

# STEIGERUNG DER GENAUIGKEIT VON DIGITALEN GELÄNDEMOTELLEN IM KÜSTENBEREICH AUS LASERSCANNERMESSUNGEN

**ALEXANDER BRZANK, PETER LOHMANN**

Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover

## **Abstract:**

Digitale Geländemodelle, abgeleitet aus Laserscannermessungen, werden seit mehreren Jahren durch zuständige Landes- und Bundesbehörden als wertvolle Geoinformation zur Erfüllung der hoheitlichen Aufgaben verwendet. Dabei müssen Wasser- und Nichtwasserbereiche voneinander getrennt werden, da die Wasseroberfläche, welche der Laserpuls in der Regel nicht durchdringt, nicht der gesuchten Geländeoberfläche entspricht. Die Segmentierung von Wasser- und Nichtwasserflächen aus den Laserscannerdaten (Höhe und Intensität) erfolgt bisher durch einen einfachen Höhenschwellwert, wodurch Wasserflächen nur unzureichend extrahiert werden können. Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf der Suche nach Wasserflächen in lokalen Höhenminima des Digitalen Oberflächenmodells mit anschließendem überwachten Regiongrowing im Höhen- und Intensitätskanal sowie der Ermittlung einer Trendfläche.

## **1 Einleitung**

Im Rahmen des Küstenschutzes werden an der Nordseeküste seit einigen Jahren regelmäßig Laserscannerbefliegungen durchgeführt. Ziel dieser Befliegungen ist die Ableitung von hochgenauen Digitalen Geländemodellen der Watt- und Küstenbereiche. Durch die Analyse dieser Digitalen Geländemodelle und Vergleich mit den Messungen vergangener Jahre werden wichtige Erkenntnisse gewonnen. So können Lage- und Höhenveränderungen von bedeutsamen Objekten des Küstenschutzes wie Deichen oder Dünen, Verschiebungen der Land-Wasser-Verteilung sowie Änderungen von Prielen und Vorlandkanten festgestellt werden. Diese Geoinformationen benutzen die jeweiligen Fachbehörden des Bundes sowie der Länder als wichtiges Hilfsmittel für die Durchführung von Planfeststellungsverfahren mit dem Ziel des Neu- oder Ausbaus von Küstenschutzanlagen, der Vertiefung von Fahrrinnen und ähnlichen Maßnahmen. Da die Punktdichte von Laserscannermessungen deutlich höher ist als die der Schiffs-Peilungsmessungen, wird der Küstenbereich bevorzugt bei Niedrigwasser befliegen. Dadurch ist ein Großteil der Wattfläche nicht von Wasser bedeckt. Trotzdem verbleibt ein Teil des Wassers in den Prielen des Watts, die sich einem Flussdelta ähnlich durch das Watt erstrecken. In kleinen Senken und Mulden des Watts sammelt sich ebenfalls häufig Wasser, welches bei Niedrigwasser nicht mehr abfließt.

Analog zu den im aufgenommenen Gelände enthaltenen Vegetationsflächen, handelt es sich bei vorhandenen Wasserflächen nicht um die gesuchte Geländeoberfläche. Sie sind aber in dem aus den Laserscannerdaten abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodell enthalten, da der Laserpuls in der Regel nicht in die Wasserfläche eindringt, sondern an der Oberfläche reflektiert wird. Um ein hochgenaues Digitales Geländemodell zu erhalten, müssen die Wasserflächen erkannt und aus der Berechnung des Digitalen Geländemodells ausgeschlossen werden.

Ziel eines Partnerprojektes zwischen der Universität Hannover und beteiligter Fachbehörden ist die automatisierte Extraktion von Wasserflächen aus Laserscannerdaten des Watt- und Küstenbereiches zur Steigerung der Genauigkeit des abgeleiteten Digitalen Geländemodells. Da aufgrund der Gezeiten nur zwei begrenzte Zeitfenster pro Tag für die Befliegung der Küste zur Verfügung stehen, sowie aus Kostengründen, welche sich durch die zeitgleiche Erhebung von Laserscanner- und Multispektraldaten ergeben würden, soll die Erkennung von Wasserflächen ohne Multispektraldaten erfolgen.

## 2 Verfahren zur Trennung von Land- und Wasserflächen mit Laserscannerdaten

Das bisher durch die beteiligten Behörden praktizierte Verfahren zur Trennung von Land- und Wasserflächen mit Hilfe von Laserscannerdaten bedient sich fester Annahmen über die Wasserhöhe.

In Abhängigkeit vom jeweiligen Befliegungszeitpunkt für das zu segmentierende Gebiet wird ein Höhengschwellwert angesetzt. Dieser Höhengschwellwert entspricht der geschätzten Meereswasserhöhe zum jeweiligen Zeitpunkt. Da eine simultane Erfassung größerer Gebiete aufgrund des Messprinzips des Airborne Laserscanning, der streifenweisen Abtastung des Küstenbereiches, nicht möglich ist, entspricht die tatsächliche Wasserhöhe nicht überall dem Schwellwert. Zudem beeinflussen Wind und die Gezeitenwirkung die Wasserhöhe innerhalb der Priele, so dass selbst für kleinere Bereiche die Wasserhöhe unterschiedlich ist. Somit werden viele Bereiche falsch klassifiziert. Weiterhin ist zu bemängeln, dass auf den Wattflächen verbleibende, höher liegende Wasserflächen nicht erkannt werden können.

Abbildung 1 verdeutlicht die Klassifizierung sowie deren Mängel. Der Hauptpriel wird vollständig erkannt. Der Nebenpriel sowie die stehende Wasserfläche werden fehlerhaft als Landfläche klassifiziert, da sie oberhalb des Schwellwertes liegen.

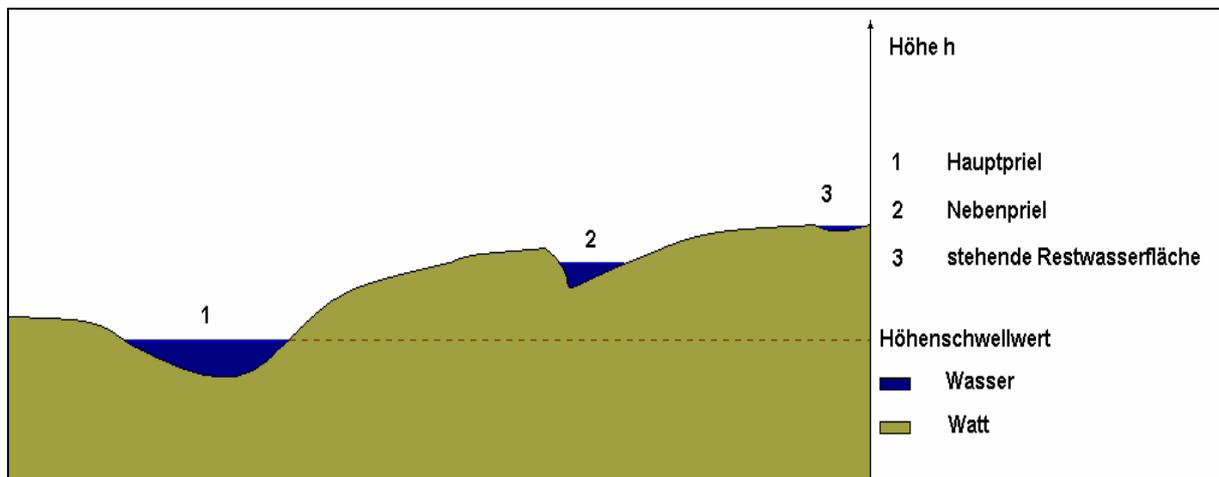


Abbildung 1: Segmentierung von Wasser- und Landflächen durch Schwellwertbildung

Ein anderer Ansatz wird durch Brockmann und Mandlbürger (2001) verfolgt. Ausgehend von Höhendaten aus Laserscannermessungen und Gewässerbettquerprofilen war es das Ziel des Projektes, ein Digitales Geländemodell des Wasserlaufes der Oder aufzubauen. Aus eindeutig identifizierbaren Wasserpunkten wurden alle 100 m 1D-Wasserspiegellagen abgeleitet. In einem nachfolgenden 2-stufigen Prozess, welcher aber zwingend auf Höheninformationen des Gewässerbetts angewiesen ist, ermittelte man die Land-Wasser-Grenze.

### 3 Eigenschaften und Erkennung von Wasserflächen in Laserscannerdaten

Wasserflächen haben das Bestreben, die kleinstmögliche potentielle Energiemenge  $E_{pot}$  zu besitzen. Befinden sich zusammengehörende Wassermengen in Ruhe, so ist die potentielle Energie überall auf der Oberfläche gleich. Ebenso ist die Höhe, sofern man von einer räumlich begrenzten Wasserfläche ausgeht, quasi identisch. Befinden sich zusammenhängende Wassermengen in Ruhe und haben somit die für sie geringste mögliche potentielle Energie, so entsprechen die ruhigen Wasseroberflächen lokalen Höhenminima im Gelände. Somit können potentielle Wasserflächen durch die Extraktion von lokalen Minima im Digitalen Oberflächenmodell gewonnen werden.

Im Intensitätskanal zeichnen sich Wasserflächen in der Regel durch geringe Intensitätswerte aus. Ursache sind die physikalischen Eigenschaften des Wassers. Zum einen wird ein Großteil der emittierten Strahlungsenergiemenge  $E_{emi}$  absorbiert (Abbildung 2). Dadurch wird nur ein geringer Teil der ausgesandten Energiemenge reflektiert. Zum anderen verhält sich eine ebene Wasseroberfläche nicht wie ein Lambertscher Strahler. Aufgrund des Rayleigh Kriterium (Pedrotti, 1987) und der daraus resultierenden spiegelnden Eigenschaft von ruhigen Wasseroberflächen kommt es zur gerichteten Reflexion. Je nach räumlicher Stellung zwischen Flugzeug, Richtung des ausgesandten Laserpulses sowie Ausrichtung der Wasseroberfläche gelangt nur ein sehr geringer Anteil der ausgesandten Energiemenge  $E_{emi}$  zum Detektor zurück (Frauendorfer 2002). Oft ist diese Energiemenge so gering, dass eine Streckenmessung nicht möglich ist.

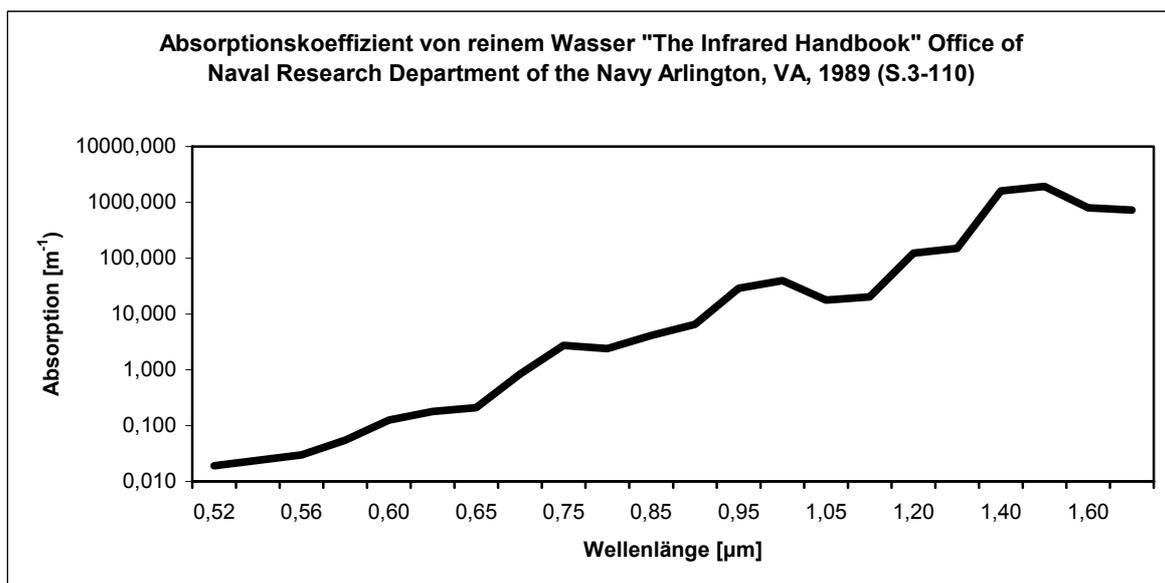


Abbildung 2: Absorptionskoeffizient von reinem Wasser (Wolfe et al, 1989)

### 4 Ansatz zur Segmentierung von Land- und Wasserbereichen

Aus den unter Punkt 3 erläuterten Überlegungen ergibt sich folgender grundsätzlicher Ansatz. Durch die Extraktion von lokalen Minima aus dem Digitalen Oberflächenmodell und anschließendem Nachweis von Wasserflächen durch den durchschnittlichen Intensitätswert des jeweiligen lokalen Minimums werden Quellbereiche gefunden. Aufgrund der zufälligen Messfehler, Wind und Gezeitenwirkung entsprechen die Quellbereiche nicht der gesamten gesuchten Wasserflächenmenge. Deshalb wird ein begrenztes, durch Überwachung des Höhen- und Intensitätskanals gesteuertes Regiongrowing durchgeführt, welches die gesamte,

zusammenhängende Wasserfläche extrahiert. Um auch geneigte Wasserflächen ermitteln zu können, wird eine Trendfläche in Form einer ausgleichenden Ebene berechnet.

#### 4.1 Algorithmus zur Extraktion von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

Im ersten Schritt werden die lokalen Minima im Digitalen Oberflächenmodell gesucht. Diese gewinnt man durch die Anwendung der Wasserscheidentransformation (Wegner et al., 1995), wobei man die gefundenen Bassins vorerst nicht auffüllt (Abbildung 3). Als Datengrundlage zur Ableitung der lokalen Minima wird ein grob skaliertes Digitales Oberflächenmodell (z.B.: eine Einheit entspricht einer Höhenauflösung von 30 cm) verwendet. Dies erfolgt aus zwei Überlegungen. Zum einen enthält das feine Digitale Oberflächenmodell lokale Minima aufgrund des Messrauschens des Laserscanners. Würde zum Beispiel eine horizontale Wasserfläche aufgemessen, so hätten die unregelmäßig verteilten Massepunkte und nachfolgend auch das daraus abgeleitete Digitale Oberflächenmodell aufgrund der zufälligen Messfehler unterschiedliche Höhen. Somit leitet man lokale Minima ab, die im aufgenommenen Gelände nicht existieren. Zum anderen sollen nur die lokalen Minima extrahiert werden, die sich durch einen aussagekräftigen Höhenunterschied von ihrer Umgebung absetzen. Um nur in den Höhenbereichen nach Wasserflächen zu suchen, in denen ihr Auftreten wahrscheinlich ist, wird die Suche nach lokalen Minima in der Höhe mit einem Schwellwert begrenzt.

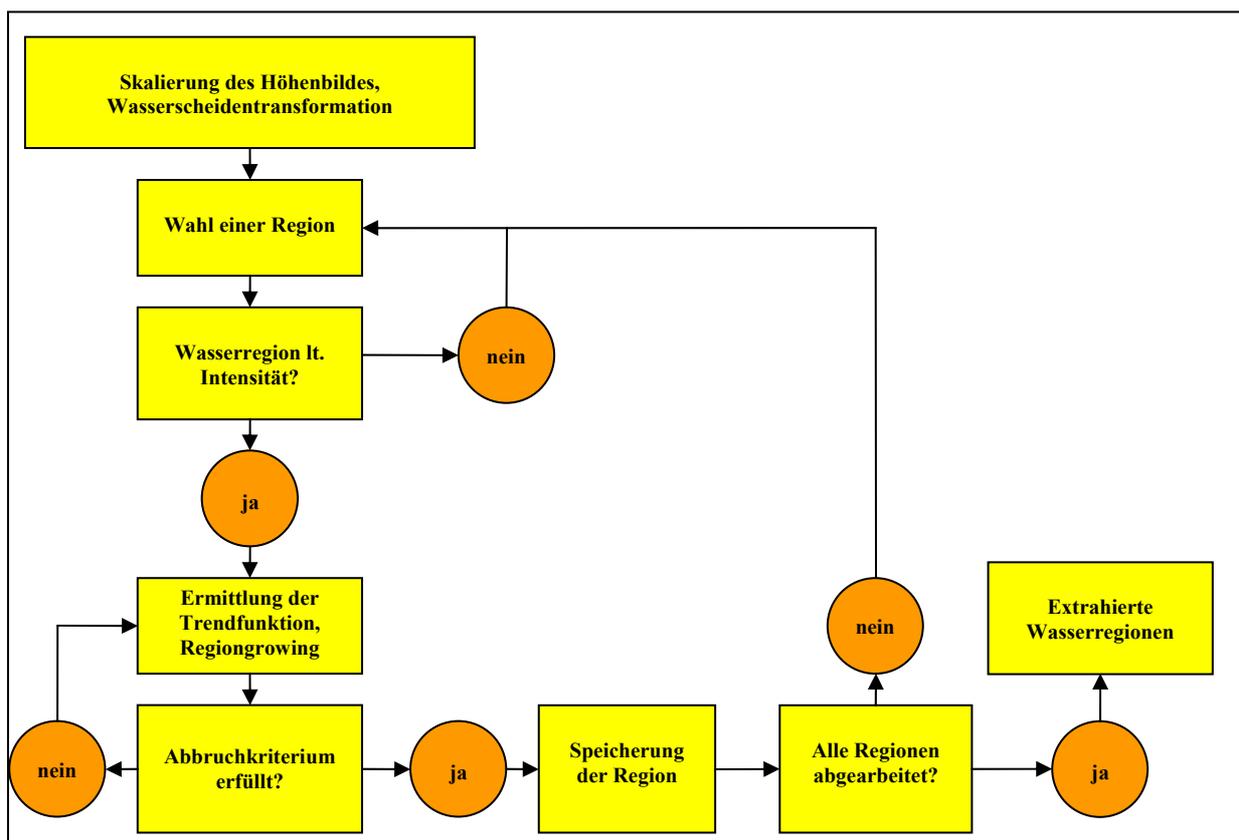


Abbildung 3: Flussdiagramm zur Extraktion von Wasserflächen mit Höhen- und Intensitätsdaten

Nach der Extraktion der lokalen Minima wird für jede Region überprüft, ob es sich um eine Wasserfläche handelt. Dazu wird der jeweilige Mittelwert der Intensität aller Laserpunkte ermittelt. Liegt dieser unter einem durch den Bearbeiter vorgegebenen Höhengrenzwert, so wird das lokale Minimum als Wasserfläche erkannt. Liegt der Mittelwert oberhalb des Grenzwertes, so scheidet diese Region als Wasserfläche aus.

Im Folgenden wird aus den nicht skalierten Höhenwerten der Wasserregion eine ausgleichende Ebene berechnet. Anschließend dehnt man die Region durch Dilation mit einem Kreis als Strukturelement (Isometrie) so aus, dass die Region sich in alle Richtungen um jeweils ein Pixel ausbreitet. Nachfolgend wird jedes Randpixel anhand zweier Regeln überprüft, ob es sich um ein Wasser- oder ein Nichtwasserpixel handelt.

Regel 1:

Aufgrund der zufälligen Messfehler des Airborne Laserscannings, dem Einfluss von Wind sowie den Gezeitenkräften sind die Punkthöhen zusammenhängender Wasserflächen unterschiedlich. Durch Vorgabe eines diskreten Auffüllgrenzwertes wird dieser Tatsache Rechnung getragen und das Regiongrowing sinnvoll begrenzt. Der Höhengrenzwert soll der erwarteten Standardabweichung der Höhenmessgenauigkeit sowie vermuteter Einflüsse durch Wind und Gezeitenwirkung entsprechen. Liegt der Höhenwert des jeweiligen Randpixels oberhalb der Summe der Höhenwerte von ausgleichender Ebene und dem Auffüllgrenzwert, so wird das Randpixel nicht als Wasserpixel erkannt und von der dilatierten Wasserregion abgezogen. Liegt es unterhalb der Summe aus ausgleichender Ebene und Auffüllgrenzwert, so verbleibt es als Wasserpixel in der Region. Sofern alle Randpixel nicht als Wasserpixel erkannt werden, so entfernt der Algorithmus alle Punkte des Umrings und extrahiert die verbleibende Region als Wasserfläche.

Regel 2:

Die 2. Regel überprüft die Intensitätswerte der Randpixel der dilatierten Region. Liegt der jeweilige Intensitätswert des Randpixels oberhalb eines durch den Bearbeiter festzusetzenden Grenzwertes, so handelt es sich um kein Wasserpixel. Es wird deshalb von der dilatierten Region entfernt. Ist der Intensitätswert kleiner als der vorgegebene Grenzwert, so geht der Algorithmus davon aus, dass es sich um ein Wasserpixel handelt. Es verbleibt in der dilatierten Region. Sofern alle Randpixel oberhalb des Grenzwertes liegen, ist der Rand der Wasserfläche erreicht. Die Randpixel werden entfernt und die Wasserfläche wird extrahiert.

Sofern nicht alle Randpixel als Nichtwasserpunkte erkannt und entfernt wurden, überprüft der Algorithmus, ob die Randpixel weitere lokale Minima berühren. Findet der Algorithmus weitere lokale Minima innerhalb der dilatierten Region, so werden sie mit ihr vereinigt.

Sind nach Anwendung von Regel 1 und 2 nicht alle Randpixel der dilatierten Region als Wasserpixel erkannt worden, so wird die verbleibende Region erneut dilatiert. Der Kreislauf aus Dilation, Extraktion der Randpixel sowie Überprüfung der Randpixel gemäß Regel 1 und 2 auf ihre Klassenzugehörigkeit wird solange durchgeführt, bis die Randpixel vollständig als Wasserpunkte erkannt und somit die Begrenzung der Wasserfläche erreicht wurde.

## 4.2 Einsatz einer Trendfläche

Durch Gezeiten, Strömung, Wind und andere natürliche Phänomene in der Natur sind die Wasserhöhen innerhalb einer zusammengehörigen Fläche oftmals ungleichmäßig. Um dieser Tatsache im Algorithmus Rechnung zu tragen, wird das Regiongrowing im Höhenkanal nicht auf die Summe der durchschnittlichen Höhe des lokalen Minima sowie des

Höhenschwellwertes begrenzt, sondern vor jeder Dilation eine aktuelle Trendfläche abgeleitet. Somit können auch geneigte Wasserflächen, vorkommend in Flüssen und Prielen, mit diesem Algorithmus vollständig erkannt werden.

## 5 Praktischer Test des Algorithmus

Aufgrund bisher noch fehlender Datengrundlagen für Wattflächen wurde der Ansatz mit zwei Testdatensätzen der Firma Toposys durchgeführt. Der erste Testdatensatz stammt aus der Befliegung der Nordseeinsel Sylt. Er enthält zwei Wasserflächen, einen großen Meereswasserbereich mit starker Wellenbildung und eine schmale, oberhalb des Meereswasserspiegels gelegene Wasserlache. Im zweiten Testdatensatz wurde ein Abschnitt der Elbe beflogen. Neben der Elbe beinhaltet dieser Datensatz weiterhin eine Reihe höher gelegener Seen.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Wasserextraktion mit Höhen- und Intensitätsdaten aus Laserscannermessungen. 98.5 % der vorhandenen Wasserflächen wurden durch den Algorithmus extrahiert. Neben der Meereswasserfläche konnte ebenfalls ein großer Teil der höher gelegenen Wasserlache ermittelt werden. Im Meereswasserbereich wurden einige Wasserflächen nicht erkannt. Hier handelt es sich um höher gelegene Wellenberge. Da ein maximaler Auffüllbetrag von 12 cm zu Grunde gelegt wurde, können diese Bereiche nicht extrahiert werden, da der Höhenunterschied zwischen Wellental und Wellenberg zum Teil größer als 30 cm ist. Diese Wasserflächen können aber problemlos in einem Nachbearbeitungsschritt ermittelt und der extrahierten Wasserfläche hinzugefügt werden.



Abbildung 4: Ableitung von Wasserflächen aus dem Testdatensatz Sylt

Links: Color-Infrarot-Darstellung

Mitte: Lokale Minima im grob skalierten Höhenbild

Rechts: Durch den Algorithmus extrahierte Wasserflächen

Die extrahierte Uferlinie entspricht in einzelnen Regionen nicht der wahren Uferlinie, sondern erstreckt sich in den periodisch von Wellen überspülten Strandbereich. Dieser nasse Sand spiegelt sich im Intensitätskanal durch sehr geringe Werte, die unterhalb des angesetzten Intensitätsschwellwertes liegen, wieder. Deshalb gelingt es dem Algorithmus nicht vollständig, das Regiongrowing an der eigentlichen Land-Wasser-Grenze zu beenden.

	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Vollständigkeit [%]	Richtigkeit[%]
Wasser, Referenz	455717	100.0	-
Wasser, extrahiert	448944	98.5	100.0
Wasser, richtig klassifiziert	444310	97.5	99.0
Wasser, falsch klassifiziert	4634	1.0	1.0

Tabelle 1: Auswertung der extrahierten Wasserflächen des Testgebietes „Sylt“

Auch im zweiten Testgebiet (Abbildung 5) konnten die Wasserflächen fast vollständig aus den Höhen- und Intensitätsdaten der Laserscannermessung abgeleitet werden (Tabelle 2). Hervorzuheben ist die exakte Erkennung der südlichen Uferlinie der Elbe. Lediglich einzelne kleinere, isolierte Seen wurden nicht erkannt, da sie keine lokalen Minima im groben Höhenbild sind. An dieser Stelle offenbart sich ein Schwachpunkt des Ansatzes. Nach Festlegung des Skalierungsfaktors erfolgt die Festlegung der Höhe des Stufenübergangs willkürlich. Durch eine weitere Skalierung mit dem gleichen Faktor, wobei aber der Stufenübergang um den Betrag Faktor/2 verschoben ist, kann man weitere lokale Minima ableiten. Zukünftig ist zu untersuchen, ob durch andere Maßnahmen wie der Tiefpassfilterung des Digitalen Oberflächenmodells im Frequenzraum nachfolgend ein grobes Höhenbild erstellt werden kann, welches alle repräsentativen lokalen Minima enthält.



Abbildung 5: Ableitung von Wasserflächen aus dem Testdatensatz Elbe

Links: Color-Infrarot-Darstellung

Mitte: Lokale Minima im grob skalierten Höhenbild

Rechts: Durch den Algorithmus extrahierte Wasserflächen

Innerhalb der Elbe wurden einige Wasserbereiche nicht erkannt, da die jeweiligen Intensitätswerte oberhalb des Schwellwertes liegen. Diese Bereiche setzen sich streifenweise mit konstantem Abstand über das aufgenommene Gebiet fort. Es ist zu vermuten, dass diese Streifen genau die Stellen markieren, welche das Flugzeug senkrecht überflogen hat. Aufgrund der gerichteten Reflexion gelangt ein Großteil der senkrecht nach unten ausgesandten Strahlung zum Empfänger zurück. Analog zu den Wellenbergen im Testgebiet Sylt können aber auch diese nicht erkannten Wasserbereiche problemlos nachträglich erfasst werden.

	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Vollständigkeit [%]	Richtigkeit[%]
Wasser, Referenz	463771	100.0	-
Wasser, extrahiert	446363	96.2	100.0
Wasser, richtig klassifiziert	438658	94.6	98.3
Wasser, falsch klassifiziert	7705	1.7	1.7

Tabelle 2: Auswertung der extrahierten Wasserflächen des Testgebietes „Elbe“

## 6 Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma Toposys, die uns die Testdatensätze zur Verfügung gestellt hat. Des Weiteren bedanken wir uns bei den Partnerbehörden dieses Projektes, namentlich das Amt für Ländliche Räume Husum, der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz Norden sowie der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest für die fachliche und infrastrukturelle Unterstützung des Projektes.

## Literaturverzeichnis

Frauendorf, J.: Entwicklung und Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Ableitung von Wasserqualitätsparametern verschiedener Restseen des Braunkohlentagebaus in Mitteldeutschland, Dissertation Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002

Kou, L., Labrie, D. Chylek, P.: Refractive indices of water and ice in the 0.65 – 2.5  $\mu\text{m}$  spectral range. 1993, Applied Optics, 32, 3531-3540.

Morel, A.: Optical properties of pure water and pure sea water. IN: JERLOV, N.G. & E. Steemann Nielsen (1974): Optical Aspects of oceanography. Academic press London, 1-24.

Pedrotti, F.L., Pedrotti, L. S.: Introduction to Optics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey), 1987.

Pope, R. M., Fry, E.S.: Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water, II. Integrating cavity measurements., 1997, Applied Optics, 36, 8710-8723.

Wegner S., Harms T., Builtjes J.H., Oswald H., Fleck E.: The watershed transformation for multiresolution image segmentation. Proc. 8th International Conference on Image Analysis and Processing, San Remo, Italien, September 1995, S. 31-36.

Brockmann, H., Mandlbürger, G.: Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder, Dreiländertagung „Geodäten schaffen Verbindungen“, Konstanz September 2001

Wolfe; W. L., Zissis, G. J.: The infrared handbook, 1989, The Infrared Information Analysis Center; Environmental Research Institute of Michigan