

# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

## Identifizierung von Muschelbänken im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer mittels LiDAR-Daten

vorgelegt von

Dr. Gabriele Müller  
U1494, UNIGIS MSc Jahrgang 2010

Zur Erlangung des Grades  
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:  
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Tönning, 28. März 2013

---

## **Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit**

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden sind entsprechend gekennzeichnet.

Tönning, 28. März 2013

Gabriele Müller

---

## Vorwort

Diese Master Thesis wurde im Rahmen meiner Tätigkeit für den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) angefertigt. Das im Fachbereich Umweltbeobachtungen und Planungsgrundlagen der Nationalparkverwaltung laufende Projekt SAMOWatt – „Satellitenmonitoring im Wattenmeer“ ist ein Teil des Forschungsprojektes DeMarine, das im Rahmen vom Erdbeobachtungsprogramm Copernicus der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) durchgeführt wird. Das Ziel von SAMOWatt ist es, satellitenbasierte optische Fernerkundungsdaten und Radardaten sowie Monitoring- und In Situ-Daten zu einem operationellen Bewertungsverfahren für das Wattenmeer zu verknüpfen.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die Identifizierung von Muschelbänken werden dem SAMOWatt-Projekt als Wissensgrundlage hinzugefügt. Da sich die Ergebnisse der Arbeit auf die Struktur der Oberfläche beziehen, werden sie hoffentlich besonders für die Analyse der Radardaten nützlich sein.

Ich möchte mich ganz herzlich bei meinem Kollegen Jörn Kohlus bedanken, der mir das Thema ermöglicht hat, auf dessen Hilfe und Unterstützung ich immer zählen konnte und der nie müde wurde mir neue Blickwinkel auf Daten und Ergebnisse zu eröffnen.

Bedanken möchte ich mich auch beim LKN, der die Daten zur Verfügung gestellt hat und es mir ermöglichte, während meiner Arbeitszeit an der Thesis zu arbeiten.

Mein Dank gilt auch David Fleet, der das Korrekturlesen der englischen Zusammenfassung übernommen hat.

Vielen Dank auch an alle Kolleginnen und Kollegen, die mich während der Arbeit an der Master Thesis unterstützt, mir den Rücken freigehalten oder einfach nur zugehört und mich motiviert haben, wenn es mal nicht ganz so rund lief.

Danke!

---

## Zusammenfassung

Das Wattenmeer ist ein einzigartiges Ökosystem und unterliegt nationalen, europäischen und internationalen Richtlinien, in denen ein regelmäßiges Monitoring der bedeutendsten Lebensräume gefordert wird. Muschelbänke leisten einen wichtigen Beitrag zur Stoffumsetzung und fungieren als Lebensraum für andere Tiere. Daher unterliegen auch sie einem regelmäßigen Monitoring. Dieses Monitoring basiert auf GPS-Vermessungen vor Ort sowie auf Interpretationen von Luftbildern. In dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit sich Muschelbänke anhand von Laserscandaten erfassen lassen.

Luftgestütztes Laserscanning nutzt das Prinzip der Laufzeitmessung zwischen dem Aussenden eines Laserimpulses und dem Empfang der Reflexion sowie der Messung der Stärke der Reflexion, um flächendeckende Informationen über Höhe und Reflexionsintensität der untersuchten Oberfläche zu erhalten.

Für drei Testgebiete im Wattenmeer wurden Daten aus einer Laserscanbefliegung von Schleswig-Holstein selektiert. Aus den Daten wurden für drei unterschiedliche Gridgrößen die Punktdichte sowie vier Parameter in Bezug auf Höhe und Intensität abgeleitet. Auf Basis dieser Parameter wurden die Testgebiete mittels des Maximum-Likelihood-Algorithmus klassifiziert. Die resultierenden Muschelflächen wurden dann mit Daten aus dem Muschelmonitoring verschnitten um einen Flächenvergleich durchzuführen. Zusätzlich wurden die Eigenschaften der resultierenden Klassen untersucht um herauszufinden, welche Parameter für die Identifizierung der Muschelflächen am besten geeignet sind.

In einem der drei Testgebiete stimmten die Ergebnisse gut mit den Daten aus dem Muschelmonitoring überein. Hier wurden Form und Struktur der Muschelbank sehr gut und über alle drei Gridgrößen hinweg erkannt. Die Klassifizierungen der anderen beiden Testgebiete ergaben jedoch weniger gute Ergebnisse, welche allerdings auf Qualitätsprobleme der Daten bzw. auf die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der verschiedenen Datensätze zurückgeführt wurden. Als geeignetster Parameter für die Identifizierung von Muschelflächen stellte sich die Rückstrahlungsintensität heraus.

Als problematisch erwiesen sich bei der Analyse vor allem die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Datensätze sowie eine Überlagerung der Laserscanreihen in den Daten eines Testgebietes. Außerdem stellte sich heraus, dass eine Zusammenfassung der Daten mehrerer Flugstreifen in 1x1 km Kacheln, sowie sie für diese Arbeit vorlagen, nicht geeignet ist.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass Muschelflächen mittels Laserscandaten erkannt werden können. Jedoch sollten weitere Untersuchungen mit einer optimierten Datengrundlage gemacht werden, um die Ergebnisse zu verifizieren.

---

## Abstract

The Wadden Sea is a unique ecosystem and is subject to several national, European and international directives. According to these directives a regular monitoring of the most important habitats is required. Because mussel beds contribute significantly to the turnover of organic materials and also function as habitat for other species, they too are subject to regular monitoring. This monitoring is based on on-site GPS surveys as well as interpretation of aerial photos. This study aims at determining whether mussel beds can be identified from laser scanning data.

Airborne laser scanning employs the principle of measuring the travelling time between the emission of a laser pulse and the reception of its reflection as well as the registration of the intensity of the reflection. In this way, area-wide information on the height of the ground and the reflection intensity can be obtained for the study area.

From a laser scanning campaign covering all of Schleswig-Holstein, data for three test sites within the Wadden Sea area were selected. For three different grid sizes four different parameters covering height and intensity information as well as the point density were derived from these data. Based on these parameters the test sites were classified using a maximum-likelihood-algorithm. The resulting mussel beds were then geometrically intersected with data from the mussel monitoring for comparative purposes. Additionally, the characteristics of the resulting classification classes were analysed to extract the most suitable parameter for the identification of the mussel beds.

One of the three test sites showed very good agreement with the data from ground-based mussel monitoring. In this case, the recognition of both the shape and the structure of the mussel bed were excellent for all three grid sizes. The classifications of the other two test sites were comparatively poor. However, these poor results were assumed to be caused by problems inherent to the original dataset and by differences in the time of data acquisition of the various datasets. The intensity of reflection proved to be the most suitable parameter in the identification of mussel beds.

The time differences in data acquisition and the overlap of laser scan rows in the data from one test site appeared to be problematic in the analysis process. Furthermore, the aggregation of individual laser pulses from several flight strips into 1x1 km grids, as was done for the data used in this study, was found to be inappropriate.

On the whole this study shows that mussel beds can be identified using laser scanning data. However, further studies with an appropriate data base should be undertaken to verify the achieved results.

---

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit & Hypothese.....	3
1.2 Struktur der Arbeit.....	3
1.3 Erwartete Ergebnisse .....	4
<b>2 LiDAR: Technik und Anwendung im Gezeitenbereich .....</b>	<b>5</b>
2.1 LiDAR-System .....	5
2.1.1 Laserlicht .....	5
2.1.2 Distanzmessung, Trennungsvermögen und Footprint.....	6
2.1.3 Intensität .....	8
2.1.4 Funktionsprinzip.....	10
2.1.5 Genauigkeit .....	13
2.2 LiDAR im Gezeitenbereich.....	13
2.2.1 Herausforderungen in der Gezeitenzone.....	13
2.2.2 Geländemodelle und Strukturlinienextraktion .....	14
2.2.3 Substraterfassung .....	16
<b>3 Material und Methode.....</b>	<b>17</b>
3.1 Testgebiete .....	17
3.1.1 Muschelbank NA03, Amrum .....	17
3.1.2 Muschelbank NA23, Föhr .....	17
3.1.3 Muschelbank NH19, Hamburger Hallig.....	18
3.2 LiDAR-Daten .....	18
3.3 Datenbearbeitung .....	20
3.4 Klassifizierung .....	20
3.5 Eigenschaften der Klassifikationsklassen .....	21
3.6 Vergleichsdaten aus dem Muschelmonitoring .....	22
3.7 Qualitätsbewertung .....	23
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>26</b>
4.1 Datengrundlage .....	26
4.2 Klassifikationen .....	27
4.3 Einfluss der Gridgröße.....	32
4.4 Eigenschaften der Klassifikationsklassen .....	35
4.5 Qualität der Klassifikationen .....	44
4.5.1 Qualitativer Vergleich mit den Monitoringdaten.....	44
4.5.2 Flächenvergleich mit den Monitoringdaten.....	45
<b>5 Diskussion .....</b>	<b>49</b>
5.1 Datengrundlage .....	49
5.2 Parameter zur Identifizierung von Muscheln .....	50
5.3 Klassifikationen, Gridgröße & Flächenvergleich .....	51
<b>6 Fazit &amp; Ausblick .....</b>	<b>54</b>
6.1 Fazit .....	54
6.2 Beantwortung der Forschungsfragen .....	54
6.3 Ausblick .....	55
<b>7 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>57</b>

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Struktur der Masterarbeit.....	3
Abbildung 2.1: Prinzip der Absorption, der spontanen Emission und der stimulierten Emission.....	6
Abbildung 2.2: Darstellung des Footprints im Verhältnis zu Flughöhe, Öffnungswinkel und Distanz zum Boden. ....	7
Abbildung 2.3: Geometrie und Messgrößen in der Radargleichung. ....	8
Abbildung 2.4: Reflexionsarten: gerichtet (a), diffus (b) und gemischt (c).....	10
Abbildung 2.5: Komponenten eines LiDAR-Systems. ....	11
Abbildung 2.6: Darstellung der Funktionsweise von luftgestütztem LiDAR (links) und verschiedene Scanmuster (rechts). ....	11
Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Beschleunigungen (links) und Drehraten (rechts). ....	12
Abbildung 3.1: Lage der Testgebiete im nordfriesischen Wattenmeer.....	18
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Überführung der Parameterwerte in Attribute eines Punktshapes (links) und Erstellung der Werteverteilungen (rechts). ....	22
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung einer Muschelbank (schwarz umrandet) mit Wattflächen (weiß) zwischen den einzelnen Muschelbeeten (grau).....	23
Abbildung 3.4: Prinzip des Flächenvergleichs zwischen der LiDAR- und der Monitoringmethode (GPS oder Luftbildinterpretation).....	24
Abbildung 4.1: Histogramme der normalisierten Intensitätswerte vor (rot) und nach (grau) der Entfernung der Extremwerte für die Muschelbänke NA03, NA23 und NH19.....	27
Abbildung 4.2: Muschelbank NA03, 1x1 m: Gesamtklassifikation (links), Luftbild mit Muschelbankumriss aus Monitoring (Mitte) und zusätzlich mit bearbeiteter Muschelbankfläche aus Klassifikation (rechts).....	28
Abbildung 4.3: Fotos der Muschelbank NA03 vom Sommer 2012.....	28
Abbildung 4.4: Muschelbank NA23, 1x1 m: Gesamtklassifikation (links), Luftbild mit Muschelbankumriss (schwarz: GPS, weiß: Luftbildinterpretation) aus Monitoring (Mitte) und zusätzlich mit bearbeiteter Muschelbankfläche aus Klassifikation (rechts). ....	29
Abbildung 4.5: Muschelbank NH19, 1x1 m: Gesamtklassifikation (oben), Luftbild mit Muschelbankumriss (schwarz: GPS, weiß: Luftbildinterpretation) aus Monitoring (Mitte) und zusätzlich mit bearbeiteter Muschelbankfläche aus Klassifikation (unten). ....	30
Abbildung 4.6: Vergleich der Klassifikationen von NA03 mit den Gridgrößen 1x1 m (links), 2x2 m (Mitte) und 3x3 m (rechts). ....	32

---

Abbildung 4.7: Vergleich der Klassifikationen von NA23 mit den Gridgrößen 1x1 m (links), 2x2 m (Mitte) und 3x3 m (rechts)..	33
Abbildung 4.8: Vergleich der Klassifikationen von NH19 mit den Gridgrößen 1x1 m (oben), 2x2 m (Mitte) und 3x3 m (unten)..	34
Abbildung 4.9: Werteverteilung von NA03 (1x1 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).	36
Abbildung 4.10: Werteverteilung von NA03 (2x2 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).	37
Abbildung 4.11: Werteverteilung von NA03 (3x3 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 4 (grau schraffiert).	38
Abbildung 4.12: Werteverteilung von NA23 (1x1 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).	40
Abbildung 4.13: Werteverteilung von NA23 (2x2 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 4 (grau schraffiert).	42
Abbildung 4.14: Werteverteilung von NH19 (1x1 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).	43

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Aufnahmezeitpunkte der LiDAR-Daten für die einzelnen Testgebiete. ....	19
Tabelle 4.1:	Anzahl Laserpunkte sowie minimale und maximale Intensitätswerte für die drei Testgebiete vor und nach der Entfernung der Extremwerte. ....	26
Tabelle 4.2:	Übersicht der in der Klassifizierung verwendeten Parameter. ....	27
Tabelle 4.3:	Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NA03 zwischen der Luftbildinterpretation (LB) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR) für alle drei Gridgrößen. ....	45
Tabelle 4.4:	Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NA23 zwischen der Luftbildinterpretation (LB) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR) für die Gridgrößen 1x1 m und 2x2 m. ....	46
Tabelle 4.5:	Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NA23 zwischen der GPS-Vermessung (GPS) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR) für die Gridgrößen 1x1 m und 2x2 m. ....	46
Tabelle 4.6:	Gesamtgröße und quantitativer Vergleich der Flächen zwischen der GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB) der Muschelbank NA23 innerhalb des Testgebietes. ....	47
Tabelle 4.7:	Gesamtgröße und quantitativer Vergleich der Flächen zwischen der GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB) der Muschelbank NH19 innerhalb des Testgebietes. ....	47
Tabelle 4.8:	Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NH19 zwischen den Monitoringmethoden (GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB)) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR).....	48
Tabelle 4.9:	Übersicht der Gütemaße Producer's Accuracy (PA, Vollständigkeit) und User's Accuracy (UA) aufgeteilt nach Gridgröße und Monitoringmethode (GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB)). Darstellung der Gütemaße (PA/UA) in Prozent. ....	48

# 1 Einleitung

Das Schleswig-Holsteinische Wattenmeer bildet eine Übergangszone zwischen der Nordsee und dem Festland und ist durch eine Reihe von vielfältigen Lebensräumen, wie z. B. Sand- und Schlickwatten, Seegraswiesen und Muschelbänke, gekennzeichnet. Im Jahr 2009 wurde das deutsch-niederländische Wattenmeer als UNESCO Weltnaturerbe anerkannt. Hierdurch wurde der „außergewöhnliche universelle Wert“ des Wattenmeeres ausgezeichnet. Diese Auszeichnung ist – neben der Intaktheit und dem zugewiesenen Schutzstatus – auf geologische und ökologische Prozesse sowie einer großen Bedeutung für die biologische Vielfalt zurückzuführen (Gemeinsames Wattenmeersekretariat 2008). Außerdem sind große Teile des Wattenmeeres als Nationalpark, als Feuchtgebiet von internationaler Bedeutung nach dem Ramsar-Übereinkommen, als UNESCO-Biosphärenreservat nach dem „Man and Biosphere“-Programm sowie als Schutzgebiet infolge der Vogelschutz- und der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie ausgewiesen. Der ständige Wechsel zwischen Ebbe und Flut und die damit verbundenen extremen Lebensbedingungen stellen die hier lebenden Organismen vor große Herausforderungen, denen entweder mit einer enormen Vielseitigkeit oder einer hochgradigen Spezialisierung begegnet wird (Gemeinsames Wattenmeersekretariat 2008). Die vielfältigen Lebensräume sowie die hohe Produktivität geben dem Wattenmeer zudem eine außergewöhnliche und internationale Bedeutung für Vögel als Rast-, Mauser- und Überwinterungsgebiet (Koffijberg *et al.* 2009; Laursen *et al.* 2009).

Muscheln sind aus mehreren Gründen wichtige Organismen im Wattenmeer: (1) durch die Filtration des Wassers spielen sie eine wichtige Rolle in der Stoffumsetzung im Wattenmeer (Asmus & Asmus 1991; Dame *et al.* 1991; Dankers & Zuidema 1995), (2) sie dienen anderen Organismen als Substrat (Dittmann 1990) und (3) sie dienen einer Reihe von Vogelarten als Nahrungsquelle (Koffijberg *et al.* 2009; Laursen *et al.* 2009). Häufig vorkommende Muschelarten sind die Miesmuschel (*Mytilus edulis*), Sandklaffmuschel (*Mya arenaria*), Herzmuschel (*Cerastoderma edule*) und die Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*). Während die Miesmuschel eine heimische Art ist, wurde die Pazifische Auster in den 1970er Jahren zu Kulturzwecken eingeführt, hat sich seitdem über das gesamte deutsche Wattenmeer verbreitet und wird als Konkurrent der Miesmuschel angesehen (Nehls *et al.* 2009). Sowohl die Miesmuschel als auch die Pazifische Auster können ausgeprägte Muschelbänke bilden, indem sie sich an einen festen Untergrund (dies kann auch eine andere Muschel sein) anheften. Auf diese Weise können Muschelbänke zu Größen von mehreren tausend Hektar anwachsen (Nehls *et al.* 2009) und als Lebensraum für andere Arten wie z. B. Schwämme und Seescheiden dienen.

Im Rahmen der trilateralen Zusammenarbeit zwischen den Niederlanden, Deutschland und Dänemark zum Schutz des Wattenmeeres wurde ein Trilaterales Monitoring- und Bewertungs-

programm (TMAP) entwickelt und 1997 operativ zum Einsatz gebracht (Marencic 1997). Das Ziel des TMAP ist eine kontinuierliche, wissenschaftliche Bewertung des Ökosystems Wattenmeer sowie eine Bewertung des Umsetzungsgrades von trilateralen Zielen aus dem Wattenmeerplan. Im Rahmen des TMAP ist auch ein jährliches Miesmuschelmonitoring vorgegeben, in dem sowohl obligatorische als auch begleitende Parameter festgelegt sind. Zu den obligatorischen Parametern gehören Fläche, Verteilung, Biomasse und Bedeckungsgrad der Muschelbänke, während z. B. Dichte, Längenverteilung und Struktur zu den begleitenden Parametern zählen.

Im TMAP wird zudem empfohlen beim Miesmuschelmonitoring obenstehende Parameter gleichzeitig auch für die Pazifische Auster zu erfassen. In Bezug auf die Methode gibt das TMAP-Handbuch vor, die erforderlichen Parameter anhand von Luftbildern und GPS-Vermessungen zu bestimmen (TMAG – Trilateral Monitoring and Assessment Group 2009), wobei einige der Parameter wie z. B. die Längenverteilung nur direkt vor Ort erfasst werden können. Die Erfassung der Parameter soll an ausgewählten Standorten zweimal jährlich durchgeführt werden, während weitere Erfassungen die Entwicklung über den Jahreszyklus hinweg dokumentieren sollen. Da besonders die GPS-Vermessungen vor Ort sehr arbeitsintensiv sind (manche Muschelbänke können z. B. nur per Boot erreicht werden), ist das Muschelmonitoring insgesamt eine sehr aufwändige Aufgabe.

Aufgrund der Unzugänglichkeit vieler Bereiche des Wattenmeeres z. B. durch Schlick und tiefe Priele wurden bereits einige Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Fernerkundungsmethoden zu Monitoringzwecken im Wattenmeer durchgeführt. Der Fokus dieser Untersuchungen lag auf der Identifizierung von Sedimenttypen (Doerffer & Murphy 1989; Sørensen *et al.* 2006; Stelzer *et al.* 2004) sowie auf der Erstellung von digitalen Geländemodellen und Extraktion von Strukturlinien (Brzank *et al.* 2008b; Niedermeier *et al.* 2005). In den letzten Jahren wurde auch versucht z. B. Muschelbänke direkt mittels Fernerkundung zu erfassen (Schmidt *et al.* 2012a; Schmidt *et al.* 2012b; Stelzer *et al.* 2010).

Im Zeitraum 2005 bis 2007 wurde im Auftrag des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein eine Laserscanbefliegung von Schleswig-Holstein sowie eine anschließende Klassifizierung der Datenpunkte durchgeführt. Neben den Landflächen Schleswig-Holsteins decken die Daten auch große Teile des Wattenmeeres ab. In dieser Arbeit sollen die Laserscandaten (auch LiDAR-Daten genannt) daher auf ihre Eignung zur Identifizierung von Muschelbänken im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer hin untersucht werden.

## 1.1 Ziel der Arbeit & Hypothese

Das Ziel der Arbeit ist es festzustellen, ob Muschelbänke im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer anhand von luftgestützten LiDAR-Daten identifiziert werden können. Im Speziellen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Können Muschelbänke mit Hilfe von luftgestützten LiDAR-Daten identifiziert werden?

Falls obige Frage mit „Ja“ beantwortet werden kann, stellen sich unweigerlich auch folgende Fragen:

- Anhand welcher Parameter der LiDAR-Daten können die Muschelbänke identifiziert werden?
- Welchen Einfluss hat der Analysemaßstab (Gridgröße) auf die Erkennung der Muschelbänke?

Die grundlegende Hypothese hinter den obengenannten Fragestellungen ist die, dass die Struktur der Muschelbänke – im Gegensatz zu Wattsedimenten und Wasser – dem Boden eine Rauigkeit und Härte verleiht, und dass diese Unterschiede in den LiDAR-Daten erkennbar sind und daher eine Identifizierung der Muschelbänke ermöglichen.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert. Eine visuelle Darstellung dieser Gliederung ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

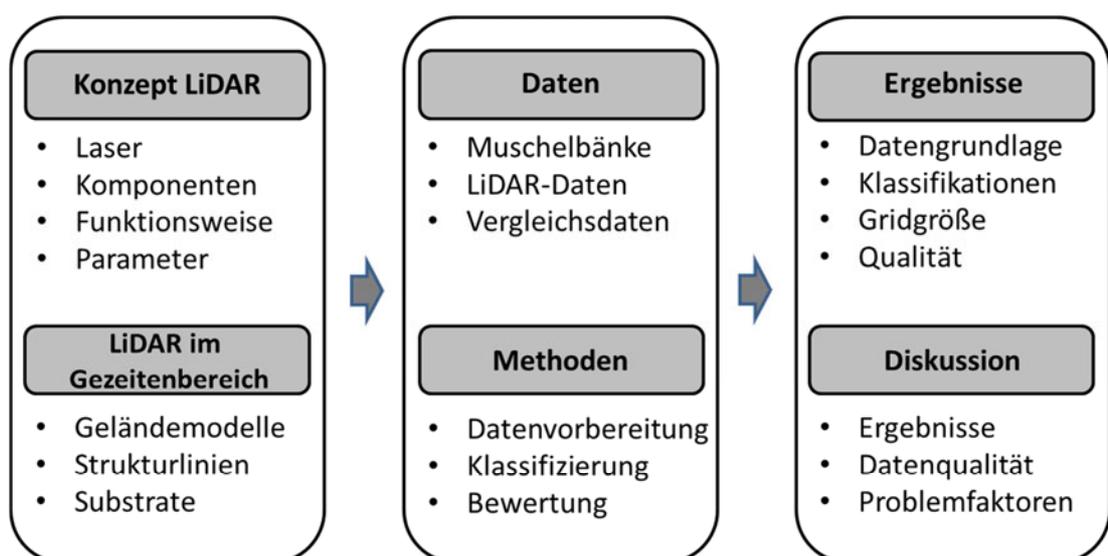


Abbildung 1.1: Struktur der Masterarbeit.

Im ersten Teil der Arbeit wird das Konzept des Laserscannings vorgestellt. Hierbei wird besonders auf die Komponenten eines LiDAR-Systems, deren Funktionsweise und die erfassten Parameter eingegangen. Anschließend wird erläutert, zu welchen Zwecken LiDAR im Wattenmeer bereits eingesetzt wird.

Im zweiten Teil werden die Daten und die Methoden, die in dieser Arbeit verwendet werden, vorgestellt. Zuerst werden die drei Testgebiete und die LiDAR-Daten präsentiert. Anschließend werden die einzelnen Schritte in der Datenvorbereitung und -analyse beschrieben. Abschließend werden die Vergleichsdaten aus dem Muschelmonitoring sowie die Methode für die Bewertung der Klassifikationen präsentiert.

Im dritten Teil werden die Ergebnisse der Datenanalyse vorgestellt, wobei auf die Datengrundlage, die Klassifikationen und auf die Qualität der gesamten Analyse eingegangen wird. Anschließend werden die Ergebnisse diskutiert, wobei die Qualität der Ausgangsdaten sowie die Erfassungsmethode der Vergleichsdaten eine wichtige Rolle spielen.

### **1.3 Erwartete Ergebnisse**

Die erwarteten Ergebnisse stützen sich auf die in Abschnitt 1.1 gestellten Fragen. Das primäre Ergebnis ist die Antwort auf die Frage, ob Muschelbänke anhand von luftgestützten LiDAR-Daten identifiziert werden können. Sollte diese Frage mit einem „Ja“ beantwortet werden können, werden als weitere Ergebnisse diejenigen Parameter erwartet, auf denen die Identifizierung hauptsächlich basiert. Zusätzlich werden hier Informationen über den Analysemaßstab (in Form der Gridgröße) erwartet, bei dem eine Identifizierung möglich ist.

## 2 LiDAR: Technik und Anwendung im Gezeitenbereich

In diesem Kapitel wird zuerst das LiDAR-System mit seinen Eigenschaften und seiner Funktionsweise beschrieben. Anschließend wird dargestellt, in welchen Bereichen LiDAR bereits im Wattenmeer eingesetzt wurde.

### 2.1 LiDAR-System

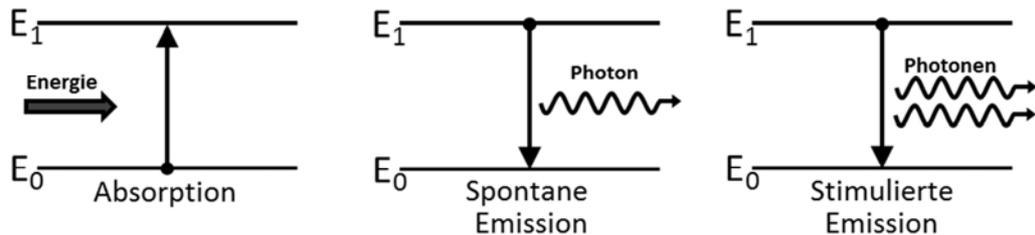
Das Akronym LiDAR steht für **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging, wobei die Begriffe Laser Radar und LADAR (**L**aser **D**etection **A**nd **R**anging) auch häufig für das Laserscanning verwendet werden. LiDAR ist eine aktive Fernerkundungsmethode, bei der ein Laserimpuls ausgesendet und dessen Reflexion aufgezeichnet wird. Aus diesem Grund ist LiDAR unabhängig von der Sonnenstrahlung und kann sowohl tagsüber als auch nachts angewendet werden. Im Gegensatz zum Radar kann LiDAR jedoch nicht bei schlechtem Wetter (z. B. Regen und starke Bewölkung) eingesetzt werden.

#### 2.1.1 Laserlicht

Das Akronym „Laser“ steht für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, d. h. dass die Erzeugung von Laserlicht auf der stimulierten Emission von Photonen eines Lasermediums basiert. Durch eine Energiezufuhr von außen (Absorption) können die Elektronen eines Atoms, die sich normalerweise in einem stabilen Grundzustand ( $E_0$ ) befinden, in ein höheres Energieniveau ( $E_1$ ) überführt werden (siehe Abbildung 2.1 links). Das Atom befindet sich dann in einem „angeregten“ Zustand. Dieser angeregte Zustand ist jedoch sehr instabil, weshalb die Elektronen sehr schnell wieder auf das stabile, aber geringere Energieniveau zurückspringen, wobei ein Photon ausgesendet wird (Abbildung 2.1 Mitte). Die Energie dieses Photons ist gleich der Differenz der beiden Energieniveaus.

Bei einem Laser wird dem Lasermedium (dies kann ein Festkörper, ein Gas oder eine Flüssigkeit sein) von außen Energie zugeführt, so dass eine Besetzungsinversion entsteht. Hierbei handelt es sich um einen Zustand, in dem sich mehr Elektronen im angeregten Zustand als im energieärmeren Grundzustand befinden. Wenn nun ein – bei einer spontanen Emission ausgesandtes – Photon auf ein angeregtes Elektron trifft, wird das Photon absorbiert und das Elektron springt unter Aussendung zwei gleicher Photonen wieder in seinen Grundzustand zurück. Dies ist dann eine induzierte bzw. stimulierte Emission. Auf diese Weise entstehen zwei Photonen mit der gleichen Wellenlänge und der gleichen Phase (Abbildung 2.1 rechts). Diese Photonen können dann ihrerseits weitere Emissionen stimulieren. Da das Lasermedium sich in einem Resonator befindet, in dem die Photonen durch Spiegel hin und her reflektiert werden,

wird hierdurch eine Kettenreaktion ausgelöst und weil die emittierten Photonen dieselbe Wellenlänge und Phase haben, wird das Lichtbündel im Resonator kontinuierlich verstärkt. Befindet sich an einem Ende des Resonators eine kleine Öffnung, kann der Laserstrahl hierdurch austreten (Petrie & Toth 2008; Wagner *et al.* 2003).



**Abbildung 2.1:** Prinzip der Absorption, der spontanen Emission und der stimulierten Emission. Nach Wagner *et al.* (2003), Seite 2, verändert

Ein häufig verwendetes Lasermedium ist das kristalline Nd:YAG-Material (Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat), das hohe Pulsraten in Kombination mit einer sehr hohen Leistung von mehr als 1 kW ermöglicht. Die produzierte Wellenlänge liegt im infraroten Bereich bei 1064 nm (Heritage & Large 2009; Petrie & Toth 2008).

Laserlicht hat gegenüber dem normalen Licht einige wesentliche Vorteile: (1) es ist annähernd monochromatisch, d. h. dass es je nach Art des Lasermediums nur eine spezifische Wellenlänge bzw. einen extrem engen Wellenlängenbereich hat; (2) es ist kohärent, d. h. dass die Wellenpakete zueinander in Phase schwingen; (3) es hat eine geringe Divergenz und (4) es hat eine hohe Intensität (Petrie & Toth 2008; Wagner *et al.* 2003; Wehr & Lohr 1999).

### 2.1.2 Distanzmessung, Trennungsvormögen und Footprint

Laser können entweder kontinuierlich Licht aussenden (Continuous Wave oder CW-Laser) oder in kurzen Impulsen (gepulster Laser). Da sich diese Arbeit mit Daten eines gepulsten Lasers befasst, wird auf eine Darstellung des Messprinzips für CW-Laser verzichtet.

Das Messprinzip bei einem gepulsten Laser besteht in der Messung der Laufzeit vom Aussenden eines Impulses bis zur Registrierung der Reflexion von diesem Impuls durch eine Photodiode. Über diese Laufzeit  $t$  kann die Distanz  $R$  (siehe Abbildung 2.2) zwischen dem Sensor und der reflektierenden Oberfläche bzw. dem reflektierenden Objekt über folgende Formel berechnet werden:

$$R = \frac{t \cdot v}{2} \quad (1)$$

wobei  $v$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserimpulses darstellt, die laut Wagner *et al.* (2003) bis zu 0,03 % von der Lichtgeschwindigkeit abweicht. Der Faktor 2 entsteht dadurch, dass das Signal den Weg zwischen Sensor und Oberfläche bzw. Objekt zweimal zurücklegen muss, bevor es vom Sensor registriert wird.

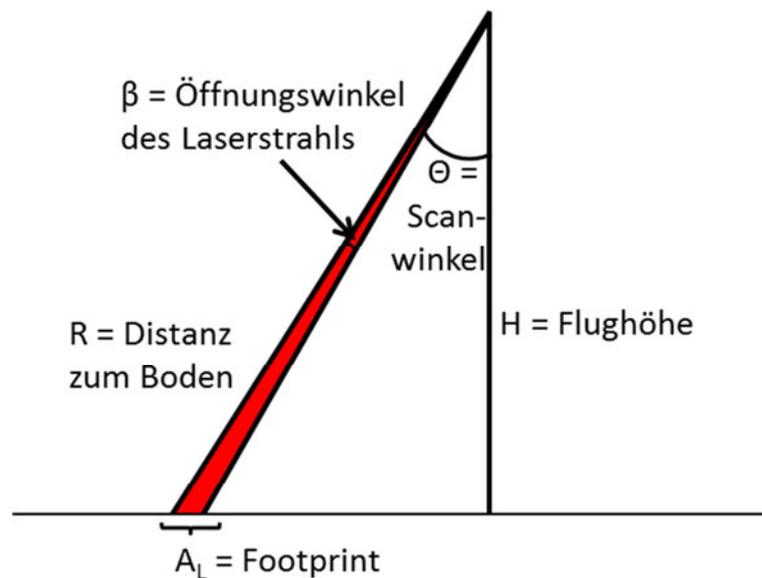
Wenn zwei Objekte mit dem Abstand  $\Delta R$  vom gleichen Laserimpuls erfasst werden, so hängt es von der Dauer  $\Delta \tau$  des ausgesendeten Impulses ab, ob die Echos der beiden Objekte separat empfangen werden können. Da der Laserimpuls den Weg  $\Delta R$  zweimal durchlaufen muss, kommt das Echo des zweiten Objektes um

$$\Delta T = \frac{2 * \Delta R}{v} \quad (2)$$

später am Sensor an als das Echo des ersten Objektes (Wehr & Lohr 1999). Um eine Trennung der beiden Objekte zu gewährleisten muss  $\Delta T > \Delta \tau$  sein. Die kleinstmögliche Entfernung zweier trennbarer Objekte  $\Delta r$  ergibt sich daher durch Umstellung von Formel (2) wie folgt:

$$\Delta r = \frac{v * \Delta \tau}{2} \quad (3)$$

Für einen 10 ns langen Impuls bedeutet dies, dass die kleinstmögliche Entfernung  $\Delta r$  zwischen zwei Objekten 1,5 m beträgt.



**Abbildung 2.2:** Darstellung des Footprints im Verhältnis zu Flughöhe, Öffnungswinkel und Distanz zum Boden.

Der Footprint eines Lasersystems (siehe Abbildung 2.2) gibt an, welche Fläche ein einzelner Laserimpuls auf dem Boden beleuchtet. Der Durchmesser vom Footprint  $A_L$  ist von der Flug-

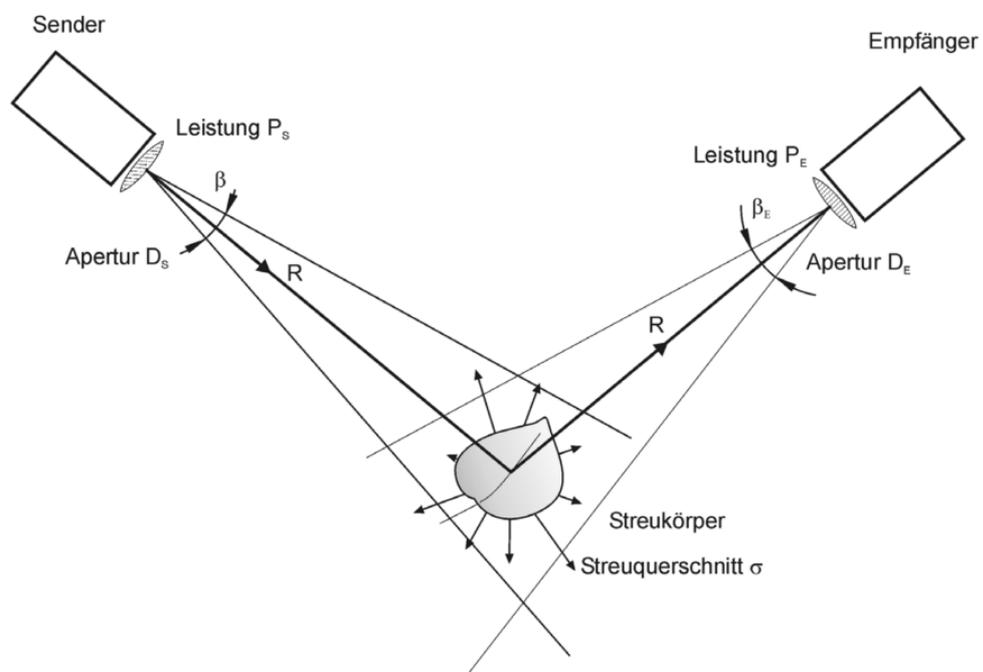
höhe  $H$ , dem Scanwinkel  $\theta$  sowie dem Öffnungswinkel des Laserstrahls  $\beta$  abhängig und wird laut Wehr and Lohr (1999) wie folgt bestimmt:

$$A_L = R\beta = \frac{H}{\cos(\theta)} * \beta \quad (4)$$

Bei einer Flughöhe von 1000 m, einem Öffnungswinkel von 0,25 mrad und einem Scanwinkel von  $0^\circ$  (Blick senkrecht nach unten und  $R = H$ ) ergibt sich ein Footprint-Durchmesser von 25 cm. Dies entspricht laut Wagner *et al.* (2003) auch dem Auflösungsvermögen in der Ebene normal zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls.

### 2.1.3 Intensität

Beim Auftreffen auf ein Objekt wird normalerweise ein Teil des Laserimpulses in Richtung des Sensors reflektiert. Die Stärke dieser Reflexion wird auch als Intensität bezeichnet und ist von der Stärke des Ausgangsimpulses, der Entfernung und den Eigenschaften des reflektierenden Objektes abhängig. Mit der Radargleichung aus der Mikrowellenfernerkundung, in der diese Parameter berücksichtigt werden, kann die Intensität ermittelt werden. Die folgende Beschreibung basiert auf den Ausführungen von Wagner *et al.* (2003), der eine leicht modifizierte Form der Radargleichung präsentiert.



**Abbildung 2.3:** Geometrie und Messgrößen in der Radargleichung.  
Quelle: Wagner *et al.* (2003), Seite 7

In Abbildung 2.3 werden die Geometrie und die Messgrößen der Radargleichung dargestellt, wobei Sender (Laser) und Empfänger (Photodiode) der Übersichtlichkeit wegen einander gegenüber platziert sind. Die Hauptkomponenten der Radargleichung sind die Bestrahlungsstärke  $S_0$ , die vom Objekt zurückgestreute Leistung  $P_r$ , die Bestrahlungsstärke am Empfänger  $S_E$  sowie die Leistung am Empfänger  $P_E$ .

Die Bestrahlungsstärke  $S_0$  ist abhängig von der Leistung des Senders  $P_S$  und der Fläche  $A$ , die sich aus dem kreisförmigen Raumwinkel  $\pi\beta_s^2/4$  und der Entfernung zum Objekt  $R$  ergibt:

$$A = R^2 * \frac{\pi * \beta_s^2}{4} \quad (5)$$

Die Bestrahlungsstärke  $S_0$  ist somit gegeben durch:

$$S_0 = \frac{P_S}{A} = \frac{4 * P_S}{\pi * R^2 * \beta_s^2} \quad (6)$$

Die vom Objekt zurückgestreute Leistung  $P_r$  setzt sich zusammen aus der Bestrahlungsstärke  $S_0$  und dem Streuquerschnitt  $\sigma$  (in  $m^2$ ):

$$P_r = S_0 * \sigma \quad (7)$$

Die Bestrahlungsstärke am Empfänger  $S_E$  ist wie folgt:

$$S_E = \frac{P_r}{4\pi R^2} = \frac{P_S * \sigma}{\pi^2 * R^2 * \beta_s^2} \quad (8)$$

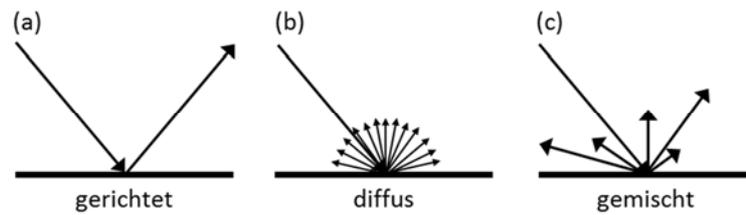
Aus der Bestrahlungsstärke und der Apertur  $D_E$  am Empfänger kann dann die Leistung am Empfänger  $P_E$  (die Intensität) ermittelt werden:

$$P_E = \frac{S_E * \pi * D_E^2}{4} = \frac{P_S * D_E^2}{\pi * R^4 * \beta_s^2} * \sigma \quad (9)$$

Zusätzlich zu den oben genannten Parametern wird das Signal noch durch das System sowie durch die Atmosphäre beeinflusst. Diese Parameter werden durch den Wirkungsgrad des Laserscanners  $\eta_{SYS}$  und den Transmissionsfaktor der Atmosphäre  $\eta_{ATM}$  dargestellt. Insgesamt ergibt sich daher die angepasste Radargleichung wie folgt:

$$P_E = \frac{P_S * D_E^2}{\pi * R^4 * \beta_s^2} * \sigma * \eta_{SYS} * \eta_{ATM} \quad (10)$$

Auch wenn der Transmissionsfaktor der Atmosphäre hier als Konstante dargestellt wird, so haben sowohl das Medium als auch die Wetterbedingungen einen Einfluss auf diesen Faktor. Bei einer terrestrischen, luftgestützten Anwendung muss der Laserstrahl die Luft zwischen dem Laser und dem Objekt zweimal durchqueren. Hierbei spielen Wetterbedingungen wie z. B. die Luftfeuchtigkeit eine Rolle. Beim bathymetrischen Laser müssen das Medium Wasser und Einflussfaktoren wie z. B. Trübung und Einfallswinkel zusätzlich berücksichtigt werden.

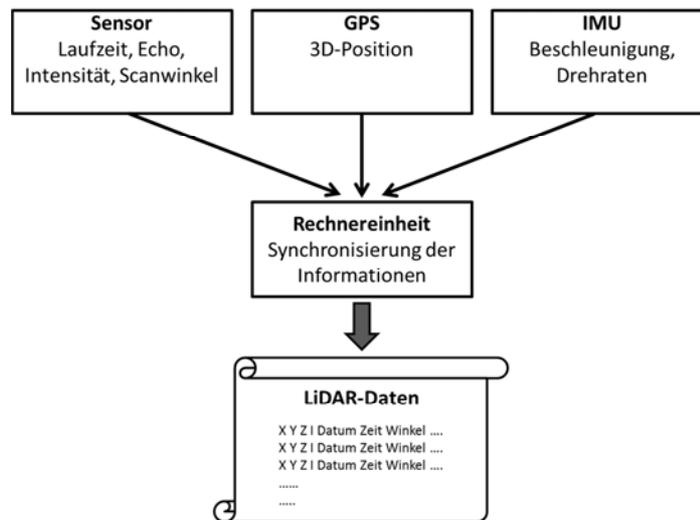


**Abbildung 2.4:** Reflexionsarten: gerichtet (a), diffus (b) und gemischt (c).  
Nach Heritage and Large (2009), Seite 23, verändert

Die auf ein Objekt oder Streukörper einfallende Strahlung kann vom Objekt absorbiert, transmittiert oder reflektiert werden. Der Streuquerschnitt ist ein Maß dafür, wie viel von der eingehenden Bestrahlungsstärke wieder reflektiert wird. Dieser Parameter berücksichtigt sowohl den Raumwinkel der Reflexion (wobei eine gerichtete Reflexion einem geringen Raumwinkel entspricht) sowie den Reflexionsgrad des beleuchteten Materials (Wagner *et al.* 2003). Die Reflexion kann je nach Oberfläche gerichtet oder diffus sein, wobei diese beiden Typen die Extremformen darstellen und meistens eine gemischte Form auftritt (Heritage & Large 2009). Bei der gerichteten Reflexion wird die einfallende Strahlung vollständig von der Quelle weg reflektiert, wobei der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht (siehe Abbildung 2.4a). Dies geschieht, wenn die Wellenlänge größer als die Rauigkeit der Oberfläche ist wie z. B. bei einer glatten Wasseroberfläche. Die diffuse Reflexion reflektiert die einfallende Strahlung gleichmäßig in alle Richtungen (siehe Abbildung 2.4b), da die Wellenlänge kleiner als die Rauigkeit der Oberfläche ist. In der Natur verursachen die meisten Oberflächen jedoch eine gemischte Form der Reflexion (siehe Abbildung 2.4c).

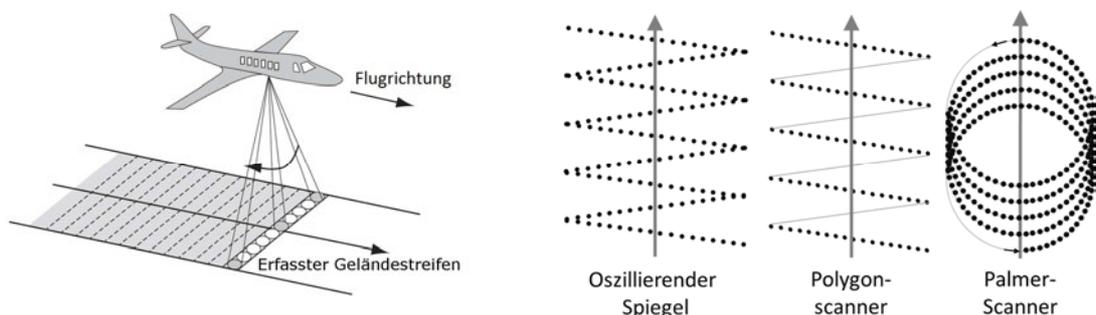
#### 2.1.4 Funktionsprinzip

Ein luftgestütztes LiDAR-System besteht aus vier Hauptkomponenten: einem Laserscanner, einem GPS (Global Positioning System), einer IMU (Inertial Measurement Unit, inertielle Messeinheit) und einer Rechneinheit (siehe Abbildung 2.5).



**Abbildung 2.5:** Komponenten eines LiDAR-Systems.

Der Laserscanner besteht aus einem Sender (Laser), einem Empfänger (Photodiode) und einer Ablenkeinheit, die den Laserimpuls in bestimmten Winkeln quer zur Flugrichtung ablenkt (siehe Abbildung 2.6 links), wodurch ein Geländestreifen entlang des Flugwegs abgetastet wird. Je nach Scannertyp unterscheiden sich die Scanmuster (siehe Abbildung 2.6 rechts). Die Punktdichte auf der Erdoberfläche ist hauptsächlich abhängig vom Scannertyp und der Fluggeschwindigkeit, wird aber auch von der Flugrichtung und der Bodentopographie beeinflusst (Wehr & Lohr 1999). Durch die vorgegebenen Winkel können jedem Laserimpuls ein Richtungsvektor und damit auch polare Koordinaten zugewiesen werden (Heritage & Large 2009). Der Ursprung bzw. Nullpunkt dieser Koordinaten ist die Apertur des Laserscanners.

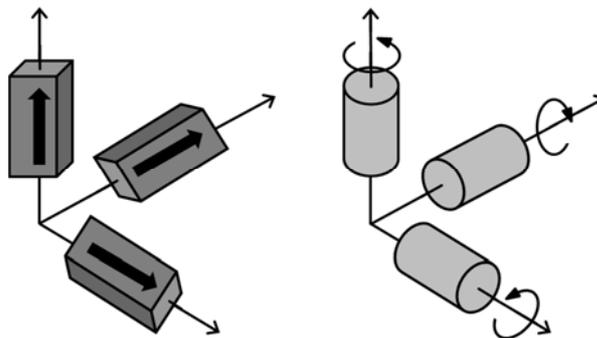


**Abbildung 2.6:** Darstellung der Funktionsweise von luftgestütztem LiDAR (links) und verschiedene Scanmuster (rechts).

Links: Nach Petrie and Toth (2008), Seite 8, verändert

Rechts: Nach Wehr (2008), Seite 146, verändert

Die Position des Flugzeugs wird anhand eines DGPS-Gerätes ermittelt, wobei für das DGPS eine oder mehrere Referenzstationen benötigt werden. Die Positionsangaben des DGPS liegen meist im WGS84-Koordinatensystem vor. Die Orientierung des Flugzeugs wird durch eine IMU (inertiale Messeinheit) bestimmt (Wehr & Lohr 1999). Die IMU registriert sowohl die Drehraten als auch die Beschleunigungen des Flugzeuges (siehe Abbildung 2.7) und hierüber kann zu jeder Zeit die exakte dreidimensionale Ausrichtung des Laserscanners bestimmt werden. Dies ist notwendig, da das Flugzeug (mit dem Laserscanner) nicht immer exakt ausgerichtet werden kann. Der Wind kann z. B. die Ausrichtung des Flugzeugs verändern und diese Änderungen können nicht vom DGPS registriert werden. Bei den IMU-Daten handelt es sich um relative Werte, da sich die einzelnen Angaben aus den vorangegangenen, aufsummierten Werten zusammensetzen. Da sich hierdurch relativ schnell große Fehler aufsummieren könnten, wird die aktuelle Position der IMU mit einer hohen Frequenz (z. B. 10 Hz) vom DGPS aktualisiert (Devereux & Amable 2009). Auf diese Weise können sich keine großen Fehler aufsummieren.



**Abbildung 2.7:** Schematische Darstellung der Beschleunigungen (links) und Drehraten (rechts).

Für eine exakte Geokodierung der einzelnen Laserpunkte werden die Informationen vom Laserscanner, dem DGPS und der IMU in einer Rechneinheit zusammengeführt. Dies erfordert eine exakte zeitliche Synchronisierung der Daten. Aufgrund der teilweise extrem hohen Datenmengen wird dies normalerweise nach der Befliegung durchgeführt. Die Koordinaten der Laserpunkte können nun in das WGS84-System überführt werden, wobei dann jeder Laserpunkt seine exakte Koordinate erhält. Anschließend können diese Koordinaten in ein vom Nutzer vorgegebenes Koordinatensystem umgerechnet und projiziert werden. Der hohe Grad an Automatisierung bei der Erfassung und Synchronisierung der Daten ist ein wesentlicher Vorteil der LiDAR-Technologie.

### **2.1.5 Genauigkeit**

Laut Baltsavias (1999a) hängt die Genauigkeit der 3D-Koordinaten hauptsächlich von der Genauigkeit der Distanzmessung, der Position des Laserstrahls, der Richtung des Laserstrahls und der Umrechnung von WGS84 in das lokale Koordinatensystem ab. Bei der Distanzmessung ist es wichtig, dass die zeitliche Erfassung des ausgesendeten und des reflektierten Impulses immer an der gleichen relativen Position des Signals (typischerweise auf der Anstiegsflanke) stattfindet. Aufgrund der extrem kurzen Zeitintervalle spielt die Genauigkeit des Zeitmessers sowohl hier als auch bei der späteren Synchronisierung der Daten eine bedeutende Rolle. Bei der Positionsbestimmung haben z. B. Faktoren wie die Hardware, die Satellitenkonstellation während des Fluges und die Anzahl und Entfernung der Referenzstationen einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität. Die Güte der IMU-Daten wird u. a. von der Messfrequenz sowie der Nachbearbeitung und Integration mit den DGPS-Daten beeinflusst. Viele der genannten Faktoren sind heutzutage kontrollierbar, so dass meist Genauigkeiten von unter 30 cm (horizontal) bzw. unter 15 cm (vertikal) erreicht werden (Baltsavias 1999b; Large & Heritage 2009).

## **2.2 LiDAR im Gezeitenbereich**

Die Anwendungsbereiche von LiDAR sind sehr vielfältig und decken eine Vielzahl von unterschiedlichen Richtungen ab. Bereits kurz nach der Entwicklung des Lasers wurden luftgestützte Vermessungen durchgeführt. Mit der Entwicklung von Scannersystemen, die eine flächenhafte Erfassung des Geländes ermöglichten, und den GPS- und IMU-Systemen in den 1990er Jahren konnte die LiDAR-Technologie sich rasant entwickeln und wird seitdem in immer mehr Bereichen eingesetzt (Large & Heritage 2009). Zu den aktuellen Anwendungsbereichen gehören z. B. die Archäologie, hochauflösende Geländemodelle, 3D-Vegetationserfassung, Landbedeckungsanalysen, 3D-Stadtmodellierung und die Hydrographie. Diese Auflistung ist bei weitem nicht vollständig und durch die ständige Weiterentwicklung der LiDAR-Technologie wird sie mit großer Wahrscheinlichkeit zukünftig auch noch weiter wachsen. Im Folgenden wird kurz dargelegt, welche Herausforderungen das Wattenmeer an die wissenschaftlichen Methoden stellt und auf welche Art und Weise LiDAR bereits im Wattenmeer eingesetzt wurde.

### **2.2.1 Herausforderungen in der Gezeitenzone**

Das Wattenmeer mit seinen Gezeiten ist ein hochdynamischer Übergangsbereich zwischen Land und Nordsee. Mit seinen trockenfallenden Wattflächen aus Schlick oder Sand, den z. T. tiefen Prielen und der vollständigen Wasserbedeckung bei Hochwasser stellt er die Wissenschaft immer wieder vor große Herausforderungen. Aufgrund der teilweise sehr geringen

Wassertiefen können z. B. Schiffe mit Fächerecholot nicht überall bzw. in manchen Bereichen nur während der kurzen Zeit des höchsten Wasserstandes eingesetzt werden. Auch terrestrische Vermessungsmethoden können aufgrund der Unzugänglichkeit und der kurzen Phase des Niedrigwassers nur sehr begrenzt eingesetzt werden.

Die LiDAR-Technologie zeichnet sich durch mehrere Eigenschaften aus, die besonders im Küstenbereich (und daher auch im Wattenmeer) vorteilhaft sind. Mit LiDAR werden sowohl geometrische (Höhe) als auch radiometrische Informationen (Intensität) erhoben. Je nach eingesetztem Lasertyp und Wellenlänge können auch Bereiche unterhalb der Wasseroberfläche erfasst werden. Auf diese Weise ist die LiDAR-Technologie besonders für die Übergangsbereiche zwischen Land und Wasser geeignet, wo weder hydrographische noch terrestrische Methoden optimal eingesetzt werden können (Chust *et al.* 2010; Nayegandhi *et al.* 2009). Costa *et al.* (2009) zufolge entspricht die Genauigkeit von LiDAR prinzipiell der Genauigkeit von standardmäßig eingesetzten Fächerecholoten, was die LiDAR-Technologie zu einer kosteneffizienten Alternative macht. Mason *et al.* (2000) verglichen die LiDAR-Technologie mit einer Reihe anderer Methoden zur Erfassung von topographischen Daten. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die LiDAR-Technologie im Küsten- und Gezeitenbereich einige wesentliche Vorteile bietet, auch wenn sie nicht ganz an die Genauigkeit von terrestrischen Vermessungsmethoden heranreicht.

### **2.2.2 Geländemodelle und Strukturlinienextraktion**

Da für ein Monitoring des Wattenmeeres eine regelmäßige topographische Erfassung der Wattflächen erforderlich ist und die terrestrischen bzw. hydrographischen Methoden in diesem Gebiet nur schwer einsetzbar sind, hat sich die LiDAR-Technologie als eine geeignete Alternative erwiesen (Baltsavias 1999a; Brzank *et al.* 2008b). Prinzipiell sind bathymetrische LiDAR-Sensoren geeigneter für Bereiche, in denen auch Flächen unter der Wasseroberfläche erfasst werden sollen, als Sensoren, die im infraroten Bereich des Spektrums arbeiten. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass zum einen das Wasser im Wattenmeer oftmals sehr trüb sein kann (Aarup 2002), wodurch die Effektivität eines bathymetrischen Lasers verringert wird, und zum anderen, dass küstennahe Bereiche bei terrestrischen Messkampagnen (mit infraroten Laser) „mitbeflogen“ werden, so dass diese Daten wie im Fall der vorliegenden Arbeit für andere Situationen zweckentfremdet werden können.

Die Daten eines im infraroten Wellenlängenbereich arbeitenden Laserscanners haben jedoch den Nachteil, dass die Laserimpulse an der Wasseroberfläche reflektiert werden und daher nur ein Oberflächenmodell darstellen. Für die Erstellung eines Geländemodells müssen die Wasserflächen in den Prielen oder auf noch nicht trockengefallenen Wattflächen extrahiert

und durch Daten aus anderen Quellen ersetzt werden (Brzank & Heipke 2007; Brzank *et al.* 2009). Brzank *et al.* (2008b) und Brzank *et al.* (2009) nutzten die Parameter Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte in einer überwachten Klassifizierung, um zwischen Watt- und Wasserflächen zu unterscheiden. Für jeden einzelnen Punkt wurde ein Zugehörigkeitsgrad zur Klasse Wasser für die Parameter Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte – unter Berücksichtigung des Scanwinkels – errechnet und zu einer Gesamtzugehörigkeit zur Klasse Wasser zusammengefasst. Um Fehler aufgrund von Höhensprüngen zwischen verschiedenen Flugstreifen und unterschiedlichen Wasserständen bei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten zu vermeiden, wurden die Flugstreifen jeweils separat analysiert. Die abschließende Klassifizierung wurde anhand eines Schwellenwertes durchgeführt.

Da Wasserflächen generell eine geringe Punktdichte haben, haben Brzank and Heipke (2006) den Parameter „missed points“ (Laserimpulse für die keine Reflexion registriert wurde) in ihre Klassifizierung integriert. Dies basiert auf der Annahme, dass ein fehlender Punkt ein Indiz für eine Wasserfläche ist, und dass die Wahrscheinlichkeit für Wasser größer ist, je mehr nebeneinanderliegende Punkte in einer Scanreihe fehlen. Dasselbe Prinzip wurde von Höfle *et al.* (2009) genutzt um Wasserflächen des Flusses Inn in Innsbruck zu identifizieren. Sie modellierten die fehlenden Punkte durch Interpolation innerhalb der Scanreihe und durch Extrapolation, wenn sich die fehlenden Punkte an den Enden einer Scanreihe befanden (der Intensitätswert wurde auf null gesetzt). Sowohl die erfassten als auch die modellierten Punkte wurden dann in einer Punktwolke zusammengefasst und anhand von Parametern basierend auf der Höhe und Intensität segmentiert.

Priele sind wesentliche strukturelle Elemente im Wattenmeer. Eine Erfassung solcher Strukturen zu unterschiedlichen Zeitpunkten kann Aufschluss über morphologische Änderungen geben. Brzank *et al.* (2008a) extrahierten die Strukturlinien über eine Kantendetektion und modellierten mittels einer hyperbolen Tangensfunktion die oberen und unteren Uferkanten eines Prielabschnitts im Bereich der Emsmündung. Der Vergleich der modellierten Uferkanten zwischen den Jahren 2005 und 2007 zeigte, dass sich innerhalb von zwei Jahren sowohl die Länge, die Breite als auch die Neigung der Prielkanten in dem untersuchten Gebiet stark verändert hatten.

Lohani and Mason (2001) und Mason *et al.* (2006) nutzten einen anderen Ansatz zur Extraktion von Prielen aus LiDAR-Daten. Über Kantendetektion und Verbindung von einander gegenüberliegenden Kanten desselben Priels konnten Fragmente eines Prielnetzwerks erstellt werden. In einem weiteren Schritt wurden die Fragmente miteinander verbunden, so dass ein vollständiges Netzwerk entstand.

### **2.2.3 Substraterfassung**

Neben der Erstellung von Geländemodellen, welche u. a. für den Küstenschutz von besonderer Bedeutung sind, ist die Bestimmung von unterschiedlichen Sedimenten und Substraten eine wichtige Aufgabe im Rahmen des Monitorings im Wattenmeer, das durch mehrere nationale, trilaterale, europäische und internationale Richtlinien vorgegeben ist. Für diese Monitoringaufgaben wird bereits seit einiger Zeit die Eignung von Fernerkundungsdaten (hauptsächlich satellitengestützte optische Fernerkundung) getestet. Stelzer *et al.* (2010) nennen als Vorteile dieser Methode die weiträumige und gleichzeitige Erfassung von großen Flächen sowie die automatisierte Klassifizierung mit reproduzierbaren und konsistenten Ergebnissen. Die Nachteile ergeben sich aus der geringen räumlichen Auflösung der Sensoren (30 m) sowie der schlechten zeitlichen Verfügbarkeit von geeigneten Aufnahmen. Letztere wird hauptsächlich durch das Wetter (Wolken), den Gezeiten (Wasserbedeckung der Wattflächen) und einer relativ langen Wiederkehrperiode des Satelliten (die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen eines Gebietes) verursacht.

Seit Kurzem wird daher versucht LiDAR-Daten nicht nur zur Unterscheidung von Wasser- und Wattflächen zu nutzen, sondern auch zur Unterscheidung von verschiedenen Substrattypen. Schmidt *et al.* (2012a) und Schmidt *et al.* (2012b) nutzten die *Conditional Random Fields*-Methode in einer überwachten Klassifizierung, um LiDAR-Daten aus dem niedersächsischen Wattenmeer in die Klassen Wasser, Watt und Muschel zu klassifizieren. Bei dieser Methode werden die Relationen zwischen Nachbarpunkten anhand eines Netzwerkes von Kanten und Knoten in die Klassifizierung miteinbezogen. Auf diese Weise wird die Klassifizierung eines Punktes durch die Klassifizierung des Nachbarpunktes beeinflusst – beispielsweise ist es eher unwahrscheinlich, dass sich mitten in einer Wasserfläche einzelne Muscheln befinden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Klassifizierung von Wasser und Muscheln sehr schwierig ist, aber durch Hinzunahme von Kontextinformationen die Qualität der Klassifikation verbessert werden kann. Die Erkennung von Muscheln erreichte jedoch nur maximal eine Vollständigkeit von 56,5 % und eine Korrektheit von 42,6 %.

## 3 Material und Methode

In diesem Kapitel werden die Testgebiete sowie die Vorgehensweise bei der Datenbearbeitung, der Klassifizierung und der Qualitätsbewertung (inkl. der Vergleichsdaten) erläutert. Folgende Punkte werden dargestellt:

- Testgebiete
- LiDAR-Daten
- Datenbearbeitung
- Klassifizierung
- Eigenschaften der Klassifikationsklassen
- Vergleichsdaten aus dem Muschelmonitoring
- Qualitätsbewertung

### 3.1 Testgebiete

Für diese Arbeit wurden drei Testgebiete im nordfriesischen Wattenmeer ausgewählt. Die Gebiete wurden so ausgewählt, dass die Streifenüberlappung bei den LiDAR-Daten auf maximal zwei Streifen begrenzt war (siehe Abschnitt 3.2), um Probleme aufgrund von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (im Verhältnis zum Niedrigwasser) und einer unterschiedlichen Anzahl von Datenpunkten in verschiedenen Bereichen der einzelnen Testgebiete zu minimieren.

#### 3.1.1 *Muschelbank NA03, Amrum*

Das erste Testgebiet liegt bei Stenodde auf Amrum direkt an der Küste und umfasst die Miesmuschelbank NA03, Wattflächen unterschiedlicher Art sowie Teile eines großen Priels (siehe Abbildung 3.1). Das Gebiet hat eine Nord-Süd-Ausdehnung von 330 m, eine Ost-West-Ausdehnung von 185 m und eine Größe von 61.050 m<sup>2</sup>. Das Gebiet liegt innerhalb der Rechtswerte 3460185 und 3460370 und innerhalb der Hochwerte 6056810 und 6057140 (DHDN 3, Gauß-Krüger Zone 3).

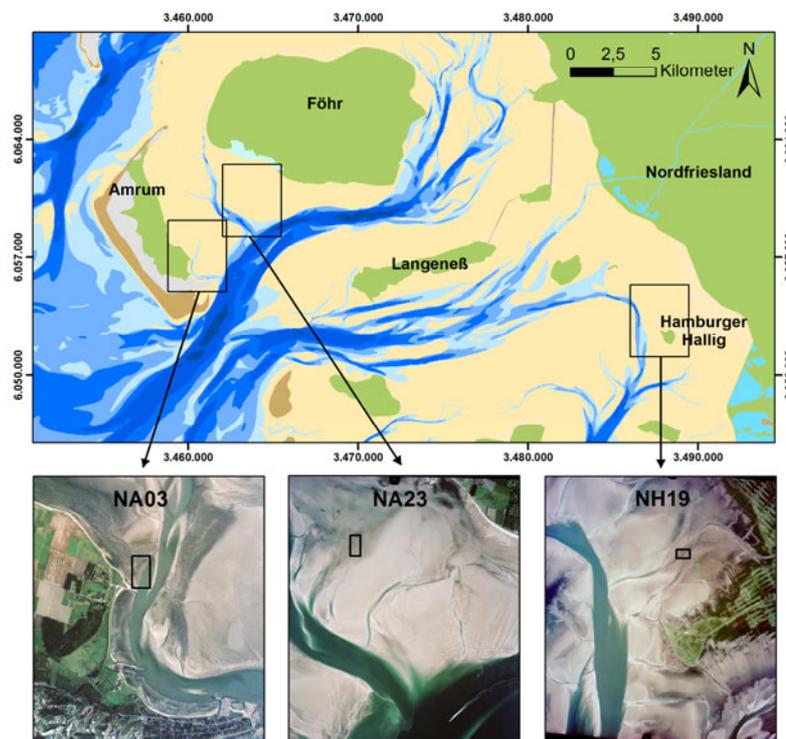
#### 3.1.2 *Muschelbank NA23, Föhr*

Das zweite Testgebiet befindet sich auf den Wattflächen südwestlich von Föhr (siehe Abbildung 3.1). Es handelt sich um einen Teil der Miesmuschelbank NA23, der sehr schmal ist und in nord-südlicher Richtung verläuft, sowie die umliegenden Wattflächen. Das Gebiet hat eine Nord-Süd-Ausdehnung von 395 m, eine Ost-West-Ausdehnung von 190 m und eine Größe

von 75.050 m<sup>2</sup>. Das Gebiet liegt innerhalb der Rechtswerte 3462825 und 3463015 und innerhalb der Hochwerte 6061240 und 6061635 (DHDN 3, Gauß-Krüger Zone 3).

### 3.1.3 Muschelbank NH19, Hamburger Hallig

Das dritte Testgebiet umfasst einen Teil der Miesmuschelbank NH19 nördlich von der Hamburger Hallig (siehe Abbildung 3.1). Das Gebiet hat eine Nord-Süd-Ausdehnung von 185 m, eine Ost-West-Ausdehnung von 285 m und eine Größe von 52.725 m<sup>2</sup>. Das Gebiet liegt innerhalb der Rechtswerte 3488065 und 3488350 und innerhalb der Hochwerte 6054000 und 6054185 (DHDN 3, Gauß-Krüger Zone 3).



**Abbildung 3.1:** Lage der Testgebiete im nordfriesischen Wattenmeer.  
Quelle Luftbilder: Nationalparkamt 2005

## 3.2 LiDAR-Daten

Die Laserscanbefliegung von Schleswig-Holstein wurde in den Jahren 2005 bis 2007 im Auftrag des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein durchgeführt. Die Daten wurden mit dem Optech ALTM3100-Sensor mit einer Messrate von 100 kHz, bei einer Flughöhe von 1100 m und einer Fluggeschwindigkeit von 65 m/s aufgenommen. Die Wellenlänge des Lasers lag im infraroten Bereich. Der Streifenabstand betrug 400 m und der Aufnahmewinkel lag bei maximal

23,0°. Die Lagegenauigkeit lag bei  $\leq 30$  cm und die Höhengenaugigkeit (im flachen Gelände) bei  $\leq 15$  cm. Der durchschnittliche Abstand zwischen den einzelnen Punkten liegt bei diesem Sensor bei  $< 0,7$  m, wobei die Punktdichte jedoch stark vom Bodentyp abhängt.

Die Metadaten der Laserscanbefliegung wurden über einen WFS-Server des Schleswig-Holsteinischen Metainformationssystems<sup>1</sup> in ArcGIS abgefragt. Hierüber wurden die Aufnahmezeitpunkte der Flugstreifen in den einzelnen Testgebieten ermittelt. In Tabelle 3.1 sind diese Aufnahmezeitpunkte sowie der zeitliche Abstand zum Niedrigwasser im jeweiligen Testgebiet aufgeführt. Alle verwendeten LiDAR-Daten wurden vor Niedrigwasser also bei ablaufendem Wasser erhoben.

**Tabelle 3.1: Aufnahmezeitpunkte der LiDAR-Daten für die einzelnen Testgebiete.**

	Datum	Uhrzeit (ca.)	Zeitlicher Abstand zu Niedrigwasser
<b>NA03</b>	14.10.2005	17:25	$\cong 2,5$ Std.
	16.10.2005	16:25	$\cong 3,5$ Std.
<b>NA23</b>	16.10.2005	18:08	$\cong 2,5$ Std.
<b>NH19</b>	13.10.2005	13:20	$\cong 3,0$ Std.

Die Ausgangsdaten für diese Arbeit lagen im XYZI-Format vor. Für jeden einzelnen Laserpunkt waren somit folgende Informationen vorhanden: Rechtswert (X), Hochwert (Y), Höhe (Z, in Relation zum Normalhöhennull) und Intensität (I) der Rückstreuung. Die Rechts- und Hochwerte liegen im Gauß-Krüger-Format vor. Die Laserpunkte der Flugstreifen waren in 1x1 km große Kacheln zusammengefasst. Bei dieser Zusammenfassung wurden mehrfache Überflüge kleinerer Bereiche sowie Überlappungsbereiche nicht berücksichtigt, so dass Daten mehrerer Flugstreifen übereinander liegen. Es wurden daher Testgebiete ausgewählt, für die maximal zwei Flugstreifen angegeben sind. Es kann jedoch aufgrund fehlender Zeitinformationen in den einzelnen Datenpunkten nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Flugstreifen aufgrund von Sensorausfällen keine Daten enthalten. Daher kann nicht bestimmt werden, ob die Daten der ausgewählten Testgebiete Punkte aus einem oder aus zwei Flugstreifen enthalten.

<sup>1</sup> [www.sh-mis.schleswig-holstein.de](http://www.sh-mis.schleswig-holstein.de), Zugriff: Februar & März 2013

### 3.3 Datenbearbeitung

Für alle drei Testgebiete wurden die im Testgebiet liegenden Laserpunkte extrahiert und als Punkt-Featureclass in eine File-Geodatabase überführt. Einzelne Laserpunkte mit extrem hohen Intensitätswerten (visuelle Bestimmung des Schwellenwertes anhand der Histogramme) wurden eliminiert. Die Anzahl der eliminierten Punkte lag zwischen 0,02 % (38 Punkte) und 0,08 % (132 Punkte) der Gesamtpunktezahl. Die Wertebereiche der Höhenwerte umfassten sowohl positive wie auch negative Werte. Da die Höhe im Verhältnis zum Nullniveau in dieser Arbeit nicht von Bedeutung ist, wurden die Wertebereiche so angepasst, dass alle Werte positiv sind.

In dieser Arbeit werden die LiDAR-Daten zwecks Klassifizierung in Rasterlayer umgewandelt, da eine Klassifizierung der Punktwolken nur mittels spezieller (und meist kommerzieller) Software durchgeführt werden kann. Eine solche Software stand für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Zudem müsste sichergestellt sein, dass evtl. Unterschiede in den Absolutwerten der einzelnen Flugstreifen korrigiert worden wären – dies ist für die Intensität nicht gegeben. Daher wurden für die Analyse mit den ArcGIS Tools *Create Fishnet* und *Polygon To Feature* Polygongrids erstellt, in die die numerischen Attribute der Laserscanpunkte pro Gridzelle mittels einer Verlinkung übernommen wurden. Für jedes Testgebiet wurden 3 Polygongrids mit den Zellgrößen 1x1 m, 2x2 m und 3x3 m erstellt. Pro Gridzelle wurden der Mittelwert der Höhen- und der Intensitätswerte, die Standardabweichungen der Höhen- und der Intensitätswerte sowie die Punktdichte für alle in der Gridzelle liegenden Datenpunkte berechnet. Für alle Zellgrößen wurden diese Werte aus den originalen Datenpunkten berechnet, es fand kein Resampling von der kleinsten auf eine größere Zellgröße statt.

Mit dem Tool *Polygon To Raster* wurde für jedes Attribut des Polygongrids (für alle drei Gridgrößen) ein separater Rasterlayer für die nachfolgende Klassifizierung erstellt. Die Zellgröße der Rasterlayer wurde entsprechend der Gridgröße gewählt.

### 3.4 Klassifizierung

Für diese Arbeit wird eine nicht-überwachte Klassifizierung verwendet. Diese basiert auf einer rein statistischen Auswertung der Daten bei der die Pixel in Klassen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften unterteilt werden (Clusterung). Prinzipiell ergeben überwachte Klassifizierungen unter der Verwendung von Referenzdaten bessere Ergebnisse. In diesem Fall jedoch bestehen die einzigen Referenzdaten aus den Daten aus dem Muschelmonitoring. Bei diesen ist jedoch zu beachten, dass die erfassten Flächen auch kleinere Bereiche mit Wasser oder Watt enthalten (siehe Abschnitt 3.6) und somit keine „reinen“ Signaturen darstellen würden. Da zudem keinerlei Informationen über die anderen im Testgebiet vorkommenden Klassen (z. B. unter-

schiedliche Wattsedimente und Wasserflächen) vorliegen, muss auf eine nicht-überwachte Klassifizierung zurückgegriffen werden.

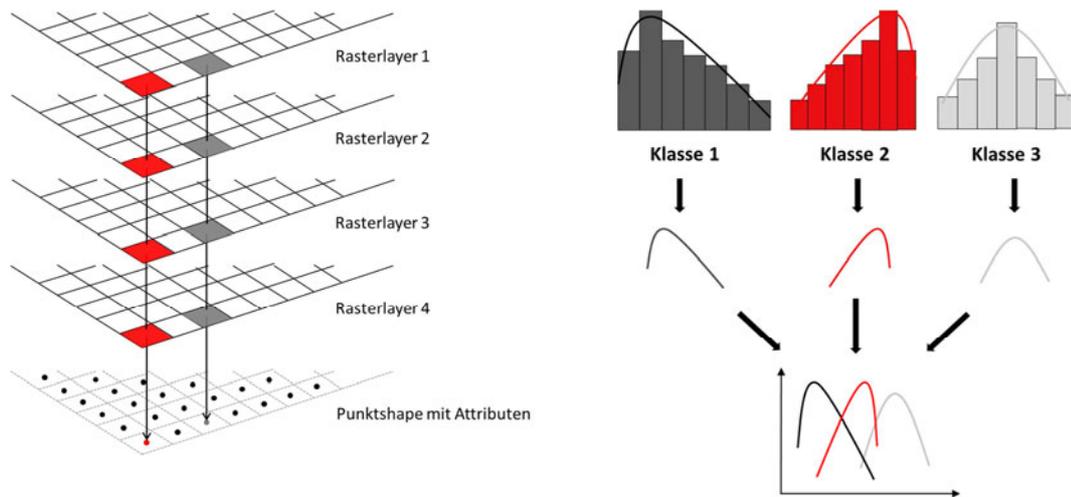
Für die Datenanalyse stand ArcGIS zur Verfügung. Die Signaturen für die Klassifizierung wurden mittels des *Iso Cluster* Tools erstellt, das eine Clusterung anhand eines Teils der Daten aus dem Testgebiet vornimmt. Für die Klassifizierung sämtlicher Daten im Testgebiet wurde die Maximum-Likelihood-Klassifizierung mit den vorher erstellten Signaturen genutzt. Hierbei wird für jedes Pixel die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu den einzelnen Klassen berechnet. Anschließend werden die Pixel der Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Das Ziel dieser Klassifizierung war es, die Muschelflächen als separate Klasse zu erhalten. Eine vollständige und korrekte Separation der restlichen Flächen in z. B. Land, Watt oder Wasser wurde nicht angestrebt.

Der Rasterlayer mit der Klassifikation wurde mit dem Tool *Raster To Polygon* in eine Shape-datei umgewandelt und die als Muschel klassifizierten Polygone wurden aggregiert. Dies geschah, um eine Gesamtfläche für die Muschelbank berechnen und einen Flächenvergleich durchführen zu können. Entsprechend der Vorgehensweise beim Monitoring (siehe Abschnitt 3.6) wurden Polygone, die eine sehr geringe Größe aufwiesen und deutlich von der eigentlichen Muschelbank getrennt vorkamen, eliminiert. Diese Flächen entsprechen zum einen Fehlklassifikationen einzelner Pixel sowie kleiner Muschelansammlungen, die jedoch beim Monitoring auch unberücksichtigt bleiben. Die Kanten der aggregierten Polygone wurden mit dem Tool *Smooth Polygon* geglättet. Sowohl die Eliminierung kleinster Flächen als auch die Kantenglättung wurde durchgeführt, damit die resultierenden Muschelpolygone soweit möglich den Daten aus dem Monitoring entsprechen und die Daten dadurch besser miteinander verglichen werden können.

### 3.5 Eigenschaften der Klassifikationsklassen

Die für die Klassifizierung erstellten Signaturdateien basieren nur auf einem Subset der Daten und liefern nur sehr begrenzte Informationen über die Verteilung der Werte innerhalb der einzelnen Klassen. Aus diesem Grunde wurde jedes Klassifikationsraster in ein Punktshape umgewandelt (*Raster To Point*), wobei für jede Gridzelle ein Punkt erstellt wurde (unabhängig von der Gridgröße). Als Attribut hat jeder Punkt die entsprechende Klassifikationsklasse erhalten. Nun wurden die Werte der Rasterlayer aus der Klassifizierung (Punktdichte, mittlere Intensität etc.) ihrer Position entsprechend als Attribute an dieses Punktshape angehängt (*Extract Multi Values To Points*). Der Prozess ist schematisch in Abbildung 3.2 dargestellt. Auf diese Weise erhält jeder Punkt sowohl die Klassifikationsklasse wie auch die entsprechenden originalen Werte aus den Rasterlayern.

Um die Verteilung der Werte zwischen den Klassen (innerhalb eines Parameters) vergleichen zu können, wurde für jede Klasse ein Histogramm über die Werteverteilung erstellt. Danach wurde für jedes Histogramm eine Kurve abgeleitet. Für einen visuellen Vergleich wurden alle Kurven (der 4 bzw. 5 Klassen aus der Klassifikation) in einer Abbildung dargestellt. Dies ermöglicht eine visuelle Einschätzung der Trennbarkeit der einzelnen Klassen auf Basis der einzelnen Parameter.



**Abbildung 3.2:** Schematische Darstellung der Überführung der Parameterwerte in Attribute eines Punktshapes (links) und Erstellung der Werteverteilungen (rechts).

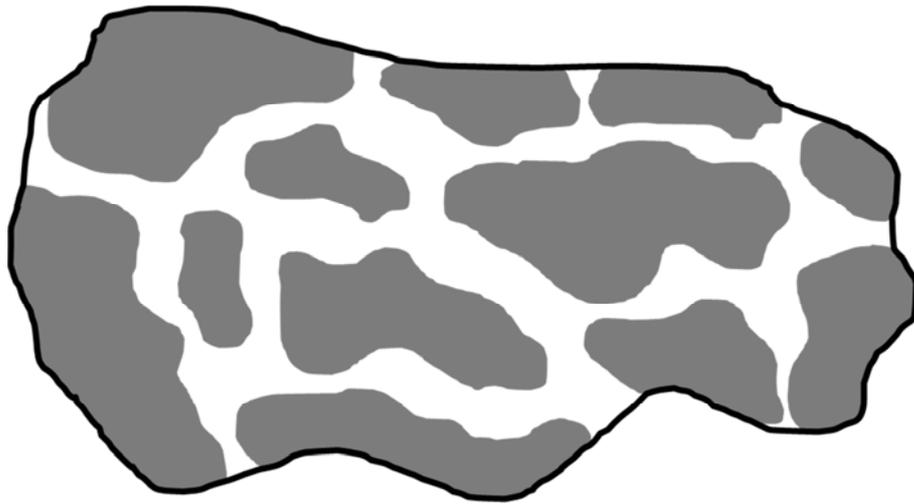
### 3.6 Vergleichsdaten aus dem Muschelmonitoring

Um die Laserscanmethode zur Identifizierung von Muschelbänken bewerten zu können, wurden Daten aus dem Muschelmonitoring des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein aus dem Jahr 2005 zum Vergleich herangezogen. Da die Art und Weise, wie diese Daten erhoben werden, für die spätere Qualitätsbewertung der LiDAR-Methode von großer Bedeutung ist, wird sie hier relativ ausführlich dargestellt. Die folgende Beschreibung der Methodik basiert auf den Ausführungen von Nehls and Büttger (2006).

Das Monitoring der flächenhaften Ausbreitung der Muschelbänke wird anhand von GPS-Kartierungen im Watt und anhand von Luftbildinterpretationen durchgeführt. Aufgrund ihrer Lage und Anzahl können nicht alle Muschelbänke mit GPS vor Ort kartiert werden, so dass ein Teil der Muschelbänke nur anhand von Luftbildinterpretationen erfasst wird.

Bei der Kartierung vor Ort wird der Umriss der Muschelbank (ohne Berücksichtigung von kleineren Watt- und Wasserflächen innerhalb der Muschelbank) abgelaufen während ein GPS-Gerät alle 10 Sekunden die Position aufzeichnet (siehe Abbildung 3.3). Die Grenze zwischen

kleinen verstreuten Muschelansammlungen und einer Muschelbank oder zwischen zwei Muschelbänken ist nicht immer eindeutig definierbar und wird daher z. T. nach persönlicher Bewertung bestimmt. Muschelflächen, die mehr als 25 m von der ursprünglichen Muschelbank entfernt sind, werden normalerweise nicht in die Untersuchung miteinbezogen bzw. werden als einer anderen Muschelbank zugehörig betrachtet.



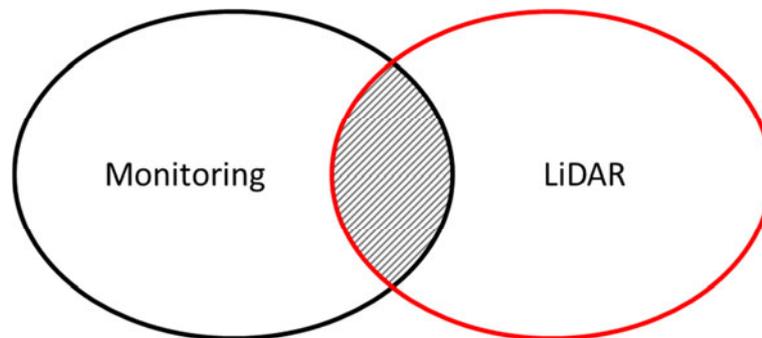
**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung einer Muschelbank (schwarz umrandet) mit Wattflächen (weiß) zwischen den einzelnen Muschelbeeten (grau).  
Nach Nehls and Büttger (2006), Seite 12, verändert

Für die Luftbildinterpretation werden entweder schwarzweiße Aufnahmen im Maßstab 1:15.000 oder farbige Aufnahmen im Maßstab 1:25.000 verwendet. Alle Luftbilder werden georeferenziert und entzerrt. Die Lage und der Umriss einer Muschelbank wird – soweit möglich – analog zu der Vorgehensweise vor Ort ermittelt. Aufgrund von unterschiedlicher Färbung des Wattbodens ist die Identifizierung von Muschelbänken auf den Luftbildern jedoch nicht immer einfach. Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation zwischen GPS-Kartierung und Luftbilddauswertung lag im Jahr 2005 bei 0,59. Prinzipiell ergibt die Luftbilddauswertung kleinere Werte als die Kartierung, da weniger dichte Bereiche der Muschelbänke in den Bildern nur schwer bzw. nicht erkennbar sind.

### 3.7 Qualitätsbewertung

Bei der qualitativen Bewertung der der LiDAR-Methode zur Identifizierung von Muschelbänken wird eine visuelle Gesamtbewertung der Klassifikation vorgenommen. Diese basiert auf den Klassifikationsergebnissen, den Luftbildern und den Daten aus dem Muschelmonitoring.

Für einen Flächenvergleich wurden die Muschelbankflächen aus den LiDAR-Daten mit denen aus dem Muschelmonitoring verschnitten (*Union Tool*). Anhand der Attribute der resultierenden Shapefile konnte festgestellt werden, welche Bereiche nur von einer und welche Bereiche von beiden Methoden als Muschelbank definiert wurden (siehe Abbildung 3.4).



**Abbildung 3.4:** Prinzip des Flächenvergleichs zwischen der LiDAR- und der Monitoringmethode (GPS oder Luftbildinterpretation).

Der Parameter Vollständigkeit ( $V_{LB}$  bzw.  $V_{GPS}$ ) gibt an, welchen Anteil von der Fläche aus dem Monitoring (Luftbildinterpretation oder GPS-Vermessung) die LiDAR-Klassifikation erfasst hat. Sie entspricht damit dem Flächenanteil der LiDAR-Klassifizierung, der auch von dem Monitoring als Muschelbank klassifiziert wurde. In Abbildung 3.4 entspricht dies der grau schraffierten Fläche.

Zu einer Klassifizierung gehört neben einer visuellen Bewertung und einem Flächenvergleich (mit oder ohne Berücksichtigung der Position) prinzipiell auch eine Fehlermatrix (Congalton 2001; Lillesand *et al.* 2008). In einer solchen Fehlermatrix werden in tabellarischer Form die Referenzdaten mit den Klassifikationsergebnissen verglichen. Da in der aktuellen Arbeit nur Referenzdaten für die Muschelbänke vorliegen, kann dementsprechend auch nur ein Vergleich der als Muschel klassifizierten Pixel durchgeführt werden. Dies entspricht dem oben beschriebenen Flächenvergleich, bei dem die Position (durch den Grad der Überlappung der Muschelbankpolygone) berücksichtigt wurde. Der Parameter Vollständigkeit entspricht den bei Fehlermatrizen üblichen Parameter *Producer's Accuracy*, der den Anteil der korrekt klassifizierten Pixel als Teil der Gesamtzahl der Referenzpixel (einer Klasse) darstellt. Bei dem Flächenvergleich wird nur die Fläche anstelle der Pixel eingesetzt, was jedoch dasselbe Ergebnis hervorbringt. Diesem Prinzip folgend ist der Parameter *User's Accuracy* durch die Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel (bzw. der Fläche) als Teil der Gesamtzahl der in dieser Klasse befindlichen Pixel (bzw. der Gesamtfläche) gegeben.

Bei der Qualitätsbewertung werden nur die bearbeiteten Muschelbankpolygone aus der Klassifikation berücksichtigt. Beim Muschelmonitoring werden kleine Muschelflächen und

Muschelbeete außerhalb der größeren Muschelbänke nicht berücksichtigt, so dass eine Entfernung solcher kleineren Flächen aus den Klassifikationen die Vergleichbarkeit der Daten erhöht. Sowohl die Qualitätsbewertung als auch der Flächenvergleich werden unter der Annahme durchgeführt, dass die Daten aus dem Muschelmonitoring der Wirklichkeit entsprechen. Jedoch zeigt schon die Korrelation zwischen der GPS-Vermessung und der Luftbildinterpretation, dass diese Annahme nicht korrekt ist. Die GPS-Daten werden direkt vor Ort erhoben, scheinen aber zumindest teilweise durch die oben genannten Schwierigkeiten bei der Trennung von kleinen Muschelflächen und Muschelbänken beeinflusst zu sein. Eine Bewertung der Ergebnisse der LiDAR-Klassifizierung muss daher berücksichtigen, auf welche Art und Weise die Vergleichsdaten erhoben worden sind.

## 4 Ergebnisse

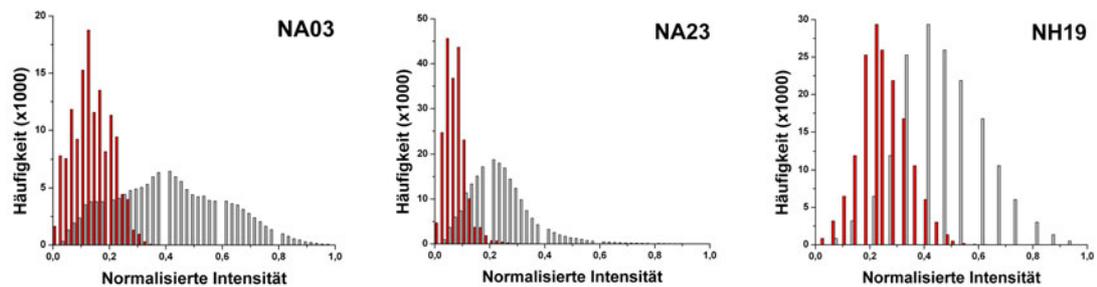
### 4.1 Datengrundlage

Die Anzahl der aufgenommenen Laserpunkte pro Testgebiet liegt zwischen 137.139 und 214.658. Da die Intensitätswerte aller drei Gebiete aufgrund von einer relativ geringen Anzahl von Extremwerten eine schiefe Verteilung zeigt (siehe Abbildung 4.1), wurden diese Extremwerte aus den Daten entfernt. In den drei Gebieten wurden 99 Punkte (NA03), 38 Punkte (NA23) bzw. 132 Punkte (NH19) entfernt. In Tabelle 4.1 sind die Anzahl der Laserpunkte sowie die minimalen und maximalen Intensitätswerte vor und nach der Entfernung der Extremwerte dargestellt. In den Gebieten NA03 und NA23 wurde der Wertebereich der Intensität durch die Entfernung der Extremwerte um ca.  $\frac{2}{3}$  verringert, während im Gebiet NH19 der Wertebereich halbiert wurde. Zwischen den Gebieten NA03/NA23 und dem Gebiet NH19 besteht ein deutlicher Unterschied im Wertebereich, sowohl vor als auch nach der Entfernung der Extremwerte.

**Tabelle 4.1:** Anzahl Laserpunkte sowie minimale und maximale Intensitätswerte für die drei Testgebiete vor und nach der Entfernung der Extremwerte.

	Vor Entfernung der Extremwerte			Nach Entfernung der Extremwerte		
	Anzahl Punkte	Min.	Max.	Anzahl Punkte	Min.	Max.
<b>NA03</b>	137.139	1	130	137.040	1	45
<b>NA23</b>	214.658	1	136	214.620	1	45
<b>NH19</b>	163.398	1	27	163.266	1	15

In der Abbildung 4.1 sind die Histogramme der Intensitätswerte aller drei Gebiete dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Intensitätswerte mittels des Maximalwertes normalisiert. Trotz der Reduzierung des Wertebereiches im Gebiet NA23 um ca.  $\frac{2}{3}$  ist die Verteilung der Intensitätswerte noch nicht optimal, da der weitaus größte Anteil der Daten innerhalb des Bereiches von 0 bis 0,5 liegt. Um eine über den Wertebereich mehr oder weniger gleichmäßige Verteilung zu bekommen, müsste jedoch eine deutlich größere Anzahl von Punkten entfernt werden. Eine solche Anzahl von Punkten kann dann allerdings nicht mehr als Ausreißer bezeichnet werden. Als mögliche Ursache hierfür käme allerdings eine örtliche Störung der Kleinmorphologie in Betracht.



**Abbildung 4.1:** Histogramme der normalisierten Intensitätswerte vor (rot) und nach (grau) der Entfernung der Extremwerte für die Muschelbänke NA03, NA23 und NH19.

## 4.2 Klassifikationen

Die für die Klassifizierung verwendeten Parameter sind von der Höhen- bzw. Intensitätsinformation der Laserpunkte abgeleitet. Ein zusätzlicher Parameter ist die Punktdichte pro Gridzelle. Alle Parameter sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Es hat sich herausgestellt, dass eine Klassifizierung mit 5 Klassen am geeignetsten ist. Hierdurch können verschiedene Klassen für unterschiedliche Sedimente bzw. Land- und Wasserbereiche erstellt werden, während eine separate Klasse die Muschelflächen erfasst. Bei größeren Gridgrößen resultiert die Klassifizierung z. T. nur in 4 Klassen.

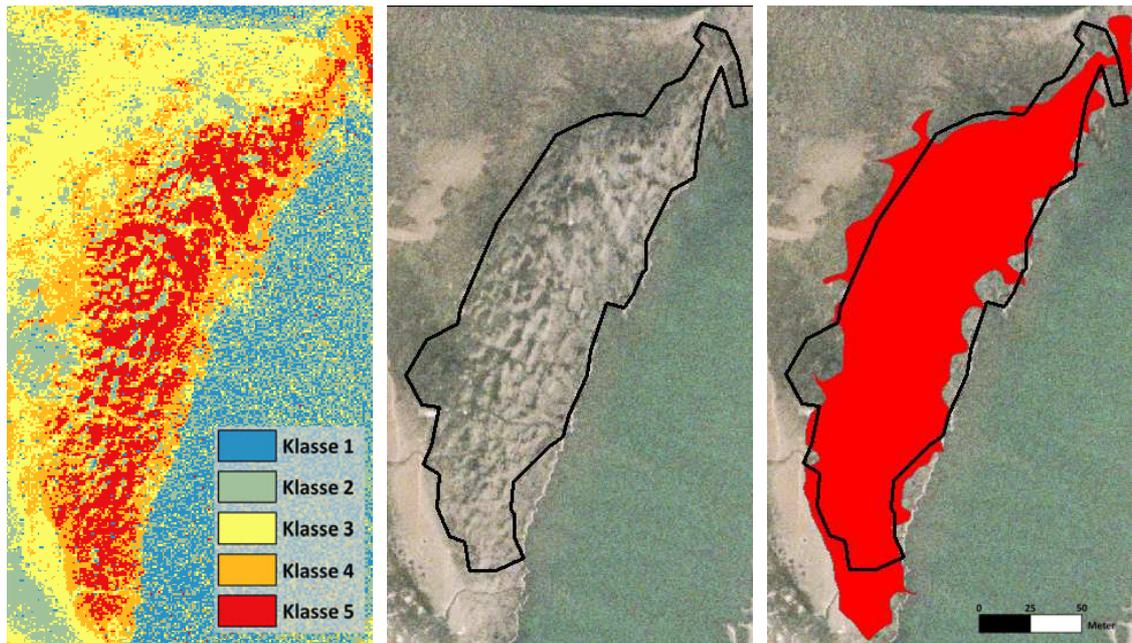
**Tabelle 4.2:** Übersicht der in der Klassifizierung verwendeten Parameter.

Intensität	Höhe	Anzahl Punkte
Mittlere Intensität	Mittlere Höhe	Punktdichte
Standardabweichung Intensität	Standardabweichung Höhe	

Die Klassifikation der Muschelbank NA03 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem auf der Luftbildinterpretation basierenden Umriss der Muschelbank (Abbildung 4.2). Deutlich zu sehen ist auch die Wasserkante entlang der rechten Seite der Muschelbank. Innerhalb der Muschelbank gibt es viele kleinere Flächen, die der Signatur von Wasser entsprechen. Hierbei handelt es sich um kleinere Wasserflächen innerhalb der Muschelbank, wie sie auf dem Foto in Abbildung 4.3 zu sehen sind. Beide Fotos in Abbildung 4.3 wurden nach Niedrigwasser aufgenommen. Dies verdeutlicht, dass solche Wasserflächen für die gesamte Zeit, in der die Muschelbank trockenfällt, bestehen und dass sie bei ablaufendem Wasser mindestens genauso groß wenn nicht sogar noch größer sind.

Am unteren und oberen Ende der Muschelbank ist die Übereinstimmung zwischen Klassifikation und Luftbildinterpretation geringer. Dies mag daran liegen, dass Muschelbänke im

Luftbild nicht mit einer sehr hohen Präzision erfasst werden können. Zudem werden Muschel­flächen bzw. Muschelbeete, die durch mehr als 25 m von der Ausgangsmuschelbank getrennt sind, im Monitoring nicht erfasst (Nehls & Büttger 2006). Interessant ist auch die kleine Ausbuchtung auf der westlichen Seite des Muschelbankumrisses aus dem Monitoring. In diesem Bereich tauchen in allen drei Gridgrößen (siehe Abbildung 4.6) kaum Muschelsignaturen auf.

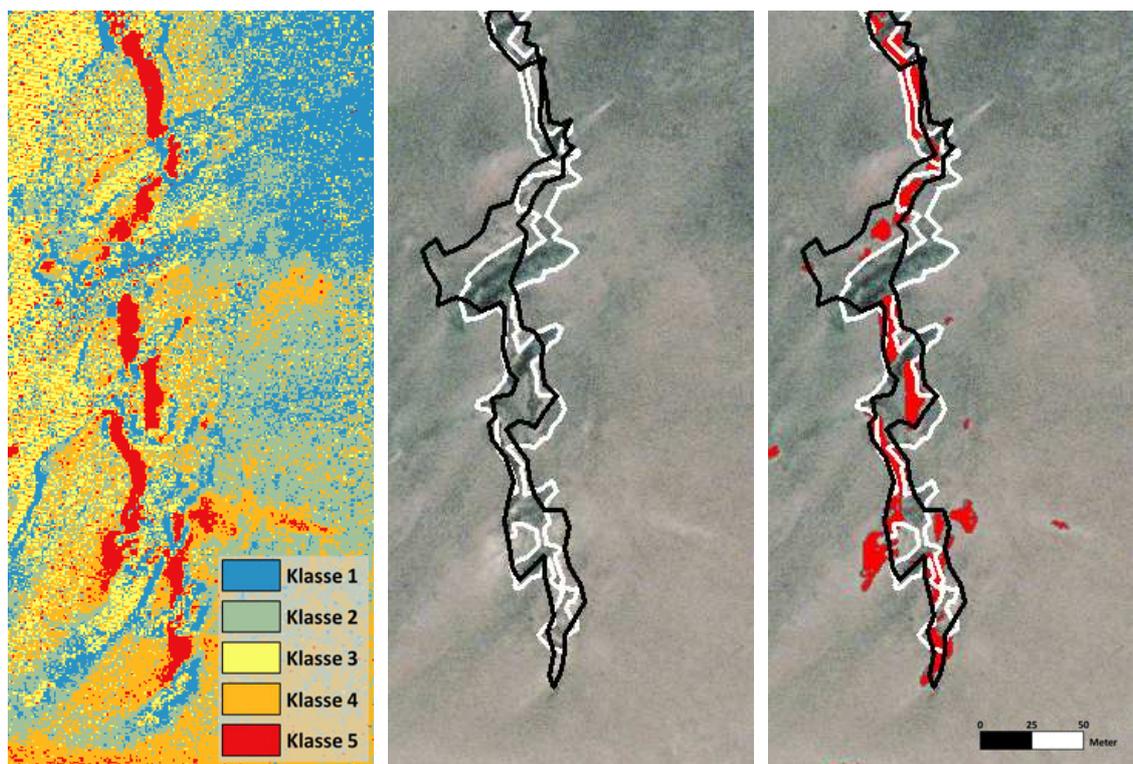


**Abbildung 4.2:** Muschelbank NA03, 1x1 m: Gesamtklassifikation (links), Luftbild mit Muschelbankumriss aus Monitoring (Mitte) und zusätzlich mit bearbeiteter Muschelbankfläche aus Klassifikation (rechts). Gleichmaßstäbliche Darstellung.



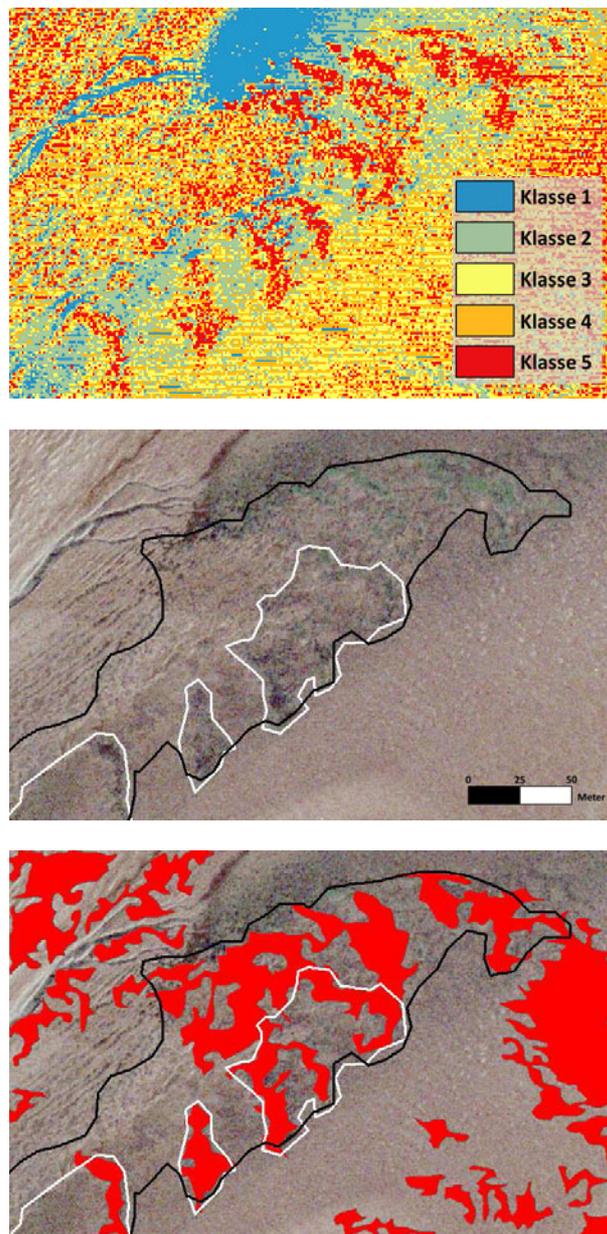
**Abbildung 4.3:** Fotos der Muschelbank NA03 vom Sommer 2012.  
Fotos: G. Müller

Die Klassifikation der Muschelbank NA23 südlich von Föhr zeigt eine generelle Übereinstimmung mit den Daten aus dem Monitoring (Abbildung 4.4). Hier wird allerdings auch deutlich, dass die Daten aus dem Monitoring aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsmethoden (Luftbildinterpretation und GPS-Vermessung) voneinander abweichen können. Zudem sind in dieser Klassifikation viele Bereiche zwischen den Muschelflächen als Wasser klassifiziert (z. B. im oberen rechten Bildbereich), die im Luftbild nicht als Wasserflächen erkennbar sind. Da die Laserscanbefliegung dieser Muschelbank einen zeitlichen Abstand von ca. 2,5 Std. zu Niedrigwasser hatte, sind einige Bereiche, die bei der GPS-Vermessung als Muschelbank klassifiziert worden sind, evtl. noch nicht trockengefallen. Da der verwendete Laser die Wasseroberfläche nicht durchdringen kann, werden diese Bereiche dann als Wasser klassifiziert, obwohl unter der Wasseroberfläche Muscheln vorhanden sein können. Wie auch bei der Muschelbank NA03 wird hier deutlich, dass die Luftbildinterpretation hauptsächlich die dunkleren Bereiche im Luftbild als Muschelbank identifiziert, während sowohl bei der GPS-Vermessung als auch der LiDAR-Klassifizierung auch hellere Bereiche als Muschelbank ausgewiesen werden.



**Abbildung 4.4:** Muschelbank NA23, 1x1 m: Gesamtklassifikation (links), Luftbild mit Muschelbankumriss (schwarz: GPS, weiß: Luftbildinterpretation) aus Monitoring (Mitte) und zusätzlich mit bearbeiteter Muschelbankfläche aus Klassifikation (rechts). Gleichmaßstäbliche Darstellung.

Die Klassifikation der Muschelbank NH19 bei der Hamburger Hallig ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Es sind mehrere Bereiche mit einer Muschelsignatur zu erkennen, jedoch gibt es auch große Flächen (links oben und rechts im Bild), in denen sehr viele kleine und nicht-zusammenhängende Bereiche als Muschel klassifiziert sind. Zudem gibt es in dieser Klassifikation ein horizontales Streifenmuster, das auf Probleme bei der Datenerhebung zurückzuführen sein könnte.



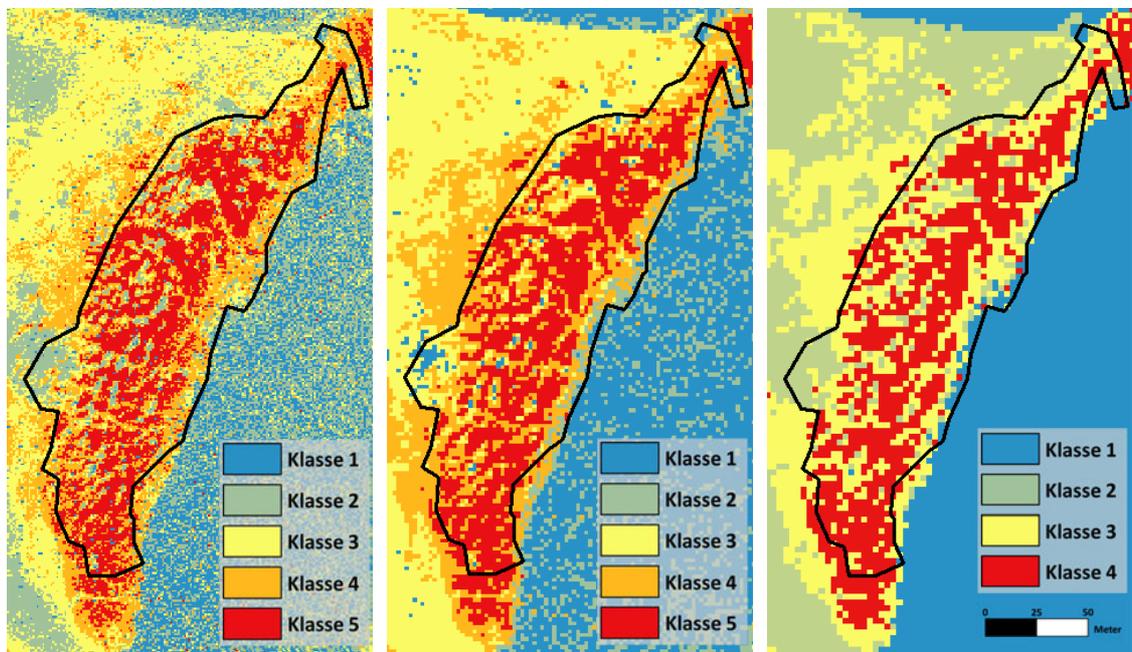
**Abbildung 4.5:** Muschelbank NH19, 1x1 m: Gesamtklassifikation (oben), Luftbild mit Muschelbankumriss (schwarz: GPS, weiß: Luftbildinterpretation) aus Monitoring (Mitte) und zusätzlich mit bearbeiteter Muschelbankfläche aus Klassifikation (unten). Gleichmaßstäbliche Darstellung.

Wie bei der Muschelbank NA23 gibt es auch hier Unterschiede zwischen den Erhebungen durch Luftbildinterpretation und GPS-Vermessung. Im Gegensatz zur Muschelbank NA23 sind diese Unterschiede hier jedoch sehr stark ausgeprägt (siehe auch den Abschnitt Flächenvergleich auf Seite 45). In der Klassifikation (Abbildung 4.5 oben) sind die deutlichsten Muschel-signaturen als halbmondförmige Strukturen entlang der Diagonale von unten links nach oben rechts im Bild zu erkennen. Wie bei der Muschelbank NA23 sind auch hier Bereiche mit einer Wassersignatur zwischen den Muschelflächen erkennbar. Die LiDAR-Aufnahmen in diesem Bereich wurden ca. 3 Std. vor Niedrigwasser gemacht und das Wasser scheint dementsprechend hier noch nicht komplett abgelaufen zu sein.

An der bearbeiteten Muschelbankfläche (Abbildung 4.5 unten) ist zu erkennen, dass auch große Flächen außerhalb der Monitoringflächen als Muschelbank klassifiziert worden sind. Dies gilt besonders für Flächen im oberen linken und im rechten Bildbereich. Diese Flächen haben im Luftbild eine eher helle Signatur und könnten auf trockenen Sand zurückzuführen sein, der in den LiDAR-Daten evtl. eine ähnliche Signatur erzeugt wie die Muscheln. Da es sich hierbei um größere Flächen handelt, können sie nicht einfach als „Fehlklassifikation“ definiert werden (zumal aufgrund von nicht-vorhandenen Referenzdaten nicht ausgeschlossen werden kann, dass hier auch Muscheln vorhanden sind). Dies hat jedoch dementsprechende Auswirkungen auf den Flächenvergleich (siehe Abschnitt 4.5.2).

### 4.3 Einfluss der Gridgröße

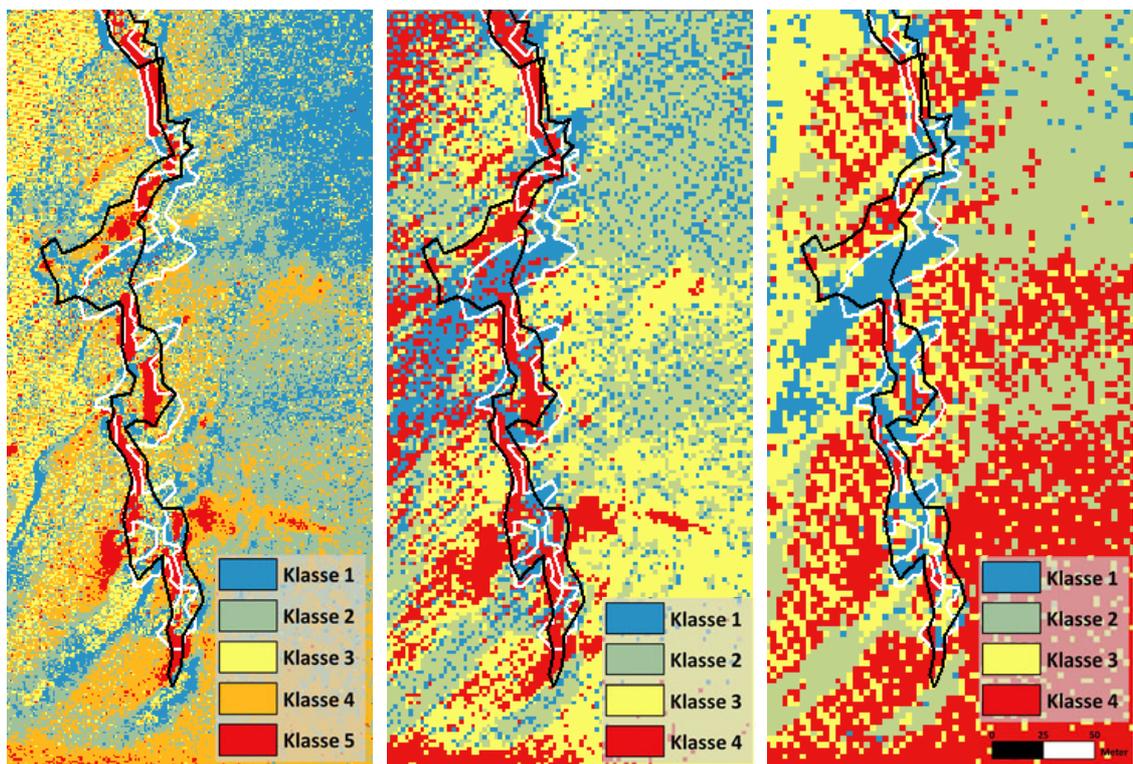
Für alle drei Muschelbänke wurden die Klassifikationen mit drei unterschiedlichen Gridgrößen durchgeführt: 1x1 m, 2x2 m und 3x3 m. Bei der Muschelbank NA03 vor Amrum (Abbildung 4.6) zeigt sich, dass die Muschelbank bei allen drei Gridgrößen deutlich zu erkennen ist, jedoch eine unterschiedlich große Gesamtfläche einnimmt (für einen detaillierten Flächenvergleich siehe Seite 45). Bei den Gridgrößen 1x1 m und 2x2 m resultiert die Klassifizierung in 5 Klassen, während bei der Gridgröße 3x3 m nur noch 4 Klassen erstellt werden. Durch diese Reduzierung der Klassenzahl ergibt sich eine vollständige und eindeutige Zuordnung der Wasserflächen zur Klasse 1. Im Gegenzug verschwinden jedoch die kleineren als Wasser klassifizierten Flächen innerhalb der Muschelbank und auch die Form der einzelnen Muschelbeete ist nicht mehr so deutlich erkennbar. Bei der Mittelung der Werte in den Gridzellen und der Erhöhung der Gridgrößen sollte beachtet werden, dass hierbei sowohl das Rauschen in den Daten als auch sehr kleinskalige Details verloren gehen. Die als Muschel oder Watt klassifizierten Pixel, die innerhalb des Priels liegen sind auf Datenrauschen und daraus resultierenden Fehlklassifikationen zurückzuführen. Ob solche Einzelpixel aus anderen Bereichen des Testgebietes auf Rauschen oder auf kleinste morphologische Strukturen zurückzuführen sind, kann jedoch nicht geklärt werden.



**Abbildung 4.6:** Vergleich der Klassifikationen von NA03 mit den Gridgrößen 1x1 m (links), 2x2 m (Mitte) und 3x3 m (rechts). Gleichmaßstäbliche Darstellung.

Bei der Muschelbank NA23 zeigt sich eine etwas andere Situation (Abbildung 4.7). Bei der Gridgröße von 1x1 m sind die einzelnen Muschelflächen gut zu erkennen, jedoch werden

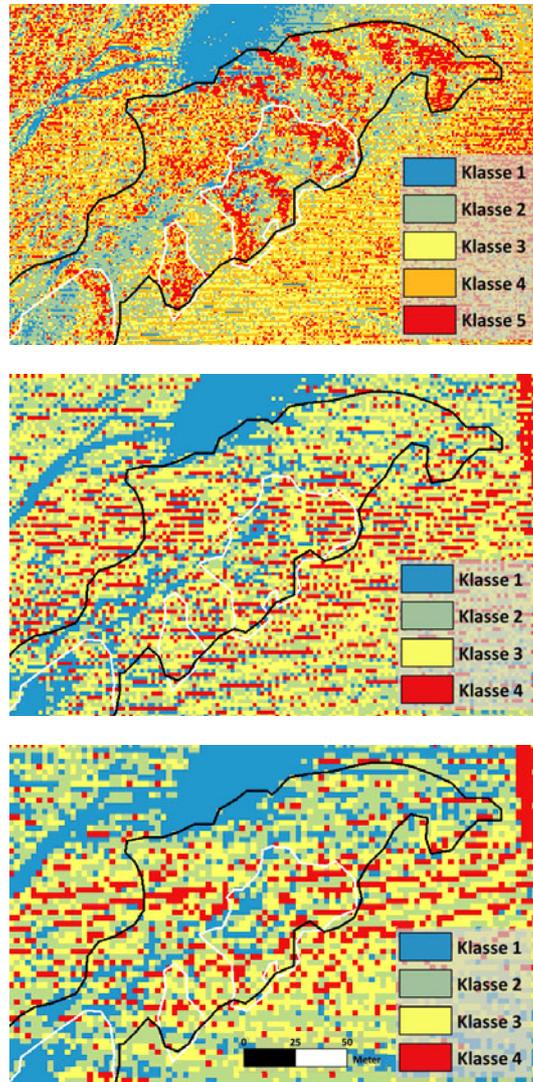
bereits ab einer Gridgröße von 2x2 m deutlich mehr Flächen als Muschel klassifiziert (links im Bild) und bei einer Gridgröße von 3x3 m ist eine separate Klasse mit Muschelflächen nicht mehr vorhanden. Im Gegensatz zu Abbildung 4.5 (oben) und Abbildung 4.8 ist hier jedoch kein Streifenmuster zu erkennen, das als Ursache für die schlechte Klassifikation in Frage käme. Beachtenswert ist, dass die als Muschel klassifizierten Flächen bei der 1x1 m Gridgröße auch bei der 2x2 m Gridgröße noch als Muschel (hier als Klasse 4) vorhanden sind, allerdings auch viele Bereiche im linken Bildbereich zusätzlich in diese Klasse integriert worden sind. Bei der Gridgröße 3x3 m sind viele dieser „Muschelbereiche“ aus der 1x1 m Klassifikation in verschiedene Klassen (Klassen 1 und 3) aufgeteilt worden. Bei der Gridgröße 3x3 m scheint daher eine vollständige Neuordnung der einzelnen Pixel stattgefunden zu haben. Dies ist im starken Kontrast zur Muschelbank NA03, bei der eine Erhöhung der Gridgröße keinen derartigen Einfluss auf das Gesamtbild von Muschelbank, Wasser- und Wattflächen hat. Bei Muschelbank NA23 liefert daher nur die Gridgröße von 1x1 m ein interpretierbares Ergebnis im Verhältnis zu den Daten aus dem Muschelmonitoring.



**Abbildung 4.7:** Vergleich der Klassifikationen von NA23 mit den Gridgrößen 1x1 m (links), 2x2 m (Mitte) und 3x3 m (rechts). Gleichmaßstäbliche Darstellung.

Bei der Muschelbank NH19 ist bereits die Klassifikation mit einer Gridgröße von 1x1 m nicht optimal, da im Nordosten sowie im Westen sehr viele Bereiche als Muschel klassifiziert werden, obwohl diese Flächen weder im Luftbild noch bei der GPS-Vermessung als Muschelbank erkannt wurden. Es ist jedoch zu sehen, dass ein großer Teil der im Luftbild identifizierten

Muschelbank auch in der Klassifikation als Muschelfläche ausgewiesen ist. Die Klassifikationen mit den Gridgrößen 2x2 m und 3x3 m zeigen bereits keinerlei separate Muschelklasse mehr. Nur die Wasserflächen im oberen linken Bildbereich sowie in der Diagonale von unten links nach oben rechts treten bei allen drei Gridgrößen deutlich hervor.



**Abbildung 4.8:** Vergleich der Klassifikationen von NH19 mit den Gridgrößen 1x1 m (oben), 2x2 m (Mitte) und 3x3 m (unten). Gleichmaßstäbliche Darstellung.

Wie weiter oben schon erwähnt tritt bei dieser Muschelbank ein deutliches horizontales Streifenmuster auf. Dies ist bereits bei der Gridgröße von 1x1 m zu erkennen, wird bei den anderen Gridgrößen jedoch noch deutlicher. Da das horizontale Muster in etwa der Scanrichtung entspricht (Flugrichtung war Nord-Süd), könnte dies auf ein Problem bei der Datenaufnahme hindeuten.

#### 4.4 Eigenschaften der Klassifikationsklassen

Die Ergebnisse aus den Klassifikationen (Abschnitt 4.2) und der Analyse der Gridgröße (Abschnitt 0) haben gezeigt, dass die LiDAR-Daten in einigen Situationen eine gute Erkennung der Muschelflächen ermöglichen, während die Ergebnisse in anderen Situationen nicht eindeutig sind. Um herauszufinden, welche Parameter den größten Einfluss auf die Klassifikation haben, wurden die Verteilungen der Werte der einzelnen Klassifikationsklassen analysiert (siehe Abschnitt 3.5 für die Vorgehensweise). Im Folgenden werden diese Werteverteilungen für alle Klassifikationen und Gridgrößen dargestellt. Für die Testgebiete NA23 und NH19 werden nur Daten aus den Klassifikationen gezeigt, die ein aussagekräftiges Ergebnis zeigten.

Für die Muschelbank NA03 (Gridgröße 1x1 m) sind die Werteverteilungen in Abbildung 4.9 gezeigt. Die deutlichste Unterscheidung der Werteverteilung ist beim Parameter mittlere Intensität zu sehen. Hier stellt sich die Klasse 5 (Muschel) als Klasse mit den höchsten Werten und einer geringen Überlappung mit Klasse 4 im Wertebereich 25 bis 30 dar. Beim Parameter mittlere Höhe gibt es einen Unterschied zwischen den Klassen 1 und 2 und den Klassen 3, 4 und 5. Dieser Unterschied ist jedoch bei Weitem nicht so deutlich wie bei der mittleren Intensität. Bei den Standardabweichungen der Intensität und der Höhe wie auch bei der Punktdichte überlappen sich die Wertebereiche der 5 Klassen so stark, dass keine Trennung möglich ist.

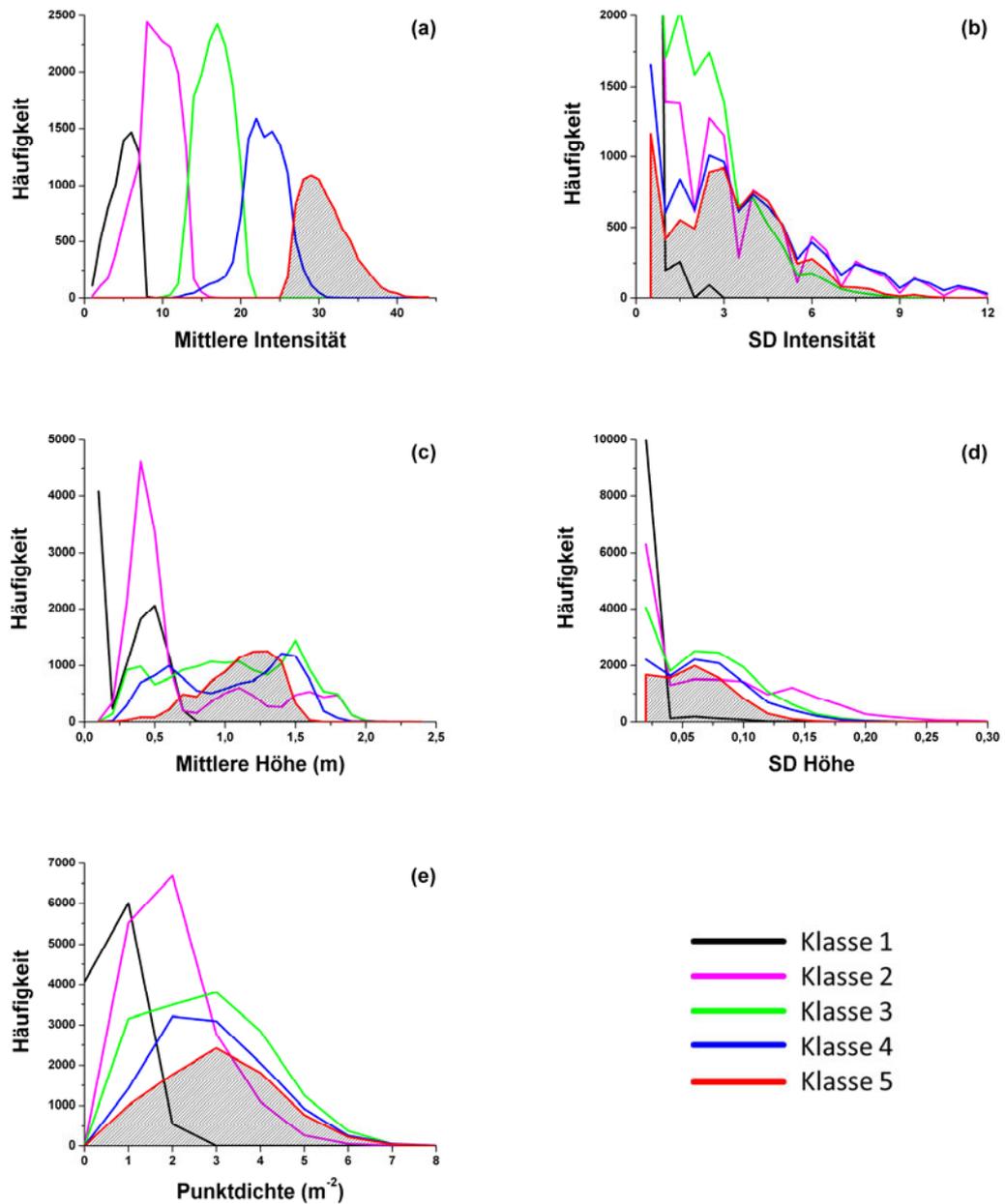
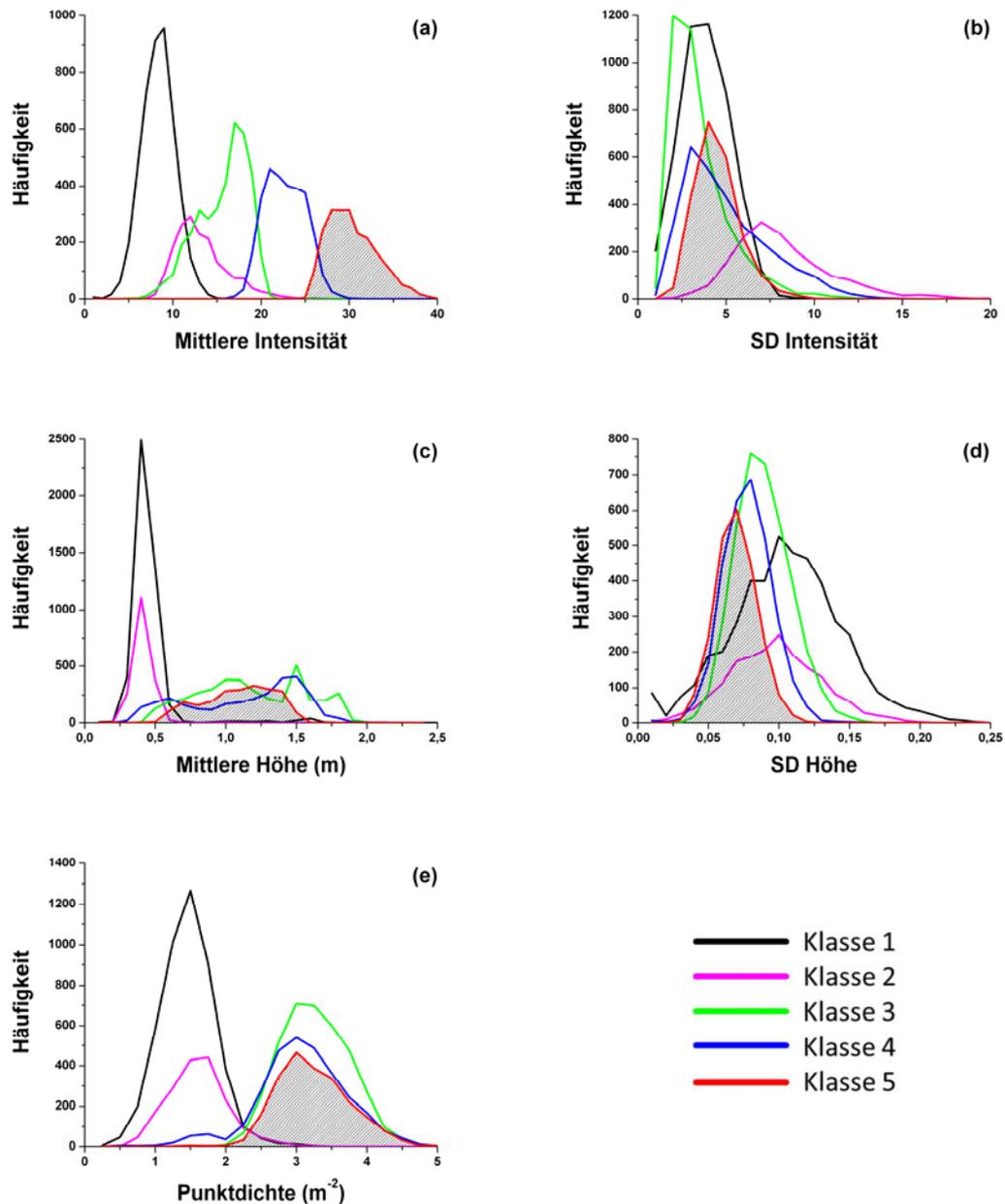


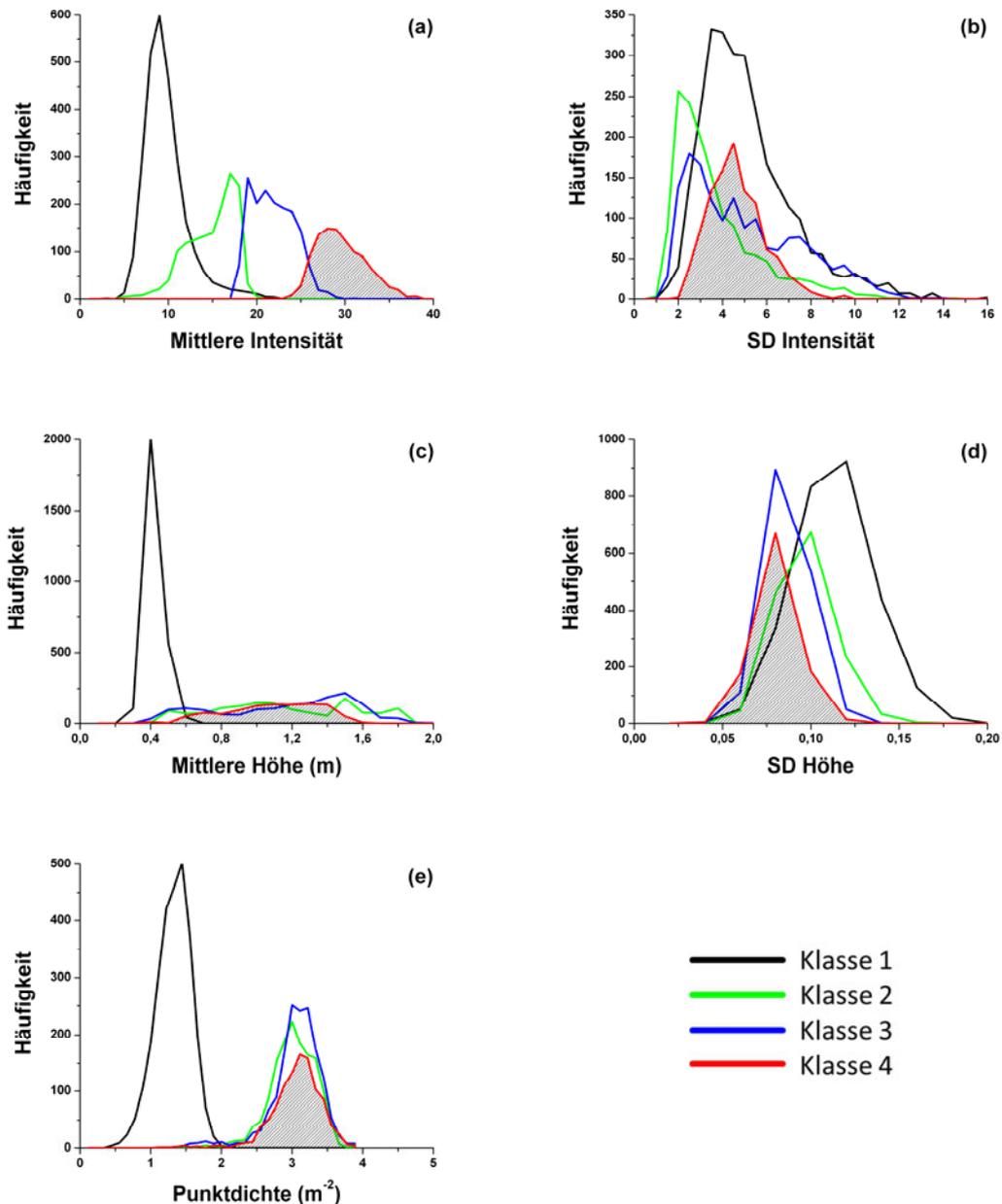
Abbildung 4.9: Werteverteilung von NA03 (1x1 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).



**Abbildung 4.10:** Werteverteilung von NA03 (2x2 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).

Bei der Gridgröße 2x2 m (Abbildung 4.10) zeigt sich eine Verschiebung der Werteverteilung in den Parametern mittlere Intensität und Punktdichte. Bei der mittleren Intensität überlappen sich die Klassen 2 und 3 wesentlich mehr, während die Klasse 5 allerdings weiterhin den höchsten Wertebereich (25 bis 40) einnimmt. Bei der Punktdichte liegen die Werteverteilungen von den Klassen 1 und 2 sowie die Verteilungen von den Klassen 3, 4 und 5 jeweils übereinander. Diese beiden Gruppen sind allerdings deutlich voneinander zu unterscheiden. Die Klassen 1 und 2 sind in den Klassifikationen als Wasser erkennbar, so dass eine „Verschmelzung“ dieser beiden Klassen zu erwarten war. Bei der mittleren Höhe ist eine

ähnliche, aber nicht so deutliche Gruppierung sichtbar. Wie auch bei der vorherigen Gridgröße sind die Werteverteilungen anhand der Standardabweichungen der Intensität und der Höhe nicht zu unterscheiden.



**Abbildung 4.11:** Werteverteilung von NA03 (3x3 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 4 (grau schraffiert).

Bei der Gridgröße 3x3 m (Abbildung 4.11) setzen sich die Trends aus den kleineren Gridgrößen fort und es sind nur noch 4 Klassen vorhanden, wobei anhand der Kurvenformen zu erkennen ist, dass die Klassen 1 und 2 aus den vorherigen Klassifikationen miteinander verschmolzen sind. Anhand der Punktdichte ist eine klare Trennung zwischen der Klasse Wasser (Klasse 1)

und den restlichen Klassen möglich. Die Punktdichte der Muschelklasse unterscheidet sich jedoch nicht von den zwei übrigen Klassen. Wieder ist hier die mittlere Intensität derjenige Parameter, anhand dessen die Muschelflächen identifiziert werden können. Allerdings ist auch hier wieder ein kleiner Überlappungsbereich (Wertebereich 25 bis 30) mit der Klasse 3 zu sehen. Anhand der mittleren Höhe wird deutlich, dass bis auf die Klasse Wasser (Klasse 1), alle Klassen über fast den gesamten Höhenbereich verteilt sind. Die Klasse Wasser dagegen erstreckt sich nur über einen kleinen Höhenbereich (ca. 0,2 bis 0,5). Dass dieser Höhenbereich nicht ganz am unteren Ende des Wertebereiches liegt, deutet darauf hin, dass es in den Höhenwerten der Ausgangsdaten einige Ausreißer gibt, dessen Werte unter denen des Priels liegen.

Bei der Muschelbank NA23 (1x1 m, Abbildung 4.12) fällt sofort auf, dass die Fläche der als Muschel identifizierten Klasse (Klasse 5, grau schraffiert) im Verhältnis zu den anderen Klassen sehr gering ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Muschelbank NA23 nur einen relativ geringen Teil des gesamten Testgebietes ausmacht. Wie schon bei der Muschelbank NA03 ist auch hier ein deutlicher Unterschied in der mittleren Intensität zwischen den meisten Klassen festzustellen. Die Muschelklasse liegt wiederum im oberen Wertebereich (17 bis 40) und daher kann die mittlere Intensität auch hier als Trennungskriterium verwendet werden. Die Werteverteilungen in den anderen Parametern lassen keine Trennung der Klassen zu.

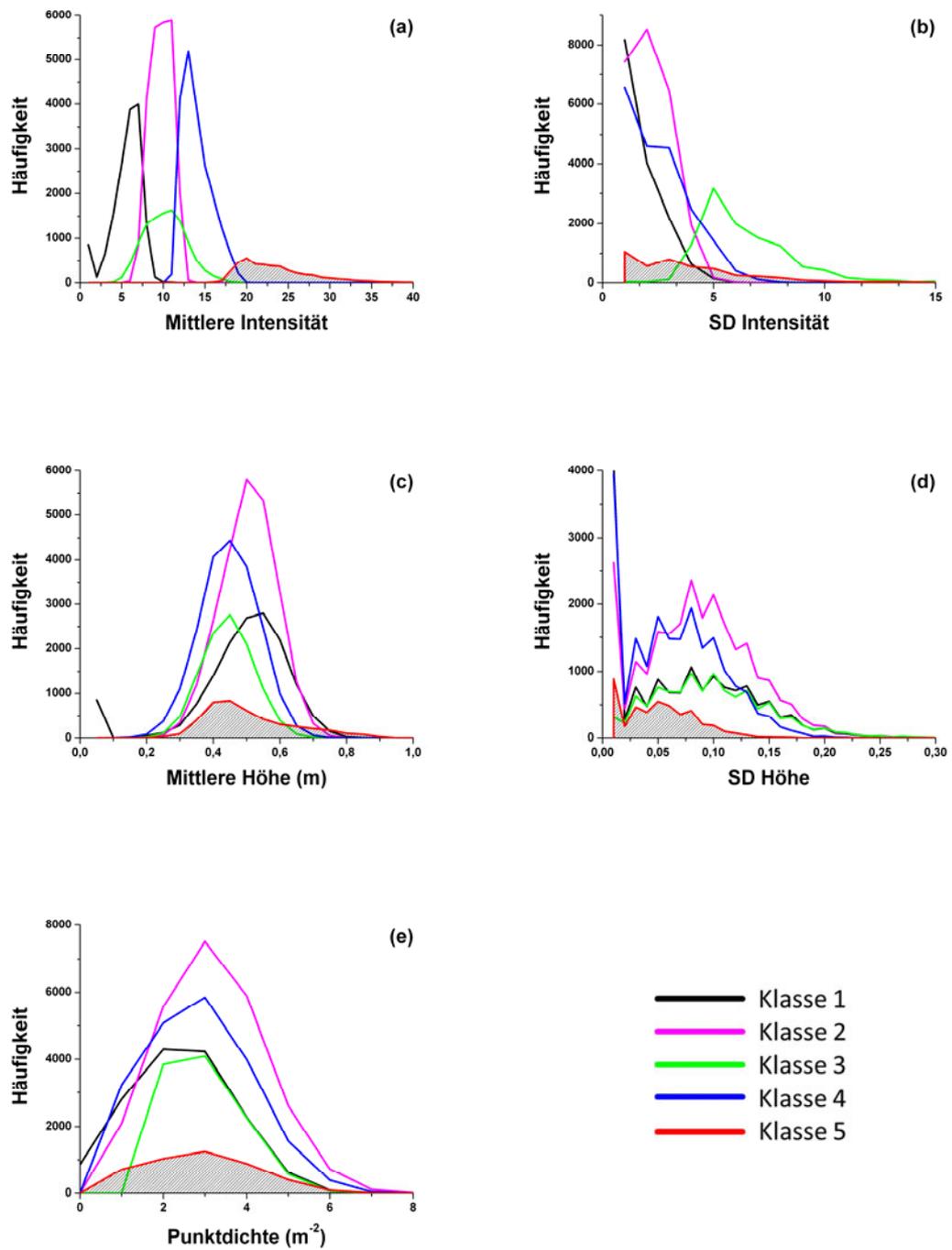


Abbildung 4.12: Werteverteilung von NA23 (1x1 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).

Die Klassifikation der Muschelbank NA23 mit einer Gridgröße von 2x2 m zeigte weniger gute Ergebnisse als die Klassifikation mit der Gridgröße 1x1 m. Dies spiegelt sich auch in den Werteverteilungen wieder (Abbildung 4.13). Die Fläche unter der Kurve von Klasse 4 (Muschel) ist deutlich gestiegen, was zeigt, dass diese Klasse entweder mit einer anderen Klasse verschmolzen ist oder dass eine Neuordnung von einem Teil der Pixel stattgefunden hat. Da in der Klassifikation die Muschelflächen aus der 1x1 m Klassifikation noch enthalten sind, ist eine Verschmelzung der Muschelklasse mit Daten aus einer anderen Klasse wahrscheinlicher. Die Muschelklasse wird auf diese Weise „verwässert“ und ist in keinem Parameter mehr klar erkennbar.

Bei der Muschelbank NH19 (Abbildung 4.14) ist die Überlappung zwischen der Muschelklasse und den anderen Klassen selbst beim Parameter mittlere Intensität noch deutlicher. Interessant ist, dass die Muschelklasse beim Parameter mittlere Höhe eine bimodale Verteilung aufweist. Dies liegt daran, dass die als Muschel klassifizierten Pixel im mittleren bis linken Bildbereich eine tiefere absolute Höhe haben als die als Muschel klassifizierten Pixel im rechten Bildbereich. Bei dieser Muschelbank gibt es keinen einzelnen Parameter, anhand dessen sich eine Klasse vollständig von den anderen trennen lässt.

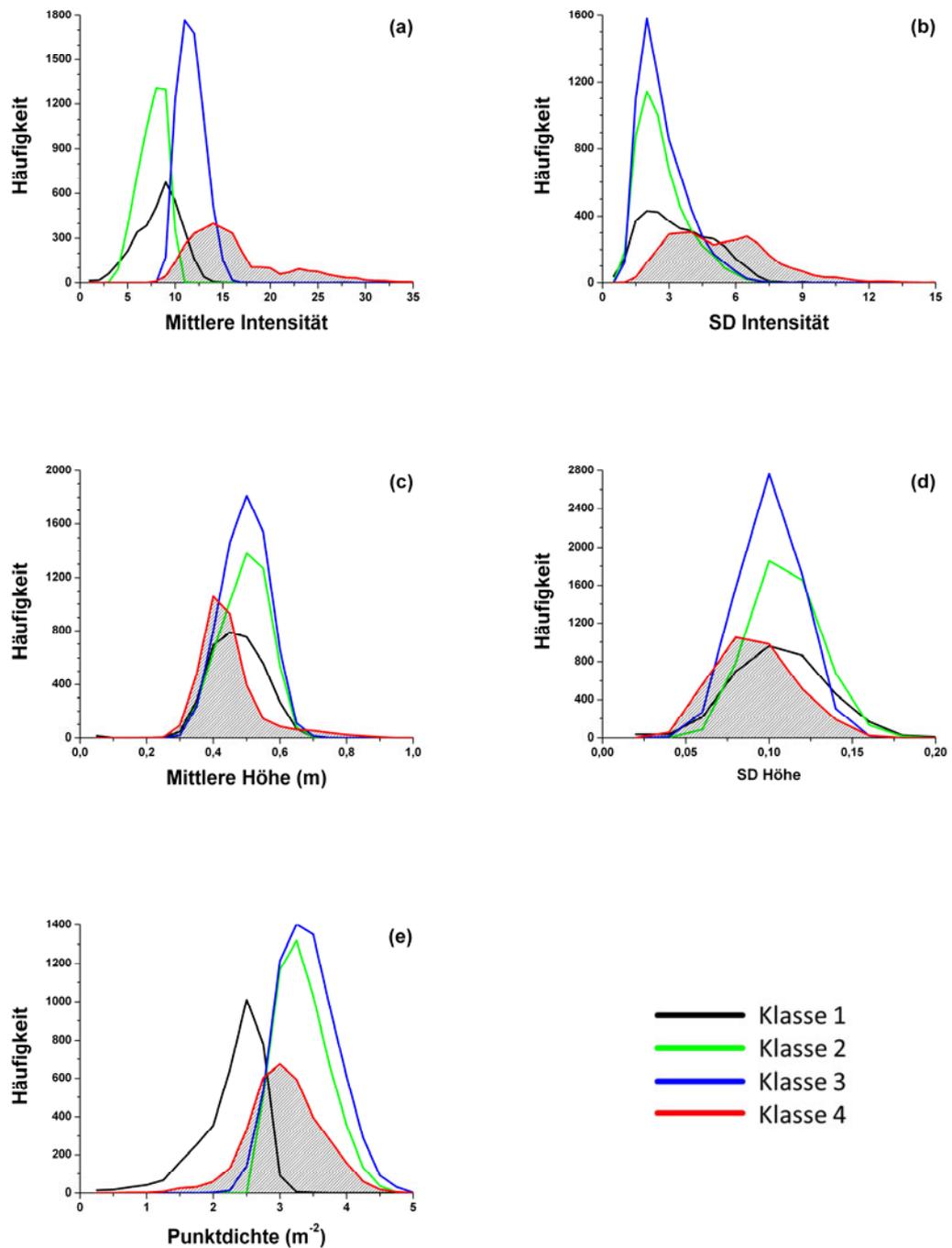
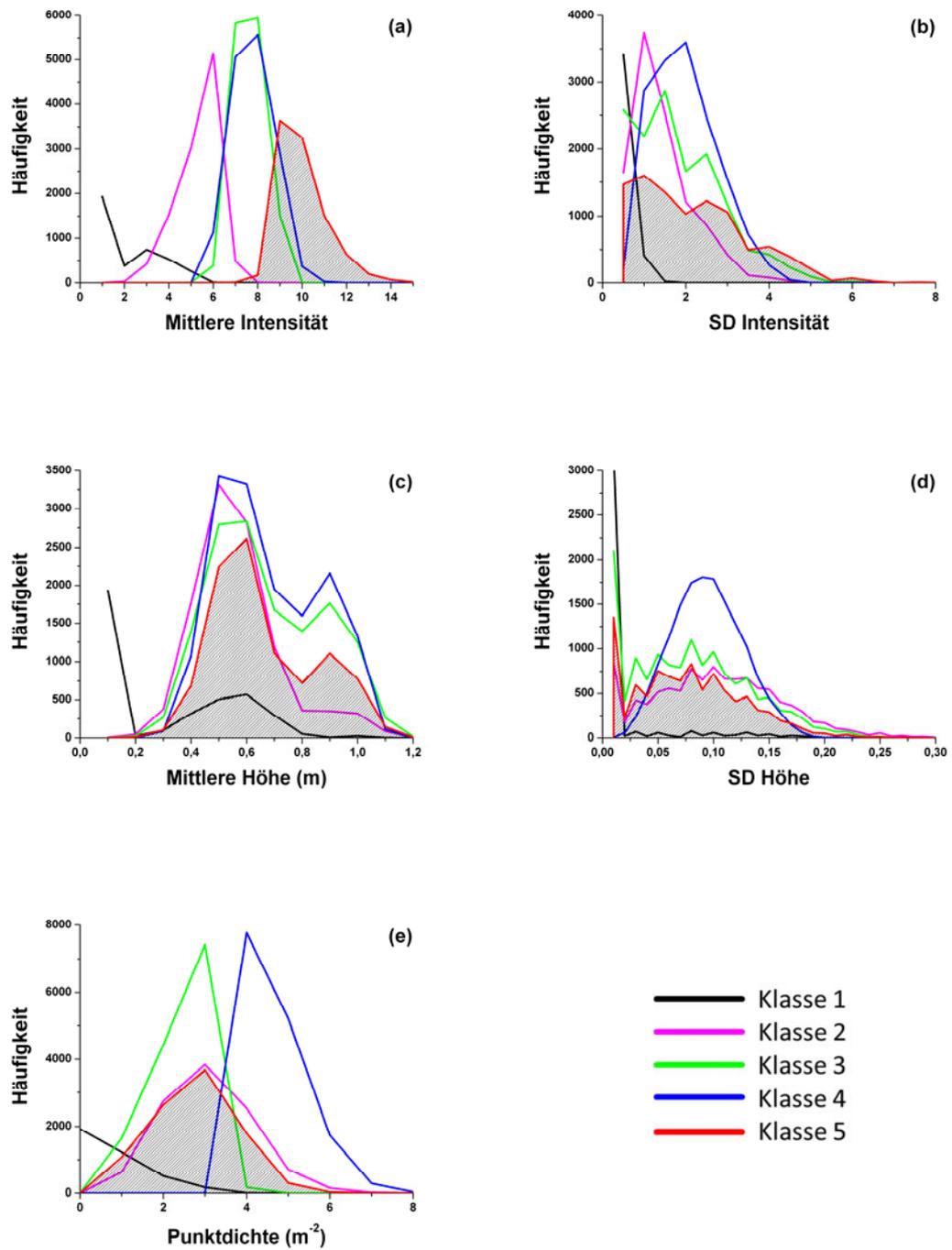


Abbildung 4.13: Werteverteilung von NA23 (2x2 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 4 (grau schraffiert).



**Abbildung 4.14:** Werteverteilung von NH19 (1x1 m) in den fünf Parametern mittlere Intensität (a), SD Intensität (b), mittlere Höhe (c), SD Höhe (d) und Punktdichte (e). Die als Muschel identifizierte Klasse ist die Klasse 5 (grau schraffiert).

## 4.5 Qualität der Klassifikationen

### 4.5.1 Qualitativer Vergleich mit den Monitoringdaten

Die Klassifikationen der LiDAR-Daten zeigen – entsprechend der gewählten Gridgröße – eine sehr detaillierte Darstellung der Muschelbänke. Besonders bei der Muschelbank NA03 ist zum einen die Gesamtfläche der Muschelbank gut erkennbar, zum anderen treten aber auch die kleineren Wasser- und Wattflächen zwischen den Muschelbeeten deutlich hervor. Bei der Gridgröße 2x2 m haben einige dieser Flächen noch die Signatur von Wasser, aber bei einer Gridgröße von 3x3 m ist nur noch eine Fläche als Wasser klassifiziert, während die anderen Flächen jetzt als Watt klassifiziert sind. Sehr deutlich ist bei dieser Gridgröße auch die exakte Erfassung der Wasserkante. In Abbildung 4.6 ist besonders bei den Gridgrößen 2x2 m und 3x3 m zu sehen, dass die östliche Begrenzung der Muschelbank aus dem Monitoring ein wenig in den Priel hineinragt. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die unterschiedlichen Erfassungszeitpunkte im Verhältnis zu Niedrigwasser zurückzuführen. Interessant ist auch der Bereich innerhalb der kleinen Ausbuchtung an der westlichen Seite des Muschelbankumrisses aus dem Monitoring. Bei allen drei Gridgrößen wird dieser Bereich primär als Wasser- oder Wattfläche klassifiziert, jedoch nicht als Muschel. Bei der kleinsten Gridgröße gibt es sehr viele einzelne verstreute Pixel die als Muschel klassifiziert sind. Da einige dieser Pixel im Bereich des Priels liegen, handelt es sich bei diesen definitiv um Fehlklassifikationen.

Bei der Muschelbank NA23 ist die erste Klassifizierung mit der Gridgröße 1x1 m sehr vielversprechend, auch wenn die Übereinstimmung zwischen der LiDAR-Klassifikation und den Monitoringdaten nicht an allen Stellen optimal ist. Zudem wird bei dieser Muschelbank deutlich, wie stark sich die GPS-Vermessung lokal von der Luftbildinterpretation unterscheiden kann. Bei den Gridgrößen 2x2 m und besonders bei 3x3 m sind die Klassifikationen schon deutlich weniger brauchbar, da große Wattflächen in die Muschelklasse integriert werden bzw. eine totale Neuordnung der Pixel erfolgt.

Die Ergebnisse der Klassifizierung von der Muschelbank NH19 sind wiederum deutlich schlechter, da hier schon bei der Gridgröße 1x1 m große Bereiche als Muschel klassifiziert werden die weder bei der GPS-Vermessung noch bei der Luftbildinterpretation als Muschel deklariert wurden. Diese Bereiche sind jedoch nicht zusammenhängend, sondern bestehen aus sehr vielen einzelnen Pixeln und sehr kleinen Flächen. Hier besteht die Möglichkeit, dass ein weiterer Sediment- bzw. Substrattyp eine ähnliche Signatur erzeugt, wie die Muscheln. Bei dieser Muschelbank scheint die Qualität auch von dem zuvor beschriebenen Streifenmuster stark negativ beeinflusst zu sein. Dieses Muster ist bei allen Gridgrößen sichtbar.

#### 4.5.2 Flächenvergleich mit den Monitoringdaten

Für den qualitativen Flächenvergleich wurden die aggregierten und geglätteten Muschelbankpolygone mit denen aus dem Monitoring (Luftbildinterpretation und GPS-Vermessung separat) verschnitten. So entstanden jeweils drei (Multi-Part-)Polygone, die folgende Muschelflächen darstellen (siehe auch Abbildung 3.4):

1. Flächen, die nur über die LiDAR-Daten als Muschel klassifiziert worden sind.
2. Flächen, die nur über das Monitoring (Luftbildinterpretation oder GPS-Vermessung) als Muschel klassifiziert worden sind.
3. Flächen, die sowohl über die LiDAR-Daten als auch über das Monitoring (Luftbildinterpretation oder GPS-Vermessung) als Muschel klassifiziert worden sind.

Dieselbe Vorgehensweise wurde bei den Muschelbänken NA23 und NH19 verwendet, um einen quantitativen Vergleich zwischen den beiden Monitoringmethoden (Luftbildinterpretation und GPS-Vermessung) vorzunehmen.

##### Muschelbank NA03, Amrum

Die Muschelbank NA03 hat auf Basis der Luftbildinterpretation eine Gesamtfläche von 16.632,8 m<sup>2</sup>. Die aus den LiDAR-Daten berechnete Fläche der Muschelbank variiert je nach Gridgröße und nimmt folgende Werte an: 17.281,0 m<sup>2</sup> (1x1 m), 14.084,7 m<sup>2</sup> (2x2 m) und 14.399,3 m<sup>2</sup> (3x3 m). Die Werte aus dem Flächenvergleich zwischen LiDAR und Monitoring sind in Tabelle 4.3 dargestellt (für die Muschelbank NA03 gibt es keine GPS-Vermessung sondern nur die Luftbildinterpretation). Die Fläche, die nur von der LiDAR-Klassifizierung als Muschelbank klassifiziert wird, nimmt mit steigender Gridgröße (von 1x1 m zu 2x2 m) ab, während die Fläche, die nur durch das Monitoring erfasst wird, von der Gridgröße 1x1 m auf 2x2 m stark zunimmt, um dann zur Gridgröße 3x3 m wieder leicht zurückzugehen. Die Fläche, die von beiden Methoden als Muschelbank klassifiziert wird, ist bei einer Gridgröße von 1x1 m am größten und vermindert sich um ca. 2.000 m<sup>2</sup> bei den Gridgrößen 2x2 und 3x3 m.

**Tabelle 4.3: Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NA03 zwischen der Luftbildinterpretation (LB) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR) für alle drei Gridgrößen.**

	1x1	2x2	3x3
<b>Nur LB</b>	2.309,0 m <sup>2</sup>	4.277,4 m <sup>2</sup>	4.194,6 m <sup>2</sup>
<b>Nur LiDAR</b>	2.957,3 m <sup>2</sup>	1.729,3 m <sup>2</sup>	1.961,2 m <sup>2</sup>
<b>LB + LiDAR</b>	14.323,7 m <sup>2</sup>	12.355,4 m <sup>2</sup>	12.438,1 m <sup>2</sup>

Unter der Annahme, dass die Flächenwerte der Luftbildinterpretation der Wirklichkeit entsprechen, würde die LiDAR-Klassifikation bei einer Gridgröße von 1x1 m eine Vollständigkeit ( $V_{LB}$ ) von 86,1 % erreichen. Die  $V_{LB}$ -Werte für die Gridgrößen 2x2 m und 3x3 m liegen bei 74,3 % bzw. 74,8 %.

#### Muschelbank NA23, Föhr

Die aus dem Monitoring stammenden Flächen für die Muschelbank NA23 innerhalb des Testgebietes liegen bei 5.361,7 m<sup>2</sup> (Luftbildinterpretation) bzw. bei 5.974,6 m<sup>2</sup> (GPS-Vermessung). Die Gesamtfläche der Muschelbank auf Basis der LiDAR-Klassifikation liegt bei 3.145,0 m<sup>2</sup> (1x1 m) bzw. bei 8.728,0 m<sup>2</sup> (2x2 m). Der große Anstieg der Fläche ist auf die Hinzunahme von Nicht-Muschelflächen zurückzuführen (siehe Abbildung 4.7). Da bei der Gridgröße von 3x3 m keine separate Muschelklasse mehr erkennbar ist, wird hierfür kein Flächenvergleich durchgeführt.

**Tabelle 4.4:** Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NA23 zwischen der Luftbildinterpretation (LB) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR) für die Gridgrößen 1x1 m und 2x2 m.

	1x1	2x2
Nur LB	3.859,6 m <sup>2</sup>	3.191,1 m <sup>2</sup>
Nur LiDAR	1.642,8 m <sup>2</sup>	6.557,4 m <sup>2</sup>
LB + LiDAR	1.502,2 m <sup>2</sup>	2.170,7 m <sup>2</sup>

**Tabelle 4.5:** Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NA23 zwischen der GPS-Vermessung (GPS) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR) für die Gridgrößen 1x1 m und 2x2 m.

	1x1	2x2
Nur GPS	3.919,0 m <sup>2</sup>	2.819,8 m <sup>2</sup>
Nur LiDAR	1.089,4 m <sup>2</sup>	5.573,3 m <sup>2</sup>
GPS + LiDAR	2.055,6 m <sup>2</sup>	3.154,8 m <sup>2</sup>

Unter der Annahme, dass die Flächenwerte der Luftbildinterpretation bzw. der GPS-Vermessung der Wirklichkeit entsprechen, liegen die Vollständigkeitswerte  $V_{GPS}$  und  $V_{LB}$  bei einer Gridgröße von 1x1 m bei 34,4 % bzw. 28,0 %. Für die Gridgröße 2x2 m steigt  $V_{GPS}$  auf 52,8 % und  $V_{LB}$  auf 40,5 %.

Tabelle 4.6 zeigt, dass die beiden Flächen aus dem Monitoring (Luftbildinterpretation und GPS-Vermessung) in ihrer Größe nur um ca. 11 % voneinander abweichen. Es wird jedoch nur ein Bereich von 3.267,8 m<sup>2</sup> von beiden Methoden erfasst, so dass große Teile der jeweiligen Gesamtfläche (GPS/LB) nur von jeweils einer der beiden Methoden erfasst werden. Die Fläche, die von beiden Methoden erfasst wird, hat einen Anteil von 54,7 % der GPS-Gesamtfläche und einen Anteil von 60,9 % der LB-Gesamtfläche.

**Tabelle 4.6: Gesamtgröße und quantitativer Vergleich der Flächen zwischen der GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB) der Muschelbank NA23 innerhalb des Testgebietes.**

	Fläche		Fläche
<b>GPS gesamt</b>	5.974,6 m <sup>2</sup>	<b>Nur GPS</b>	2.706,7 m <sup>2</sup>
<b>LB gesamt</b>	5.361,7 m <sup>2</sup>	<b>Nur LB</b>	2.093,9 m <sup>2</sup>
		<b>LB + GPS</b>	3.267,8 m <sup>2</sup>

#### **Muschelbank NH19, Hamburger Hallig**

Bei der Muschelbank NH19 weichen die Flächengrößen der beiden Monitoringmethoden sehr stark voneinander ab. Die mit GPS erfasste Fläche hat in etwa die dreifache Größe der mit Luftbildinterpretation erfassten Fläche (Tabelle 4.7). Die mit der Luftbildinterpretation und GPS erfasste Fläche (5.644,1 m<sup>2</sup>) macht somit nur 31,5 % der insgesamt mit GPS erfassten Fläche aus. Umgekehrt deckt die mit Luftbildinterpretation und GPS erfasste Fläche 96,1 % der mit Luftbildinterpretation erfassten Fläche ab. Nur ca. 230 m<sup>2</sup> der mit Luftbildinterpretation erfassten Fläche liegen außerhalb der mit GPS erfassten Fläche. Diese Unterschiede zeigen deutlich, wie stark die beiden Monitoringmethoden voneinander abweichen können.

**Tabelle 4.7: Gesamtgröße und quantitativer Vergleich der Flächen zwischen der GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB) der Muschelbank NH19 innerhalb des Testgebietes.**

	Fläche		Fläche
<b>GPS gesamt</b>	17.924,8 m <sup>2</sup>	<b>Nur GPS</b>	12.280,7 m <sup>2</sup>
<b>LB gesamt</b>	5.876,3 m <sup>2</sup>	<b>Nur LB</b>	232,3 m <sup>2</sup>
		<b>LB + GPS</b>	5.644,1 m <sup>2</sup>

**Tabelle 4.8: Quantitativer Vergleich der Muschelbankflächen von NH19 zwischen den Monitoringmethoden (GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB)) und der LiDAR-Klassifikation (LiDAR).**

	GPS	LB
Nur Monitoring	11.279,1 m <sup>2</sup>	3.495,6 m <sup>2</sup>
Nur LiDAR	7.854,8 m <sup>2</sup>	12.119,7 m <sup>2</sup>
Monitoring + LiDAR	6.645,6 m <sup>2</sup>	2.380,7 m <sup>2</sup>

Da bei der Muschelbank NH19 nur die Gridgröße 1x1 m ein sinnvolles Klassifikationsergebnis hervorbringt, sind die Flächenvergleiche der LiDAR-Klassifikation mit den Monitoringmethoden für diese Gridgröße in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Die LiDAR-Klassifikation ergibt eine Fläche von insgesamt 14.500,4 m<sup>2</sup> für die Muschelbank. Dies resultiert in Vollständigkeitswerten von  $V_{LB} = 40,5\%$  und  $V_{GPS} = 37,1\%$ . Trotz der deutlichen Unterschiede in den Flächen aus dem Monitoring sind beide Vollständigkeitswerte recht niedrig, was auf eine generell schlechte Erfassung der Muschelflächen deutet.

Der Übersichtlichkeit wegen sind die Parameter Producer's Accuracy (Vollständigkeit) und User's Accuracy für alle drei Testgebiete in Tabelle 4.9 noch einmal zusammengefasst. Wie schon bei den Abbildungen der Klassifikationen ersichtlich war, zeigen die Klassifikationen der Muschelbank NA03 mit Abstand die höchsten Gütemaße.

**Tabelle 4.9: Übersicht der Gütemaße Producer's Accuracy (PA, Vollständigkeit) und User's Accuracy (UA) aufgeteilt nach Gridgröße und Monitoringmethode (GPS-Vermessung (GPS) und Luftbildinterpretation (LB)). Darstellung der Gütemaße (PA/UA) in Prozent.**

	1x1 m		2x2 m		3x3 m	
	LB	GPS	LB	GPS	LB	GPS
NA03	86,1/82,9	-	74,3/87,7	-	74,8/86,4	-
NA23	28,0/47,8	34,4/65,4	40,5/24,9	52,8/36,1	-	-
NH19	40,5/16,4	37,1/45,8	-	-	-	-

## 5 Diskussion

### 5.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage ist bei dieser Arbeit ein sehr wichtiger Punkt, da sie verschiedene Aspekte der Analyse beeinflusst. Die LiDAR-Daten wurden erhoben, um ein hochauflösendes Geländemodell von Schleswig-Holstein zu erstellen. Die Punktdaten lagen daher nur in 1x1 km Kacheln vor und enthielten weder Informationen zum exakten Aufnahmezeitpunkt noch zum Scanwinkel. Zudem wurde auf eine Bearbeitung bzw. Kalibrierung der Intensitätswerte verzichtet. Diese Ausgangslage ist für die vorliegende Analyse aus verschiedenen Gründen nicht optimal:

- (1) Eine Zusammenfassung von mehreren Flugstreifen in 1x1 km Kacheln bedeutet, dass Daten aus einzelnen Flugstreifen und einzelnen Scanreihen ohne entsprechende Attribute nicht mehr identifiziert bzw. separiert werden können. Es bedeutet auch, dass Daten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Bezug zu Niedrigwasser aufgenommen worden sind, miteinander vermischt und die Klassifikationen dadurch beeinträchtigt werden können. Bei der Muschelbank NA03 vor Amrum lag eine Stunde zwischen den Aufnahmen aus den beiden Flugstreifen, jedoch zeigten die Klassifizierungen dieser Muschelbank die besten Ergebnisse. Dies könnte daran liegen, dass einer der beiden Flugstreifen wegen einem Sensorausfall keine Daten enthielt. Es könnte aber auch sein, dass die Muschelbank bereits zum Zeitpunkt des ersten Überfluges trockengefallen war und der zweite Flugstreifen somit in diesem Testgebiet keine anderen Wasserstände registrieren konnte. Dies kann jedoch im Nachhinein nicht mehr festgestellt werden.
- (2) Aufgrund der fehlenden Informationen zum Scanwinkel können die Intensitätswerte nicht mehr kalibriert werden. Höfle and Pfeifer (2007) und Brzank *et al.* (2009) zeigen, dass die Intensitätswerte u. a. vom Scanwinkel abhängen und dass eine Korrektur der Werte erforderlich ist, um zwischen verschiedenen Studien und Flugkampagnen vergleichbare Intensitätswerte zu erhalten.
- (3) Die Auswahl der Testgebiete war sehr stark durch die Überlappung der Flugstreifen (erkennbar durch die Anzahl der Flugstreifen, die in den Metadaten pro Gebiet angegeben wurden) begrenzt. Zudem fanden sämtliche Aufnahmen der ausgewählten Testgebiete in deutlichem zeitlichem Abstand zu Niedrigwasser statt. Daher sind alle Klassifikationen und Flächenvergleiche hiervon beeinflusst.

Die Daten aus dem Muschelmonitoring sind mit unterschiedlichen Methoden erfasst worden. Die Unterschiede zwischen der GPS-Vermessung und der Luftbildinterpretation ergeben auch stark unterschiedliche Ergebnisse in den als Muschelbank ausgewiesenen Flächen. Damit wird der Vergleich zwischen der Klassifizierung mittels LiDAR-Daten und den Daten aus dem

Monitoring erschwert. Interessanterweise ist die Übereinstimmung zwischen der Luftbildinterpretation und der LiDAR-Klassifikation bei der Muschelbank NA03 am besten, wohingegen die Übereinstimmung zwischen der GPS-Vermessung und der LiDAR-Klassifikation sowie zwischen der GPS-Vermessung und der Luftbildinterpretation bei den anderen Muschelbänken sehr variabel ist. Bei den Muschelbänken NA23 und NH19 spielen wahrscheinlich jedoch die hohen Wasserstände sowie die Probleme mit der Datenqualität (Streifenmuster bei NH19) eine wichtige Rolle.

Da das Wattenmeer ein sehr dynamischer Raum ist, spielen die Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Datensätze auch eine wichtige Rolle für die Qualität der Analyseergebnisse. Die LiDAR-Daten wurden zwischen dem 13. und dem 16. Oktober 2005 erfasst. Die Luftbilder wurden am 4. September 2005 aufgenommen und hierauf basieren auch die Luftbildinterpretationen aus dem Muschelmonitoring. Die GPS-Vermessungen der Muschelbänke NH19 und NA23 fanden am 9. Juni bzw. am 28. Juli 2005 statt. Damit liegen die einzelnen Datensätze zwischen 5 und 16 Wochen auseinander. In so einer Zeitspanne – und besonders zum Herbst hin aufgrund der Herbststürme – können sich Wattflächen stark verändern. Sedimente können verschoben und z. B. auf Muschelbänken abgelagert werden, wodurch das Signal verändert werden könnte. In der Zeit von Mitte Juli bis Mitte Oktober 2005 gab es mehrere Tage mit andauerndem starken Wind sowie einige Tage mit starkem bis stürmischem Wind bzw. stürmischen Windböen (2. Julihälfte)<sup>2</sup>, so dass dies – besonders für die Muschelbank NH19 – zutreffend sein könnte. Abschließend sollte auch die Zeit der Erfassung in Bezug zum Niedrigwasser berücksichtigt werden. Die GPS-Vermessungen werden so nah bei Niedrigwasser gemacht wie möglich, während die LiDAR-Daten beispielsweise bis zu 3 Stunden vor Niedrigwasser aufgenommen wurden.

## 5.2 Parameter zur Identifizierung von Muscheln

Die Analyse der Werteverteilungen der Klassifikationsklassen zeigte, dass die Intensität der ausschlaggebende Parameter für die Identifizierung der Muschelbänke ist. In allen Klassifikationen, die ein verwertbares Ergebnis zeigten, unterschied sich die Muschelklasse von den anderen Klassen in diesem Parameter und zeigte die höchsten Werte. Bei allen anderen Parametern konnte die Muschelklasse nicht von den anderen Klassen separiert werden.

Wenn die Laserimpulse auf eine Muschelbank treffen, dann wird ein deutlich größerer Teil der Strahlung reflektiert, als wenn der Laserimpuls auf die umliegenden Flächen trifft. Dies resultiert dann in einem deutlicheren Echo, das am Sensor registriert und in einen höheren

---

<sup>2</sup> <http://www.wetterspiegel.de>, Zugriff: 26.03.2013

Intensitätswert umgerechnet wird. Da die Wellenlänge im Verhältnis zur Größe der Muschel (und den eventuellen Unregelmäßigkeiten auf der Schale) sehr klein ist, wird die Reflexion hier hauptsächlich diffus sein (Wagner *et al.* 2003). Trifft der Laserimpuls jedoch auf die Oberfläche eines Priels, der noch Restwasser enthält, oder auf eine kleine, wassergefüllte Senke innerhalb der Muschelbank, dann sind diese Oberflächen im Verhältnis zur Wellenlänge eher glatt und resultieren in einer mehr gerichteten Reflexion weg vom Sensor. Wie in Abschnitt 2.1.3 schon erwähnt, sind sowohl die gerichtete als auch die diffuse Reflexion die zwei Extremformen der Reflexion, und normalerweise ergibt sich in einer natürlichen Umgebung immer eine Mischform dieser beiden Typen. Aus diesem Grund werden auch normalerweise immer Reflexionen von Wasserflächen empfangen – diese haben jedoch eine geringere Intensität als Reflexionen von anderen Oberflächen.

Die Punktdichte ist derjenige Parameter, der für eine Trennung zwischen Wasser und anderen Oberflächen genutzt werden kann. Dies wird bei der Muschelbank NA03 (3x3 m) sehr deutlich. Die Punktdichte unterscheidet sich jedoch nicht zwischen Muschelbänken und anderen „festen“ Oberflächen.

Anhand des Parameters Höhe kann nur die Klasse Wasser bei der Muschelbank NA03 unterschieden werden. Die deutliche Trennung hier ist dadurch verursacht, dass ein großer Teil des Testgebietes von einem Priel eingenommen wird. Da der Priel die tiefste Fläche des Testgebietes repräsentiert (auf die Ausreißerwerte wurde bereits in Abschnitt 4.4 hingewiesen), gibt es in diesem Höhenbereich daher eine hohe und steile Kurve für die Klasse Wasser. Da Wasserflächen jedoch auch in höheren Bereichen vorkommen können – z. B. innerhalb der Muschelbänke und in Senken – kann dieses Kriterium nicht als einziges zur Identifizierung von Wasserflächen herangezogen werden.

### **5.3 Klassifikationen, Gridgröße & Flächenvergleich**

Insgesamt fallen die Ergebnisse der Klassifizierungen der drei Muschelbänke sehr unterschiedlich aus. Während bei der Muschelbank NA03 sehr gut interpretierbare Ergebnisse erzielt werden, sind die Ergebnisse bei der Muschelbank NA23 nur bei einer Gridgröße von 1x1 m verwertbar. Bei der Muschelbank NH19 ist bereits die Klassifikation mit der Gridgröße 1x1 m so stark von dem Streifenmuster beeinflusst, dass die Ergebnisse schwierig zu interpretieren sind.

Die besten Ergebnisse werden bei der Muschelbank NA03 vor Amrum erzielt. Hier ist die von Nord nach Süd verlaufende Muschelbank deutlich erkennbar und auch kleinere Wasserflächen werden bei den kleineren Gridgrößen dargestellt. Diese gehen jedoch bei der höchsten Gridgröße verloren bzw. sind nur noch als Wattflächen erkennbar. Die gesamte Fläche und

Struktur der Muschelbank bleibt jedoch erhalten. Zudem ist die Übereinstimmung mit dem Muschelbankumriss aus dem Monitoring sehr gut. Sehr deutlich tritt auch die Kante zwischen Muschelbank und Priel hervor. Die Vollständigkeitswerte liegen – je nach Gridgröße – zwischen 74,3 % und 86,1 %. Bei allen drei Gridgrößen liegen die Muschelbankbereiche, die nicht von der LiDAR-Klassifizierung als solche klassifiziert wurden, im Bereich der kleinen Ausbuchtung auf der westlichen Seite sowie am nördlichen Ende der Muschelbank. Durch die Veränderung der Gridgröße wird auch ein größerer Bereich an der östlichen Kante als Wasser klassifiziert und reduziert damit die Fläche, die von beiden Methoden als Muschel deklariert wird. Im Gegensatz hierzu gibt es zwei Bereiche, die bei der LiDAR-Methode als Muschel klassifiziert wird, die aber nicht im Monitoring erkannt wurden. Hierbei handelt es sich um den südlichsten Bereich der Muschelbank und der nordöstlichsten Ecke, die beide gerade außerhalb des Muschelbankumrisses aus dem Monitoring liegen. Die Qualität dieser Klassifikationen wird durch die konsistente Form und Lage der Muschelbank bei allen drei Gridgrößen sowie durch die detaillierte Darstellung der Muschelbankstrukturen (Muschelbeete sowie dazwischenliegende Wasser- und Wattflächen) hervorgehoben.

Die Klassifikationen der Muschelbänke NA23 und NH19 zeigen dagegen eine deutliche Inkonsistenz bei den drei Gridgrößen. Während bei der Muschelbank NA23 die Muschelflächen aus der 1x1 m Klassifikation bei der 2x2 m Klassifikation noch zu erkennen sind und erst bei der Gridgröße 3x3 m eine vollständige Neuordnung der Pixel stattfindet, ist dies bei der Muschelbank NH19 bereits bei der Gridgröße von 2x2 m der Fall. Bei diesen beiden Muschelbänken müssen jedoch einige Faktoren berücksichtigt werden. Die Muschelbank NA23 enthält insgesamt nur sehr wenige Muschelflächen, wodurch die Erstellung der Signatur im Verhältnis zu den anderen Klassen erschwert sein könnte. Im Testgebiet scheint zum Aufnahmezeitpunkt der LiDAR-Daten noch viel Restwasser auf den Wattflächen vorhanden gewesen zu sein. Da aber in den Werteverteilungen bei der Punktdichte keine „Wasserkategorie“ erkennbar ist, könnte es sich hier auch um sehr feuchtes Sediment handeln. Diese Vermutung wird durch das Fehlen eines erkennbaren Priels in den Luftbildern gestützt.

Im Gegensatz zur Muschelbank NA03 haben die beiden anderen Muschelbänke auch eine andere Verteilung der ursprünglichen Intensitätswerte (siehe Abbildung 4.1). Während die normalisierten Werte von Muschelbank NA03 nach der Entfernung der Extremwerte relativ gleichmäßig zwischen 0 und 1 verteilt sind, nehmen die Werte der Muschelbank nach der Entfernung der Extremwerte trotzdem fast nur den Bereich zwischen 0 und 0,5 ein. Um die Werte mehr oder weniger gleichmäßig zwischen 0 und 1 zu verteilen, hätten mehr als 1 % der Punkte entfernt werden müssen. Damit wäre der maximale Intensitätswert auch auf weniger als 30 reduziert worden. Bei der Muschelbank NH19 liegt der maximale Intensitätswert schon vor der Entfernung der Extremwerte nur bei 27 – im Gegensatz zu den Werten 130 bzw. 136

bei den anderen beiden Muschelbänken. Nach der Entfernung der Extremwerte liegt der Maximalwert bei 15. Vorausgesetzt, dass dieser Wert der Realität entspricht, könnte eine Erklärung sein, dass die Muscheln durch Sedimentverschiebungen nur noch geringfügig aus dem Sediment herausragen und daher kein so deutliches Signal erzeugen. Eine andere Erklärung wäre, dass die Reflexionen vom Wetter (z. B. Nebel, Dunst, leichter Regen) beeinflusst worden wären. Da das Wetter in den Tagen der Befliegung der Testgebiete keine signifikanten Unterschiede aufwies<sup>3</sup>, ist Letzteres jedoch unwahrscheinlich.

Bei der Muschelbank NH19 ist bei allen drei Gridgrößen ein deutliches Streifenmuster zu beobachten. Anhand der einzelnen Datenpunkte ist erkennbar, dass sich die Scanreihen z. T. überlagern: jeweils 3 bis 4 Scanreihen überlagern sich und der Abstand innerhalb solcher sich überlagernder Scanreihen ist deutlich geringer als der Abstand zu den nächsten 3 bis 4 Scanreihen, die sich ebenfalls wieder überlagern. Diese Überlagerung erzeugt schon in den Punktdaten ein Streifenmuster, welches allerdings bei der Überführung der Daten in die Grids noch deutlicher hervortritt. Es wäre zu untersuchen, ob eine Interpolation der Daten über das gesamte Testgebiet (anstelle der Überführung in die Grids) dieses Problem umgehen würde. Dies liegt allerdings außerhalb des Ziels dieser Arbeit.

Wie in Abschnitt 5.1 bereits erwähnt, können die Unterschiede in den Aufnahmezeitpunkten (sowohl in Bezug auf das Niedrigwasser als auch in Bezug auf die Jahreszeiten) einen Einfluss auf die Klassifikationen und die Flächenvergleiche gehabt haben. Wenn Muschelbänke z. B. über Senken hinweg verlaufen, dann kann ein relativ hoher Wasserstand einen Teil der Muschelbank bedecken – was höchstwahrscheinlich bei der Muschelbank NA03 der Fall war. Da alle Daten aus dem Jahr 2005 stammen und sich das Wattenmeer kontinuierlich ändert, können obengenannte Möglichkeiten nicht mehr überprüft werden. Allerdings sollte bei weiteren Untersuchungen darauf geachtet werden, dass die Daten möglichst am gleichen Tag bzw. innerhalb weniger Tage, aber unbedingt innerhalb eines kleinen Zeitfensters um Niedrigwasser herum erhoben werden.

---

<sup>3</sup> <http://www.wetterspiegel.de>, Zugriff: 26.03.2013

## 6 Fazit & Ausblick

### 6.1 Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, LiDAR-Daten auf ihre Eignung zur Identifizierung von Muschelbänken im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer hin zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden für drei Testgebiete mit bekannten Muschelbänken LiDAR-Daten, die zur Erstellung eines hochauflösenden Geländemodells von Schleswig-Holstein erfasst wurden, selektiert. Aus den vorhandenen Höhen- und Intensitätsinformationen wurden fünf Parameter abgeleitet: mittlere Intensität, Standardabweichung der Intensität, mittlere Höhe, Standardabweichung der Höhe und Punktdichte. Für jeden Parameter wurden drei Rasterlayer mit den Gridgrößen 1x1 m, 2x2 m und 3x3 m erstellt, die als Grundlage für eine Maximum-Likelihood-Klassifizierung dienten. Die als Muschel klassifizierten Pixel wurden aggregiert und die resultierende Fläche wurde zu Vergleichszwecken mit Daten aus dem Muschelmonitoring verschnitten. Abschließend wurden die Histogrammkurven der einzelnen Klassen (pro Parameter) erstellt und für einen visuellen Vergleich aufbereitet.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Identifizierung der Muschelbänke mittels der LiDAR-Daten möglich ist. Die Klassifikationen einer Muschelbank zeigten über alle drei Gridgrößen ein konsistentes und schlüssiges Ergebnis mit einer hohen Detailliertheit. Bei den zwei anderen Muschelbänken waren die Ergebnisse weniger eindeutig. Dies ist jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit auch auf die Ausgangsdaten zurückzuführen. Die Histogrammkurven zeigten, dass die Intensität der geeignetste Parameter für die Identifizierung der Muschelbänke war.

Die eingangs gestellte Frage zur Eignung der LiDAR-Daten zur Identifizierung von Muschelbänken muss differenziert beantwortet werden. Einerseits sind mit dieser Methode sehr gute und schlüssige Ergebnisse erzielt worden. Andererseits traten einige Probleme – besonders in der Datengrundlage – auf. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die gewonnenen Erkenntnisse zu verifizieren bzw. um beobachtete Problematiken näher zu untersuchen und zu klären.

### 6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Abschließend lassen sich aus den erzielten Ergebnissen und entstandenen Problematiken folgende Antworten auf die eingangs gestellten Forschungsfragen geben:

**Können Muschelbänke mit Hilfe von luftgestützten LiDAR-Daten identifiziert werden?**

Diese Frage muss differenziert beantwortet werden. Die Ergebnisse der Muschelbank NA03 sind sehr positiv: die Muschelbank insgesamt und Strukturen wie Muschelbeete und kleinere Watt- und Wasserflächen innerhalb der Muschelbank sind bei allen drei Gridgrößen klar erkennbar. Bei den Muschelbänken NA23 und MH19 treten jedoch deutliche Probleme auf, die eine Interpretation der Klassifikationen erschweren bzw. unmöglich machen. Diese Probleme scheine ihre Ursache jedoch in der Datengrundlage zu haben, so dass die weniger guten Ergebnisse für diese beiden Muschelbänke eher den Ausgangsdaten als dem Klassifizierungsprozess zuzuordnen sind.

**Anhand welcher Parameter der LiDAR-Daten können die Muschelbänke identifiziert werden?**

Es stellte sich heraus, dass der Parameter Intensität der LiDAR-Daten der geeignetste Parameter für die Klassifizierung ist. Anhand der Histogrammkurven wurde deutlich, dass bei den verwertbaren Klassifikationen die Muschelklasse prinzipiell nur anhand der Intensitätswerte von den anderen Klassen getrennt werden konnte.

**Welchen Einfluss hat der Analysemaßstab (Gridgröße) auf die Erkennung der Muschelbänke?**

Die Gridgröße hatte bei der Muschelbank NA03 keinen Einfluss auf die Erkennung der Muschelflächen. Die Klassifikationen wurden entsprechend der steigenden Gridgröße gröber, jedoch behielt die Muschelbank insgesamt sowohl ihre Form als auch ihre Struktur. Bei den beiden anderen Muschelbänken brachten nur die kleinsten Gridgrößen ein verwertbares Ergebnis hervor, was aber – wie schon erwähnt – höchstwahrscheinlich an Problemen in der Datengrundlage lag.

### 6.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die LiDAR-Daten sehr viel Potenzial haben. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass die Datengrundlage sehr wichtig ist. Daher sollten weitere Untersuchungen mit speziell zu diesem Zweck erhobenen Daten gemacht werden. Als Stichwörter können hier separate Flugstreifen, Zeitinformation und Scanwinkel genannt werden. Zudem sollten Vergleichsdaten möglichst zum gleichen Zeitpunkt erhoben werden wie die LiDAR-Daten selbst, um Effekte aufgrund der Dynamik im Wattenmeer und verschiedenen Wasserständen zu vermeiden.

Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung von LiDAR-Daten zur Identifizierung von Muschelbänken wäre es zu ermitteln, ob andere Substrate oder Sedimente eine ähnliche Signatur in den Daten erzeugen wie die Muscheln. In der vorliegenden Arbeit deuteten die Ergebnisse darauf hin, dass trockener Sand, evtl. mit Rippeln, ein solches Substrat sein könnte.

Ein weiterer Schritt wäre die Nutzung von bathymetrischen LiDAR-Scannern, die – auch wenn sie nicht allzu tief in das trübe Wasser im Wattenmeer eindringen können – zumindest gewisse Informationen über die Ausdehnung der Muschelbänke in Priele oder Senken hinein geben könnten.

Die Entwicklung eines geeigneten und weitgehend automatisiert ablaufenden Workflows wäre aufgrund der Menge an Daten, die beim Laserscanning produziert werden, auf jeden Fall sinnvoll. In dieser Beziehung könnte auch ein Algorithmus entwickelt werden, der die Muschel­flächen direkt anhand ihrer Eigenschaften extrahiert, so dass der Klassifizierungsschritt entfällt.

## 7 Literaturverzeichnis

- Aarup, T. (2002). Transparency of the North Sea and Baltic Sea – a Secchi depth data mining study. *Oceanologia*, 44 (3), 323-337.
- Asmus, R. M., & Asmus, H. (1991). Mussel beds: limiting or promoting phytoplankton? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 148 (2), 215-232.
- Baltsavias, E. P. (1999a). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2–3), 199-214.
- Baltsavias, E. P. (1999b). Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2–3), 164-198.
- Brzank, A., & Heipke, C. 2006. Classification of lidar data into water and land points in coastal areas. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI Part 3, Bonn, Germany.
- Brzank, A., & Heipke, C. 2007. Supervised classification of water regions from lidar data in the Wadden Sea using a fuzzy logic concept. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI Part3/W52, Espoo, Finland.
- Brzank, A., Heipke, C., & Goepfert, J. 2008a. Morphologic change detection in the Wadden Sea from lidar data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVII Part B8-2, Peking.
- Brzank, A., Heipke, C., Goepfert, J., & Sörgel, U. (2008b). Aspects of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar–water classification and structure line extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (5), 510-528.
- Brzank, A., Heipke, C., & Sörgel, U. (2009). Ableitung Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten. In *Die Küste* (Vol. 76, pp. 91-121). Boyens Buchverlag.
- Chust, G., Grande, M., Galparsoro, I., Uriarte, A., & Borja, Á. (2010). Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89 (3), 200-213.
- Congalton, R. G. (2001). Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International Journal of Wildland Fire*, 10 (4), 321-328.
- Costa, B. M., Battista, T. A., & Pittman, S. J. (2009). Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 113 (5), 1082-1100.

- Dame, R., Dankers, N., Prins, T., Jongma, H., & Smaal, A. (1991). The Influence of Mussel Beds on Nutrients in the Western Wadden Sea and Eastern Scheldt Estuaries. *Estuaries*, 14 (2), 130-138.
- Dankers, N., & Zuidema, D. R. (1995). The Role of the Mussel (*Mytilus edulis* L.) and Mussel Culture in the Dutch Wadden Sea. *Estuaries*, 18 (1A), 71-80.
- Devereux, B., & Amable, G. (2009). Airborne LiDAR: Instrumentation, Data Acquisition and Handling. In G. L. Heritage & A. R. G. Large (Eds.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences* (pp. 49-66). Wiley-Blackwell.
- Dittmann, S. (1990). Mussel beds — amensalism or amelioration for intertidal fauna? *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 44 (3-4), 335-352.
- Doerffer, R., & Murphy, D. (1989). Factor analysis and classification of remotely sensed data for monitoring tidal flats. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 43 (3-4), 275-293.
- Gemeinsames Wattenmeersekretariat (2008). Anmeldung des deutsch-niederländischen Wattenmeeres als Weltnaturerbebestätte. *Wadden Sea Ecosystem*, 24, 1-217.
- Heritage, G. L., & Large, A. R. G. (2009). Principles of 3D Laser Scanning. In G. L. Heritage & A. R. G. Large (Eds.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences* (pp. 21-34). Wiley-Blackwell.
- Höfle, B., & Pfeifer, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62 (6), 415-433.
- Höfle, B., Vetter, M., Pfeifer, N., Mandlbürger, G., & Stötter, J. (2009). Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 (12), 1635-1649.
- Koffijberg, K., Dijkzen, L., Hälterlein, B., Laursen, K., Potel, P., & Schrader, S. (2009). Breeding Birds. Quality Status Report 2009. Thematic Report No. 18. *Wadden Sea Ecosystem*, 25, 1-15.
- Large, A. R. G., & Heritage, G. L. (2009). Laser Scanning – Evolution of the Discipline. In G. L. Heritage & A. R. G. Large (Eds.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences* (pp. 1-20). Wiley-Blackwell.
- Laursen, K., Blew, J., Ens, B., Eskildsen, K., Günther, K., Hälterlein, B., Koffijberg, K., Potel, P., & Van Roomen, M. (2009). Migratory Birds. Quality Status Report 2009. Thematic Report No. 19. *Wadden Sea Ecosystem*, 25, 1-18.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.

- Lohani, B., & Mason, D. C. (2001). Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56 (2), 100-120.
- Marencic, H. (1997). The Trilateral Monitoring and Assessment Program (TMAP) of the Wadden Sea. *Natur und Landschaft: Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege*, 72 (11), 507-512.
- Mason, D. C., Gurney, C., & Kennett, M. (2000). Beach topography mapping — a comparison of techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 6 (1), 113-124.
- Mason, D. C., Scott, T. R., & Wang, H.-J. (2006). Extraction of tidal channel networks from airborne scanning laser altimetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (2), 67-83.
- Nayegandhi, A., Brock, J. C., & Wright, C. W. (2009). Small-footprint, waveform-resolving lidar estimation of submerged and sub-canopy topography in coastal environments. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (4), 861-878.
- Nehls, G., & Büttger, H. (2006). Miesmuschelmonitoring 1998 - 2005 im Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer. Bericht an das Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer.
- Nehls, G., Witte, S., Büttger, H., Dankers, N., Jansen, J., Millat, G., Herlyn, M., Markert, A., Sand Kristensen, P., Ruth, M., Buschbaum, C., & Wehrmann, A. (2009). Beds of blue mussels and Pacific oysters. Quality Status Report 2009. Thematic Report No. 11. *Wadden Sea Ecosystem*, 25, 1-30.
- Niedermeier, A., Hoja, D., & Lehner, S. (2005). Topography and morphodynamics in the German Bight using SAR and optical remote sensing data. *Ocean Dynamics*, 55 (2), 100-109.
- Petrie, G., & Toth, C. K. (2008). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. In J. Shan & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* (pp. 1-27). CRC Press.
- Schmidt, A., Adolph, W., Klonus, S., Ehlers, M., Farke, H., & Sörgel, U. 2012a. Potential of Airborne Laser Scanning Data for Classification of Wadden Sea Areas. 32th EARSeL Symposium, Mykonos.
- Schmidt, A., Rottensteiner, F., & Sörgel, U. 2012b. Classification of airborne laser scanning data in Wadden Sea areas using conditional random fields. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIX-B3, Melbourne.
- Sørensen, T. H., Bartholdy, J., Christiansen, C., & Pedersen, J. B. T. (2006). Intertidal surface type mapping in the Danish Wadden Sea. *Marine Geology*, 235 (1-4), 87-99.

- Stelzer, K., Brockmann, C., & Geißler, J. (2010). Remote sensing of the Wadden Sea – a tool supporting TMAP and WFD monitoring. *Wadden Sea Ecosystem*, 26, 87-92.
- Stelzer, K., Brockmann, C., Murphy, D., & Krämer, U. (2004). Applicability of Remote Sensing in Monitoring Coastal Zones. *Coastline Reports*, 1, 249-253.
- TMAG – Trilateral Monitoring and Assessment Group. (2009). TMAP Manual. The Trilateral Monitoring and Assessment Program (TMAP).
- Wagner, W., Ullrich, A., & Briese, C. (2003). Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 91 (4), 223-235.
- Wehr, A. (2008). LiDAR Systems and Calibration. In J. Shan & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* (pp. 129-172). CRC Press.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2), 68-82.