Die Küste, 84 (2016), 147-192

Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken

Lars Tiepolt

Zusammenfassung

In den beiden Forschungsvorhaben „Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken (LEDA-K)“ und „Laserscanaufnahmen durch Einsatz von Drohnen (Unmanned Arial Vehicles, kurz UAV) zur Aufnahme von Küstengebieten und Entwicklung von teilautomatisierten Softwareverfahren bei der Luftbildauswertung aus UAV-Befliegungen (LEDA-K2)“, federführend bearbeitet von der Dezernatsgruppe Küste des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg in Rostock, sollten nur die Voraussetzungen geschaffen werden, dass der Einsatz von Mobilem Laserscanning (MLS) und von Unmanned Aircraft Vehicles (Drohnen) **im direkten ufernahen Küstenbereich und für reine, spezifische Küstenschutzaufgaben an Nord- und Ostsee** erfolgreich durchgeführt werden kann. In beiden Projekten mit den kurzen Projektzeiträumen vier und neun Monate sollten nur die tatsächliche **Anwendbarkeit der vorhandenen technischen Systeme** untersucht werden, so dass die hier dargelegten Ergebnisse nur einen **Erfahrungsbericht des praktischen Einsatzes** und der Möglichkeiten darstellen und nicht auf technische Spezifikationen oder gar Anpassungen der eingesetzten Geräte eingehen können. Die Ergebnisse aus beiden Projekten lassen sich stichpunktartig wie folgt zusammenfassen:

- Für alle morphologischen Naturraummessungen im ufernahen Bereich mittels MLS reichen die erzielbaren Punktdichten (>10 Punkte) und Punktgenauigkeiten (in der Höhe kleiner 5 cm und in der Lage kleiner als 1 dm) aus.
- Die minimale Scanreichweite bei MLS liegt bei 1,5 m, die optimale Scanreichweite sollte die 200-m-Marke nicht überschreiten, die maximale Scanreichweite liegt bei 500 m, wobei eigene Abschattungen durch das System selbst nicht zu verzeichnen sind.
- Die Lasermesspunktgröße sowie die verwendeten Korrelationen von Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte sind in allen Reichweitenbereichen für Naturraummessungen völlig ausreichend und somit uneingeschränkt nutzbar.
- Bei einer optimalen, durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit mit MLS von 30–40 km/h bei sandigen Flachküstenabschnitten und Deichtrassen können bis zu 80 km am Tag aufgenommen werden.
- Eine Unterscheidung von Gebäuden und befestigten Deichtrassen gegenüber natürlichen Strukturen (Sandstrand, Pflanzen, Bäume) ist bei MLS über die erfassten Rauigkeitsbeiwerte möglich.
- In der Regel sind im ufernahen Bereich alle Vorgaben für die problemlose GNSS/INS Initialisierung und GNSS-Vermessung vorhanden.

- In der Regel gibt es bei der Vermessung mit MLS an sandigen Flachküstenabschnitten vom Strand aus, von der Deichkrone bzw. von der landseitigen Dünen- oder Deichseite keine Probleme, auch nicht bei der Erfassung des Deichfußes.
- Probleme beim MLS gibt es bei Schneebedeckung, die zu quantitativen und qualitativen Verlusten bei den Messergebnissen führen kann sowie an stark steinigen Flachküstenbereichen, an Steilküstenbereichen oder auch bei feinsandigen, neu akkumulierten Strandbereichen, wo die Gefahr des Festfahrens des Fahrzeugs besteht.
- Die Datenmengen und Bearbeitungszeiten sind stark von den Aufnahmeparametern abhängig, bei optimierten Verarbeitungsalgorithmen benötigt man pro 1 MLS-Datenerfassungsstunde 8 Stunden für das Postprocessing.
- Durch Verwendung des LAS-Formates bei MLS ist Standardsoftware verwendbar und es können problemlos Digitale Geländemodelle (DSM, DTM) erzeugt werden, auch verlustfreie CAD-Konvertierungen sind theoretisch möglich.
- Der Einsatz der UAV (Drohne) direkt nach Sturmfluten ist bis Windstärke 4 problemlos möglich, ebenso im Winter, solange keine vollständige Schneebedeckung vorliegt.
- Die optimale Flughöhe von UAVs für Küstenschutzbelange beträgt 80–120 m bei möglichen Fluggeschwindigkeiten von 10–70 km/h, die maximale Windgeschwindigkeit darf dabei 30 km/h nicht überschreiten.
- Die tatsächlichen Flugzeiten der UAVs im Winterbetrieb liegen zwischen 20 und 35 Minuten in Abhängigkeit der verwendeten Akkus und Witterungsverhältnisse.
- Orthophotos von UAVs lassen über manuelle Auswertung eine rein optische Betrachtung des Vegetationszustandes zu, automatische Verfahren mit NIR-Filtern sind nicht zu empfehlen.
- Die Kombination von UAV, MLS- und DGM-Daten ist möglich und sinnvoll, da die Verschneidung dieser Daten zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führt.
- Die Nutzung von Luftbildern aus UAV-Flügen mit dem LEDA-K Flächenflieger (Easy Glider Pro) für Digitale Geländemodelle, für stereoskopische Auswertungen sowie zur Ermittlung von Abbruchraten, Volumen- und Massenberechnungen sind theoretisch möglich, aber derzeit nicht praktikabel (Stand 2014).
- Die verwendete MLS-Technik sowie die Drohnen (UAV) entsprechen für den dienstlichen Einsatz den gesetzlichen Vorgaben und Regelungen, wobei bei der Datenerfassung und -verarbeitung die Datenschutzbestimmungen des jeweiligen (Bundes-) Landes zu beachten sind.

Hinzu kamen zum Einen die praxisreife Entwicklung und der Bau eines Prototyps eines UAV mit Kleinstlaser zur Küstengebietserfassung und damit der Nachweis des grundsätzlichen Einsatzes von Drohnen mit kleinen Laserscannern für die Aufgaben des Küsten- und Umweltschutzes und zum Anderen die spezialisierte Neuentwicklung einer Software, die geeignete Lösungen bietet, um die speziellen Anforderungen an Genauigkeit, Überlappung, Flughöhe und -geschwindigkeit der UAV bei der photogrammetrischen Bearbeitung von Luftbildern sowie an die besondere Morphologie und Bodenbeschaffenheit im Küstenbereich mit den entwickelten Tools praxisrelevant bearbeiten zu können.

Schlagwörter

Mobiles Laserscanning (MLS), Drohnen, UAV (unmanned aircraft vehicle), UAS (unmanned aircraft system), Küstengebiete, Küstenschutz, Nordsee, Ostsee, Luftbilder, Orthophotos, Laservermessung, Softwareentwicklung

Summary

The research projects "Mobile laser scanning and use of unmanned aircraft vehicles for the survey of coastal areas and coastal protection structures (LEDA-K)" and "Laser scan recordings using unmanned aircraft vehicles (UAV) for the survey of coastal areas and development of semi-automated software methods for the evaluation of aerial scenes gathered by UAV-surveying-flights (LEDA-K2)", set the stage for a successful application of mobile laser scanning (MLS) and unmanned aircraft vehicles for issues of coastal protection in the North Sea and Baltic regions. The department group for coastal protection of the State Office for Agriculture and Environment in Rostock was the institution in charge for these projects. Results from both projects can be summarized as follows:

- *Point-densities (>10 per square meter) and -accuracies (< 5cm vertically and < 10 cm horizontally) attainable with MLS are sufficient for all morphological surveys in coastal areas.*
- *Minimum scan range is 1.5 m. Optimal scan range is below 200 m while maximum scan range is 500 m whereupon shadowing effects by the system itself could not be recognized.*
- *The size of laser measurement points as well as the used correlation of flight velocity, scan rate and scan point density are absolutely sufficient at all scales of range and thereby usable without limitations.*
- *In case of sandy shallow coasts and dikes a distance of 80 km can be surveyed per day under assumption of an optimal average flight velocity of 30–40 km per hour.*
- *A distinction between rigid man-made structures as buildings and dikes and natural structures (beaches, vegetation) is possible for MLS by integration of the detected bottom roughness.*
- *Usually, all requirements for a working initialization of GNSS/INS and GNSS-survey are given in coastal areas.*
- *Concerning the survey with MLS at sandy shores, from the top of the dike or from landward dune or dike, no problems could be recognized. Neither could it be with the detection of the dike's bottom line.*
- *For MLS, problems appear with the presence of a snow coverage resulting in a qualitative and quantitative decrease of the survey's information as well as on shallow shores rich with rocks, cliffs, or recently accumulated beaches where the vehicle can get stuck.*
- *The amount of data and the duration of processing vary largely with the recorded parameters. With optimized processing algorithms, post processing takes 8 hours for the data of one hour of survey.*
- *By application of the LAS-file format for MLS also standard software can be used and digital terrain models (DEM, DSM) can easily be generated. Even nondissipative CAD-conversions are possible in theory.*
- *Application of an UAV in close succession to a storm flood is possible for wind speeds of up to 4 bft. The same is valid for winter, as long as there is no dense snow coverage.*
- *Optimal flight altitude for UAV's for coastal protection issues is 80 to 120 m with possible flight velocities of 10 to 70 km/h, while maximum wind speed may not exceed 30 km/h.*
- *Dependig on the batteries used and the contemporary weather conditions, the actual time of flight for a UAV varies between 25 and 30 min in case of an operation during winter.*

- *Using orthophotos gathered by UAVs and including a manual evaluation, information on the condition of the vegetation can be executed in a purely optical way. Automated procedures with NIR-filters are not recommended.*
- *The combination of data from UAV, MLS and digital terrain models is possible and makes sense, since it results in an increase of information.*
- *The usage of aerial images from UAV flights with the LEDA-K plane (Easy Glider Pro) for digital terrain models, stereoscopic analysis as well as the quantification of cliff erosion, calculation of masses and volumes is possible in theory, however, not feasible at this time (2014).*
- *The used MLS-technology just as UAV's are conformable to law if applied for public service. However, regulations for data privacy of every single (federal) country have to be taken into account concerning gathering and processing of data.*

Further aspects were the development and construction of a practically working UAV prototype with small scale laser for the survey of coastal areas and herewith the proof of a fundamental applicability of small laser scanners for the duties of coastal and environmental protection just as the development of a customized software able to cope with the requirements concerning accuracy, overlap, flight speed and altitude of the UAV with regard to photogrammetric processing of aerial images and the unique morphology and soil properties of the littoral.

Keywords

mobile laser scanning, unmanned aircraft vehicle, unmanned aircraft system, coastal protection, shoreline, North Sea, Baltic Sea, aerial photographs, mobile laser scanning, airborne laser scanning, software development

Inhalt

1 Einleitung 151
2 Mobiles Laserscanning 152
2.1 Untersuchungsschwerpunkte Mobiles Laserscanning 153
2.2 Ergebnisse des Mobilen Laserscannings 154
2.2.1 Realisierbare Fahrgeschwindigkeiten 154
2.2.2 Realisierbare Leistungsparameter:km pro h, km pro d, km pro Woche .. 154
2.2.3 Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe 155
2.2.4 Scanraten und Lasermesswerte pro m²,Messpunktdichte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Scanrate 155
2.2.5 Minimum und Maximum von Scanreichweite, Scanbereich und Scanwinkel 157
2.2.6 Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit von der Reichweite 158
2.2.7 Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte 158
2.2.8 Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialen 158
2.2.9 Navigationspfad, GNSS/INS Initialisierung, GNSS-Abschattungen 159
2.2.10 Probleme durch Laserabschattungen hinsichtlich der Deichfußerfassung 159

3 Einsatz von Flächenfliegern 160
3.1 Untersuchungsschwerpunkte beim Einsatz von UAV 163
3.2 Ergebnisse des Einsatzes von Flächenfliegern 163
3.2.1 Zustandserfassung von Deichen und Dünen im Allgemeinen und für ein Monitoring von Ufer-Strand-Dünen 163
3.2.2 Flughöhe, -geschwindigkeit und -dauer 170
3.2.3 Tatsächliche Windanfälligkeit (nach Sturmflut!) 171
3.2.4 Kombination der UAV-Daten mit MLS und DGM 172
3.2.5 Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand- und Dünenbereich/Beitrag zu Volumen- und Massenberechnungen nach Sturmfluten/Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation 172
3.2.6 Nutzbarkeit als Grundlage für Digitale Geländemodellierung 177
3.2.7 Rückschlüsse auf Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/-dichte in den Dünen 177
3.2.8 Stereoaufnahmen 178
3.2.9 Kombination MLS und Drohne während der Aufnahme 178
3.2.10 Wintereinsatz der Drohne 179
3.2.11 Gesetzliche Bestimmungen (u. a. Datenschutz) 179
4 Einsatz von Multikoptern 180
4.1 Untersuchungsschwerpunkte und Einsatzmöglichkeiten von Multikoptern 180
4.2 Bestandteile des entwickelten LEDA-K2-Multikopters 181
4.2.1 Flugplattform MikroKopter Basisset Hexa XL 181
4.2.2 GPS-Chipset UBX-G5000/G0010 182
4.2.3 Autopilot-Einheit Krooz inklusive IMU-Sensor MPU-6000/6050 182
4.2.4 Recheneinheit PandaBoard ES 182
4.2.5 Wahl des Laserscanners 183
4.2.6 Aufbau der Komponenten 184
4.3 Spezifikationen des LEDA-K2-Multikopters 185
5 Aktuelle Entwicklungen zum Einsatz von UAV 189
6 Danksagung 191
7 Schriftenverzeichnis 191

1 Einleitung

Bisher kamen im Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern zur Aufnahme der Morphologie und zur Vermessung von Küstenschutzanlagen neben den klassischen tachymetrischen Messverfahren hauptsächlich Airborne Laserscanning (ALS) und vereinzelt terrestrisches Laserscanning zum Einsatz.

Bei der tachymetrischen Vermessung wird der Vorteil der hochgenauen Aufnahme von Objekten inklusive der Attributierung durch die überwiegenden Nachteile von

wenigen Punkten pro Fläche, einem hohen Zeit- und Kostenaufwand und der Notwendigkeit der Interpolation von Zwischenflächen zunichte gemacht.

Demgegenüber wird bei der ALS-Vermessung eine sehr große Fläche in kurzer Zeit aufgenommen, hier fehlen aber dann die Attributierung der Punkte sowie die hohe Genauigkeit und es besteht das Problem der Verfügbarkeit von Flugzeugen/Hubschraubern zum gewünschten Zeitpunkt. Bei zu kleinen Flächen liegen die Mob-/DeMobkosten bzw. An- und Abflugkosten oft über den tatsächlichen Befliegungskosten.

Das terrestrische Laserscanning als Mittelweg durch die Aufnahme mit hoher Punktdichte bei einer größeren Fläche mit schnellerer Verfügbarkeit (als beim ALS), aber mit reduzierter Genauigkeit gegenüber tachymetrischen Verfahren und mittlerem Zeit- und Kostenaufwand ist für kleinflächige Objekte eine gute Alternative, für größere und insbesondere langgestreckte Objekte, wie Dünen und Deiche, aber auch keine befriedigende Lösung.

Die Technikentwicklung der letzten Zeit hat nun zwei weitere mögliche Aufnahmeverfahren zur Marktreife gebracht, deren Anwendung gerade für die Aufgaben des Küstenschutzes, nicht nur in MV sondern in allen Küstenländern, theoretisch vielversprechende Ergebnisse erwarten lässt, zum einen ist dies das Mobile Laserscanning (MLS) und zum anderen der Einsatz ferngesteuerter Drohnen. Beide Verfahren wurden exemplarisch an ausgewählten Küstenschutzstandorten getestet, um entweder ihre praxisrelevante Nutzbarkeit zu bestätigen und damit eine Grundlage für detaillierte Forschungen und Anwendungen zu schaffen oder eben diese Verfahren für Belange des Küstenschutzes in der jetzt vorliegenden Technologie auszuschließen. Dabei wurden die UAV (unmanned aircraft vehicle) sowohl mit Kameras für Fotoaufnahmen als auch mit Kleinstlasern für Laserscanvermessungen ausgestattet und erforscht.

2 Mobiles Laserscanning

Beim Mobilen Laserscanning werden auf einem Fahrzeug montierte Laserscanner zur Aufnahme der direkten Umgebung genutzt, wobei diese ihre Arbeit bei kontinuierlicher Fahrt schneller, flächenhafter und hervorragend für Linienelemente durchführen können. Durch die parallele Aufnahme von Echtfarbvideos kann im Nachhinein ein besonders gutes Zustandsbild von den erfassten Objekten erstellt werden.

Im Projekt kam dabei der RIEGL-Scanner VMX-250 auf verschiedenen Fahrzeugen zum Einsatz sowie ein klassischer terrestrischer RIEGL-Scanner, der auf einen Jeep montiert worden war. Alle erhobenen MLS-Daten wurden von der Firma Milan Geoservice GmbH mit Softwarepaketen ausgewertet, wie sie auch bei der tachymetrischen Landvermessung bzw. bei der ALS-Vermessung verwendet werden, um die tatsächliche Datenqualität zwischen den jeweiligen Verfahren softwareunabhängig und verlustfrei beurteilen zu können.

Abbildung 1: Geländetaugliches Fahrzeug mit montiertem Riegl MLS-System VMX-250.

2.1 Untersuchungsschwerpunkte Mobiles Laserscanning

Der Einsatz von Mobilen Laserscannern bei der Vermessung von urbanen Gebieten, insbesondere von Infrastrukturen in Städten, ist Stand der Technik und stellt derzeit keine besonderen Anforderungen an das Equipment und an das Postprocessing. Ein Einsatz auf schmalen Uferstreifen mit sandigem oder stark steinigem Untergrund bei gleichzeitig wenig baulich festen Strukturen ist bisher nicht probiert worden und stellt auf jeden Fall weit höhere Anforderungen an die Technik (Geländefähigkeit) und an die Nachbearbeitung der Daten. Ziel der Untersuchungen war es, folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Leistungsparameter, d. h. km pro h, km pro d, km pro Woche
- Fahrgeschwindigkeiten
- Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe
- Scanraten, Lasermesswerte pro m²
- Messpunktdichte in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit
- Messpunktdichte in Abhängigkeit der Scanrate
- min./max. Scanreichweite, Scanbereich, Scanwinkel
- Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit der Reichweite
- Genauigkeitsbetrachtung: Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate, Messpunktdichte
- Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialen
- Navigationspfad, GNSS/INS Initialisierung, GNSS-Abschattungen
- Laserabschattungen, Deichfußerfassung
- Zugangsmöglichkeiten bzw. Zugangseinschränkungen des Messfahrzeuges
- Auswirkungen von Schneebedeckung auf die Messergebnisse

- Datenerfassung, Datenmenge, Zeitraum der Bearbeitung
- Datenformate, Datenableitungen, Datenspeicherung
- Datenaufbereitung, u. a. CAD-Modell, Zeit-/Leistungsverhältnis, Genauigkeitsverlust
- Betriebswirtschaftliche Gesamtbewertung, Zeit- und Kostenersparnis
- gesetzliche Forderungen im Bereich des Küstenschutzes
- gesetzliche Bestimmungen, Datenschutz

2.2 Ergebnisse des Mobilen Laserscannings

2.2.1 Realisierbare Fahrgeschwindigkeiten

Die erreichbaren und realisierbaren Fahrgeschwindigkeiten richten sich nach verschiedenen Gesichtspunkten. Erfolgt eine Aufnahme bspw. in bebauten Gebieten auf öffentlichen Straßen, so ist die maximale Geschwindigkeit auf die durch die STVO vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit begrenzt. Diese Beschränkungen gelten auch bei MLS-Aufnahmen auf Deichwegen. Da diese üblicherweise als Rad- und Fußgängerwege ausgelegt sind, ist die Geschwindigkeit zusätzlich so anzupassen, dass weder Menschen noch Tiere zu Schaden kommen können. Die Sperrung von Stränden und Deichwegen ist im Sommer aufgrund der touristischen Nutzung keine Option und auch im Winter sollte/muss eigentlich eine Sperrung nur eine temporärere und räumlich stark begrenzte Möglichkeit sein. Vom Gerätehersteller wird dazu eine maximale Geschwindigkeit von 60–70 km/h vorgesehen, um ein optimales Verhältnis von Punktdichte, Punktgenauigkeit und Datensicherheit bei maximaler Datenaufnahme zu erhalten.

Dies gilt gleichermaßen für MLS-Aufnahmen im Strandgebiet. Im Verlaufe der MLS-Messungen an den Stränden von Wustrow-Dierhagen, Prerow und Hörnum-Odde ergab sich eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 40–50 km/h. Höhere Geschwindigkeiten konnten auf Sandboden nicht erreicht werden.

Fazit: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei sandigen Flachküsten und Deichtrassen beträgt bei MLS 30–40 km/h in einem Abschnitt.

2.2.2 Realisierbare Leistungsparameter: km pro h, km pro d, km pro Woche

Angenommen an sandigen Strandbereichen kann über weite Strecken mit der Höchstgeschwindigkeit (40–50 km/h) gefahren werden, dann ergibt sich eine theoretische maximale Aufnahmegeschwindigkeit von 40 bis 50 km Sandstrand pro Stunde. Dies kommt nur in Frage, wenn alle Strandabschnitte direkt miteinander verbunden sind und dadurch nacheinander aufgenommen werden können. Durch den teilweise recht lockeren Sandboden, Hindernisse sowie Passanten ist eher von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 25–30 km/h auszugehen. Des Weiteren wird Zeit für das Umsetzen des Fahrzeuges, für einen eventuellen Austausch der Datensicherungsplatten und auch für die Betankung des Fahrzeuges benötigt. Anhand dieser Faktoren und der im Rahmen des Projektes tatsächlich gefahrenen Kilometer ist von einer Aufnahmelänge von 10 km pro Stunde auszugehen. Damit wären pro Tag 80 km und in einer Woche rund 500–600 km erreichbar.

Fazit: Durchschnittliche Geländeaufnahme bei MLS: 80 km am Tag.

2.2.3 Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe

Um die Scanstreifen einander anzupassen wurden Ebenenpaare in benachbarten Scanstreifen gesucht und deren Abstände zueinander berechnet. Diese wiesen eingangs eine Standardabweichung von ca. 4 cm auf. Nach einer Ausgleichung, welche eine Verschiebung und Verkippung der einzelnen Streifen zuließ, betrug die Standardabweichung nur noch ca. 1 cm.

Für die Bestimmung der äußeren Genauigkeit wurde ein Datensatz aus einer ALS-Befliegung aus dem Jahr 2012 verwendet. Dabei wurden wiederum Ebenenpaare zur Berechnung herangezogen. Horizontale Flächen zur Abschätzung der Höhengenauigkeit zeigten Differenzen von <5 cm und schräge Flächen z. B. an Häusern zur Abschätzung der Lagegenauigkeit Differenzen von <10 cm.

Zudem wurde die Höhengenauigkeit mit Hilfe von Profilen aus RTK-GNSS-Messungen ermittelt. Die Profile passen in den befestigten Bereichen wie dem Deich oder an Häusern sehr gut zueinander. Hier liegen die Höhenunterschiede der beiden Messungen bei etwa 4 cm. Im Strandbereich befinden sich keine ebenen und befestigten Flächen die zur Referenzierung verwendet werden können.

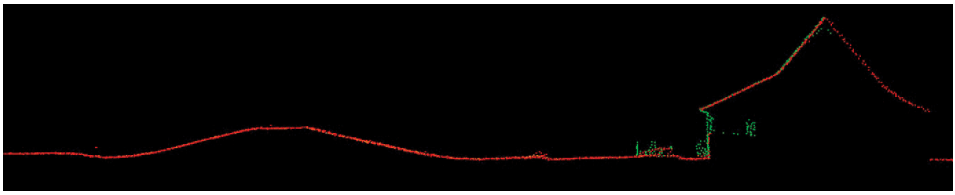

Abbildung 2: Profilvergleich ALS (rot) mit MLS (orange, grün) befestigter Bereich Wustrow.

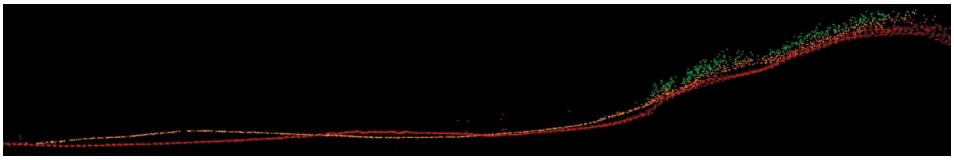

Abbildung 3: Profilvergleich ALS (rot) mit MLS (orange, grün) Strandbereich Wustrow.

Fazit: Erfassungsgenauigkeiten bei MLS in der Höhe definitiv kleiner 5 cm (1–4 cm im Projekt) und in der Lage kleiner als 1 dm.

2.2.4 Scanraten und Lasermesswerte pro m², Messpunktdichte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Scanrate

Jeder der beiden Riegl VQ-250 Laserscanner weist eine maximale Scanrate von 300 kHz und eine maximale Scangeschwindigkeit von 100 Scanlinien/Sek. auf. Die Anzahl der 3D-Punkte pro m² ist abhängig von der verwendeten Scanrate, der Fahrgeschwindigkeit und der Entfernung zum Laserscanner. Je höher die Scanrate ist, desto mehr Messungen werden auf einen m² durchgeführt. Die Wahl der verwendeten Scanrate ist wiederum davon abhängig, welche maximale Reichweite benötigt wird, um das Zielgebiet aufzunehmen.

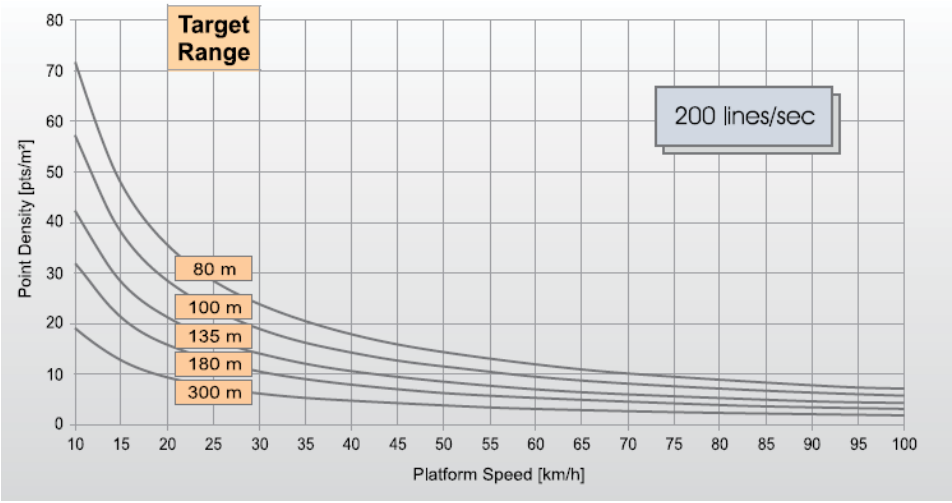

Abbildung 4: Punktdichte bei 100 kHz (2 x 50 kHz) bei langen Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten.

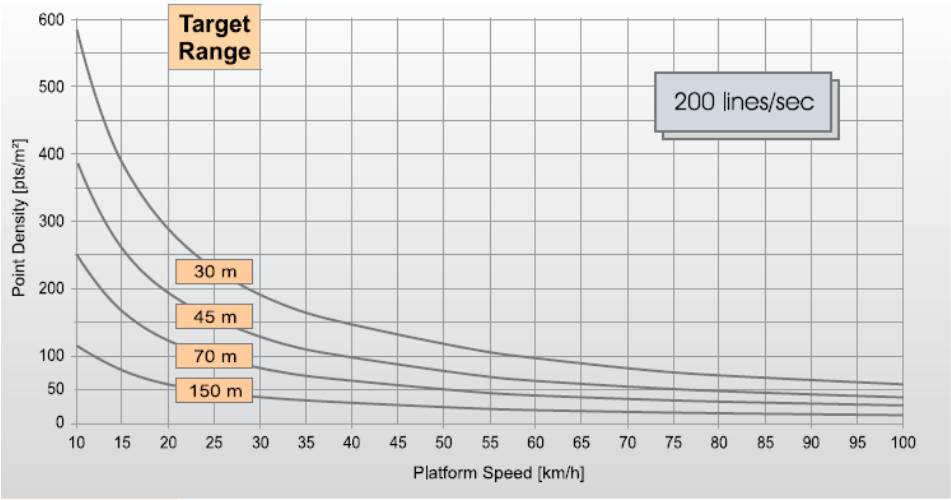

Abbildung 5: Punktdichte bei 300 kHz (2 x 150 kHz) bei mittleren Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten.

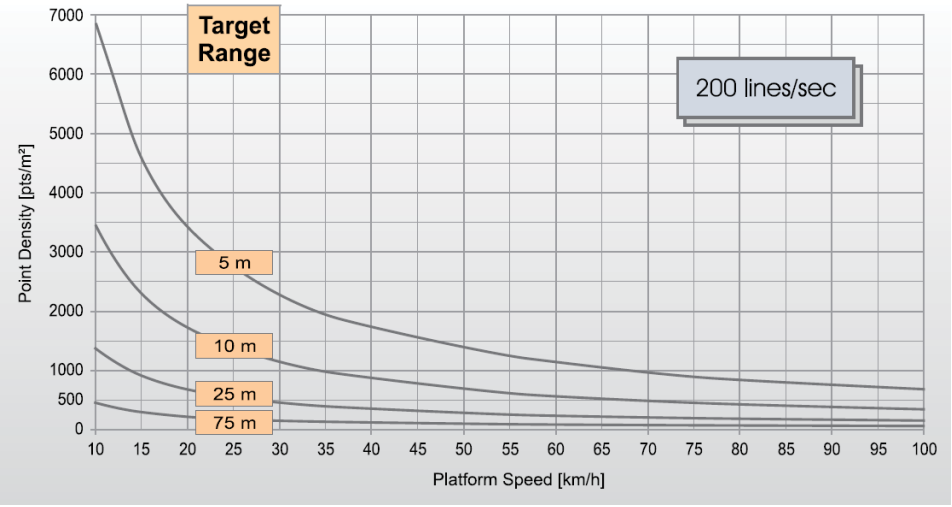

Abbildung 6: Punktdichte bei 600 kHz (2 x 300 kHz) bei kurzen Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten.

Die Punktdichte nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit des Messfahrzeuges ab. Dies gilt ebenso bei zunehmender Distanz zum Aufnahmeobjekt. Detaillierte Betrachtungen zu den technischen Eigenschaften waren nicht Bestandteil des Projektinhaltes.

2.2.5 Minimum und Maximum von Scanreichweite, Scanbereich und Scanwinkel

Die minimale Reichweite, ab der eine Distanzmessung möglich ist, beläuft sich auf 1,5 m. Die beiden verwendeten Laserscanner haben relativ zueinander einen Abstand von ca. 70 cm und sind üblicherweise auf dem Dach eines Geländefahrzeuges montiert. Aufgrund dieser Konfiguration entstehen praktisch keine Datenlücken. Sollte die Distanz zu einem Objekt die minimale Reichweite einmal nicht erreichen, wird das Objekt durch den zweiten Scanner aufgenommen. Die maximale Reichweite beträgt bei einer gewählten Scanrate von 50 kHz 500 m. Bei 300 kHz wird nur noch eine maximale Reichweite von 200 m erreicht. Die beiden Laserscanner des VQ-250 weisen jeweils ein Sichtfeld von 360° auf und besitzen somit bezüglich des Scanbereiches keine Einschränkungen. Zudem sind sie bezüglich einer horizontalen und vertikalen Ebene schräg angeordnet. Hierdurch können Schattenbereichen des einen Scanners durch den anderen Scanner aufgenommen werden.

Fazit: Die minimale Scanreichweite liegt bei 1,5 m, die maximale Scanreichweite sollte die 200-m-Marke nicht überschreiten, aufgrund der Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs und des 360° Scanwinkels sind eigene Abschattungen durch das System selbst nicht zu verzeichnen.

2.2.6 Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit von der Reichweite

Der VQ-250 verfügt über eine Strahldivergenz von 0,35 mrad (Milli-Radiant). Das entspricht einem Winkel von 0,02°. Bereits beim Verlassen weist der Laserstrahl eine Breite von 7 mm auf. Bei einer Entfernung von 50 m trifft der Strahl mit einem Durchmesser von 18 mm auf ein Objekt auf und bei einer Entfernung von 100 m bereits mit 36 mm Durchmesser. Für die maximale Reichweite von 500 m ergibt sich demnach eine Punktgröße von 18 cm.

Fazit: Die Lasermesspunktgröße ist im angestrebten Reichweitenbereich von 200 m sehr gut und selbst im maximalen Reichweitenbereich von 500 m für Naturraummessungen völlig ausreichend und somit uneingeschränkt nutzbar.

2.2.7 Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte

Wurden mehrere Scans vorgenommen (bspw. vom Strand und vom Deich aus), können diese zueinander angepasst werden. Zunächst werden mittels der sog. Boresight-Kalibrierung Korrekturen der Orientierung von Scanner und IMU-Einheit zueinander vorgenommen. Diese können durch den Vergleich von Ebenen aus gegenläufigen Scanstreifen bestimmt werden. Die folgende Anpassung der einzelnen Streifen zueinander verläuft ebenfalls über einen Vergleich von Ebenenpaaren. Hausdächer bspw. sind für diesen Vergleich am besten geeignet. In Abschnitt 2.2.4 wurde bereits eingehend behandelt wie sich die Scanrate und die Fahrgeschwindigkeit auf die Messpunktdichte auswirken. Je höher die verwendete Scanrate ist und je langsamer das Fahrzeug fährt, desto höher ist die Anzahl der Punkte pro m².

Fazit: Die bekannten und dargestellten Korrelationen von Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte liefern in allen Fällen mit den vorgegebenen Parametern sehr gute Ergebnisse.

2.2.8 Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialen

Intensitätsbilder der Rückstreuung des Laserscanners können genutzt werden, um Aussagen zur Beschaffenheit der Oberflächen zu machen. Glatte Oberflächen reflektieren das auftreffende Lasersignal eher in einem Winkel, der dem Auftreffwinkel entspricht. Somit kommt nur ein geringer Teil des Signals zurück zum Scanner. Bei rauen Flächen verhält es sich umgekehrt, wodurch Punkte eine höhere Intensität aufweisen. Aufgrund dessen sind in diesem Fall Fassadenpunkte in der folgenden Intensitätsdarstellung heller abgebildet als Punkte des Daches. Natürlich können auch andere Gründe wie Materialeigenschaften und unterschiedliche Reflektivität zu ähnlichen Effekten führen.

Abbildung 7: Intensitätsbild eines Hauses im Gebiet Hörnum-Odde.

Fazit: Eine Unterscheidung von Gebäuden und befestigten Deichtrassen gegenüber natürlichen Strukturen (Sandstrand, Pflanzen, Bäume) ist über die erfassten Rauigkeitsbeiwerte möglich.

2.2.9 Navigationspfad, GNSS/INS Initialisierung, GNSS-Abschattungen

Eine GNSS/INS Initialisierung muss vor Beginn jeder Messungskampagne durchgeführt werden. Für die Initialisierung der GNSS/INS-Einheit muss diese für eine kurze Zeit auf eine Geschwindigkeit von 60–70 km/h beschleunigt werden. Dafür ist eine in der Nähe befindliche Straße zu wählen, auf der mindestens 70 km/h gefahren werden darf.

Der GNSS-Empfänger des Riegl VMX-250-Systems kann Signale von sowohl GPS als auch GLONASS-Satelliten empfangen. Aufgrund dessen ist die Sicht zu ausreichend Satelliten fast immer gegeben. Größere, die Güte der Positionsbestimmung beeinflussende Abschattungen sollten daher weder am Strand noch auf Deichen auftreten und stellen somit kein Problem dar.

Fazit: In der Regel sind im ufernahen Bereich alle Vorgaben für die problemlose GNSS/INS Initialisierung und GNSS-Vermessung vorhanden.

2.2.10 Probleme durch Laserabschattungen hinsichtlich der Deichfußerfassung

Wenn möglich, dann wird sowohl vom Strand als auch vom Deich aus mit dem MLS-Verfahren gescannt. Da von einem Fahrzeug aus gemessen wird, ist eine vollständige Durchdringung des Waldes hinter dem Deich abhängig von der Breite des Waldes. Trotz der flachen Aufnahme der Deichfüße vom Deich aus, ergaben sich keine Probleme bei Rekonstruierung des Deichprofils. Vom Strand aus konnten nur bis zur seeseitigen Dünenoberkannte Punkte aufgenommen werden, sodass der für Küstenschutzfragen wichtige gesamte Dünenkörper mit einer einzigen Aufnahme nicht erfasst werden kann.

3 Einsatz von Flächenfliegern

Bisher wurde zur Ermittlung der Morphologie des Strand-Dünenbereichs und zur Erfassung von Schäden nach Sturmfluten neben den kleinräumigen Profilaufnahmen (von maximal 3 Profilen pro Kilometer bei Naturraummessungen bis zu nur 5 Einzelprofilen an der gesamten Flachküsten nach Sturmfluten) auch für kleinere Gebiete Airborne Laseraufnahmen (5 Gebiete á 5-10 km Küstenlänge pro Jahr bzw. Schadensereignis) verwendet, um Zustand und Schäden des Uferbereiches zu ermitteln. Nach Sturmfluten haben Mitarbeiter der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLUs) vor Ort Fotoaufnahmen gemacht, mit deren Hilfe dann Abtragsraten und -volumina überschläglich ermittelt wurden, um den monetären Schaden und auch die Notwendigkeit von Reparatur- oder Aufspülmaßnahmen zu beurteilen. Das sind im Endeffekt unsichere Verfahren mit der großen Gefahr von Fehleinschätzungen bzw. -berechnungen. Jede flächenhaftere Aufnahme mit geprüften und einheitlichen Werkzeugen und Methoden muss zwangsläufig zur Verbesserung der Ergebnisse führen. Diesem Ziel standen bisher die viel zu hohen Kosten von klassischer Vermessung und ALS entgegen.

Deshalb wurde der Ansatz verfolgt, neue luftgestütze Aufnahmegeräte, u. a. Multikopter für den speziellen Einsatz im Küstenschutz zu testen, ggf. anzupassen oder sogar neu zu entwickeln.

Zum Einsatz kamen dabei verschiedene, von der Firma CIS GmbH Rostock modifizierte UAVs auf Basis des Modellflugzeuges „Easy Glider Pro“.

Abbildung 8: Foto des Standardflugzeugs Easy Glider Pro.

Abbildung 9: Start des UAV Easy Glider Pro.

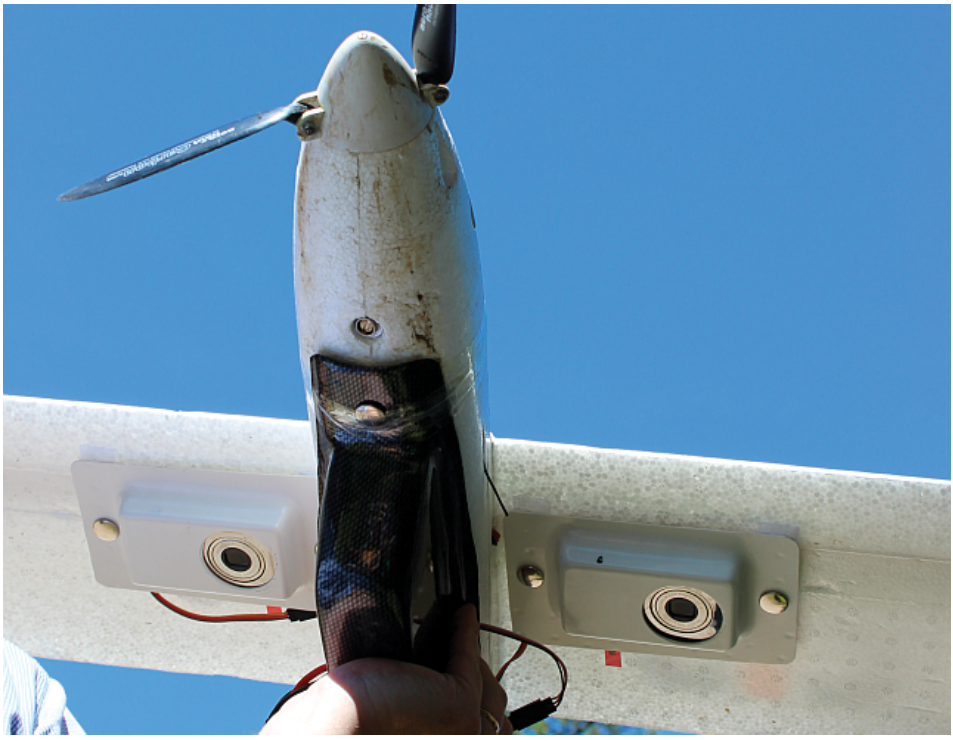

Abbildung 10: Foto der Kameraanordnung an den Flügeln.

Abbildung 11: Foto der Kameraanordnung parallel unter dem Flugzeug im Batteriekasten.

3.1 Untersuchungsschwerpunkte beim Einsatz von UAV

Die Anwendung von Unmanned Aircraft Vehicles (UAV) in fast allen Lebensbereichen hat in den letzten Jahren rasant zugenommen, so dass es für viele Bereiche schon industrielle Lösungen gibt. Allgemein wurde in der Vergangenheit die Meinung geäußert, dass eine Anwendung im Strandbereich der Ostsee oder Nordsee nicht möglich ist, da die ungünstigen naturräumlichen (keine Landung im Sand möglich) und meteorologischen Gegebenheiten (Winde) dies verhindern.

Im Projekt LEDA-K wurde erstmalig der Versuch gestartet, ein Standard-Modellflugzeug so zu modifizieren, dass mit der Verlängerung der Flugzeit durch mehrere oder größere Akkus sowie durch Anpassung der Hard- und Software die Aufnahme von direkten Küstengebieten möglich wird.

Neben den konstruktiven Anforderungen und dem tatsächlichen Bau und Einsatz von Prototypen standen folgende Fragestellungen im Fokus der Forschung:

- Zustandserfassung Deiche und Dünen allgemein
- Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand-/Dünenbereich
- Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/-dichte in den Dünen
- Monitoring Ufer-Strand-Dünen
- Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation von Abbrüchen
- Grundlagen für Digitale Geländemodellierung
- Beitrag zu Volumen-und Massenberechnungen nach Sturmfluten
- Möglichkeit von Stereoaufnahmen mit entsprechenden Verarbeitungsmethoden
- Möglichkeit der Verschneidung der Luftbilddaten aus den UAVs mit den Ergebnissen der MLS-Vermessung

3.2 Ergebnisse des Einsatzes von Flächenfliegern

3.2.1 Zustandserfassung von Deichen und Dünen im Allgemeinen und für ein Monitoring von Ufer-Strand-Dünen

Die allgemeine Zustandserfassung ist sowohl optisch durch generierte Orthophotos als auch rechnerisch durch die erzeugten Punktwolken möglich. Die folgenden Abbildungen zeigen die Zustandserfassung von Hörnum-Odde zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten als Shaded Relief und als Orthophoto:

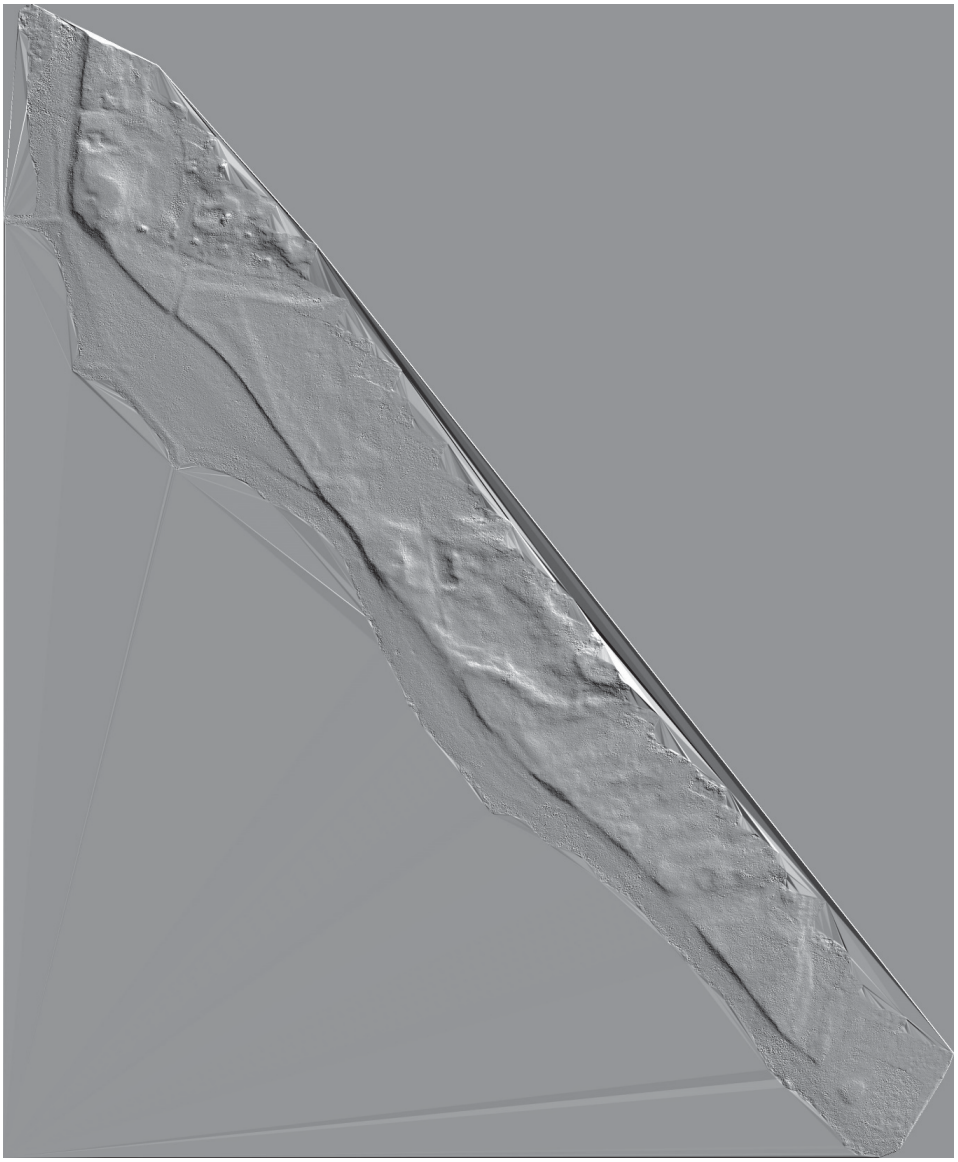

Abbildung 12: Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 06.11.2012.

Abbildung 13: Orthofoto des Gebietes Hörnum-Odde vom 06.11.2012.

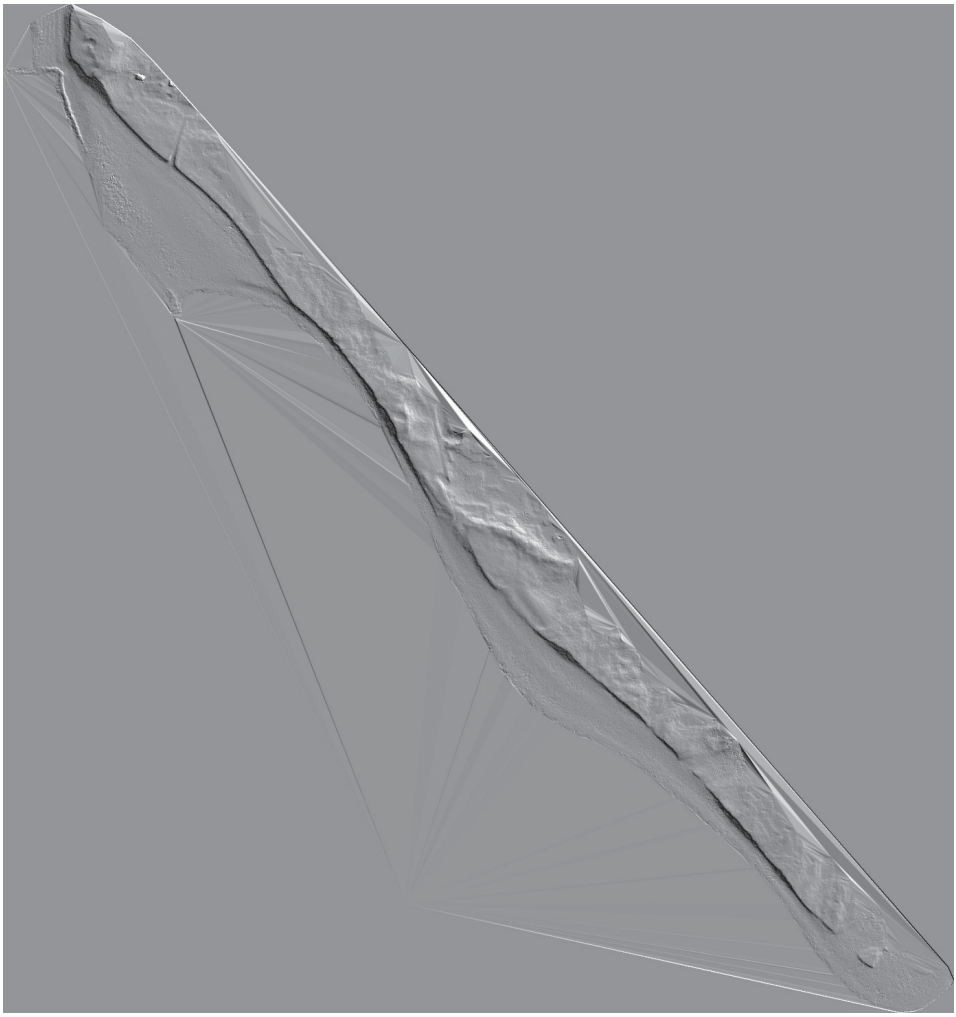

Abbildung 14: Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 25.01.2013.

Abbildung 15: Orthofoto des Gebietes Hörnum-Odde vom 25.01.2013.

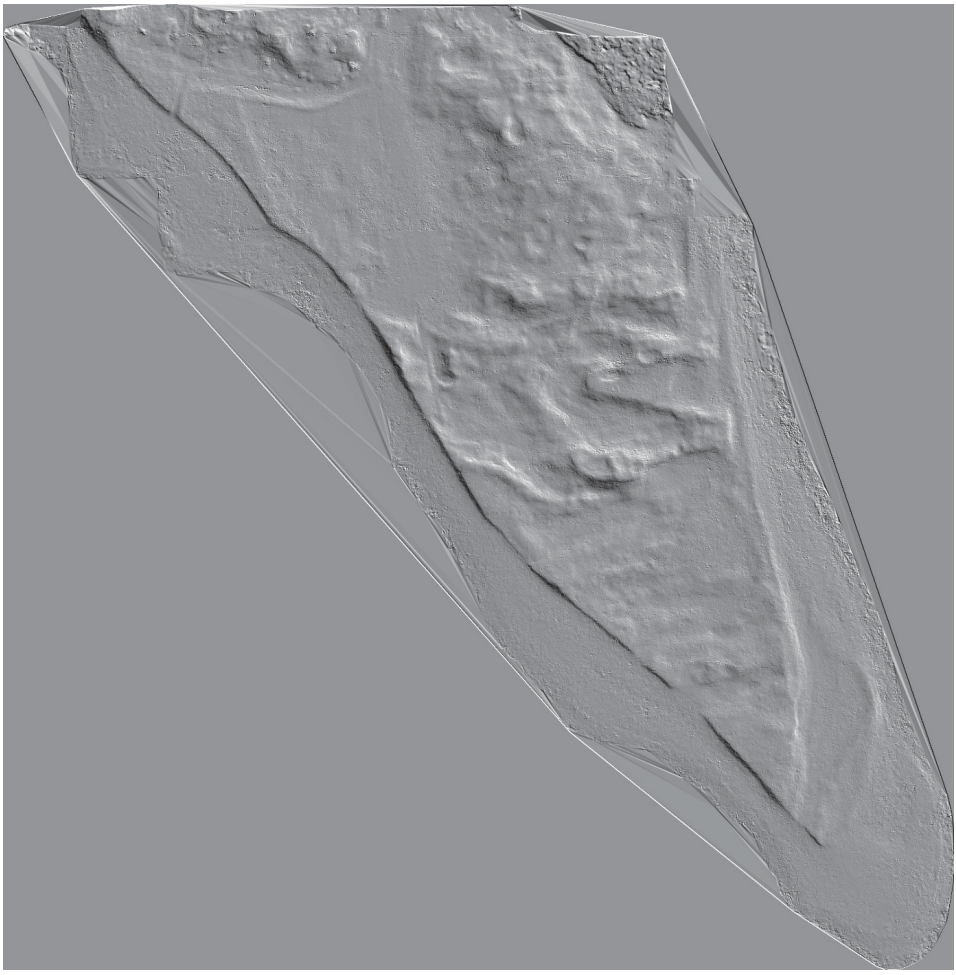

Abbildung 16: Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 05.03.2013.

Abbildung 17: Orthofoto der gesamten Südspitze im Gebiet Hörnum-Odde vom 03.05.2013.

Die Schummerungsdarstellungen der drei Messkampagnen sind im Vergleich zu den MLS-Daten weniger detailliert. Die wesentliche Morphologie kommt zwar zum Vorschein, jedoch haben die Strukturen einen geglätteten Charakter. Teilweise können in den Daten rechteckige Strukturen erkannt werden, welche den Ausdehnungen der Bilder entsprechen. Diese sind auf eine ungenügende Verknüpfung der Bilder zurückzuführen.

Zudem ist der Profilverlauf der aus den Bildern errechneten Punktwolken im Vergleich zu den Referenzdaten äußerst geglättet. Der Grad der Glättung ist im Strandbereich stärker als auf der Düne. Dies ist auf die unterschiedliche Texturierung in den beiden Bereichen und die damit verbundene Robustheit der Punktzuordnung im Anpassungsprozess zurückzuführen. Dadurch kann gesagt werden, dass die auffälligere Bepflanzung auf der Düne zu einer besseren Übereinstimmung mit den Referenzdaten führt.

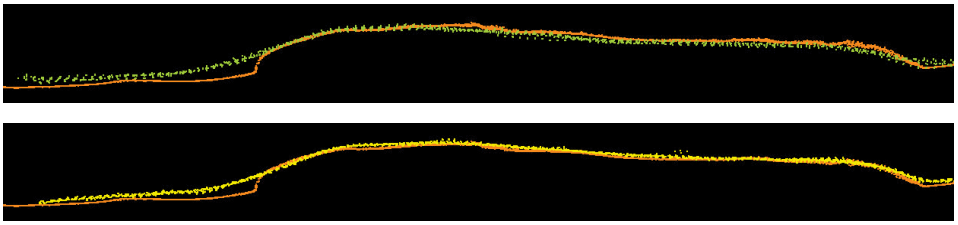

Abbildung 18: Vergleich der ALS-Daten (orange) mit den Ergebnisse der RGB-Datenauswertung (grün, gelb).

Abbildung 19: Zugehöriger Küstenabschnitt.

Fazit: Die allgemeine Zustandserfassung ist sowohl optisch durch generierte Orthophotos als auch rechnerisch durch die erzeugten MLS-Punktwolken möglich.

3.2.2 Flughöhe, -geschwindigkeit und -dauer

Die maximale Flughöhe der Drohne beträgt mit der projektzugehörigen Zuladung etwa 300 m. Im Zuge des Projektes kam die Drohne in einer maximalen Höhe von 200 m zum Einsatz. Als optimale Flughöhe ergab sich aber ein Wert von 120 m. Wird die Flughöhe niedriger angesetzt, weisen die Bilder eine zu geringe Überlappung auf. Wird mehr als 120 m gewählt, zeigen die Fotos aufgrund der größeren Entfernung zum Boden zu wenige Details, wodurch die generierte Punktwolke Einzelheiten ungenügend wieder gibt. Je nach Kamera variieren der Aufnahmebereich/-winkel und die maximale Auflösung. Damit ist die optimale Flughöhe zugleich abhängig von der gewählten Kamera. Im Zuge des LEDA-K Projektes kamen nur Kameras des Typs Casio EX-Z800 zum Einsatz.

Für eine stabile Flugbahn der Drohne wird eine relative Windgeschwindigkeit von mind. 5 km/h benötigt. Die absolute Geschwindigkeit der Drohne zur Zeit der Aufnahme beträgt im Idealfall 72 km/h (~20 m/s). Dabei versucht die Drohne mit maximal 70 % ihrer Motorleistung diese Geschwindigkeit zu erreichen, da dieses Leistungsniveau

auf Dauer den Motor schont. Zusätzlich dazu fällt die Motorleistung beim Rückflug zur Nutzspur auf 30 % zurück.

Die Flugdauer hängt stark sowohl von der Umgebungstemperatur als auch von den vorherrschenden Windverhältnissen ab. Je kälter es ist und je stärker der Wind weht, desto weniger Zeit kann die Drohne in der Luft verbleiben. Denn durch Kälte entladen sich die Akkus schneller und bei viel Wind muss der Motor mehr Leistung aufbringen, um seine absolute Geschwindigkeit bei zu behalten. Beide Einwirkungen erhöhen den Stromverbrauch eines Akkus erheblich. Zusätzlich darf die Drohne nur bis zu einer maximalen Windgeschwindigkeit von 30 km/h betrieben werden. Im Laufe des Testprojektes wurde das Fluggerät zudem so angepasst, dass es 2 Akkus tragen kann und somit die Zuverlässigkeit und Dauer eines Fluges erhöht wurde. Mithilfe der zwei Akkus wurde eine Flugzeit von bis zu 40 min ermöglicht.

Fazit: Die optimale Flughöhe beträgt 80–120 m bei Fluggeschwindigkeiten von 50–70 km/h. Die maximale Windgeschwindigkeit darf dabei 30 km/h nicht überschreiten und die dabei erzielten Flugzeiten im Winterbetrieb liegen zwischen 20 und 35 Minuten in Abhängigkeit der verwendeten Akkus und Witterungsverhältnisse.

3.2.3 Tatsächliche Windanfälligkeit (nach Sturmflut)

Beobachtungen der Pegelstände und Windgeschwindigkeiten zeigten, dass 24 Stunden nach einer Sturmflut der Wind soweit abgeschwächt ist, dass die LEDA-K Drohne sicher zum Einsatz kommen kann. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen, dass die Windgeschwindigkeit innerhalb von einem Tag bereits wieder Durchschnittswerte erreicht hat. Zudem erreichen die Windgeschwindigkeiten ihren Spitzenwert bereits bevor der Wasserstand seinen Höchststand erreicht. Das hat zur Folge, dass nach dem Wasserhöchststand durch eine Sturmflut die Windgeschwindigkeit bereits soweit abgeschwächt ist, dass eine Drohnenbefliegung einen Tag nach einer Sturmflut gefahrlos möglich ist.

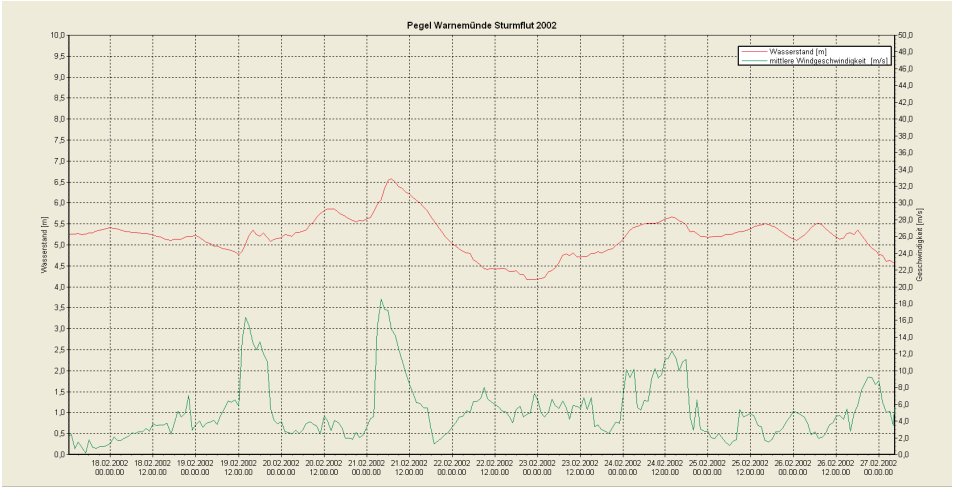

Abbildung 20: Wasserstandsverlauf und Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut 2002 am Pegel Warnemünde.

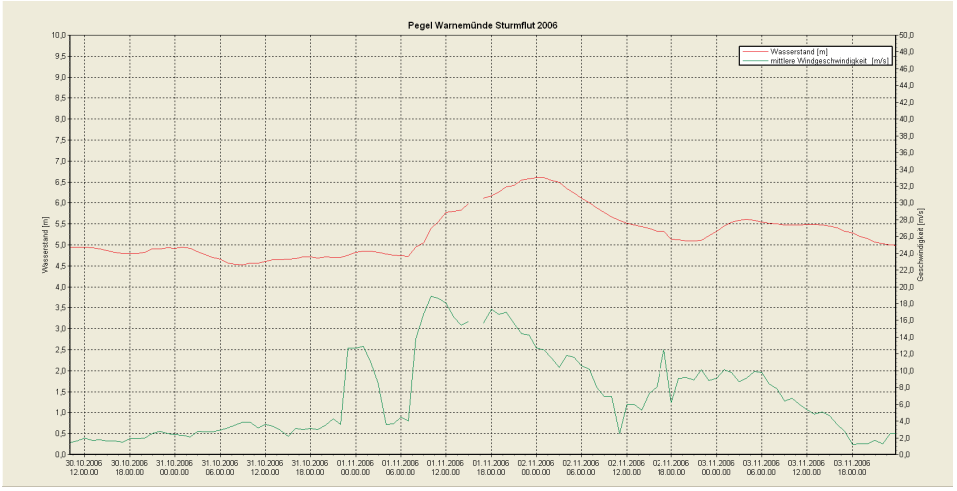

Abbildung 21: Wasserstandsverlauf und Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut 2006 am Pegel Warnemünde.

Fazit: Der Einsatz der Drohne direkt nach Sturmfluten ist bis Windstärke 4 problemlos möglich.

3.2.4 Kombination der UAV-Daten mit MLS und DGM

Die durch MLS-Messungen und durch Drohnenbefliegung erzeugten Punktwolken können in gleiche Datenformate ausgegeben werden. Damit ist sowohl ein Vergleich als auch ein Zusammenführen der verschiedenen Datensätze möglich. So können bei MLS-Messungen auftretende Abschattungsbereiche durch Daten der LEDA-K Drohne aufgefüllt werden. Dabei ist zu beachten, dass die aus digitalen Bildern heraus generierte Punktwolke die Erdoberfläche als DSM und nicht als DTM abbildet. Bei normaler bis dichter Begrünung der Flora können durch die Software an diesen Stellen keine Bodenpunkte berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Kombination beider Messungen ist die Erstellung eines texturierten DGMs. Dabei werden die Bildinformationen der Drohne auf das Oberflächenmodell projiziert. Dies ermöglicht Echtfarbenansichten und -animationen eines aufgenommenen Geländes für Präsentationen und Kameraflüge.

Fazit: Die Kombination von UAV, MLS- und DGM-Daten ist möglich und sinnvoll, da die Verschneidung dieser Daten zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führt.

3.2.5 Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand- und Dünenbereich/Beitrag zu Volumen- und Massenberechnungen nach Sturmfluten/Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation

Die Zustandserfassung nach Sturmfluten ist prinzipiell möglich. Jedoch müssen Passpunkte über das gesamte Aufnahmegebiet verteilt sein, damit eine genaue Georeferenzierung ermöglicht wird.

Im Gebiet Wustrow-Dierhagen konnte eine günstige Passpunktverteilung erreicht werden. Dies lag einerseits an der Bebauung hinter dem Deich. Andererseits befinden sich im Wasser Buhnen, welche in den ALS-Daten gut lokalisiert und entsprechende Koordinaten abgeleitet werden konnten.

Abbildung 22: Passpunktverteilung im Bereich Wustrow-Dierhagen.

Ein Vergleich mit einem Referenzbild zeigt im überwiegenden Teil eine hohe Übereinstimmung. In den Randbereichen, in denen schon die Zusammensetzung der Einzelbilder nicht überzeugend war, ist folglich auch eine Abweichung zum Referenzbild zu erkennen.

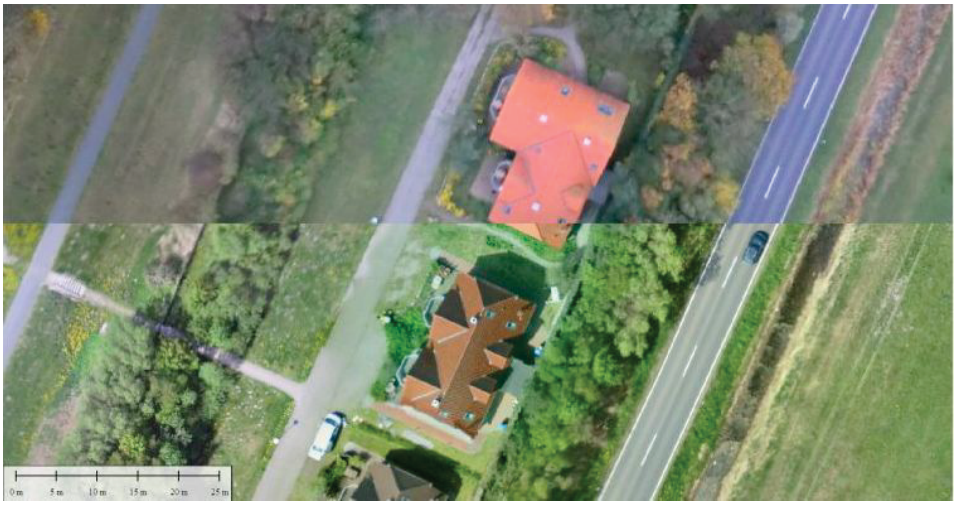

Abbildung 23: Vergleich des erzeugten zum Referenzbild im mittleren Bereich.

Abbildung 24: Vergleich des erzeugten zum Referenzbild im südlichen Randbereich.

Im Gebiet Hörnum-Odde dagegen war die Passpunktverteilung nicht optimal. Geeignete Punkte traten vermehrt im nördlichen Bereich auf. Im Süden konnten Passpunkte lediglich in einem Areal um den Leuchtturm gefunden werden. Eine Folge davon ist, dass die Übereinstimmung der Punktwolken im nördlichen Bereich größer ist als im Süden.

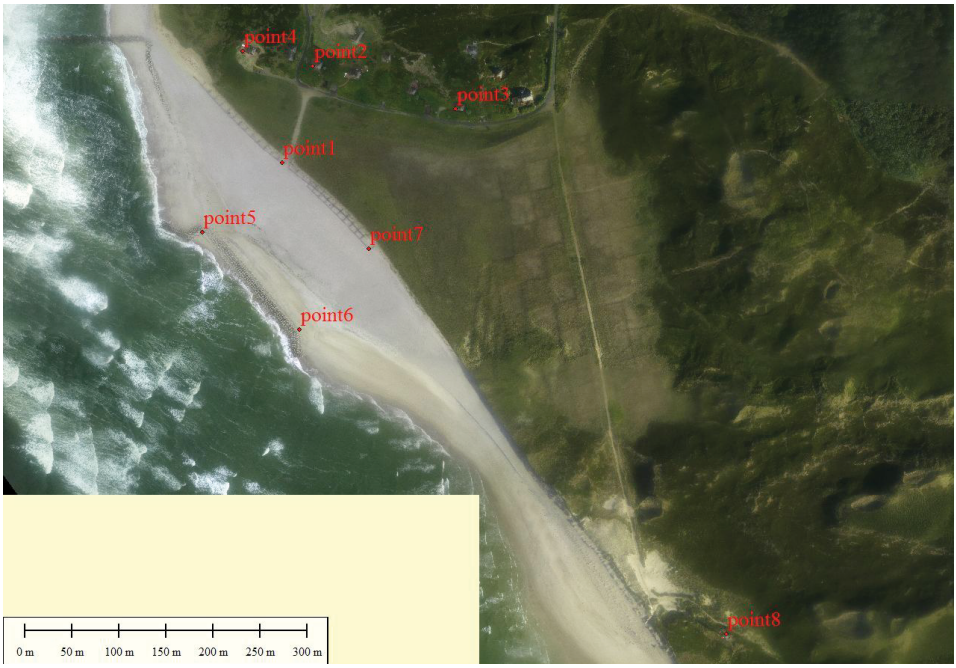

Abbildung 25: Passpunktverteilung im Gebiet Hörnum-Odde.

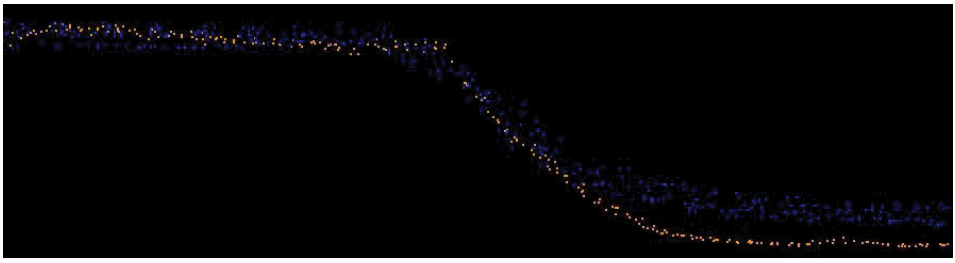

Abbildung 26: Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 06.11.2012 (blau).

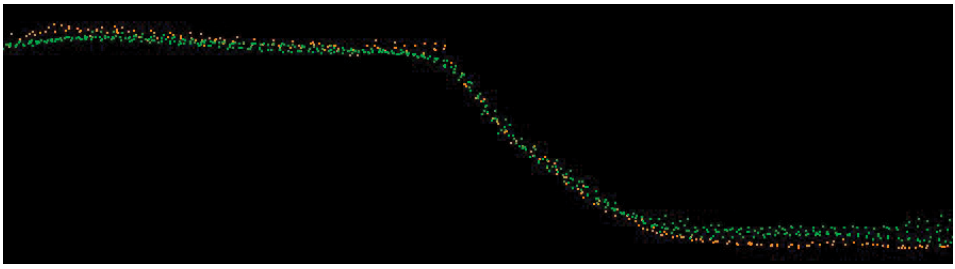

Abbildung 27: Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 25.01.2013 (grün).

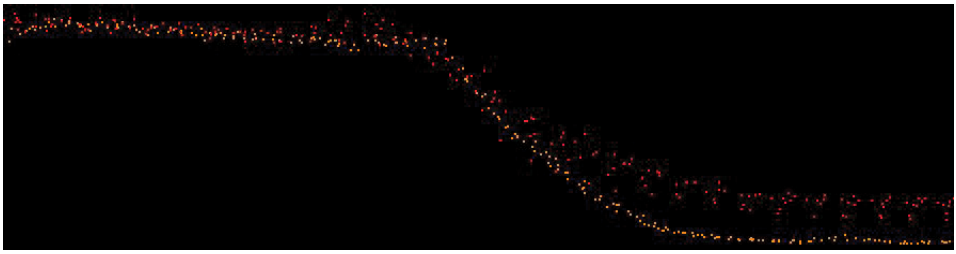

Abbildung 28: Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 05.03.2013 (rot).

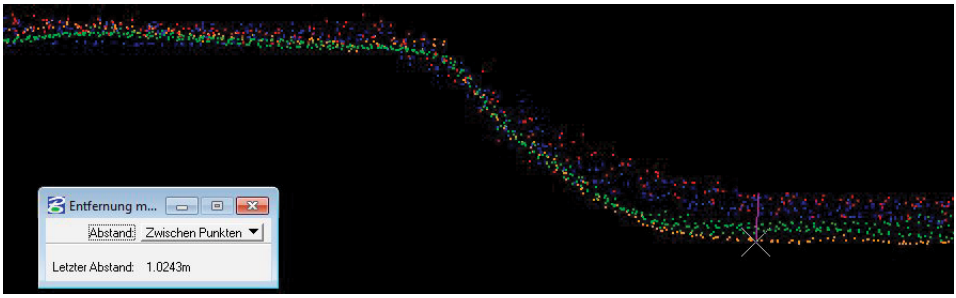

Abbildung 29: Vergleich aller drei DHMs zum ALS-Datensatz mit maximaler Abweichung von 1 m.

Im Gegensatz dazu treten im südlichen Bereich von Hörnum-Odde extreme Höhenunterschiede auf. Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 12 m. Die ist höchstwahrscheinlich auf die Passpunktverteilung zurückzuführen. Der südlichste Passpunkt befindet sich ca. in der Mitte des Untersuchungsgebietes. Je weiter südlich man von diesem Passpunkt die Profile vergleicht, desto größer werden die Abweichungen.

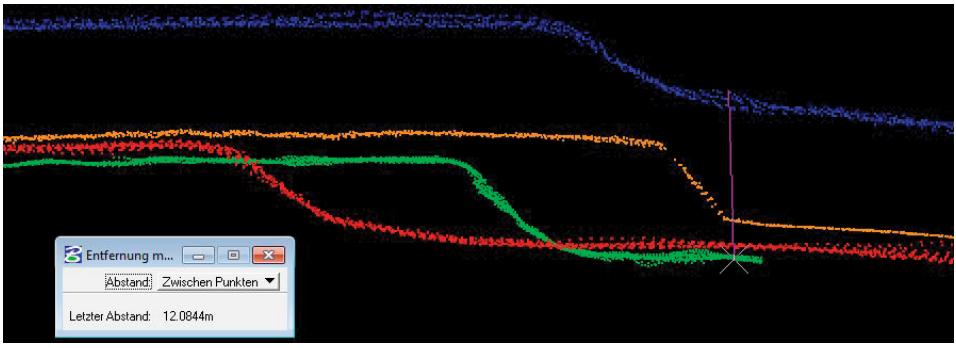

Abbildung 30: Vergleich aller Digitalen Höhenmodelle

Ohne eine genaue Georeferenzierung über geeignete Passpunkte, ist eine zuverlässige Ermittlung von Differenzen zwischen zwei Aufnahmen nicht möglich und damit auch keine zuverlässige Massen- oder Volumenberechnung. Differenzen würden schon allein durch Lageungenauigkeiten zwischen zwei Modellen entstehen. Passpunkte sollten daher möglichst am Rand des Untersuchungsgebietes verteilt sein, um eine stabile Geometrie zu erhalten. Außerdem sollten sie sich auf befestigten Oberflächen befinden und gut

erkennbar sein. Das Auffinden geeigneter Passpunkte ist gerade im Strandbereich schwierig, da es hier kaum befestigte und gut signalisierte Punkte gibt. Abhilfe schafft hier das Anlegen von eigenen Passpunkten vor Ort in Form von Holz- oder Stoffkreuzen, die temporär im lockeren Boden befestigt werden oder durch das Aufbringen von temporären Farbkreuzen auf befestigten Flächen (Straßen, Wege). Dadurch kann die Verteilung der Passpunkte gezielt gesteuert werden. Durch das Anbringen und das Einmessen der Passpunkte vor Ort entsteht allerdings ein zusätzlicher zeitlicher und personeller Aufwand.

Fazit: Abbruchraten, Volumen- und Massenberechnungen sind theoretisch möglich und wurden auch exemplarisch durchgeführt, wobei der tatsächliche Aufwand für belastbare Aussagen mit hoher Genauigkeit mit den verwendeten Verfahren und Softwarepaketen zu hoch ist. Hier besteht zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3.2.6 Nutzbarkeit als Grundlage für Digitale Geländemodellierung

Die aus Drohnendaten generierten Punktwolken können u. U. als Grundlage für digitale Geländemodelle genutzt werden. Dafür müssen jedoch mindestens die folgenden Punkte erfüllt sein.

- Passpunkte müssen gut verteilt, genau bestimmt und auf den Bildern scharf zu erkennen sein.
- Die Kameras müssen stabilisiert und kalibriert sein.
- Die aufgenommenen Bilder müssen scharf sein und ausreichend kontrastreiche Textur aufweisen.

Doch selbst wenn alle eben aufgezählten Punkte beachtet werden, sind ALS- oder MLS-Daten von der Genauigkeit und Aussagekräftigkeit her immer noch den aus Bilddaten heraus erzeugten DGMs vorzuziehen. Zudem gestaltet sich die Ableitung eines DGMs aus den Bilddaten heraus schwierig. Denn die Punkte werden anhand aller Bildinformationen generiert und bilden somit das DSM des Aufnahmegebietes ab. Die Ableitung eines DGMs ist daher nur möglich, wenn auf den Bildern ausreichend Boden abgebildet wird. Dies setzt voraus, dass die Vegetation nicht zu dicht ist. Zur Generierung eines durchgängigen DGMs stellt ALS bisweilen das am geeignetste Verfahren dar.

Fazit: Die Nutzung von UAV-Daten (Orthophotos) für Digitale Geländemodelle ist unter Einhaltung verschiedener Voraussetzungen theoretisch möglich, aber in punkto Genauigkeit und Aufwand derzeit nicht effektiv anwendbar (Stand 2014).

3.2.7 Rückschlüsse auf Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/ -dichte in den Dünen

Durch die Ausstattung der Drohne mit einer Infrarotkamera können die Aufnahmen dazu verwendet werden, Rückschlüsse auf die Gesundheit von Pflanzen zu ziehen. Mithilfe der Rot- und der Infrarotanteile eines jeden Bildpixels, können über den sog. NDVI (normalisierten Vegetationsindex) Rückschlüsse auf die Vegetationsbedeckung gezogen werden. Bei der Ableitung von 3D-Punkten aus digitalen RGB-Bildern, sind Punkte, die zur Vegetation und Punkte, die zum Relief gehören, schwer voneinander zu unterscheiden.

Aussagen über die Vegetation des Deiches und Strandhaferdichte können nur optisch anhand eines generierten Orthophotos und durch den NDVI getroffen werden.

Im Forschungsprojekt kam eine normale RGB-Kamera mit einem NIR-Filter zum Einsatz, deren Bilder befriedigende Ergebnisse bei der Vegetationsauswertung lieferten. Grünland- und Waldflächen sind mit den bekannten Algorithmen sicher auswertbar, für Fragen des Küstenschutzes und hier insbesondere zum Zustand des Strandhafers auf den Dünen und der Grasnarbe auf den Deichen waren die erzeugten Bilder nicht verwertbar. Durch den frühen Totalverlust der Kamera nach einem UAV-Absturz wurden die Arbeiten zu dieser Thematik nicht fortgesetzt, da keine befriedigenden Ergebnisse zu erwarten waren. Sollte diese Fragestellung im Küstenschutz zukünftig doch mehr in den Mittelpunkt gestellt werden müssen, ist hier ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf nötig.

Fazit: Orthophotos lassen über manuelle Auswertung eine rein optische Betrachtung des Vegetationszustandes zu. Automatische Verfahren mit NIR-Filter-Einsatz haben zu keinem verwertbaren Ergebnis geführt.

3.2.8 Stereoaufnahmen

Durch das Mitführen von zwei Kameras gleichzeitig an der Drohne war es möglich, zeitgleich zwei Bilder von jeder Position aufzunehmen. Eine stereoskopische Auswertung anhand von Bildpaaren konnte durch dieses Vorgehen allerdings nicht durchgeführt werden, da der Abstand zwischen den Kameras (ca. 0,5 m) als stereoskopische Basis nicht ausreicht. Für eine gute Höhenbestimmung mittels Stereoskopie wird eine breite Basis der Bildpaare benötigt. Eine Basis von 0,5 m stellt eine unzureichende Länge für eine aussagekräftige Höhenbestimmung dar.

Da bei einer manuellen stereoskopischen Verarbeitungsmethode die Probleme (Bildqualität, Kameraabstand) überwiegen, war eine detailliertere Untersuchung in dem kurzen Projektzeitraum nicht realisierbar. Allerdings ist eine stereoskopische Auswertung von benachbarten Bildern bereits in Verarbeitungsalgorithmen von Softwareprodukten enthalten und läuft automatisch ab. Dadurch erscheint eine manuelle stereoskopische Auswertung zudem als unwirtschaftlich.

Fazit: Eine stereoskopische Auswertung der Luftbilder führte mit den bestehenden Aufnahmetechniken und Softwarepaketen trotz mehrfachen Modifikationen nicht zu verwertbaren Ergebnissen.

3.2.9 Kombination MLS und Drohne während der Aufnahme

Die parallele Durchführung von Drohnenbefliegungen und MLS-Messungen ist logistisch möglich. Dabei entstehen allerdings zusätzliche Kosten, da sowohl für den Betrieb der Drohne als auch des MLS-Systems jeweils zwei Mitarbeiter benötigt werden. Aufgrund dessen müssen vier anstatt zwei Mitarbeiter vor Ort sein.

Die Idee, die Drohne vom Fahrzeug aus parallel zur MLS-Aufnahme zu bedienen, ist nicht realisierbar und scheitert aus einer Vielzahl von Gründen und Problemen (u. a. gesetzliche Bestimmungen, unterschiedliche Geschwindigkeiten, Flugplanungssoftware, Sicherheitsbestimmungen, Streifenproblematik).

Fazit: Eine Steuerung der Drohne vom MLS-Fahrzeug ist nicht möglich.

3.2.10 Wintereinsatz der Drohne

Der Einsatz der Drohne bei Temperaturen unter 0 °C ist prinzipiell möglich. Jedoch hat die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Dauer des Fluges, da sich die Akkus bei Kälte schneller entladen. Die Verwendung von Isoliermaterial hat hier Verbesserungen erwirkt. Auch das Mitführen von 2 Akkus hat die Zuverlässigkeit und Dauer eines Fluges erhöht.

Bei leichter Schneebedeckung weist das Aufnahmegebiet eine auffälligere Texturierung auf. Matching-Algorithmen liefern hier bessere Ergebnisse da Muster robuster zu erkennen und Zuordnungen in benachbarten Bildern eindeutiger sind. Allerdings ist eine 3D-Punktgenerierung bei vollständiger Schneebedeckung nicht möglich.

Fazit: Der Einsatz der Drohne im Winter ist mit Einschränkungen möglich, solange keine vollständige Schneebedeckung vorliegt.

3.2.11 Gesetzliche Bestimmungen (u. a. Datenschutz)

Rechtliche Vorgaben und die Einstufung von Drohnen finden sich im Luftverkehrsgesetz (LuftVG) und in der Luftverkehrsverordnung (LuftVO) der Bundesrepublik Deutschland. Laut § 1 Absatz 2 Nummer 3 des LuftVG „gelten unbemannte Fluggeräte einschließlich ihrer Kontrollstation, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden (unbemannte Luftfahrsysteme)“, als Luftfahrzeug. Zusätzlich dazu können UAV‘s auch zur Gruppe der Flugmodelle gezählt werden, die ebenfalls als Luftfahrzeuge einzustufen sind [LuftVG 2013 § 1 (2) Nr. 9]. Der Betrieb von Drohnen ist nur verboten, „wenn er außerhalb der Sichtweite des Steuerers erfolgt oder die Gesamtmasse des Geräts mehr als 25 Kilogramm beträgt“ [LuftVO § 19a (3)]. Daher müssen UAV‘s auf Sicht gesteuert werden, damit der Benutzer die Kontrolle behält und in einem Notfall manuell eingreifen kann. Ein völlig autonomer Flug eines UAV‘s ist nur mit Ausnahmeregelungen möglich. Grundvoraussetzung dafür ist allerdings, dass weder die Sicherheit des Luftverkehrs gefährdet ist, noch Gefahr für die öffentliche Ordnung besteht [LuftVO § 15a (2)].

Ein weiterer Punkt ist die Notwendigkeit einer Erlaubnis zur Nutzung des Luftraumes. Zwar dürfen Flugmodelle mit weniger als 5 kg Gesamtmasse, elektrischem Antrieb und mehr als 1,5 km Entfernung zu einem Flugplatz, ohne Erlaubnis betrieben werden [LuftVO § 20 (1) Nummer 1]. Doch wird in § 16 Absatz 1 Nummer 7 LuftVO festgelegt, dass der „Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen“ einer Erlaubnis bedarf. Eine Erlaubnis ist bei der örtlich zuständigen Behörde des entsprechenden Bundeslandes, in dem der Flug stattfinden soll, einzuholen [LuftVO § 20 (3)].

Fazit: Die verwendete MLS-Technik sowie die Drohnen (UAV) entsprachen zum Zeitpunkt der Untersuchungen und dem Verfassen dieses Beitrages den gesetzlichen Vorgaben und Regelungen, wobei bei der Datenerfassung und -verarbeitung die Datenschutzbestimmungen des jeweiligen (Bundes-)Landes zu beachten sind. Gegenwärtig sind aber Veränderungen und Konkretisierungen zu den Vorschriften des Einsatzes von UAV und ggf. sogar neue gesetzliche Bestimmungen in Vorbereitung und Diskussion.

4 Einsatz von Multikoptern

4.1 Untersuchungsschwerpunkte und Einsatzmöglichkeiten von Multikoptern

Flugzeuggetragene klassische und digitale Luftbildsysteme sind bei kleineren Gebieten (Einzelobjekte bis einige 100 ha) sehr teuer und durch die große Wetterabhängigkeit nicht flexibel genug. Oft ist gerade eine hohe Zeitnähe sehr wichtig, z. B. zur Ermittlung von Momentanzuständen, u. a. nach Sturmfluten, Starkregenereignissen, Überschwemmungen und anderen Katastrophen sowie menschlichen Tätigkeiten im Gebiet.

Eine preiswerte und flexible Alternative dazu sind autonome, unbemannte Flugobjekte (UAV), die in niedrigen Höhen und unter den Wolken operieren können und damit bis auf den Wind weitgehend wetterunabhängig sind. Ein wesentlicher Schritt hin zu verwertbaren Lösungen unbemannter Fluggeräte ist die Entwicklung von miniaturisierten autonomen Steuerungen, die per GNSS und inertialer Messtechnik (Inertial Navigation System INS) auch eine selbständige Flugführung ermöglichen. Über programmierbare Autopiloten können so systematische und koordinatenbezogene Aufnahmen gemacht werden. Bei nur vom Boden aus gesteuerten Modellflugzeugen hingegen erfolgt die Auslösung nicht nach vorgegebenen Positionen sondern in bestimmten Zeitintervallen.

Jedoch ist der spezielle Aufwand, ein UAV für fernerkundliche bzw. photogrammetrische Zwecke einzusetzen recht groß, da es an die jeweilige Fragestellung angepasster, hardwareseitiger Tests und Entwicklungen bedarf bzw. methodische Untersuchungen fehlen, um geeignete Lösungen zu finden.

Erst die Kombination von digitaler Photogrammetrie und dem Airborne-Laserscanning in Verbindung mit unbemannten Flugkörpern bringt die notwendige Genauigkeit, Schnelligkeit und Informationsvielfalt für ein technologisch motiviertes Vermessen in diversen Bereichen wie z. B. dem Umweltmonitoring, dem Küsten- und Katastrophenschutz sowie darüber hinaus für viele weitere Anwendungen in Industrie und Wirtschaft.

Ein Hauptschwerpunkt des Forschungsprojektes LEDA-K2: „Laserscanaufnahmen durch Einsatz von Drohnen (UAV) zur Aufnahme von Küstengebieten und Entwicklung von teilautomatisierten Softwareverfahren bei der Luftbildauswertung aus UAV-Befliegungen“ war die Neuentwicklung eines Multikopters mit einem Kleinstlasersystem für Airborne Laservermessungen (ALS) in Küstengebieten.

Das geplante ALS-Drohnensystem sollte dabei aus den gleichen Komponenten wie ein herkömmliches ALS-System bestehen. Dazu zählen ein Miniaturlaserscanner, Positionierungssystem (GNSS-Antenne), IMU, Recheneinheit inklusive Datenaufzeichnung und der Drohne als Trägerplattform selbst. In dem Projekt sollte zunächst die Kopplung der einzelnen Baugruppen hergestellt, sowie, wenn möglich, mehrere verschiedene Komponenten getestet werden. Weiter galt es, die Kommunikation der einzelnen Elemente untereinander zu ermöglichen und eine geeignete Recheneinheit für diese Aufgabe zu finden. Diese sollte sowohl als Verbindungsstelle als auch zur Datenaufzeichnung dienen. Auch die zeitliche Synchronisation der aufgezeichneten Messwerte (Positionsdaten, Orientierungs- und Bewegungsdaten, Distanzmessungen) musste mithilfe der Recheneinheit gelöst werden. Weiterhin sollten die aus den einzelnen Flugrouten erhaltenen gescannten Spuren durch geeignete Anpassungsalgorithmen miteinander verknüpft werden.

Als Einsatzmöglichkeiten von ALS mit Drohnen im Küstenschutz wurden insbesondere folgende Aufgaben gesehen:

- Kontroll- und Deformationsmessungen von Bauwerken
- Vermessung für Archäologie und Baudenkmalpflege
- Erfassung von Hafen- und Industrieanlagen
- Erfassung und Kontrolle von Ufer-, Strand- und Küstenprofilen im Rahmen eines effizienten Küstenschutzes
- Katastrophenschutz und schneller Einsatz bei Unfällen bzw. nach Unwettern
- Erstellung von Orthophotokarten
- Erstellung digitaler Geländemodelle
- Bestandseinmessungen

4.2 Bestandteile des entwickelten LEDA-K2-Multikopters

4.2.1 Flugplattform MikroKopter Basisset Hexa XL

Als Flugplattform kommt das Hexakopter-Modell Hexa XL der Firma MikroKopter zur Anwendung.

Abbildung 31: MikroKopter Basisset Hexa XL.

Wie der Name schon impliziert, erfolgt der Auftrieb der Drohne über sechs Rotoren (weitere Spezifikationen kann man der folgenden Tabelle entnehmen). Es handelt sich um ein Set zum Bau der Drohne. Der Zusammenbau und die Anbringung aller Komponenten erfolgte, genau wie bei der LEDA-K Drohne, durch die CIS GmbH Rostock.

Tabelle 1: Technische Daten MikroKopter Basisset Hexa XL.

Gewicht ohne Akku [g]	1600
Maximale Nutzlast [g]	1500
Durchmesser [mm]	730
Höhe [mm]	410
Flugzeit (mit 14,8V 6600 mAh LiPo-Akku) [min]	13–28 (variiert je nach Nutzlast)

4.2.2 GPS-Chipset UBX-G5000/G0010

Die Chipsätze UBX-G5000 und G0010 der schweizerischen Firma U-Blox sind ein Positionierungssystem und durch ihre geringe Größe und geringes Gewicht geeignet für Anwendungen wie die Positionierung von unbemannten Fluggeräten, in denen die Größe und das Gewicht eine zentrale Rolle spielen. Sie unterstützen die L1-Frequenzen mit dem C/A-Code der GPS- und auch die L1-Frequenzen der zukünftigen Galileo-Satelliten.

Tabelle 2: Technische Daten UBX-G5000/G0010.

Maximale Updaterate [Hz]	< 4 ROM / 2 Flash
Genauigkeit [m]	2,5
Maximale Geschwindigkeit [m/s]	500
Maximale Einsatzhöhe [m]	5000
Messbedingungen [°C]	-40 ~ +85
Abmessungen [mm]	UBX-G5000: 9 x 9 x 0.91 UBX-G0010: 4 x 4 x 0.85

Durch die hohe Unempfindlichkeit gegenüber Störungen erfolgt eine Positionierung auch bei schwierigen Satelliten-Sichtverhältnissen, wie bspw. in Häuserschluchten, und in Gebieten mit schwacher Signalabdeckung.

4.2.3 Autopilot-Einheit Krooz inklusive IMU-Sensor MPU-6000/6050

Bei dem Autopiloten Board „Krooz" handelt es sich um ein Board, welches speziell für die Steuerung von Fluggeräten entworfen wurde. Das Board kann mit verschiedensten Sensoren, Modulen und Einheiten bestückt werden und ist durch seine geringe Größe ideal für UAV-Systeme.

Unter anderem wurde das Krooz-Board mit einem MPU-6000/6050-Modul ausgestattet, welcher zur Gewinnung der Orientierungsdaten dient. Das Modul enthält eine mikroelektro-mechanische IMU und einen 3-Achsen Beschleunigungssensor, die auf ein und demselben Siliziumchip montiert sind. Zusätzlich befindet sich noch ein digitaler Bewegungsprozessor an Bord.

4.2.4 Recheneinheit PandaBoard ES

Das PandaBoard ES ist die Plattform für die LEDA-K2 Drohne, in der alle Komponenten zusammenlaufen. Das Board besitzt einen leistungsstarken Dual-Core Prozessor mit 1,2 GHz pro Kern. Als Arbeitsspeicher stehen 1 GB DDR 2 RAM zur Verfügung. Des Weiteren besitzt das Board neben insgesamt 2 USB-Schnittstellen auch einen SD/MMC-Card-Leser, der auch Karten mit hohen Geschwindigkeiten und hoher Speicherkapazität beschreiben kann. Eine SD-Karte dient im LEDA-K2 Projekt als Speichermedium für die gewonnenen Daten und Messwerte sowie für das Betriebssystem und die benötigte Software. Weiterhin besitzt das Board ein WLAN-Modul.

4.2.5 Wahl des Laserscanners

Aufgrund der möglichen geringen Zuladung des Hexakopters, ergab sich nur eine kleine Anzahl infrage kommender Kompaktscanner. Zudem sollte der Scanner eine entsprechend hohe Scanrate und Einzelpunktmessgenauigkeit bieten. In der näheren Auswahl wurden folgende Scanner betrachtet:

Tabelle 3: Technische Spezifikationen der untersuchten Scanner.

Parameter	Hokuyo UTM-30LX	Sick LD-MRS	Riegl VUX-1
Reichweite [m]	30	250	150
Genauigkeit [mm]	50	100	10
Scannrate [Hz]	43.200	50	500.000
Öffnungswinkel [°]	270	85	330
Abmessungen [mm]	60x60x85	94x165x88	227x180x125
Gewicht [g]	370	1000	3.600

Das Gerät der Firma Riegl verspricht die beste Scanleistung, sodass hier die besten Ergebnisse zu erwarten waren. Ein UAV, welches eine Masse von 3,6 kg tragen kann, hat jedoch ein Gesamtabfluggewicht, welches deutlich über 5 kg liegt. Da in Deutschland bei Geräten von unter 5 kg nur eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung für den Betrieb benötigt wird, wurde entschieden, dass nur solche Systeme für das Projekt in Frage kommen. Somit wurde die Verwendung des Riegl VUX-1 beim LEDA-K2 Projekt ausgeschlossen.

Das Gewicht von ca. 1 kg des LD-MRS von Sick ist im Bereich der Nutzlast von auf dem Markt verfügbaren Drohnen, welche eine Maximum Takeoffweight (MTOW) von unter 5kg haben. Hier jedoch wurden die Scanleistungen für nicht ausreichend befunden. Zum einen können mit 50 Hz nur mit hohem zeitlichem Aufwand Produkte erstellt werden, die wie im herkömmlichen ALS Punktdichten von 10–20 Punkten/m² liefern. Zum anderen liegt die Genauigkeit mit 100 mm außerhalb der gewünschten Parameter. Das Gesamtsystem soll eine absolute Punktgenauigkeit von 10–20 cm aufweisen. Bei einer Genauigkeit von 10 cm des Laserscanners bleibt demnach zu wenig Spielraum für die Komponenten GNSS und IMU.

Somit fiel letztendlich die Wahl auf den UTM-30LX von Hokuyo. Die Parameter Gewicht und Abmessungen erlauben den Einsatz auf einem Multikopter mit einem MTOW von 5 kg. Die Scanrate und Genauigkeit sind ausreichend um Punktwolken entsprechend den Daten aus ALS-Befliegungen zu erzeugen. Lediglich die Reichweite von 30 m muss als einschränkender Faktor bewertet werden. Somit sind nur Flughöhen von ca. 25 m realistisch. Flächenhafte Erfassungen benötigen somit erhöhten Aufwand.

Für das gestellte Anwendungsfeld des LEDA-K2-Projektes, Profile entlang der Küste zu erfassen, ist dies jedoch ausreichend.

Abbildung 32: Kompaktlaserscanner Hokuyo UTM-30LX.

Die hinsichtlich des Projekts wichtigsten Daten des Laserscanners von Hokuyo sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4: Technische Spezifikationen Hokuyo UTM-30LX.

Reichweite [m]	garantiert: 0,1 – 30 maximal: 0,1 – 60
Genauigkeit [mm]	Bei 3000 lx: auf weißem Papier ± 30 Bei 100000 lx: auf weißem Papier ± 50
Auflösung und Wiederholgenauigkeit [mm]	1 mm Bei 3000 lx: σ =10 (weißes Papier bis zu 10 m) Bei 100000 lx : σ = 30 (weißes Papier bis zu 10 m)
Aufnahmewinkel [°]	270
Abtastungen pro Zeile	1080
Winkelauflösung [°]	0,25 (270°/1080 Abtastungen)
Scangeschwindigkeit [Hz]	40 (= 25 Millisekunden)
Gewicht [g]	210 (inklusive Kabel: 370)
Abmessungen [mm]	60 x 60 x 85
Messbedingungen [°C]	-10 ~ +50 weniger als 85% relative Luftfeuchte
Erhaltungstemperatur [°C]	-25 ~ +75
Energieverbrauch [Watt]	weniger als 8

4.2.6 Aufbau der Komponenten

Das Anbringen aller Komponenten an dem Hexakopter erfolgte durch die CIS GmbH in Rostock. Die folgende Abbildung zeigt die Drohne mit allen verbauten Komponenten. Der Laserscanner wurde horizontal an der Unterseite der Drohne befestigt mit Nullrichtung zum Boden.

Das Krooz-Board samt IMU-Sensor befindet sich unter der Abdeckung der Drohne auf Höhe der Rotorstreben. Unter dem Krooz-Board sind der Akku und darunter das PandaBoard platziert. Eine der sechs Rotorstreben ist rot und zeigt die Vorwärtsflugrichtung der Drohne an. Die GNSS-Antenne befindet sich auf einem vertikal angebrachten Rohr, welches am Anfang der roten Rotorstrebe befestigt ist. Um eine Höhere Nutzlast realisieren zu können, wurden, anstelle der Verwendung eines Oktokopters, leistungsstärkere Motoren statt der Standardmotoren durch die CIS GmbH verbaut. Zusätzlich zur Stabilisierung der gesamten Flugeinheit, wurde Angelschnur von Rotorstrebe zu Rotorstrebe angebracht.

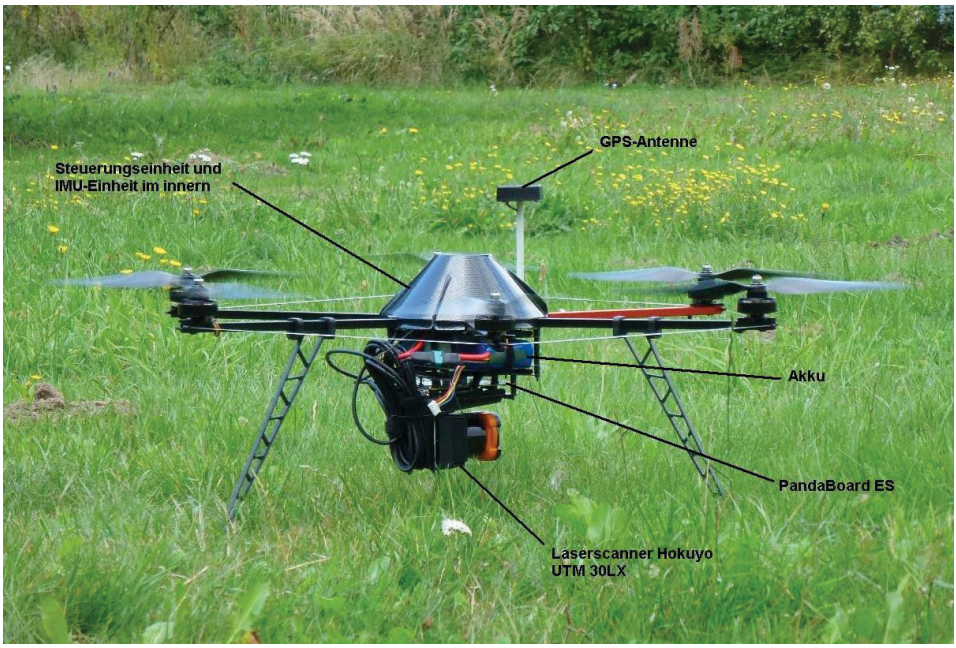

Abbildung 33: LEDA-K2 Hexakopterdrohne mit allen montierten Komponenten.

4.3 Spezifikationen des LEDA-K2-Multikopters

Mit dem fertigen Aufbau des Multikopters (siehe Punkt 4.2.6) wurden mit allen Komponenten eine Reihe von Versuchen und Messungen durchgeführt, um die tatsächliche Praxistauglichkeit des Fluggerätes zu beweisen. Die ausführlichen Tests mit Messprotokollen, Parametern und Beschreibungen zu den Eigenschaften sind im Abschlussbericht zum o. g. Projekt (Förderkennzeichen 03KIS105, Laufzeit des Projektes und Berichtszeitraum: 01.05.2013–31.01.2014), welcher dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Januar 2015 übergeben wurde, enthalten und können dort nachgelesen werden. Im Folgenden sind nur die Ergebnisse zu den Spezifikationen und Leistungsmerkmalen des Kopters für seine einzelnen Bestandteile aufgeführt.

Für die IMU-Einheit ist herauszustellen, dass sich die drei Orientierungswinkel innerhalb von etwa 30 Minuten jeweils einem Wert annähern. Erst nach dieser Zeit können die einzelnen Messreihen relativ zueinander passen. Nach dem Anbringen von

Korrekturwerten in Abhängigkeit von der Temperatur konnte dieses Verhalten jedoch nicht vollständig ausgeglichen werden. Die festgestellten Schwankungen bei laufenden Motoren im Stand üben einen großen Einfluss auf die Orientierungswinkel aus. Jedoch konnte nicht geklärt werden, ob der Einfluss so groß bleibt, wenn sich die Drohne mit laufenden Rotoren in der Luft befindet und nicht am Boden. Des Weiteren laufen die Rotoren im Stand nur auf einem Bruchteil ihrer Leistung. Offen geblieben ist, wie groß der tatsächliche Einfluss auf die Orientierungswinkel bei einem Flug mit entsprechender Gebrauchsleistung tatsächlich ist.

Zur Genauigkeit und Verlässlichkeit des GPS-Chipset UBX-G5000/G0010 konnte festgestellt werden, dass bei der Positionsbestimmung ein Höhenfehler von ca. 6 bis 7 m vorliegt, dessen Ursache noch nicht identifiziert werden konnte. Gemessene Scanstreifen müssen daher in der Höhe entsprechend an Referenzdaten angepasst werden. Die erhaltene absolute Lagegenauigkeit liegt mit 1,6 m in einem Bereich entsprechend der Herstellerangaben. Für eine genauere Georeferenzierung muss die Ursache für den Höhenfehler identifiziert werden, ansonsten muss der Ausgleich bzw. die Korrektur im Postprocessing erfolgen.

Untersuchungen zur Genauigkeit an dem im Projekt verwendeten Laserscanners Hokuyo UTM-30LX haben ergeben, dass die Distanzmessgenauigkeit besser ist, als vom Hersteller angegeben. Die Soll-Ist-Abweichung der vom Scanner ausgegeben Austrittswinkel der Laserstrahlen von 0,001° bewirkt auf die maximal garantierte Zielweite (30 m) nur einen minimalen Lagefehler von 0,5 mm.

Beim Zusammenspiel der einzelnen Komponenten konnte zunächst festgestellt werden, dass eine individuelle Anpassung des Yaw-Winkel für jeden Streifen im Laufe der Punktberechnung notwendig ist. Insgesamt lässt sich jedoch sagen, dass die IMU- und die GNSS-Einheit die Schwachstelle der Kopter-Konstruktion darstellen. Schnelle und starke Veränderungen in den Orientierungswinkeln und/oder der dreidimensionalen Lage werden nicht mit der nötigen Aktualisierungsrate durch die Sensoren erfasst und Oberflächen werden dadurch ca. 2- bis 6-mal schlechter abgebildet. Bisweilen müssen mehrere zusammengehörende Spuren im Nachhinein noch automatisch bzw. manuell zueinander in der Lage und Orientierung angepasst werden. Diese Anpassung erfolgt ähnlich der des MLS (Kap. 2.2.3) mit firmeneigener Software. Die erzeugten Punktwolken des Scansystems zeigen die folgenden Abbildungen:

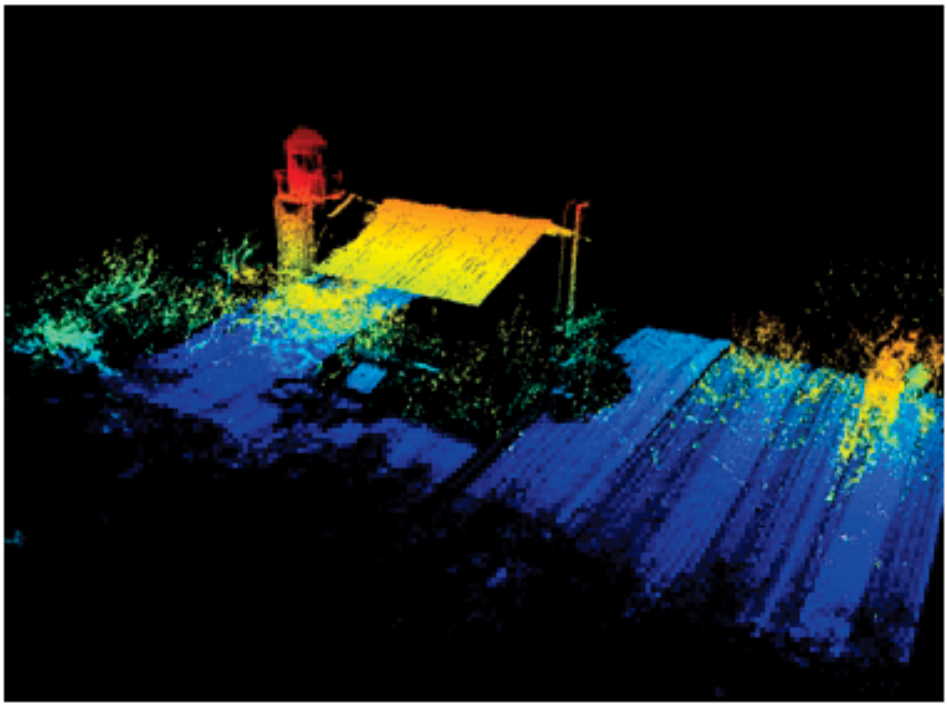

Abbildung 34: Punktwolke einer Spur des Laserscanners Hokuyo UTM 30LX.

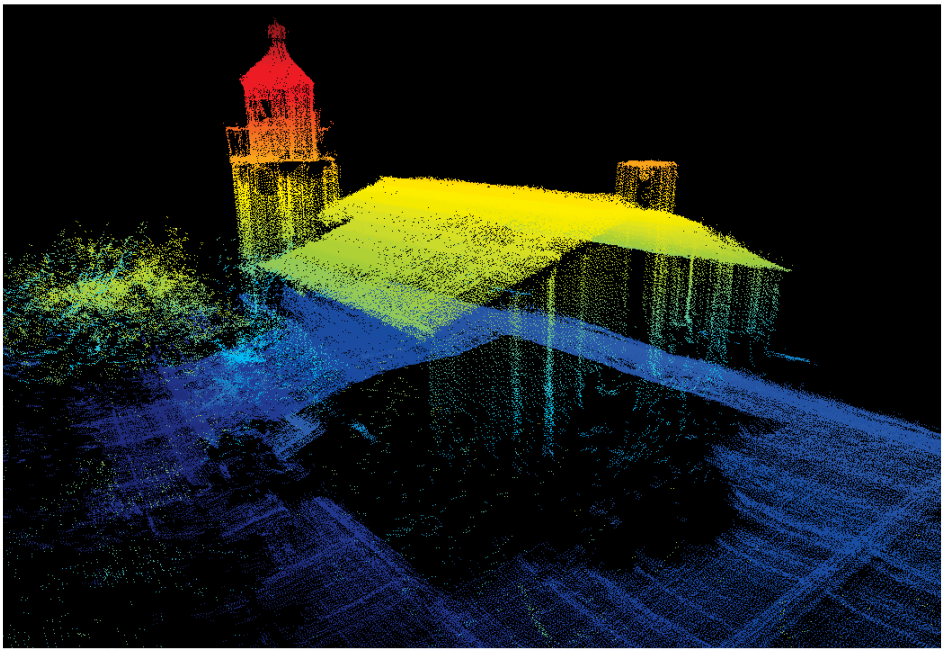

Abbildung 35: Punktwolke aller Spuren des Laserscanners Hokuyo UTM 30LX.

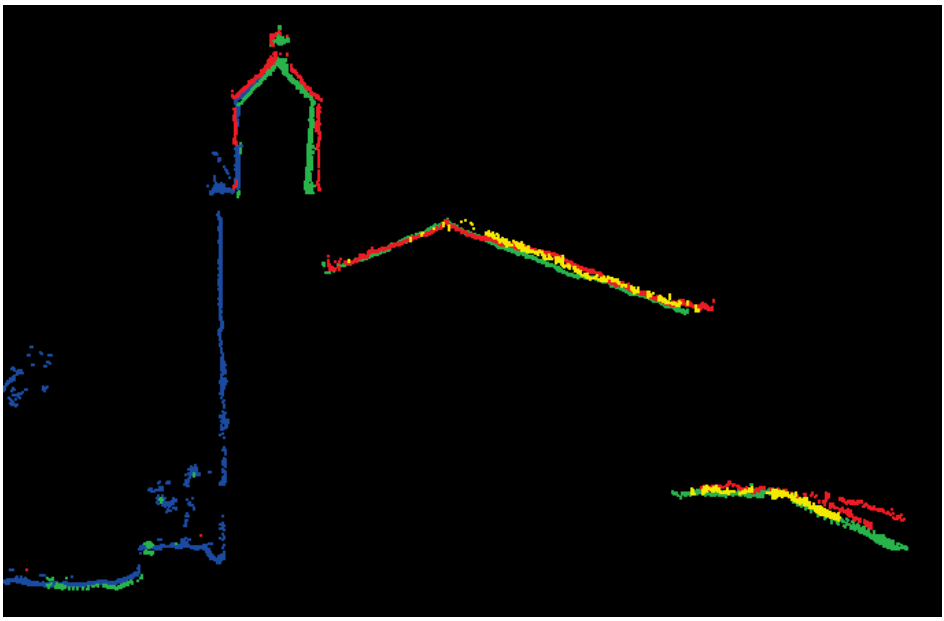

Abbildung 36: Querschnitt durch die Punktwolken aller angepassten Spuren des Laserscanners Hokuyo UTM 30LX.

Die gemessenen Standardabweichungen für ein definiertes, eingemessenes Objekt sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 5: Standardabweichungen der Punktwolken von der ausgleichenden Ebene.

Spur	Std-abw. der Punkte von der Ebene [m]	Anzahl der Punkte
Spur 1	0,012	60257
Spur 2	0,020	77747
Spur 3	0,042	65361
Spur 4	0,024	75862
Spur 5	0,076	66713
Spur 6	0,027	11607

Die Befliegungen mit dem neu entwickelten LEDA-K2-Multikopter bei normalen meteorologischen und morphologischen Bedingungen haben eindeutig bewiesen, dass die Gesamtkonstruktion (sowie alle Einzelkomponenten) durchaus in der Lage ist, ein Abbild der Erdoberfläche als Punktwolke geometrisch korrekt mit einer relativen Genauigkeit innerhalb des Streifens besser als 3 cm aufzunehmen und somit für kleinräumige Gebiete und kurzfristige Aufgabenstellungen im Küstenbereich und für Küstenschutzaufgaben eine sinnvolle Alternative zu den klassischen ALS-Aufnahmen auf Flugzeugen bieten. Da die anwendungsbezogenen Fragestellungen für den reinen Küstenschutz im Vordergrund standen, konnte auch insbesondere in Anbetracht des kurzen Projektzeitraums weitere

wichtige Fragestellungen wie z. B. eine Abschätzung der absoluten Genauigkeit des Gesamtsystems im Vergleich zur photogrammetrischen Auswertung nicht erfolgen. Besonders im Hinblick der zu klärenden groben Fehler der GNSS-Einheit und der ungenügenden IMU-Performance war dies nicht im Rahmen des Projektzeitraums bearbeitbar und bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit (Stand 2014).

5 Aktuelle Entwicklungen zum Einsatz von UAV

Schon im Bearbeitungszeitraum des Projektes LEDA-K2 Ende 2013 bzw. Anfang 2014 wurde deutlich, dass insbesondere die rasante Entwicklung der Photogrammetrie dazu geführt hat, dass der tatsächliche Einsatz von Kleinstlasern auf Drohnen zukünftig wahrscheinlich nicht mehr nötig sein wird, da die einfachere, schnellere und sicherere Anwendung von RGB-Kameras auf UAV-Basis für die Geländemodellierung mindestens gleichwertige Ergebnisse bieten kann. Deshalb wurde ebenfalls ein weiteres System mit einer normalen Kamera auf einem Multikopter installiert und parallel und kostenneutral zum Projektantrag getestet. Dabei kam die speziell für den Einsatz in Küstengebieten entwickelte Photogrammetrie-Software EDA-K der Firma CIS GmbH Rostock zur Anwendung.

Das Programm "EDA-K – Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten" ist ein von der CIS GmbH entwickeltes Geographisches Informationssystem (GIS). Es enthält spezielle Funktionen zur Arbeit mit Luftbildern, die z. B. bei einer Befliegung mit unbemannten Flugsystemen entstehen sowie Funktionen zur Auswertung von 3D-Modellen, die aus diesen Luftaufnahmen abgeleitet werden können.

Neben diesen Spezialfunktionen enthält das Programm GIS Funktionen zum Im- und Export von geographischen Datensätzen, zur Koordinatentransformation sowie zum Erzeugen von Geometrischen Objekten und die Verknüpfung mit bzw. Abfrage und Bearbeitung von Sachdaten. Weiterhin besteht die Möglichkeit Daten von WebMapServices (WMS) zu beziehen, um sich so eine Hintergrundkarte anzeigen zu lassen (z. B. amtliche Luftbilder, topographische Karten etc.).

Unter dem Menüpunkt „UAV" sind alle wichtigen Funktionen zur Arbeit mit den UAV Daten zusammengefasst. Zunächst sollte man im entsprechenden Untermenü die Voreinstellungen prüfen und insbesondere die für den aktuellen Flug verwendete Kamera samt Kalibrierung einstellen oder auswählen.

Danach kann ein Flugprotokoll eingelesen werden. Dieses Protokoll enthält eine Aufzeichnung des vom Fluggerät zurückgelegten Weges sowie die Punktpositionen, an denen die Kamera eine Aufnahme erstellt hat.

Diesen Fotopunkten werden beim Einlesen mehrere Objektvariablen zugeordnet, in denen unter anderem die Dateinamen der Fotodatei und die aufgezeichneten Flugwinkel gespeichert sind. Diese Werte können dazu verwendet werden, die Bilder perspektivisch und in Flugrichtung gedreht anzuzeigen.

Weiterhin kann aus den einzelnen Aufnahmen ein Bildmosaik erstellt werden, so dass man eine flächendeckende Gesamtaufnahme des beflogenen Gebietes erhält. Zu diesem Zweck müssen noch die zu verwendenden Flugpunkte ausgewählt werden (entweder manuell oder automatisch über die Flughöhe und Flugwinkel), um ein möglichst gutes Gesamtergebnis zu erhalten.

Eine weitere Funktion, die hier im Hinblick auf die 3D-Auswertung erwähnt werden muss, ist die Möglichkeit, die EXIF-Informationen der Fotodateien um die räumliche Lage (GNSS-Positionen) zu erweitern. Dies kann dazu genutzt werden, bei der Erstellung der 3D-Modelle bessere Ergebnisse zu erzielen und von vornherein eine genauere Platzierung der Modelle zu erreichen.

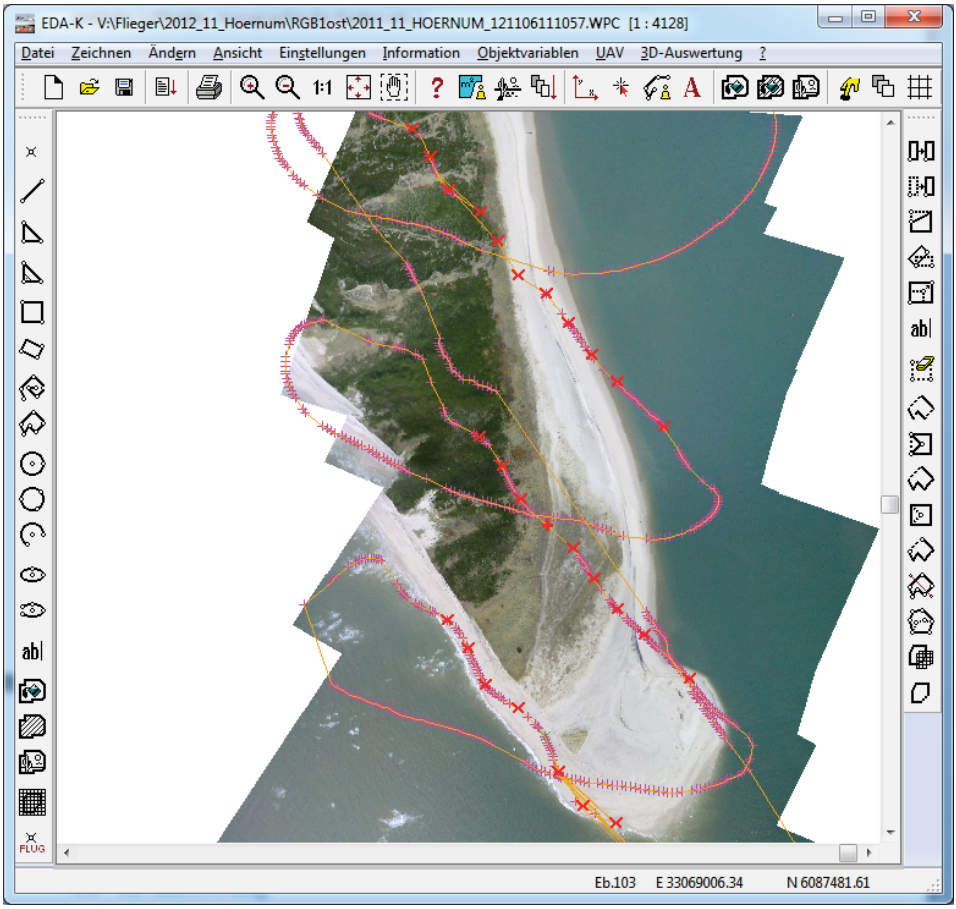

Abbildung 37: Oberfläche von EDA-K mit geladenem Flugprotokoll und Bildmosaik einer Befliegung der Südspitze von Sylt.

Nach dem Projektende haben neben den beteiligten Firmen CIS GmbH und Milan Geoservice GmbH viele weitere Firmen und Hardwareproduzenten Lösungen auf den Markt gebracht, die heute eingesetzt werden, um schnell und effizient über normale Bildbefliegungen hochgenaue dreidimensionale Geländemodelle zu erzeugen. Trotzdem bleibt auch der Spezialeinsatz von Kleinstlasern auf Multikoptern eine wichtige Methode zur Aufnahme besonderer Strukturen unter besonderen Aufnahmebedingungen.

6 Danksagung

Das Forschungsvorhaben LEDA-K wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Fördernummer 03KIS104 (2012–2013) gefördert und vom Projektträger Jülich begleitet.

Alle Abbildungen und Fotos sind projektbezogen entstanden und von den beteiligten Firmen/Institutionen erstellt/aufgenommen worden:

- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg
- Milan Geoservice GmbH
- CIS Gmbh Rostock

7 Schriftenverzeichnis

LUFTVERKEHRSGESETZ (LUFTVG): BGBl. I 2007 S. 698.
https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl107s0698.pdf%27]__1493306927143

LUFTVERKEHRSVERORDNUNG (LUFTVO): BGBl. I 2015 S. 1894.
https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl115s1894.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl115s1894.pdf%27]__1493307156671
https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/luftvo_2015/gesamt.pdf

Unter anderem wurden folgende Quellen zur Beantragung des Projekts herangezogen:

IGI MBH: Aerooffice User Manual, Version V5.0b Release 12.01.2004, 2005.

AGISOFT LLC: Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.0, 2012.

BAUER, M.: Vermessung und Ortung mit Satelliten – Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Berlin, Offenbach, 2011.

BECKER, M. und HEHL, K.: Geodäsie, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2012.

BAUMANN, E.: Vermessungskunde, Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure – Band 1 Einfache Lagemessung und Nivellement, 5., bearbeitete und erweiterte Auflage, Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1999.

BRENNER, C.: Aerial Laser Scanning – Systems, Processing, Applications (Tutorial), in: International Summer School Digital Recording and 3D Modeling, 24–29. April 2006, Greece, 2006.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Luftverkehrsgesetz, neugefasst durch B. v. 10.05.2007 BGBI. I S. 698; zuletzt geändert durch Artikel 29 G. v. 26.06.2013 BGBI. I, S. 1809, 2013.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Luftverkehrsordnung, neugefasst durch B. v. 27.03.1999 BGBI. I, S. 580; zuletzt geändert durch Artikel 3 G. v. 08.05.2012 BGBI. I S. 1032, 2012.

CONTE, G.; KLEINER, A.; RUDOL, P.; KORWEL, K.; WZOREK, M. and DOHERTY, P.: Performance Evaluation of a light-weight multi-echo Lidar for unmanned Rotorcraft applications, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote

Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, Rostock, Deutschland, 2013.

GERBETH, V.: Photogrammetrie, 3. Auflage, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2007.

GRUBER, F.J. und JOECKEL, R.: Formelsammlung für das Vermessungswesen, 13. Erweiterte und aktualisierte Auflage, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2007.

HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD: Spezifikation des Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN, 2008.

JOECKEL, R.; STOBER, M. und HUEP. W.: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung – und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren, 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Heidelberg, München, Landsberg, Berlin, 2008.

KAGER, H.: Discrepancies Between Overlapping Laser Scanner Strips – Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips, Proceedings XXth ISPRS Congress, Istanbul, Vol. XXXV, Part B /1, S. 555–560, 2004.

KING, A.D.: Inertial Navigation – Forty Years of Evolution, GEC Review, Vol. 13, NO. 3, 1998.

MILAN GEOSERVICE GMBH: Informationen anhand der Praxiserfahrungen der Firma MILAN Geoservice GmbH, 2013.

SCHREITER, M.: EVALUIERUNG des Einsatzpotentials des Kompaktlaserscanners UTM-30LX für photogrammetrische Anwendungen, Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden, 2012.

SHAN, J and TOTH, C.K.: Topographic laser ranging and scanning: principles and processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2009.

SIEBERT, S.; KLONOWSKI, J. und NEITZEL, F.: Unmanned Aerial Vehicles (UAV) – Historische Entwicklung, rechtliche Rahmenbedingungen und Betriebskonzepte. In: LUHMANN, T. und MÜLLER, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Herbert Wichmann Verlag, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg, 2009.

SZELISKI, R.: COMPUTER Vision – Algorithms and Applications, Springer Verlag, London, 2011.

RIEGL LMS GMBH: VMX-250 Datenblatt, 2012.

U-BLOX AG: UBX-G5010, G5000/G0010 Datenblatt, 2009.

VERHOEVEN, G.: Software Review, Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan, Wiley Online Library, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

VOSSELMANN, G. and MAAS, H.-G.: Airborne and terrestrial laser scanning, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, 2011.