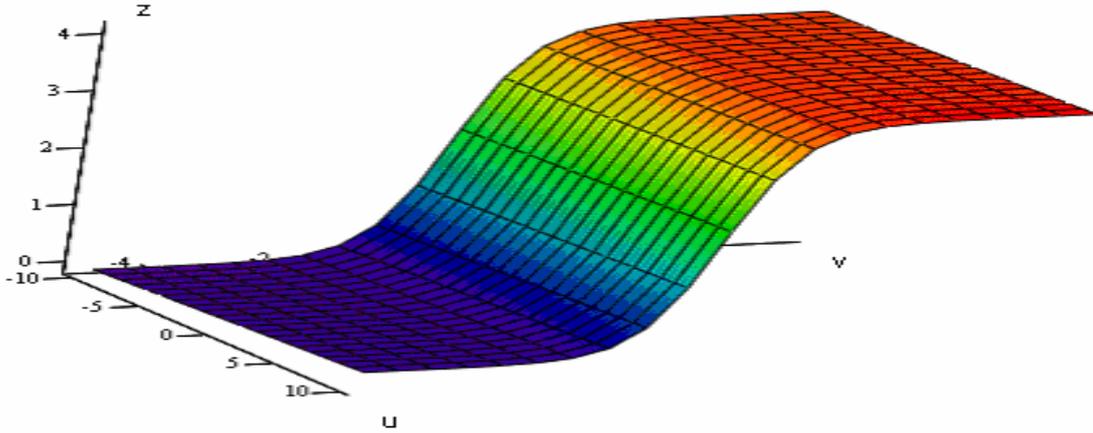


Abbildung 4.12: Tangens hyperbolicus Funktion (2D-Basis)

$$z(u, v) = s \tanh(f(v + p)) + k + tu \quad (4.10a)$$

$$u = \cos(\alpha)x + \sin(\alpha)y \quad (4.10b)$$

$$v = -\sin(\alpha)x + \cos(\alpha)y \quad (4.10c)$$

mit:

- α Verdrehungswinkel zwischen dem Referenz-KS (x,y) und dem lokalen KS (u,v)
- t Anstiegsfaktor der Kante in Strukturlinienrichtung

Der zweite Flächentyp (Abbildung 4.13) ist geeignet, um einen im Grundriss gekrümmten Verlauf der Strukturlinien zu approximieren. Die 1D-Profile setzen sich dabei nicht linear sondern kreisförmig fort. Die abgeleiteten Strukturlinienlösungen für jede einzelne Recheneinheit entsprechen den Teilstücken zweier konzentrischer Kreise.

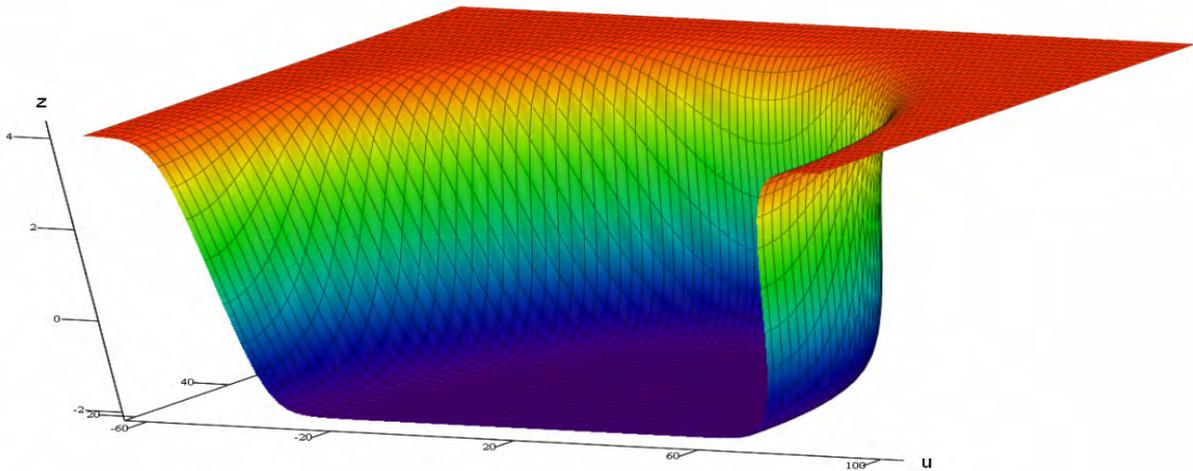


Abbildung 4.13: Tangens hyperbolicus Funktion (2D-Kreis)

Die Kreis-Variante besitzt sieben Parameter (Gleichungen 4.11a-c). Analog zur Basisversion bleiben die Parameter s , f , k und t bestehen. Hinzu kommen die Variablen u_{shift} , v_{shift} sowie der **Radius**. Die Parameter u_{shift} und v_{shift} markieren den Mittelpunkt des Kreises im (u,v)-Koordinatensystem. Der **Radius** bestimmt die Stärke der Richtungsänderung, welche die beiden Strukturlinien erfahren. Die Variable α ist im Gegensatz zur Basisversion keine Unbekannte. Sie ergibt sich aus den Punkten innerhalb der jeweiligen Recheneinheit (siehe Kapitel 4.2.6.2). Der Parameter p entfällt.

$$z(u, v) = s \tanh\left[f\left(\sqrt{(u - u_{shift})^2 + (v - v_{shift})^2} - \text{Radius}\right)\right] + k + \text{acos}\left[\frac{u - u_{shift}}{\sqrt{(u - u_{shift})^2 + (v - v_{shift})^2}}\right] t \quad (4.11a)$$

$$u = \cos(\alpha)x + \sin(\alpha)y \quad (4.11b)$$

$$v = -\sin(\alpha)x + \cos(\alpha)y \quad (4.11c)$$

4.2.3 Ableitung der Näherungslösung

Um die Parameter der jeweiligen Flächenfunktion zu bestimmen, wird prinzipiell eine 2D-Approximation beider zusammengehörender Strukturlinien benötigt. Zum einen können so die Näherungswerte der gesuchten Parameter bestimmt werden, die Voraussetzung für die durchzuführende Ausgleichung einer nicht linearen Flächenfunktion nach der Methode der kleinsten Quadrate sind. Zum anderen müssen zur Berechnung der Unbekannten die verwendeten Laserpunkte auf eine definierte Strukturlinienumgebung begrenzt werden (siehe Kapitel 4.2.4).

Die Approximationen liegen im Allgemeinen a priori nicht vor, sondern müssen aus den Laserdaten abgeleitet werden. Dafür verwendet man gewöhnlich Operatoren der Bildverarbeitung (siehe Kapitel 3.2.1). Die Bestimmung der Näherungen gestaltet sich jedoch häufig schwierig, wenn Operatoren der zweiten Ableitung eingesetzt werden. Aufgrund der höheren Rauschanfälligkeit sinken Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Extraktion. Größere Schwierigkeiten bereitet zusätzlich die Verknüpfung korrespondierender Strukturlinien zu einem Paar. Die Bestimmung scheitert gänzlich, wenn der Abstand des Strukturlinienpaares (z.B. bei schmalen Priel) im Vergleich zur Fensterbreite des Operators sehr klein ist.

Grundsätzlich lassen sich die Näherungswerte aller Parameter mit Ausnahme von f^{18} auch aus der Mittellinie zwischen beiden zusammenhängenden Strukturlinien ableiten. Diese Linie entspricht der Verbindung aller Punkte, die in den 1D-Profilen maximale Neigung aufweisen, und kann durch Kantenoperatoren der 1. Ableitung bestimmt werden. Diese Näherung lässt sich genauer und zuverlässiger ermitteln. Zudem entfällt die Verknüpfung korrespondierender Strukturlinien.

Deshalb werden für diesen Ansatz die Mittellinien verwendet. Durch den Einsatz von Standardkantenoperatoren der 1. Ableitung (z.B. Canny) wird ein Kantenbild erzeugt. Anschließend erfolgt eine Ausdünnung möglicher Kantenpunkte durch eine Non-Maxima-Unterdrückung. Nachfolgend werden durch die Methode Hysteresis Threshold im Kantenbild Pixelketten gebildet, die der Mittelachsennäherung entsprechen.

4.2.4 Bestimmung der Umringgrenzen

Berechnet man Flächenfunktionen aus gemessenen Stützpunkten, so dürfen nur die Punkte verwendet werden, die in der direkten Umgebung der gesuchten Strukturlinien liegen. Je weiter ein Punkt von der Mittelachse entfernt ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass dieser Punkt nicht mit der verwendeten Flächenfunktion harmoniert.

Es bestehen mehrere Möglichkeiten zur Bestimmung der Umringgrenzen. So können sie anhand des unterlegten DGM manuell digitalisiert werden. Auf diese Weise ist eine sinnvolle Begrenzung in Abhängigkeit der näheren Umgebung gegeben. Leider ist die manuelle Erfassung zeitaufwändig und auf die Dauer unbefriedigend. Die Umringgrenzen können ebenfalls automatisch generiert werden. Dazu wird ein Korridor um die jeweilige Mittelachse mit einer fixen Breite gebildet. Diese Variante ist schnell, kann jedoch bei bestimmten Situationen (sich stark ändernde Grabenbreite, weitere Strukturlinienpaare in unmittelbarer Umgebung) zu fehlerhaften Umrängen führen. Deshalb ist eine visuelle Kontrolle des Polygons durch einen menschlichen Operateur sinnvoll.

4.2.5 Festlegung und Kontrolle der Recheneinheiten

Der Nutzer definiert die Länge einer Recheneinheit sowie die Überlappungsrate. Da die Gesamtlänge der Näherungslösung bekannt ist, können die eingegebenen Parameter so (geringfügig) modifiziert werden, dass der Anfang der ersten Recheneinheit mit dem Startpunkt und das Ende der letzten Recheneinheit mit dem Endpunkt der Mittelachse übereinstimmen. Nun können jeder Recheneinheit die jeweiligen Laserpunkte hinzugefügt werden.

Anschließend wird für jedes Teilstück die geeignete Flächenfunktion ausgewählt. Dazu untersucht man den Verlauf der Mittelachse in der Recheneinheit. Sofern die Mittelachse keine Richtungsänderung erfährt, wird die Basisversion verwendet. Ändert die Mittelachse jedoch ihre Richtung stärker als ein vorgegebener Schwellwert, so wird die Kreisversion herangezogen. Treten innerhalb einer Recheneinheit sowohl positive als auch negative Richtungsänderungen auf, so wird die Berechnung der Recheneinheit nicht durchgeführt, wenn die Änderungen jeweils größer als der Schwellwert sind. Andernfalls wird die Summe aus allen Richtungsänderungen gebildet und diese mit dem Schwellwert verglichen. Nachfolgend wird kontrolliert, ob jede Recheneinheit genügend Punkte für eine Berechnung beinhaltet und wie diese

¹⁸ Das Verfahren zur Ableitung des Parameters f anhand der Mittellinie sowie der umgebenden Punkte wird im Abschnitt 4.2.6 beschrieben.

verteilt sind. Dazu gibt der Nutzer die Mindestanzahl an Punkten je Seite bezüglich der Mittelachse vor. Nur wenn die Punktzahl je Recheneinheit ausreichend hoch ist und für beide Seiten – insbesondere in den Bereichen außerhalb beider Strukturlinien – genügend Punkte vorhanden sind, werden für die Recheneinheit die Parameter bestimmt.

4.2.6 Berechnung der Startwerte

Nachdem die Recheneinheiten festgelegt und kontrolliert sind, müssen die Startwerte für die Unbekannten bestimmt werden. Die Startwerte werden benötigt, um die Beobachtungsgleichungen zu linearisieren. Je nach ausgewähltem Flächentyp unterscheidet sich der Berechnungsvorgang.

4.2.6.1 Basisversion

Bei der Basisversion wird zuerst der Ursprung des lokalen (u,v)-Koordinatensystems im Schwerpunkt der Laserpunkte der jeweiligen Recheneinheit verankert. Sofern die Näherungslösung innerhalb der Recheneinheit keine Richtungsänderung erfährt, entspricht der Startwert von α dem Winkel (mathematisch positive Richtung) zwischen der x-Achse und der Mittelachse (Abbildung 4.14 links). Treten jedoch Knickpunkte auf, so wird eine ausgleichende Gerade durch alle Knickpunkte in der Recheneinheit sowie den Schnittpunkten der Mittelachse am Anfang und Ende der Recheneinheit gelegt. Der Startwert von α ergibt sich analog als Differenzwinkel zwischen der Richtung der x-Achse und der ausgleichenden Geraden (Abbildung 4.14 rechts).

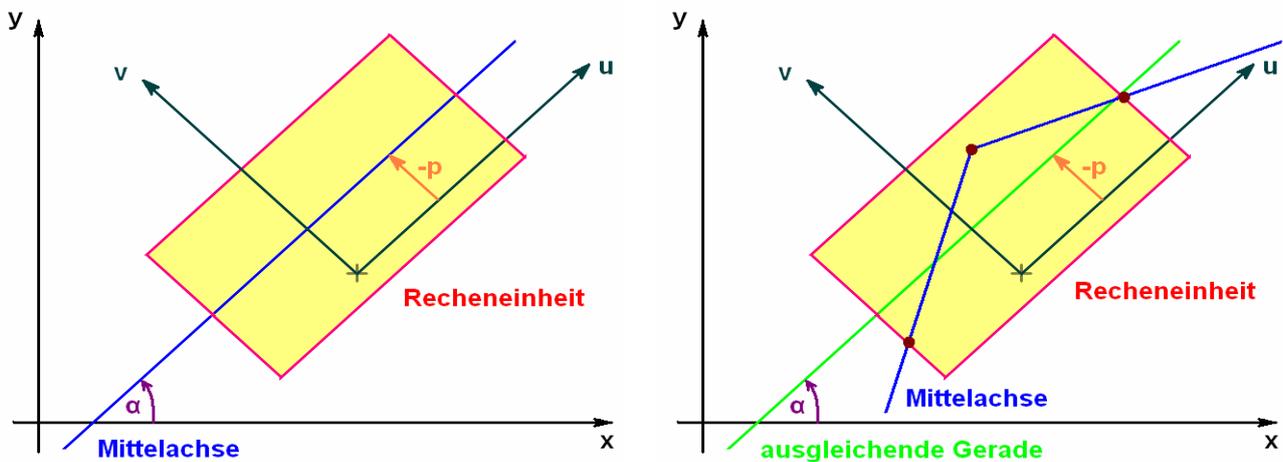


Abbildung 4.14: Festlegung des (u,v)-KS und Berechnung der Startwerte von α und p für die Basisversion: ohne Knickpunkt der Mittelachse (links), mit Knickpunkt der Mittelachse (rechts)

Der Startwert für den Verschiebungsbetrag p ergibt sich aus dem senkrechten Abstand zwischen der u -Achse und der Mittelachse (respektive der ausgleichenden Geraden). Nachfolgend wird eine ausgleichende Ebene durch alle Punkte der Recheneinheit ermittelt. Die Neigung der Ebene in Richtung der u -Achse findet Verwendung als Startwert für den Anstiegsparameter t . Nun werden die Höhen sämtlicher Stützpunkte so geändert, dass der Einfluss des ermittelten Anstiegs in Strukturlinienrichtung nicht mehr vorhanden ist. Im Folgenden werden die Punkte in Bezug auf ihre Lage (links oder rechts) zur Mittelachse klassifiziert. Beide Gruppen werden bezüglich ihrer Höhe neu geordnet und es wird der jeweilige mittlere Höhenwert berechnet. Durch den Vergleich beider Mittelwerte ergibt sich, auf welcher Seite die Böschungsober- bzw. die Böschungsunterkante liegt. Nun wird jeweils der Mittelwert einer bestimmten Prozentzahl (z.B. 30%) der höchsten Punkte der Seite der Böschungsoberkante bzw. der tiefsten Punkte der Seite der Böschungsunterkante ermittelt. Zieht man diese beiden Werte voneinander ab, so erhält man genähert den Abstand zwischen dem oberen und unteren Plateau, welcher dem doppelten Startwert für den Parameter s entspricht. Der Startwert für das mittlere Höhenniveau k kann durch Mittelbildung der oberen und unteren Plateauhöhe gewonnen werden.

Schlussendlich fehlt nur noch der Startwert für den Parameter f . Sofern die beiden zusammengehörenden Strukturlinien vorhanden sind, kann f direkt aus deren Abstand berechnet werden. Es steht jedoch nur die Mittelachse zur Verfügung. Von allen plausiblen f wird deshalb jedes innerhalb einer Ausgleichung zusammen mit den anderen Startwerten verwendet. Nachfolgend berechnet man die mittlere Verbesserungsquadratsumme. Für die Ausgleichung, bei der die mittlere Verbesserungsquadratsumme am kleinsten ist, harmonisiert der zugehörige Wert f am besten mit den bereits ermittelten Startwerten sowie den Laserpunkten in der Recheneinheit. Dieser Wert wird im Folgenden verwendet.

4.2.6.2 Kreisversion

Auch bei der Kreisversion wird zuerst das lokale (u,v)-KS aufgebaut. Dazu wird durch den ersten, mittleren und letzten Punkt der Mittelachse in der jeweiligen Recheneinheit ein Kreis gelegt (Abbildung 4.15). Der Mittelpunkt des Kreises bildet den Ursprung des (u,v)-Systems. Sofern die Mittelachse in Ausbreitungsrichtung eine Linkskurve beschreibt, wird die u-Achse durch den Startpunkt der Recheneinheit auf der Mittelachse gelegt. Handelt es sich um eine Rechtskurve, so durchläuft die u-Achse den Stoppunkt der Recheneinheit. Die v-Achse ergibt sich aus der Tatsache, dass es sich um ein rechtshändiges, kartesisches KS handelt. Der aus den drei Punkten ermittelte **Radius** dient als Startwert. Die Parameter u_{shift} und v_{shift} werden mit 0 initialisiert. Im Folgenden werden die Polarkoordinaten sämtlicher Stützpunkte in der Recheneinheit in Bezug auf das (u,v)-KS berechnet. Im Polarkoordinatensystem wird eine ausgleichende lineare Funktion der Form $f(r,\varphi) = z = a \cdot r + b \cdot \varphi + c$ geschätzt. Betrachtet man die Funktion im (x,y)-KS, so ähnelt sie einer Spirale. Der Anstieg in Richtung φ dient als Startwert für den Parameter t . Analog zur Basisvariante muss der Einfluss des Anstieges in Strukturlinienrichtung nun eliminiert werden. Dazu wird von jedem Punkt i der Betrag $t \cdot \varphi_i$ abgezogen. Die Bestimmung der Startwerte von s , k sowie f erfolgt analog zur Basisvariante.

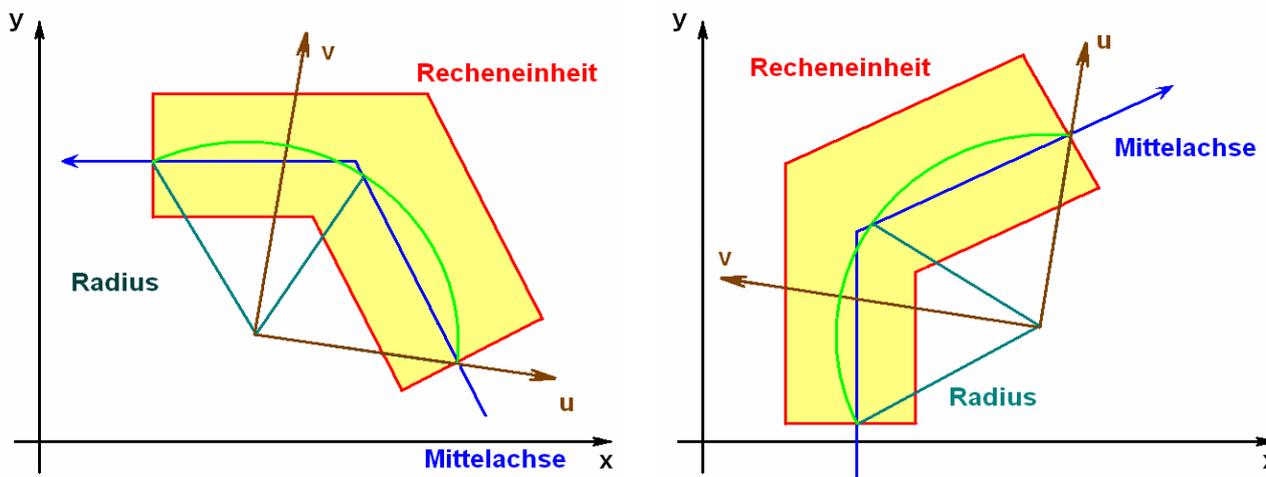


Abbildung 4.15: Festlegung des (u,v)-KS und Berechnung des Startwertes Radius für die Kreisversion: Richtungsänderung gegen den Uhrzeigersinn (links), Richtungsänderung im Uhrzeigersinn (rechts)

4.2.7 Ausgleichung und Ableitung der Strukturlinienpunkte

Für jede Recheneinheit werden innerhalb einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate die gesuchten Parameter bestimmt. Weiterhin können zusätzliche Pseudobeobachtungen eingeführt werden, um die Ausgleichung zu stützen. Sie beziehen sich jeweils auf einen ermittelten Startwert.

Nachfolgend werden die ermittelten Parameter s und f der Recheneinheiten plausibilisiert, für welche die Ausgleichung konvergierte. Sofern Vorwissen über den minimalen und maximalen Abstand der gesuchten Strukturlinien bekannt ist, können unter Angabe des Strukturlinientyps die berechneten Lösungen der Recheneinheiten auf Einhaltung dieser Forderung kontrolliert werden. Gleiches gilt für den minimalen und maximalen Höhenunterschied zwischen den Linien. Im Zuge dieser Kontrolle der Ergebnisse werden unplausible Lösungen entfernt. Anschließend können nun die Strukturlinien berechnet werden. Dazu wird in jeder Recheneinheit eine Ebene definiert. Diese verläuft durch den Schwerpunkt der Laserpunkte im Teilstück und steht senkrecht auf den beiden Lösungsgeraden (Basisversion) bzw. den konzentrischen Kreisen (Kreisversion). Auf diese Weise erhält man je einen Punkt der Böschungsoberkante und Böschungunterkante. In der ersten und letzten Recheneinheit werden die beiden Geraden/Kreise zusätzlich noch mit einer senkrechten Ebene durch den Startpunkt beziehungsweise Endpunkt der Mittelachse geschnitten. Durch eine Besselsplineinterpolation (siehe Kraus, 2000) können nachfolgend alle Punkte beider Strukturlinien zu geschlossenen Linienzügen verknüpft werden.

4.2.8 Eigenschaften des Algorithmus

a) Ableitung von Formlinien- und Bruchkantenpaaren

Je nach Auswahl des Modells können zwei korrespondierende Formlinien oder Bruchkanten (Stufenkante und Rampenkante) extrahiert werden. Damit ist der Ansatz universell für alle gängigen Strukturlinienformen im Wattbereich einsetzbar.

b) Approximation von geraden und gekrümmten Strukturen

Durch die Analyse der Richtungsänderungen innerhalb einer Recheneinheit kann gezielt entweder die Basis- oder die Kreisversion für die Rekonstruktion der Oberfläche eingesetzt werden. Dadurch steigt die Approximationsgenauigkeit der Oberfläche und des Strukturlinienpaares.

c) Semiautomatische Extraktion

Die Strukturlinien werden innerhalb eines semiautomatischen Prozesses extrahiert. Dadurch wird einerseits eine zuverlässige und kontrollierte Extraktion gewährleistet. Andererseits impliziert dieses Vorgehen einen höheren personellen Aufwand als ein vollständig automatisches Verfahren. An mehreren Stellen muss die Ableitung der Strukturlinien durch manuelles Eingreifen unterstützt werden. Dieses umfasst im Allgemeinen eine Vorgabe von Parametern für den jeweiligen Teilschritt.

d) Einsatz von kontinuierlichen Flächenfunktionen

Der Algorithmus verwendet für die stückweise Rekonstruktion jeweils eine kontinuierliche Flächenfunktion. Im Gegensatz zu einer Aneinanderreihung mehrerer Funktionen innerhalb einer Recheneinheit (z.B. Ebenenpaar – Brzank (2001)) entfallen durch dieses Vorgehen mehrere Nachteile.

Beim Einsatz mehrerer Funktionen müssen die Laserpunkte jeweils einer Fläche zugeordnet werden. Die Approximationsgüte hängt entscheidend von der richtigen Zuordnung ab, die wiederum mit der Genauigkeit der 2D-Strukturliniennäherungen korreliert ist. Zudem müssen für alle Teilfunktionen genügend Laserpunkte vorhanden sein, um eine exakte Bestimmung der Parameter zu gewährleisten. Beide Bedingungen sind jedoch häufig nicht erfüllt. Die Genauigkeit der Strukturliniennäherungen ist aufgrund der Verwendung von Kantenoperatoren der 2. Ableitung durch die erhöhte Anfälligkeit gegen Rauschen oft gering. Zudem ist die Anzahl von Laserpunkten zwischen zwei korrespondierenden Strukturlinien in Abhängigkeit von deren Abstand, der Exposition der Oberfläche, den Befliegungsparametern sowie dem eingesetzten System sehr klein.

e) Verwendung der Mittelachse als 2D-Näherung

Für die Bestimmung der Näherungswerte der unbekannt Parameter der jeweiligen Flächenfunktion sowie des Umrings benötigt man entweder die 2D-Näherung des Strukturlinienpaares oder die Mittelachse. Der Algorithmus verwendet die Mittelachse als 2D-Näherung, da die exakte Ermittlung der Strukturliniennäherungen schwieriger ist als die Bestimmung der Mittelachse. Dies liegt daran, dass zur Bestimmung der Strukturliniennäherungen Kantenoperatoren der 2. Ableitung verwendet werden müssen. Diese weisen eine höhere Rauschanfälligkeit als die Operatoren der 1. Ableitung auf, welche für die Extraktion der Mittelachse eingesetzt werden. Zudem müssen die korrespondierenden Strukturliniennäherungen zueinander orientiert werden. Dies ist bisher nur durch hohen manuellen Aufwand möglich.

f) Automatisierte Kontrollen der Zwischenergebnisse

An mehreren Stellen des Algorithmus wird eine automatisierte Kontrolle der Ergebnisse des jeweiligen Teilschrittes durchgeführt. Nur die Recheneinheiten, welche die entsprechenden Anforderungen erfüllen, verbleiben in der Extraktion. Alle anderen werden im weiteren Verlauf nicht mehr verwendet.

Eine automatisierte Kontrolle erfolgt nach der Festlegung der Recheneinheiten sowie der Ausgleichung. Dadurch können Recheneinheiten ausgeschlossen werden, die über eine zu geringe Punktzahl verfügen sowie unplausible Lösungen nach der Ausgleichung entfernt werden. Dieses Vorgehen führt bei Ausschluss von Recheneinheiten zu fehlenden Strukturlinienlösungen. Durch die Splineinterpolation werden diese im letzten Schritt geschlossen.

5 Praktische Tests der vorgestellten Ansätze und Verfahren

Um die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Verfahren zu demonstrieren sowie ihre Grenzen auszuloten, werden in diesem Kapitel ausgewählte Beispiele sowohl für die Klassifikation der Wasserflächen als auch die Extraktion von Strukturlinien vorgestellt und analysiert. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Referenzdaten sind die Beispiele voneinander unabhängig. Im Folgenden werden zuerst die beiden vorgestellten Teillösungen bezüglich des Leistungsvermögens sowie der erzielbaren Genauigkeit analysiert. Anschließend wird für einen großflächigen repräsentativen Wattbereich anhand des adaptierten Arbeitsablaufes ein Digitales Geländemodell abgeleitet.

5.1 Konzept der Evaluation

Um die Güte des jeweiligen Algorithmus zu analysieren, können sowohl interne als auch externe Methoden verwendet werden. Bei einer internen Analyse erfolgt die Evaluation anhand von Genauigkeitsparametern, die parallel im jeweiligen Algorithmus abgeleitet wurden. Diese Methode benötigt keine zusätzlichen Mess- bzw. Referenzdaten und kann somit generell immer durchgeführt werden. Aufgrund der Ableitung der Genauigkeitsparameter aus dem Algorithmus, ist jedoch die daraus folgende Evaluierung nicht vollständig objektiv.

Externe Verfahren nutzen Referenzdaten unabhängiger Quellen. Dabei verwendet man möglichst Daten, die mindestens eine Zehnerpotenz genauer sind, um den Einfluss der (Un-)Genauigkeit der Referenzdaten nachfolgend nicht weiter berücksichtigen zu müssen. Aufgrund der statistischen Unabhängigkeit zwischen den zu evaluierenden Ergebnissen und den Referenzwerten (sowie deren höherer Genauigkeit) kann die Güte der berechneten Ergebnisse objektiv ermittelt werden. Somit lässt sich durch Variation der Modell- und Steuerungsparameter direkt deren Einfluss auf die Genauigkeit analysieren. Externe Verfahren bedingen aber unabhängige Referenzdaten, die oft nicht zur Verfügung stehen.

5.1.1 Evaluation der Klassifikation von Wasserflächen

Für jeden zu klassifizierenden Punkt wird ein Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ aus den verwendeten Merkmalen errechnet, der zwischen Null und Eins liegt. Es handelt sich zwar nicht um eine Eintrittswahrscheinlichkeit, die direkt eine mathematisch strenge interne Genauigkeitsinterpretation ermöglicht. Dennoch können aber sowohl die Zugehörigkeitsgrade alleine als auch die Dichtefunktionen der Zugehörigkeitsgrade für das Trainingset (siehe Kapitel 4.1.5.4) verwendet werden, um die Güte der Klassifikation einzuschätzen. Der jeweilige Zugehörigkeitsgrad entspricht einem bestimmten Verhältnis der Dichtefunktion des Trainingsgebietes „Wasser“ zur Dichtefunktion des Trainingsgebietes „Watt“. Im Falle des Klassifikationsschwellwertes liegt dieses bei Eins. Die Entscheidung für die Klasse „Wasser“ ist statistisch betrachtet genauso richtig (bzw. falsch) wie für die Klasse „Watt“. Mit steigendem Abstand des Zugehörigkeitsgrades vom Schwellwert steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Punkt der jeweiligen Klasse auch wirklich angehört. Anhand des Quotienten kann also die jeweilige Zuordnung hinsichtlich ihrer Richtigkeit eingeschätzt werden.

Für die externe Evaluation können verschiedene Datenquellen verwendet werden. So besteht die Möglichkeit, die Wasserflächen zeitgleich zur Befliegung terrestrisch aufzumessen. Dies ist allerdings nur für kleinere Bereiche praktikabel und generell mit einem nicht unerheblichen Aufwand und Risiko verbunden. Die zweite Möglichkeit stellt die Verwendung von zeitnah erhobenen Echolotungen dar. In Abhängigkeit von der jeweiligen Wassertiefe ergibt sich zwischen der Laserscannermessung und der Echolotung ein entsprechender Differenzbetrag. Allerdings sind eventuell auftretende Klaffungen zwischen beiden Messungen zu berücksichtigen. Ferner wird der Nachweis von flachen Wasserbereichen aufgrund der geringen oft nicht signifikanten Differenz schwierig. Die dritte Variante beruht auf der Digitalisierung der Wasser- und Wattbereiche aus zeitgleich erhobenen Orthophotos. Diese Methode eignet sich sowohl aus Sicht der erzielbaren Genauigkeit als auch der Wirtschaftlichkeit. Anhand der Referenzflächen kann sowohl die Korrektheit als auch die Vollständigkeit ermittelt werden. Deshalb wird die externe Evaluation anhand von Orthophotos durchgeführt.

5.1.2 Evaluation der Extraktion von Strukturlinien

Die interne Evaluation nutzt die im Zuge der vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate abgeleiteten Genauigkeitsparameter. Mit Hilfe des Globaltestes lässt sich analysieren, inwieweit das angesetzte funktionale und stochastische Modell zutrifft. Ferner ermöglichen die Standardabweichungen der geschätzten Parameter eine Interpretation deren Güte und Signifikanz. Nachfolgend können durch Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes (siehe Gleichung 5.1) die Kovarianzmatrizen der extrahierten Strukturlinienpunkte ermittelt und daraus deren Konfidenzellipsen abgeleitet werden.

$$\Sigma_{ff} = A \Sigma_{ll} A^T \quad (5.1)$$

Zudem dient die Anzahl der gelösten Recheneinheiten im Vergleich zur Gesamtanzahl als weiteres Kriterium.

Die externe Evaluation verwendet die terrestrisch erhobenen Strukturlinienpunkte. Nachfolgend können 3D-Verschiebungsvektoren durch Aufwinkeln der aus dem Algorithmus extrahierten Punkte auf die Referenzlinie ermittelt werden. Durch die statistische Analyse der Verschiebungsvektoren kann die Güte der Extraktion eingeschätzt werden.

5.2 Klassifikation von Wasserflächen

5.2.1 Vorstellung der Klassifikationsbeispiele

Die Klassifikation der Wasserflächen und deren Evaluation erfolgt anhand von drei Beispielen. Diese stammen aus unterschiedlichen Befliegungen (siehe Tabelle 5.1) und entsprechen jeweils einem Ausschnitt eines Flugstreifens. Insbesondere unterscheiden sich die Beispiele hinsichtlich des verwendeten Scannertyps. Eine Übersicht bezüglich der Größe des jeweiligen Untersuchungsgebietes, der Punktzahl etc. liefert Tabelle 5.2.

Das erste Beispiel enthält einen Ausschnitt eines Flugstreifens der Befliegung der Insel Juist, der im März 2004 mit einem Laserscanner vom Typ ALTM 2050 erhoben wurde (siehe Abbildung 5.1 links). Der Flugstreifenabschnitt befindet sich südlich von der Westspitze der Insel und enthält zwei Wasserflächen – einen großen Hauptpriell in der Mitte des Flugstreifens sowie einen kleinen Nebentriell am westlichen Ende. Die Länge des Beispielgebietes beträgt ca. 3.800m während eine Scanzeile eine Strecke von ca. 540m umfasst. Insgesamt zählt der Ausschnitt 1.477.828 Punkte. Die Abbildung 5.1 rechts stellt diese intensitätscodiert dar. Deutlich lässt sich der Unterschied der Merkmalsausprägung zwischen den Klassen „Wasser“ und „Watt“ erkennen. Das Scanmuster weist sowohl im Wasser- als auch im Wattbereich keine nennenswerten Lücken auf. Somit ist mit einer ähnlichen Punktdichte für die Klassen „Wasser“ und „Watt“ zu rechnen.

Tabelle 5.1: Befliegungsparameter der Laserscannerflüge

	Juist 2004	Friedrichskoog 2005	Langeoog 2005
Scannersystem	ALTM 2050	Falcon II	Riegl LMS-Q560
Wellenlänge [nm]	1047	1560	Nahes Infrarot
Maximaler Scanwinkel [°]	32	14,3	44,9
Pulsrate [Hz]	50.000	83.000	49.500
Flugdatum	31.03.2004	13.05.2005, 15.05.2005, 29.05.2005	01.04.2005
Anzahl Flugstreifen	7	35	15
Flughöhe [m]	1000	1200	600
2D-Punktdichte [Punkte/m²]	2	4	3
Punktabstand – Scanzeile [m]	0,8	2,3	0,6
Punktabstand – Flugrichtung [m]	0,8	0,1	0,7

Tabelle 5.2: Übersicht der Klassifikationsbeispiele

	Juist 2004	Friedrichskoog 2005	Langeoog 2005
Länge der erhobenen Fläche [m]	3800	3300	900
Breite der erhobenen Fläche [m]	540	310	450
Höhendifferenz im Gelände [m]	2,5	3	3,8
Punktzahl	1.477.828	3.334.785	353.440
Anzahl der Scanlinien	3.753	26.670	1.578

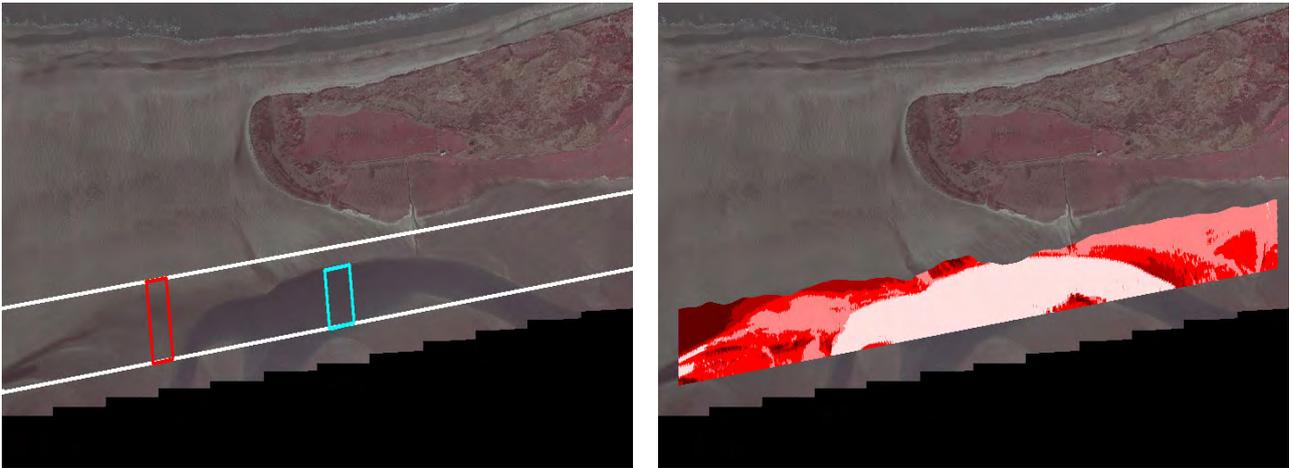


Abbildung 5.1: Orthophoto der Befliegung „Juist 2004“ mit der Begrenzung des prozessierten Flugstreifens (weiß) sowie der festgelegten Trainingsgebiete: Wasser – hellblau, Watt – rot (links); zu klassifizierende Punktwolke intensitätscodiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (rechts)

Das zweite Beispiel umfasst eine Wattfläche im Bereich der Außenweser, die im Rahmen der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ mit einem Scanner vom Typ Falcon II erhoben wurde. Es enthält drei große Wasserflächen. Am nördlichen und südlichen Ende befindet sich jeweils eine weitläufige Senke. Zudem verläuft im mittleren Bereich ein Priel, der in die südliche Senke mündet (siehe Abbildung 5.2 links). Der illuminierte Bereich hat eine Länge von 3.300m sowie eine Breite von 310m (siehe Abbildung 5.2 rechts) und enthält 3.334.785 Punkte. Im Gegensatz zum ersten Beispiel lässt sich deutlich das Abfallen der Intensitätswerte von der Streifenmitte zu den Randbereichen auch bei gleich bleibender Klassenzugehörigkeit erkennen. Ferner offenbart sich, dass sich die Intensitätswerte beider Klassen in der unmittelbaren Nähe der Mittelachse unterscheiden, im Randbereich aber nahezu identisch sind. Innerhalb der Wasserflächen sind keine Punktlücken festzustellen. Das Scanmuster ist wie im Wattbereich vollständig besetzt.

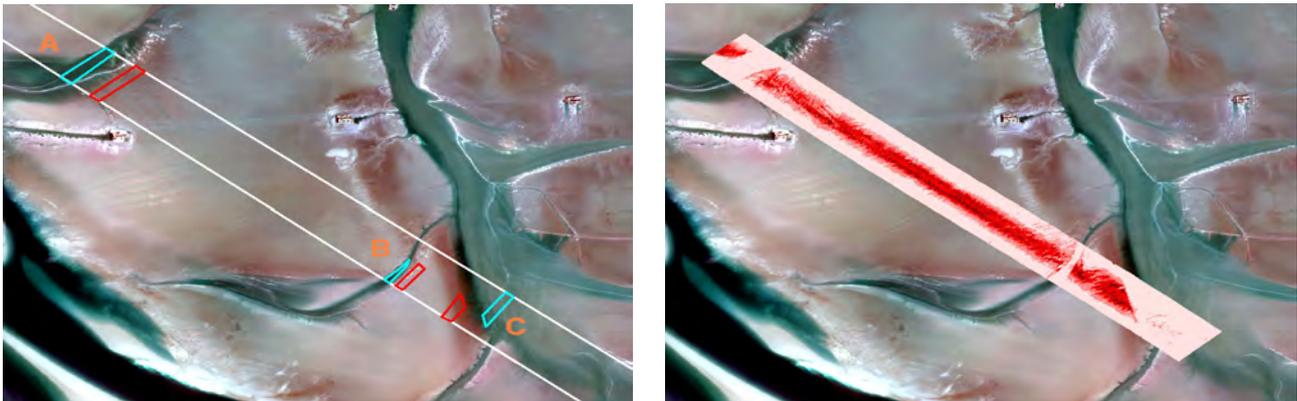


Abbildung 5.2: Orthophoto der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ mit der Begrenzung des prozessierten Flugstreifens (weiß) sowie der festgelegten Trainingssets A, B und C: Wasser – hellblau, Watt – rot (links); zu klassifizierende Punktwolke intensitätscodiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (rechts)

Das dritte Beispiel enthält einen Ausschnitt eines Flugstreifens der Befliegung „Langeoog 2005“. Die Daten wurden im April 2005 mit einem Laserscanner des Typs Riegl LMS-Q560, montiert auf einem Helikopter, erhoben. Aufgrund der geringen Flughöhe von nur 600m ist die 2D-Punktdichte im Vergleich zum ersten Beispiel mit drei Punkten pro m² etwas größer. Der erfasste Bereich beinhaltet die offene Meeresfläche sowie eine ca. 1,2m über dem Meeresspiegelniveau befindliche Wasserfläche im Strandbereich. Der Ausschnitt des Flugstreifens hat eine Ausdehnung von ca. 900m in Flug- und 450m in Scanlinienrichtung und umfasst 353.440 Punkte. Im Gegensatz zum zweiten Beispiel scheinen die Intensitätswerte nicht mit der jeweiligen Streifenlage zu korrelieren. Die Intensitätswerte im Wasserbereich sind stark heterogen mit einem hohen, lokalen Texturgrad. Wassernahe, durchfeuchtete Strandbereiche weisen geringe Intensitäten auf, während helle trockene Sandgebiete merklich größere Intensitätswerte besitzen. Im Wasser ist deutlich die Abnahme der 2D-Punktdichte von der Streifenmitte zu den Randbereichen zu erkennen.

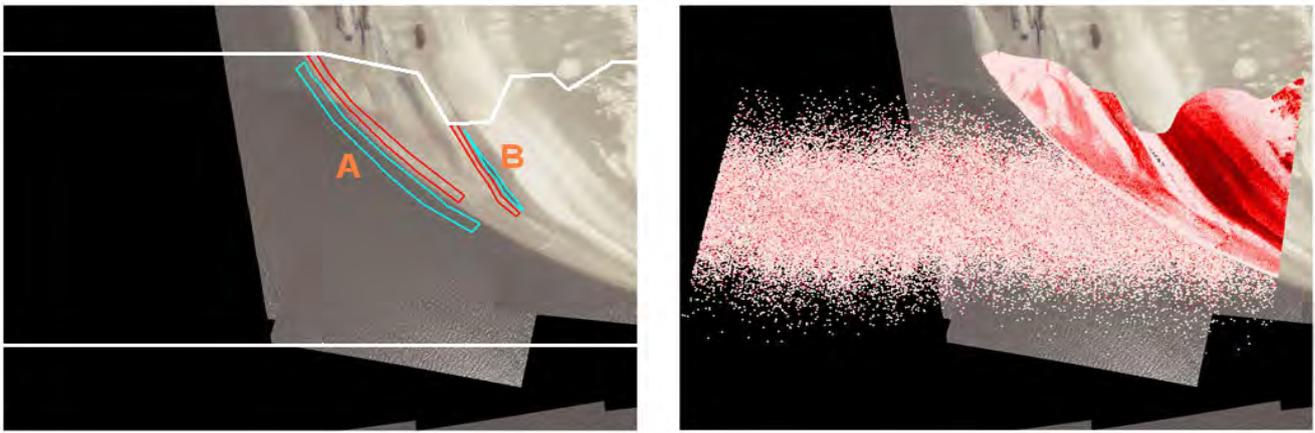


Abbildung 5.3: Orthophoto der Befliegung „Langeoog 2005“ mit der Begrenzung des prozessierten Flugstreifens (weiß) sowie der festgelegten Trainingssets A und B: Wasser – hellblau, Watt – rot (links); zu klassifizierende Punktwolke intensitätscodiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (rechts)

5.2.2 Durchführung der Klassifikation

Im Gegensatz zu den Rohdaten der Befliegungen „Friedrichskoog 2005“ und „Langeoog 2005“ sind die Laserpunkte für das Beispiel „Juist 2004“ innerhalb der Rohdaten-Datei nicht entsprechend ihrer zeitlichen Aufnahme nacheinander abgelegt, sondern in Gitterzellen der Größe 100m x 100m gespeichert. Da die auf Grundlage des im Kapitel 4.1 vorgestellten Klassifikationsalgorithmus erstellte Software aus methodischen sowie rechentechnischen Gründen die Anordnung entsprechend der zeitlichen Aufnahme voraussetzt, wurden die Punkte einer Vorverarbeitung unterzogen. Dabei konnten die Punkte zwar nicht in Form der ursprünglichen Aufnahme rekonstruiert, aber zumindest Pseudoscanlinien erstellt werden, die eine Klassifikation ermöglichen. Dazu wurde jeder Punkt auf die Trajektorie des Fluges aufgewinkelt, wodurch die Werte Stationierung und Abstand ermittelt wurden. Anschließend wurden die Punkte gemäß ihrer Stationierung aufsteigend sortiert. Alle Punkte innerhalb eines Intervalls von 1m bildeten nachfolgend jeweils eine Pseudoscanlinie. Basierend auf dem zeitgleich erhobenen Orthophoto wurde dann ein Trainingsset bestehend aus einem Wasser- und einem Wattpolygon digitalisiert. Dabei wurde berücksichtigt, dass der gesamte Auslenkbereich von der Flugachse bis zum Streifenrand abzudecken ist, um die jeweiligen Parameter der Funktion gemäß Gleichung 4.2, welche die systematische Abhängigkeit von Intensität und 2D-Punktdichte beschreibt, möglichst genau schätzen zu können und eine Extrapolation zu vermeiden. Das Trainingsgebiet der Klasse „Wasser“ enthält 28.782 Punkte aus 110 Scanzeilen, während das Gebiet der Klasse „Watt“ 52.057 Punkte aus 123 Scanzeilen umfasst (siehe Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Übersicht der Trainingssets

	Juist 2004		Friedrichskoog 2005						Langeoog 2005			
Anzahl der Trainingssets	1		3						2			
Set	A		A		B		C		A		B	
Wasser – W, Watt – L	W	L	W	L	W	L	W	L	W	L	W	L
Anzahl der Laserpunkte	28782	52057	43167	49287	14645	28191	37229	37055	3584	12076	387	4614
Anzahl der Scanlinien	110	123	450	449	323	551	776	831	280	499	57	217

Im Folgenden wurden die Klassifikationsparameter aus den Trainingsgebieten abgeleitet. Dabei wurde (wie auch für alle folgenden Beispiele) nicht die Abhängigkeit zum Inzidenzwinkel β sondern zum Auslenkwinkel α bestimmt. Diese Entscheidung beruht auf der Tatsache, dass die Wattflächen sehr eben sind und nur geringe Höhenunterschiede aufweisen. Signifikante, von der Zenitrichtung verschiedene Flächennormalen lassen sich deshalb für weite Teile nicht ableiten. Die Abbildung 5.4 visualisiert die geschätzte Abhängigkeit der Merkmale Intensität und 2D-Punktdichte vom Auslenkwinkel. Die braune Linie entspricht der approximierten Funktion der Klasse „Watt“, während die blaue Linie die Funktion der Klasse „Wasser“ darstellt. Die jeweils umgebenden Bänder illustrieren die Standardabweichung der Verbesserungen und beschreiben somit, wie gut die Beobachtungen durch die jeweilige Funktion approximiert werden.

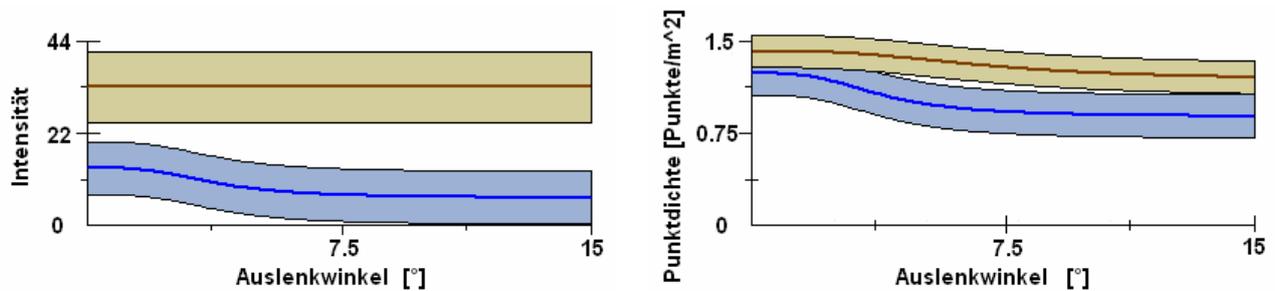


Abbildung 5.4: Befliegung „Juist 2004“ – geschätzte Abhängigkeit der Intensität (links) und der 2D-Punktdichte (rechts) vom Auslenkwinkel mit zugehöriger Standardabweichung der Verbesserungen: Watt – braun/ocker, Wasser – dunkelblau/hellblau

Für das Beispiel „Juist 2004“ (siehe Abbildung 5.4) ist zu erkennen, dass sich die Merkmalsausprägung der Intensität über den gesamten Auslenkbereich zwischen beiden Klassen signifikant unterscheidet. Dabei steigt die Unterscheidbarkeit mit steigendem Auslenkwinkel an. Ebenfalls ist die Differenzierung anhand des Merkmals 2D-Punktdichte möglich, außer für Auslenkwinkel nahe 0 Grad. Bis zu einem Winkel von ca. 7,5 Grad steigt sie an und fällt danach wieder ab. Insgesamt ist der Einfluss des Merkmals 2D-Punktdichte geringer als der Einfluss der Intensität.

Nachfolgend wurde die Klassifikation durchgeführt. Die Abbildung 5.5 links zeigt das Ergebnis (siehe auch Tabelle 5.4). Sie verdeutlicht, dass sowohl die beiden Wasserflächen als auch die Wattbereiche homogen extrahiert wurden. Einzig an flachen Übergangsstellen, z.B. des östlichen isolierten Prieles sowie der südlichen Landzunge neben dem Hauptpriel, treten Fehlklassifikationen auf. Nachfolgend wird deshalb die Plausibilisierung durchgeführt. Leider können nur zwei von fünf Teilschritten, nämlich die Kontrolle der fiktiven Profile in Flugrichtung (siehe Kapitel 4.1.7.3) sowie die Tiefpassfilterung in dieser Richtung (gemäß Kapitel 4.1.7.4) durchgeführt werden, da nur Pseudoscanlinien vorliegen. Das Resultat ist in Abbildung 5.5 rechts illustriert. Im Vergleich zur Klassifikation ist die Trennung beider Klassen an den Übergangsbereichen klarer modelliert, d.h. das Rauschen im Übergangsbereich ist deutlich reduziert. Das Ergebnis enthält nur noch zwei große zusammenhängende Wasserflächen – den Hauptpriel und den Nebenspriel. Aufgrund der nur unvollständig durchgeführten Plausibilisierung verbleiben jedoch isolierte Segmente insbesondere am flachen Übergangsbereich der südlichen Landzunge.

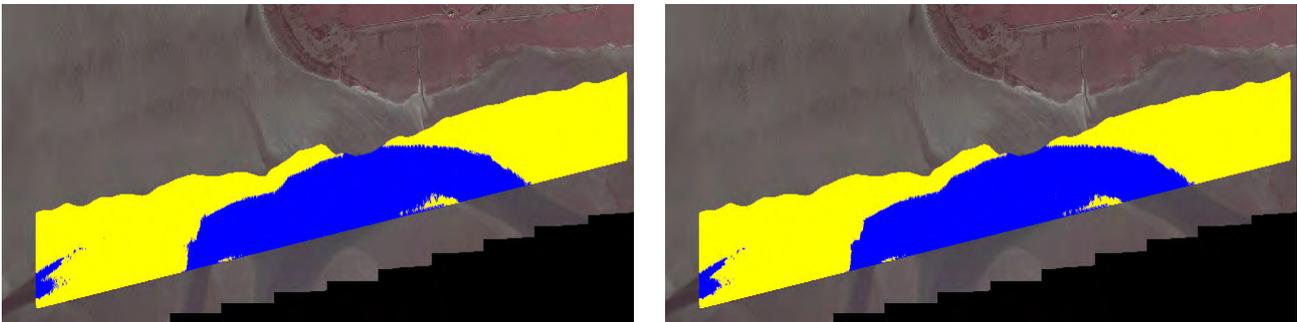


Abbildung 5.5: Befliegung „Juist 2004“ – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden.

Da das Beispiel für die Befliegung „Friedrichskoog 2005“ drei voneinander unabhängige Wasserbereiche enthält, wurde für jedes ein eigenes Trainingset festgelegt (siehe Abbildung 5.2 links). Ihre Auswertung ergab, dass die signifikante Unterscheidbarkeit zwischen beiden Klassen anhand der Intensität mit steigendem Auslenkwinkel sinkt (siehe Abbildung 5.6 links). Während in der Streifenmitte eine hohe Trennbarkeit über alle Trainingsets hinweg gegeben ist, kann die Intensität für Auslenkwinkel im Bereich von ca. 4 Grad und größer nicht mehr verwendet werden. Da das Scanmuster sowohl im Wasser- als auch Wattbereich vollständig besetzt ist, lässt sich für alle drei Trainingsets über den gesamten Winkelbereich keine signifikante Unterscheidung anhand der 2D-Punktdichte feststellen (siehe Abbildung 5.6 rechts). Die Klassifikation stützt sich somit nur auf die Höhe sowie im Mittelbereich des Flugstreifens zusätzlich auf die Intensität. Diese Tatsache spiegelt sich im Klassifikationsergebnis wieder (siehe Abbildung 5.7 links und Abbildung 5.8 links). Während die Punkte in dem mittleren Bereich des Flugstreifens wenige Fehler aufweisen, treten in den östlichen Randbereichen der beiden Senken vermehrt Fehlklassifikationen auf. Diese ergeben sich durch das Auftreten von Höhenunterschieden innerhalb der Wasserfläche. Weitere Fehlklassifikationen sind ebenfalls im Bereich schäumender Wellen zu beobachten. Diese reflektieren das Signal stärker und zeichnen sich deshalb durch größere Intensitätswerte als umgebende Wasserbereiche aus. Sie werden, sofern das Merkmal Intensität innerhalb der jeweiligen Klassifikation signifikant ist, oftmals fehlerhaft als Watt klassifiziert. Eine solche Fehlklassifikation tritt am südlichen Ufer der Wasserfläche der nördlichen Senke auf (Abbildung 5.8 links). Aufgrund des Einflusses der Intensität auf die Klassifikation in der Streifenmitte wird der schäumende Wellenbereich als Watt klassifiziert, während die gleiche Welle im westlichen

Randbereich als Wasser erkannt wird. Durch die nachfolgend ausgeführte Plausibilisierung können jedoch die Wasserflächen homogen extrahiert werden (siehe Abbildung 5.7 rechts und Abbildung 5.8 rechts).

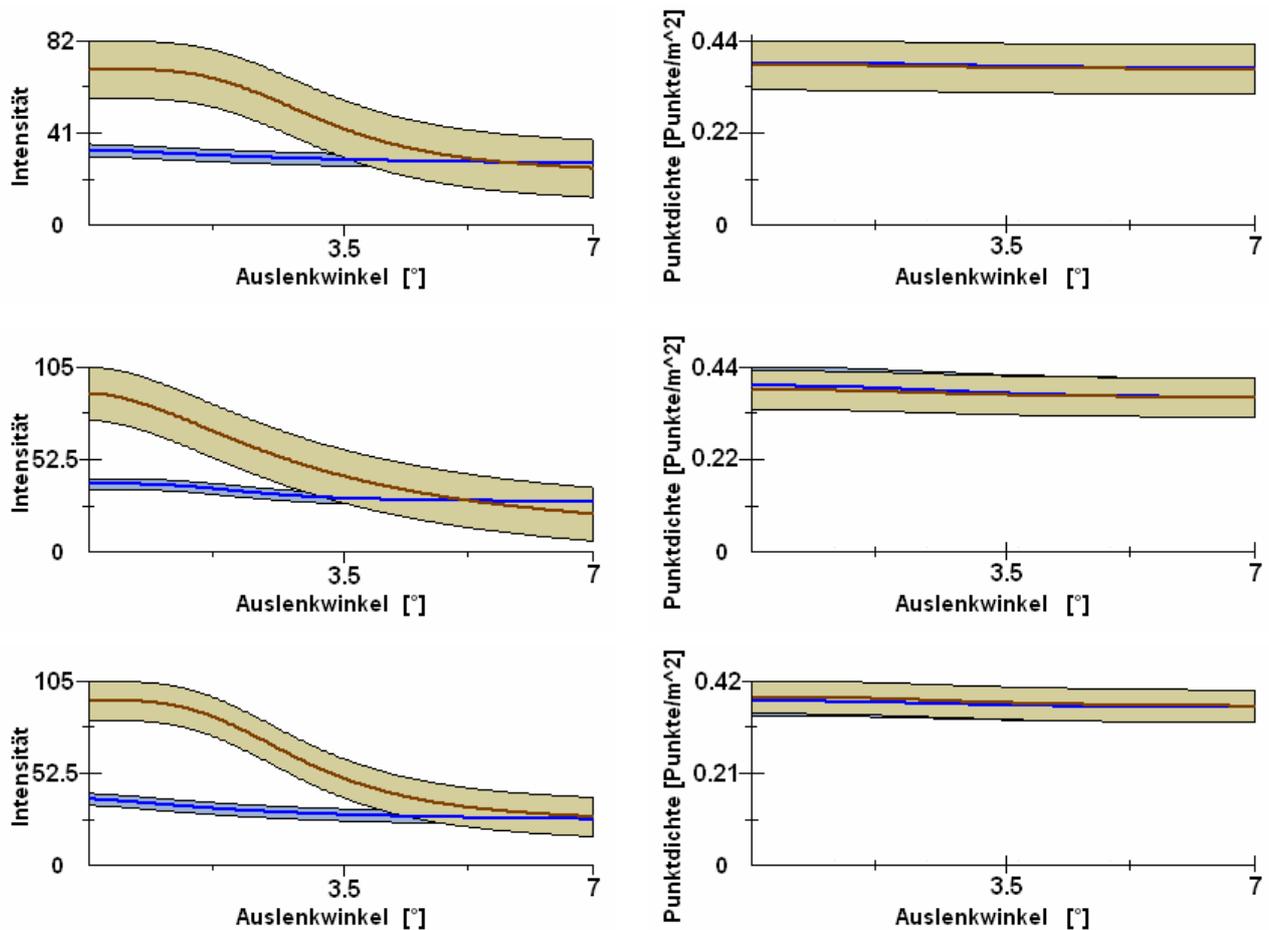


Abbildung 5.6: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – geschätzte Abhängigkeit der Intensität (links) und der 2D-Punktdichte (rechts) vom Auslenkwinkel mit zugehöriger Standardabweichung der Verbesserungen: Watt – braun/ocker, Wasser – dunkelblau/hellblau, Trainingsset A – oben, Trainingsset B – mitte, Trainingsset C – unten

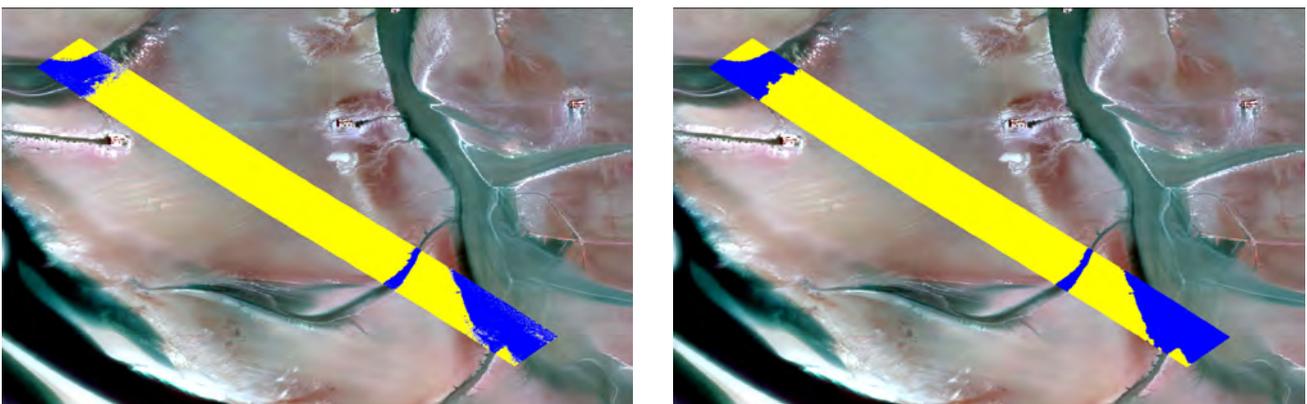


Abbildung 5.7: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden.

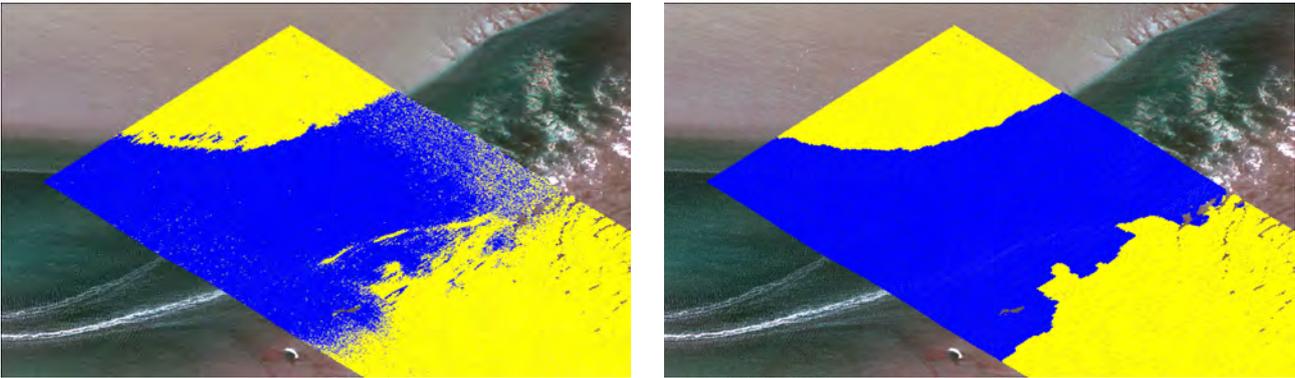


Abbildung 5.8: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – nördlicher Abschnitt des Flugstreifens – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden.

Für das Klassifikationsbeispiel der Befliegung „Langeoog 2005“ wurden zwei Trainingsets festgelegt. Das Set A umfasst den Übergangsbereich zwischen dem Meer und dem Strand, während das Set B die höher gelegene Wasserfläche sowie den angrenzenden Strandbereich beinhaltet. Wiederum wurde darauf geachtet, dass der gesamte Auslenkbereich durch die Trainingsgebiete abgedeckt ist, um eine Extrapolation zu vermeiden.

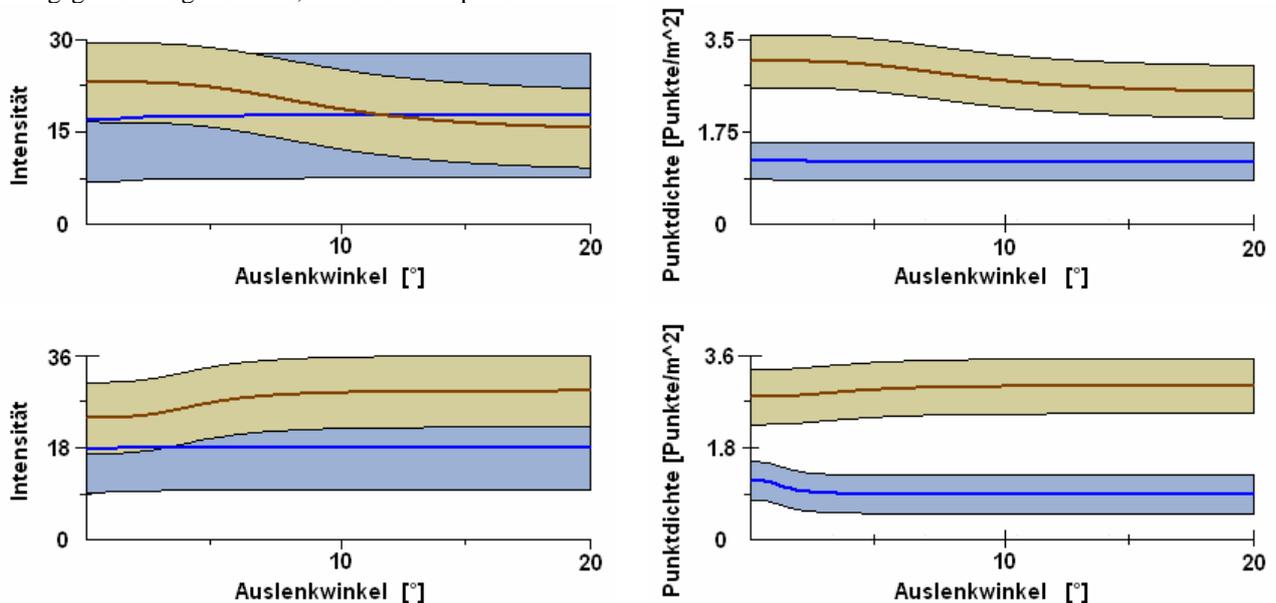


Abbildung 5.9: Befliegung „Langeoog 2005“ – geschätzte Abhängigkeit der Intensität (links) und der 2D-Punktdichte (rechts) vom Auslenkwinkel mit zugehöriger Standardabweichung der Verbesserungen: Watt – braun/ocker, Wasser – dunkelblau/hellblau, Trainingset A – oben, Trainingset B – unten

Die nachfolgende Analyse ergab, dass das Merkmal Intensität für das Trainingset A über den gesamten Auslenkbereich nicht signifikant ist. Für das Trainingset B ist eine begrenzte Unterscheidbarkeit für Auslenkwinkel >10 Grad gegeben. Eine deutlich bessere Trennbarkeit kann durch das Merkmal 2D-Punktdichte erzielt werden. Die Güte sinkt mit wachsendem Auslenkwinkel im Fall des Trainingsets A, während sie beim Trainingset B steigt. Auffällig ist ferner der atypische Anstieg der geschätzten Intensität sowie der 2D-Punktdichte im Strandbereich im Trainingset B. Dieser ergibt sich aufgrund eines sinkenden Durchfeuchtungsgrades der Punkte des zugehörigen Trainingsgebietes Strand mit wachsendem Auslenkwinkel. Eine fallende Durchnässung führt zu einem höheren Reflexionsgrad der Oberfläche und somit nachfolgend zu einer höheren Intensität und 2D-Punktdichte.

Die Klassifikation liefert bei visueller Interpretation (siehe Abbildung 5.10 links) eine klare Trennung beider Klassen. Sowohl der Meereswasserbereich als auch die höher gelegene Pfützenfläche sind erfolgreich detektiert worden. Fehlklassifikationen treten vereinzelt in der Flugstreifenmitte innerhalb der Meeresfläche auf. Durch die nachfolgend ausgeführte Plausibilisierung konnten aber nahezu alle Fehlklassifikationen innerhalb der Hauptwasserfläche detektiert und eliminiert werden.

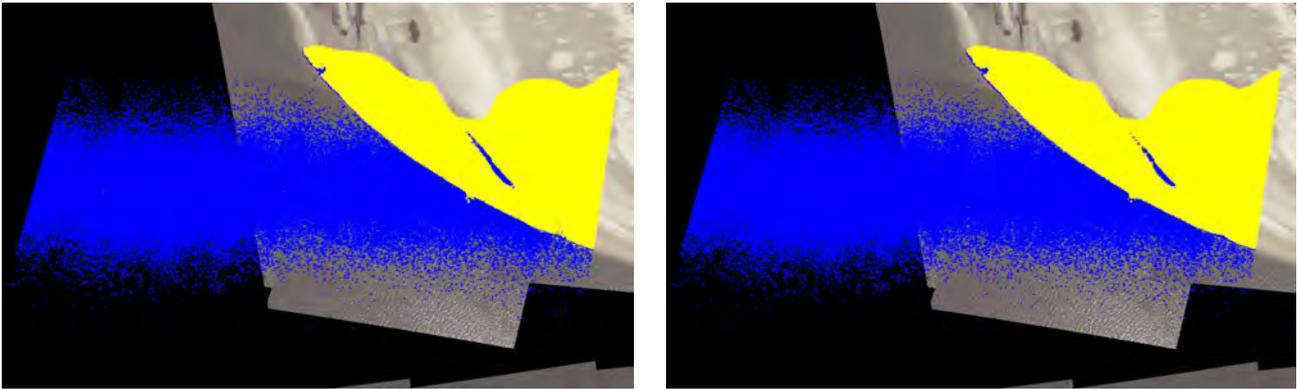


Abbildung 5.10: Befliegung „Langeoog 2005“ – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden.

5.2.3 Evaluation der Klassifikationsgüte

Nach der Einteilung der Laserpunkte in die Klassen „Wasser“ und „Watt“ liegen folgende Ergebnisse vor (siehe Tabelle 5.4). Diese werden im Folgenden hinsichtlich der Klassifikationsgüte evaluiert.

Tabelle 5.4: Absolute und relative Verteilung der Laserpunkte für die Beispiele „Juist 2004“, „Friedrichskoog 2005“ und „Langeoog 2005“ nach der Klassifikation sowie der Plausibilisierung

Klasse	Juist 2004		Friedrichskoog 2005		Langeoog 2005	
	Klassifikation	Plausibilisierung	Klassifikation	Plausibilisierung	Klassifikation	Plausibilisierung
Wasser	537.577 (36,4%)	537.512 (36,4%)	771.331 (23,1%)	784.776 (23,5%)	113.812 (32,2%)	114.047 (32,3%)
Watt	940.251 (63,6%)	940.316 (63,6%)	2.563.454 (76,9%)	2.550.009 (76,5%)	239.628 (67,8%)	239.393 (67,7%)

Die interne Evaluation stützt sich auf die Dichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klassen „Wasser“ und „Watt“ der beteiligten Trainingssets (siehe Kapitel 5.1.1 und Abbildung 4.7). Ausgehend vom jeweiligen Gesamtzugehörigkeitsgrad eines jeden Punktes wird der Quotient der beiden Dichtewerte gebildet. Nachfolgend werden die Quotienten in sechs empirisch festgelegte Genauigkeitsgruppen eingeordnet, die sich in jeweils drei Gruppen für die Klasse „Wasser“ sowie die Klasse „Watt“ untergliedern lassen. Diese entsprechen einem Ampelschema – grün/sicher, gelb/wahrscheinlich sowie rot/unsicher. Die jeweilige Punktzahl sowie die prozentuale Verteilung bezüglich der Gesamtpunktzahl im Beispiel (absolut) sowie bezüglich der Punktzahl innerhalb einer Klasse (relativ) sind für alle Beispiele in Tabelle 5.5 aufgeführt sowie in den Abbildungen 5.11, 5.12 und 5.13 visuell dargestellt. Die Farben haben dabei folgende Bedeutung: gelb – sicher Watt, orange – wahrscheinlich Watt, braun – unsicher Watt, dunkelgrün – unsicher Wasser, hellblau – wahrscheinlich Wasser, blau – sicher Wasser.

Tabelle 5.5: Interne Evaluation der Klassifikation

Quotient – Wasser/Watt	Klasse	Juist 2004		Friedrichskoog 2005		Langeoog 2005	
		absolut	relativ	absolut	relativ	absolut	relativ
(10;∞)	„sicher Wasser“	517.552 (35,0%)	96,3%	690.074 (20,7%)	89,4%	112.058 (31,7%)	98,5%
(2;10]	„wahrscheinlich Wasser“	13.911 (0,9%)	2,6%	64.631 (1,9%)	8,4%	1.256 (0,4%)	1,1%
(1;2]	„unsicher Wasser“	6.017 (0,4%)	1,1%	16.840 (0,5%)	2,2%	508 (0,1%)	0,4%
(0,5;1]	„unsicher Watt“	5.913 (0,4%)	0,6%	18.436 (0,6%)	0,7%	579 (0,2%)	0,2%
(0,1;0,5]	„wahrscheinlich Watt“	14.283 (1,0%)	1,5%	47.590 (1,4%)	1,9%	2.039 (0,6%)	0,9%
(0;0,1]	„sicher Watt“	920.151 (62,3%)	97,9%	2.497.214 (74,9%)	97,4%	237.000 (67,0%)	98,9%

Für den Flugstreifenausschnitt der Befliegung „Juist 2004“ sind mehr als 95% der als Wasser beziehungsweise Watt klassifizierten Punkte Element der sicheren Gruppen. Nur ca. 1,1% der Wasserpunkte sowie ca. 0,6% der Wattpunkte

gelten als unsicher klassifiziert. Diese Punkte liegen fast ausnahmslos an den Übergangszonen zwischen Wasser und Watt. Vornehmlich treten sie an der südlichen Übergangszone des Hauptpriels auf, die aufgrund des geringen Höhenunterschiedes wesentlich stärker ausgeprägt ist als am nördlichen Ufer (siehe Abbildung 5.11). Innerhalb der Wasser- und Wattflächen sind keine unsicher klassifizierten Punkte enthalten. Die erzielte Genauigkeit scheint unabhängig vom jeweiligen Auslenkwinkel innerhalb des Flugstreifens zu sein.

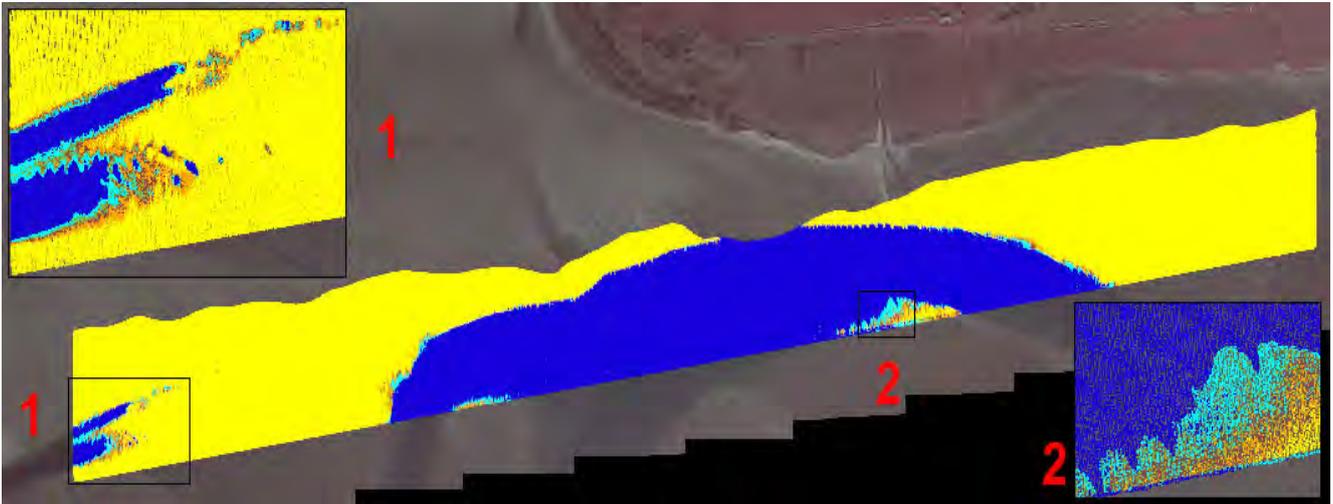


Abbildung 5.11: Interne Evaluation der Befliegung „Juist 2004“ – empirische Genauigkeitsklassen: gelb – sicher Watt, orange – wahrscheinlich Watt, braun – unsicher Watt, dunkelgrün – unsicher Wasser, hellblau – wahrscheinlich Wasser, blau – sicher Wasser.

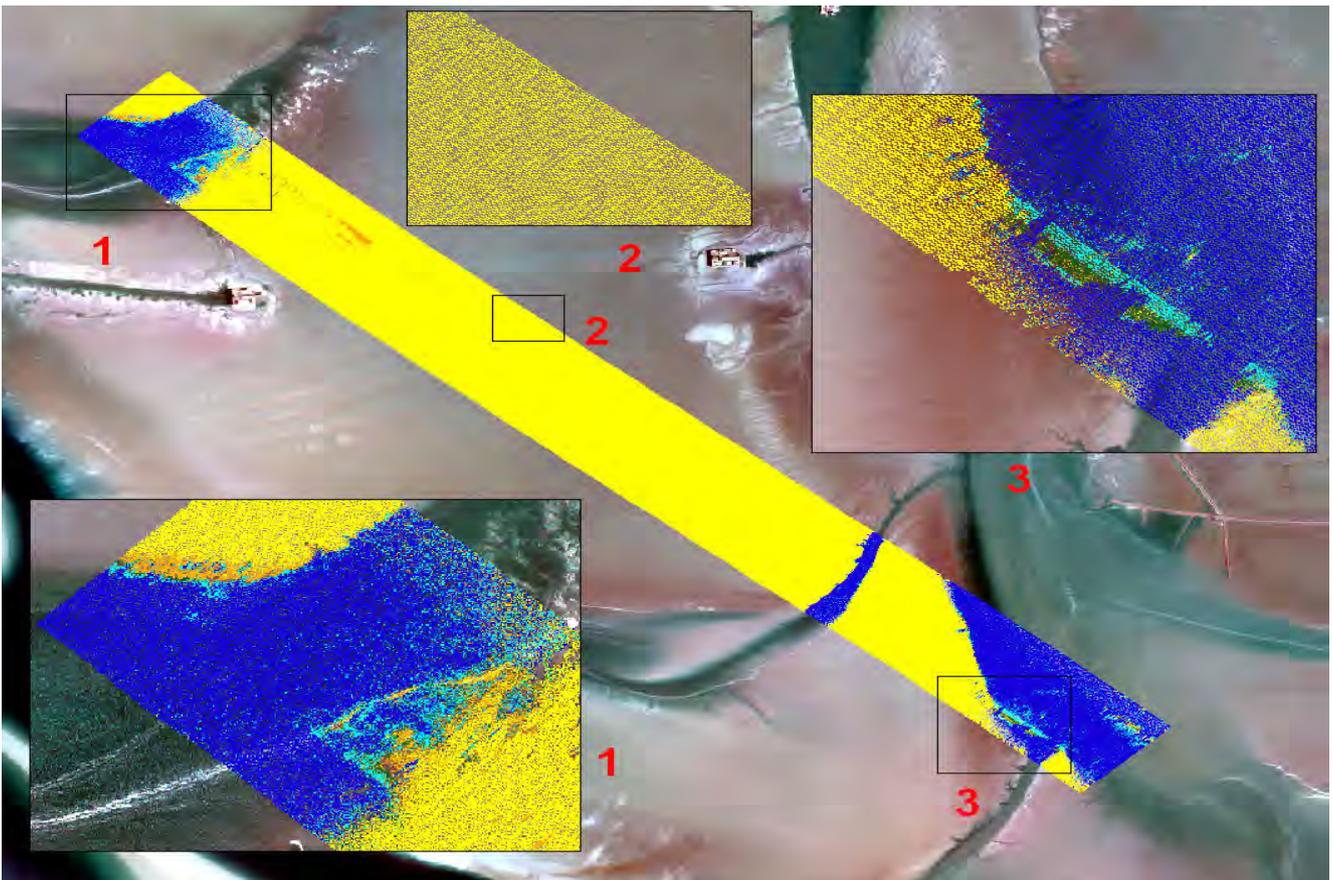


Abbildung 5.12: Interne Evaluation der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – empirische Genauigkeitsklassen: gelb – sicher Watt, orange – wahrscheinlich Watt, braun – unsicher Watt, dunkelgrün – unsicher Wasser, hellblau – wahrscheinlich Wasser, blau – sicher Wasser.

Im Vergleich zum ersten Beispiel ist die erzielte innere Genauigkeit des Flugstreifenabschnittes „Friedrichskoog 2005“ geringer. Insbesondere steigen die Prozentsätze der Punkte der Klassen „wahrscheinlich Wasser“ und „unsicher Wasser“ auf 8,4% beziehungsweise 2,2%. Anhand der Abbildung 5.12 ist zu erkennen, dass die Punkte der unsicheren Gruppen nicht nur im Bereich der Übergangszone liegen, sondern insbesondere auch in den Randgebieten des Flugstreifens bezüglich der Flugachsenmitte. Die Verteilung ist somit augenscheinlich nicht unabhängig von der jeweiligen Punktlage. Die Ursache ist die Abhängigkeit der Verwendbarkeit der Merkmale 2D-Punktdichte und Intensität bezüglich des

Auslenkwinkels. Während die 2D-Punktdichte über den gesamten Auslenkbereich nicht signifikant verschieden ist, ist eine Trennung beider Klassen anhand der Intensität nur im Bereich der Flugstreifenmitte gegeben (siehe Abbildung 5.6). Die Klassifikation stützt sich somit im Außenbereich nur auf die Höhe. Da das Untersuchungsgebiet sehr flach ist und die Höhenunterschiede zwischen den zugehörigen Trainingsgebieten der Sets A-C nur zwischen 10cm und 20cm liegen, verursachen zufällige Messfehler sowie auftretende Wellen im Außenbereich fälschlich klassifizierte Wattpunkte innerhalb der Wasserflächen. In der Flugstreifenmitte wirkt hingegen die zusätzliche Verwendung der Intensität einer Fehlklassifikation entgegen. Sofern – wie in der nördlichen Senke – jedoch Wellen mit Schaumkronen auftreten, besteht ebenfalls die Tendenz, diese Bereiche als Watt zu klassifizieren, da neben der größeren Höhe die Intensitätswerte aufgrund der starken Reflexion der Schaumkronen in der Regel deutlich über dem Niveau der Wasserflächen liegen.

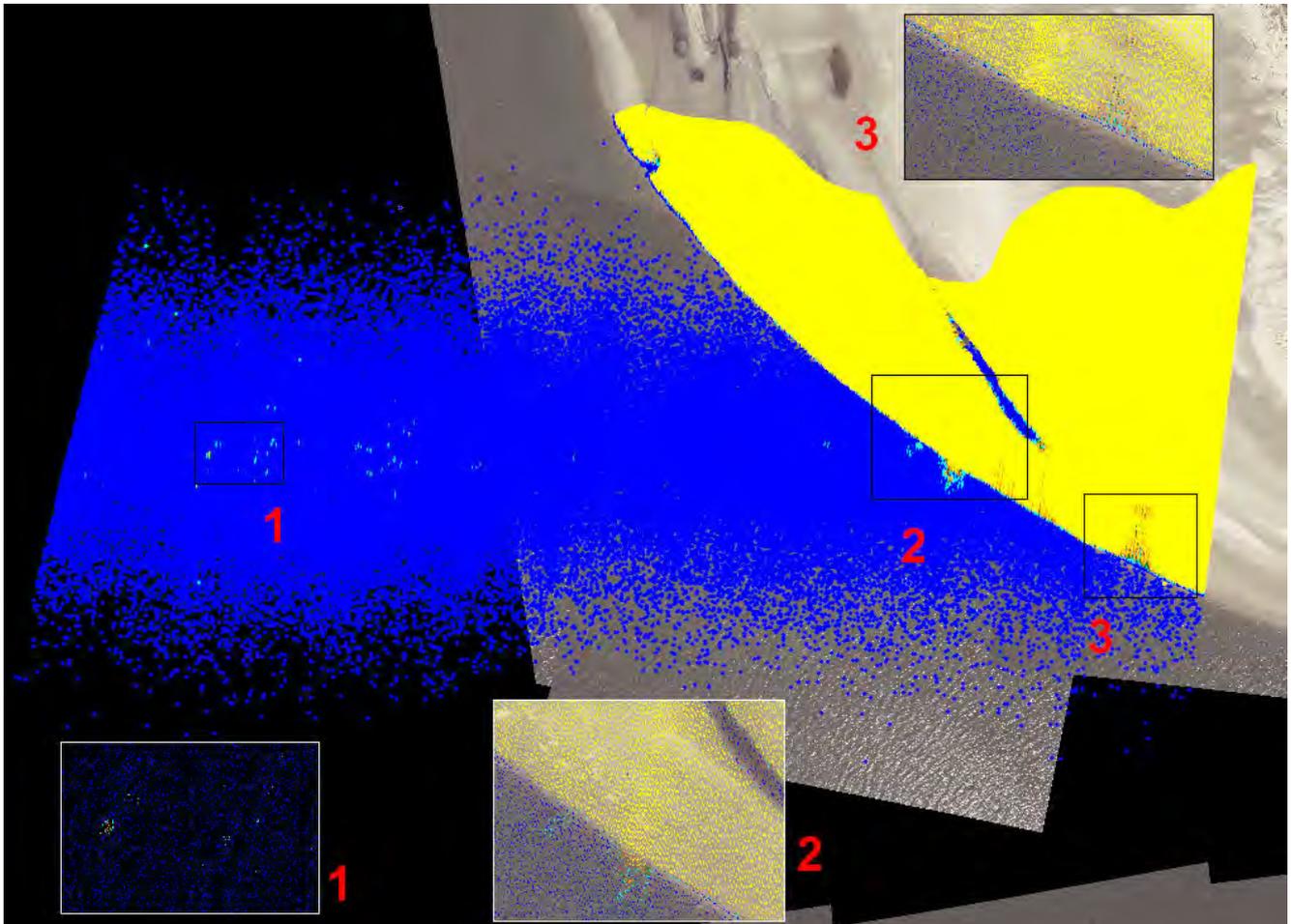


Abbildung 5.13: Interne Evaluation der Befliegung „Langeoog 2005“ – empirische Genauigkeitsklassen: gelb – sicher Watt, orange – wahrscheinlich Watt, braun – unsicher Watt, dunkelgrün – unsicher Wasser, hellblau – wahrscheinlich Wasser, blau – sicher Wasser.

Die erzielte interne Genauigkeit des Untersuchungsgebietes „Langeoog 2005“ erreicht im Vergleich zu den beiden anderen Beispielen die höchsten Werte. Nur 0,2% der Wattpunkte beziehungsweise 0,5% der Wasserpunkte gelten als unsicher klassifiziert. Hingegen wurden jeweils mehr als 98% als sicher eingestuft. Unsicher klassifizierte Wasserpunkte treten im Bereich der Übergangszone aber auch im offenen Meer in der Flugstreifenmitte auf. Wiederum lässt sich eine Abhängigkeit der inneren Genauigkeit von der Lage des jeweiligen Punktes bezüglich des Flugstreifens erkennen. Die große Streuung der 2D-Punktdichte im Wasserbereich wirkt sich in Bezug auf die Klassifikation insbesondere in der Streifenmitte aus, da in dieser Region die Punktdichtewerte der Wasserpunkte Größenwerte erreichen können, die ebenfalls am Strand auftreten. In den Randbereichen erreicht die 2D-Punktdichte trotz großer Streuung nicht dieses Niveau, so dass keine unsicheren Zuordnungen aufgrund dieses Merkmals auftreten. Auch im Strandbereich befinden sich einige unsicher klassifizierte Bereiche. Insbesondere im Bereich des östlichen Endes des Beispiels sind solche größeren Flächen zu erkennen. An dieser Stelle interagieren mehrere Faktoren zusammen, die eine unsichere Zuordnung bewirken. So sind diese Bereiche stärker durchfeuchtet, wodurch die geringeren Intensitätswerte begründet sein dürften. Dieses Merkmal wird, da sich die Flächen im Einflussbereich des Sets B befinden, wenn auch nur in geringem Maße, innerhalb der Klassifikation verwendet. Ferner sind die Scanlinienabstände zwischen benachbarten Zeilen nicht gleich. Es ist zu vermuten, dass dieser Effekt aufgrund der Verwendung eines Helikopters als Flugplattform entstanden ist. Variierende Scanlinienabstände resultieren in fehlerhaft streuenden 2D-Punktdichtewerten und nachfolgend in einer unsicheren Klassifikation.

Die externe Evaluation der Klassifikation stützt sich auf die parallel erhobenen Orthophotos, aus denen die Referenzflächen für beide Klassen digitalisiert wurden. Die Referenzflächen umfassen jeweils den gesamten Bereich der

Klassifikation. Nachfolgend konnten die plausibilisierten Punkte innerhalb jeder Referenzfläche ermittelt werden. Durch den Vergleich der durch den Algorithmus zugewiesenen Klasse sowie der sich aus dem Orthophoto ergebenden Zuordnung wurden anschließend die prozentuale Richtigkeit und Vollständigkeit berechnet. Die prozentuale Richtigkeit R_X beschreibt, wie viel Prozent der klassifizierten Punkte der Klasse X entsprechend der Referenz auch dieser Klasse angehören (siehe Gleichung 5.2). Die prozentuale Vollständigkeit V_X hingegen beschreibt, wie viel Prozent aller Punkte innerhalb der Referenzfläche der Klasse X auch dieser Klasse X zugeordnet wurden (siehe Gleichung 5.3).

$$R_X = \frac{N_{X-RX}}{N_X} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

$$V_X = \frac{N_{X-RX}}{N_{RX}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

mit:

N_{X-RX} Anzahl der klassifizierten Punkte der Klasse X innerhalb der Referenzfläche der Klasse X
 N_X Anzahl der klassifizierten Punkte der Klasse X
 N_{RX} Anzahl aller Punkte innerhalb der Referenzfläche der Klasse X

Die Verteilung der Punkte sowie die Genauigkeitsmaße sind in Tabelle 5.6 verzeichnet.

Tabelle 5.6: Externe Evaluation der Klassifikation

	Juist 2004		Friedrichskoog 2005		Langeoog 2005	
Anzahl klassifizierter Punkte	1.477.828		3.334.785		353.440	
Anzahl klassifizierter Wasserpunkte	537.512		784.776		114.047	
Anzahl klassifizierter Wattpunkte	940.316		2.550.009		239.393	
	Wasser	Watt	Wasser	Watt	Wasser	Watt
klassifizierte Wasserpunkte	516.365	21.147	687.895	96.881	111.785	2.262
klassifizierte Wattpunkte	2.597	937.719	10.893	2.539.116	555	238.838
Richtigkeit [%]	96,1	99,7	87,7	99,6	98,0	99,8
Vollständigkeit [%]	99,5	97,8	98,4	96,3	99,5	99,1

Dabei zeigt sich über alle drei Beispiele, dass die Genauigkeitsmaße fast ausnahmslos deutlich über 90% liegen. Eine sehr hohe Genauigkeit erreicht die Klassifikation des Flugstreifenausschnittes der Befliegung „Juist 2004“. Dies wird zum einen durch die Tatsache begünstigt, dass alle drei Merkmale eine signifikante Trennbarkeit der beiden Klassen ermöglichen. Zum anderen ist die Übergangszone zwischen Watt und Wasser nur schwach ausgeprägt, da ein deutlicher Höhenanstieg im Bereich mehrerer Dezimeter auftritt. Aus Abbildung 5.14 ist zu erkennen, dass insbesondere Fehlklassifikationen an den südlichen Wattungen auftreten. Hier wurden fälschlicherweise Wasserpunkte erkannt. Dies ist hauptsächlich durch den im Gegensatz zum restlichen Beispiel kaum vorhandenen Höhenunterschied zwischen dem angrenzenden Wasserbereich sowie den Wattungen zu erklären.

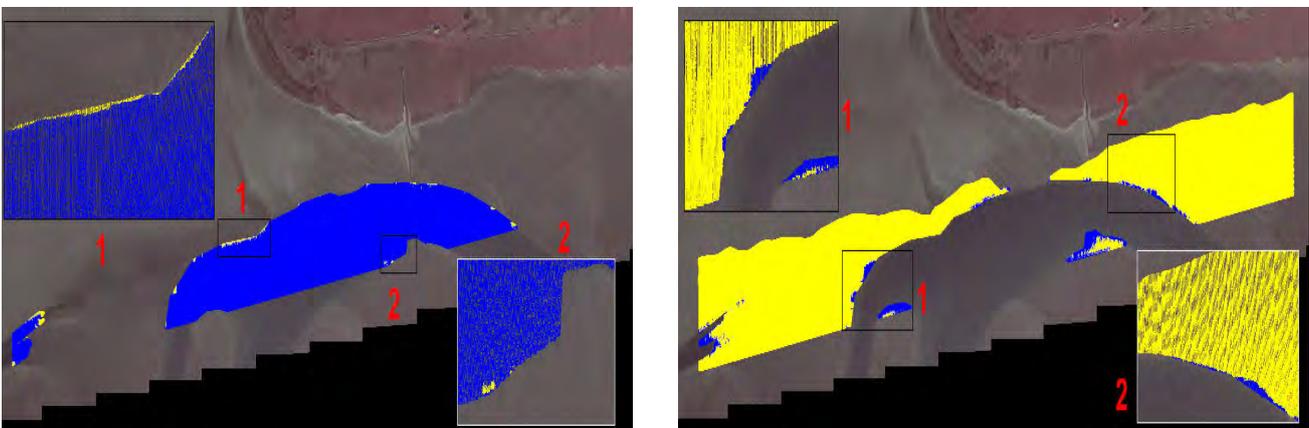


Abbildung 5.14: Befliegung „Juist 2004“ – klassifizierte Punkte innerhalb des Referenzgebietes Wasser (links) und des Referenzgebietes Watt (rechts): blau – Wasser, gelb – Watt

Die Güte der Qualitätsmerkmale Richtigkeit und Vollständigkeit des Beispiels „Friedrichskoog 2005“ differiert deutlich für die Klassen „Watt“ und „Wasser“. Während nur ca. 87,7% der klassifizierten Wasserpunkte gemäß der Referenz auch wirklich dieser Klasse angehören, sind dies für die klassifizierten Wattpunkte 99,7%. Hingegen sind 98,4% der klassifizierten Punkte innerhalb der Referenzfläche Wasser auch dieser Klasse zugeordnet, während dies für die Wattbereiche 96,3% sind. Dieses Ergebnis spiegelt sich in Abbildung 5.15 wider. Sie zeigt, dass in der Referenzfläche „Watt“ eine größere Anzahl an klassifizierten Wasserpunkten enthalten ist, während in der Referenzfläche „Wasser“ eine wesentlich geringere Anzahl an fehlerhaft klassifizierten Wattpunkten auftritt. Es wurden also tendenziell mehr Wasserpunkte klassifiziert als in der Wirklichkeit auftreten. Dieses Phänomen lässt sich auch für beide anderen Beispiele – wenn auch in abgeschwächter Form – beobachten. Die Ursache liegt in der größeren Varianz des Merkmals Höhe im Watt. Diese bewirkt, dass die Varianz des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klasse „Watt“ im Allgemeinen wesentlich größer als die des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klasse „Wasser“ wird (siehe Abbildung 4.7). Dadurch sind die Klassifikationsfehler 1. und 2. Art ungleichmäßig verteilt. Dieser Effekt wirkt sich im Beispiel „Friedrichskoog 2005“ stärker aus, da der Übergangsbereich zwischen Watt und Wasser insbesondere im südlichen Abschnitt sehr flach verläuft und somit viele Punkte einen Gesamtzugehörigkeitsgrad im Bereich des Klassifikationsschwellwertes haben.

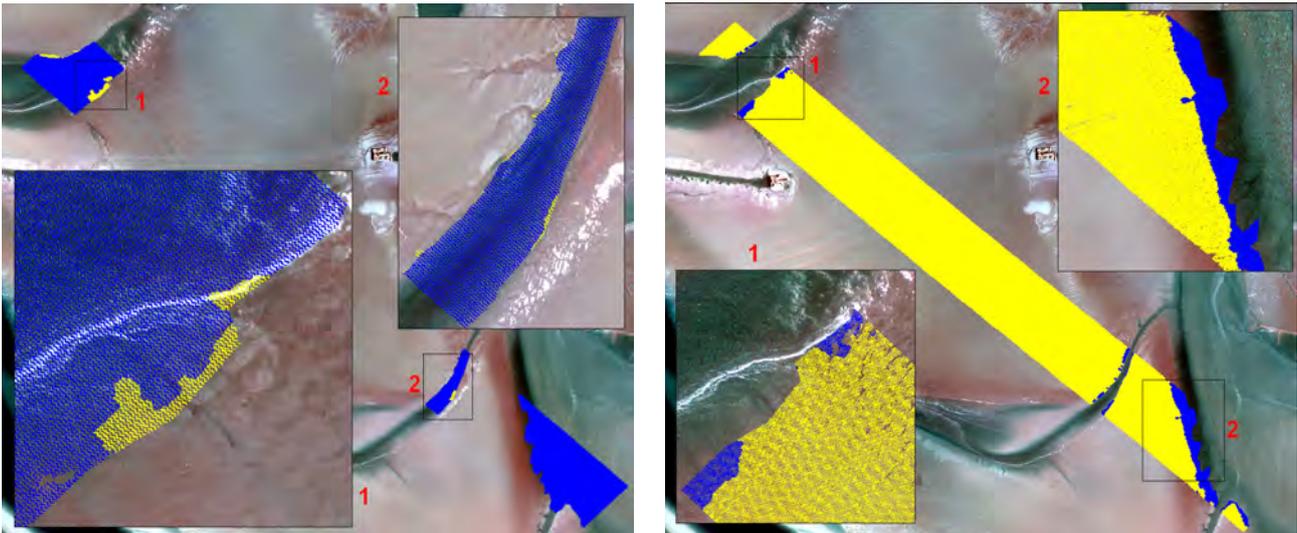


Abbildung 5.15: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – klassifizierte Punkte innerhalb des Referenzgebietes Wasser (links) und des Referenzgebietes Watt (rechts): blau – Wasser, gelb – Watt

Die höchste Genauigkeit erreicht das Beispiel aus der Befliegung „Langeoog 2005“. Zwar wird das Merkmal Intensität innerhalb der Klassifikation aufgrund schlechter Trennbarkeit kaum verwendet, jedoch sind Höhe und 2D-Punktdichte über den gesamten Auslenkwinkelbereich signifikant. Zudem bewirkt in diesem Beispiel die kleinräumig ausgeprägte Übergangszone aufgrund des merklichen Höhenanstieges innerhalb des Strandbereiches eine sehr geringe Fehlklassifikationsquote. Einzelne Fehler treten am Strandufer sowie im Bereich der höher stehenden Wasserpfütze auf (siehe Abbildung 5.16).

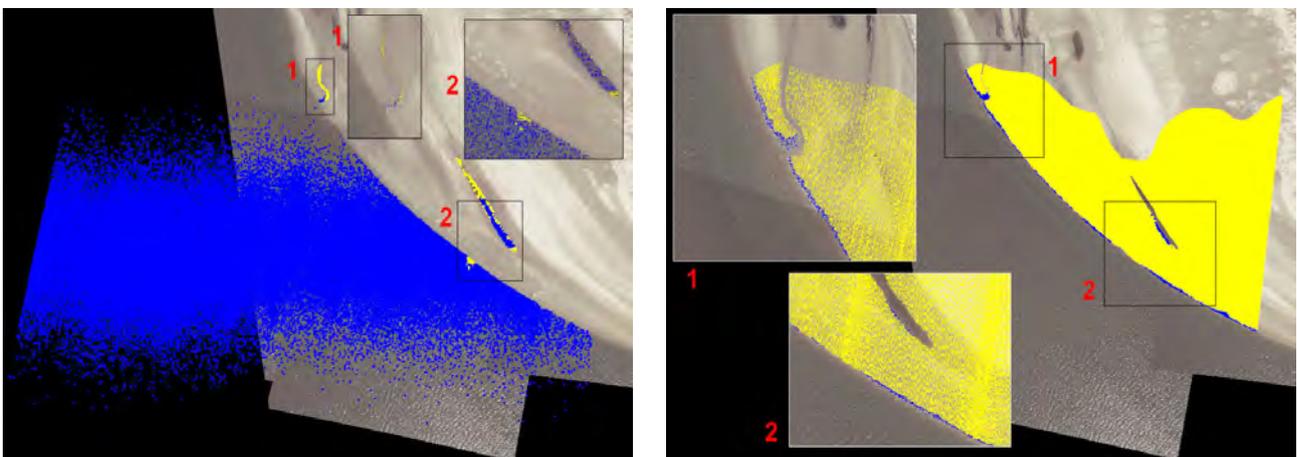


Abbildung 5.16: Befliegung „Langeoog 2005“ – klassifizierte Punkte innerhalb des Referenzgebietes Wasser (links) und des Referenzgebietes Watt (rechts): blau – Wasser, gelb – Watt

5.2.4 Allgemeine Bewertung der Anwendbarkeit der Klassifikation

Die Güte der Klassifikation hängt von der Trennbarkeit der Klassen „Wasser“ und „Watt“ anhand der verwendeten Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte ab. Dabei steigt die erzielte Genauigkeit mit steigender Trennbarkeit des einzelnen Merkmals sowie mit Zunahme der Anzahl der wirksamen Merkmale. Klassifikationsergebnisse, die sich nur auf ein Merkmal stützen (im Allgemeinen die Höhe), weisen tendenziell eine geringere Genauigkeit auf, da keine unabhängige Kontrolle über ein weiteres Merkmal erfolgt. Die Klassifikation kann nicht durchgeführt werden, wenn kein Merkmal eine signifikante Unterscheidung ermöglicht. Schwierigkeiten bereiten ferner Punkte, die im Merkmalsraum zwischen den Klassenausprägungen – abgeleitet aus den Trainingsgebieten – liegen. Diese befinden sich im Allgemeinen in den Übergangszonen zwischen Wasser- und Wattflächen, die abhängig vom jeweiligen Untersuchungsgebiet unterschiedlich groß ausgeprägt sein können.

Sofern Wellen innerhalb der zu klassifizierenden Punktwolke auftreten, kann es zu Fehlklassifikationen kommen. In Abhängigkeit von der Wellenhöhe können insbesondere Punkte auf Wellenbergen fälschlicherweise als Watt erkannt werden. Im Bereich von Schaumkronen und brechenden Wellen kann dieser Effekt verstärkt werden, da die Intensität der Gischtpunkte im Allgemeinen signifikant höher als die der Wasserpunkte ausfällt. Es ist darauf zu achten, dass auftretende Wellenbereiche Teil eines Trainingsgebietes werden, damit die Merkmalsausprägungen innerhalb der Klassifikation berücksichtigt werden. Dennoch verbleiben im Allgemeinen fehlerhaft klassifizierte Wattlepunkte, die jedoch durch die Plausibilisierung größtenteils beseitigt werden.

Wie die Analyse in Kapitel 5.2.3 zeigte, klassifiziert der Algorithmus tendenziell mehr Wasserpunkte als in Wirklichkeit auftreten. Die Ursache liegt in der durchschnittlich größeren Varianz der Höhe im Trainingsgebiet „Watt“ als im Trainingsgebiet „Wasser“ begründet. Dadurch fällt die Varianz des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Wattlepunkte ebenfalls deutlich größer als die Varianz des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Wasserpunkte aus (siehe Abbildung 5.17). Die unterschiedliche Varianz resultiert in einem größeren Fehler 1. Art (der Punkt gehört zur Klasse „Watt“ und wird fälschlicherweise als „Wasser“ klassifiziert) und einen kleineren Fehler 2. Art (der Punkt gehört zur Klasse „Wasser“ und wird fälschlicherweise als Watt klassifiziert). Dieser Effekt verstärkt sich, wenn sich die Varianz der Höhe im Wattbereich vergrößert oder die Übergangsbereiche bzgl. der Gesamtfläche ansteigen.

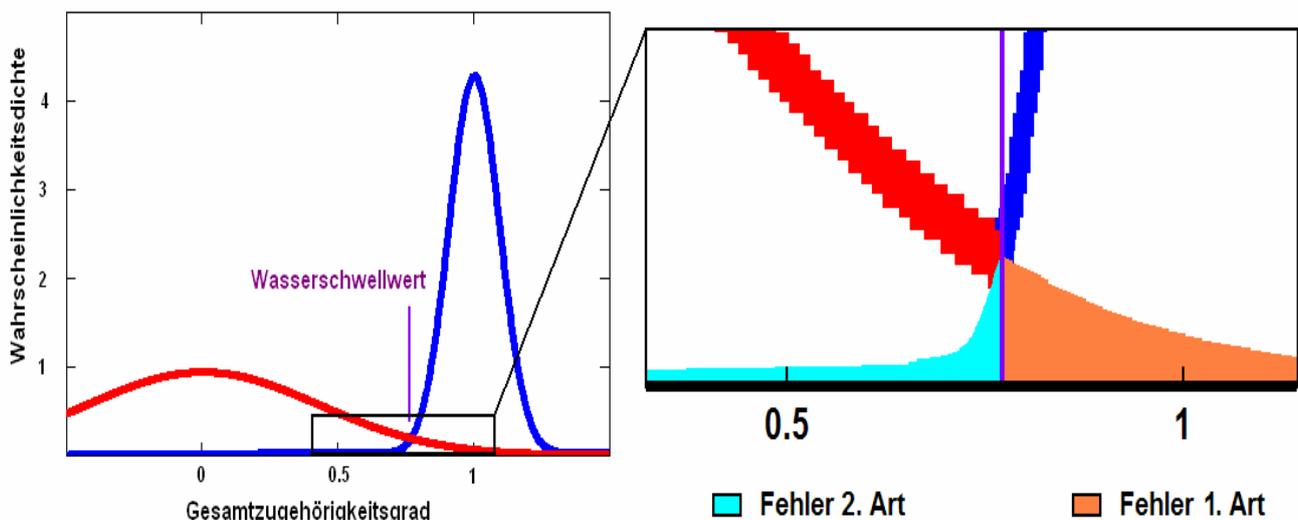


Abbildung 5.17: Abhängigkeit des Klassifikationsfehler 1. und 2. Art von der unterschiedlichen Varianz des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klassen „Wasser“ und „Watt“

5.3 Extraktion von Strukturlinien

5.3.1 Vorstellung der Extraktionsbeispiele

Die Extraktion der Strukturlinien und die Evaluation der Ergebnisse erfolgt anhand von zwei Priele, die jeweils in einer eigenständigen Befliegung erfasst wurden (siehe Tabelle 5.7). Die beiden Priele unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ausdehnung sowie Ausprägung (siehe Tabelle 5.8).

Tabelle 5.7: Befliegungsparameter der Beispieldatensätze

	Friedrichskoog 2005	Außenweser 2004
Scannersystem	Falcon II	Falcon II
Wellenlänge [nm]	1560	1560
Maximaler Scanwinkel [°]	14,3	14,3
Pulsrate im Rahmen [Hz]	83.000	83.000
Flugdatum	13.05.2005, 15.05.2005, 29.05.2005	17.08.2004 – 29.09.2004
Anzahl Flugstreifen	35	180
Flughöhe [m]	1200	1200
2D-Punktdichte [Punkte/m²]	4	4
Punktabstand – Scanzeile [m]	2,3	2,3
Punktabstand – Flugrichtung [m]	0,1	0,1

Tabelle 5.8: Übersicht der Extraktionsbeispiele

	Friedrichskoog 2005	Außenweser 2004
Länge des Priels [m]	440	490
Breite des Priels [m]	6	17
Tiefe des Priels [m]	1,4	1,4
Strukturlinienausprägung	Bruchkante – Rampenkante	Formlinie
Horizontaler Abstand korrespondierender Strukturlinienpunkte [m]	1	6

Das erste Beispiel enthält einen Priel im Marschland der Gemeinde Friedrichskoog. Er besitzt eine Länge von ca. 440m und eine Breite von ca. 6m. An seinem westlichen Ende mündet er in einen größeren Hauptpriels. Der umgebende Bereich ist eben und mit Pionierpflanzen geringer Höhe bewachsen. Das Prielbett weist ebenfalls einen horizontalen Verlauf auf. Die Böschungen sind zu beiden Seiten deutlich ausgeprägt. Die Übergänge zwischen Prielbett und Böschung sowie Umgebung und Böschung erfolgen abrupt in Form einer Bruchkante.

Die Laserscannerdaten wurden mit dem Falcon II – System mit einer Punktdichte von 4 Punkten/m² erhoben. Parallel erfolgte die Aufnahme von Farbinfrarot-Daten, aus denen Orthophotos berechnet wurden. Die Befliegung fand im Zeitraum Mai 2005 statt. Die Abbildung 5.18 links zeigt den aufgenommenen Priel im Bereich des Marschlandes der Gemeinde Friedrichskoog. Dieser führte im Untersuchungsbereich zum Zeitpunkt der Aufnahme kaum Wasser. Als Referenzdaten liegen GPS-RTK-Messungen vor (siehe Abbildung 5.18 rechts), die am 14.06.2005 zeitnah zur Befliegung erhoben wurden.

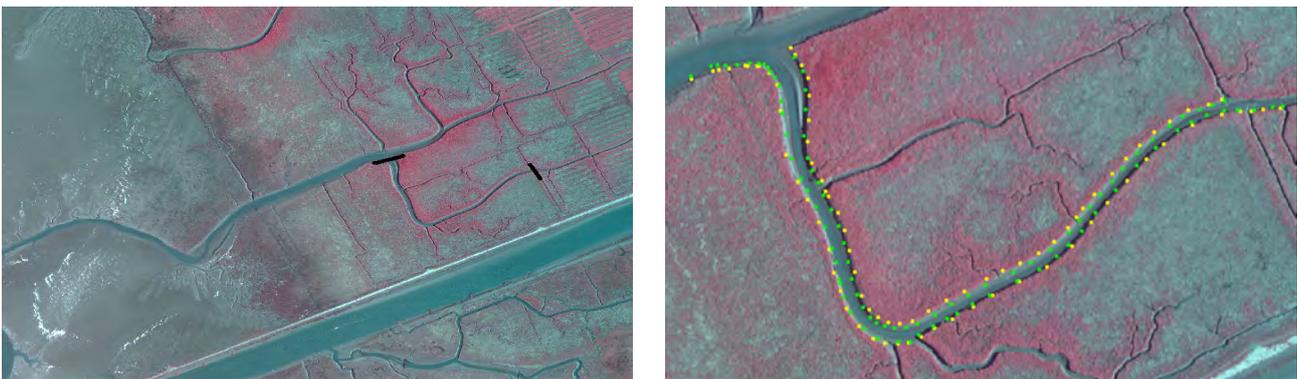


Abbildung 5.18: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – Orthophoto des Priels im Marschland (links), GPS-RTK-Referenzmessungen eines Teils des Priels (rechts). Die gelben Punkte entsprechen der Böschungsoberkante. Die grünen Punkte kennzeichnen die Böschungsunterkante.

Das zweite Beispiel umfasst einen Ausschnitt eines Priels im Bereich der Außenweser nahe Bremerhaven (siehe Abbildung 5.19 links). Er erstreckt sich vom Hafen des Seebades Wremen bis zum Mündungsbereich der Weser. Der umgebende Bereich verläuft eben und besteht aus Schlickwatt. Im Gegensatz zum ersten Beispiel sind die Böschungen aufgrund ihrer im Vergleich zur Höhenänderung großen horizontalen Ausdehnung nur sehr schwach ausgeprägt. Die Höhe fällt von der Umgebung zum Prielbett langsam ab. Es treten keine abrupten Neigungswechsel auf.

Der Priel wurde innerhalb einer Laserscanbefliegung der Firma Toposys im Zeitraum August/September des Jahres 2004 erfasst. Zum Einsatz kam ebenfalls ein Scanner des Typs Falcon II. Die Punktdichte der Laserscannerdaten beträgt ca. 4 Punkte/m². Zudem wurden zeitgleich Farbinfrarotaufnahmen der abgetasteten Oberfläche mit einer digitalen Zeilenkamera

erhoben. Da der Priel während der Befliegung teilweise noch Wasser führte, wurden im Anschluss Fächerecholotdaten mit einer Dichte von mehr als 40 Punkten pro m^2 erfasst. Für die Kontrolle der extrahierten Strukturlinien stehen GPS-RTK-Messungen vom 08.09.2004 über eine Länge von knapp 500m (siehe Abbildung 5.19 rechts) zur Verfügung. Da das Prielbett sowie Teile der Böschung durch Wasser bedeckt waren, konnte nicht die Böschungsunterkante gemessen werden. Stattdessen wurde die Wasserliniengrenze bestimmt.

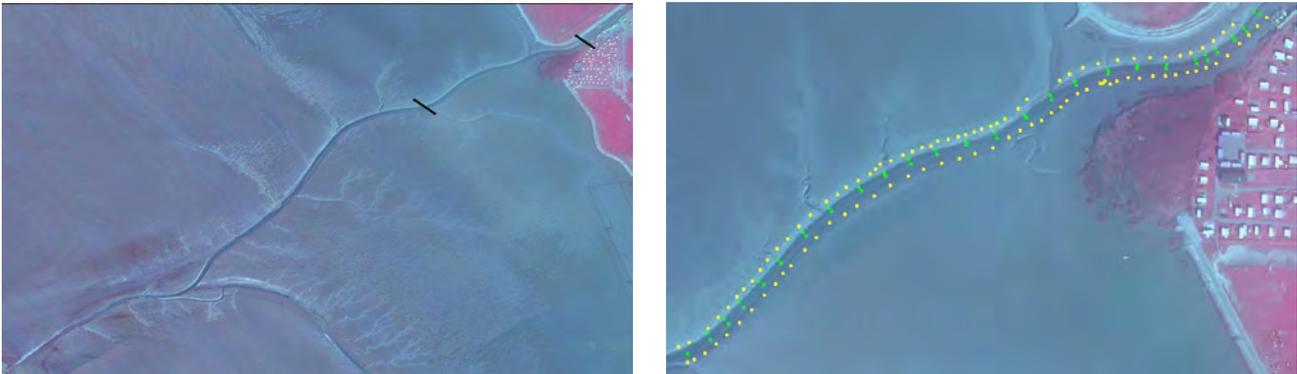


Abbildung 5.19: Befliegung „Außenweser 2004“ – Orthophoto des Priels in der Nähe des Hafens „Wremen“ (links), GPS-RTK-Referenzmessungen eines Teils des Priels (rechts). Die gelben Punkte entsprechen der Böschungsoberkante. Die grünen Punkte kennzeichnen die Wasserliniengrenze zum Zeitpunkt der Erhebung der Kontrollmessungen.

5.3.2 Extraktion der Strukturlinien

Um eine exakte Extraktion der Strukturlinien zu gewährleisten, dürfen nur Stützpunkte verwendet werden, die auf der Geländeoberfläche liegen. Auftretende Wasserpunkte müssen deshalb vorher eliminiert werden. Der Priel des Beispiels „Friedrichskoog 2005“ enthielt jedoch zum Zeitpunkt der Aufnahme nur wenige Wasserpfützen mit geringer Tiefe (kleiner 10cm), weshalb auf eine Trennung verzichtet werden konnte. Im ersten Schritt wurde ein DGM aus den Laserscannerpunkten berechnet. Aus dem DGM wurden nachfolgend mit Hilfe des Deriche-Operators (Deriche, 1987) die Mittelachsen des Priels abgeleitet. Anschließend erfolgte die interaktive Verknüpfung zusammengehörender Teilstücke sowie die Digitalisierung der Umringe (siehe Abbildung 5.20 links und rechts). Danach wurde die Länge der Recheneinheiten auf 5m festgesetzt sowie eine Überlappungsrate von 35% vorgegeben.¹⁹ Nun wurde für jede Recheneinheit kontrolliert, ob genügend Punkte für die Parameterschätzung zur Verfügung stehen. Sofern eine Recheneinheit auf jeder Seite der Mittelachse mindestens 15 Punkte enthält, wird die vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Während alle Recheneinheiten der nördlichen Mittelachse die Forderung erfüllten, mussten neun Recheneinheiten der südlichen Mittelachse von der weiteren Berechnung ausgeschlossen werden. Von den insgesamt 103 Recheneinheiten der nördlichen und 129 Recheneinheiten der südlichen Mittelachse konnten 98 beziehungsweise 115 erfolgreich berechnet werden. Aus den erfolgreich gelösten Recheneinheiten wurden die Bruchkantenpunkte gemäß Gleichungen 4.8a und 4.8b ermittelt (siehe Abbildung 5.21). Nachfolgend wurde eine Besselsplineinterpolation (Kraus, 2000) durchgeführt, um auftretende Lücken zu überbrücken (siehe Abbildung 5.22).

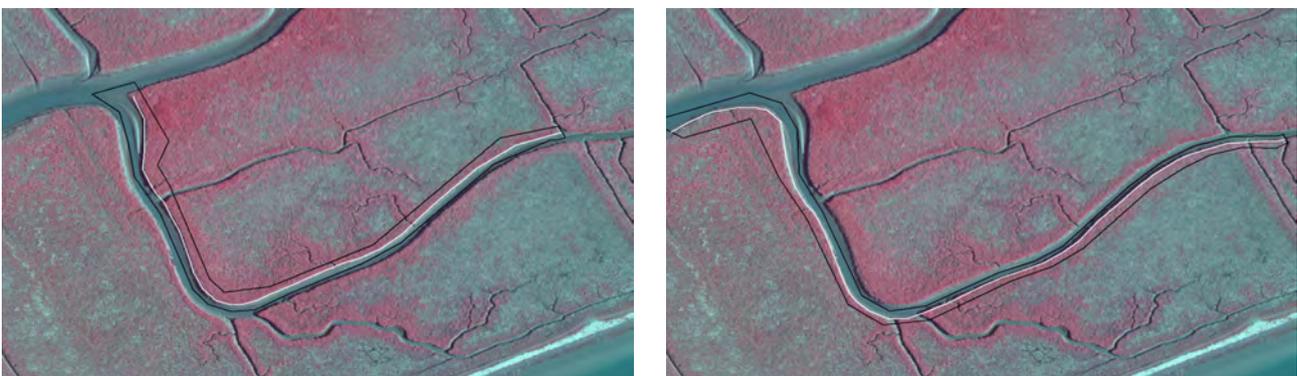


Abbildung 5.20: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ - Näherungslösung sowie Umringpolygon für die nördliche (links) und südliche Böschung (rechts). Die Mittelachsen sind in weiß und die Umringe in schwarz dargestellt.

¹⁹ Die manuelle Festlegung der Länge der Recheneinheiten erfolgt basierend auf der Erfüllung mehrerer Kriterien. Die Punktzahl soll groß genug sein, um eine exakte Bestimmung der Parameter zu ermöglichen. Die Recheneinheiten müssen lang genug sein, um Höhenveränderungen, modelliert durch den Parameter t , ermitteln zu können. Die manuelle Festlegung der Überlappung auf 35% ist der empirische Standardwert.

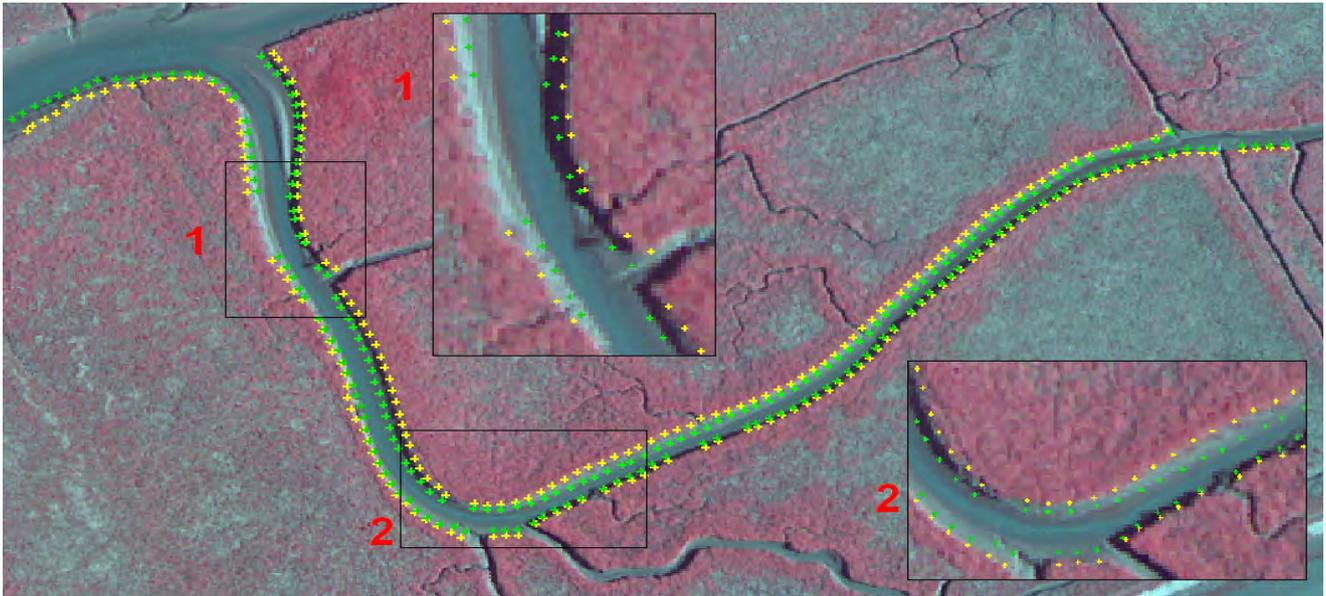


Abbildung 5.21: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – extrahierte Bruchkantenpunkte. Die Böschungs-unterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt.

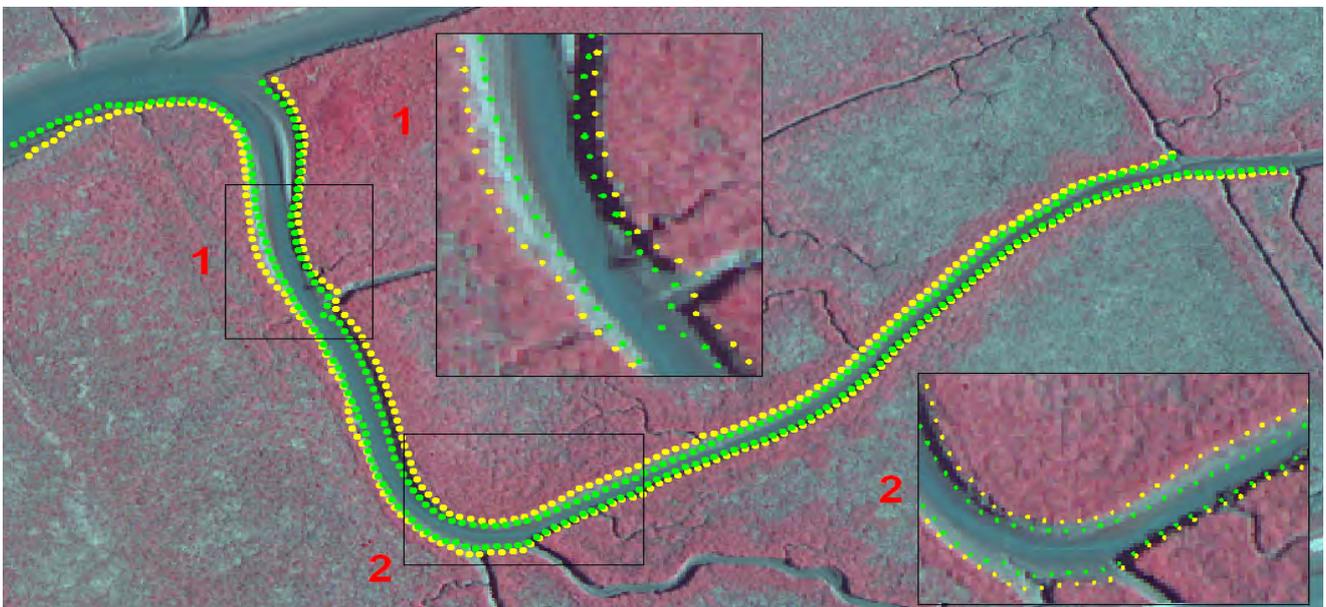


Abbildung 5.22: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – interpolierte Strukturlinienpunkte. Die Böschungsoberkanten sind in grün und die Böschungsunterkanten in gelb dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Befliegung enthielt der zu untersuchende Priel des zweiten Beispiels eine zusammenhängende Wasserfläche. Um Einflüsse auf die Qualität der Extraktion durch eine fehlerhafte Klassifikation des Wassers auszuschließen, erfolgte die Trennung der Laserdaten durch Digitalisierung der Wasserflächen aus den zeitgleich erhobenen Orthophotos. Da die Fächerecholotdaten im Vergleich zu der Laserscanneraufnahme eine sehr hohe Punktdichte aufweisen, wurde im Vorfeld ein DGM aus den Echolotpunkten mit der Rasterweite 0,5m berechnet und anstelle der originären Punkte wurden die Gitterelemente im Wasserbereich verwendet. Aus dem vereinigten DGM wurden wiederum anhand des Deriche-Operators die Mittelachsen des Priels abgeleitet, die Teilstücke verbunden und die Umringe bestimmt (siehe Abbildung 5.23). Die Länge der Recheneinheiten wurde auf 4m reduziert, um eine etwa gleich große Anzahl von Punkten (ca. 200 je Recheneinheit) wie im ersten Beispiel zu ermöglichen. Es ergaben sich für die nördliche Mittelachse 183 und für die südliche Mittelachse 188 Recheneinheiten. Nachfolgend wurde für jede Recheneinheit kontrolliert, ob genügend Punkte der vereinigten Laser-Echolot-Punktswolke für die Parameterschätzung zur Verfügung stehen, sowie die vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Es konnten für die nördliche Mittelachse 161 und für die südliche Mittelachse 170 Recheneinheiten erfolgreich bearbeitet werden. Das entspricht jeweils einer Quote von ca. 90% (siehe Tabelle 5.9). Aus diesen Recheneinheiten wurden dann die Strukturlinienpunkte mit den Krümmungsmaxima (siehe Gleichungen 4.6a und 4.6b) abgeleitet (siehe Abbildung 5.24). Nachfolgend wurden auftretende Lücken durch eine Besselsplineinterpolation geschlossen (siehe Abbildung 5.25).



Abbildung 5.23: Befliegung „Außenweser 2004“ – Näherungslösung sowie Umringspolygon für die nördliche (links) und südliche Böschung (rechts). Die Mittelachsen sind in weiß und die Umringe in schwarz dargestellt.

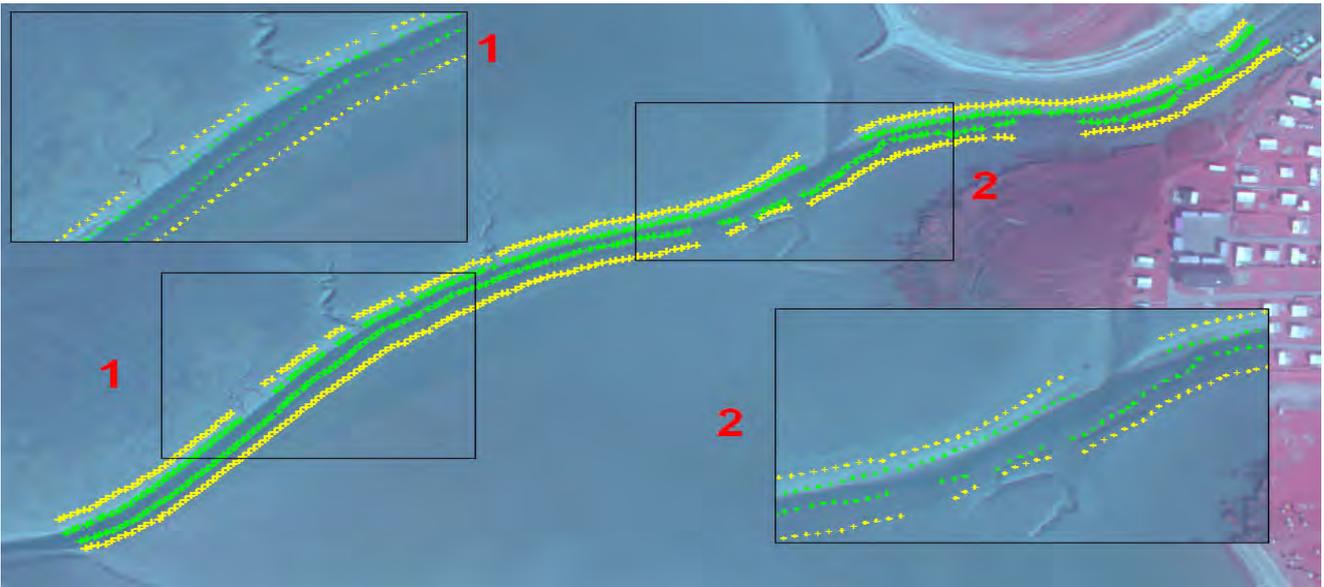


Abbildung 5.24: Befliegung „Außenweser 2004“ – extrahierte Formlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt.

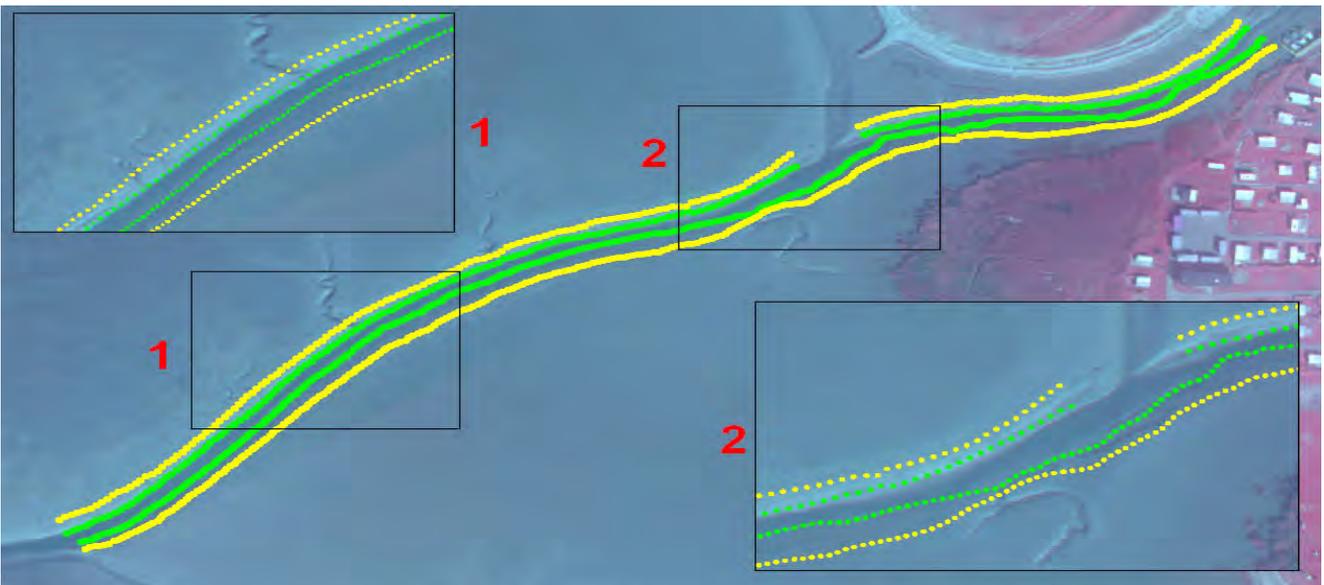


Abbildung 5.25: Befliegung „Außenweser 2004“ – interpolierte Strukturlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt.

Tabelle 5.9: Verwendete Parameter und quantitative Auswertung der Recheneinheiten

	Friedrichskoog 2005		Außenweser 2004	
Länge der Recheneinheit [m]	5		4	
Überlappung [%]	35		35	
Mittelachse	Nord	Süd	Nord	Süd
Anzahl Recheneinheiten	103	129	183	188
Anzahl berechenbarer Recheneinheiten [/%]	103/100	120/93,0	183/100	188/100
Anzahl gelöster Recheneinheiten [/%]	98/95,1	115/89,1	161/88,0	170/90,4

5.3.3 Evaluation der Extraktionsgüte

Aus den Ausgleichungsergebnissen für die Flächenfunktion je Recheneinheit wurden durch Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes die Kovarianzen der Strukturlinienpunkte abgeleitet. Die durchschnittlichen Standardabweichungen für die Bruchkantenpunkte des Priels des Beispiels „Friedrichskoog 2005“ liegen in X-Richtung im Bereich von 0,025m bis 0,045m, in Y-Richtung von 0,024m bis 0,045m und in Z-Richtung von 0,008m bis 0,015m (siehe Tabelle 5.10). Auffällig ist, dass die mittleren Standardabweichungen in der Lage für die Punkte der Böschungsoberkante kleiner sind als für die Punkte der Böschungsunterkante. Die Ursache liegt in der manuellen Festlegung der Umringsgrenzen begründet. So befinden sich durchschnittlich mehr Laserpunkte innerhalb des jeweiligen Umringspolygons im Außenbereich als im Prielbett. Dadurch liegen die Schwerpunkte der Recheneinheiten im Allgemeinen deutlich außerhalb des Grabens. Somit ist der Abstand der ermittelten Strukturlinienpunkte der Unterkante zum jeweiligen Schwerpunkt fast ausnahmslos größer als der der Oberkante. Die Standardabweichung des Verdrehungsparameters α wirkt sich entsprechend dem Abstand stärker auf die inneren, tiefer liegenden Punkte aus. Ferner sind ebenfalls die mittleren Standardabweichungen in der Höhe für die Unterkantenpunkte größer als für die Oberkantenpunkte. Dies lässt sich durch auftretende mehrheitlich negative Korrelationen zwischen den Parametern s und k , die im Zuge der vermittelnden Ausgleichung berechnet wurden, erklären, da die Beträge der Jacobi-Matrix \mathbf{A} für die Bestimmung der Z-Koordinaten der Böschungsober- und Böschungsunterkante vollständig identisch sind und sich ausschließlich im Vorzeichen für die Ableitung in Richtung des Parameters s unterscheiden.

Tabelle 5.10: Friedrichskoog 2005 – Evaluation der a posteriori Standardabweichungen der Strukturlinienpunkte

		Strukturlinie			
		Nord oben	Nord unten	Süd oben	Süd unten
Mittelwert der Standardabweichung [m]	X	$\begin{pmatrix} 0,032 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,045 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,025 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,030 \end{pmatrix}$
	Y	0,032	0,045	0,024	0,028
	Z	$\begin{pmatrix} 0,008 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,015 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,008 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,012 \end{pmatrix}$
Standardabweichung der Standardabweichung [m]	X	$\begin{pmatrix} 0,027 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,030 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,016 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,018 \end{pmatrix}$
	Y	0,027	0,034	0,014	0,015
	Z	$\begin{pmatrix} 0,006 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,010 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,003 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,005 \end{pmatrix}$
Minimalwert der Standardabweichung [m]	X	$\begin{pmatrix} 0,010 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,017 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,001 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,005 \end{pmatrix}$
	Y	0,004	0,003	0,004	0,003
	Z	$\begin{pmatrix} 0,004 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,005 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,004 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,004 \end{pmatrix}$
Maximalwert der Standardabweichung [m]	X	$\begin{pmatrix} 0,264 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,270 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,092 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,112 \end{pmatrix}$
	Y	0,230	0,292	0,097	0,076
	Z	$\begin{pmatrix} 0,056 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,077 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,022 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,027 \end{pmatrix}$

Die durchschnittlichen Standardabweichungen für die Formlinienpunkte der Außenweser liegen in X-Richtung im Bereich von 0,069m bis 0,165m, in Y-Richtung von 0,086m bis 0,147m und in Z-Richtung von 0,009m bis 0,018m (siehe Tabelle 5.11). Insbesondere sind die mittleren Standardabweichungen in der Lage deutlich größer als für das Beispiel aus der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ (siehe Tabelle 5.10). Dies wird hauptsächlich durch signifikant kleinere geschätzte Parameterwerte f bewirkt, die aus der räumlich weiten horizontalen Nachbarschaft korrespondierender Strukturlinienpaare Δd_h resultieren (Friedrichskoog 2005: $\Delta d_h \leq 1m$ vs. Außenweser 2004: $\Delta d_h \leq 7m$). Ferner ist der Einfluss des Parameters α aufgrund des durchschnittlich größeren horizontalen Abstandes zum Ursprung des (u,v)-KS größer. Wiederum sind die Standardabweichungen der Punkte der Böschungsunterkanten deutlich größer als die der Böschungsoberkanten. Auch in diesem Fall lässt sich dies durch die relative Lage des Ursprunges des (u,v)-KS je Recheneinheit, welche dem Schwerpunkt aller enthaltenen Rohdatenpunkte entspricht, erklären. Da die interpolierten Echolotpunkte eine geringere Dichte aufweisen als die Laserpunkte, verschiebt sich der Schwerpunkt jeweils entgegengesetzt zur Grabenmitte nach außen. Dadurch ist der Abstand der ermittelten Formlinienpunkte der Unterkante fast ausnahmslos größer als der der Oberkante. Die Standardabweichung des Verdrehungsparameters α wirkt sich entsprechend dem Abstand stärker auf die inneren, tiefer

liegenden Punkte aus. Ebenfalls ist wieder eine deutlich größere mittlere Standardabweichung der Höhe der Unterkantenpunkte zu verzeichnen, die analog zum ersten Beispiel durch die Korrelation zwischen den Parametern s und k entsteht.

Tabelle 5.11: Außenweser 2004 – Evaluation der a posteriori Standardabweichungen der Strukturlinienpunkte

		Strukturlinie			
		Nord oben	Nord unten	Süd oben	Süd unten
Mittelwert der Standardabweichung [m]	X	$(0,071)$	$(0,127)$	$(0,069)$	$(0,165)$
	Y	0,093	0,116	0,086	0,147
	Z	$(0,012)$	$(0,018)$	$(0,009)$	$(0,018)$
Standardabweichung der Standardabweichung [m]	X	$(0,060)$	$(0,076)$	$(0,034)$	$(0,069)$
	Y	0,059	0,071	0,033	0,051
	Z	$(0,008)$	$(0,011)$	$(0,004)$	$(0,007)$
Minimalwert der Standardabweichung [m]	X	$(0,003)$	$(0,034)$	$(0,007)$	$(0,032)$
	Y	0,031	0,030	0,037	0,031
	Z	$(0,004)$	$(0,006)$	$(0,003)$	$(0,006)$
Maximalwert der Standardabweichung [m]	X	$(0,452)$	$(0,533)$	$(0,210)$	$(0,509)$
	Y	0,495	0,495	0,196	0,388
	Z	$(0,058)$	$(0,068)$	$(0,020)$	$(0,046)$

In beiden Beispielen konnten jeweils ca. 10% der Recheneinheiten nicht erfolgreich gelöst werden (siehe Tabelle 5.9). Dies resultiert aus zwei Fakten. Zum einen konvergieren die zu schätzenden Parameter innerhalb einer Ausgleichung nicht, wenn das angesetzte funktionale Modell in Form der tanh-Funktion nicht mit der auftretenden Geländeoberfläche übereinstimmt. Dies tritt insbesondere in Bereichen von Einmündungen (siehe Abbildung 5.26) sowie schwach ausgeprägten Plateaus der Grabensohle und/oder der angrenzenden Bereiche auf. Zum anderen verhindern größere Datenlücken, welche häufig aufgrund starker Durchfeuchtung in der Grabensohle auftreten (siehe Abbildung 5.26), eine statistisch sichere Schätzung der Flächenparameter. Die maximalen Abweichungen zwischen extrahierter und Referenzlösung treten generell an den Stellen auf, wo eine und/oder beide geschilderten Sachverhalte vorliegen.

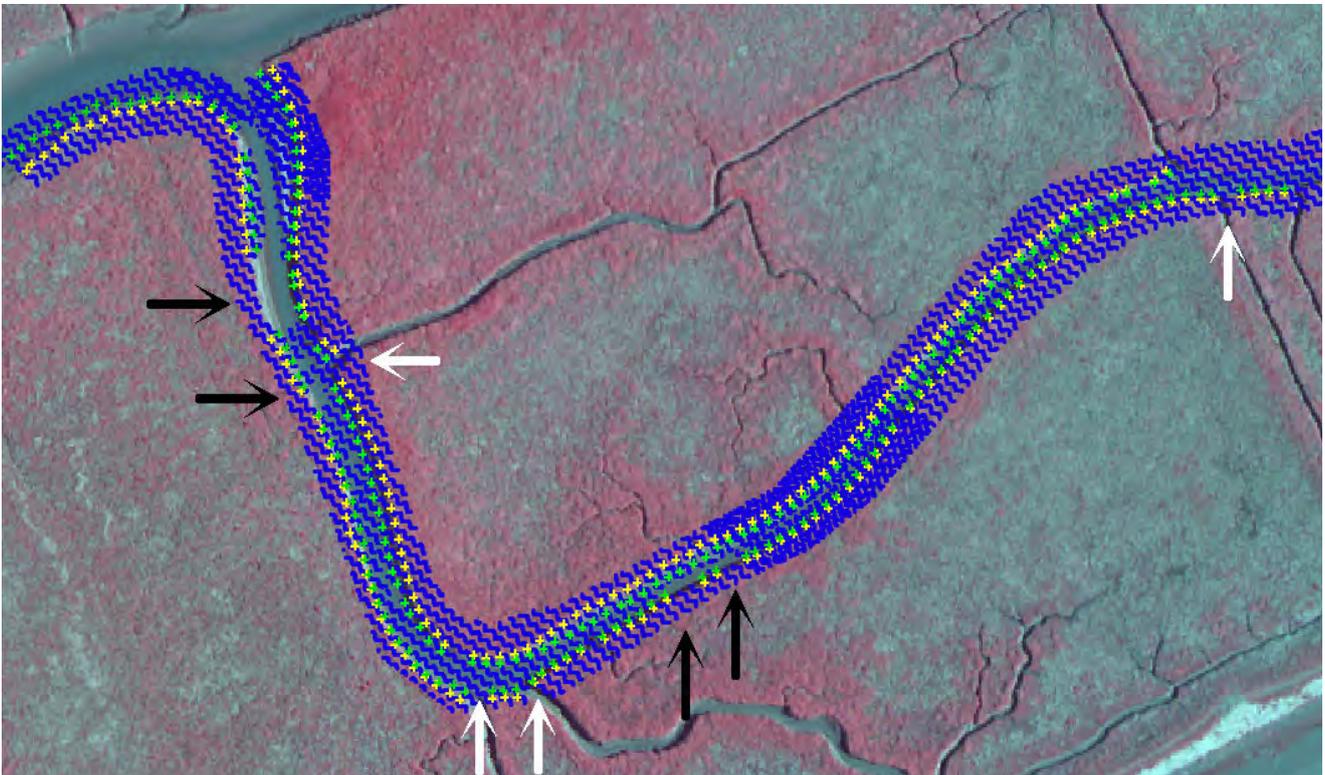


Abbildung 5.26: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – fehlende Flächenpunkte, welche eine Lösung einzelner Recheneinheiten verhindern: Laserscannerpunkte – blau, extrahierte Bruchkantenpunkte – grün und gelb, fehlende Lösungen aufgrund von Datenlücken – schwarze Pfeile, fehlende Lösungen aufgrund von einmündenden Prielen – weiße Pfeile

Im nächsten Schritt wurden die extrahierten Strukturlinienpunkte mit terrestrischen Kontrollmessungen verglichen. Dazu wurden die Lösungen auf das jeweilige Referenzpolygon, welches durch lineare Verknüpfung der zugehörigen

Referenzpunkte entstanden ist, aufgewinkelt (Friedrichskoog – siehe Abbildung 5.27, Außenweser 2004 – siehe Abbildung 5.28). Nachfolgend konnten für jeden extrahierten Strukturlinienpunkt der horizontale und vertikale Abstand berechnet werden²⁰. Aufgrund der Wasserbedeckung während der terrestrischen Aufnahme liegen für die Böschungsunterkanten des Priels in der Außenweser keine Referenzdaten vor. Die stattdessen gemessene Wasserliniengrenze hat keinen Bezug zur Böschungsunterkante. Aus diesem Grund wird für dieses Beispiel nur die Böschungsoberkante evaluiert.

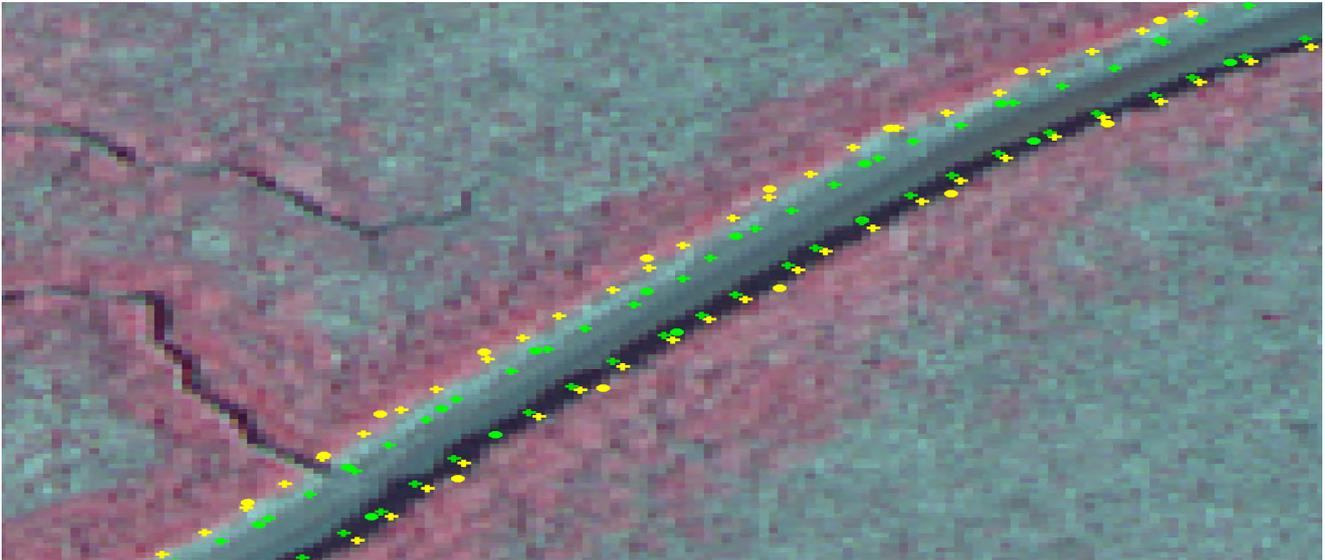


Abbildung 5.27: Befliegung „Außenweser 2004“ – Vergleich der extrahierten Bruchkantenpunkte (Kreuze) mit den Referenzmessungen (Kreise) – Ausschnitt: Böschungsoberkante – gelb, Böschungsoberkante – grün

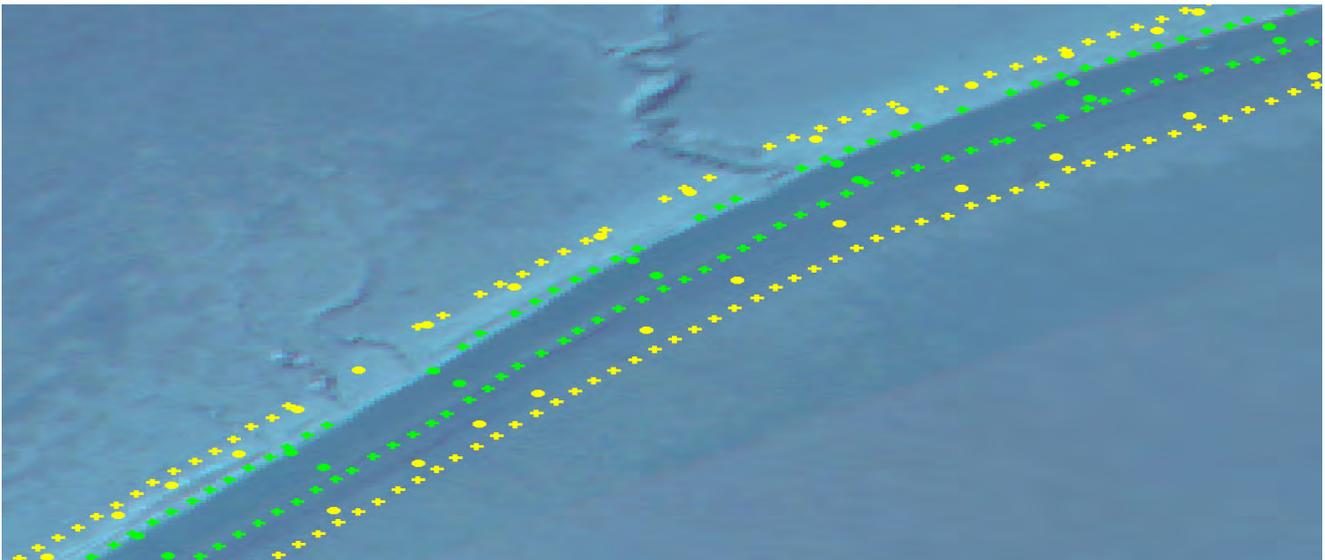


Abbildung 5.28: Befliegung „Außenweser 2004“ – Vergleich der extrahierten Formlinienpunkte (Kreuze) mit den Referenzmessungen (Kreise) – Ausschnitt: Böschungsoberkante – gelb, Böschungsoberkante – grün

Die dabei erzielten Genauigkeitsmaße sind für Friedrichskoog 2005 in Tabelle 5.12 und für die Außenweser 2004 in Tabelle 5.13 verzeichnet. Im Vergleich zu den anhand des Varianzfortpflanzungsgesetzes geschätzten Standardabweichungen zeigt sich, dass die Genauigkeit der extrahierten Strukturlinien sowohl in der Lage als auch in der Höhe geringer ist. Die mittleren horizontalen Abweichungen liegen für den Graben aus der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ im Bereich von 0,019m für die südliche Unterkante bis 0,426m für die nördliche Oberkante. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Vorzeichens. So liegen die abgeleiteten nördlichen und südlichen Böschungskanten im Vergleich zur jeweiligen Referenz verschoben in Richtung der Grabenmitte. Die Punkte sind somit zu weit innen ermittelt worden. Der Grund ist nicht bekannt. Die Höhenunterschiede ΔZ liegen im Bereich von -0,179m bis 0,146m. Dabei sind die Oberkantenpunkte zu weit oben und die Unterkantenpunkte zu weit unten bestimmt worden. Dies lässt sich aus dem verwendeten Rampenkantenmodell (siehe Abbildung 4.11 mitte) erklären. Die extrahierten Bruchkantenpunkte sind nicht

²⁰ Bei der Berechnung des horizontalen Abstandes wurde die relative Lage des extrahierten Strukturlinienpunktes bezüglich des Referenzpolygons berücksichtigt. Befindet sich der Punkt links von der Fortschrittrichtung des Polygons ist der horizontale Abstand negativ. Befindet sich der Punkt rechts von der Fortschrittrichtung des Polygons ist der horizontale Abstand positiv.

Teil der sich aus den geschätzten Parametern ergebenden Fläche sondern liegen für die Böschungsoberkante über und für die Böschungsunterkante unter dieser.

Die Formlinienpunkte der Böschungsoberkante des Beispiels der Außenweser liegen mit einem durchschnittlichen horizontalen Abstand von 1,055m für die nördliche und 1,992m für die südliche Linie deutlich von der jeweiligen Referenz entfernt. Aus Abbildung 5.28 lässt sich erkennen, dass alle Linien in Bezug auf die Grabenmitte zu weit außen bestimmt wurden. Dadurch werden nachfolgend Höhen für die Formlinienpunkte bestimmt, die sich signifikant über den Referenzlinien befinden. Die durchschnittlichen Höhenunterschiede ΔZ liegen dabei im Bereich von 0,293m bis 0,297m.

Die deutlich geringere Genauigkeit der Strukturlinien des zweiten Beispiels im Vergleich zum ersten Beispiel lässt sich durch mehrere Faktoren erklären. Zum einen sind die Böschungen des Priels nur sehr schwach ausgeprägt. So treten zwischen korrespondierenden Strukturlinien relativ große horizontale Distanzen (durchschnittlich ca. 6m) auf, während vergleichsweise nur geringe Höhenunterschiede (ca. 1m) überbrückt werden. Im Zusammenspiel mit der periodischen Überflutung des Gebietes führt dies dazu, dass die Böschungskanten sich nicht markant im Gelände abzeichnen. Dadurch ist sowohl die Extraktion der Strukturlinien anhand des verwendeten Ansatzes als auch die Lokalisation der genauen Lage innerhalb der Referenzmessung erschwert. Deshalb ist ebenfalls die Genauigkeit der Referenz geringer als für das erste Beispiel. Zum anderen besitzt der Priel kein ausgeprägtes horizontales Gewässerbett. Nach Vereinigung der Laserscanner- und Fächerecholotdaten zeigte sich, dass der Querschnitt eher einem V-förmigen Profil ähnelt. Somit bestehen zwischen dem angesetzten Modell und der wahren Geländeform größere Abweichungen, welche die exakte Bestimmung der Strukturlinien erschweren.

Tabelle 5.12: Friedrichskoog 2005 – statistische Auswertung der extrahierten Strukturlinien anhand terrestrischer Referenzmessungen

	Strukturlinie			
	Nord oben	Nord unten	Süd oben	Süd unten
2D-Distanz				
Mittelwert [m]	0,426	0,352	-0,169	-0,019
Standardabweichung [m]	0,441	0,440	0,538	0,444
maximaler positiver Abstand [m]	1,350	1,216	1,781	1,023
maximaler negativer Abstand [m]	-0,921	-0,555	-1,259	-1,164
ΔZ				
Mittelwert [m]	0,131	-0,179	0,146	-0,154
Standardabweichung der Einzelmessung [m]	0,128	0,092	0,097	0,160
Maximalwert [m]	0,524	0,021	0,671	0,113
Minimalwert [m]	-0,264	-0,383	-0,131	0,640

Tabelle 5.13: Außenweser 2004 – statistische Auswertung der extrahierten Strukturlinien anhand terrestrischer Referenzmessungen

	Strukturlinie	
	Nord oben	Süd oben
2D-Distanz		
Mittelwert [m]	-1,055	1,992
Standardabweichung [m]	1,066	0,692
maximaler positiver Abstand [m]	0,945	4,002
maximaler negativer Abstand [m]	-4,445	-0,311
ΔZ		
Mittelwert [m]	0,297	0,293
Standardabweichung der Einzelmessung [m]	0,213	0,105
Maximalwert [m]	0,834	0,584
Minimalwert [m]	-0,342	-0,008

5.3.4 Allgemeine Bewertung der Anwendbarkeit der Extraktion

Der verwendete Ansatz zur Strukturlinienextraktion basiert auf der stückweisen Geländeapproximation durch die tanh-Funktion, wobei zwei 2D-Funktionen in Abhängigkeit von der horizontalen Fortschrittrichtung des Strukturlinienpaares zur Verfügung stehen. Zwar besitzt diese strenge Festlegung der Oberflächenform entscheidende Vorteile, z.B. geringe Anzahl unbekannter Parameter, einfache Extraktion der Strukturlinienpunkte etc., auf der anderen Seite sinkt jedoch die Genauigkeit der erzielten Lösungen mit wachsender Abweichung des angesetzten Modells von der

wahren Geländeoberfläche bis zum vollständigen Versagen der Extraktion. Die Diskrepanz zwischen Modell und Realität macht sich insbesondere im Bereich von kleineren Einmündungen von Nebenrielen in den Hauptgraben bemerkbar, sofern die verwendete Mittelachse diese nicht berücksichtigt.

Des Weiteren besitzt die verwendete 1D-tanh-Funktion die Eigenschaft der Punktsymmetrie, d.h. der linke und rechte Bereich der Funktion sind bis auf eine Verdrehung von 180° identisch. Diese Festlegung verringert zwar die Anzahl der zu schätzenden Parameter, impliziert aber auch einen symmetrischen Verlauf der Oberfläche zu beiden Seiten der Mittelachse. Die Genauigkeit der extrahierten Strukturlinien hängt neben dem Grad der Übereinstimmung zwischen angesetzttem Oberflächenmodell und der wahren Geländeform sowie der Stützpunktdichte und -verteilung auch von der Ausprägung des Strukturlinienpaars ab. Sofern zwei korrespondierende Strukturlinien einer Böschung einen großen horizontalen Abstand bei gleichzeitig geringem Höhenunterschied besitzen, weisen die Linienpunkte nur geringe absolute Krümmungen quer zur Ausbreitungsrichtung auf, die sich kaum von den umgebenden Krümmungen unterscheiden lassen. In diesen Fällen sinkt die Genauigkeit der extrahierten Linienpunkte deutlich.

Ferner ist bei der Anwendung des Algorithmus zu berücksichtigen, dass das Rampenkanten- sowie das Stufenkantenmodell Strukturlinienpunkte liefern, die nicht auf der interpolierten Oberfläche sondern darüber oder darunter liegen. Die vertikale Differenz hängt dabei ausschließlich vom Parameter s ab. Dieser impliziert den vertikalen Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Plateau. Mit steigendem Höhenunterschied zwischen beiden Strukturlinien vergrößert sich der geschätzte Parameter s und ebenfalls die vertikale Differenz. Für das Rampenkantenmodell lässt sich die maximale Abweichung z_{Diff} (siehe Abbildung 5.29 links) zwischen der interpolierten tanh-Funktion sowie der Rampenkantenoberfläche anhand Gleichung 5.4 bestimmen, welche sich durch Differenzbildung der Gleichungen 4.7a und 4.9a ergibt:

$$z_{\text{Diff}} \approx 0,238s \quad (5.4)$$

Bei einer angenommenen Standardabweichung der Laserpunkthöhen von 0,1m liegt der Modellfehler für Oberflächen mit $s \leq 0,42\text{m}$ innerhalb des Messrauschens. Im Falle des Stufenkantenmodells erhöht sich die vertikale Abweichung auf:

$$z_{\text{Diff}} = s \quad (5.5)$$

Jedoch findet dieses Modell nur Anwendung, sofern in der Realität eine Stufenkante auftritt oder sehr hohe geschätzte Werte des Parameters f diese Annahme nahe legen. In diesem Fall ist es sinnvoller, den Abstand des Lotes der Stufenkantenpunkte bezüglich der interpolierten Fläche d_{Diff} zu verwenden (siehe Abbildung 5.29 rechts). Er ergibt sich durch Minimierung des Abstandes zwischen der Flächenfunktion sowie einem Bruchkantenpunkt (siehe Gleichung 5.6).

$$d_{\text{Diff}} = \sqrt{v^2 + (s - s \tanh(fv))^2} \rightarrow \min \quad (5.6)$$

Die Abweichung zwischen der tanh-Funktion und dem Rampenkanten- sowie Stufenkantenmodell kann vernachlässigt werden, wenn sie sich innerhalb des Messrauschens befindet. Für die vertikale Differenz z_{Diff} wird die Höhenstandardabweichung der Laserpunkte und für die räumliche Differenz d_{Diff} die 3D-Punktfehlerellipse herangezogen. Für die große Mehrzahl der auftretenden Böschungen im Wattbereich sind die auftretenden Abweichungen zu vernachlässigen. Aufgrund des im Allgemeinen geringen Höhenunterschiedes zwischen Böschungsober- und Böschungsunterkante liegen sie innerhalb des Messrauschens.



Abbildung 5.29: maximale Höhendifferenz z_{Diff} zwischen der interpolierten Oberfläche und dem Rampenkantenmodell (links) und maximale Schrägdifferenz d_{Diff} zwischen der interpolierten Oberfläche und dem Stufenkantenmodell (rechts)

5.4 Erstellung konsistenter Digitaler Geländemodelle

In der Außenweser wurde ein 2km x 2km großes repräsentatives Gebiet ausgewählt, um anhand des neuen Arbeitsablaufes ein DGM abzuleiten. Es ist durch ein zusammenhängendes System mehrerer Priele, deren Hauptrichtung von Nord nach Süd verläuft (siehe Abbildung 5.30 links), geprägt. Ferner enthält das Beispiel mehrere östlich und westlich angrenzende Wattbereiche, die zum Zeitpunkt des Tideniedrigwassers trocken fallen. Während insbesondere die Seitenarme nur geringe Tiefen von 1m bis 2m bezüglich der angrenzenden Watten besitzen, befindet sich im Zentrum des Hauptpriels eine Senke, die ca. 10m unterhalb der umgebenden Wattflächen liegt. Der Bereich wurde im Rahmen der jährlichen Befliegung im August und September 2005 durch die Firma Toposys gescannt²¹. Insgesamt zwölf parallel zueinander liegende Flugstreifen enthalten Laserpunkte des Untersuchungsgebietes²². Die Anzahl der zu klassifizierenden Punkte beläuft sich auf 16.625.248. Zeitnah zur Befliegung erhob das Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven Fächerecholotdaten dieses Gebietes (siehe Abbildung 5.30 rechts). Dabei wurde darauf geachtet, dass insbesondere der sicher überflutete Bereich durch die Peilungsmessungen abgedeckt wird. In den Randbereichen steigt hingegen der Abstand zwischen den einzelnen Spuren auf bis zu 100m, sodass größere Lücken verbleiben. Insgesamt umfasst der Echolotdatensatz 20.402.791 gemessene Punkte.

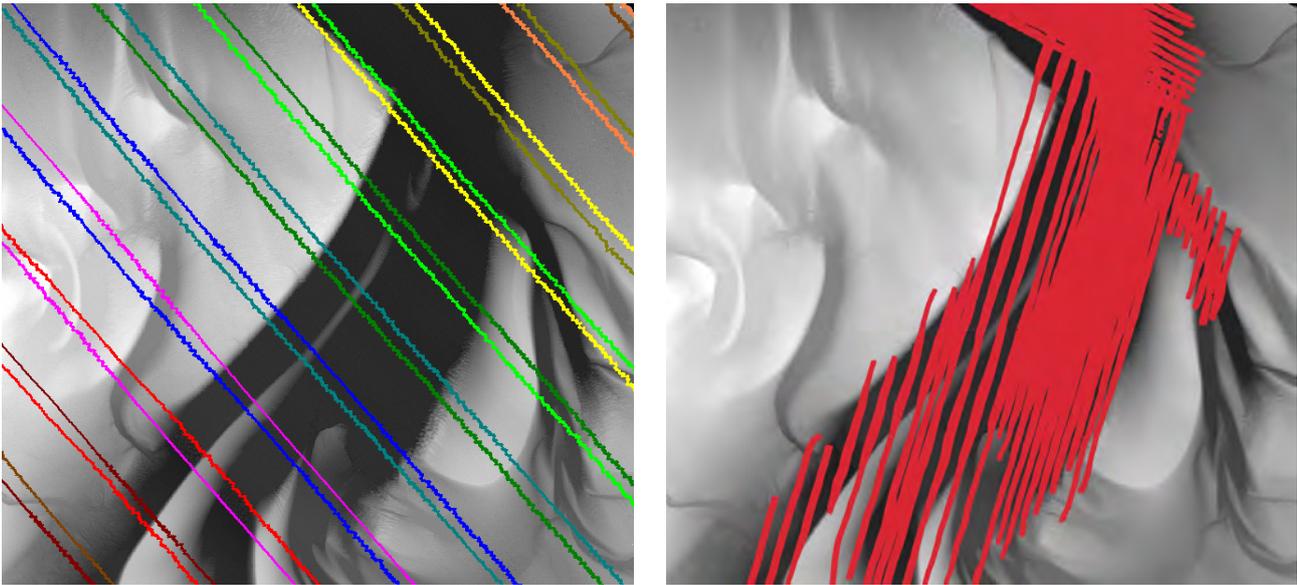


Abbildung 5.30: Befliegung „Außenweser 2005“ – Digitales Oberflächenmodell des Untersuchungsgebietes aus den Laserscannerdaten mit Umringen der Flugstreifen (links), gemessene Echolotpunkte (rechts): Umringe – grün und braun, Echolotpunkte – rot

Im Rahmen der Klassifikation in die Gruppen „Wasser“ und „Watt“ anhand des neuen Algorithmus erfolgte eine Analyse der Laserpunkte. Dabei zeigte sich, dass analog zum Beispiel aus der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ das Scannmuster auch im Bereich der Wasserflächen nahezu keine Lücken enthält (siehe Abbildung 5.31 links). Die Intensitätswerte weisen für viele Streifen die typische Abhängigkeit vom Auslenkwinkel auf. Diese ist für Wasser und Watt unterschiedlich ausgeprägt. Im Bereich des Hauptpriels sind die Intensitätswerte starken hochfrequenten Schwankungen unterworfen. Diese werden hauptsächlich durch auftretende Wellen verursacht. Zu den Rändern des jeweiligen Streifens nehmen die Intensitätswerte langsam ab. Auf den trockenen Wattflächen finden sich in der Streifenmitte hohe Intensitätswerte, die sehr stark zu den Seiten abfallen. Dadurch sind die durchschnittlichen Intensitäten im Übergangsbereich zwischen Streifenmitte und -rand im Watt oft geringer als im Wasser. Ferner sind hochfrequente Streuungen im Watt kaum anzutreffen. Die nassen Wattflächen wiederum weisen in der Streifenmitte signifikant geringere Intensitätswerte auf. Diese liegen teilweise deutlich unterhalb der Werte auf dem Wasser.

²¹ Die Flugparameter stimmen mit der Befliegung „Außenweser 2004“ überein (siehe Tabelle 5.7).

²² Die Umringe der Flugstreifen sind in Abbildung 5.30 rechts dargestellt. In Tabelle 5.14 sind die Namen der Streifen entsprechend ihrer Anordnung von Südwesten (0938012) bis Nordosten (0945002) aufgelistet.



Abbildung 5.31: Befliegung „Außenweser 2005“ – zu klassifizierende Laserpunktwolke intensitätscodiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (links), Ergebnis der Plausibilisierung (rechts): Wasser – blau, Watt – gelb

Danach erfolgte die Festlegung der Trainingsgebiete. Für alle Streifen wurde jeweils ein Set digitalisiert. Dabei wurden das Watttrainingsgebiet jeweils im prielnahen nassen Sandbereich und das Wassertrainingsgebiet im Hauptpriel definiert. Die visuelle Analyse konnte innerhalb der Auswertung der Trainingsgebiete bestätigt werden. Für alle Streifen können die Klassen signifikant anhand des Merkmals Höhe unterschieden werden. Hingegen ermöglicht das Merkmal 2D-Punktdichte keine Trennung (siehe Abbildung 5.32 rechts). Das Merkmal Intensität ist nur teilweise nutzbar. Im Randbereich unterscheiden sich die Verteilungen für Wasser und Watt generell kaum. In der Streifenmitte ist für mehrere Streifen z.B. 0942006 (siehe Abbildung 5.32 links unten) die Intensität signifikant. Für andere Streifen konnte über den gesamten Winkelbereich keine Trennbarkeit anhand der Intensität festgestellt werden (siehe Abbildung 5.32 links oben).

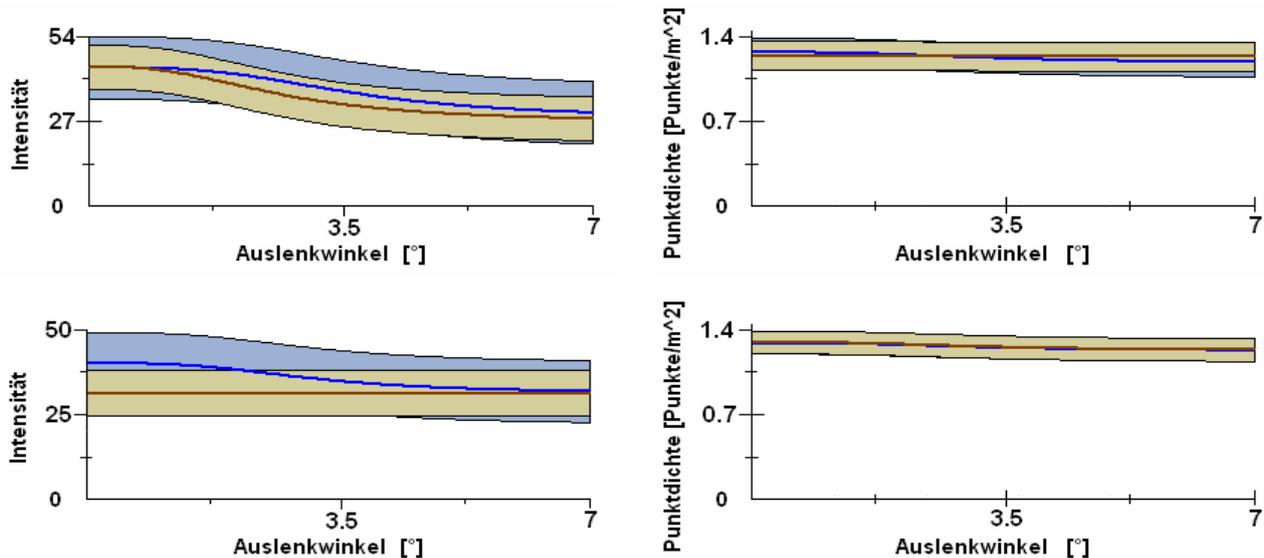


Abbildung 5.32: Befliegung „Außenweser 2005“ – geschätzte Abhängigkeit der Intensität (links) und der 2D-Punktdichte (rechts) vom Auslenkwinkel mit zugehöriger Standardabweichung der Verbesserungen für zwei ausgewählte Streifen: 0942002 – oben, 0942006 – unten: Watt – braun/ocker, Wasser – dunkelblau/hellblau

Basierend auf der Auswertung der Trainingsgebiete wurden nachfolgend die Klassifikation sowie die Plausibilisierung der Streifen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.14 bzw. Abbildung 5.31 rechts aufgeführt. Von den mehr als 16 Millionen Laserpunkten wurden ca. 4,7 Millionen als Wasser und 11,9 Millionen als Watt klassifiziert. Teilweise sind an den Grenzen benachbarter Flugstreifen deutliche Klassifikationsunterschiede zu erkennen, die durch den unterschiedlichen Befliegungszeitpunkt und den dadurch unterschiedlichen Wasserstand begründet sind.

Tabelle 5.14: Außenweser 2005 – Ergebnisse der Klassifikation

Streifen	Anzahl Laserpunkte	Anzahl Wasserpunkte	Anzahl Wattpunkte
0938012	266.341	45.626	220.715
0938013	874.155	163.860	710.295
0938014	1.256.322	277.471	978.851
0942002	1.808.542	512.073	1.296.469
0942003	2.558.724	619.406	1.939.318
0942004	2.422.326	602.496	1.819.830
0942005	2.701.106	651.665	2.049.451
0942006	1.891.846	624.551	1.267.295
0942007	1.601.305	999.230	602.075
0942008	830.909	250.296	580.613
0942009	396.244	2.319	393.925
0945002	17.418	0	17.418
Summe	16.625.248	4.748.993	11.876.255

Nachdem die Wasserpunkte aus der weiteren Berechnung ausgeschlossen wurden, erfolgte die Fusion der Laserscanner- und Fächerecholotdaten. Da die Lotungen teilweise größere Lücken aufwiesen, wurden diese durch eine Interpolation mittels Delaunay-Triangulierung (Shewchuk, 1997) geschlossen. Im Anschluss konnten elf Strukturlinienpaare an den Prielrändern bestimmt werden (siehe Abbildung 5.33). Die Berechnung stützte sich dabei auf das Formlinienmodell. Für die einzelnen Linienpaare konnten durchschnittlich 74,8% der Recheneinheiten erfolgreich bestimmt werden (siehe Tabelle 5.15). Die Erfolgsquote zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Ausprägung der Böschung sowie dem Grad der Interpolation aufgrund der Lücken innerhalb der Lotungen. So konvergiert die vermittelnde Ausgleichung zum Beispiel nur für 59,7% der Recheneinheiten des zweiten Strukturlinienpaars, obwohl alle genügend Punkte beinhalten (berechenbare Recheneinheiten – 100%). Die interpolierten Punkte verhindern eine erfolgreiche Extraktion, da sie aus den gegebenen Punkten unabhängig von der wahren Geländeform entsprechend dem Interpolationsverfahren abgeleitet wurden und somit keine im Sinne der Ausgleichung unabhängigen Beobachtungen darstellen. Für den Priel, welcher durch die Strukturlinienpaare 10 und 11 begrenzt wird, sind nur für den nördlichen Abschnitt Echolotpunkte (siehe Abbildung 5.30 rechts) innerhalb der Wasserfläche vorhanden (siehe Abbildung 5.31 rechts), so dass alle südlichen Recheneinheiten aufgrund fehlender Punkte nicht berechnet werden konnten.

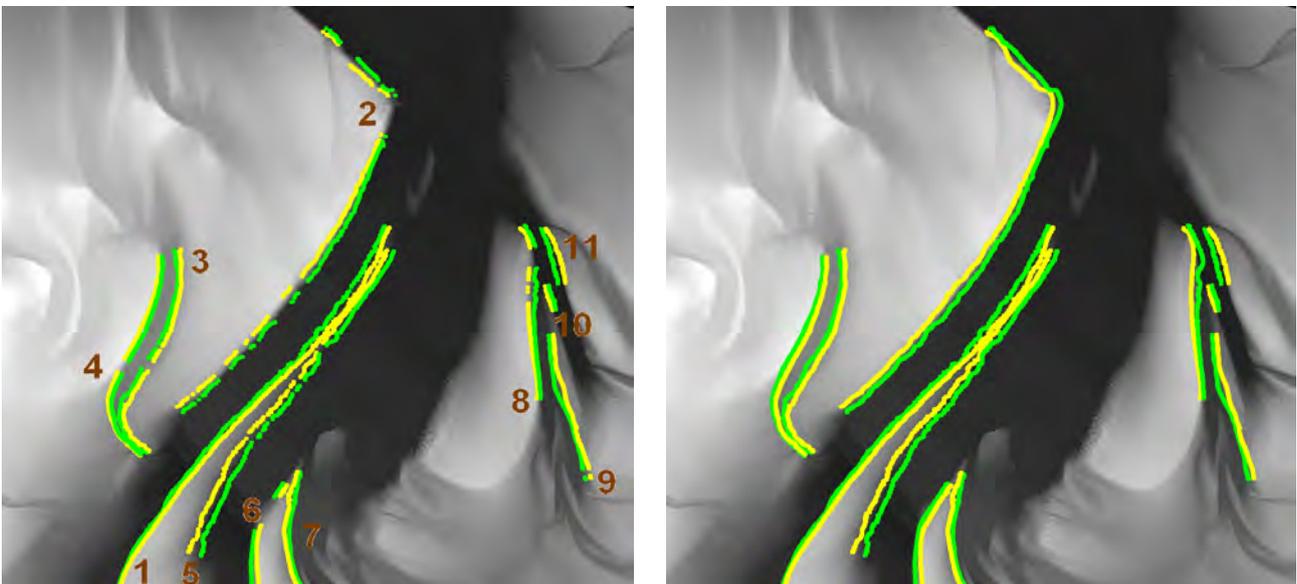
**Abbildung 5.33:** Befliegung „Außenweser 2005“ – extrahierte Strukturlinienpunkte (links), interpolierte Strukturlinienpunkte (rechts)

Tabelle 5.15: Außenweser 2005 – Verwendete Parameter und quantitative Auswertung der Recheneinheit

	Formlinienpaar										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Länge der Recheneinheit [m]	7	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Überlappung [%]	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Anzahl Recheneinheiten	332	268	168	177	275	116	110	139	148	68	135
Anzahl berechenbarer Recheneinheiten [%]	332/100	268/100	168/100	177/100	275/100	115/9,1	108/9,2	120/8,3	148/100	20/29,4	50/37,0
Anzahl gelöster Recheneinheiten [%]	323/97,3	160/59,7	158/94,4	153/86,4	231/84,0	60/51,7	91/65,5	100/71,9	109/73,6	19/27,9	44/32,6

Im Anschluss erfolgte die Interpolation des DGM durch Delaunay-Triangulation unter Berücksichtigung der ermittelten Formlinien. Abbildung 5.34 illustriert das berechnete DGM. Deutlich prägen sich die Senke im Hauptpriel sowie die Neigungsänderungen im Bereich der Strukturlinien am Übergang zwischen horizontaler Wattfläche und dem Prielsystem aus.

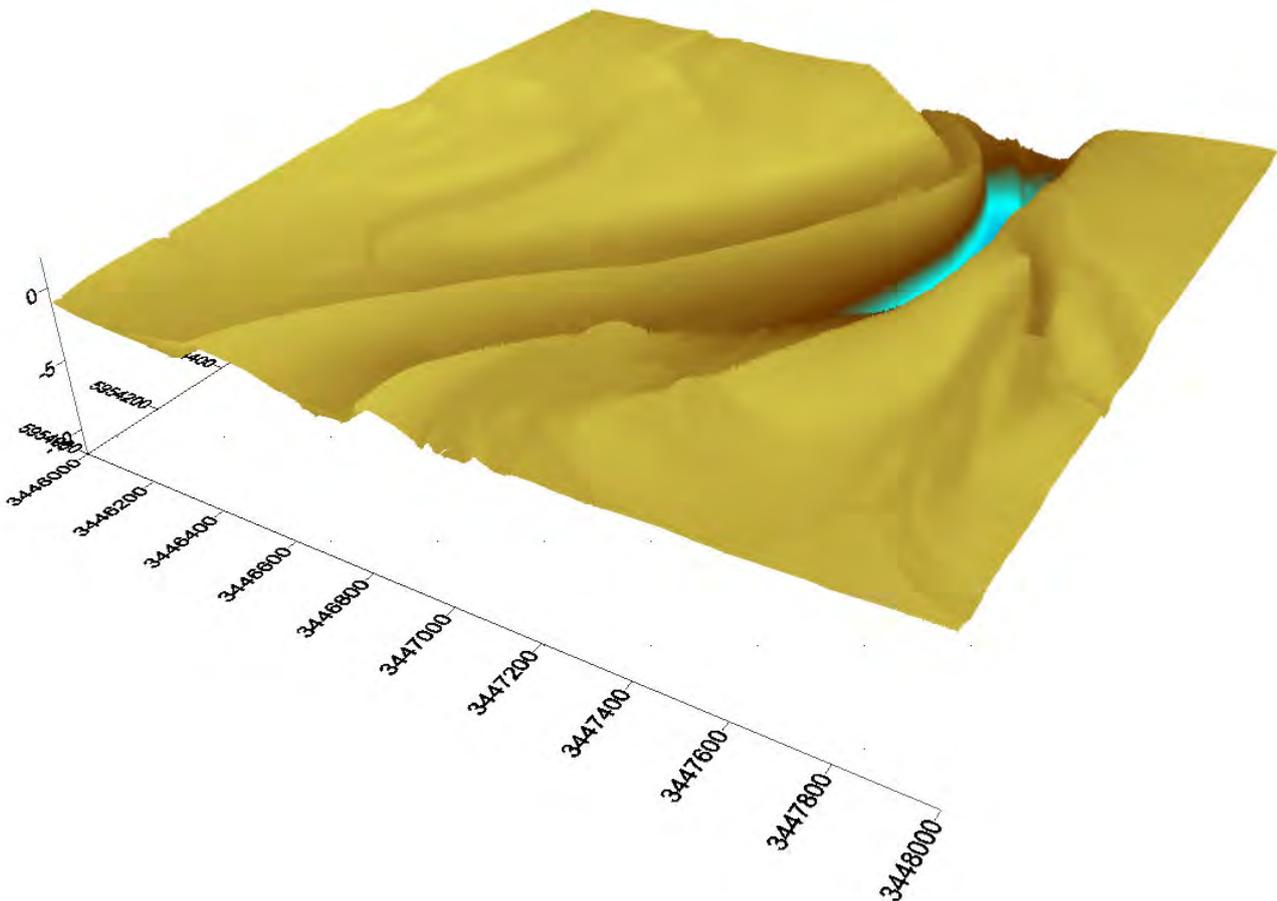


Abbildung 5.34: Befliegung „Außenweser 2005“ – Modelliertes DGM aus Laserscanner- und Fächerecholotdaten sowie extrahierten Strukturlinien in einer 2,5D-Schrägdarstellung – Überhöhungsfaktor: 35

Die Abbildung 5.35 visualisiert das Differenzmodell aus dem Laser-DOM (siehe Abbildung 5.30 links) sowie dem aus den vereinigten Datensatz unter Berücksichtigung der Formlinien abgeleiteten DGM (siehe Abbildung 5.34). Für die Gebiete, die als Watt innerhalb der Laserscannerbefliegung klassifiziert wurden, betragen die Differenzen – mit geringen Abweichungen aufgrund der jeweiligen Interpolation – 0m. Deutliche Differenzen treten jedoch für die als Wasser klassifizierten Bereiche auf. Innerhalb der Senke im Hauptpriel wachsen diese auf einen Betrag von bis zu 10m an. Deutlich zeigt sich an diesem Beispiel, dass die Verwendung des Laser-DOM als DGM in Abhängigkeit von der Wassertiefe grob fehlerhaft sein kann und die nachfolgende Nutzung sehr stark einschränkt. Deshalb ist die Kombination von Laserscanner- und Echolotdaten in Form des eingeführten Arbeitsflusses durchzuführen, um ein hochgenaues DGM zu erhalten.

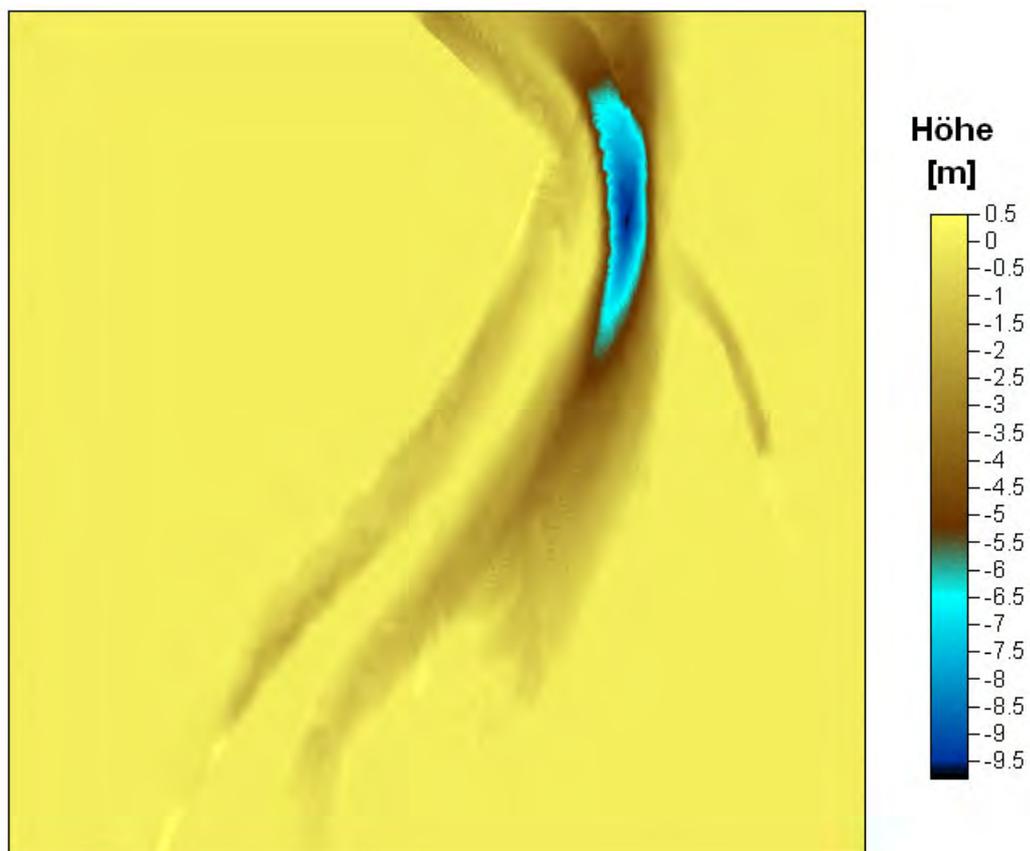


Abbildung 5.35: Befliegung „Außenweser 2005“ – Differenzmodell aus dem Laser-DOM sowie dem modellierten DGM aus Laserscanner- und Fächerecholotdaten sowie extrahierten Strukturlinien

6 Bewertung und Ausblick

Kern der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung eines geeigneten Arbeitsablaufes zur Generierung eines DGM in Watten aus Airborne Laserscannerdaten. Dieser basiert auf dem Standardkonzept zur Ableitung eines DGM im Bereich des Festlandes. Er enthält drei neue Teilschritte, namentlich: Klassifikation der Wasserflächen, Verschneidung von Airborne Laserscanner- und bathymetrischen Daten sowie die Stukturlinienextraktion. Für die Klassifikation der Wasserflächen als auch die Extraktion der Stukturlinien wurde jeweils ein neuer Algorithmus entwickelt und evaluiert.

Der überwachte Klassifikationsalgorithmus, der auf den Grundlagen der Fuzzy-Logik basiert, unterteilt die Laserpunkte eines Flugstreifens anhand der Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte in die Klassen „Wasser“ und „Watt“. Die Methode analysiert die Güte der Trennbarkeit beider Klassen anhand jedes Merkmals und verwendet diese nachfolgend in der Klassifikation. Die systematische Abhängigkeit der Intensität und der 2D-Punktdichte vom Inzidenzwinkel wird vor der Klassifikation nicht berücksichtigt, da die Korrektur der Daten nur über die a priori Information der Klassenzugehörigkeit eines jeden Punktes sowie des jeweiligen Reflexionsmodells möglich ist. Stattdessen wird dieser Abhängigkeit innerhalb der Klassifikation durch die Bewertung der Trennbarkeit für jeden Inzidenzwinkel Rechnung getragen. Der Algorithmus beinhaltet ferner eine Plausibilisierung der klassifizierten Punkte basierend auf definierten Annahmen bezüglich des Höhenverhaltens benachbarter Wasser- und Wattpunkte sowie eine Glättung, um kleinräumige isolierte Zonen zu vermeiden und ein homogenes Ergebnis zu erhalten. Anhand dreier Beispiele, die mit unterschiedlichen Scannern erfasst wurden, sowie unabhängiger Referenzdaten konnte bewiesen werden, dass der Algorithmus in der Lage ist, Wasser und Watt hochgenau zu klassifizieren. Dabei zeigte sich, dass die erzielte Genauigkeit zum einen von der Trennbarkeit der Klassen anhand der verwendeten Merkmale, zum anderen von der Ausdehnung der Übergangsbereiche abhängig ist.

Für die Extraktion der Stukturlinien wurde ein Verfahren entwickelt, welches zwei korrespondierende Stukturlinien einer Böschung aus den unregelmäßigen Punktdaten extrahiert. Ausgehend von einer 2D-Näherungslösung, die durch die Anwendung eines Standardkantenextraktor auf ein aus den unregelmäßigen Punkten erzeugtes DGM ermittelt wurde, wird die Geländeoberfläche stückweise durch eine Flächenfunktion rekonstruiert. Im Algorithmus sind zwei Funktionen implementiert, die sowohl eine geradlinige als auch eine gekrümmte Ausbreitung des Stukturlinienpaars im Grundriss approximieren können. Beide basieren auf der Aneinanderreihung der 1D-Tangens hyperbolicus Funktion. Anhand einer vermittelnden Ausgleichung gemäß der Methode der kleinsten Quadrate werden die unbekannt Parameter geschätzt. Nachfolgend können sowohl Formlinien- als auch Bruchkantenpunkte aus diesen Parametern abgeleitet werden. Zusammengehörnde Punkte einer Linie werden im Anschluss durch eine Besselsplineinterpolation miteinander verknüpft, um nicht gelöste Bereiche zu überbrücken und eine Verdichtung der Linienpunkte zu erzielen. Anhand zweier Beispiele wurde gezeigt, dass mit diesem Verfahren Stukturlinien aus Laserscannerdaten abgeleitet werden können. Die erzielbare Genauigkeit hängt dabei grundsätzlich von der Übereinstimmung des angesetzten Modells mit der örtlichen Geländeausprägung ab. Ferner verringert sich die Extraktionsgenauigkeit beim Ansteigen des Abstandes der korrespondierenden Stukturlinien sowie bei der Verringerung der Höhendifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Plateau.

Für ein 2km x 2km großes Wattgebiet im Bereich der Außenweser wurde nachfolgend ein DGM anhand des neuen Arbeitsablaufes erstellt. Dazu wurden ca. 16 Millionen Laserpunkte aus zwölf Flugstreifen klassifiziert. Anschließend erfolgte die Fusion der Laser- und Echolotdaten, wobei auftretende Datenlücken innerhalb der Echolotung durch eine Interpolation geschlossen wurden. Danach wurden elf Stukturlinienpaare anhand des vorgestellten Algorithmus extrahiert. Schlussendlich erfolgte die Interpolation des DGM anhand des fusionierten Datensatzes sowie der ermittelten Stukturlinien. Das Ergebnis zeigt, dass der Arbeitsablauf sowie die darin enthaltenen neuen Algorithmen geeignet sind, um ein hochgenaues DGM im Wattbereich aus Laserscannerdaten zu generieren.

Dennoch ist die Erstellung eines DGM aus Laserscannerdaten in Watten mit der Generierung des Arbeitsablaufes sowie der beiden Algorithmen nicht allumfassend gelöst. Beide Methoden besitzen Verbesserungspotentiale, welche eine höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit ermöglichen würden. So sind die Unterschiede im Rahmen der Klassifikation hinsichtlich der Ausprägung der Merkmale Intensität und 2D-Punktdichte zwischen Wasser und Watt häufig nicht signifikant. In diesen Fällen beruht die Unterscheidung nur auf der Höhe. Zusätzliche Merkmale könnten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Klassifikation steigern. Das sind zum einen Merkmale, die sich analog zu den bisher verwendeten physikalisch begründbar zwischen beiden Klassen unterscheiden sollten. Denkbar sind beispielsweise Texturmerkmale der Höhe, die insbesondere eine Identifikation von Punkten in Wellenbereichen verbessern könnten. Zum anderen sind Merkmale einsetzbar, die sich zwar zwischen beiden Klassen nicht signifikant unterscheiden aber die Bestimmung der Land-Wasser-Grenze exakter ermöglichen. Erste Tests wurden diesbezüglich mit einem Punktdichtequotienten durchgeführt. Dieser wird aus der maximalen und minimalen 2D-Punktdichte durch Drehung eines Kreisstücks um den jeweiligen Laserpunkt gebildet. Unter der Annahme, dass im Wasser die 2D-Punktdichte signifikant geringer als im Watt ist, erreicht der Quotient an der Land-Wasser-Grenze signifikant größere Werte als innerhalb einer Klasse. Eine weitere Steigerung der Klassifikationsgüte kann durch Integration parallel erhobener optischer Daten erreicht werden. Dazu könnten die einzelnen Farbkanäle als weitere Merkmale in die Methode einfließen, die bei entsprechender Signifikanz für die Berechnung des Gesamtzugehörigkeitsgrades verwendet werden. Der so erweiterte Algorithmus wäre in der Lage, sowohl Laserdaten alleine als auch im Verbund mit optischen Daten zu klassifizieren.

Innerhalb der Strukturlinienextraktion sind insbesondere die Gewinnung der Näherungslösung als auch die Erstellung der Umringe wichtige Elemente, die bei einer Erweiterung des Ansatzes berücksichtigt werden müssen. In beiden Bereichen ist bisher das interaktive Eingreifen notwendig, um die Genauigkeit und Vollständigkeit der Extraktion nicht zusätzlich zu vermindern. So erhält man als Ergebnis des eingesetzten Kantenoperators häufig nur Teilstücke zusammengehörender Mittelachsen, die nachfolgend manuell verbunden werden müssen. Der Umring muss ebenfalls häufig per Hand digitalisiert werden, um keine Punkte in der Flächenrekonstruktion zu berücksichtigen, die nicht zur Strukturlinienumgebung zählen. Die Integration von neuen Verfahren eröffnet die Möglichkeit, die Extraktion nicht mehr semi-automatisch sondern vollständig ohne manuelle Eingriffe ablaufen zu lassen. Denkbar ist die Verwendung eines Linienverknüpfungsalgorithmus basierend auf den Ausprägungen der extrahierten Teilstücke (wie zum Beispiel: Richtung, Länge, räumliche Nachbarschaft) sowie dem zugrunde liegenden DGM. Die automatische Umringgenerierung könnte auf der Analyse der räumlichen Nachbarschaft angrenzender Mittelachsen sowie der Übereinstimmung der an den Umringrändern befindlichen Stützpunkte zur angesetzten Oberflächenform beruhen.

Darüber hinaus können die im Rahmen der Arbeit entwickelten Methoden für andere Problemstellungen neue Impulse liefern. Betrachtet man die Filterung, welche für die Erstellung eines DGM im Bereich auftretender Vegetation beziehungsweise Bebauung ein notwendiger Teilschritt ist, so werden analog zur Klassifikation die Laserpunkte in zwei Gruppen – in diesem Fall in Boden- und Nichtgeländepunkte – unterteilt. Bisher sind nur Methoden gebräuchlich, die geometrische Kriterien der Punkte beziehungsweise Punktgruppen nutzen, die sich schlussendlich also nur auf Koordinaten respektive Koordinatenunterschiede beziehen. Jedoch besitzen die innerhalb der beiden Gruppen auftretenden Elemente spezifische Reflexionseigenschaften, die sich in den Merkmalen Intensität und 2D-Punktdichte widerspiegeln. Zukünftige Verfahren können sich diesen Effekt zu Nutze machen und in der Klassifikation berücksichtigen. Dadurch kann insbesondere in bewegtem Gelände eine sichere Trennung der beiden Klassen erzielt werden.

Der Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien wird im Bereich der Detektion von morphologischen Veränderungen in den Watten neue Möglichkeiten eröffnen. Bildet man bisher die Differenz zweier interpolierter Geländemodelle verschiedener Epochen und analysiert die Höhenunterschiede bezüglich Abweichungen außerhalb eines zulässigen Toleranzschwellwertes, so besteht nun die Möglichkeit, ein einfaches Modell eines Priels basierend auf den vier den Priel beschreibenden Strukturlinien aufzubauen. Im Gegensatz zu dem abstrakten Vergleich von Höhen derselben Lagekoordinaten kann man ausgehend von dem modellierten Priel zweier Epochen direkt Veränderungen dieses Objektes detektieren und evaluieren. So können signifikante Änderungen der Lage und Höhe aber auch anderer beschreibender Merkmale wie Grabenbreite, Querschnittsfläche, Volumen etc. ermittelt werden. Dies stellt ein ungleich höheres Potential dar, da im Gegensatz zum Punktvergleich der Objektbezug hergestellt ist.

Literaturverzeichnis

- Aarup, T. 2002. Transparency of the North Sea and Baltic Sea – a Secchi depth data mining study. In *OCEANOLOGIA*, Vol. 44 (3), pp. 323-337.
- Bahlburg, H., Breitzkreuz, C. 2008. Grundlagen der Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 403p.
- Baltsavias, E. 1999a. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3), pp. 199-214.
- Baltsavias, E. 1999b. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3), pp. 164-198.
- Besl, P., McKay, N. 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes, In *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14 (2), pp. 239-256.
- Bezdek, J. C. 1994. The Thirsty Traveler Visits Gamont: A Rejoinder to “Comments on Fuzzy Sets - What are They and Why?”. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 2 (1), pp. 43-45.
- Borkowski, A. 2004. Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. *Habilitation*, TU Dresden, Germany, 91p.
- Briese, C. 2004. Breakline modelling from airborne laser scanner data. *Dissertation*, TU Wien, Austria, 67p.
- Brockmann H., Mandlbürger G., 2001. Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder. In *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformationen*, Vol. 10, pp. 199-208.
- Brügelmann, R. 2000. Automatic breakline detection from airborne laser range data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIII, B3, Amsterdam, Netherlands, pp. 109-115.
- Brügelmann, R. and Bollweg, A.E. 2004. Laser altimetry for river management. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV, B2, Istanbul, Turkey, pp. 234-239.
- Brzank, A. 2001. Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten. *Diplomarbeit*, TU Dresden, 86p.
- Brzank, A., Lohmann, P. 2004. Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen im Küstenbereich aus Laserscannermessungen, In *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Vol. 13, pp. 203-210.
- Brzank, A., Lohmann, P., Heipke, C. 2005. Automated extraction of pair wise structure lines using airborne laserscanner data in coastal areas. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI 3/W19, Enschede, Netherlands pp. 36-41.
- Brzank, A., Heipke, C. 2006. Classification of Lidar Data into water and land points in coastal areas. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI/3, Bonn, Germany, pp. 197-202.
- Brzank, A., Heipke, C. 2007. Supervised classification of water regions from lidar data in the Wadden Sea using a fuzzy logic concept. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI/3, Espoo, Finland, pp. 90-95.
- Clode, S.P., Rottensteiner, F., 2005. Classification of trees and powerlines from medium resolution airborne laserscanner data in urban environments. In *Proceedings of the APRS Workshop on Digital Image Computing (WDIC)*, Brisbane, Australia, pp. 191–196. URL: <http://www.aprs.org.au/wdic2005/fullproceedings.pdf> (letzter Zugriff : 11.03.2008).
- Cobby, D. M., Mason, D. C., Davenport, I. J. 2001. Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 56 (2), pp. 121-138.
- Comaniciu, D., Meer, P. 2002. Mean shift: a robust approach toward features space analysis. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24 (5), pp. 603-619.
- Cramer, M. 2001. Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerotriangulation. *Dissertation*, Uni Stuttgart, Germany, 122p.
- Dannenberg, J. 2004. Ableitung der Topographie des Wattenmeeres aus ERS-SAR Daten. *Dissertation*, Uni Bremen, Germany, 150p.
- Deriche, R., 1987. Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. In *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1 (2), pp. 167-187.
- Duchon, J. 1976. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. In *R.A.I.R.O. Analyse Numérique*, Vol. 10 (12), pp. 5-12.

- Dutter, R. 1985. Geostatistik – eine Einführung mit Anwendungen. Teubner, Stuttgart, 159p.
- Eisner, L., Bell, E. E., Young, J., Oetjen, R. A. 1962. Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 micrometer - III. Terrain Measurements. In *Journal of the optical society of America* Vol. 52 (2), pp. 201-209.
- Förstner, W. 1998. Image processing for feature extraction in digital intensity, color and range images. In *Proceedings of the International Summer School on 'Data Analysis and Statistical Foundations of Geomatics'*, Greece, 25p.
- Göpfert, J., Sörgel, U. 2007. Estimation of the lidar height offset in coastal vegetated areas. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI/3, Espoo, Finland, pp. 156-161.
- Gomes-Pereira, L., Janssen, L. 1999. Suitability of laser data for DTM generation: A case study in the context of road planning and design. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 54 (4), 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. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3), pp. 105-114.
- Grundey, M., Hake, G. 1980. Wattvermessung durch elektronische Tachymetrie. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 95*, Hannover, Germany, 72p.
- Heck, B. 2003. Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung. Wichmann, Heidelberg, 473p.
- Henke, S. 1999. Umweltatlas Wattenmeer – Wattenmeer zwischen Elb- und Emsmündung, Band 2. Ulmer Verlag, Stuttgart, 200p.
- Heyken, H. 2007. Jahresbericht 2006 - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. http://www.nlwkn.niedersachsen.de/master/C18208228_N18208094_L20_D0_I5231158 (letzter Zugriff 19.02.2008).
- Höfle, B., Pfeifer, N. 2007. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 62 (6), pp. 415-433.
- Huising, E. J., Gomes Pereira, L. 1998. Errors and accuracy estimates of laser scanning systems for topographic applications. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53 (5), pp. 245-261.
- Irish, J. L., Lillycrop, W. J. 1999. Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3), pp. 123-129.
- Janza, F.J. 1975. Manual of Remote Sensing - Theory, Instruments and Techniques, The American Society of Photogrammetry, 867p.
- Jelalian, A. 1992. Laser Radar Systems. Artech House, Boston und London, 292p.
- Kass, M., Witkin, A. und Terzopoulos, D. 1987. Snakes: Active contour models. In *Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, IEEE Comput. Soc. Press*, pp. 259-268.
- Klausing, H., Holpp, W. 2000. Radar mit realer und synthetischer Apertur. Konzeption und Realisierung. Oldenbourg, München, 399p.
- Kohlus, J. 1998. Umweltatlas Wattenmeer – Nordfriesisches und Dithmarsches Wattenmeer, Band 1. Ulmer Verlag, Stuttgart, 270p.
- Konecny, G. 1979. Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 87*, Hannover, Germany, 114p.
- Kovesi, P. D. 2003. Shapelets correlated with surface normals produce surfaces. Technical report. School of computer science and software engineering, the University of Western Australia. <http://www.csse.uwa.edu.au> (letzter Zugriff: 11.03.2008).
- Kraus, K. 1974. Untersuchung zur Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten. In *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Vol. 99, Stuttgart, Germany, pp. 198-205.
- Kraus, K. 1988. Fernerkundung – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken, Band 1. Dümmler, Bonn, 291p.
- Kraus, K. 2000. Photogrammetrie – Topographische Informationssysteme, Band 3. Dümmler, Bonn, 437p.
- Kraus, K., Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53 (4), pp. 193-203.
- Krüger, M. 2005. Single Beam und Multi Beam Echolot-Messsysteme. Hamburg, Germany. <http://www.wsv.de/wsa-hh/Wasserstrassen/Peilwesen/Messsysteme> (letzter Zugriff: 11.03.2008).
- Kuchling, H. 2004. Taschenbuch der Physik, Median-Verlag, 711p.
- Liu, J.-K., Li, R., Deshpande, S., Niu, S., Shih, T.-Y. 2007. Estimation of Blufflines by Integrating Topographic LIDAR Data and Orthoimages. In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, accepted.

- Mandlbürger, G. 2006. Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie. *Dissertation*, Wien, Austria, 150p.
- Mayer, A., Mechler, B., Schlindwein, A., Wolke, R. 1993. Fuzzy Logic. Einführung und Leitfaden zur praktischen Nutzung. Addison-Wesley, Bonn, 289p.
- Moritz, H. 1972. Advanced Least-Squares Methods. Ohio State University, Department of Geodetic Science and Surveying, Report 175, Columbus, Ohio.
- Nalwa, V.S. and Binford, T.O. 1986. On Detecting Edges. In *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8 (6), pp. 699-714.
- Nicodemus, F., Richmond, J., Hsia, J., Ginsberg, I., Limperis, T. 1977. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. In *NBS Monograph 160*, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 67p.
- Niemeier, W. 2002. Ausgleichsrechnung - Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. De Gruyter, Berlin, 407p.
- Pfeifer, N., Elberink S. und Filin, S. 2005. Automatic tie elements detection for laser scanner strip adjustment. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI 3/W19, Enschede, Netherlands, pp.174-179.
- Prandle, D. Hargreaves, J. C., McManus, J. P., Campbell, A. R., Duwe, K. Lane, A., Mahnke, P., Shimwell, S., Wolf, J. 2000. Tide, wave and suspended sediment modelling on an open coast — Holderness. In *Coastal Engineering* Vol. 41 (1-3), pp. 237-267.
- Reineck, H.-E. 1982. Das Watt. Verlag von Waldemar Kramer, Frankfurt am Main, 185p.
- Schneider, W. 1969. Untersuchungen zur Anwendung des Wasserlinienverfahrens in hydrologisch schwierigen Gebieten. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 38*, Hannover, Germany, 91p.
- Schenk, T. 2001. Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners, In *Technical Notes in Photogrammetry No. 19*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, USA, 40p.
- Shewchuk, J. R. 1997. Delaunay Refinement Mesh Generation. *PhD Thesis*, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Schwäbisch, M., Moreira, J. 1999. The high resolution airborne interferometric SAR AES-1. In *Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference*, Ottawa, Canada, pp. 540-547.
- Sithole, G. 2005. Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data, *Dissertation*, TU Delft, Netherlands, 146p.
- Sithole, G. und Vosselman, G. 2005. Filtering airborne laser scanner data based on segmented point clouds. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI 3/W19, Enschede, Netherlands, pp. 66-71.
- Stelzer, K. 1998. Erfassung der Sedimentverteilung des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres mit Hilfe multispektraler Fernerkundungsdaten. *Diplomarbeit*, Universität Trier, 143p.
- Sui, L. 2002. Processing of laser scanner data and automatic extraction of structure lines. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV 2, Xian, P.R. China, pp. 429-435.
- Tovari, D. und Pfeifer, N. 2005. Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI 3/W19, Enschede, Netherlands pp. 79-84.
- Träger, D. H. 1994. Einführung in die Fuzzy-Logik. Teubner Verlag, Stuttgart, 176p.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. 1982. Microwave Remote Sensing: Active and Passive -- Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, Vol. II, Artech House, Reading, Massachusetts, 609p.
- Vaughn, C.R., Bufton J. L., Krabill, W. B., Rabine, D. 1996. Georeferencing of airborne laser altimeter measurements. In *International Journal of Remote Sensing*, Vol. XVII No. 11, pp. 2185-2200.
- Vosselman, G. 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIII (B3), Amsterdam, Netherlands, pp. 935-942.
- Wagner, W., Ulrich, A., Briese, C. 2003. Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. In *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, Vol. 4, pp. 223-235.
- Wagner, W., Ulrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N. 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 60 (2), pp. 100-112.

- Wegener, B. 1979. Rechnergestützte Erfassung und Beschickung von Wasserlinien im Verfahren der Wattvermessung. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 91*, Hannover, Germany, 84p.
- Wegner, S., Harms, T., Bultjes, J.H., Oswald, H., Fleck, E. 1995. The watershed transformation for multiresolution image segmentation. Proc. 8th International Conference on Image Analysis and Processing, San Remo, Italien, p. 31-36.
- Wenz, D. 2005. Seevermessung. Bremerhaven, Germany. <http://www.wsa-bremerhaven.de/seevermessung/seevermessung1.htm> (letzter Zugriff: 11.03.2008).
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets. In *Information and Control*, 8, pp. 338-353.
- Zissis, G. J. 1993. The Infrared and Elctro-Optical Systems Handbook. Vol. 1, Sources of Radiation. Enviromental Research Institute of Michigan, 373p.

Danke

- ... meinen Eltern für die Liebe, Geduld und Zeit, die Ihr in mich investiert habt. Aufgrund Eurer moralischen und finanziellen Unterstützung konnte ich frei und unbeschwert studieren und mich entwickeln. Vielen Dank für Euren Rückhalt.
- ... meiner lieben Frau Iryna, die mir so viel Liebe und Wärme schenkt, mich unterstützt und mir den Rücken trotz eigenen Studiums freigehalten hat.
- ... meiner kleinen Tochter Laura, weil Du unser kleiner Sonnenschein bist, der mich täglich daran erinnert, wie schön das Leben ist.
- ... meinen Brüdern Martin und Stefan für Ihre moralische Unterstützung sowie den Familienzusammenhalt.
- ... Prof. Dr. Christian Heipke für das Vertrauen und die Zeit, die Du in mich investiert hast. Dadurch eröffnete sich mir erst die Möglichkeit, wissenschaftlich zu arbeiten und eine Dissertation zu schreiben. Die Diskussionen waren nicht immer leicht, doch letztlich hat Dein Engagement die wissenschaftlichen Ergebnisse sowie die vorliegende Arbeit entscheidend verbessert.
- ... Prof. Dr. Norbert Pfeifer, für sein Engagement und seine Unterstützung während meiner Zeit als Diplomand an der TU Wien im Jahr 2001 sowie die Übernahme eines Referates. Durch Dich habe ich die Möglichkeit erhalten, erste Einblicke in das wissenschaftliche Arbeiten zu gewinnen. Meine Diplomarbeit ist das Ergebnis unserer gemeinsamen Arbeit und hat einen entscheidenden Anteil, dass ich in Hannover als wissenschaftlicher Mitarbeiter anfangen konnte.
- ... Dr. Claus Brenner für die Übernahme eines Referates.
- ... Prof. Dr. Jürgen Müller für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.
- ... Prof. Dr. Uwe Sörgel, für die Impulse und das Engagement, die sich nicht nur positiv auf meine Arbeit, sondern auf das ganze IPI ausgewirkt haben.
- ... Dr. Peter Lohmann, für die Erstellung des Forschungsantrages, welche jede Menge Zeit und Nerven kostete, so dass ich eine Stelle mit einem sehr interessanten Projekt ausfüllen konnte sowie Deine Unterstützung insbesondere in den ersten Jahren am IPI.
- ... den Mitarbeitern der am Projekt beteiligten Behörden – namentlich der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Natur und Küstenschutz in Norden, die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord-West, das Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven, das Amt für ländliche Räume in Husum sowie das Bundesamt für Gewässerkunde in Koblenz insbesondere Herr Thorenz, Herr Dirks, Herr Dr. Lange, Herr Wenz, Herr Wirth, Herr Wulff, Herr Stederoth und Herr Palm.
- ... Dipl.-Ing. Jens Göpfert für das Ertragen meiner Launen und Macken, die fachlichen und zumeist auch sachlich geführten Diskussionen sowie das Korrekturlesen der Arbeit.
- ... Dipl.-Ing. Torsten Hentschel für das Korrekturlesen der Arbeit.
- ... allen IPIanern für die gemeinsame Zeit.
- ... Allen weiteren, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Lebenslauf

	<p>Persönliches Alexander Brzank Geboren am 27. Februar 1977 in Stralsund Verheiratet mit Iryna Brzank geb. Lakhman Kinder – Laura Brzank</p>
1983-1991 1991-1995	<p>Schulbildung POS „Karl Liebknecht“ Barth Gymnasium Barth</p>
01.07.1995 – 30.06.1996	<p>Grundwehrdienst Panzerkompanie Panzerfahrer – Pzbt. 3/183 in Boostedt</p>
01.10.1996 – 14.08.2001 14. August 2001	<p>Studium Studium der Geodäsie an der TU Dresden Diplom-Ingenieur der Geodäsie Diplomarbeit „Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten“</p>
01.10.2001 – 30.11.2003 28. November 2003	<p>Referendariat Referendariat des Vermessungswesens beim Freistaat Sachsen Assessor des Vermessungsdienstes</p>
Seit 01.01.2004	<p>Beruflicher Werdegang Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität Hannover</p>

