

Integration von Informationen über Echoverteilung und Rückstreuintensitäten in den Filterprozess von Laserdaten

Von JENS GÖPFERT, UWE SÖRGEL, CHRISTIAN HEIPKE und ALEXANDER BRZANK

Zusammenfassung

Für viele Aufgaben des Küstenmanagements und des Küstenschutzes bilden digitale Geländemodelle (DGM) eine der wichtigsten Grundlagen. Sie werden beispielsweise zur Massenberechnung von Dünen und Deichen oder bei den Simulationen von Überflutungsszenarien genutzt. Eine immer häufiger verwendete effiziente Methode zur Generierung der Datenbasis für die DGM ist das Airborne Laserscanning (ALS), dessen Vorteile besonders in schwer zugänglichen Watt- und Inselbereichen zum Tragen kommen. Neben Effizienz und Wirtschaftlichkeit spielen insbesondere Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Messmethode speziell im sicherheitsrelevanten Küstenbereich eine entscheidende Rolle. Im Allgemeinen bietet ALS in vegetationslosem ebenem Gelände eine Höhengenaugigkeit von 15 cm. Wird der Laserstrahl jedoch von dichter Vegetation beeinflusst, sinkt das Genauigkeitspotential und die Zuverlässigkeit des Messverfahrens. Verschiedene Filteralgorithmen wurden entwickelt, um Vegetationspunkte aus den aufgenommenen Datensätzen zu entfernen. Diese nutzen aber zumeist ausschließlich geometrische Kriterien, beispielsweise Neigung oder Höhenunterschiede in einer definierten Nachbarschaft, zur Unterscheidung. In Gebieten mit dichter Vegetation und bewegtem Gelände, in denen nur ein geringer Prozentsatz der Laserpulse die Geländeoberfläche erreicht, versagen die zugehörigen Annahmen und die Filterung schlägt fehl. Dies führt zu einem positiven Höhenversatz in den Daten. In diesem Artikel werden zusätzliche Merkmale vorgeschlagen, welche mit den radiometrischen Eigenschaften der rückstreuenden Objekte verknüpft sind und den Filterprozess unterstützen können. Der vorgestellte neue Algorithmus verwendet die Intensitätswerte sowie die Verteilung der Mehrfachechos für eine adaptive Bestimmung der Gewichte innerhalb einer iterativen Flächenschätzung. Auf der Grundlage von Kontrollflächen, die sich in verschiedenen Arten von Küstendünengebüsch befinden, wird das Potential der Methode veranschaulicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration der zusätzlichen Merkmale die Differenzen zwischen der geschätzten Oberfläche und den Kontrollmessungen reduziert.

Summary

Accurate digital terrain models (DTM) are one of the most important requirements for many applications in coastal management and safety, such as the calculation of the volume of dunes and dikes for the purpose of coastal protection. Airborne LIDAR sensors provide dense height information of large areas in an efficient manner, therefore such data are appropriate to derive suitable DTM. Besides reasons of efficiency and economy, the accuracy and especially the reliability of the data are essential factors for the applicability in safety related domains. In case of moderate surface roughness in non-vegetated areas LIDAR DTM usually provide a standard deviation in height of less than 15 cm. However, the accuracy and reliability of the LIDAR DTM points suffer if the laser beam interacts with vegetation. Several filter algorithms were developed in order to eliminate the vegetation points in LIDAR data sets. Usually, they apply geometric criteria, for instance the slope in a defined neighbourhood, to solve this task. However, in areas of very dense vegetation and rough terrain, where only a few laser pulses are able to penetrate the canopy, such processing often fails resulting in an upward height shift of the derived DTM. In this paper additional features are proposed, which correspond to the reflectance characteristics of the backscattering objects, to support the filtering process. The introduced new algorithm uses intensity information and the distribution of multiple echoes for adaptive determination of the weights during an ite-

rative surface fitting. Based on several control areas located in different types of coastal shrubberies the potential of this method is demonstrated. The results show that the integration of the new features decreases the differences between the LIDAR based surface and the control measurements.

Keywords

Airborne Laserscanning, Vegetation, Digitale Geländemodelle, Filterung, LIDAR, Rückstreuintensitäten, Echoverteilung

Inhalt

1. Einführung	000
1.1 Motivation	000
1.2 Stand der Forschung	000
2. Neuer Filteralgorithmus	000
2.1 Vorüberlegungen	000
2.2 Neuer Filteransatz	000
3. Experimente	000
4. Bewertung und Ausblick	000
5. Danksagung	000
6. Schriftenverzeichnis	000

1. Einführung

1.1 Motivation

Heutzutage ist das luftgestützte Laserscanning eine der wichtigsten Techniken zur Generierung von großflächigen Höheninformationen und der daraus abgeleiteten digitalen Geländemodelle. Die Vorteile dieses berührungslosen Messverfahrens kommen besonders im Bereich der deutschen Nordseeküste zur Geltung, wo der Zugang für terrestrische Methoden aufgrund dichter Vegetation auf den Inseln und teilweise in den Vorlandbereichen, sowie des periodisch überfluteten Wattenmeeres eingeschränkt ist. Die Qualität des LIDAR (light detection and ranging) DGM hängt im Wesentlichen von dem verwendeten Sensor, den Befliegungsparametern (z.B. Flughöhe über Grund), der Nachbearbeitung der Daten (z.B. Streifenanpassung und Georeferenzierung) und der Topographie der abgetasteten Fläche ab. Bei geringer Geländeneigung in vegetationslosen Gebieten erreichen die mit Laserscanning bestimmten Punkthöhen üblicherweise Standardabweichungen von weniger als 15 cm. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des LIDAR DGM sinkt jedoch, wenn der Laserstrahl auf Vegetationsflächen trifft. Die Art der Vegetation sowie die Jahreszeit beeinflussen die Durchdringungsrate des Laserpulses. Niedrige Vegetation lässt sich häufig nicht vom darunter liegenden Boden trennen. Dies führt zu einem aus verschiedenen Reflexionen zusammengesetzten Signal, dessen Schwerpunkt sich oberhalb der eigentlichen Geländeoberfläche befindet. Folglich wird die Laufzeit des Laserpulses sowie die daraus abgeleitete Entfernung zum Sensor zu kurz bestimmt, was zu einem Höhenfehler für den jeweiligen Laserpunkt führt. Je nach Entfernungsauflösung können neuere Sensoren in höherer Vegetation für einen ausgesandten Puls Mehrfachechos aufzeichnen, die durch Reflexionen von Pflanzenteilen in ver-

schiedenen Höhen hervorgerufen werden. Viele Filteralgorithmen zur Entfernung von Vegetationspunkten in den Datensätzen stützen sich auf die Annahme, dass das letzte zurückgestreute Echo die Geländeoberfläche repräsentiert. Bei sehr dichter Vegetation werden jedoch auch diese Echos häufig von Rückstreuern, die sich vollständig in Vegetationsschichten befinden, erzeugt. Dies führt ebenfalls zur Messung einer zu kurzen Distanz zwischen Sensor und Boden sowie dementsprechend zu Laserpunkten, die oberhalb der eigentlichen Geländeoberfläche liegen (positiver Höhenversatz). Heutzutage angewandte automatische Filteralgorithmen nutzen häufig ausschließlich geometrische Kriterien, wie beispielsweise Höhendifferenzen und Neigungen, um die Vegetationspunkte zu detektieren (siehe Abschnitt 1.2 für Details). Die Funktionstüchtigkeit dieser Methoden setzt die Existenz einer ausreichenden Anzahl von Bodenpunkten voraus. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Untersuchungsgebiet an der deutschen Nordseeküste ist jedoch von vielfältiger dichter Vegetation, wie verschiedene Gebüschstrukturen, bedeckt, die nur eine geringe Durchdringungsrate der Laserstrahlen gestatten. Ein zusätzliches Problem bei der Filterung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Vegetation sich oft in kleinen Tälern befindet. Dadurch liegen die Vegetationspunkte manchmal sogar niedriger als die sie umgebenden Kämme. Diese Aspekte führen zu unbefriedigenden Ergebnissen herkömmlicher Filterverfahren. In diesem Artikel wird deshalb eine neue Methode vorgestellt, welche das Reflexionsverhalten der rückstreuenden Objekte berücksichtigt, um den Filterprozess zu unterstützen.

1.2 Stand der Forschung

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Landschaften wurden verschiedene Filtermethoden zur automatischen Separation von Boden- sowie Vegetations- und Gebäudepunkten entwickelt. Die Dissertation von SITHOLE (2005) bietet einen umfassenden Überblick über die existierenden Algorithmen, ihre Klassifizierung nach verschiedenen Kriterien, eine Beschreibung des ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Filtertests und ein Ansatz für eine neue Filtertechnik. Sithole unterschied die Filtermethoden bezüglich ihrer Datenstruktur, der berücksichtigten Nachbarschaften, des Maßes für Geländeunstetigkeiten, einfacher oder iterativer Verfahren, des zugrunde liegenden Filterkonzeptes und der Integration externen Wissens. Vier Hauptgruppen wurden entsprechend den folgenden Konzepten definiert:

- basierend auf Neigung (z.B. VOSELMANN, 2000; ROGGERO, 2001)
- Block Minimum (z.B. WACK and WIMMER, 2002)
- basierend auf Oberflächenrekonstruktion (z.B. KRAUS and PFEIFER, 1998)
- Clusterung/Segmentierung (z.B. BROVELLI, 2002).

Ein anderes Kriterium bewertet die Integration des Reflexionsverhaltens der rückstreuenden Objekte, wie beispielsweise Intensitäten oder die Verteilung von Mehrfachechos bei der Filterung. Unter allen Teilnehmern des ISPRS-Testes berücksichtigte jedoch nur BROVELLI (2002) die Differenzen zwischen erstem und letztem Echo im Filterprozess. Die mit den Laserpunkten abgespeicherten Intensitätswerte wurden dagegen bisher noch nicht in einem der getesteten Algorithmen verwendet. Einige Ansätze zur Klassifizierung von Objekten aus Laserscannerdaten nutzten allerdings den Informationsgehalt dieses Merkmals. MOFFIET et al. (2005) untersuchte beispielsweise Möglichkeiten anhand von unterschiedlichen Echos (erste, letzte und einzelne) sowie der zugehörigen Intensitätswerte Baumarten zu unterscheiden. Neben anderen Merkmalen verwendeten TÓVÁRI and VÖGTLE (2004) die Intensitäten, um Vegetation, Gebäude und Bodenpunkte zu klassifizieren. BRZANK et al.

(2008) entwickelten einen Algorithmus, der unter Berücksichtigung der Intensitäten Wasserflächen in Laserscannerdaten des Wattenmeeres detektiert.

Eine notwendige Voraussetzung für die Interpretation und Auswertung von Full-Waveform-Daten, die von den neuesten Scannern aufgezeichnet werden können, ist ein aussagekräftiges physikalisches Modell der komplexen Interaktion zwischen Laserstrahl und den rückstreuenden Objekten innerhalb des Strahlenkegels, die auch eine Ausdehnung in vertikaler Richtung besitzen können. Auf Grundlage der Radargleichung beschreibt JELALIAN (1992) die fundamentalen Zusammenhänge zwischen Emitter, dem reflektierenden Objekt und dem Empfänger für die Technologie des Laserscannings. Dabei werden die sensor- und objektabhängigen Parameter formal getrennt und ein objektbezogener Rückstreuquerschnitt wird definiert. WAGNER et al. (2006) veranschaulichen zusätzlich die Beziehungen zwischen den räumlichen Variationen des Rückstreuquerschnittes und der Amplitude sowie der Breite der reflektierten Echos. Diese theoretischen Überlegungen sollten im nächsten Schritt in praktische Anwendungen dieser Merkmale bei der Filterung und Klassifizierung münden.

Der Ansatz in diesem Artikel basiert hauptsächlich auf dem Verfahren der robusten Filterung, die in KRAUS und PFEIFER (1998) vorgestellt wurde. Dieser iterative Algorithmus verwendet die Lineare Prädiktion als Interpolationsmethode zur erstmaligen Oberflächenmodellierung. Die Verbesserungen der Laserpunkthöhen bezüglich der Oberfläche der vorangegangenen Iteration bestimmen die Gewichte für die nächste Ausgleichung unter Verwendung einer speziellen Transferfunktion (Formel 1). Niedrige Gewichte werden Punkten oberhalb der geschätzten Fläche (wahrscheinlich Vegetation) zugewiesen, während Punkte darunter (wahrscheinlich Boden) ein hohes Gewicht erhalten. Der Algorithmus wird beendet, wenn sich die Veränderung der unbekannt Parameter der Fläche unter einem vorher definierten Schwellwert befindet oder eine maximale Iterationsanzahl erreicht ist. Zum Schluss wird anhand eines Schwellwertes für die Verbesserungen der Laserpunkthöhen die Filterung durchgeführt.

$$(1) \quad p(r_i) = \begin{cases} 1 & \text{für } g < r_i \\ \frac{1}{1 + (a \cdot (g - r_i)^b)} & \text{für } g \geq r_i \end{cases}$$

mit

$p(r_i)$	Gewicht von Punkt i
a, b	Definition der Steilheit
r_i	Verbesserung von Punkt i
g	Verschiebung in Richtung von r_i

2. Neuer Filteralgorithmus

2.1 Vorüberlegungen

Der Ansatz, der in diesem Artikel beschrieben wird, wurde im Rahmen eines Projektes in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Behörden des Küstenmanagement und -schutzes erarbeitet. Ein wichtiges Ziel des Projektes bestand in der Analyse des Einflusses küstentypischer Vegetation (z.B. Sanddorn, Kartoffelrose) auf die Genauigkeit der Laserscannerdaten und der Entwicklung von Algorithmen zur automatischen Detektion und Beseitigung möglicher Fehler. Durch einen Vergleich umfangreicher terrestrischer Kontrollmessungen

mit den aufgenommenen Laserdaten konnten Problembereiche bezüglich der Genauigkeit erkannt und Zusammenhänge zwischen den auftretenden Höhenfehlern und den Eigenschaften der Vegetation, wie der Pflanzenart, -höhe und -dichte, hergestellt werden (GÖPFERT and HEIPKE, 2006). In einem weiteren Schritt wurden Merkmale aus den verfügbaren Fernerkundungsdaten (z.B. Streuung der Laserpunkthöhen, Intensität der Echos, Merkmale aus Multispektraldaten) extrahiert, welche die Vegetationseigenschaften in den Daten repräsentieren können und somit für eine Klassifizierung aussagekräftig sind. Zur Bestimmung der Signifikanz der Merkmale wurde die Korrelation zum auftretenden Höhenversatz der Laserpunkte in Vegetationsbereichen unter Verwendung der Kontrollmessungen ermittelt. Anschließend wurden die besten Merkmale zur Klassifizierung der Laserdaten in definierte Genauigkeitsbereiche. Die Intensitätswerte der Laserpunkte gehörten beispielsweise zu denjenigen Merkmalen, die eine signifikante negative Korrelation zum Höhenversatz aufwies.

Nachteilig wirkte sich bei diesem Ansatz jedoch aus, dass sich die Genauigkeitsklassen nicht als gut trennbare Clustern im Merkmalsraum abzeichneten, was aber eine wichtige Voraussetzung für solche Klassifizierungsverfahren ist. Wird nur eine spezielle Vegetationsart bei der Analyse berücksichtigt, zeigte der Höhenversatz statt einer clusterförmigen Ausprägung eine eher kontinuierliche Charakteristik. Das bedeutet, innerhalb des ermittelten Genauigkeitsbereiches für eine bestimmte Vegetationsart sind alle Fehlergrößen möglich, was hauptsächlich von der Dichte und Höhe der einzelnen Pflanzen abhängt. Deswegen wurde in einem zweiten Ansatz (GOEPFERT and SOERGEL, 2007) der Zusammenhang zwischen Merkmal und Höhenversatz der Laserpunkte anhand von kontinuierlichen Funktionen modelliert. Diese Funktionen wurden in Trainingsgebieten geschätzt, für die der Höhenversatz aus Kontrollmessungen bestimmbar war. Mittels der Parameter der ausgeglichenen Funktionen und der extrahierten Merkmale für jeden Laserpunkt konnte im Anschluss der Höhenversatz in anderen Regionen mit ähnlicher Vegetation geschätzt werden.

Ein anderer Vorteil verglichen mit der ersten Methode ergibt sich aus der Berechnung der Merkmale auf Basis der unregelmäßigen Punktwolke, so dass die Signifikanz der Merkmale nicht durch zusätzliche Interpolationseffekte beeinträchtigt wird. Abbildung 1 veranschaulicht zwei Beispiele für die modellierten Zusammenhänge zwischen Intensitätswerten und Höhenversatz für Trainingsgebiete mit unterschiedlicher Größe.

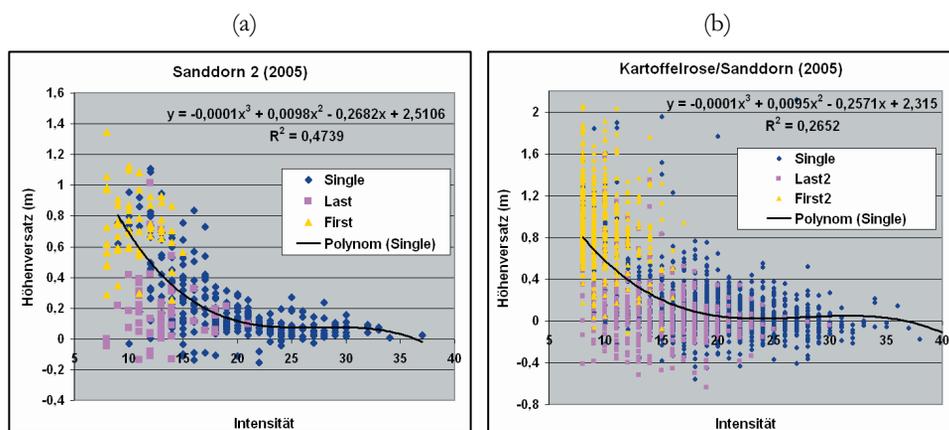


Abb. 1: Abhängigkeit zwischen Intensitätswerten und Höhenversatz für Single- und Mehrfachechos für zwei Testgebiete unterschiedlicher Größe: a) 297 Singleechos, b) 1183 Singleechos (Riegl-Scanner LMS-Q560)

Allerdings hat auch der zweite Ansatz noch einige Nachteile. Auf der einen Seite sind vielfältige aufwendige Kontrollmessungen für die Trainingsgebiete notwendig, um robuste Funktionen schätzen zu können und die Übertragbarkeit auf andere Regionen zu garantieren. Auf der anderen Seite steigen die Verbesserungen für die geschätzten Funktionen mit größeren und deshalb inhomogeneren Trainingsgebieten und die Aussagekraft der Merkmale sinkt (Abbildung 1).

Infolge der größeren Inhomogenität in der Verteilung der Vegetationshöhen und -dichten, verringert sich auch die Signifikanz der Intensitätswerte. Abbildung 2 veranschaulicht diesen Zusammenhang genauer. Wenn die Vegetationshöhen im Trainingsgebiet stark variieren, können sich ähnliche Rückstreuquerschnitte und folglich ähnliche Intensitätswerte für Echos in sehr unterschiedlichen Höhen über dem Boden ergeben. Deshalb hängt die Verwendbarkeit der Intensitätswerte von der Ausdehnung der betrachteten Nachbarschaft ab. So müssen die Trainingsgebiete im zweiten Ansatz klein genug bezüglich der Homogenität ihrer Vegetation und groß genug im Hinblick auf eine robuste Schätzung der Funktionen sein. Darüber hinaus erschwert die Tatsache, dass die Vegetation häufig in kleinen Tälern zu finden ist und deshalb ähnliche Rückstreuquerschnitte, die zwar zu Laserechos mit unterschiedlichen Höhenfehlern gehören, sich aber in der gleichen absoluten Höhe befinden, die Interpretation der Intensitätswerte für größere Trainingsgebiete mit erheblicher Variation der Geländehöhen und Vegetation noch zusätzlich (Abbildung 2).

Weitere Aussagen über die Verteilung der Intensitätswerte lassen sich aus der Analyse der Abbildung 1 ableiten, die für das Design eines neuen Filteralgorithmus wichtig sind. Dabei wird von einem Singleecho gesprochen, wenn für einen ausgesandten Laserimpuls nur ein Echo stark genug ist, um im Scanner aufgezeichnet zu werden. Bei einem komplexeren reflektierten Signal mit mehreren signifikanten Echos kennzeichnet das erste oder Firstecho diejenigen Rückstreuer (z.B. die Baumkrone), die dem Scanner am nächsten sind, während das letzte oder Lastecho (z.B. niedrige Äste oder der Boden) die am weitesten entfernten Rückstreuer repräsentiert.

- Je höher sich ein Singleecho in der Vegetation befindet, desto kleiner werden die zugehörigen Intensitätswerte.
- Es existieren Singleechos mit Intensitätswerten und Höhenfehlern, die auch für die ersten Echos (von mehreren) zu beobachten sind.
- Aufgrund des Energieverlustes durch vorangegangene Rückstreuer, deren Echostärke oberhalb des Schwellwertes des Scanners liegt, ist die durchschnittliche Intensität des letzten Echos (von mehreren) eines Laserpulses kleiner als der gleiche Wert für ein ungestörtes Singleecho am Boden (Abschattungseffekte).
- Die Intensitätswerte der letzten Echos (von mehreren) variieren in Abhängigkeit vom zugehörigen Rückstreuquerschnitt und der Stärke vorangegangener Rückstreuer. Weil diese Einflussfaktoren nur schwer zu trennen sind, ist der Intensitätswert der letzten Echos für die Filterung weniger nützlich.

Neben den Ergebnissen der Datenanalyse unterstützen theoretische Überlegungen die Verwendung der Intensität im Filterprozess. Obwohl die Intensitätswerte der Laserechos durch die Firmen auf unterschiedliche Art und Weise abgeleitet werden, sind sie doch in jedem Fall eine Funktion der Amplitude des zurück gestreuten Signals, die von der räumlichen Variation des Rückstreuquerschnittes abhängt (WAGNER et al., 2006). Der Reflexionsgrad, das Streuverhalten und die wirksame Fläche der reflektierenden Objekte werden im Konzept des Rückstreuquerschnitts zusammengefasst, um die Eigenschaften von Punktstreuern zu modellieren. Für in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahles ausgedehnte Objekte wurde ein so genannter differentieller Rückstreuquerschnitt eingeführt. Nach diesem Konzept beinhal-

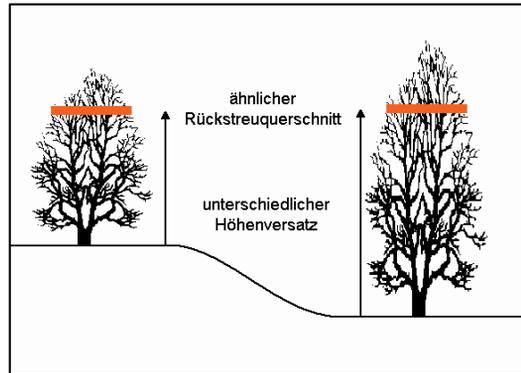


Abb. 2: Die Korrelation zwischen Intensitätswerten (und den zugehörigen Rückstreuquerschnitten) und dem Höhenversatz hängt stark von der Homogenität der Verteilung der Vegetationshöhe und -dichte im Testgebiet ab

ten sowohl Amplitude als auch die von ihr abgeleitete Intensität wichtige Informationen über die Charakteristik von Teilen komplexer Objekte, wie beispielsweise die Struktur einer Pflanze, und somit über die Vegetationsdichte. Im Ausgangsfall eines vertikal einfallenden Laserstrahles mit gleichmäßiger Energieverteilung besitzt demnach eine ebene Geländeoberfläche einen homogenen Rückstreuquerschnitt (runder Messfleck) sowie ein schmales Echosignal mit großer Amplitude, während für ein gemischtes Signal mit Anteilen von Reflexionen am Boden und in niedriger Vegetation die Pulsbreite aufgeweitet und die Amplitude abgeschwächt ist. Bei der Analyse von Gebüschstrukturen in der vegetationslosen Phase wird deutlich, dass je höher das Echo sich in der Vegetation befindet, desto dünner die Äste und Zweige werden, die zum potentiellen Rückstreuquerschnitt beitragen können. Deshalb verringert sich auch in der Theorie die Amplitude des Echosignals und folglich die zugehörigen Intensitätswerte für Laserpunkte in den oberen Bereichen der Vegetation. Diese Aussage deckt sich somit mit den Erkenntnissen der Datenanalyse im vorigen Abschnitt.

2.2 Neuer Filteransatz

Während in den vorherigen Ansätzen die Intensitätswerte direkt in die Berechnung des Höhenversatzes einfließen, werden sie im neuen Algorithmus zur Bestimmung der Gewichte in einer iterativen Flächenschätzung verwendet*. Verschiedene Erwägungen unterstützen diese mittelbare Integration der Intensitätswerte in den Filterprozess. So könnte beispielsweise bei einer aus den Daten abgeleiteten hohen Gewichtung der Intensitätswerte im zweiten Ansatz die sich aus den Laserpunkten ergebende Oberfläche stark von den Höhenwerten abweichen, da die Intensität direkt an der Berechnung der Höhenverbesserungen beteiligt ist. Um diesen Effekt zu vermeiden sind die Laserhöhen die einzigen Beobachtungen bei der Flächenschätzung des neuen Algorithmus, während die Intensitätswerte an der Bestimmung der jeweiligen Gewichte mitwirken. Ein anderes Argument bezieht sich auf die Theorie der

* Das grundlegende Konzept der robusten Filterung findet sich in KRAUS and PFEIFER (1998).

Ausgleichsrechnung. Die Gewichte werden normalerweise aus den a priori-Standardabweichungen der zugehörigen Beobachtungen (in diesem Falle die Laserhöhen) abgeleitet. Je breiter das Echosignal der Lasermessung und je geringer die Trennbarkeit der jeweiligen Amplitude vom Rauschen wird, desto unsicherer wird die Ermittlung der exakten Position des Echos im Signal. Deshalb deutet eine geringere Intensität auf eine größere Standardabweichung bei der Entfernungsbestimmung hin und ein kleineres Gewicht sollte eingesetzt werden.

Im neuen Verfahren wird eine iterative Oberflächenschätzung in einer lokalen Nachbarschaft durchgeführt, welche im aktuell bearbeiteten Single- oder Lastecho zentriert ist. Die Methode beginnt mit einer lokalen Schätzung einer Fläche erster oder zweiter Ordnung mit gleich gewichteten Beobachtungen (Beobachtungsgleichungen in Formel 2) aus einem Flugstreifen in einem über den Datensatz zu verschiebenden Fenster (gelber Kreis in Abbildung 4a) als Näherungslösung.

$$(2) \quad r_i = f(\hat{a}, x_i, y_i) - z_i$$

mit

r_i	Verbesserung für Punkt i
\hat{a}	Vektor der Unbekannten (Parameter der Fläche)
x_i, y_i	Koordinaten von Punkt i
z_i	Beobachtung für Punkt i

Die resultierenden Verbesserungen werden im Anschluss analysiert, um die Gewichte der Beobachtungen für die nächste Iteration zu aktualisieren. Die Gewichte setzen sich aus zwei Anteilen zusammen. Formel 1 überführt die Verbesserungen direkt in die erste Komponente des Gewichtes $p(r_i)$. Dabei wird angenommen, dass die Laserpunkte unterhalb der geschätzten Fläche zum Boden und die Punkte oberhalb der Fläche tendenziell zur Vegetation gehören. Der zweite Anteil des Gewichtes $p(l_i)$ wird aus der Analyse der Intensitätswerte für die Singleechos und der räumlichen Echoerteilung für die Lastechos berechnet. Zu diesem Zweck werden zwei lineare Übertragungsfunktionen definiert:

1. Wenn mindestens drei Firstechos in der betrachteten Nachbarschaft vorhanden sind, wird dem Mittelwert ihrer Intensitäten ein Gewicht von 0,2 zugewiesen, so dass sich ein Stützpunkt der Intensitätsübertragungsfunktion ergibt (Bezug: Aussage 2 in Abschnitt 2.1). Anderenfalls erhält der Mittelwert derjenigen Singleechos das Gewicht 0,4, welche die größten negativen Verbesserungen besitzen (wahrscheinlich Vegetation – Aussage 1). Diese empirischen Werte berücksichtigen, dass die Firstechos mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zur Vegetation gehören. Der zweite Punkt der Übertragungsfunktion wird durch den Mittelwert der Intensitäten der Singleechos mit den größten positiven Verbesserungen (wahrscheinlich Boden – Aussage 1) festgelegt. Dieser Stützpunkt erhält das Gewicht 1. Gemäß der Aussage 3 im Abschnitt 2.1 gehen in diesem Teil des Algorithmus nur die Intensitätswerte der Single- und Firstechos ein. Die lineare Intensitätsübertragungsfunktion (Abbildung 3) wird auf Werte zwischen 0 und 1 begrenzt und in Abhängigkeit von den Verbesserungen nach jeder Iteration aktualisiert.
2. Wie in der Aussage 4 erörtert wurde, sind die Intensitätswerte der Lastechos weniger aussagekräftig. Deshalb wird ihre zweite Gewichtskomponente im Ausgleichsprozess über die Höhendifferenzen zu den zugehörigen Firstechos definiert. Dieses Konzept stützt sich auf die Annahme, dass eine größere Differenz die Wahrchein-

lichkeit für das jeweilige Lastecho erhöht, ein Bodenpunkt zu sein. Die Echoverteilungsübertragungsfunktion wird durch die Echos mit der größten Höhendifferenz (Gewicht 1) für die aktuelle Fensterposition und einer fiktive Differenz von 0m (Gewicht 0,2) festgelegt.

Um das Gesamtgewicht für die Laserpunkte zu berechnen, werden die beiden Komponenten miteinander multipliziert (Formel 3). In jeder Iteration werden die Gewichte entsprechend den genannten Regeln aktualisiert. Der Prozess wird nach einer vorgegebenen maximalen Iterationsanzahl beendet. Abschließend wird die Verbesserung des zentralen Laserpunktes abgespeichert und das Fenster wird zum nächsten Last- oder Singleecho in der Datei verschoben. Nach der Bearbeitung aller Laserpunkte in der Datei wird die eigentliche Filterung durchgeführt, indem die gespeicherten Verbesserungen mit einem vorher definierten Schwellwert verglichen werden.

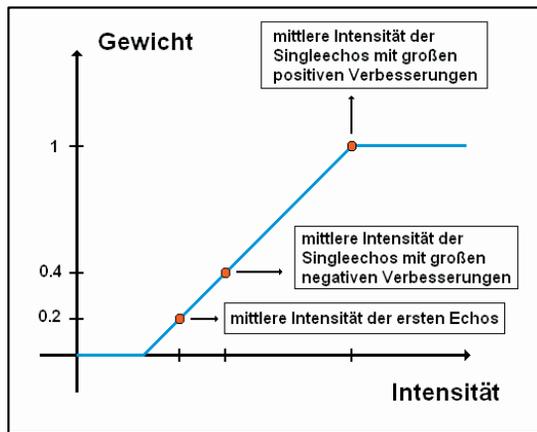


Abb. 3: Festlegung einer Gewichtskomponente unter Verwendung der Intensitätswerte und der Verbesserungen der vorangegangenen Iteration

$$(3) \quad p_i = p(r_i) \cdot p(I_i)$$

mit

p_i Gesamtgewicht von Punkt i

$p(r_i)$ Gewichtskomponente von Punkt i auf der Basis der Verbesserungen

$p(I_i)$ Gewichtskomponente von Punkt i auf der Basis der Intensitätswerte und der Echoverteilung.

Aufgrund der starken Abhängigkeit der Intensitätswerte von den Eigenschaften der verschiedenen Laserscanner, wie beispielsweise die zeitliche Pulsstabilität oder die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Intensitäten, wird ihre Verwendbarkeit für jede Iteration und Fensterposition entsprechend der Aussage 1 in Abschnitt 2.1 geprüft. Wenn die Singleechos oberhalb der geschätzten Fläche eine kleinere Intensität aufweisen als die Punkte unterhalb, stimmen die Daten mit dem theoretischen Modell überein und die Intensitätswerte werden im Filterprozess berücksichtigt. Anderenfalls wird nur die erste Komponente des Gewichts, die direkt aus den Verbesserungen abgeleitet wurde, verwendet. Die Information „Intensität genutzt“ in den folgenden Experimenten bezieht sich auf diesen Test.

3. Experimente

Die Experimente basieren auf drei Flugmissionen und einer Vielzahl von Trainingsflächen, die mittels Tachymeter und GPS-Techniken aufgenommen wurden. Die Daten der ersten Mission, die vor allem die Ostfriesische Insel Juist abdecken, wurden im März 2004 während einer Messkampagne der Firma TopScan mit dem ALTM 2050-Scanner von Optech erhoben. Die Flughöhe betrug 1000 m und das eingesetzte System gewährleistete eine Punktdichte von 2 Punkten pro m². Der Hauptteil der Untersuchungen wurde mit Hilfe von Laserdaten ausgeführt, welche von der Milan Flug GmbH aufgenommen wurden und die Region der Ostfriesischen Insel Langeoog während der vegetationslosen Periode (April 2005 und 2006) beinhalten. Während dieser Messkampagnen wurde ein LMS-Q560-System der Firma Riegl eingesetzt. Bei einer Flughöhe von 600 m erreichte das System Punktdichten von rund 3 Punkten pro m². Die Kontrollflächen beinhalten verschiedene Populationen von Küstendünengebüschen, wie Kartoffelrose, Sanddorn und Kriechweide. Eine detaillierte Beschreibung der Referenzdaten findet sich in GÖPFERT and HEIPKE (2006).

Die Experimente in diesem Abschnitt konzentrieren sich auf die Verifikation des Vorteils, der bei der Integration von Intensitätswerten und Echoverteilung im Filterprozess entsteht. Die zwei ersten Tests sollen den Einfluss der Fenstergröße (der betrachteten Nachbarschaft) sowie der Iterationsanzahl auf die Genauigkeit der Oberflächenrekonstruktion mit Hilfe von Kontrollmessungen im Trainingsgebiet „Weide 2“ in Flugstreifen 1 der Befliegung „Langeoog 2005“ quantifizieren. Zusätzlich werden dabei geeignete Werte für diese beiden Parameter für die folgenden Untersuchungen festgelegt. Die Parameter a und b der Funktion für die robuste Filterung (Formel 1) wurden dabei auf 1,5 und 2 gesetzt, während für g der Wert 0 für die folgenden Tests zugewiesen wurde.

Im ersten Experiment wurde die Oberflächenschätzung mittels einer Ebene in drei Iterationen (entsprechend den Ergebnissen in Tabelle 2) unter Verwendung von Nachbarschaften verschiedener Größe (Tabelle 1) durchgeführt. Wenn die Größe des Fensters erweitert wird, steigen auch der Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Kontrollmessungen und der geschätzten Fläche. Für einen größeren Bereich ist die ausgeglichene Ebene demnach nicht mehr in der Lage, die wahre Geländeoberfläche mit ausreichender Genauigkeit zu modellieren. Als einen geeigneten Kompromiss aufgrund der folgenden Überlegungen wird der Radius des Fensters für weitere Analysen auf 2,5 m begrenzt. Auf der einen Seite wird ein relativ großer Wert gewählt, um eine minimale Punktanzahl im Fenster für die Flächenschätzung sowie für die Trennung von Boden und Vegetation auf der Grundlage der Verbesserungen zu gewährleisten. Eine erfolgreiche Unterscheidung ist sowohl für die robuste Filterung als auch für die Bestimmung der Intensitätsübertragungsfunktion notwendig. Ein für diese Trennbarkeit geeigneter Radius hängt von der Durchdringungsrate der Laserstrahlen in der jeweiligen Vegetation ab. Außerdem sollten genügend Laserpunkte im betrachteten Fenster existieren, die Aussage 1 aus Abschnitt 2.1 erfüllen, um die Eignung der Intensitätswerte für den Algorithmus bewerten zu können. Der höhere Prozentsatz in der Spalte „Intensität genutzt“ in Tabelle 1 für größere Nachbarschaften unterstützt diese Überlegungen. Auf der anderen Seite verringert ein großer Radius die Genauigkeit der geschätzten Oberfläche und die Qualität der bestimmten Übertragungsfunktionen, da in einem größeren Fenster die Vegetation inhomogener in ihrer Ausprägung ist und die Zusammenhänge somit schwerer zu modellieren sind (siehe auch Abbildungen 1 und 2).

Tab. 1: Einfluss der Größe der definierten Nachbarschaft auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen Kontrollmessungen und geschätzter Oberfläche, durchschnittliche Anzahl von Punkten im Fenster und Prozentsatz der Fensterpositionen mit verwendeter Intensität (Kontrollfläche „Weide 2“ in Flugstreifen 1 „Langeoog 2005“)

Radius (m)	Mittelwert (cm)	Standardabweichung (cm)	Punktanzahl	Fenster mit genutzter Intensität (%)
1,5	5,12	7,70	24	73,7
2,0	5,33	7,98	42	77,7
2,5	5,41	9,08	63	81,2
3,0	5,68	10,85	92	84,5
5,0	7,83	19,20	250	95,1

Tab. 2: Einfluss der Iterationsanzahl auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen Kontrollmessungen und geschätzter Oberfläche (Kontrollfläche „Weide 2“ in Flugstreifen 1 „Langeoog 2005“)

	Anzahl der Iterationen				
	1	2	3	5	10
Mittelwert (cm)	7,021	5,479	5,413	5,408	5,408
Standardabweichung (cm)	10,375	9,146	9,078	9,073	9,073

Tabelle 2 visualisiert den Einfluss der Iterationsanzahl auf die Genauigkeit des Algorithmus. Offensichtlich verringern sich sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Kontrollmessungen und der geschätzten Oberfläche kontinuierlich und eine stabile Lösung ergibt sich nach wenigen Iterationen, was die Anwendbarkeit der Methode hinterlegt. In den weiteren Analysen werden 3 Iterationen verwendet.

Der Prozentsatz der Laserpunkte, in deren Umgebung die Intensitätswerte den Verbesserungen hinsichtlich der Theoretischen Überlegungen (Aussage 1 in Abschnitt 2.1) entsprechen, beträgt über 90 % für die meisten der Kontrollflächen, welche sich in Bereichen von verschiedenen Küstendünengebüsch befinden (Tabelle 3). Ein niedriger Prozentsatz kann für einige Flächen mit geringerer Punktdichte beobachtet werden. Dieses Ergebnis bestätigt die Anfangsexperimente mit verschiedenen Fenstergrößen und somit auch variierender Punktanzahl (Tabelle 1). Eine mögliche andere Erklärung dieses Phänomens berücksichtigt die Lage der Kontrollflächen im Flugstreifen. Die zwei Testgebiete „Weide 2“ und „Rose 2“ befinden sich am Rand des Flugstreifens 2 der Messkampagne 2005. Aufgrund des größeren Einfallswinkels der Laserstrahlen im Vergleich zum Nadirblick sind die Durchdringungsrate und die Variationen des Rückstreuquerschnittes kleiner. Deshalb könnte die Signifikanz der Intensitätswerte am Rande der Flugstreifen etwas geringer ausfallen. Die größere Standardabweichung für diese Kontrollflächen unterstützt diese These.

Die Anwendbarkeit der Informationen über die Reflexionscharakteristik beschränkt sich auf Flächen mit Küstendünengebüsch (Abbildung 4). Während Punkte, für deren Nach-

Tab. 3: Informationen zu den verschiedenen Kontrollflächen: Gesamtanzahl der Laserpunkte, Prozentsatz der Fensterpositionen mit verwendeter Intensität für Flächen erster und zweiter Ordnung, Anzahl der Laserpunkte in der Nachbarschaft ($r = 2,5$ m)

Testgebiet (Scanner-Flughöhe)	Anzahl Laserpunkte	Intensität genutzt-Ebene (%)	Intensität genutzt- Fläche 2. Ord. (%)	Anzahl Punkte im Fenster ($r = 2,5$ m)
Juist 2004 (ALTM 2050–1000 m)				
Rose/Weide	4046	89,7	88,7	48
Langeoog 2005 (LMS-Q560–600 m)				
Rose/Sanddorn (Streifen 1)	3015	99,8	99,8	63
Rose/Weide (Streifen 1)	497	99,4	99,3	57
Sanddorn 1 (Streifen 1)	820	99,1	99,8	67
Sanddorn 2 (Streifen 1)	574	91,6	92,5	60
Rose 1 (Streifen 1)	736	96,5	98,5	57
Rose 2 (Streifen 1)	450	91,8	90,7	62
Rose 2 (Streifen 2)	265	89,8	89,8	37
Weide 1 (Streifen 1)	419	93,1	93,1	68
Weide 2 (Streifen 1)	453	81,2	83,7	63
Weide 2 (Streifen 2)	260	77,3	83,1	37
Strandhafer (Streifen 1)	705	87,2	86,5	59
Langeoog 2006 (LMS-Q560–600 m)				
Sanddorn 1 (Streifen 11)	522	94,8	97,5	42
Sanddorn 2 (Streifen 11)	302	74,2	77,8	31
Sanddorn 2 (Streifen 12)	199	80,9	91,0	21

barschaft die Intensitätswerte berücksichtigt werden, spärlich und zufällig in Gebieten mit Heide und Wiesen verteilt liegen, wird diese Information für die Oberflächenschätzung in der Testfläche „Sanddorn 2“ (grüne Punkte in Abbildung 4a) und in der Gebüschregion auf der linken Seite des Bildausschnittes (siehe Biotoptypenkartierung in Abbildung 4b) fast für jede Fensterposition integriert. Aufgrund der geringen Vegetationshöhe und anderer Rückstreueigenschaften für Wiesenflächen und Heide ist die Signifikanz der Intensitätswerte gering. Dies zeigt jedoch auch den Nutzen der Intensität als ein Merkmal unter anderen zum Zwecke der Artenunterscheidung in einer Klassifizierung.

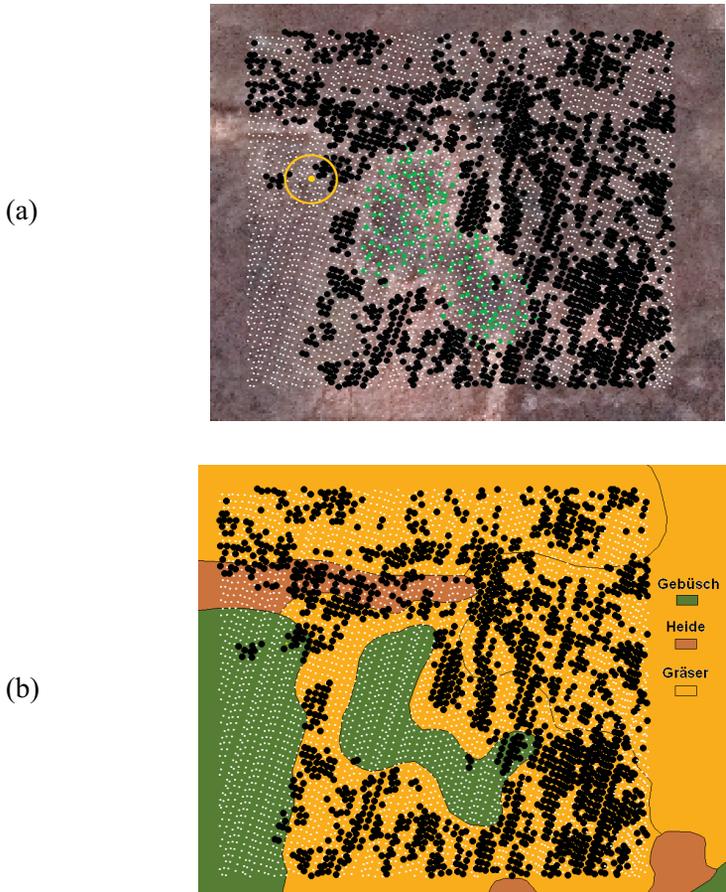


Abb. 4: Wenn die Verteilung der Intensitätswerte und der zugehörigen Verbesserungen mit der Theorie im betrachteten Fenster (gelber Kreis in (a) – Radius 2,5 m) übereinstimmt, wird die Intensität für die Filterung verwendet (kleine weiße Punkte), anderenfalls nicht (schwarze Punkte). Die grünen Punkte in (a) kennzeichnen die Kontrollmessungen für ein Habitat mit Sanddorn. Hintergrund: (a) Orthophoto, (b) Biotypenkartierung

Tabelle 4 fasst den Mittelwert und die Standardabweichungen der Differenzen zwischen Kontrollmessungen und der geschätzten Oberfläche für alle Testgebiete und Flugkampagnen mit unterschiedlichen Methoden zusammen. Im Vergleich zur Näherungslösung mit gleich gewichteten Beobachtungen (erste und zweite Datenspalte) wird durch den iterativen Prozess bei der robusten Filterung (dritte und vierte Datenspalte) die geschätzte Fläche in jedem Testgebiet durch niedriger liegende Laserpunkte bezüglich der Kontrollmessungen gelegt. Die Integration der Rückstreuinformationen verstärkt für jede untersuchte Fläche diesen Effekt. Zusätzlich wird auch die Standardabweichung für zwei Drittel der Testgebiete durch die Verwendung der auf den Intensitätswerten beruhenden Gewichte verringert.

Die Unterschiede der mittleren Differenzen zwischen den verschiedenen Testgebieten scheinen zu einem großen Teil von ihrer Lage im jeweiligen Flugstreifen abzuhängen. Infolge von Ungenauigkeiten bei der Nachbearbeitung der Laserscannerrohdaten (schlecht verteilte Kontrollmessungen im Wattbereich aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit) sind die Flug-

Tab. 4: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen der geschätzten und der wahren Oberfläche (Kontrollmessungen) für die Näherungslösung (eine Iteration), Robuste Filterung und Robuste Filterung mit Intensitätsinformationen

Testgebiet (Scanner-Flughöhe)	Ebene (cm)					
	Initial		Robust		Robust + Int	
	Mittelwert	σ	Mittelwert	σ	Mittelwert	σ
Juist 2004 (ALTM 2050–1000 m)						
Rose/Weide	53,9	58,2	50,8	56,6	43,7	52,4
Langeoog 2005 (LMS-Q560–600 m)						
Rose/Sanddorn (Streifen 1)	15,0	17,4	12,7	16,6	11,0	16,4
Rose/Weide (Streifen 1)	20,6	7,4	19,6	7,2	18,1	7,1
Sanddorn 1 (Streifen 1)	15,0	12,5	14,3	12,3	12,7	11,9
Sanddorn 2 (Streifen 1)	16,5	11,1	15,7	10,5	13,9	9,3
Rose 1 (Streifen 1)	7,8	8,3	7,3	8,2	6,4	8,2
Rose 2 (Streifen 1)	6,5	4,2	6,3	4,1	5,5	4,2
Rose 2 (Streifen 2)	-2,4	5,4	-2,5	5,4	-3,7	5,6
Weide 1 (Streifen 1)	12,6	6,0	12,3	6,0	10,8	5,9
Weide 2 (Streifen 1)	7,0	10,4	6,4	9,8	5,4	9,1
Weide 2 (Streifen 2)	4,8	12,2	4,1	11,9	3,2	12,6
Strandhafer (Streifen 1)	13,8	20,6	13,7	20,6	12,8	20,7
Langeoog 2006 (LMS-Q560–600 m)						
Sanddorn 1 (Streifen 11)	2,1	11,1	0,9	11,0	-1,3	10,7
Sanddorn 2 (Streifen 11)	-1,9	10,5	-2,9	9,7	-5,5	8,0
Sanddorn 2 (Streifen 12)	-1,4	10,2	-2,3	9,5	-4,8	9,0

streifen etwas verkippt. Dieser Aspekt führt zu einem systematischen Offset in Abhängigkeit zur Position im Flugstreifen. Aufgrund der geringen Ausdehnung der Kontrollflächen (durchschnittlich 20 m × 20 m) sollte dieser Umstand den Vergleich der verschiedenen Methoden hinsichtlich eines Testgebietes aber nur gering beeinflussen.

Wenn die Oberflächenrauheit steigt, verbessert die Verwendung einer Fläche zweiter Ordnung die Ergebnisse etwas. Der Trend ist jedoch ähnlich wie bei der Nutzung einer Ebene. Im Projekt wurden weiterhin Schilfflächen untersucht. Für Sommerbefliegungen ist die Durchdringungsrate der Laserpulse ähnlich gering wie bei den analysierten Gebüschstrukturen auf den Inseln, so dass fast gar keine Bodenpunkte in den Daten vorhanden sind. Dies führt bei größerer Ausdehnung der jeweiligen Vegetationsfläche zum generellen Versa-

gen der Filteralgorithmen, so dass von Befliegungen in der Vegetationsperiode abzuraten ist, wenn man ein DGM erzeugen will. Bei Befliegungen im Frühjahr ist die Durchdringung der Laserpulse für stehende trockene Schilfgebiete gut und eine Abhängigkeit der Intensitätswerte von der Höhe des zugehörigen Echos über der Geländeoberfläche ist ebenfalls zu beobachten. Damit sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Filterung gegeben. Bei durch Wind oder andere Kräfte niedergelegten Schilfschichten erreichen die Laserpulse die Geländeoberfläche in der Regel nicht und für die Filterung fehlen in diesen Bereichen die Informationen über die wahre Geländeoberfläche.

4. Bewertung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein modifizierter Filteralgorithmus vorgestellt, der die Intensitätswerte und die Echoverteilung in der Laserpunktwolke in Gewichte für eine lokale iterative Flächenschätzung überführt. Die Methode wurde anhand verschiedener Testgebiete mit küstentypischen Gebüschstrukturen während der laubfreien Jahreszeit untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration der Rückstreuinformationen die geschätzte Oberfläche für jede Testfläche zu den niedrigsten Laserpunkten bezüglich der Kontrollmessungen zieht. Des Weiteren verringert der neue Algorithmus die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Kontrollmessungen und der geschätzten Oberfläche in Bezug zur robusten Filterung für zwei Drittel der Testflächen.

Die Punkte für die Intensitätstransferfunktion wurden jedoch hier nur empirisch ermittelt. In zukünftigen Ansätzen sollte die Trennbarkeit der Intensitätswerte der höchsten und niedrigsten Echos bezüglich der geschätzten Oberfläche anhand statistischer Tests analysiert werden. Die Signifikanz dieses Merkmals kann dann weiter genutzt werden, um über eine Integration dieser Information zu entscheiden und die Übertragungsfunktion festzulegen.

Für weiterführende Arbeiten können Fortschritte in der Technik der Laserscanner, die eine Aufzeichnung des gesamten zurück gestreuten Signals (so genannte Full-Waveform-Scanner) ermöglichen, zusätzliche aussagekräftige Merkmale liefern. So ist beispielsweise die Signalbreite des Echos ein Qualitätskriterium für sich. Es beschreibt die Unsicherheit der Objektoberfläche und der Entfernungsmessung des zugehörigen Echos und kann deshalb ebenso leicht für die Bestimmung der Gewichte in den Filterprozess integriert werden.

Die vielversprechenden Untersuchungsergebnisse in diesem Artikel sollten dazu ermutigen, ihre Übertragbarkeit auf andere Vegetationsarten zu analysieren. So könnte beispielsweise die Annahme, dass je höher sich die Laserechos in der Vegetation befinden, desto kleiner werden der zugehörige Rückstreuquerschnitt und die Intensitätswerte, auch für laubfreie Bäume gelten, da unter anderem der Rückstreuquerschnitt durch den Durchmesser der reflektierenden Äste beeinflusst wird.

5. Danksagung

Diese Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projektnummer 03KIS050 gefördert. Zusätzlich bedanken wir uns bei unseren Projektpartnern: dem Amt für ländliche Räume Husum (ALR), der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Norden-Norderney (NLWKN) für die fachliche und infrastrukturelle Unterstützung.

6. Schriftenverzeichnis

- BROVELLI, M.; CANNATA, M. and LONGONI, U.: Managing and processing lidar data within GRASS. In Proceedings of the Open Source GIS-GRASS users conference, Trento, Italy, 2002.
- BRZANK, A.; HEIPKE, C.; GOEPFERT, J. and SOERGEL, U.: Aspects of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar – water classification and structure line extraction. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63, Nr. 5, 2008.
- GÖPFERT, J. and HEIPKE, C.: Assessment of Lidar DTM Accuracy in Coastal Vegetated Areas: In Int. Arch. of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI/3, Bonn, Germany, 2006.
- GOEPFERT, J. and SOERGEL, U.: Estimation of the lidar height offset in coastal vegetated areas. In Int. Arch. of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI/3, Espoo, Finland, 2007.
- JELALIAN, A. V.: Laser Radar Systems. Artech House, Boston and London, 1992.
- KRAUS, K. and PFEIFER, N.: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53 (4), 1998.
- MOFFIET, T.; MENGERTSON, K.; WITTE, C.; KING, R. and DENHAM, R.: Airborne laser scanning: Exploratory data analysis indicates variables for classification of individual trees or forest stands according to species. In ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 59 (2005), 2005.
- ROGGERO, M.: Airborne laser scanning: Clustering in raw data. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV Part 3/W4, Annapolis, USA, 2001.
- SITHOLE, G.: Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data, Dissertation, TU Delft, Netherlands, 2005.
- SITHOLE, G. and VOSSSELMAN, G.: Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 59 (1–2), 2004.
- TÓVÁRI, D. and VÖGTLE, T.: Object Classification in Laser-Scanning Data. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI, Part 8/W2, 2004.
- VOSSSELMAN, G.: Slope based filtering of laser altimetry data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII Part 3B, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- WACK, R. and WIMMER, A.: Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV Part 3B, Graz, Austria, 2002.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; DUCIC, V.; MELZER, T. and STUDNICKA, N.: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. In ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 60, 2006.