

Harald Vennegeerts,
Eva Richter, Jens-André
Paffenholz, Hansjörg Kutterer
und Maria Hennes

Genauigkeitsuntersuchungen zum kinematischen Einsatz terrestrischer Laserscanner

AVN

ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.

Tag der Einreichung: 02. Dezember 2009

1 Motivation und Zielsetzung

Das terrestrische Laserscanning (TLS) bietet aufgrund der hohen Abstraten der Laserentfernungsmessung vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Zum Zweck der Dokumentation ist oft ein räumlich hochaufgelöstes, dreidimensionales Modell erforderlich. Die Beobachtungsrichtung variiert daher mit langsamer Geschwindigkeit. Im klassischen Fall rotiert die Beobachtungsrichtung um zwei Achsen und um ein festes (statisches) Rotationszentrum: Es entsteht unmittelbar eine dreidimensionale Punktwolke. Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit terrestrischer Laserscanner für die statische Aufnahme nicht-bewegter Objekte finden sich in RESHETYUK [2009], RIETDORF [2004], SCHULZ [2007]. Darüber hinaus untersucht SCHULZ [2007] ebenfalls einzelne Eigenschaften eines Scanners wie die Rotationsgeschwindigkeit der vertikalen Umlenkeinheit.

Für das hier betrachtete kinematische Laserscanning (k-TLS) ist die Erfassung bewegter Zustände und deren zeitabhängige Beschreibung charakteristisch. Prinzipiell können die Varianten (i) bewegter Scanner und ortsfeste Umgebung und (ii) ortsfester Scanner und bewegte Umgebung unterschieden werden. Im vorliegenden Beitrag wird der zweite Fall zugrunde gelegt. Insgesamt können beim k-TLS drei verschiedene Messmodi eines Scanners eingesetzt werden, die sich hinsichtlich ihrer Dimension und ihrer Wiederholbarkeit unterscheiden (KUTTERER ET AL., 2009). Beim 3D-Modus – dem klassischen Fall der statischen Aufnahme – variiert die Beobachtungsrichtung um zwei Rotationsachsen, wodurch eine Umgebung dreidimensional abgetastet wird. Wird die Rotation um die Stehachse ausgeschaltet, rotiert also die Umlenkeinheit nur um eine Achse (2D-Modus), so entstehen 2D-Profile mit der Wiederholfrequenz der Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels. Dieser Erfassungsmodus wird hier näher untersucht. Prinzipiell besteht darüber hinaus noch die Möglichkeit, die Beobachtungsrichtung

konstant zu halten (sog. 1D-Modus) und ausschließlich Distanzänderungen zu messen. KUTTERER ET AL. [2009] geben dazu ein Anwendungsbeispiel.

Durch die hohen Wiederholungsraten des 2D-Profilmodus können schnelle Bewegungen von Objekten verfolgt werden. Das Verfahren wird damit zumindest für kurzzeitige Überwachungsmessungen anwendbar. Die Zustände der schnellen Bewegungen werden dabei nur durch sehr wenige bzw. einzelne gescannte Punkte repräsentiert. Für Überwachungsaufgaben ist es relevant, wie gut sich unter diesen Umständen ein Objektverhalten rekonstruieren lässt. Ein solches Verhalten wird im folgenden Beitrag kontrolliert hergestellt. Auf der Messbahn des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe wird dazu ein bewegtes Zielobjekt im 2D-Modus eines terrestrischen Scanners verfolgt. Die Objektposition wird für diese Untersuchungen mit einem Lasertracker referenziert. Die aus dem Scan ermittelte Entfernung soll anschließend mit der Referenzdistanz verglichen werden. Ein wesentlicher Unterschied zwischen statischen und kinematischen Scans ist, dass Zustände bewegter Objekte – sofern nur ein Scanner zum Einsatz kommt – aufgrund der sequentiellen Aufnahme nicht redundant erfasst werden. Empirische Unsicherheiten können daher nur unter Annahmen zum Objektverhalten angegeben werden. Diese Annahmen können hier als gegeben vorausgesetzt werden, weil das Bewegungsverhalten des Scanzieles bekannt ist. Sie sollen verwendet werden, um auch Unsicherheiten empirisch abzuschätzen.

Der vorliegende Beitrag stellt im Abschnitt 2 kurz die Messbahn und die Prüfanordnung vor. Um die Ergebnisse des scannenden und referenzierenden Systems mitein-

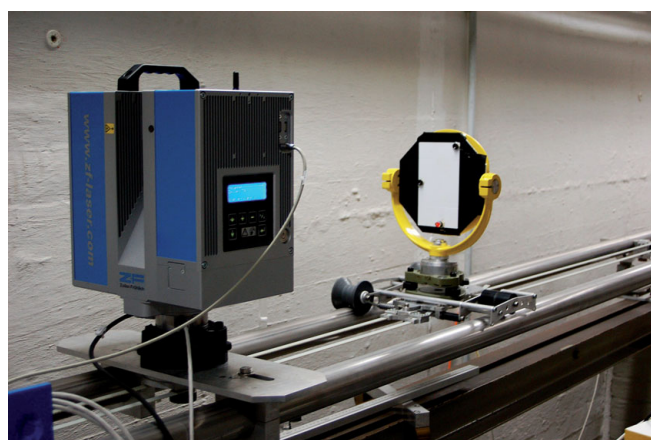


Abb. 1: Scanner und Target mit Halterung des Prismas für die Referenzmessung

ander vergleichen zu können, sind beide Systeme in ein gemeinsames räumliches und zeitliches System zu transformieren. Diese Transformationen werden im Abschnitt 3 näher erläutert. Anhand einer Reihe von Testfahrten wird anschließend die Nutzbarkeit des Scanners zur kinematischen Erfassung ersichtlich. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion und einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse.

2 Untersuchungskonzept

Die Linearmessbahn PHIL (Precise High speed Linear track) des Geodätischen Instituts Karlsruhe (GIK) wurde bereits bei der Konstruktion für die Überprüfung kinematischer Parameter von Instrumenten ausgelegt und wird hier zur kinematischen Untersuchung der Distanzmessung eines terrestrischen Scanners eingesetzt. Das zu überprüfende Instrument wird am Kopfende der Bahn montiert (siehe Abb. 1). Ein beweglicher, automatisch steuerbarer Wagen trägt Reflektoren, Scannertargets oder andere Aufbauten von bis zu max. 3 kg. Er wird mittels zweier parallel geführter Zahnriemen positioniert, die über einen Motor am Bahnende angetrieben werden. Die Wiederholgenauigkeit der Wagenpositionierung beträgt über die gesamte Bahnlänge von 22,5 m insgesamt $10 \mu\text{m}$ (HENNES, 2006). Sind die absoluten Positionen des Wagens aus der Ansteuerung bekannt, kann die Trajektorie daher mit entsprechender Wiederholgenauigkeit auch ohne den Einsatz eines Interferometers gefahren werden.

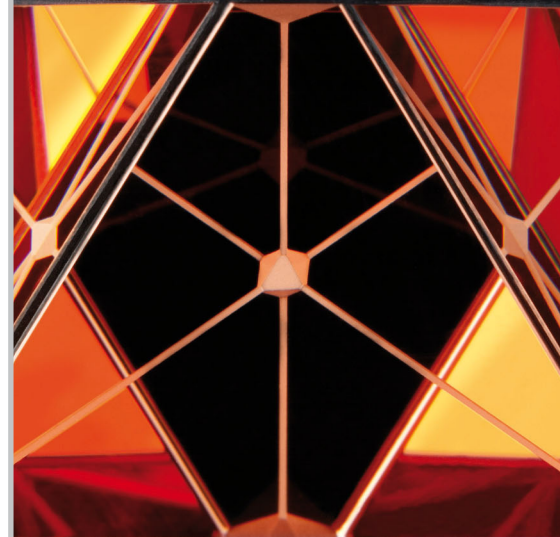
Charakteristisch für die Bewegung des Wagens sind die kleinste positionierbare Schrittweite von $18 \mu\text{m}$, eine maximale Beschleunigung von bis zu 12 m/s^2 und eine Maximalgeschwindigkeit von 9 m/s , die über eine Nutzlänge von 17 m konstant gehalten werden kann. Diese Rahmendaten prädestinieren die Messbahn für Untersuchungen zum kinematischen Laserscanning, da Objektbewegungen kontrolliert nachgebildet werden können. Darüber hinaus kann die Bahn im Stop&Go-Modus genutzt werden, um etwa Additionskonstanten und zyklische Phasenfehler in einer automatisierten Messkonfiguration zu bestimmen.

Zur Verifizierung der mit dem Scanner gemessenen Distanzen wird die Targetposition entlang der Bahn mit einem Lasertracker eingemessen, welcher das räumliche und zeitliche Referenzsystem vorgibt. Am Scannertarget ist dazu zusätzlich ein Break Resistant Reflector (BRR) mit $0.5''$ Durchmesser befestigt, der mit dem Lasertracker verfolgt wird. Die maximal mit dem Lasertracker erfassbare Objektgeschwindigkeit beträgt 4 m/s (quer zum Strahl) bzw. 6 m/s (in Strahlrichtung) PRITH [2003]. Diese Geschwindigkeiten wurden bei den Versuchen nicht überschritten.

Für den betrachteten Genauigkeitsbereich von unter 1 mm und Objektgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s sind referenzierender und scannender Sensor entsprechend zu synchronisieren. DEPENTHAL und BARTH [2007] zeigen, dass bei einer Triggerung der Trackermessungen, ausgelöst durch Impulse des Winkelencoders eines Dreharms, eine Wertzuordnung innerhalb $1 \mu\text{sec}$ sichergestellt ist. Es ist nicht davon auszugehen, dass bei einer geänderten Gerätekombination der selbe geringe Wert gilt. Nimmt man jedoch von vorneherein eine Zeitverzögerung von bis zu $10 \mu\text{sec}$ zwischen Nadirdurchgang des Scanners und Messwertregistrierung des Trackers für ein mit 1 m/s bewegtes Target in Kauf, hat sich das Target innerhalb dieser Latenzzeit nur um 0.01 mm bewegt. In Voruntersuchungen konnte zudem bei Messungen auf ein bewegtes Target kein Zusammenhang zwischen Targetgeschwindigkeit und Differenz zwischen Referenz- und Scannerstrecke festgestellt werden. Dies unterstreicht die Vermutung, dass der Einfluss der Latenzzeit hier neben den anderen Fehlereinflüssen deutlich zurückbleibt und berechtigt zur Annahme einer ausreichenden Synchronisierungsqualität.

Die Synchronisation zwischen Scanner und Tracker erfolgt durch Nutzung des TTL (Transistor-Transistor-Logik)-Triggers des Scanners für den Steuerungsserver des Lasertrackers. Wird ein 2D- oder 3D-Scan gestartet, erzeugt der Scanner, nachdem der Vertikalmotor auf seine Sollzahl hochgefahren

Einzigartige Präzision



Leica Prismen garantieren höchste Ziel- und Streckenmessgenauigkeit. Die optisch-mechanische Fertigung der Präzisionsprismen mit **0,3mm Zentriergenauigkeit** liefert höchste Koordinatengenauigkeit.

www.leica-geosystems.de

when it has to be right

Leica
Geosystems

ist, bei jedem Nadirdurchgang des Vertikalspiegels einen TTL-Puls. Zu jedem Puls wird vom Tracker eine 3D-Position des BRR erzeugt, welche zusammen mit dem dazugehörigen Zeitstempel aus dem Tracker abgespeichert wird. Zusätzlich kann mit einem externen Frequenzzähler die Drehfrequenz und damit die Drift des Scanners überwacht werden. Die zeitliche Zuordnung zwischen jedem Nadirdurchgang des Scanners und den BRR-Koordinaten auf dem Target ist somit gegeben. Der Messstrahl des Scanners erreicht das Target allerdings erst später, also nach dem Nadirdurchgang. Wie die Relation in zeitlicher und räumlicher Hinsicht schließlich für einzelne Scanpunkte hergestellt wird, wird im anschließenden Abschnitt erläutert.

Die nachfolgend ausgewerteten Messungen wurden mit dem terrestrischen Laserscanner Z + F Imager 5006 des Geodätischen Instituts der Leibniz Universität Hannover (GIH) durchgeführt.

3 Räumliche und zeitliche Transformationen

Um die gescannten mit den referenzierenden Messungen des Trackers vergleichen zu können, ist ein gemeinsames räumliches und zeitliches Bezugssystem zu definieren. Als gemeinsames räumliches System wurde hier das System des Scanners vereinbart. Mit Hilfe einer Helmert-Transformation (6 Parameter) werden zunächst alle Punkte x_T , die zu den Zeitpunkten t_i erfasst wurden, vom System des Lasertrackers über die Rotation R_T^R und die Translation Δx_T^R in das System des Scanners x_R transformiert:

$$x_R(t_i) = R_T^R x_T(t_i) + \Delta x_T^R. \quad (1)$$

Als identische Punkte für die Transformation dienen Kugeln, die entlang der Kalibrierbasis aufgestellt und deren Zentren in beiden Systemen koordiniert wurden. Die Punkte x_R bilden die Referenz für die gescannten Messungen.

Für die Auswertung der gescannten Punkte im 2D-Modus x_S sind nur diejenigen Punkte zu verwenden, die auf der Graukarte der Zieltafel reflektiert wurden. Die parallele Ausrichtung der Stehachse des Scanners und der Zieltafel erlaubt es, die Punkte mithilfe kartesischer Koordinatenwerte (hier z -Koordinate) auszuwählen:

$$x_S = (y_S, z_S) | z_{\min} \leq z_S \leq z_{\max}. \quad (2)$$

Durch die konstante radiale Abtastrate nimmt die Anzahl der Punkte pro Profil linear mit der Entfernung ab. Bei einem vertikalen Abschnitt auf der Zieltafel von 10 cm liegen bei einer Entfernung von ca. 20 m ca. 10 Punkte auf der Zieltafel, bei den vorderen Profilen (Entfernung ca. 1 m) sind es 110 Punkte.

Um ein Übersteuern der Elektronik aufgrund der Reflektion des BRR zu vermeiden, wurde die Zieltafel durchgängig so aufgenommen, dass in der vertikalen Scanebene der BRR nach dem ausgewählten Bereich (Gl. 2) erfasst wurde. Der in den Untersuchungen betrachtete Abstand auf der Zieltafel wurde so hoch gewählt, dass in diesem Bereich bei ruhender Zieltafel mit und ohne Reflektor keine Abweichungen erkennbar waren.

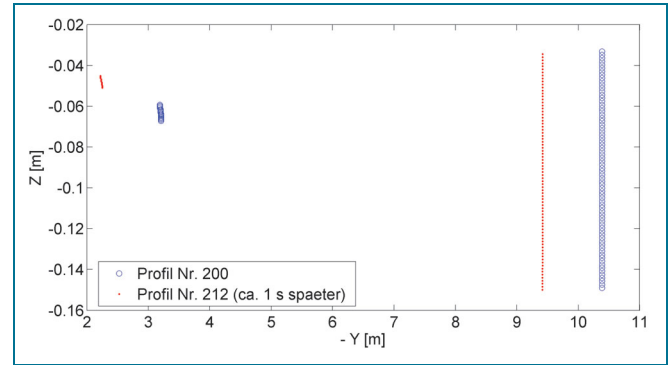


Abb. 2: Zwei Scanprofile einer Messfahrt ($v = 1 \text{ m/s}$) mit einem zeitlichen Abstand von 1 s

Für den Vergleich der gescannten Profile mit der Referenzmessung wird pro Profil aus j Punkten ein repräsentativer Punkt x_{rep} nach

$$(y, z)_{rep} = (\text{median}(y_S^{(j)}), \text{median}(z_S^{(j)})) \quad (3)$$

bestimmt. Die Auswahl eines repräsentativen Punktes pro Profil ist darin begründet, dass in den Profilen gescannte Punkte als Ausreißer auftreten können. Die Abb. 2 zeigt die Punkte zweier Profile im zeitlichen Abstand von 1 Sekunde bei bewegter Zieltafel mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 1 \text{ m/s}$. Es ist deutlich erkennbar, dass einzelne Punkte im Abstand von ca. 7,2 m vor der Zielmarke versetzt liegen. Für alle Profile und alle Punkte einer Messfahrt veranschaulicht die Abb. 3 die Häufigkeitsverteilung der Abstände in Richtung der Kalibrierbahn (y -Koordinate) zwischen gescanntem Punkt x_S und repräsentativen Punkt x_{rep} . Danach treten die Differenzen nur in definierten Abständen auf. Prinzipiell können diese Abweichungen mit dem sog. Mixed-Pixel-Effekt erklärt werden. Dieser wird durch Streulicht verursacht und tritt auf, wenn neben dem eigentlichen Ziel Licht von in der Beobachtungsrichtung benachbarten Objekten reflektiert wird. Es ist abhängig von der jeweiligen Relation der Zielentfernung zur Entfernung der störenden

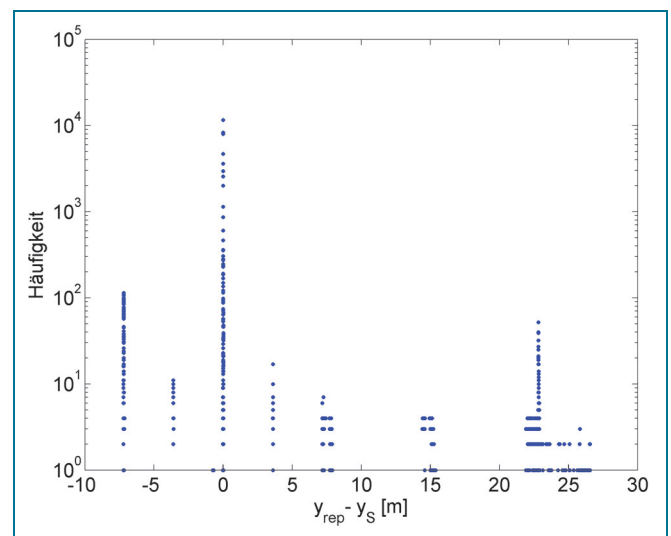


Abb. 3: Differenzen innerhalb eines Profils zwischen y_{rep} und y_s

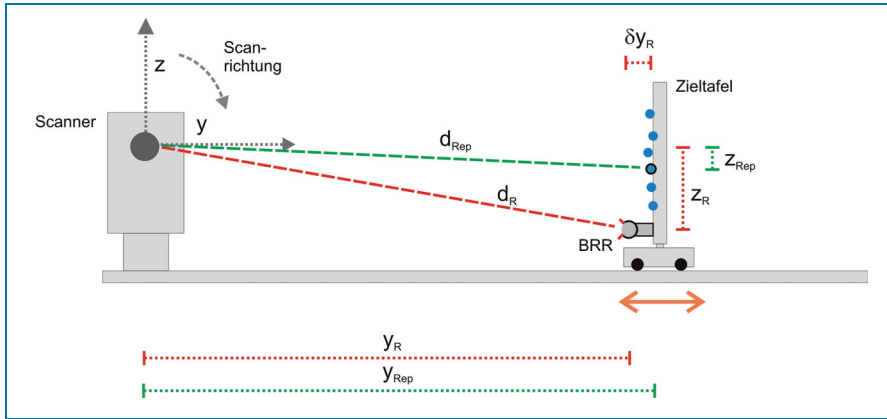


Abb. 4: Schematischer Aufbau zum Vergleich der Scan- und Referenzdistanz

Objekte. Dadurch können Punkte vor dem Zielobjekt als auch dahinter auftreten. Der Effekt kann softwareseitig minimiert werden, wenn einzelne Punkte gefiltert werden, die außerhalb ihrer lokalen Nachbarschaft liegen. In kinematischen Anwendungen kann aufgrund der Bewegung der geometrische Zusammenhang zur Nachbarschaft nicht generell hergestellt werden.

Für einzelne gescannte Punkte ist eine eindeutig definierte zeitliche Zuordnung erforderlich. Dieser Zeitbezug ist nicht für ein gesamtes Profil gültig, sondern für jeden Scanpunkt ist ein separater Zeitstempel zu erstellen. Dies verdeutlicht beispielhaft folgende Relation zwischen der Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels und Translation eines Objektes: Für das Scannen eines Ausschnittes auf der Zieltafel von 10 cm im Abstand von 3 m sind annähernd 0,42 ms (Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels: 12,5 Hz) erforderlich. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 1 m/s bewegt sich die Zieltafel in diesem Zeitraum entsprechend um 0,4 mm. Der Scanzeitpunkt wird deshalb für jeden einzelnen Scanpunkt abgeleitet.

Für jedes aller n Profile wurde beim Nadirdurchgang der vertikalen Umlenkeinheit ein Zeitstempel registriert. Der tatsächliche Messzeitpunkt ist für jeden Punkt x_S entsprechend der Umlaufzeit T_M der vertikalen Umlenkeinheit zu korrigieren. Der Zeitversatz zwischen Nadirdurchgang des Umlenkspiegels und dem Scannen eines Punktes wird proportional zum Nadirwinkel ϕ_j des Punktes x_S angenommen mit

$$\Delta t_j = \frac{\phi_j T_M}{2 \cdot \pi}, \quad (4)$$

so dass sich der Zeitpunkt t_S für einen gescannten Punkt eines i -ten Profils mit

$$t_S = t_i + \Delta t_j \quad (5)$$

angeben lässt. Zu dem Scan-Zeitpunkt t_S werden jetzt die Referenzpositionen $x_R(t_S)$ interpoliert. Da auch nicht-

lineare Bewegungen in den Testfahrten untersucht werden sollen, werden die Referenzpositionen über stückweise kubische Funktionen approximiert.

Zum geometrischen Vergleich der gescannten Distanz mit der interferometrischen Messung aus $x_R(t_S)$ siehe Abb.4. Die y -Koordinate y_R der Referenzposition $x_R(t_S)$ kann nun direkt mit der gescannten Distanz in gleicher Richtung (y_S) verglichen werden. Zu beachten ist noch die Korrektur infolge des BRR-Offsets δy_R zur Zieltafel.

$$\Delta y = y_R + \delta y_R - y_{Rep} \quad (6)$$

4 Varianten der Trajektorien

Auf der Linearmessbahn des GIK können Trajektorien mit Geschwindigkeiten bis zu 9 m/s definiert werden. Ziel der Untersuchungen ist es, systematische Abweichungen im kinematischen Einsatz des Scanners zu detektieren. Daneben ist zu überprüfen, inwieweit sich k-TLS für Aufgaben des Bauwerksmonitoring einsetzen lässt und welche stochastischen Eigenschaften für derartige Anwendungsfälle anzunehmen sind.

In Anlehnung an exemplarische Bedingungen bei der Überwachung von Bauwerken (wie z.B. Windenergieanlagen) wurden Schwingungen im Entfernungsbereich von rund 20 m erzeugt, die eine Amplitude von ca. 1 cm aufweisen. Durch die Rotationsgeschwindigkeiten der vertikalen Umlenkeinheit von bis zu 50 rot/s eignet sich die kinematische Aufnahme auch für die Erfassung vergleichbar hoher Objektgeschwindigkeiten. Alternativ wurden ein Stop & Go-Modus und eine konstante Fahrtgeschwindigkeit von 1 m/s ausgewertet. Aus dem Messprozess können sowohl ein absoluter Vergleich mit den Referenzdistanzen abgeleitet, als auch Standardabweichungen empirisch abgeschätzt werden, da die Zieltafel kontrolliert bewegt wird. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die ausgewerteten Trajektorien.

Tab. 1: Trajektorien und ausgewertete Messmodi

Name (Abschnitt)	Messmodus	Differenzen (Abb.)
Stop & Go (4.1)	500 kHz @ 12.5 rot/s	(5)
Konstante Geschwindigkeit (4.2)	500 kHz @ 12.5 rot/s	(6)
Schwingung (4.3)	500 kHz @ 12.5 rot/s	(10)

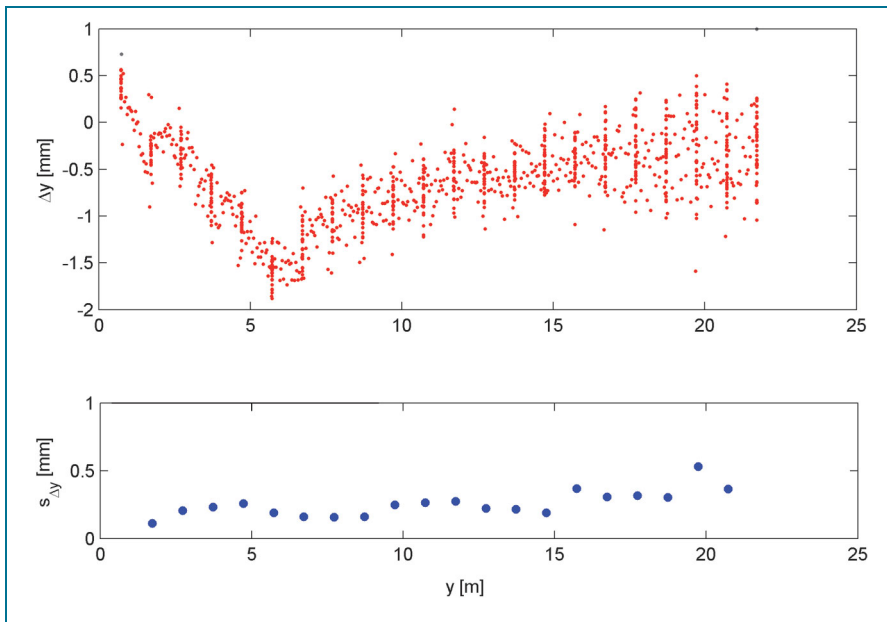


Abb. 5: Differenz aus Referenz und gescannter Entfernung [oben] und Standardabweichung [unten] aus Wiederholungsmessungen in den Ruhephasen

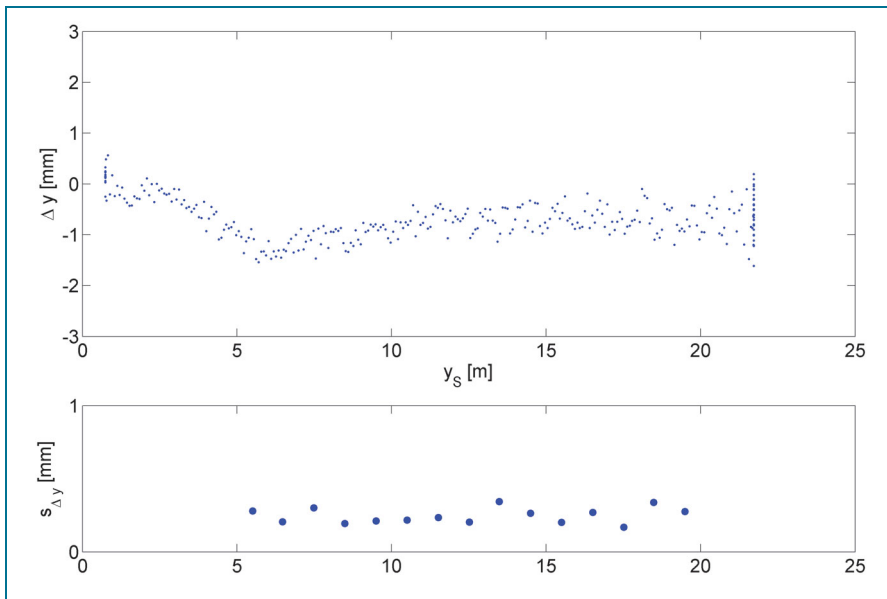


Abb. 6: Differenz aus Referenz und gescannter Entfernung [oben] und Standardabweichungen [unten] unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit

Als Ergebnis der räumlichen Transformation betragen die Standardabweichungen der ausgeglichenen Koordinaten im Mittel $\bar{s}_{\hat{x}} = 0,6$ mm, $\bar{s}_{\hat{y}} = 0,5$ mm und $\bar{s}_{\hat{z}} = 0,6$ mm.

4.1 Stop & Go

Für den referenzierbaren Entfernungsbereich der Kalibrierbahn wird im Folgenden die Zieltafel im Abstand von jeweils 1 m versetzt, wo sie für jeweils 3 s ruhig steht. Diese quasi-statische Trajektorie ermöglicht einen Soll-Ist-Vergleich über die nutzbare Länge der Kalibrierbahn. Zudem wird in den Ruhephasen die Distanz redundant ermittelt, wodurch eine Unsicherheit für die jeweiligen Entfernungsbereiche abgeschätzt werden kann.

Die Differenzen zwischen Referenzmessung und gescannter Distanz zeigt die Abb. 5 (oben). Für den ausgewerteten Längenabschnitt liegen sie im Bereich von 1 mm und damit im Niveau der mittleren Koordinatenunsicher-

heit der räumlichen Transformation (Gl. 1). Als Ursache für die starke Änderung der Differenzen im Nahbereich ist ein Überstrahlen des Sensors aufgrund der hohen Reflektivität des Targets sehr wahrscheinlich. Das Unsicherheitsniveau aus Wiederholungsmessungen zeigt die Abb. 5 (unten). Die Standardabweichung der Einzelmessung bezieht sich hier auf alle repräsentativen Punkte innerhalb einer Ruhephase (ca. 30 Punkte) und liegt für alle Entfernungsbereiche unterhalb von 0,5 mm. Dies deutet darauf hin, dass eine Unterscheidung zwischen Ruhezustand und Bewegung des Objekts auch im sub-Millimeterbereich möglich ist.

4.2 Konstante Geschwindigkeit

Im Entfernungsbereich von 5 bis 20 m wird die Zieltafel mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit (hier 1 m/s) bewegt. Die Annahme einer konstanten Geschwin-

digkeit kann verwendet werden, um innerhalb eines Zeitraumes die Bewegung redundant zu beobachten. Analog zur Stop & Go-Fahrt werden hier für Abschnitte von 1 m Länge konstante Geschwindigkeiten ausgeglichen und aus den Verbesserungen Standardabweichungen zu den gescannten Distanzen berechnet.

Die Abb. 6 enthält sowohl die Differenzen zwischen der Referenzmessung und der gescannten Distanz (oben). Darüber hinaus wurden für Abschnitte von jeweils 1 m eine ausgleichende Gerade berechnet. Deren Steigung kann auch als Geschwindigkeit interpretiert werden. Aus den Residuen zu dieser ausgleichenden Gerade wurde jeweils eine Standardabweichung berechnet (Abb. 6, unten).

Wie bei der Trajektorie der Stop & Go-Fahrt (Abb. 5) treten beim Messmodus mit 12,5 rot/s Standardabweichungen aus Wiederholungsmessungen in vergleichbarer Größenordnung auf. Über die gesamte Länge der Messbahn bewegen sich diese Abweichungen auf einem konstanten Niveau von unter 1 mm. Neben dem Messmodus mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 12 rot/s wurde in dieser Variante die Trajektorie auch im Messmodus mit 50 rot/s erfasst. Zur Auswertung wurden nicht nur einzelne repräsentative Punkte pro Profil (gem. Gl. 3) herangezogen, sondern alle auf der Zieltafel gescannten Punkte wurden mit der Referenzdistanz verglichen. Die Differenzen zwischen gescannter und referenzierter Entfernung in Richtung der Bahnachse (y-Achse) zeigt die Abbildung 7.

Hohe absolute Differenzen aufgrund fehlerhaft gelöster Mehrdeutigkeiten (vgl. Abb. 3) wurden hier gefiltert. Dargestellt sind die Differenzen gescannt mit dem Z + F Imager 5006 als auch mit dem Scanner des GIK (Leica HDS 6000), der baugleich zum Z + F Imager 5006 ist. Die z-Richtung gibt den gewählten Ausschnitt auf der Zieltafel wieder. Es wird deutlich, dass die Abweichungen in den verschiedenen Regionen der Zieltafel nicht homogen verteilt sind. Im unteren, später gescannten Bereich ($z \approx -15$ cm), sind die Beträge der Differenzen ähnlich hoch wie im Messmodus mit 12,5 rot/s (vgl. Abb. 6). Im oberen Bereich zeigt sich vor allem bei entfernt gelegener Zieltafel ($y > 15$ m) ein zusätzlicher systematischer Effekt, der bei beiden Scannern erkennbar ist (s. auch Vergrößerung in Abb. 8). Deutlich erkennbar sind Schwingungen mit linear zunehmender Amplitude. Im zugehörigen Spektrum (Abb. 9) kann eine dominante Frequenz eindeutig erkannt werden. Diese hat eine Wellenlänge von ca. 0,7 m. Vielfache von diesem Betrag treten auch als Ausreißer zur Zieltafel auf (vgl. dazu Abb. 3).

Ein ähnlicher zyklischer Effekt tritt auf, wenn Licht bereits beim Austritt aus der Oberfläche des Umlenkspiegels reflektiert wird, was z.B. bei einer Verschmutzung des Scannerspiegels geschehen kann. Es kommt dann zwischen Störsignal und Messsignal zu optischem Übersprechen, denn der an der Spiegeloberfläche und der am Target reflektierte Strahl überlagern sich zu einer

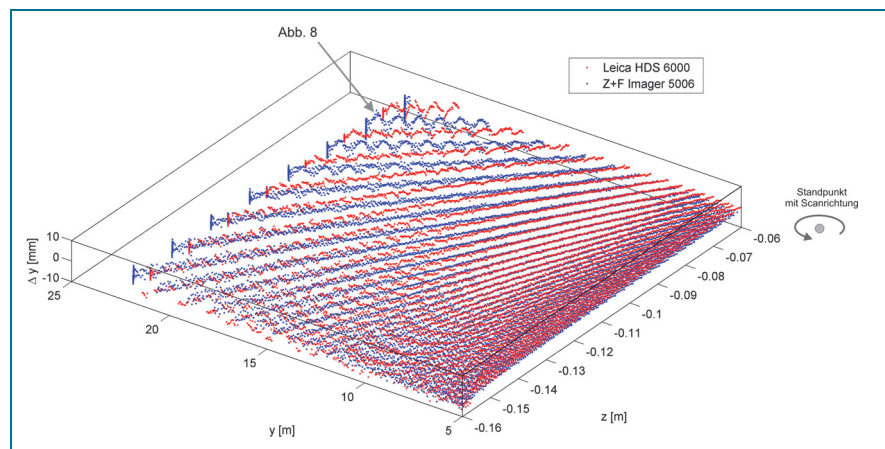


Abb. 7: Differenzen aus gescannter und referenzierter Distanz der Punkte der Zieltafel (Messmodus 50 rot/s, 500 kHz). Die y-Achse zeigt in Richtung der Bahnachse, die z-Achse drückt die vertikale Lage der Punkte auf der Zieltafel aus

Beste Verarbeitung



Das Leica Qualitätsmanagement sichert eine Fertigung nach höchsten Ansprüchen. Die Präzisionsprismen werden mit einer **Genauigkeit von 1"** geschliffen und garantieren hohe Reichweiten bei bester Genauigkeit.

www.leica-geosystems.de

when it has to be **right**

Leica
Geosystems

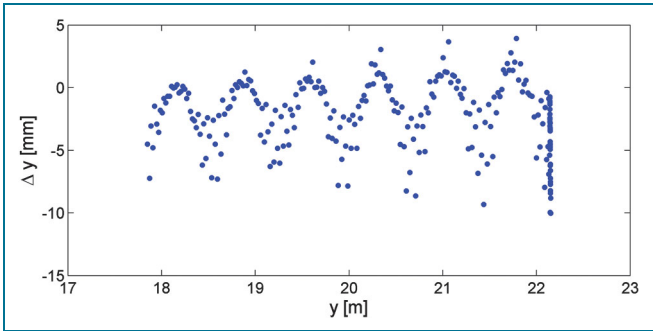


Abb. 8: Vergrößerter Ausschnitt: Oberer Bereich der Zieltafel (vgl. Abb. 7)

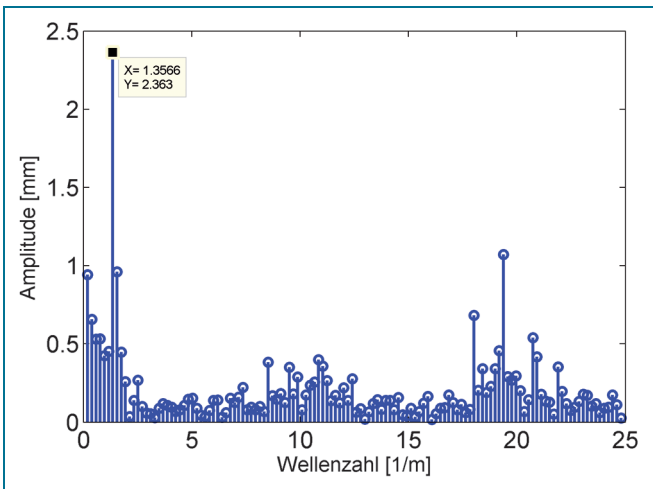


Abb. 9: Spektrum der Reihe von Abb. 8

Mischphase und verursachen damit einen periodischen, mit der Distanz zunehmenden Streckenfehler. Geht man als Ursache von optischem Übersprechen aus, hängt die Höhe des entstehenden Streckenfehlers von Amplitude und Phasenlage des Störsignals ab und weist die Periodizität des Feinmassstabes auf [WÖLFELSCHNEIDER et al., 2005].

Hier tritt der Effekt jedoch bei langsamer Spiegelrotation nicht auf, sondern ist erst bei hoher Drehfrequenz des Spiegels erkennbar. Es muss also durch die höhere Drehfrequenz zu einem weiteren Effekt kommen, der entweder ein im langsamen Modus zwar existierendes, aber nicht erkennbares Übersprechsignal verstärkt, oder der ein neues Übersprechen verursacht. Da die Messkonfiguration nicht verändert wurde, ist anzunehmen, dass große und sehr schnell wechselnde Entfernungen und/oder Intensitäten zwischen Rückwand des Labors und Target effektiv nicht exakt aufgelöst bzw. verarbeitet werden können. Für den Fall einer statischen Messung – also eine Entfernungsmessung mit konstanter Beobachtungsrichtung 1D – untersuchen ZÁMEČNÍKOVÁ et al. [2009] den hier eingesetzten Scanner Z + F Imager 5006 für Entfernungen von bis zu 50 m bei Messfrequenzen von 62 und 500 kHz. Beim Vergleich der gescannten Distanz mit der Referenzdistanz werden dort in Entfernungen von ca. 40 m zyklische Effekte erkannt, die trotz geringerer Amplitude dieselbe Periode von ca. 0,72 m aufweisen.

4.3 Schwingung von ca. 1 cm

In der Nähe der maximal erfassbaren Referenzdistanz von ca. 22 m wurde eine Schwingung mit einer Amplitude von 1 cm und einer Periodenlänge von 1,5 s angeregt. Über die elektronische Steuerung der Motoren kann die Position der Zielmarke gut reproduziert werden. Die Schwingung verläuft sinusähnlich, wobei die Zielmarke etwas schneller beschleunigt als abbremst.

In jedem Profil wurde ein repräsentativer Punkt x_{rep} (Gl. 3) ausgewählt und nach entsprechender Zeitkorrektur mit der Referenzdistanz (Gl. 6) verglichen. In Abhängigkeit von der Distanz sind die Differenzen Δy (Gl. 6) in Abb. 10 dargestellt. Diese wurden ausgewertet für den Messmodus mit 12,5 rot/s.

Danach streuen die Differenzen Δy überwiegend in einem Bereich von 0,5 mm. Zwischen den maximalen Auslenkungen treten größere Differenzen auf. Da im Zwischenbereich erheblich höhere Geschwindigkeitsänderungen auftreten, wird der Verlauf der Trajektorie in diesem Zeitraum nur durch wenige Referenzpunkte erfasst. Die Positionen können in dieser Phase weniger gut durch die kubischen Funktionen approximiert werden. Dadurch treten hier Interpolationsabweichungen zu den Referenzdistanzen auf, wodurch die Differenzen Δy geringfügig höhere Beträge annehmen. Insgesamt beträgt die Standardabweichung $s_{\Delta y}$ aus den wiederholten Messungen (ca. 300 Werte) 0,5 mm.

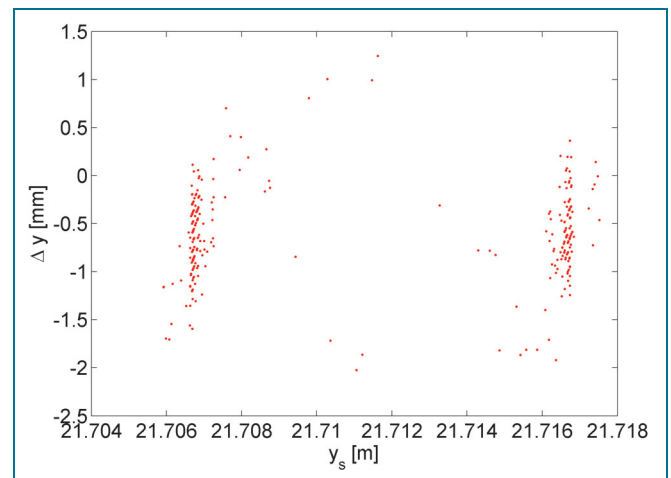


Abb. 10: Differenz aus Referenz und gescannter Entfernung

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wurde der Profilmodus eines terrestrischen Laserscanners im kinematischen Einsatz für verschiedene Messmodi und Trajektorien des Zielobjektes untersucht. Für die betrachteten Messfahrten liegen die systematischen Abweichungen überwiegend im Bereich von 1 mm, wobei eine Signifikanz mit dem gewählten Versuchsaufbau nicht feststellbar ist, wenn die räumliche Transformation über identische Punkte realisiert wird. Bei größeren Entfernungen ab 10 m jedoch treten zyklische Abweichungen auf, die Beträge bis zu mehreren mm erreichen können.



Die empirischen Unsicherheiten aus Wiederholungsmessungen (Stop & Go) bzw. unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit liegen abgesehen von den erwähnten systematischen Effekten durchgehend im sub-mm Bereich. Danach wäre es zunächst zu erwarten, dass zumindest kurzzeitige Änderungen eines Objektverhaltens auch im entsprechenden Bereich zu detektieren sind. Gerade für den Vergleich kurzfristiger Objektzustände bleibt zukünftig zu untersuchen, welche Korrelationen auftreten, wie diese zu modellieren und in die kinematische Prozessierung zu integrieren sind. Um das kinematische Laserscanning für das Monitoring von Bauwerken einsetzen zu können ist außerdem zu beobachten, welche Langzeiteffekte auftreten, wenn die Beobachtungsreihe im 2D-Modus (Profilmodus) erheblich über die betrachteten Zeiträume ausgedehnt wird.

Aufgrund der großen Datenmengen ist die Frage, wie ein Objektzustand zu einem einzelnen Zeitpunkt bestmöglich repräsentiert werden kann, explizit zu beantworten. Ein repräsentativer Zustand ist nicht nur zur Reduktion der Datenmenge zu definieren. Üblicherweise basieren die Kalibrierverfahren auf repräsentativen Punktpositionen, die beim Laserscanning meist durch Ausgleichung primitive Formen wie Kugeln oder Ebenen ermittelt werden. Diese Transformation von einer Form aus gescannten Einzelpunkten zu repräsentativen Punkten ist für das Kalibrierergebnis charakteristisch und für einen Vergleich zwischen Sensormodellen und Messmodi eindeutig festzulegen. Zudem sollte die Transformation (z.B. die Wahl von Form, Größe und Oberfläche der gescannten Objekte und deren Ausgleichung) der angestrebten Anwendung angepasst sein, damit die Kalibrierergebnisse aus Soll-Ist-Vergleichen übertragbar sind. Bei schnell wechselnden Distanzänderungen treten in den Beobachtungen noch systematische Effekte auf. Für die Modellierung bedeutet dies, dass Objekte nicht nur durch einzelne diskrete Punkte gebildet werden, sondern dass auch die Umgebung Einfluss nimmt. Demnach ist es nicht ausreichend, nur die Kalibrierkörper und deren relative Lage zu definieren. Zusätzlich ist auch die Umgebung festzulegen, in denen diese Körper gescannt werden. Die Kalibrierszene wird also stets vom ganzen Messraum geprägt.

Im kinematischen Fall können allgemein ohne Kenntnis der Objektbewegung keine Formen im Scanbild ausgeglichen werden. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Untersuchung vornehmlich ein Vergleich auf Basis einzelner ausgewählter (repräsentativer) Scanpunkte durchgeführt, für die dann jeweils ein Zeitstempel berechnet wurde. Sollen Formen ausgeglichen werden und bewegt sich das Objekt schnell im Verhältnis zur Scangeschwindigkeit, ist diese Bewegung vorab zu modellieren. Die Bewegung muss dazu bekannt bzw. aus dem Scanprozess geschätzt werden. Für Kalibrieransätze, die repräsentative Punkte aus gescannten Formen in Bewegung ableiten, ist diese Vorgehensweise zu definieren, um eindeutige Soll-Ist-Vergleiche zu diskreten Zeitpunkten und Positionen durchführen zu können.

Insgesamt bietet das terrestrische Laserscanning aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung sehr gute

Voraussetzungen für den kinematischen Einsatz – sei es für Monitoringaufgaben oder für Mobile-Mapping-Anwendungen. Die Untersuchungen zeigen, dass für die dargestellten Testfahrten und unter den gezeigten Bedingungen stochastische Unsicherheiten im Bereich von 1 mm und kleiner erreicht werden können. Dies gilt für den betrachteten Messbereich jedoch nur, wenn relative kleinräumige Bewegungsänderungen zu erfassen sind. Im absoluten Vergleich sind für den Profilmodus mit 50 rot/s derzeit noch systematische Abweichungen erkennbar, die bis zu mehreren mm betragen können.

Im Ganzen bleibt zu erwarten, dass – den Massendaten angepasste Algorithmen vorausgesetzt – das kinematische Laserscanning auch im hier betrachteten 2D-Modus zukünftig vermehrt für die ingenieurgeodätische Modellierung eingesetzt werden kann.

Literatur

- [1] DEPENTHAL, C.; BARTH, M.: Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzierten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, 7: 244–249, 2007
- [2] HENNES, M.: Präzises und kinematisches Prüfen – Möglichkeiten der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, 6: 352–358, 2006
- [3] KUTTERER, H.; PAFFENHOLZ, J.-A.; VENNEGEERTS, H.: Kinematisches terrestrisches Laserscanning. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, 2: 279–87, 2009
- [4] PRITH, D.: Leica Laser Tracker Hardware Betriebsanleitung. Leica Geosystems, 2003
- [5] YURIY RESHETYUK: Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Diss., KTH – Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2009
- [6] RIETDORF, A.: Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. Diss., Technische Universität Berlin, 2004
- [7] SCHULZ, T.: Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Diss., ETH Zuerich, 2007
- [8] WÖLFESCHNEIDER, H.; BLUG, A.; BAULIG, C.; HÖFLER, H.: Schnelle Entfernungsmessung für Laserscanner. Technisches Messen, 7–8: 450–467, 2005
- [9] ZÁMEČNÍKOVÁ, H.; KUTTERER, H.; SUHRE, H.; VENNEGEERTS, H.: Untersuchung des Distanzmesssystems Imager 5006. In: T. Luhmann und C. Müller, Hrsg., Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, S. 45–52, 2009

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. HARALD VENNEGEERTS, Dipl.-Ing. JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ, Prof. Dr.-Ing. habil. HANSJÖRG KUTTERER, Geodätisches Institut Hannover (GIH), Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
 Dipl.-Ing. EVA RICHTER, Prof. Dr.-Ing. MARIA HENNES, Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe