

Untersuchungen zur Erfassung bewegter Objekte durch kinematisches terrestrisches Laserscanning*

On Data Acquisition of Moving Objects via Kinematic Terrestrial Laser Scanning

Daniel Wujanz, Stefan Röckelein, Frank Neitzel, Christoph Fröhlich

Das terrestrische Laserscanning (TLS) hat sich als Messverfahren für geodätische Aufgabenstellungen etabliert. Vorteilhaft an dieser Technik sind die hohe erreichbare Genauigkeit sowie die schnelle, aktive und flächenhafte Abtastung des Objektraums. Probleme treten jedoch auf, wenn ein zu erfassendes Objekt oder der Scanner in Bewegung ist, was als kinematisches Laserscanning (k-TLS) bezeichnet wird. Problematisch dabei ist die sequentielle, zeitlich versetzte Abtastung einzelner Messpunkte, die sich dadurch von der photometrischen Erfassung abgrenzt. Durch diesen zeitlichen Versatz bei der Erfassung der Einzelpunkte kommt es in Folge von Bewegungen des Scanners oder des Objekts zu geometrischen Verfälschungen. Gelingt es jedoch, die jeweilige Orientierung und Position des Objektes oder, für den zweiten beschriebenen Fall, die des Scanners durch zusätzliche Sensorik zu jedem Zeitpunkt zu bestimmen, kann eine kinematische, geometrisch korrekte Objekterfassung erfolgen. Das entwickelte Verfahren nutzt einen terrestrischen Laserscanner, der die Abtastung eines Objekts durchführt, sowie drei zielverfolgende Tachymeter, die Ausrichtung und Position eines Objekts im Koordinatensystem des Scanners beschreiben. Die Messgenauigkeit der Tachymeter sowie die Zeitsynchronisierung zwischen den einzelnen Sensoren haben hierbei einen maßgeblichen Einfluss auf die zu erreichende Genauigkeit der geometrischen Korrektur. Zu Beginn des Beitrages erfolgt die Einführung in die Problematik an Hand eines einfachen Beispiels. Erprobt wird das Verfahren an einem 2,5 m langen Schiffsmodell in einer Versuchshalle sowie an einem 12 m langen Schiff im Freien. Zur Verifikation der Ergebnisse werden beide Modelle mit statischem Laserscanning erfasst, also außerhalb des Wassers beziehungsweise in Ruhelage, aus dem geometrische Referenzmodelle abgeleitet werden.

Schlüsselwörter: kinematisches terrestrisches Laserscanning (k-TLS), Erfassung kinematischer Prozesse, Schiffsvermessung

Terrestrial laser scanning (TLS) can be seen as an established method for geodetic data acquisition. Advantageous is its high achievable accuracy as well as its rapid, active and laminar sampling of the object space. However, problems occur if an object, the scanner itself or both are moving which is referred to as kinematic TLS (k-TLS). The cause of this issue is the sequential scanning principle of TLS which causes temporal offsets between measured points and hence describes a distinctive feature to photometric approaches. Due to this temporal shift movements of the scanner or an object lead to geometric falsification during data acquisition. If, however, one can determine current orientation and position of an object or the scanner at any point of time by applying additional sensor technology, geometrically correct

* Überarbeitete Fassung des im Tagungsband „Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013“ (Hrsg. Th. Luhmann, Chr. Müller) veröffentlichten Beitrags.

and kinematic data acquisition can be derived. The contribution at hand presents a multi sensor system which applies a terrestrial laser scanner for acquisition of an object's surface. In addition three tracking total stations are applied that monitor the object's orientation and position within the coordinate system of the TLS. Influencing factors onto the geometric correction are the accuracy of the applied total stations for determination of six degrees of freedom (6dof) as well as the temporal synchronisation. At first an introduction into the problem domain is exemplified on a simple case. The system is then tested on a 2.5 m long ship model inside a research facility as well as outdoors on a 12 m long vessel. For the sake of assessment the results have been compared to statically acquired scans of the test objects, outside of the water respectively in position of rest, in order to derive reference models.

Keywords: kinematic terrestrial laser scanning, acquisition of kinematic processes, ships

1 EINLEITUNG

Die Erfassung kinematischer Prozesse ist ein Anwendungsfeld, das bereits über mehrere Dekaden von photometrischen Verfahren dominiert wird, was auf deren Fähigkeit der quasi-simultanen Datenerfassung zurückzuführen ist. Ein Nachteil solcher Verfahren ist die Abhängigkeit von ausreichendem Kontrast im Bildmaterial, der durch Lichtverhältnisse, dem Objektkontrast oder weiteren Aspekten beeinflusst wird. In einer vorangegangenen Untersuchung /Wujanz *et al.* 2013/ wurde die äußere Hülle eines Schiffes auf dem Wasser zur Definition eines Schiffskoordinatensystems vermessen. Diese Aufgabe wurde durch Generierung einer Punktwolke mit Hilfe von Multi-View Stereo Software wie etwa BUNDLER /Snavely *et al.* 2006/ auf Grundlage unkalibrierter Digitalfotos bearbeitet. Das erzielte Ergebnis war auf Grund mehrerer Sachverhalte nicht zufriedenstellend:

- Der Objektkontrast der äußeren Schiffshülle war zum größten Teil unzureichend, was zu einer grob und heterogen aufgelösten Punktwolke führte.
- Reflektionen der Bootshülle auf dem Wasser führten zu sich wiederholenden Mustern, was zu falschen Korrespondenzen und in Folge dessen falschen Koordinaten der gesuchten Punkte führte.
- Da die Bilder von einem Dock aus erfasst wurden, mussten die vorliegenden schlechten Lichtbedingungen während der Aufnahme in Kauf genommen werden.
- Von der eingesetzten Software wurden keine Qualitätsmaße oder stochastische Informationen ausgegeben. So wurde der Benutzer gezwungen, das Ergebnis visuell zu überprüfen, eine Vorgehensweise, die höchst subjektiv ist und somit gewachsene Methoden der geodätischen Qualitätssicherung in keiner Weise erfüllt.

1.1 Motivation

Aus den zuvor aufgeführten Nachteilen erwuchs die Motivation, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem das gestellte Problem, also die Erfassung der Geometrie von bewegten Objekten, gelöst werden kann. Das Verfahren soll unempfindlich gegenüber Lichtverhältnissen, unabhängig gegenüber dem lokalen Objektkontrast sein und Belange der Qualitätssicherung erfüllen. Des Weiteren soll es im Innen- und Außenbereich anwendbar sein, was bei der Konzeption des Systems zu beachten ist. Eine Technologie, welche die gestellten Anforderungen erfüllt, ist das terrestrische Laserscanning (TLS)

/Vosselman, Maas 2010/. Nachteilig daran ist jedoch die sequentielle Datenerfassung, die zu zeitlichen Versätzen zwischen gemessenen Punkten und in Folge dessen zu geometrischer Verzerrung bei der Erfassung bewegter Objekte führt. Gelingt es jedoch, die Position und Orientierung des Objektes während des Scanvorgangs zu verfolgen, kann die erfasste Punktwolke geometrisch korrigiert werden, wodurch die eigentliche Form wiederhergestellt werden kann.

Die zuvor beschriebene Problemstellung muss ebenfalls im Mobile Mapping gelöst werden, jedoch wird hier die Position und Ausrichtung einer Multi-Sensor-Plattform relativ zur Umgebung bestimmt. Ein Blick auf ältere und aktuelle Literatur, der im nächsten Abschnitt erfolgt, zeigt, dass der Begriff kinematische Datenerfassung hauptsächlich im Kontext des Mobile Mappings genannt wird. Diese Systeme sind meist als Multi-Sensor-Plattformen realisiert und führen drei Grundfunktionalitäten aus, nämlich die flächenhafte Datenerfassung sowie die Positionierung und Orientierung des Systems. Die erforderliche Frequenz dieser drei Funktionalitäten hängt von den kinematischen Parametern der Relativbewegung ab, also Position und Orientierung eines Objekts im Raum.

Da die im vorliegenden Beitrag untersuchten Problemstellungen eher langsamer und stetiger Natur sind, können die Anforderungen an die drei Grundfunktionen des einzusetzenden Multi-Sensorsystems durch zielverfolgende Tachymeter erfüllt werden. Des Weiteren ist anzumerken, dass die geometrische Gestalt der beobachteten Objekte als stabil angenommen wird, so dass eine Starrkörpertransformation zur Beschreibung der Bewegung verwendet werden kann.

In Abschnitt 2 wird das eingesetzte k-TLS System im Detail vorgestellt, wobei verschiedene Strategien der Objekterfassung diskutiert werden. Die Erfassung einer oszillierenden Bewegung zur Überprüfung der zeitlichen Synchronisation wird in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschnitt 4 befasst sich mit Szenarien aus dem marinen Umfeld und bearbeitet folglich das zu Beginn beschriebene Problem. Zusammenfassende Bemerkungen und zukünftige Problemstellungen werden im letzten Abschnitt diskutiert.

1.2 Verwandte Arbeiten

Einen Überblick über Historie, Komponenten, Prozessschritte und andere wichtige Aspekte zum Thema Mobile Mapping im Allgemeinen gibt /El-Sheimy 2005/. Darüber hinaus können weitere Fälle

definiert werden, die ebenfalls der Erfassung kinematischer Prozesse dienen, wobei in diesem Zusammenhang das Objektkoordinatensystem (OKS), das Sensorkoordinatensystem (SKS) und das Umweltkoordinatensystem (UKS) eingeführt werden:

- Fall 1: OKS, SKS und UKS sind zueinander konstant. Das zu vermessende Objekt verändert jedoch die Objektform in Folge dynamischer Einflüsse während der Messung.
- Fall 2: OKS und UKS sind zueinander konstant, wobei sich das SKS in diesen bewegt (Mobile Mapping).
- Fall 3: SKS und UKS sind zueinander konstant, wobei sich das OKS in diesen bewegt.
- Fall 4: OKS und das SKS verändern sich unabhängig voneinander im UKS.

Da der Fokus dieses Beitrags auf der kinematischen Erfassung von Objekten mit TLS liegt, sollen im Folgenden Publikationen vorgestellt werden, die sich mit dieser Thematik befassen. /Paffenholz *et al.* 2008/ bearbeiten ein Problem, das der Definition von Fall 1 zuzuordnen ist. Dabei gilt es ein sich während der Vermessung verformendes Objekt zu erfassen und daraus Rückschlüsse über dessen Verhalten abzuleiten. /Neitzel *et al.* 2012/ widmen sich einem Szenario desselben Falls, in dem Structural Health Monitoring (SHM) in einer vergleichenden Studie zwischen k-TLS, Beschleunigungsmesser und einem terrestrischen RADAR-System durchgeführt wird.

Die Mehrzahl wissenschaftlicher Untersuchungen konzentrierte sich bisher auf Probleme, die der Definition des zweiten Falls entsprechen. /Mettenleiter *et al.* 2008/ beschreiben verschiedene Möglichkeiten und grundlegende Aspekte der zeitlichen Synchronisierung am Beispiel des in diesem Beitrag eingesetzten TLS. /Vennegeerts *et al.* 2008/ stellen soft- und hardwarebasierte Synchronisationsmöglichkeiten vor und analysieren die jeweiligen Ergebnisse in Bezug auf die geometrische Genauigkeit. /Hesse 2007/ nutzt eine Kombination von TLS, GPS und einem Inclinometer für ein Mobile Mapping System, wodurch ganz auf kostenintensive inertielle Messeinheiten verzichtet werden kann. Einen umfassenden Einblick in das Forschungsfeld k-TLS gewährt /Vennegeerts 2011/. Während die zuvor genannten Systeme terrestrisch eingesetzt wurden, installierten /Kersten *et al.* 2011/ ihr System im Verbund mit hydrographischer Sensorik auf einem Schiff.

Ein laufendes Forschungsvorhaben an der Jade Hochschule in Oldenburg namens „WindScan“ /IAPG 2013/ plant die kombinierte Nutzung aus Photogrammetrie und TLS, um die Belastungen auf Windkrafttrotoren während des Betriebs zu bestimmen. Folglich kann dieses Projekt sowie das in diesem Beitrag beschriebene Verfahren, gemäß der zuvor aufgestellten Definition, der dritten Kategorie zugeordnet werden. Zum derzeitigen Standpunkt sind den Autoren keine Arbeiten zu Problemen bekannt, die der vierten Kategorie entsprechen.

Grundlegende Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Robottachymetern, die in diesem Beitrag zur Bestimmung von kinematischen Parametern genutzt werden, fasst /Hennes 1999/ zusammen. Eine detaillierte Analyse von Robottachymetern, insbesondere im Hinblick auf die Synchronität von Strecken- und Richtungsmessung, stellt /Stempfhuber 2003/ vor. Die Nutzung von GNSS und einem Robottachymeter zur kinematischen Positionierung eines Schiffes präsentieren /Czaja *et al.* 2001/.

2 PRINZIP DES ENTWICKELTEN KINEMATISCHEN TLS

Der vorgestellte k-TLS Ansatz basiert auf der Verbindung zwischen einem oder mehreren Tachymetern (2 Leica TS30 und 1 Leica TCRP 1201) zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade eines Objekts im Raum und einem TLS (Zoller + Fröhlich 5006h), der zur Erfassung der Objektoberfläche dient. Zur Steuerung der Instrumente wurde eine Kontrollsoftware entwickelt, die auf dem Software Development Kit von Z+F sowie der GEOCOM-Schnittstelle von Leica basiert. Eine kurze Beschreibung aller für das k-TLS erforderlichen Schritte ist in der folgenden Prozesskette beschrieben, wobei alle Prozesse später im Detail erläutert werden:

- Transformation aller Instrumentenkoordinatensysteme in ein gemeinsames Koordinatensystem.
- Zeitliche Synchronisation – Überführung in ein gemeinsames Zeitsystem.
- Datenerfassung und Bestimmung der aufgezeichneten Trajektorie.
- Geometrische Korrektur der Punktwolke.

Die zuerst zu lösende Aufgabe ist die Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem, was im Übrigen der einzige Schritt ist, der nicht von der Qualität der zeitlichen Synchronisation abhängt. Zu diesem Zweck werden künstliche Zielmarken /Abmayr et al. 2008/, /Chow et al. 2010/ um das Untersuchungsgebiet verteilt, in der sich das zu vermessende Objekt bewegen wird. Anschließend werden diese koordinatenmäßig von allen genutzten Sensoren erfasst und im Rahmen einer Transformation in ein gewünschtes Koordinatensystem überführt, welches hier durch das Instrumentensystem des TLS beschrieben wird. Zur Lösung des zweiten Prozessschrittes, der zeitlichen Synchronisation aller Sensoren, wird als Referenzsystem die Uhrzeit des Steuercomputers verwendet und kann folglich der Forderung nach der Anwendbarkeit sowohl im Innen- als auch im Außenbereich gerecht werden.

Die sogenannte software-basierte Synchronisation der Tachymeter zur Rechnerzeit erfolgt über einen Uhrenabgleich vor und nach der kinematischen Datenerfassung. Dieser Uhrenabgleich kann auf Grund der unbekanntem Latenz zwischen Tachymeter und Rechner bei der Datenübermittlung nicht genauer als 10 bis 20 ms bestimmt werden. Die Synchronisation der TLS-Daten erfolgt über die Vergabe von Zeitstempeln des Rechners, die bei Ankunft einzelner Datenpakete gesetzt werden. Diese Pakete beinhalten Punkte, die während einer Rotation des Ablenkspiegels um die Kippachse von 360° erfasst wurden. Durch Kenntnis der Umlaufzeit für eine Rotation sowie der Anzahl der dabei erfassten Punkte, kann jedem Punkt ein Zeitstempel zugeordnet werden. Da dieses Verfahren einige Unsicherheiten in sich birgt, wird in Abschnitt 3 ein Verfahren zur Überprüfung der Synchronisation vorgestellt.

Die Datenerfassung selbst kann mit dem eingesetzten Instrument auf verschiedene Weise erfolgen, wie /Vennegeerts 2011, S. 19/ aufzeigt. Zum einen kann eine Abtastung durch Rotation des Scanners um Dreh- und Kippachse erfolgen, wie es standardmäßig bei TLS erfolgt (3D-Modus). Zum anderen kann die Abtastung des Objektraums auch durch Rotation um die Kippachse erfolgen (2D-Modus), so dass ein einzelnes Profil wiederholt gemessen wird. Zur Erfassung der Trajektorie wird die Trackingfunktionalität der Leica

Tachymeter in Verbindung mit 360°-Prismen verwendet. Anzumerken ist, dass zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade des Objektes während der Bewegung zahlreiche andere Methoden zur Verfügung stehen, die jedoch nicht Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen waren.

3 ÜBERPRÜFUNG UND KALIBRIERUNG DER ZEITSYNCHRONISATION

Ein einfacher kinematischer Fall kann durch ein Objekt beschrieben werden, das um eine Achse oszilliert. Zur Umsetzung dieses Aufbaus wurde ein ebenes Brett mit einer Achse versehen. Mit dieser wurde das Brett anschließend mit Hilfe von Buchsen mit einem Regalrahmen verbunden. Um eine oszillierende Bewegung anzuregen, wurde am Brett eine Pendelstange angebracht, die wiederum von einem regelbaren Elektromotor angetrieben wird. An der Unterseite des Brettes wurde ein Prisma befestigt, so dass die oszillierende Bewegung simultan durch ein zielverfolgendes Tachymeter und den eingesetzten TLS erfasst werden konnte. Eine schematische Darstellung des Aufbaus zeigt *Abb. 1*.

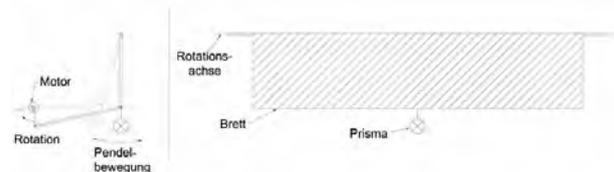


Abb. 1 | Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)

Wie im linken Teil von *Abb. 2* ersichtlich ist, bewirkt die oszillierende Bewegung des Brettes in der erfassten Punktwolke eine wellenförmige Verformung des Objekts. Interessanterweise lassen sich Veränderungen der Intensitätswerte im Bild erkennen, die durch veränderte Auftreffwinkel hervorgerufen werden. Durch Nutzung der simultanen Messung kann nun eine geometrische Korrektur der Verformung erfolgen, dessen Ergebnis im rechten Teil des Bildes zu sehen ist. Dazu muss zunächst ein Objektkoordinatensystem definiert werden, dessen Ursprung im linken, äußeren Ende der Rotationsachse des Brettes liegt. Die y -Achse verläuft durch die Rotationsachse, die x -Achse ergibt sich aus dem Kreuzprodukt vom Ortsvektor zum Prisma und einem beliebigen Ortsvektor auf der y -Achse. Die z -Achse steht senkrecht auf x - und y -Achse.

Durch Bewegung des zu erfassenden Objekts ändert sich die Orientierung des OKS im SKS, im vorliegenden Fall erfolgt eine Rotation um die y -Achse des OKS. Für jeden tachymetrisch bestimmten Punkt ist es nun möglich, die zum jeweiligen Zeitpunkt vorliegende Orientierung des Brettes zu bestimmen. Da die zeitliche Auflösung der TLS-Messungen deutlich höher ist als die des Tachymeters und zudem nicht zeitgleich gemessen wurde, erfolgt eine lineare Interpolation der Orientierung des Objektkoordinatensystems für alle TLS-Punkte. Dazu werden für jeden TLS-Punkt die beiden zeitlich benachbarten Tachymeterpunkte ermittelt, wobei anschließend die Orientierung des Brettes zu diesen beiden Zeitpunkten bestimmt wird. Um eine Orientierung des Brettes für den entsprechenden TLS-Punkt zu ermitteln, erfolgt nun eine Interpolation dieser basierend auf den Zeitpunkten der Messungen. Zur geometrischen Korrektur

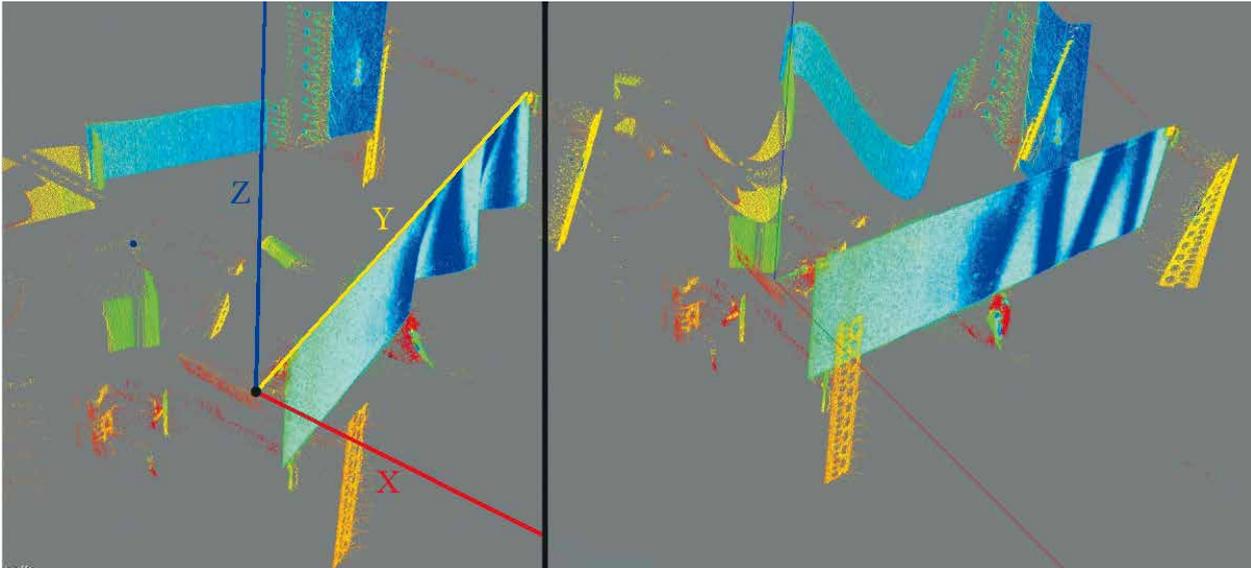


Abb. 2 | Objektkoordinatensystem und nach Intensitäten farbcodierte Punktvolke vor (links) und nach der geometrischen Korrektur (rechts)

wird das Koordinatensystem des TLS in das Objektkoordinatensystem transformiert. Da diese Korrektur auf alle erfassten Punkte angewendet wird, erscheinen unbewegte Bereiche verzerrt, was im rechten Teil von *Abb. 2* ersichtlich ist.

Die Motivation zur Umsetzung des vorgestellten Versuchsaufbaus kann durch die Möglichkeit zur Überprüfung der ermittelten software-basierten Synchronisierung begründet werden. Dazu entnimmt man aus dem TLS-Datensatz alle Punkte, die sich zwischen zwei konzentrisch um die Rotationsachse (grüner Zylinder in *Abb. 3*) angeordneten Zylindern (halbtransparent in rot und blau) befinden. Die durch die Bewegung hervorgerufene scheinbare Verformung des Brettes ist in hellgrau dargestellt, während die pinkfarbene Oberfläche den Bereich kennzeichnet, in dem Punkte für die weitere Verarbeitung selektiert werden.

Diese werden dann in Abhängigkeit zur Systemzeit (Rechtswerte) in ein zweidimensionales Koordinatensystem eingetragen, wobei die Hochwerte die entsprechende Auslenkung des Brettes in Grad bezogen auf die Nulllage (Prisma steht lotrecht unter der y -Achse) des Objektkoordinatensystems beschreiben. Dadurch zeichnet sich eine genähert sinusförmige Schwingung ab, zu welcher anschließend die Messungen aus dem Tachymeter in gleicher Weise hinzugefügt wer-

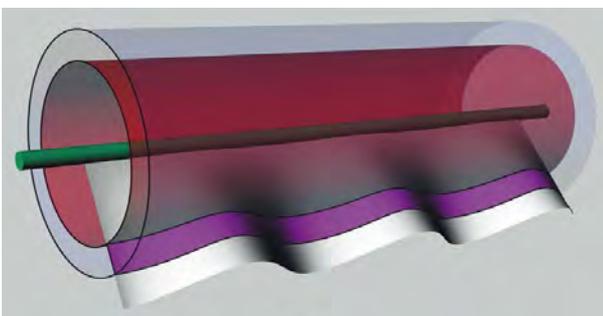


Abb. 3 | Rotationsachse (grüner Zylinder), „verformtes“ Brett (hellgraue Oberfläche) und Zylinderhüllen (halbtransparent in rot und blau) für die Auswahl an Punkten (pinkfarbene Oberfläche)

den. Diese Punkte werden nun im Rahmen einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit dem funktionalen Modell einer harmonischen Schwingung ausgeglichen, wobei die jeweiligen Auslenkungen des Brettes als Beobachtungen eingehen und die Systemzeit als fehlerfrei angesehen wird. Als Ergebnis liegen die Formparameter der beiden Schwingungen vor, wobei der Zeitversatz der Datensätze möglichst klein sein sollte, da diese die Güte der ermittelten Synchronisation beschreibt.

Abb. 4 illustriert die gemessenen (Totalstation: Kreuze; TLS: Punkte) und ausgeglichenen Ergebnisse (Totalstation: durchgezogene Linie; TLS: gestrichelte Linie) einer Periode.

Bei genauer Betrachtung der Abbildung wird ersichtlich, dass die Wendepunkte der Schwingungen leicht versetzt sind, was auf Abweichungen der beiden Zeitsysteme zueinander schließen lässt. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Hochwerte der beiden Kurven leicht versetzt sind, was darauf zurückzuführen ist, dass das Prismenzentrum nicht in der Ebene des Brettes liegt. Die Kenntnis der Phasenverschiebung kann nach Umrechnung in einen Zeitversatz auf die Synchronisierung angewendet werden, so dass eine geometrisch leicht verbesserte Punktvolke die Folge ist. Für den vorliegenden

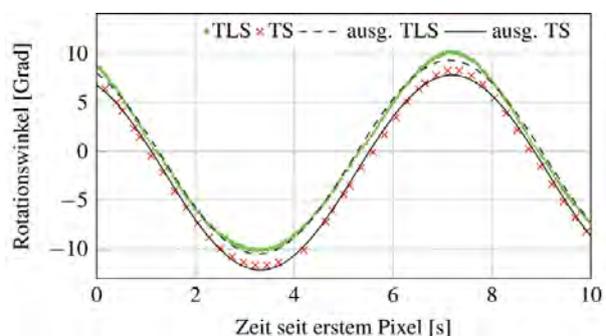


Abb. 4 | Durch TLS erfasste Oszillation (grüne Punkte) und tachymetrisch erfasste Prismenspur (rote Kreuze). Ausgeglichenen Ergebnisse sind durch die gestrichelte Linie (TLS) und eine durchgezogene Linie (Total Station – TS) gekennzeichnet

Datensatz beträgt der Zeitversatz 53 ms, welcher schließlich zu korrigierten Zeitstempeln führt.

Um die Qualität der geometrischen Korrektur und den Einfluss der Synchronisation auf diese zu untersuchen, wurden für die Datensätze ausgleichende Ebenen bestimmt. Dies erfolgte zum einen auf Grundlage eines statischen Scans und zum anderen an Hand der kinematisch erfassten Daten. *Tab. 1* fasst die erzielten Ergebnisse zusammen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Oszillation des Brettes und die daraus folgende geometrische Verfälschung große mittlere Residuen zur ausgeglichenen Ebene hervorrufen. Diese wurden unter Beachtung der Vorzeichen berechnet, welche sich durch Bestimmung der jeweiligen Flächennormalen ergeben. Nach Anwendung der einfachen softwaremäßigen Synchronisation kann die Qualität deutlich verbessert werden, wobei die Residuen im Mittel immer noch etwa doppelt so groß sind, wie die der statisch gemessenen Referenz. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die eigentlichen Messzeitpunkte beider Sensoren noch nicht ausreichend synchron sind. Nach Kalibrierung der Zeitsysteme und deren Anwendung kann die ursprüngliche Geometrie nahezu wiederhergestellt werden. Folglich können die erzielten Ergebnisse positiv bewertet werden, wobei keine zu optimistische Erwartungshaltung für die folgenden Fälle eingenommen werden sollte, da dort sechs statt einem Freiheitsgrad zu bestimmen sind.

	Mittlere Residuen zur Ebene [mm]	Maximales Residuum (Absolutbetrag) [mm]
Statisch erfasster Datensatz	+0,40 / -0,44	2,15 mm
Unkorrigierter Datensatz	+11,17 / -18,42	64,86 mm
Korrigierter Datensatz (Softwaresynchronisierung)	+0,92 / -0,76	4,15 mm
Korrigierter Datensatz (zeitliche Kalibrierung)	+0,45 / -0,55	2,21 mm

Tab. 1 | Abweichungen der erfassten Punktwolke zu einer ausgeglichenen Ebene

4 ANWENDUNG VON K-TLS IM MARINEN UMFELD

Nach der Einführung von k-TLS an einem einfachen Beispiel sollen in diesem Abschnitt zwei Szenarien vorgestellt werden, in denen sowohl die räumliche Position als auch die Orientierung eines Objekts während der Bewegung bestimmt werden müssen. Dazu kommen zwei zusätzliche Tachymeter (Leica TS 30, Leica TCRP 1201) zum Einsatz, die zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade während der Bewegung eines Schiffsmodells sowie eines Schiffs notwendig sind.

4.1 Erfassung eines Schiffsmodells

Als erstes Untersuchungsobjekt diente ein etwa 2,5 m langes Schiffsmodell, das statisch außerhalb eines Versuchsbeckens sowie in Bewegung im Wasser gescannt wurde. Folglich dient der erste Datensatz als Referenz. Zur Transformation der einzelnen Instrumentenkoordinatensysteme in ein gemeinsames Koordinatensystem



Abb. 5 | Modellschiff mit montierten Prismen (Kreise) und Zielmarken (gestrichelte Rechtecke) zur Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem

wurden fünf Zielmarken um das Becken herum verteilt, in dem das Modell bewegt wurde. Anschließend wurden alle Zielmarkenzentren von allen vier eingesetzten Instrumenten koordinatenmäßig bestimmt, wobei die mittleren räumlichen Restklaffen nach der Ausgleichung 0,66 mm betragen. Zur Bestimmung des zur geometrischen Korrektur erforderlichen Objektkoordinatensystems sowie der sechs Freiheitsgrade während der Bewegung wurden drei Prismen auf dem Modell angebracht. Da die Wasserlinie des eingesetzten Modells lediglich 10 cm unter der Oberkante lag, wurden drei 11 bis 16 cm hohe Modellcontainer auf dem Deck befestigt. *Abb. 5* zeigt das verwendete Modell, die zur Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem notwendigen Zielmarken (gestrichelte Rechtecke) sowie den Prismen (Kreise) zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade.

Der Ursprung des Objektkoordinatensystems liegt im Zentrum des linken Prismas, die y -Achse wird durch den Vektor zwischen Ursprung und rechtem Prisma beschrieben, wobei die z -Achse senkrecht auf der Ebene steht, die aus den drei Prismenzentren aufgespannt wird. Die Datenerfassung erfolgte in diesem Fall im 3D-Modus des TLS, wobei das Modell währenddessen Roll- und Gierbewegungen unterzogen wurde. *Abb. 6* zeigt im oberen Teil die gemessene Punktwolke, im unteren Teil ist das Ergebnis nach der geometrischen Korrektur abgebildet. Da durch die statisch erfasste Punktwolke eine geometrische Referenz vorliegt, wurde die korrigierte Punktwolke in dessen Koordinatensystem mit Hilfe des Iterative-Closest-Point Algorithmus (ICP) /Besl, McKay 1992/, /Chen, Medioni 1991/ trans-

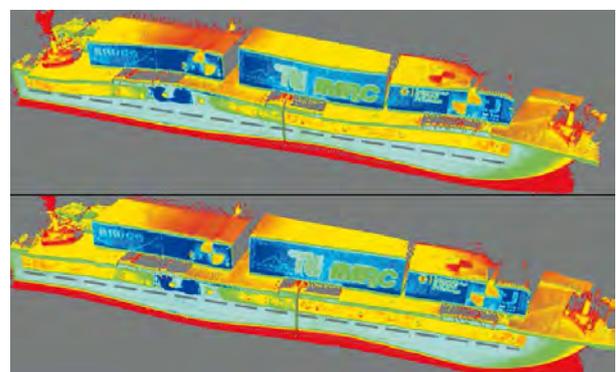


Abb. 6 | Punktwolke des Modells vor (oben) und nach der geometrischen Korrektur (unten)

formiert, um einen geometrischen Vergleich zwischen den Datensätzen durchführen zu können.

Anzumerken ist, dass die ermittelten Transformationsparameter Einfluss auf den angestrebten Vergleich nehmen, da diese durch Deformationen oder Ausreißer im Allgemeinen verfälscht werden, wie in /Wujanz 2012/ gezeigt wurde. Die Qualität der Korrektur kann insgesamt als hoch angesehen werden, wobei eine mittlere Abweichung der Residuen zur Referenz von 2,6 mm resultierte. Eine farbcodierte Darstellung dieser Abweichungen zeigt *Abb. 7*. Durch Wellen beeinflusste Bereiche, hier in grau dargestellt, wurden vom Vergleich ausgeschlossen. Auf Grund einer Leckage im hinteren Teil des Schiffs musste der linke Modellcontainer entfernt werden, weshalb dieser in der folgenden Abbildung nicht berücksichtigt wurde.

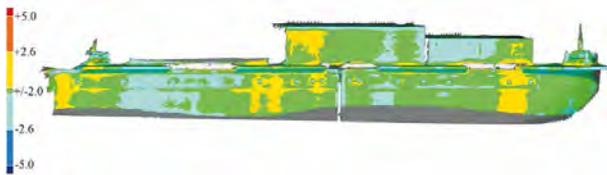


Abb. 7 | Farbcodierte Darstellung der Abweichungen [mm] zwischen Referenz und geometrisch korrigiertem Datensatz

4.2 Erfassung eines Schiffes

Die Erfassung eines 12 m langen Schiffes namens „Biene“ fand in einem ruhigen Seitenkanal des Tegeler Sees in Berlin Spandau am Aalemannufer statt. Da der Kanal auf Grund von andauernd niedrigen Temperaturen zugefroren war, konnte statt der Erfassung einer Durchfahrt lediglich eine Bewegung auf einem kleinen eisfreien Areal erfolgen, wozu das Schiff losgemacht und innerhalb der beschriebenen Fläche bewegt wurde. Um sichtbare Effekte neben der Bewegung auf dem ruhigen Wasser zu erzielen, wurde es durch einen Mitarbeiter verschoben sowie ein Gieren des Schiffes angeregt.

Vor Beginn der Messungen wurden drei Prismen auf dem Boot angebracht, die mit Magneten befestigt und durch Spanngurte gegen Bewegung gesichert wurden. *Abb. 8* zeigt im linken Teil das mit Prismen versehene Schiff, während im rechten Teil die eingesetzten Sensoren sowie die „Biene“ im Hintergrund am anderen Ufer zu sehen sind. Zur Transformation der Instrumentenkoordinatensysteme in ein gemeinsames Koordinatensystem wurden fünf Zielmarken im Untersuchungsgebiet verteilt. Drei davon wurden auf Stativen am schiffsnahen Ufer platziert, wogegen die beiden anderen Marken mit Magnetfüßen an einem Bootskran am gegenüberliegenden Ufer befestigt wurden.

Nach Berechnung der Transformationsparameter betragen die mittleren räumlichen Restklaffen 1,78 mm. Die Synchronisation erfolgte ohne Anbringung einer zeitlichen Kalibrierung, da noch nicht ausreichend geklärt ist, wie stabil die Zeitsysteme untereinander sind. Auf Grund des stillen Wassers, das keine Wellen aufwies, erfolgte zunächst die Erfassung einer Referenzmessung mit statischem TLS. Die Messung wurde, wie auch die kinematische Folgemessung, im 3D-Modus des TLS durchgeführt und dauerte etwa 20 Sekunden, wobei keine Bewegungen des Schiffes erkennbar waren. Anschließend wurde die kinematische Erfassung ausgeführt,



Abb. 8 | Das mit Prismen bestückte Schiff (links) sowie die Messinstrumente (rechts)

welche etwa 30 Sekunden in Anspruch nahm. *Abb. 9* zeigt die vermaschte, jedoch noch nicht geometrisch korrigierte Punktwolke aus der kinematischen Erfassung. Im unteren Teil der Bootshülle sind durch Wellen hervorgerufene Effekte zu sehen, die von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen wurden.

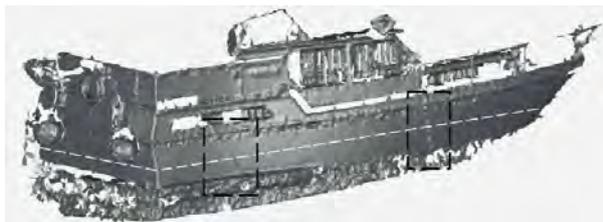


Abb. 9 | Unkorrigierte vermaschte Punktwolke der „Biene“

Die durch die schwarzen Kästen markierten länglichen Artefakte auf der Schiffshaut stellen Schläuche dar, welche die nähere Umgebung des Schiffes durch Einblasen von Luft eisfrei halten. Um die durch die Bewegung hervorgerufene „Verformung“ zu veranschaulichen, wurde eine Schnittebene durch das Modell gelegt, die in *Abb. 9* als grau gestrichelte Linie dargestellt ist. Die Resultate aus dieser Verschneidung sind in *Abb. 10* zu finden. Rechts oberhalb der gestrichelten Linie sind die kinematisch erfassten Rohdaten (schwarze Linien) im Vergleich zur Referenz (grüne Linien) dargestellt. Auf-

fällig dabei ist die wellenförmige Charakteristik der Rohdaten, die durch die Gierbewegung des Schiffes hervorgerufen wurde. Links unterhalb der gestrichelten Linie ist der geometrisch korrigierte Datensatz abgebildet. Besonders im vorderen Teil des Schnittes sind einige Unstetigkeiten zu erkennen, die vermutlich durch Ausreißer in den zielverfolgenden Tachymetermessungen hervorgerufen wurden. Führt man einen flächenhaften Vergleich der gesamten Datensätze zur Referenz durch, so betragen die Beträge der Residuen im Mittel vor der Prozessierung 13,5 cm, wie in *Abb. 11* links dargestellt. Nach der Prozessierung der Punktwolke, im rechten Teil derselben Abbildung zu sehen, reduziert sich das Mittel der Residuen auf 2,6 cm, womit das Ergebnis ebenfalls positiv bewertet werden kann.

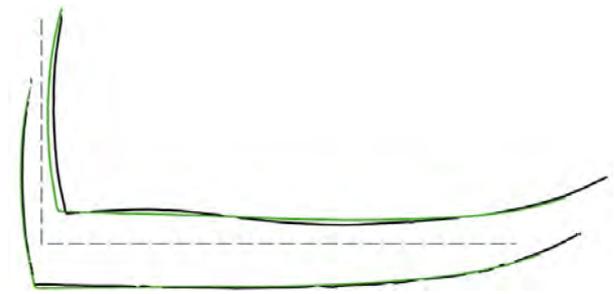


Abb. 10 | Unkorrigierter Datensatz vs. Referenz (oben rechts) und korrigierter Datensatz vs. Referenz (unten links)

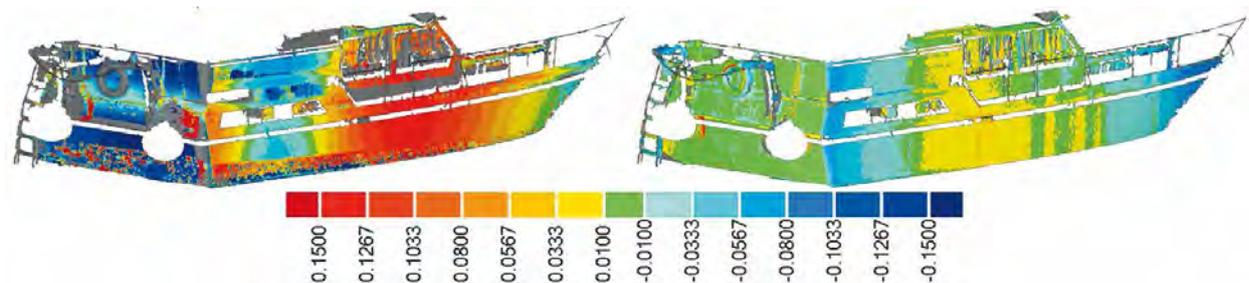


Abb. 11 | Farbcodierte Inspection Map [m] der Referenzdaten vs. der kinematisch erfassten Daten (links) und des korrigierten Resultats vs. der Referenzdaten

Eine Verbesserung des Ergebnisses kann durch verschiedene Maßnahmen bewirkt werden. So kann die Aufnahmegeometrie insbesondere im Hinblick auf den eingesetzten TLS in zukünftigen Kampagnen optimiert werden. Im vorliegenden Fall kann diese mit einer Zielweite von etwa 45 m und einem mittleren Auftreffwinkel von 45° als ungünstig bezeichnet werden, welche jedoch auf Grund der Eisbedeckung des Kanals nicht verändert werden konnte. Weiteres Optimierungspotenzial liegt in der Bestimmung der kinematischen Parameter, die durch drei zielverfolgende Tachymeter erfasst wurden und in Folge dessen auch einen dreifachen Einfluss auf das Ergebnis ausüben. Den größten Einfluss auf das Ergebnis haben jedoch der möglicherweise vorliegende zeitliche Versatz und die relative Drift zwischen beiden Zeitskalen. Bei zukünftigen Messungen soll zur Bestimmung der kinematischen Parameter ein terrestrisches stereophotogrammetrisches Aufnahmesystem eingesetzt werden, wodurch der bislang beträchtliche instrumentale Aufwand verringert werden kann. Dies soll die Verbreitung des Verfahrens in praktischen Anwendungen erleichtern.

5 SCHLUSSBETRACHTUNG

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Verfahren zur Erfassung kinematischer Prozesse vorgestellt, in dem die Erfassung eines Objekts mittels TLS und deren Ausrichtung und Positionierung während der

Bewegung mit zielverfolgenden Tachymetern erfolgte. Neben der Durchführung einer softwarebasierten Synchronisation wurde ein geometrisch motiviertes Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung dieser vorgestellt, durch welche geometrisch verbesserte Ergebnisse erzielt werden konnten. Das vorgestellte Verfahren wurde an zwei kinematischen Szenarien zur Erfassung von Schiffen angewendet, wobei die Ergebnisse als vielversprechend zu werten sind.

Der Schwachpunkt des implementierten Systems ist derzeit noch die Verwendung von Tachymetern, die auf Grund ihrer vergleichsweise niedrigen zeitlichen Auflösung nur für stetige Bewegungsmuster geeignet sind und das Anbringen von Prismen auf dem zu erfassenden Objekt voraussetzen. Die vorgestellten Ergebnisse wurden auf Grundlage von nicht prozessierten Tachymeterdaten abgeleitet, so dass geometrisch genauere Resultate durch Prozessierung der Prismentrajektorien, beispielsweise durch Kalman-Filterung, zu erwarten sind. Ebenso wurde die Annahme getroffen, dass sich die Schiffe wegen Ihrer verhältnismäßig kleinen Größe wie Starrkörper verhalten. Da dies insbesondere bei großen Frachtschiffen keine Gültigkeit besitzt, müssen andere Wege zur Bestimmung der benötigten kinematischen Parameter gefunden werden. In diesem Zusammenhang können neue Fragestellungen bearbeitet werden, z.B. wie verformt sich ein Schiff nach der Beladung oder während der Fahrt durch raue Gewässer? Zur Umsetzung des zuletzt genannten Szenarios bedarf es der Entwicklung eines Verfahrens, welches dem vierten Fall in Abschnitt 1.2 gerecht wird.

LITERATUR

- Abmayr, T.; Härtl, F.; Hirzinger, G.; Burschka, D.; Fröhlich, C. (2008): A correlation based target finder for terrestrial laser scanning. *Journal of applied Geodesy, de Gruyter* 2(3), S. 31-38.
- Besl, P.; McKay, N. (1992): A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (1992), 239-254.
- Chen, Y.; Medioni, G. (1991): Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. *Proceedings of the Intl. Conf. on Robotics and Automation*, 2724-2729, Sacramento, USA.
- Chow, J.; Ebeling, A.; Teskey, W. (2010): Low Cost Artificial Planar Target Measurement Techniques for Terrestrial Laser Scanning. *FIG Kongress 2010: Facing the Challenges – Building the Capacity*. Sydney, Australien.
- Czaja, J.; Neuhierl, T.; Stempfhuber, W. (2001): Hybrides Messsystem zur kinematischen Positionierung von Schiffen. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (avn)* 108(2001)11-12, 374-380.
- El-Sheimy, N. (2005): An Overview of Mobile Mapping Systems. *FIG Working Week 2005*. Kairo, Ägypten.
- Hennes, M. (1999): Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (avn)* 106(1999)11-12, 374-380.
- Hesse, C. (2007): Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. *Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Heft Nr. 608*.
- IAPG (2013): WindScan – Messung und Modellierung des aeroelastischen Verhaltens von horizontalen Windkraftrotoren im laufenden Betrieb durch Laserscanning und Photogrammetrie. <http://iapg.jade-hs.de/projekte/Wind-Scan/> (Zugriff am 20.02.2013)
- Kersten, Th.; Böder, V.; Thies, Th. (2011): Integration eines terrestrischen Laserscanners in ein hydrographisches Multi-Sensor-System für die kinematische Datenerfassung über und unter Wasser. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)* 118(2011)10, 330-335.
- Mettenleiter, M.; Oberteiber, N.; Härtl, F.; Ehm, M.; Baur, J.; Fröhlich, C. (2008): 3D laser scanner as part of kinematic measurement system. *1st International Conference on Machine Control & Guidance*. Zürich, Schweiz.
- Neitzel, F.; Niemeier, W.; Weisbrich, S.; Lehmann, M. (2012): GBSAR, TLS und Beschleunigungsmessungen für Schwingungsuntersuchungen. In: *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2012, Beiträge zum 115. DVW-Seminar am 25. und 26. September 2012 in Weimar*. DVW-Schriftenreihe Band 68/2012, 121-148.
- Paffenholz, J.-A.; Vennegeerts, H.; Kutterer, H. (2008): High Frequency Terrestrial Laser Scans for Monitoring kinematic Processes. *4th International Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, Slowakei.
- Snively, N.; Seitz, S. M.; Szeliski, R. (2006): Photo tourism: Exploring photo collections in 3d. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3), 137-154.
- Stempfhuber, W. (2003): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. *Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Heft Nr. 576*.
- Vennegeerts, H.; Martin, J.; Becker, M.; Kutterer, H. (2008): Validation of a kinematic laserscanning system. *Journal of Applied Geodesy*, 2/2008, 79-84.

Vennegeerts, H. (2011): Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme. *Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Heft Nr. 657*.

Vosselman, G.; Maas, H.-G. (2010): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Caithes, England.

Wujanz, D. (2012): Towards transparent quality measures in surface based registration processes: Effects of deformation onto commercial and scientific implementations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012 XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australien.

Wujanz, D.; Weisbrich, S.; Neitzel, F.; Gaitanis, C.; Motmaen Arani, R.; Krueger, D.; Petrovic, S. (2013): Fusion of point clouds from TLS and MVS for the generation of a 3D ship model. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)* 120(2013)3, 83-89.

M. Sc. Daniel Wujanz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATIONSTECHNIK

Straße des 17. Juni 135 | 10623 Berlin
daniel.wujanz@tu-berlin.de

**Dipl.-Ing. Stefan Röckelein**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATIONSTECHNIK

Straße des 17. Juni 135 | 10623 Berlin
sroeckelein@gmail.com

**Prof. Dr.-Ing. Frank Neitzel**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATIONSTECHNIK

Straße des 17. Juni 135 | 10623 Berlin
frank.neitzel@tu-berlin.de

**Dr.-Ing. Christoph Fröhlich**

ZOLLER & FRÖHLICH GMBH

Simoniusstrasse 22 | 88239 Wangen im Allgäu
info@zofre.de



Manuskript eingereicht: 25.04.2013 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet