

Scannen unter und über Wasser durch Sensorintegration von GNSS/IMU, Echolot und terrestrischem Laserscanner

Volker Böder¹, Thomas Kersten¹, Christian Hesse², Thomas Thies³,
Markus Ehm², Arne Sauer⁴

¹ Hafencity Universität Hamburg, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg

² dhpi, Harburger Schloßstraße 6-12, 21079 Hamburg

³ Hamburg Port Authority, Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg

⁴ NIAH GmbH, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg

[volker.boeder, thomas.kersten, arne.sauer]@hcu-hamburg.de

[ch, markus.ehm]@dhpi.com, thomas.thies@hpa-hamburg.de

1 Einleitung

Dreidimensionale Geodaten sind digitale Informationen, denen auf der Erdoberfläche und im Wasser eine bestimmte räumliche Lage zugewiesen werden kann. Diese Geodaten bilden einen wesentlichen Teil des in der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft vorhandenen Wissens, das auf allen Ebenen in Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft und vom Bürger zunehmend benötigt wird. Sie bilden die Grundlage des planerischen Handelns und ihre Verfügbarkeit ist eine maßgebliche Voraussetzung für Standort- und Investitionsentscheidungen. Das führt zu einem stetig steigenden Bedarf an solchen Geodaten, wodurch hohe Anforderungen an die effiziente Erfassung (aktuelle und kostengünstige Daten) und umfangliche Verfügbarkeit (schnell, einfach, flächendeckend und großmaßstäblich) gestellt werden.

Daher bieten sich für eine effiziente 3D-Datenerfassung mobile Sensorsysteme (Mobile Mapping Systeme) in der Luft (Flugzeug, Helikopter), auf dem Land (Fahrzeug) und auf dem Wasser (Schiff) an. In diesem Beitrag werden mobile Multi-Sensor-Systeme auf zwei Schiffen in Hamburg vorgestellt, mit denen über und unter Wasser simultan 3D-Geodaten erfasst werden können. Dabei steht die Integration von terrestrischen Laserscanningsystemen (TLS) auf den beiden schiff-basierten Multi-Sensor-Systemen, die mit Navigations- und hydrographischen Sensoren ausgestattet sind, im Vordergrund. Diese Systemintegration und die ersten Erfahrungen mit diesem speziellen Multi-Sensor-System sind in einer Zusammenarbeit zwischen der *Hafencity Universität Hamburg (HCU)*, der *Northern Institute of Advanced Hydrographics (NIAH) GmbH*, dem *Ingenieurbüro Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhpi)* und

der *Hamburg Port Authority (HPA)* entstanden. Dazu wurde in einer ersten Pilotstudie auf dem Vermessungsboot „*Level-A*“ der HCU/NIAH der terrestrische Laserscanner IMAGER 5006i von Zoller+Fröhlich (Z+F) in Zusammenarbeit mit dhpi installiert und integriert. In einem zweiten Pilotprojekt wurde der terrestrische Laserscanner Riegl VZ-400 auf dem Vermessungsschiff „*Deepenschriewer III*“ der HPA eingesetzt, um das System in typischen Anwendungsgebieten der HPA zu testen.

2 Mobile Multi-Sensor-Systeme

Mobile Multi-Sensor-Systeme werden schon seit fast zwei Jahrzehnten in Flugzeugen und auf Fahrzeugen eingesetzt. Gerade die Mobile Mapping Fahrzeuge mit integrierten terrestrischen Laserscannern haben sich in den letzten fünf Jahren auf dem Markt erfolgreich etabliert. So berichten u.a. verschiedene Autoren über den land-basierten Einsatz solcher Aufnahmesysteme in verschiedenen Ländern: Talaya et al. (2004), Gajdamowicz et al. (2007), Gräfe (2007), Kremer & Hunter (2007), Gandolfi et al. (2008), Kersten et al. (2009). Hesse (2008) beschreibt Ansätze zur Sensorintegration eines terrestrischen Laserscanners. In den letzten Jahren hat man das Potential terrestrischer Laserscanner auch für hydrographische Anwendungen auf Multi-Sensor-Schiffen erkannt. Alho et al. (2009) berichten vom Einsatz eines terrestrischen Laserscanners auf einem Boot zur Vermessung von Flüssen in Finnland, während Van Rens et al. (2007) den Einsatz eines Riegl LMS-Z420i in Kombination mit RTK-GPS und einem Applanix Inertialsystem POS MV 320 im Hafen von Norfolk (Virginia, USA) beschreiben.

Moderne Multi-Sensor-Systeme auf einem Schiff können heute wie folgt ausgestattet sein: Terrestrische Laserscanner zur 3D-Datenerfassung über Wasser, Fächerecholot zur Strukturerefassung unter Wasser, GNSS zur kinematischen Positionsbestimmung von Laserscanner und Echolot und Inertiale Messeinheit (IMU) zur Bestimmung der Lagewinkel und zur Stützung von GNSS. Die Raumvektoren zwischen den einzelnen Sensorsystemen werden in einem Schiffskoordinatensystem durch geodätische Messverfahren sehr genau bestimmt, so dass alle Messungen in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert werden können.

3 Vermessungsschiffe und deren Sensorik an Bord

Die Multi-Sensor-Systeme an Bord der beiden Vermessungsschiffe „*Level-A*“ und „*Deepenschriewer III*“ sind ähnlich konzipiert. Die GNSS-Korrekturdaten zur Generierung der präzisen Echtzeitposition (Vernetzungslösung) werden von

einem Dienst bezogen („Level-A“: SAPOS, „Deepenschriewer III“: Trimble VRS-NOW). Beide Systeme nutzen eine IMU der Firma IXSEA, wobei das System der HPA einen genaueren Kurswinkel generiert und auch die Positionsbestimmung stützen kann. Die Integration der Daten wird in beiden Systemen in der Aufnahme- und Auswertesoftware QINSy von der Firma QPS (Zeist, Niederlande) durchgeführt. Weitere Informationen zum Hydrographischen Multi-Sensor-System der HCU (HCU-HMSS) sind Böder (2010) zu entnehmen. Abb. 1 gibt einen Überblick über die eingesetzten Sensoren an Bord.

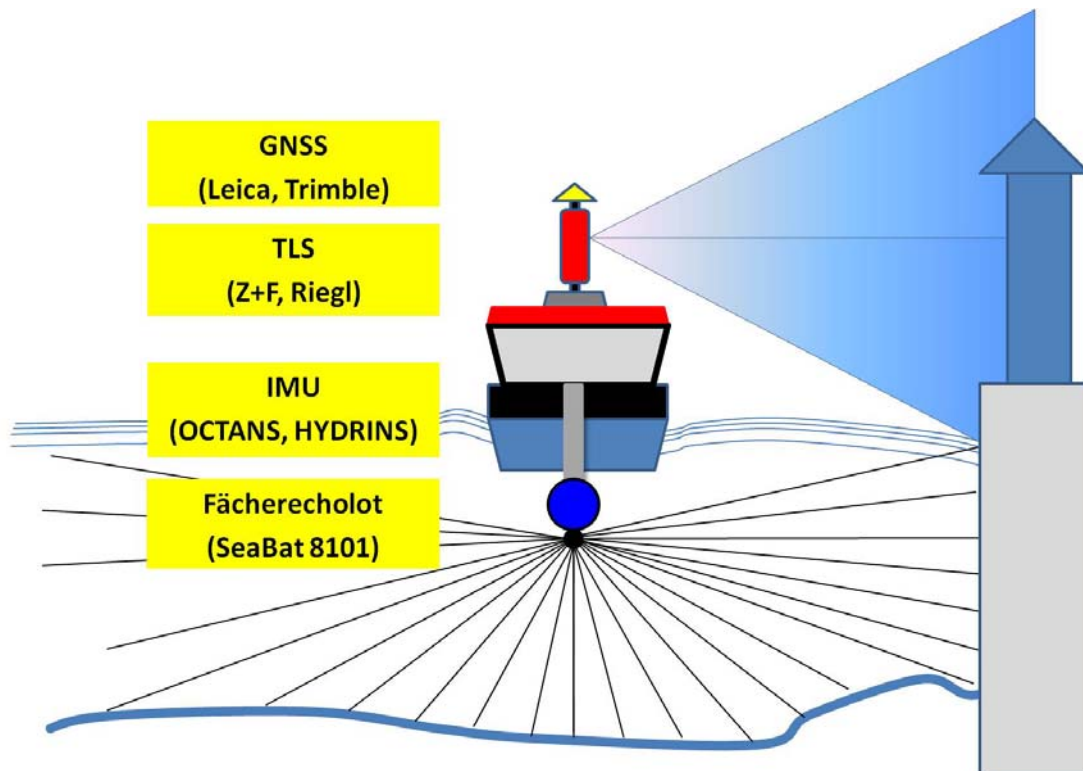


Abb. 1: Schematischer Überblick über die eingesetzten Sensoren an Bord von „Level-A“ und „Deepenschriewer III“.

3.1 Schiffe

Die „Level-A“ (siehe Abb. 2, links) ist ein Aluminiumboot und wird in Forschung und Lehre an der *HafenCity Universität Hamburg (HCU)* eingesetzt. Das Boot ist etwa 7,50 m lang und 2,50 m breit. Die „Level-A“ zeichnet sich durch einen relativ geringen Tiefgang (etwa 0,5 m) für Anwendungen im Flachwasserbereich (Flüsse, Seen, Küste) aus und ist trailerbar. Das System ist durch den modularen Aufbau, der modernen hydrographischen Sensorik (Echolote, Magnetometer, Strömungsmesser, etc.) flexibel und wirtschaftlich nutzbar und kann von Dritten angemietet werden. Die Bereederung erfolgt durch die *Northern Institute of Advanced Hydrographics GmbH (NIAH)*.



Abb. 2: Das Forschungsboot „Level-A“ der HCU/NIAH (links) und das Peilschiff „Deepenschriewer III“ der HPA (rechts).

Das Peilschiff „Deepenschriewer III“ (Abb. 2, rechts) ist ein Stahlschiff und wird bei der *Hamburg Port Authority (HPA)* zur hydrographischen Vermessung des Elbestromes und der Gebiete des Hamburger Hafens eingesetzt. Insbesondere die Überwachung der Solltiefen sowie die Bathymetrie der Gewässersohle hinsichtlich geomorphologischer Veränderungen und das Auffinden von Hindernissen sind Hauptaufgaben des Peilschiffes. Mit einer Länge von 17,20 m, einer Breite von 4,90 m und einem Tiefgang von 1,40 m ist das Boot gut für nahezu alle Aufgaben im Hafen einsetzbar. Durch ihre Größe liegt sie ruhiger im Wasser als die „Level-A“.

3.2 GNSS-Positionsbestimmung

Die Positionsbestimmung an Bord wird im Wesentlichen über GNSS-Systeme in Echtzeit unter Nutzung von Korrekturdatendiensten vorgenommen. Um eine hohe Verfügbarkeit der präzisen Position zu erreichen, müssen möglichst viele Satelliten beobachtet werden. Dies ist mit der hybriden Nutzung der Systeme NAVSTAR GPS, GLONASS und in Kürze GALILEO gegeben. Gelegentlich treten Störungen bei der Übertragung der Korrekturparameter auf großen Gewässern auf. Die hier vorgestellten Projekte wurden in unmittelbarer Nähe von Wohnbauten und Industrieanlagen durchgeführt, bei denen keine nennenswerten Störungen bemerkt wurden.

An Bord der „Deepenschriewer III“ der HPA wird ein Trimble SPS851H GNSS-Empfänger mit Zephyr 2 Antenne betrieben. Die Korrekturdaten werden von dem Dienst Trimble VRS-NOW (VRS Netzlösung) bezogen. Die Messrate beträgt bis zu 20 Hz, ein PPS-Ausgang ist vorhanden. Die Genauigkeiten im Trimble VRS-NOW Korrekturdatendienst können mit 1-2 cm abgeschätzt werden.

Die RTK-Positionsdaten werden in die IXSEA-HYDRINS Lösung (siehe Kapitel 3.3) mit den Daten des inertialen Sensors integriert. Laut Herstellerangaben ist die integrierte Positionsbestimmung 3-fach genauer als die eingespeiste GNSS-Lösung. Diese Aussage bedarf jedoch einer unabhängigen Untersuchung. Die kombinierte Lösung wird dann über RS232 oder LAN in Echtzeit an die hydrographische Auswertesoftware QINSy zur Integration aller Sensoren übertragen.

An Bord der „Level-A“ wurde zum Zeitpunkt der Messung das RTK-System Leica GPS500 mit einer AT502 Antenne betrieben. Der 2-Frequenz GPS-Empfänger bezieht die Referenzstationsdaten von dem Korrekturdatendienst der deutschen Landesvermessung SAPOS. Die Messrate beträgt bis zu 10 Hz, die Daten werden über RS232 Schnittstellen weitergeleitet. Das System besitzt selber keinen PPS-Ausgang, das PPS-Signal wird an Bord von einem zusätzlich betriebenen Javad 2-Frequenzempfänger ausgegeben. Der SAPOS HEPS Korrekturdatendienst erreicht laut Anbieterangaben eine Genauigkeit von 1-2 cm. In Kombination mit dem GPS500 System ist unter günstigen Bedingungen in etwa auch eine solche Genauigkeit umzusetzen. Das Gerät wird zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes durch ein neueres GNSS-System ersetzt.

3.3 IMU-Lagewinkelbestimmung

In den hier dargestellten Untersuchungen werden zwei unterschiedliche inertielle Messsysteme der Firma IXSEA eingesetzt. In der Produktreihe für hydrographische Einsätze sind die Typen OCTANS, HYDRINS und PHINS als etabliert zu nennen. Alle Systeme basieren auf Beschleunigungsmessern und fiberoptischen Kreiselsystemen.

Tab. 1: Wesentliche technische Spezifikationen der inertialen Messeinheiten der IXSEA-Produktreihe (Herstellerangaben). Bezeichnungen: φ : geographische Breite, $\secant(\varphi) = 1/\cos(\varphi)$, für Hamburg $\secant(53,5^\circ) = 1,68$.

Eigenschaften/Typen	OCTANS	HYDRINS	PHINS
Genauigkeiten der Lagewinkel (<i>route mean square, RMS</i>)			
Kurswinkel	0,1° $\secant(\varphi)$ Hamburg: 0,17°	0,02° $\secant(\varphi)$ Hamburg: 0,034°	0,01° $\secant(\varphi)$ Hamburg: 0,017°
Rollen / Stampfen	0,01°	0,01°	0,01°
Genauigkeiten der Positions- bzw. Translationsbestimmung (50% circular error probability (CEP) oder RMS)			
Hub / Versetzen / Schnellen (RMS)	5 cm oder 5%, jeweils der höhere Wert	2,5cm oder 2,5%, jeweils der höhere Wert	5 cm oder 5%, jeweils der höhere Wert

Die drei Systeme werden mit ihren für die Untersuchung relevanten Merkmalen in der Tabelle 1 dargestellt. Alle Systeme können über Ethernet und RS232/RS422 mit anderen Systemen verbunden werden. Die Datenabgabe erfolgt über NMEA0183, aber auch andere ASCII und binäre Formate. Die Daten können über PPS-Signale zeitsynchronisiert werden. Bei den Typen HYDRINS und PHINS werden zusätzlich die Genauigkeiten der GNSS-Positionsbestimmung und die Datenrate durch die Integration mit den inertialen Messdaten verbessert. Die Datenraten können bei allen Modellen zwischen 0,1 Hz bis 200 Hz gewählt werden. Auf der „Level-A“ kann die Lagewinkelbestimmung zusätzlich mit Hilfe eines Arrays bestehend aus vier GNSS-Antennen erfolgen (Böder 2009).

3.4 Terrestrischer Laserscanner Z+F IMAGER 5006i

Der Z+F IMAGER 5006i nutzt laut Herstellerangaben sichtbares Licht (658 nm) mit einer Strahldivergenz von 0,22 mrad ($0,014^\circ$) bei einem 3 mm kreisrunden Messstrahl, der einem *footprint* mit einem Durchmesser von 21 mm auf 79 m entspricht. Die maximale Scan-Reichweite beträgt 79 m, wobei Messungen bis 50 m praktikabel sind. Das vertikale Sichtfeld beträgt 310° , ein Bereich von 50° nach unten ist nicht messbar. Auch hier ist eine Kippmontierung installierbar. Das Instrument ist in der Horizontalen um 360° drehbar.

Vertikale und horizontale Auflösung werden mit jeweils $0,0018^\circ$ angegeben, umgerechnet entspricht dies 3 mm auf 80 m. Die vertikale und horizontale Genauigkeit wird als rms-Wert mit $0,007^\circ$ angegeben, dies wirkt sich 80 m mit jeweils 1 cm aus. Das Rauschen der Streckenmessung wird auf Entfernungen bis zu 50 m bei einer Reflektivität $\rho \geq 10\%$ mit etwa 7 mm angegeben, bei $\rho = 100\%$ mit 1,8 mm. Die Datenerfassungsrate beträgt 508.000 Pixel pro Sekunde. Die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels wird mit maximal 50 Rotationen pro Sekunde (rps), üblicherweise 25 rps angegeben. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit des Bootes von 6 kn (etwa 3 m/s) ergibt sich so ein vertikaler Linienabstand von 0,06 m (bei 50 rps).

Basierend auf diesen Angaben kann die Standardabweichung in jeder Koordinatenkomponente mit genauer als 1 cm auf die maximale Reichweite von 79 m abgeschätzt werden. In den Untersuchungen wurde der Horizontalwinkel des Systems im Verlaufe einer Aufnahme nicht verändert. Die Verknüpfung der Daten an Bord zu anderen Rechnern oder Sensoren kann über LAN und über USB durchgeführt werden. Die Zeitsynchronisation wird über einen PPS-Puls (*pulse-per-second*) realisiert. Genauigkeitsuntersuchungen des IMAGER 5006i sind in Kersten et al. (2009) publiziert.

3.5 Terrestrischer Laserscanner Riegl VZ-400

Der terrestrische Scanner Riegl VZ-400 nutzt laut Herstellerangaben nahes infrarotes Licht mit einer Strahldivergenz von 0,3 mrad ($0,017^\circ$), die einem *footprint* mit einem Durchmesser von 30 mm auf 100 m entspricht. Die Messungen überdecken in der Vertikalen einen Winkel von $+60^\circ$ über und -40° unter dem Horizont des Instruments, insgesamt somit 100° . Auf 10 m Entfernung berechnet sich mit diesen Werten ein vertikaler Messbereich von 17,3 m oberhalb und 8,4 m unterhalb des Instrumentenhorizonts. Mit Hilfe einer Kippmontierung können andere Elevationen erreicht werden.

Der Differenzwinkel zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen in der Vertikalen ist im Bereich von $0.0024^\circ \leq \Delta\phi_V \leq 0.288^\circ$ variabel einstellbar, für den Horizontalwinkel sind hier Variationen von $0.0024^\circ \leq \Delta\phi_H \leq 0.5^\circ$ möglich. Der Abstand zwischen zwei Scanlinien beträgt sowohl horizontal als auch vertikal auf 100 m somit im Minimum ebenfalls etwa 4 mm.

Für die Streckenmessung wird eine Standardabweichung von 5 mm auf 100 m unter firmeneigenen Testbedingungen angegeben. Die Auflösung der Richtungsmessungen wird für Horizontal- und Vertikalwinkel mit $0,0005^\circ$ angegeben. Dies entspricht einer Querabweichung von 4 mm auf 500 m. Basierend auf diesen Angaben kann die Standardabweichung in jeder Koordinatenkomponente mit etwas besser als 1 cm auf 100 m abgeschätzt werden. Auch hier wurde der Horizontalwinkel des Systems im Verlaufe einer Aufnahme nicht verändert, dies ist aber grundsätzlich möglich.

Im *Long Range Mode* beträgt die Reichweite 500 m für gute natürliche Reflektoren (Reflektivität $\rho \geq 80\%$) und 160 m für Reflektoren mit $\rho \geq 10\%$. Die effektive Messrate beträgt 42.000 Messungen pro Sekunde bei einer Pulswiederholungsrate von 100 kHz. Das 3-fache dieser effektiven Messrate wird im *High Speed Mode* mit 125.000 Messungen/Sekunde bei einer Pulswiederholungsrate von 300 kHz erreicht. Die Reichweite beträgt hier nur etwa 60% des *Long Range Modes* mit 300 m bei natürlichen Reflektoren mit einem $\rho \geq 80\%$ und 100 m mit einem $\rho \geq 10\%$.

Die Scangeschwindigkeit wird mit 3 bis maximal 120 Linien pro Sekunde in der Vertikalen angegeben. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit des Bootes von 3 m/s ergibt sich so ein vertikaler Linienabstand von 3 cm (bei 100 Linien/s).

Die Verknüpfung der Daten an Bord zu anderen Rechnern oder Sensoren kann sowohl über LAN als auch über USB-Verbindungen durchgeführt werden. Die Zeitsynchronisation wird über einen PPS-Puls realisiert, der von den an Bord befindlichen GNSS-Sensoren generiert werden kann. In der an Bord installierten

Software QINSy ist einen Treiber für den Riegl VZ-400 integriert, so dass eine Einbindung problemlos möglich ist.

3.6 Reson SeaBat 8101

Das Fächerecholot Reson SeaBat 8101 misst Strecken im Wasser mit einer akustischen Frequenz von 240 kHz. Eine solche Frequenz bewirkt eine Reflektion bereits an ersten Sedimentschichten, so dass das Signal vernachlässigbar gering in den Boden eindringt. Über einen Projektor wird Schallenergie in das Wasser abgegeben, am Boden oder anderen Hindernissen reflektiert und über ein Array aus mehreren Hydrophonen empfangen. Das *beamforming* generiert aus der empfangenen Energie Signale mit einem Öffnungswinkel von jeweils $1,5^\circ$ längs und senkrecht zur Sensorausrichtung, entsprechend einem *footprint* mit einem Durchmesser von 2,61 m auf 100 m. Anwendungen, die zur Verknüpfung der Daten terrestrischer Laserscanner führen können, sind küsten- und ufernah anzunehmen, so dass Tiefen von etwa 10-20 m zu erwarten sind. Der Durchmesser der *beams* beträgt auf 10 m 0,26 m und ist somit um etwa das 100-fache größer als beim Laserscanner.

Der Öffnungswinkel des gesamten Fächers des SeaBat 8101 beträgt auf der „*Level-A*“ aufgrund einer Systemerweiterung 210° quer und die oben genannten $1,5^\circ$ längs zur Schiffslängsachse. Somit misst der Sensor nicht nur nach unten, sondern auch zur Seite. Eine Verschwenkung des Sensors ist durch zusätzliche Halterungen durchführbar. Der Differenzwinkel zwischen den *beams* beträgt $1,5^\circ$ und verursacht einen Punktabstand von etwa 0,26 m auf 10 m Strecke. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 3 m/s und einer maximalen Aufzeichnungsrate von 40 Hz werden alle 7,5 cm ein Streifen jeweils bis zu 141 *beams* aufgenommen. Pro Sekunde sind so maximal 5.640 Messungen möglich. An Bord der „*Deepenschriewer III*“ ist das System mit der Standardoption von 101 *beams* und einem Öffnungswinkel von 150° ausgestattet. Die maximale Reichweite der Messungen beträgt 300 m für das verfügbare SeaBat 8101.

Die Auflösung der Tiefenmessungen wird laut Herstellerangaben mit 1,25 cm gegeben. Die Genauigkeit einer Tiefenmessung hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit der Bestimmung von Temperatur und Salzgehalt des Wassers in den jeweiligen Schichtungen ab. In Wassertiefen von 10 m sind Genauigkeiten von besser als 10 cm erreichbar, kaum aber besser als 5 cm.

Die Daten können in verschiedenen Auswerteprogrammen verarbeitet werden, üblicherweise wird das Programm QINSy an Bord der „*Level-A*“ genutzt. Die Datenübertragung zum Rechner gelingt über eine LAN-Schnittstelle.

Trotz scheinbarer schlechterer Merkmale bezüglich der Punktbestimmungen im Vergleich zu den Laserscannern sind Fächerecholote guter Qualität deutlich

teurer als gute Laserscanner. Hier wird den erschwerten Bedingungen der Unterwassermessungen mit hydroakustischen Techniken Rechnung getragen. In Abb. 3 werden die Terrestrischen Laserscanner und das Fächerecholot gegenüber gestellt.



Abb. 3: Z+F IMAGER 5006i (links), Riegl VZ-400 (Mitte) und Reson SeaBat 8101 (rechts)

4 Aufnahme einer Industrieanlage mit dem Laserscanner IMAGER 5006i an Bord der „Level-A“

Ein erster Test wurde 2009 in Wedel vor dem Kraftwerk an der Elbe vorgenommen. Kaianlage, beweglicher Verladekran und Betriebsgebäude sind direkt am Wasser gelegen (Abb. 4).



Abb. 4: Ansicht eines Teils des Kraftwerks in Wedel mit Verladekran (links) und Betriebshalle (rechts).

An Bord der „Level-A“ wurde ergänzend zu GPS-Positionsbestimmung (Leica GPS 500), inertialer Lagewinkelbestimmung (IXSEA OCTANS) und Fächer-echolot (Reson SeaBat 8101) der Laserscanner Z+F IMAGER 5006i mitgeführt. Der Laserscanner wurde mit einem Stativ auf dem Vordeck sicher in der Schiffslängsachse in etwa 1 m Entfernung installiert (Abb. 5). Das inertielle Messsystem OCTANS ist im Boot in etwa 2,5 m unter der GPS-Antenne montiert.

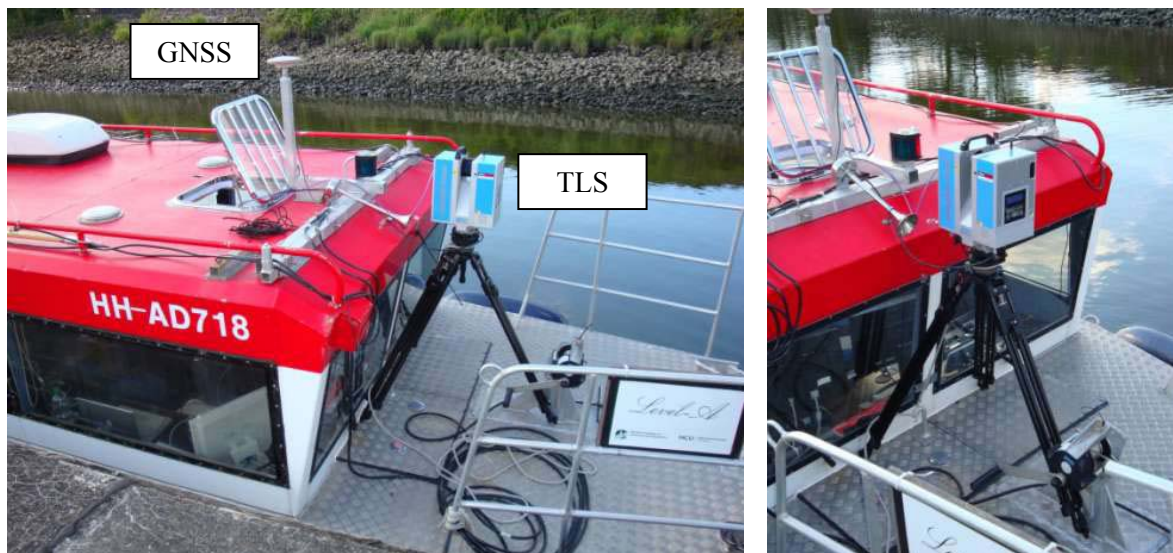


Abb. 5: Installation des Laserscanners Z+F IMAGER 5006i auf einem fest montierten Stativ an Bord der „Level-A“.

Die Einmessung des neuen Sensors in das Koordinatensystem des Schiffes erfolgte durch einen Räumlichen Rückwärtsschnitt, bei dem die an Bord vorhandenen Passpunkte vom Laserscanner gescannt und gemessen wurden. Die Passpunkte sind gleichmäßig an Bord verteilt (Abb. 6, helle Kreise).



Abb. 6: Positionsbestimmung des Laserscanners in das Koordinatensystem der „Level-A“ mit Hilfe der Passpunkte (helle Kreise). Darstellung der Intensitäten.

Das Boot wurde mit etwa 2 m/s parallel zu den Kaianlagen geführt. Der Stampfwinkel variierte etwa um $\pm 1^\circ$, der Rollwinkel um $\pm 3^\circ$ und der Kurs veränderte sich während eines Profils um etwa 40° . Die Daten des Fächer-echolots und des Laserscanners wurden simultan aufgenommen. In der Abb. 7 ist die Trajektorie des Bootes gut als Linie vor den Kaianlagen zu erkennen, hier mit einem Pfeil markiert. Die Trajektorie ergibt sich durch die Punkte, die auf dem fahrenden Boot gemessen wurden.

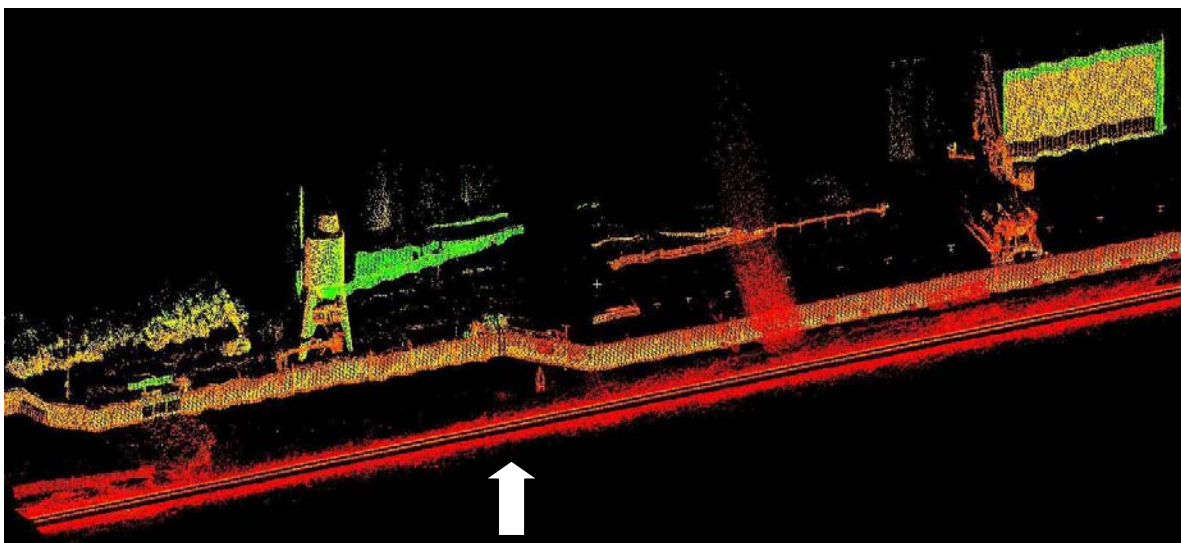


Abb. 7: Scan-Aufnahme des Kraftwerkes Wedel mit Trajektorie des Bootes parallel zur Kaianlage.

Die erfassten Daten wurden im Ingenieurbüro dhpi im Postprocessing bearbeitet. Die Z+F Scanprofile wurden nach einer Vorverarbeitung in der Auswertesoftware für 3D-Laserscannerdaten SiRailScan der Firma *Technet*, Berlin, mit den IMU-Daten integriert, um eine entzerrte Punktwolke zu erhalten.

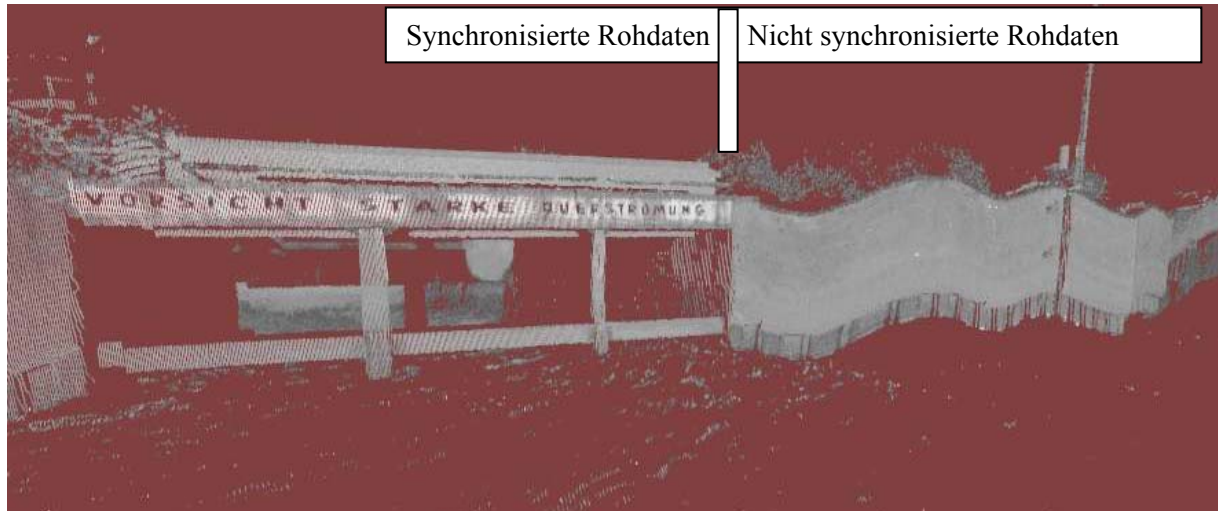


Abb. 8: Messergebnisse mit Berücksichtigung der inertial gemessenen Lagewinkel (links) und ohne Berücksichtigung derselben (rechts) für das Auslaufbauwerk des Kraftwerks Wedel.

Abb. 8 zeigt den Vergleich zwischen mit inertialen Messdaten beschickten Rohdaten in der linken Bildhälfte und den unbeschickten Rohdaten in der rechten Bildhälfte, bei denen sich die Schiffsdynamiken (insbesondere Kurs, Rollen und Stampfen) noch als Wellenbewegungen in den Koordinaten auswirken. In der Darstellung der Rückstreuungsintensitäten ist in der linken Hälfte die Beschriftung über dem Auslaufbauwerk gut zu erkennen.

Die Daten werden im Anschluss mit den in Echtzeit beschickten Fächerecholotdaten kombiniert. In Abb. 9 ist ein Ausschnitt der Messungen an der Kaimauer veranschaulicht, wobei in dem oberen Bild Kaimauer und Flussboden als DGM, in der unteren Grafik die einzelnen Tiefenmessungen des oben mit einem weißen Kasten markierten Bereichs dargestellt sind.

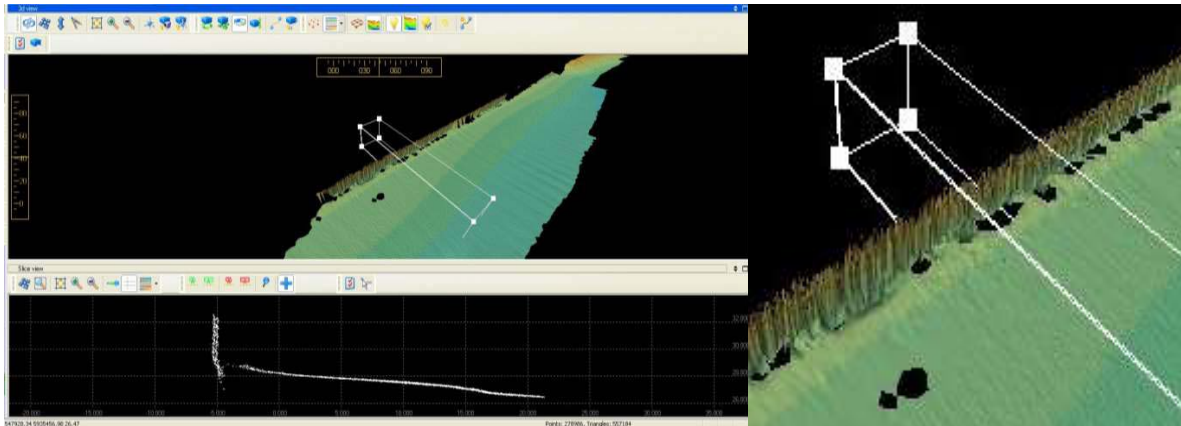


Abb. 9: Ausschnitt aus den Messergebnissen des Fächerecholots beim Kraftwerk Wedel nach Bearbeitung mit dem Programm Qcloud (QPS).

Mit dieser Messung wurde erstmals das kinematische hydrographische Laserscanning an Bord der „Level-A“ realisiert. In dieser Pilotstudie wurde deutlich, dass die Reichweite des Laserscanners von maximal 79 m für viele hydrographische Anwendungen nicht ausreichend ist. Es wurden Genauigkeiten von wenigen Zentimetern im Nahbereich erreicht. Die hier kaum hinreichende Genauigkeit der Kurswinkelbestimmung mit dem OCTANS ($0,17^\circ$) wirkt sich mit 0,24 m deutlich auf die Messgenauigkeit der Koordinaten in 79 m Entfernung aus. Dennoch lassen sich systematische Effekte zumeist kalibrieren, was jedoch in dieser Untersuchung noch nicht erfolgte.

5 Aufnahme des Grasbrookhafens in der Hamburger HafenCity mit dem Laserscanner Riegl VZ-400 an Bord der *Deepenschriewer III*

Laserscannerdaten lassen sich im Prinzip bezüglich der Integration in ein Multi-Sensor-System ähnlich behandeln wie Fächerecholote. In der hydrographischen Aufnahmesoftware QINSy wurde eine Schnittstelle für den Riegl VZ-400 erstellt, so dass die Daten z.B. an Bord der „Level-A“ integriert werden können. Das System ist so auch an Bord der „Deepenschriewer III“ verfügbar. 3D-Position und Lagewinkel werden über den inertialen Sensor IXSEA HYDRINS in Kombination mit einem TRIMBLE SPS851H bereitgestellt. Die Objektkoordinaten werden in Echtzeit in der Software QINSy bestimmt.



Abb. 10: Installation des TLS Riegl VZ-400 an Bord der „Deepenschriewer III“.

Abb. 10 zeigt den Aufbau des Systems auf dem Dach der „Deepenschriewer III“. GNSS-Antenne, IMU und TLS wurden längs der Schiffsachse in einem Abstand von jeweils 30 cm auf einer Platte montiert. Die unmittelbare Nähe der Sensoren zueinander reduziert mögliche Fehlereinflüsse bei der geodätischen Einmessung der Sensoren und bei der Fusion der Messdaten.

Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen basieren auf den ersten Messungen im Grasbrookhafen in der Hamburger HafenCity am 16.07.2010. Das Aufnahmegebiet ist in Abb. 11 in einem veraltetem Luftbild veranschaulicht. Das Hafenbecken ist in Ost-West etwa 450 m lang und in Nord-Süd-Richtung 60 m bis 110 m breit. Außer dem alten Kaispeicher A der zukünftigen Elbphilharmonie sind noch keine Bauten auf dem Luftbild vorhanden. Der nördliche und der östliche Bereich sind heute jedoch schon voll bebaut und in Nutzung. Das untere Bild in Abb. 11 zeigt eine Schrägansicht der erfassten Daten im Grasbrookhafen.

Die „Deepenschriewer III“ fuhr etwa 20 m vom Ufer entfernt, um auch die Kaianlagen bis zur Wasserlinie mit aufnehmen zu können. Drei Profile wurden nacheinander aufgenommen und analysiert: Die Profile 3 und 5 beginnen am südlichen Ufer von West nach Ost und führen am nördlichen Ufer von Ost nach West zurück. Das Profil 4 beginnt am nördlichen Ufer von West nach Ost und endet am südlichen Ufer mit einem Ost-West-Profil. Mit den Bezeichnungen A und B sind in der Abb. 11 Untersuchungsstellen markiert, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

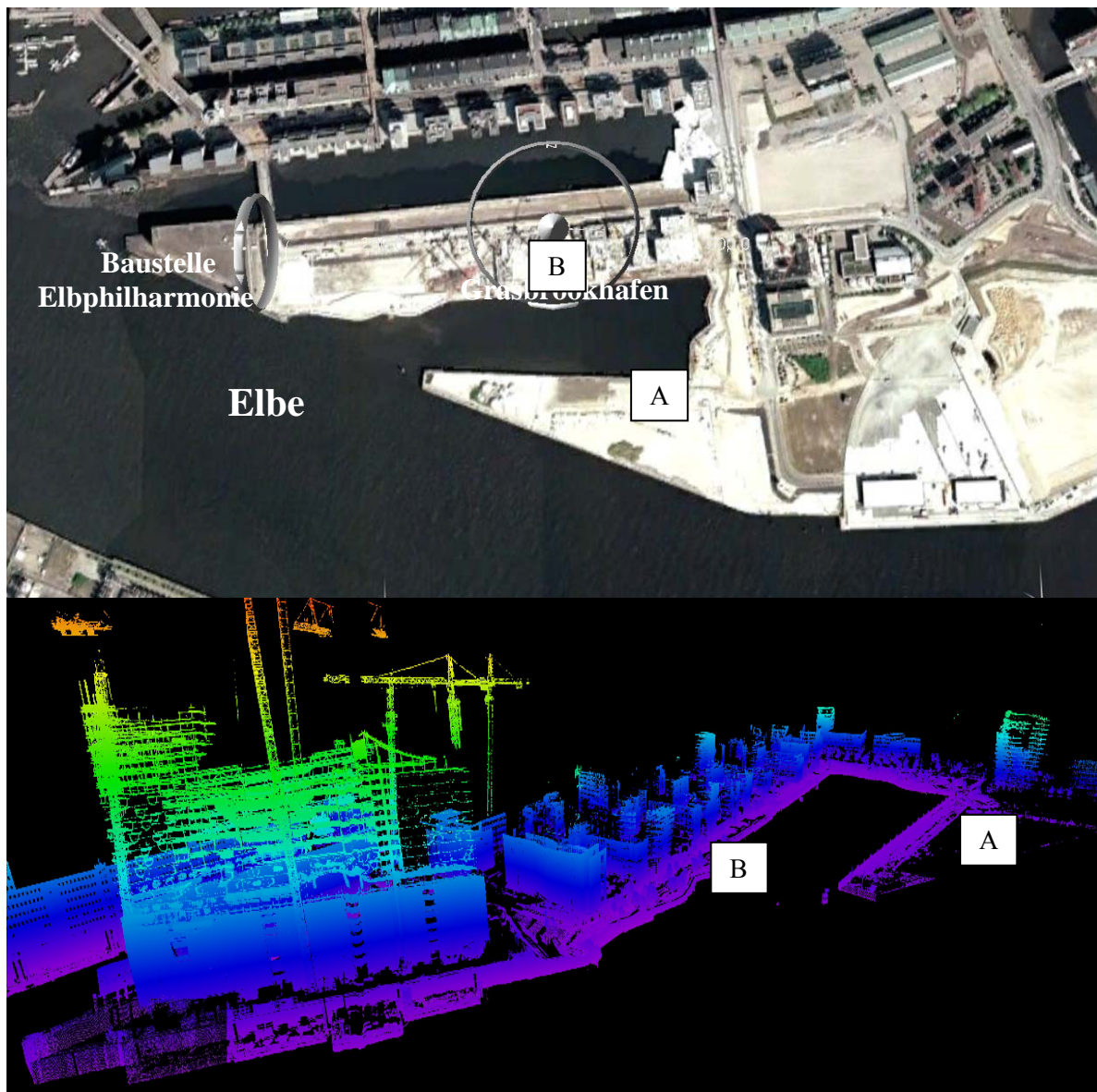


Abb. 11: Veraltetes Luftbild des Grasbrookhafens (Quelle: Google Earth) in der Hamburger HafenCity (oben) und Schrägansicht der erfassten Daten (unten).

Bei der Markierung A ist ein Bauzaun aufgenommen worden (siehe Abb. 12). Die seitlichen Rahmen der Elemente bestehen aus 4 cm dicken Rohren, die oberen und unteren Rahmen aus 2,5 cm dicken Rohren. Der Bauzaundraht hat eine Dicke von 3 mm und ist in 10 cm x 25 cm-Rechtecken aufgebaut. Der Bauzaun ist in allen Profilen deutlich identifizierbar, auch ein Teil der dünnen Drähte sind gut zu erkennen. Der Vergleich der Koordinaten, die für diesen Bauzaun ermittelt wurden, ergab, dass die Ergebnisse der West-Ost-Profile 3 und 5 in Lage und Höhe in etwa um 1-2 cm voneinander abweichen. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis, die Unterschiede sind in den Darstellungen kaum zu definieren. Das Ost-West-Profil 4 weicht dagegen aber in der Lage um 7 cm und in der Höhe um 5 cm ab.

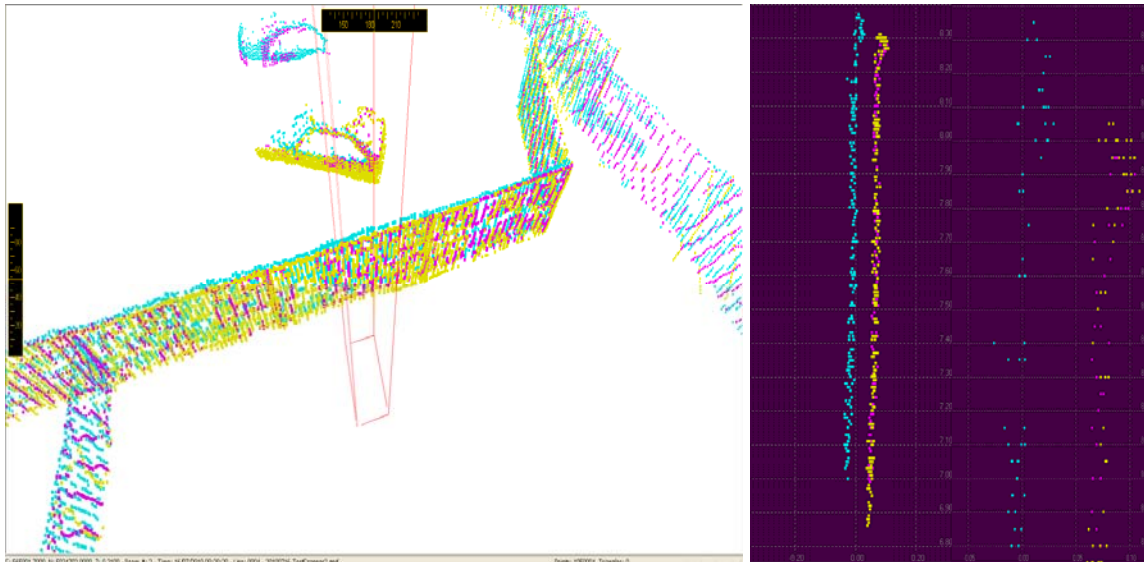


Abb. 12: Genauigkeitsanalysen anhand eines Bauzauns am südlichen Ufer des Grasbrookhafens (Marke A in Abb. 11); 3D-Darstellung der erfassten Punkte (links) und Darstellung der Messergebnisse im Querschnitt (rechts).

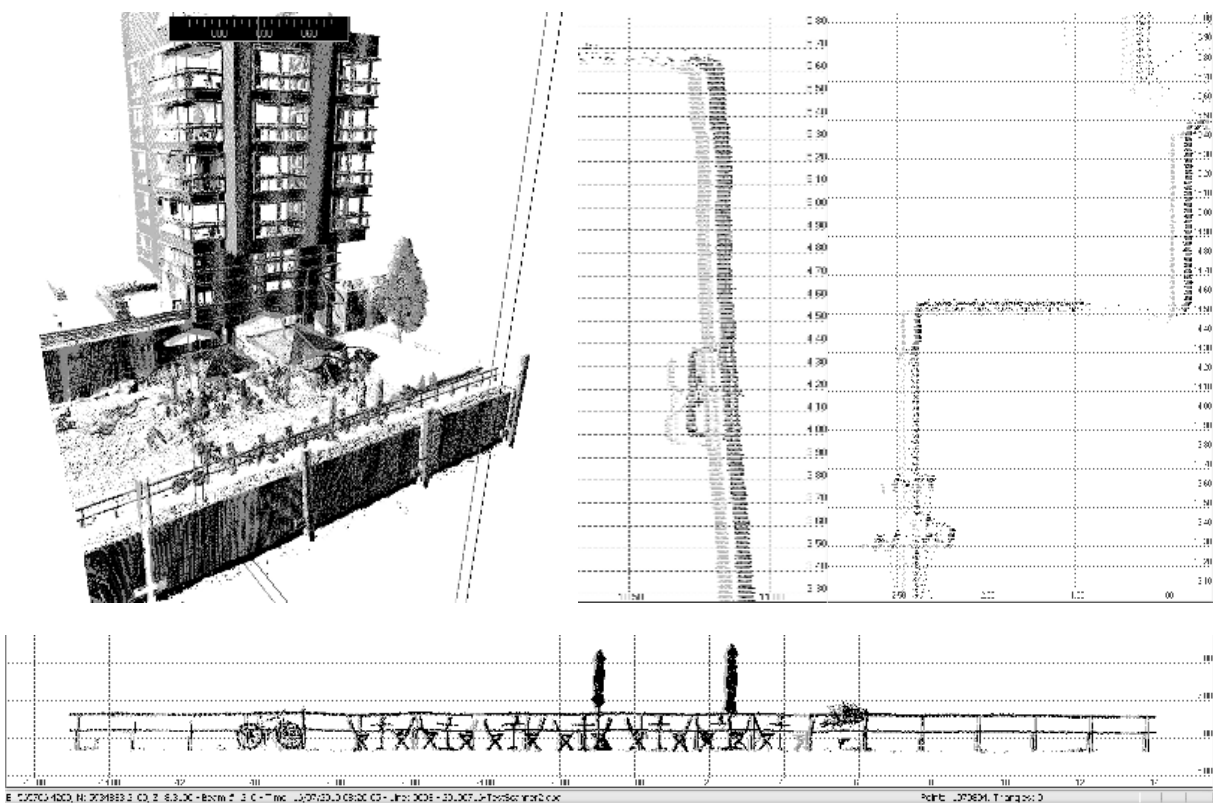


Abb. 13: Genauigkeitsanalyse an Kaimauer (Mitte) und Gebäude (rechts) im Grasbrookhafen (Marke B in Abb. 11) und Darstellung der Messpunkte am Geländer (unten).

Diese Abweichungen konnten auch am nördlichen Ufer in Abb. 13 nachgewiesen werden. Hier wurden Analysen sowohl an der zurückliegenden Hausfront (rechtes Bild) und in der Kaimauer (Mitte) durchgeführt, die jeweils vergleichbare Ergebnisse (7 cm in der Lage, 4 cm in der Höhe) mit dem Südufer ergaben. Die Koordinaten des abweichenden Profils 5 lagen stets weiter vom Schiff entfernt, so dass von einer Systematik ausgegangen werden muss. Dies kann beispielsweise durch eine Abweichung in der Einmessung der Sensoren an Bord um 3,5 cm quer zur Längsrichtung des Schiffes verursacht worden sein, was im Postprocessing kalibrierbar ist, hier aber noch nicht durchgeführt werden konnte.

Die Abweichung der Lagewinkelbestimmung bzw. eine ungenau kalibrierte Ausrichtung der Sensorachsen zueinander könnten in der Darstellung langer linearer Strukturen längs zur Fahrtrichtung in unterschiedlichen Entfernungen zum TLS analysiert werden. Ein gutes Beispiel stellen die Rohre des Geländers in Abbildung 13 im unteren Teil dar, die sich hier leicht geschwungen präsentieren. Bei einer Feldbegehung fiel jedoch auf, dass vergleichbare Variationen tatsächlich im Gelände vorhanden sind, so dass eine genauere Analyse noch nachgeholt werden muss.

Weitere Genauigkeitsaussagen können über die Analyse von Flächen und linearen Strukturen in verschiedenen Profilen durchgeführt werden (z.B. aus Normalenvektoren). Hier kann beispielsweise auch die Software RiScan Pro von Riegl herangezogen werden. Generell muss beachtet werden, dass die Objektansprache und -identifikation meist nicht an klar definierten Punkten und Bruchkanten erfolgen kann, da diese nicht direkt angezielt bzw. gescannt werden.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags sind noch nicht alle Analysen abgeschlossen. So wurden am 13.08.2010 Referenzdaten durch statisches Laserscanning aufgenommen, die präzisere Aussagen über die Genauigkeit der mobilen Aufnahme erlauben werden.

6 Fazit und Ausblick

Die ersten Untersuchungen zur Nutzung terrestrischer Laserscannersysteme an Bord von Vermessungsschiffen in Hamburg zeigen, dass die Datenerfassung durch solche Systeme sowohl im Postprocessing als auch in Echtzeit in die Hydrographischen Multi-Sensor-Systeme (HMSS) zu integrieren ist. Die hohe Geschwindigkeit der Aufnahme, die hohe Informationsfülle (3D-Koordinaten, Rückstrahleigenschaften) und die Genauigkeit der erfassten Punktwolken im

Zentimeterbereich bieten gute Voraussetzungen zur Nutzung dieser neuen Technologie für viele Anwendungen an und auf dem Wasser.

Für die Untersuchungen an der HCU/NIAH kommt der Datenerfassungssoftware QINSy eine entscheidende Schlüsselrolle bei der Integration der terrestrischen Laserscanner in Echtzeit zu. Die Integration des Riegl VZ-400 konnte erfolgreich durchgeführt werden. In beiden Pilotstudien konnte außerdem gezeigt werden, dass gerade die Genauigkeit der inertialen Messeinheiten die Genauigkeit und Qualität der kinematischen Laserscanningdaten signifikant beeinflusst. Im Vergleich der beiden eingesetzten Laserscanner an Bord der Vermessungsschiffe hatte der Riegl VZ-400 auch schon aufgrund seiner technischen Parameter Reichweite, Genauigkeit und Auflösung einen deutlichen Vorteil, wodurch ein Einsatz dieses Laserscanners hier als sehr sinnvoll erachtet wird. In naher Zukunft werden weitere Untersuchungen mit dem System im Hamburger Hafen erfolgen, um die Genauigkeit anhand von Referenzdaten detailliert zu überprüfen und um ggf. auch systematische Fehler kalibrieren zu können. Darüber hinaus wird untersucht, in wie weit diese erfassten 3D-Daten zur Modellierung und Visualisierung von baulichen Objekten genutzt werden können (Kersten et al. 2008). Ansätze zur Objekterfassung und automatisierten Modellierung können auch Hesse und Neumann (2007) entnommen werden.

Durch die Systemintegration und –erweiterung der terrestrischen Laserscanner an Bord von Vermessungsschiffen kann das Anwendungsspektrum vergrößert werden. Potentielle Anwendungen sind beispielsweise die Dokumentation und Inspektion von Kai- und Deichanlagen, sowie baulicher Objekte im Hafen- und Küstenbereich, die topographische Aufnahme von Küsten- und Uferlinien und trockenfallender Wattengebiete. Die Beobachtung von Schiffsdynamiken wie zum Beispiel die Bestimmung des Trimmverhaltens (*squat* und *settlement*) stellen eine weitere mögliche Anwendung dar.

Literatur

- Alho, P., Kukko, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Hyypä, J., Jaakkola, A. (2009). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1831-1838.
- Böder, V. (2009). Untersuchung von Lagewinkelsensoren. Beiträge zum 89. DVW-Seminar Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt. Hamburg. Schriftenreihe des DVW 58/2009, Wissner-Verlag, Augsburg: pp. 19-30.
- Böder, V. (2010). HCU-HMSS: A Multi Sensor System in Hydrographic Applications. In: Schulze-Lammers, Kuhlmann (Eds.), 2nd International Conference on Machine Control&Guidance. Bonn. March 9-11, 2010: pp. 65-74.
- Gajdamowicz, K., Öhamn, D. and Horemuz, M. (2007). Mapping and 3D Modelling of Urban Environment Based on LIDAR, GPS/IMU and Image Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/C55).
- Gandolfi, S., Barbarella, M., Ronci, E. and Burchi, A. (2008). Close Photogrammetry and Laser Scanning Using a Mobile Mapping System for the High Detailed Survey of a Height Density Urban Area. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5): 909-915.
- Gräfe, G. (2007). Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Hesse, C. (2008): Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. (Diss.) Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover ; 268
- Hesse, C.; Neumann, I. (2007): Automatische Objekterfassung und Modellierung durch kinematisches Laserscanning. In: Luhmann und Müller (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3DMesstechnik*, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Wichmann, Heidelberg, 278 - 287.
- Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K., Lindstaedt, M. (2008). Datenfluss im terrestrischen Laserscanning - Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. *Terrestrisches Laserscanning (TLS2008)*, Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda, Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 31-56.
- Kersten, Th., Büyüksalih, G., Baz, I., Jacobsen, K. (2009). Documentation of Istanbul Historic Peninsula by Kinematic Terrestrial Laser Scanning. *The Photogrammetric Record*, 24(126): 122-138.

- Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H. (2009). Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, Heft 4, pp. 301-314.
- Kremer, J. & Hunter, G. (2007). Performance of the StreetMapper mobile LIDAR mapping system in “Real World” projects. *Photogrammetric Week '07*, Fritsch (Ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 215-225.
- Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kornus, W. & Baron, A. (2004). Integration of a Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation Sensors. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5).
- Van Rens, J., Silva, A., Canter, P. & Brennan, R. (2007). Surface Imaging Capabilities on Marine Hydrographic Vessels. U.S. Hydro 2007 Conference, Norfolk, Virginia, USA, www.thsoa.org/hy07/12_04.pdf.