

Hochgenaues kinematisches Laserscanning als Beitrag für die Qualitätssicherung in der industriellen Produktion

High Accurate Kinematic Laser Scanning as a Contribution to Quality Assurance in Industrial Production

Jens Hartmann, Aaron Bachmann, Bernhard Urban, Christian Hesse, Fabian Gierschner, Ingo Neumann

In diesem Beitrag wird beschrieben, wie die effiziente 3D-Objektaufnahme durch kinematisches terrestrisches Laserscanning (k-TLS) mithilfe eines neuartigen Multi-Sensor-Systems (MSS) erfolgt. Durch die sehr hohen Genauigkeitsvorgaben von $\sigma_{3D} = 1$ mm ergeben sich besondere Anforderungen. Hierbei wird ein Profillaserscanner auf einer bewegten Plattform am Objekt vorbei bewegt und durch einen Lasertracker hochgenau georeferenziert. Dies ermöglicht eine effiziente Aufnahme von großen Objekten, was zu einer zeitlichen Verkürzung um bis zu 70 % im Vergleich zum statischen terrestrischen Laserscanning (s-TLS) führt. Die wesentlichen im Beitrag vorgestellten Entwicklungen betreffen die Themenbereiche: mobile Plattformen (Arten und Dämpfung), Systemkalibrierung, hochgenaue punktweise Georeferenzierung und eine abschließende Qualitätsbewertung der Daten.

Schlüsselwörter: Kinematisches terrestrisches Laserscanning, Systemkalibrierung, Multi-Sensor-System, Industrievermessung, Qualitätssicherung

This paper describes how a 3D object capturing is performed by kinematic terrestrial laser scanning (k-TLS) using a novel multi-sensor system (MSS). Due to the high accuracy requirements of $\sigma_{3D} = 1$ mm, special requirements arise. Here, a profile laser scanner on a mobile platform is moved along the object and highly accurate georeferenced by a laser tracker. This enables an efficient acquisition of large objects, resulting in a time reduction of up to 70 % compared to static terrestrial laser scanning (s-TLS). The main developments presented in the paper concern the topics: mobile platforms (types and damping), system calibration, high-accurate pointwise georeferencing and the final quality assessment of the data.

Keywords: Kinematic terrestrial laser scanning, system calibration, multi-sensor system, industrial surveying, quality assurance

1 MOTIVATION

Auf dem Gebiet der industriellen Fertigung gilt Deutschland als ein sehr hoch technologisierter und innovativer Standort. Um diese Stellung zu sichern bzw. noch weiter auszubauen, werden eine zunehmende Digitalisierung und Automatisierung in der industriellen Fertigung angestrebt (Industrie 4.0). Als wesentliche Ziele sind hier die durchgängige Datenhaltung, Effizienz und die Qualität hervorzuheben /BMW 2021/. Die industrielle Fertigung von Großstrukturen, wie z.B. Schiffe, Flugzeuge oder Fertigungsstraßen, stellt jedoch einen sehr komplexen Gesamtfertigungsprozess dar. Im Falle der Produktion von Mega-Yachten ergeben sich besondere Anforderungen im Vergleich zu anderen Erzeugnissen, wie z.B. dem Automobilbau. Dazu zählen die sehr großen Oberflächen sowie die hohen Beanspruchungen durch Seeschlag, Salzwasser, UV-Strahlung, Temperatur- und Lastwechsel /Buchholz & Reiter 2010/. Darüber hinaus besteht die Gesamtfertigung aus sehr vielen Einzelschritten und es herrschen zum Teil sehr strenge zeitliche Vorgaben, welche einzuhalten sind. Daher liegt es nahe, die einzelnen Schritte zu beschleunigen. Dem gegenüber stehen immer höhere Anforderungen an die Qualität. Hierzu zählen, dass Vorgaben bezüglich Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit eingehalten werden sollen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass eine nicht ausreichende Qualität zu Nacharbeiten führen kann. Dies kann schlimmstenfalls dazu führen, dass ganze Einzelschritte komplett wiederholt werden müssen und sich somit Folgeprozesse verschieben. Darüber hinaus gilt eine effiziente Fertigung auch als ein Qualitätsmerkmal bzw. ein Alleinstellungsmerkmal, welches das Unternehmen am Markt hat.

Als ein konkretes Beispiel aus der Wirtschaft ist der Bau von Mega-Yachten zu nennen. Hier werden in einem sehr aufwendigen manuellen Prozess die äußeren sichtbaren Bereiche mit Spachtel geglättet, bevor die Lackierung erfolgt. Die Dauer des Beschichtungsprozesses kann bis zu 12 Monate je Yacht betragen und zu Kosten in Millionenhöhe führen. Die gesamte Prozesskette ist die Grundlage für die Überprüfung der Produktion (Qualitätssicherung, s. Abb. 1). Dabei erfolgt final ein Vergleich zwischen dem IST-Zustand und den aus der Konstruktion vorliegenden SOLL-Daten. Werden die vorgegebenen geometrischen Vorgaben (Toleranzen) nicht eingehalten, so sind die entsprechenden Produktionsschritte zu optimieren. Um eine signifikante Steigerung der Produktivität zu erreichen, sind die messtechnischen und analytischen Prozessschritte entsprechend zu optimieren.

Im Fokus dieses Beitrags stehen die Arbeitsschritte 3D-Objekterfassung (zentrale Aufgabe der industriellen Messtechnik) sowie die Prozessierung und die Validierung der Messdaten, welche Inhalt des Teilschritts Aufbereitung sind. Die weiteren Teilschritte Model-

lierung und Spachtelsimulation werden im Rahmen des parallel erscheinenden Beitrags von /Gierschner et al. 2021/ beschrieben.

Der Fokus dieses Beitrags stellt die 3D-Objekterfassung von Großstrukturen dar, welche eine Dimension von > 100 m erreichen. Dabei gelten zum Teil sehr hohe Genauigkeitsanforderungen von $\sigma_{3D} = 1$ mm (Helmertscher Punktfehler in 3D), woraus sich eine Begrenzung der Gesamtmessunsicherheit ergibt. Beispielhaft für die entsprechenden industriellen Vorgaben sind ästhetische (Bau von Mega-Yachten) und aerodynamische Aspekte (Flugzeugbau) zu nennen. Darüber hinaus soll ein flexibler Aufnahmeprozess gewährleistet werden, der sowohl die Vollständigkeit der Datenerfassung als auch eine schnelle Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. auf einer Werft, ermöglicht. Als Verfahren für die 3D-Objekterfassung wird daher das terrestrische Laserscanning (TLS) verwendet. Im Rahmen des Auswerteprozesses werden die Daten systematisch analysiert, bewertet und aufbereitet. Darauf aufbauend wird eine optimierte Sollgeometrie abgeleitet, welche abschließend durch den Konstrukteur optimiert wird. Bezüglich der Fertigung von Mega-Yachten ist festzustellen, dass diese in den vergangenen Jahren im Durchschnitt stetig größer und komplexer geworden sind. Dies hat zur Folge, dass der Aufwand der 3D-Erfassung und der Datenauswertung erheblich gestiegen ist. Für ein einzelnes Schiffsdeck kann die Aufnahme mit dem bisher etablierten statischen TLS (s-TLS) aus 60–70 Einzelmessungen bestehen. Die Punktwolken sind im Nachgang zueinander auszurichten, zu bereinigen und schließlich zu einem optimierten Sollmodell zu verarbeiten. Dies führt zu einem sehr hohen Zeitaufwand, wodurch sich die folgenden Schritte verzögern können.

Um die gestiegenen Anforderungen an die Objektaufnahme zu erfüllen, wird daher als Messverfahren kinematisches terrestrisches Laserscanning (k-TLS) eingesetzt /Hesse 2007/. Neben einer deutlich höheren Effizienz, angestrebt ist eine Verkürzung der Aufnahmedauer von 70 %, werden auch einige genauigkeitssteigernde Aspekte, wie z.B. eine optimale Kontrolle des Auftreffwinkels, ermöglicht. Als besondere Herausforderung gelten jedoch die sehr hohen Genauigkeitsanforderungen von $\sigma_{3D} = 1$ mm beim k-TLS von Großstrukturen. Trotz eines immer weiter fortschreitenden Entwicklungsprozesses sind die aktuell am Markt befindlichen k-TLS-basierten Multi-Sensor-Systeme (MSS) dazu nicht in der Lage. Aus Platzgründen sind hier beispielhaft Leica ProScan, mit einer absoluten Positionierungsgenauigkeit von wenigen Zentimetern /Leica Geosystems AG 2016/, NavVis VLX mit einer relativen Genauigkeit, bei Verwendung von zusätzlichen Kontrollpunkten, von ca. 1 cm /NavVis GmbH 2020/ und TIMMS von Applanix mit einer relativen Punktgenauigkeit von ca. 1 cm zu nennen /Trimble Applanix 2019/.

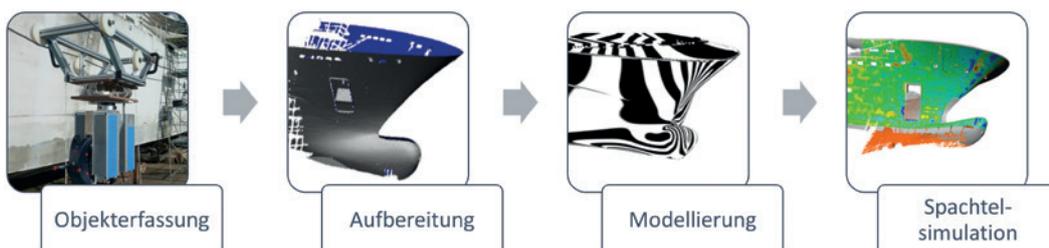


Abb. 1 | Darstellung der Prozesskette bei der Beschichtung von Mega-Yachten

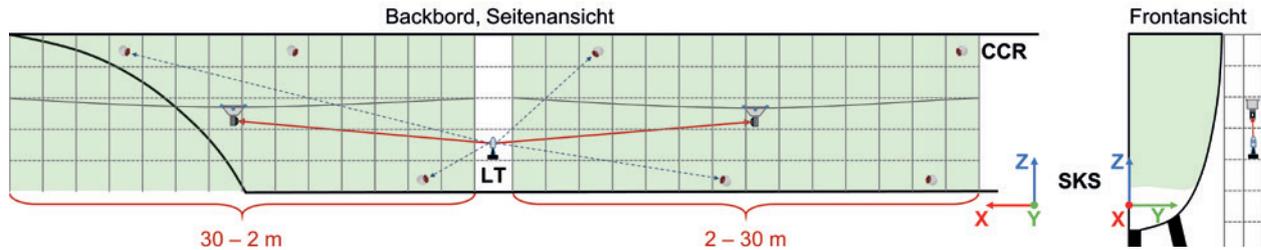


Abb. 2 | Prinzip einer seilgeführten k-TLS-basierten 3D-Objektaufnahme von einem im Schiffskoordinatensystem (SKS) stationierten Lasertracker (LT) durch Messung zu Corner-Cube-Reflektoren (CCR)

Hieraus ergibt sich die Aufgabe, die k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung so zu gestalten, dass die entsprechende Genauigkeitspezifikation eingehalten wird und darüber hinaus eine effiziente Prozessierung und eine qualitative Bewertung der Daten erfolgt. Darüber hinaus kann somit auch sichergestellt werden, dass ein örtlich flexibler und weitestgehend vollständiger Datenerfassungsprozess gewährleistet wird.

2 ANFORDERUNGEN EINER INDUSTRIELLEN 3D-OBJEKTERFASSUNG

Die hier betrachteten Großstrukturen, wie beispielsweise Mega-Yachten, können eine Ausdehnung von bis zu ca. 200 m erreichen. Dies sowie weitere produktionsgebundene Vorgaben, wie z. B. beengte Platzverhältnisse und hohe Qualitätsanforderungen, machen eine 3D-Objekterfassung zu einer besonderen Herausforderung. Hinzu kommt, dass die Objekterfassung durch die strengen zeitlichen Vorgaben oft parallel zum Fertigungsprozess stattfinden muss. Dies führt dazu, dass Effekte, wie z. B. Staubentwicklung, Erschütterungen sowie Verschattungen relevanter Objektstrukturen durch Gerüste, Menschen, temporäre Leitungen und Kabel, zu berücksichtigen sind. Eine weitere Herausforderung beim k-TLS stellt die Beschaffenheit des Bodens, welcher Unebenheiten oder Störstellen vorweisen kann, dar. Somit werden besondere Anforderungen an die zu verwendenden mobilen Plattformen gestellt, auf welche detaillierter im Abschnitt 3.2 eingegangen wird. Abb. 2 zeigt schematisch eine k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung eines Schiffsrumpfs.

Da der Schiffsrumpf im Fertigungsprozess meistens eingerüstet ist, muss die Objekterfassung auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Somit sind mehrere Standpunkte für den Lasertracker, welcher für die Georeferenzierung der mobilen Plattform verwendet wird, nötig. Die Stationierung erfolgt über Referenzpunkte, welche ein einheitliches Schiffskoordinatensystem realisieren. Diese sowie die Standpunkte des Lasertrackers sind entsprechend fest zu vermarken.

3 EIN K-TLS-BASIERTES MSS FÜR HÖCHSTE GENAUIGKEITSANSPRÜCHE

Um bei der geforderten Effizienz die sehr hohen Genauigkeitsanforderungen von $\sigma_{3D} = 1 \text{ mm}$ zu erreichen, ist ein

neuartiges k-TLS-basiertes MSS für die 3D-Objekterfassung im industriellen Umfeld zu entwickeln. In /Ehm & Hesse 2012/ wird ein grundlegendes Prinzip vorgestellt (Abb. 3), durch welches eine effiziente 3D-Objekterfassung mit entsprechender Genauigkeit ermöglicht wird.

In diesem Abschnitt werden zunächst das Prinzip und die Sensoren des neuartigen MSS dargestellt. Des Weiteren werden die Plattformen und deren Komponenten näher erläutert. Durch die Verwendung von mehreren Einzelsensoren ergeben sich besondere Anforderungen an die Systemkalibrierung und Synchronisierung, welche hier ebenfalls kurz thematisiert werden.

3.1 Prinzip und verwendete Sensoren

Die 3D-Objektaufnahme erfolgt durch einen Profillaserscanner, welcher auf einer mobilen Trägerplattform montiert ist. Es ist darauf zu achten, dass ein entsprechendes Laserscannermodell, welches im Arbeitsbereich von $< 10 \text{ m}$ eine Genauigkeit von $\sigma_{\text{TLS}} = 1 \text{ mm}$ erreicht, verwendet wird. Hier wurden Laserscanner von Zoller & Fröhlich sowie Leica Geosystems eingesetzt, welche diese Spezifikationen erfüllen (s. /Mettenleitner et al. 2015/). Des Weiteren ist anzumerken, dass auch weitere genauigkeitsbestimmende Einflussgrößen, wie z. B. der Auftreffwinkel und die Objekteigenschaften (Material und Farbe), bei der Erfassung und der Auswertung mit zu berücksichtigen sind.

Die hier vorgestellte Methode der Georeferenzierung einer mobilen Plattform unterscheidet sich signifikant von anderen MSS. Zum

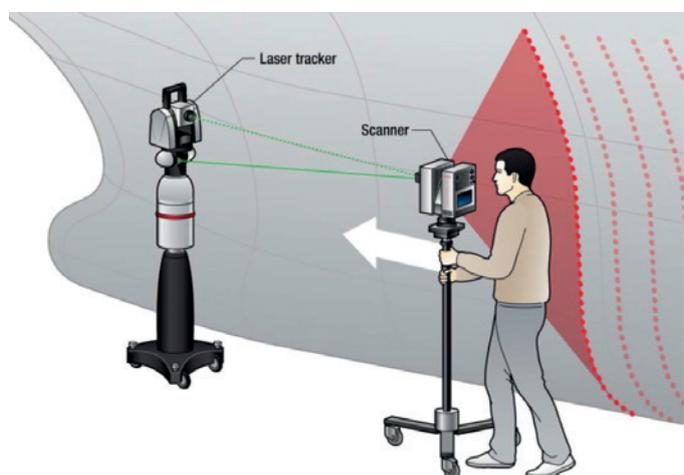


Abb. 3 | Das Prinzip der k-TLS-basierten Objekterfassung nach /Ehm & Hesse 2012/

Einsatz kommen ein Lasertracker (Leica AT960) in Verbindung mit einer Leica T-Probe, welche am Laserscanner fest montiert ist. Neben der T-Probe kann auch die T-Mac verwendet werden, beide gehören zur Klasse der Tracker-Machine-Control-Sensoren, welche eine direkte Messung von 6 DoF (Degrees of Freedom), also jeweils drei Translationen und Rotationen, ermöglichen. Die Genauigkeiten der Translationen werden als Maximum Permissible Error (MPE) spezifiziert und betragen $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$. Für die Rotationen wird eine Standardabweichung von $0,01^\circ = 18 \mu\text{m}/100 \text{mm}$ angegeben (s. /Hexagon Metrology 2013/).

Für die Synchronisierung wird eine Hardware-basierte Lösung verwendet. Am Start jedes Profils wird durch den Laserscanner ein Triggersignal erzeugt, welches über ein Koaxialkabel an den Lasertracker übertragen wird und eine 6-DoF-Messung initiiert. Da die einzelnen Sensoren unterschiedliche Koordinatensysteme besitzen, welche dreidimensional zueinander verschoben und verdreht sind, müssen alle erfassten Objektpunkte, welche hier mit dem Vektor $\mathbf{x}_s = (x, y, z)$ bezeichnet werden, transformiert werden. Dies erfolgt zweistufig, zunächst vom Koordinatensystem des Laserscanners (s) in das der T-Probe (b) und anschließend in das des Lasertrackers (l):

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{T}(x, y, z)_s^b + \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)_s^b \cdot \mathbf{x}_s. \quad (1)$$

Der Vektor $\mathbf{t} = (x, y, z)$ bezeichnet hierbei jeweils die Translationen in x -, y - und z -Richtung. $\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$ ist die Rotationsmatrix, welche die drei Rotationswinkel ω , φ und κ um die entsprechende Koordinatenachse enthält. Für detaillierte Informationen sei auf /Luhmann 2020/ verwiesen. Die Transformationsparameter zwischen s und b sind im Rahmen einer vorab durchgeführten Systemkalibrierung, welche im Abschnitt 3.3 näher beschrieben wird, zu bestimmen. Der Übergang zwischen b und l erfolgt analog nach Gl. (1) mit den durch den Lasertracker erfassten 6 DoF. Falls in einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem (r) gemessen wird, sind die Objektpunkte mit Gl. (1) von l nach r zu transformieren.

3.2 Plattformen

Bei einer großflächigeren Objekterfassung unter realen Produktionsbedingungen ergeben sich weiterführende Anforderungen an die Plattform und die Prozessierungsalgorithmen. Eine ideale, gleichförmige und lineare Bewegung ist oft nur schwer zu erreichen, obwohl dies für die Genauigkeit der Georeferenzierung von großem Vorteil ist. Daraus leitet sich die Aufgabe ab, eine Plattform zu entwickeln, welche aktiv oder passiv Schwingungen dämpft und optional einen Antrieb verwendet. Um alle möglichen späteren Einsatzszenarien erfüllen zu können, werden zwei Plattformen für den Bodeneinsatz (Rollwagen und Rückenfrage) sowie ein Seilschlitten entwickelt, um auch die höherliegenden Bereiche, wie Decksaufbauten, erfassen zu können.

Für die konstruierten Trägersysteme werden die jeweilig auftretenden Bewegungsformen untersucht. Im Rahmen von Testfahrten wird die Pose des Laserscanners mit einer Frequenz von 50 Hz erfasst. Dafür wird eine T-Probe mithilfe einer eigens entwickelten Halterung befestigt, welche eine einfache, schnelle und repro-

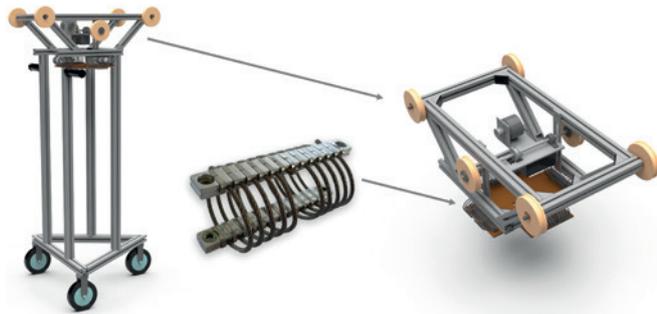


Abb. 4 | Entwickelte Plattformen: Rollwagen und Seilzugsystem (links), Darstellung eines einzelnen Drahtseil-Federdämpfers im Ausgangszustand (mittig)

duzierbare Adaptierung am Laserscanner ermöglicht. Aus den Messdaten werden die Translationen und Rotationen bzw. deren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ermittelt. Des Weiteren werden die auftretenden Frequenzen der Störbewegungen analysiert. Anhand der Ergebnisse werden Dämpfungssysteme für die Trägersysteme entwickelt. Dabei wird generell auf aktive Dämpfungssysteme verzichtet, da so zusätzliches Gewicht entfällt und der Aufbau einfach gehalten wird.

In Folge der Bewegungsuntersuchungen wurden die Dämpfungselemente der Plattformen angepasst. Der Rollwagen wird so konstruiert, dass der Seilschlitten mit dem oberen Teil verbunden werden kann. Dies ermöglicht zum einen den vereinfachten Transport des Seilschlittens inklusive adaptiertem Scanner und zum anderen den schnellen Wechsel zwischen beiden Trägersystemen (Abb. 4). Der Seilschlitten wird mit einem elektrischen Antrieb erweitert, sodass eine Geschwindigkeit vorgegeben werden kann, mit der sich der Scanner gleichmäßig entlang des Objekts bewegt. Somit kann unter anderem die ideale lineare Bewegung besser angenähert werden.

Das verwendete Dämpfungselement besteht aus mehreren, rechteckig angeordneten Cavoflex Drahtseil-Federdämpfern. Diese passiven Dämpfer sind leicht und besitzen bei Druck und Zugbelastung ähnliche Dämpfungseigenschaften (Abb. 4). Durch Entfernen einzelner Windungen kann die Dämpfung an die unterschiedlichen Bedingungen, wie z.B. Bodenbeschaffenheit und Seilspannung, besser angepasst werden.

3.3 Systemkalibrierung und Synchronisierung

Aufgrund der hohen Gesamtgenauigkeitsanforderung von $\sigma_{3D} = 1 \text{mm}$ sind die 6 DoF zwischen dem lokalen Koordinatensystem s und dem des MSS b hochgenau zu bestimmen. Die Translationen sind entsprechend mit $\mathbf{t}(x, y, z)_s^b \leq 1 \text{mm}$ und die Rotationen $(\omega, \varphi, \kappa)_s^b$ mit wenigen mgon zu bestimmen. Als Beispiel sei hier eine Abweichung von 6 mgon genannt, welche in einer Entfernung von 10 m zu einer Querabweichung von 1 mm führt. Aus der Literatur sind unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der 6 DoF bekannt, beispielhaft sind hier z.B. /Hesse 2007/, /Gräfe 2008/, /Paffenholz 2012/, /Le Scouarnec et al. 2014/ und /Jian & Ravani 2016/ zu nennen. Jedoch bleibt festzustellen, dass die geforderte Genauigkeit mit keinem der Ansätze erreicht wird. Daher wird bei der Systemkalibrierung auf den Referenzebenen-basierten Ansatz

nach /Strübing & Neumann 2013/ zurückgegriffen. Hierbei werden j unterschiedlich orientierte Referenzebenen verwendet. Die Erfassung mit übergeordneter Genauigkeit erfolgt durch i Einzelpunktmessungen durch einen Corner-Cube-Reflektor (CCR) in Verbindung mit einem Lasertracker. Im folgenden Zusammenhang werden die Punkte mit $\mathbf{x}_{r,i,j}$ bezeichnet. Die Referenzebenen werden durch die Hessesche Normalform mit folgendem funktionalen Zusammenhang bestimmt:

$$0 = \mathbf{x}_{r,i,j} \cdot \mathbf{n}_j - d_j \quad (2)$$

Hierbei sind \mathbf{n}_j der Normalenvektor und d_j der kürzeste Abstand der Referenzebene j zum Ursprung. Aufgrund der übergeordneten Genauigkeit des Lasertrackers im Vergleich zum Laserscanner wird dies hier als Referenzmessung angesehen.

In einem zweiten Schritt erfolgen mehrere 6-DoF-Referenzierungsmessungen des Lasertrackers auf die am Laserscanner fest montierte T-Probe. Anschließend werden der Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet. Hierdurch ist die direkte Transformation vom Koordinatensystem des MSS b , welches durch die T-Probe realisiert wird, in das System des Lasertrackers l möglich. Parallel dazu erfolgt die Erfassung der Referenzebenen durch den Laserscanner mit anschließender Selektion auf 100 Punkte pro Referenzebene. Der Grund dafür ist zum einen die schnellere rechentechnische Prozessierung. Zum anderen gehen somit immer eine gleiche Anzahl der Beobachtungen pro Referenzebene in die spätere Ausgleichung ein. Die Anzahl und Anordnung der einzelnen Referenzebenen ist von besonderer Bedeutung für die Bestimmung der 6 DoF. Diese zu optimieren, stellt ein aktuelles Forschungsthema dar und wurde in /Dorndorf 2014/, /Keller 2016/ und /Heinz et al. 2017/ behandelt. Im Rahmen dieser Arbeiten erfolgt eine Optimierung der 6 DoF durch eine Simulation, bei der verschiedene Konstellationen von Referenzebenen mit unterschiedlicher Anordnung, Anzahl und Entfernungen bzgl. des Laserscanners getestet werden. Es werden die Standardabweichungen sowie die Korrelationen der 6 DoF ermittelt und darauf aufbauend die Sensitivität der Referenzebenen auf die Bestimmung der 6 DoF diskutiert. In /Keller 2016/ und /Heinz et al. 2020/ wird der Aufbau einer Kalibrierungsumgebung beschrieben. Dies erfolgt auch in /Hartmann et al. 2019/, wo eine Optimierung durch ein heuristisches Verfahren erreicht wird, welches die Minimierung der Standardabweichungen als Zielfunktion verwendet. Darauf aufbauend wurde eine seit 2018 am GIH existierende Kalibrierungsumgebung weiter optimiert. Diese besteht aus elf Referenzebenen, welche über Drehgelenke einstellbar sind und anschließend fixiert werden können (Abb. 5).

Hieraus ergibt sich der Vorteil, dass unterschiedliche Konstellationen realisiert werden können. Die Aufstellung des Laserscanners erfolgt zentrisch. Die Referenzebenen 1–4 und 8–11 sind symmetrisch in einer Entfernung von 4,2 m angeordnet um auftretende systematische Abweichungen, wie z. B. bei der Streckenmessung, zu minimieren. Die Referenzebenen 5–7 sind in einer Höhe von 3,5 m

über dem Laserscanner angebracht. Für weitere Details sei hier auf /Hartmann et al. 2019/ verwiesen.

Zunächst werden die selektierten Punkte $\mathbf{x}_{s,i,j}$ mithilfe von Gl. (1) in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem (r) transformiert und in folgende Gleichung eingesetzt:

$$w_j = 0 = n_{x,r,j} \cdot x_{r,i,j} + n_{y,r,j} \cdot y_{r,i,j} + n_{z,r,j} \cdot z_{r,i,j} - d_{r,j} \quad (3)$$

Die Widersprüche w_j in der Gl. (3) sind gleich null, wenn ein vom s in r transformierter Punkt in der vom Lasertracker bestimmten Referenzebene j liegt. Dieser funktionale Zusammenhang wird hier als Restriktion in einem Gauß-Helmert-Modell (GHM) eingeführt. Gemäß der Methode der kleinsten Quadrate wird die gewichtete Verbesserungsquadratsumme der Laserscannerbeobachtungen minimiert, wobei die 6 DoF zwischen b und s die unbekannt Parameter der Ausgleichung darstellen. Als Abbruchkriterium wurden für die Translationen 0,1 mm und für die Rotationen 0,1 mgon gewählt.

In das stochastische Modell wurden die Standardabweichungen der Beobachtungen eingeführt. Die der Streckenmessung für den hier verwendeten Laserscanner (Z+F IMAGER 5010) ergab sich aus einem Intensitäts-basierten Ansatz nach /Wujanz 2017/ und die der Horizontalrichtungs- und Vertikalwinkelmessung aus den Angaben des Herstellers nach /Zoller + Fröhlich GmbH 2010/. Die Standardabweichungen der Beobachtung zwischen dem Lasertracker und der T-Probe wurden aus Wiederholungsmessungen abgeleitet. Weitere detaillierte Informationen zur Systemkalibrierung können /Strübing & Neumann 2013/, /Dorndorf et al. 2015/, /Heinz et al. 2016/ und /Hartmann et al. 2017/ entnommen werden.

Bei Messungen auf der Kalibrierumgebung am GIH wurden sehr gute Ergebnisse erreicht. Für die Translationen ergaben sich Standardabweichungen von $< 0,1$ mm und für die Rotationen im Bereich von 3–4 mgon. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Validierung im Abschnitt 4.2. Darüber hinaus wurde der Gesamtprozess stark vereinfacht und automatisiert. Final beträgt der zeitliche Gesamtaufwand für eine Systemkalibrierung weniger als eine Stunde. Dies stellt eine wesentliche Verkürzung des Zeitaufwands dar, welche am Beginn der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei sechs Stunden lag.

Für die Georeferenzierung der mobilen Plattform ist eine Synchronisierung zwischen Laserscanner (erfassender Sensor) und

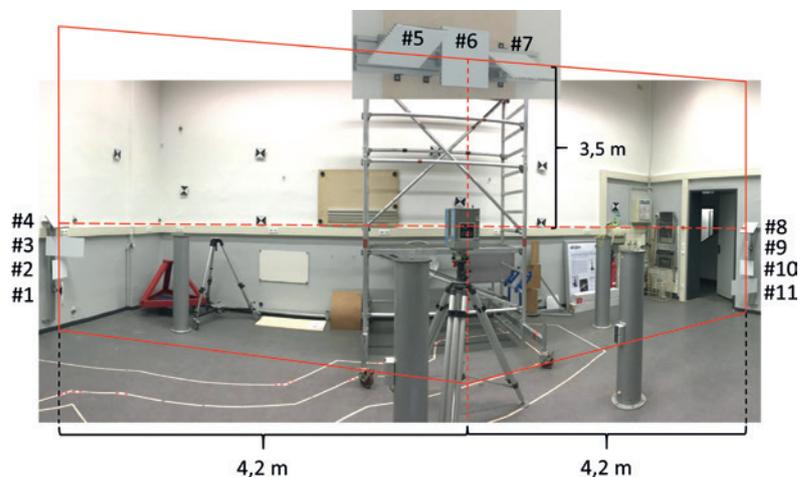


Abb. 5 | Kalibrierumgebung am GIH mit elf unterschiedlich orientierten Referenzebenen

dem Lasertracker (referenzierender Sensor) nötig. Am Start jedes Profils erzeugt der Laserscanner ein Triggersignal, welches über ein Kabel an den Lasertracker gesendet wird. Dieser führt eine 6-DoF-Messung zur am Laserscanner montierten T-Probe durch. Es ist darauf zu achten, dass jedes erfasste Profil mit der exakt dazugehörigen Referenzierungsmessung zusammen ausgewertet wird. Durch das Warm- und Auslaufen des Laserscanners kann es zu einer höheren Anzahl an Georeferenzierungsmessungen kommen, da der Laserscanner schon bzw. noch Triggersignale sendet und keine Profile erfasst. Eine Möglichkeit, die genaue Zuordnung zwischen Georeferenzierungsmessungen und Laserscannerprofilen zu bestimmen, ist in /Dorndorf et al. 2015/ beschrieben. Hier wird eine um 45° geneigten k-TLS-basierte Erfassung einer ebenen Wand im Hin- und Rückweg durchgeführt. Die erfassten Punktwolken der Ebene liegen nur übereinander, wenn eine exakte Zuordnung zwischen Profilen und Georeferenzierungen erfolgt. Eine weitere Möglichkeit stellt eine Hardware-basierte Überprüfung dar, z. B. wird mithilfe eines GNSS-Empfängers ein einheitlicher Zeitstempel generiert. Dadurch ist eine Überprüfung der Laserscannerprofile und der Referenzierungsmessungen möglich.

4 PROZESSIERUNG UND QUALITÄTSEBENWERTUNG DER K-TLS DATEN

In diesem Abschnitt wird zunächst eine Möglichkeit vorgestellt, bei welcher eine punktweise Georeferenzierung der k-TLS-basierten Daten erfolgt. Abschließend wird eine Unsicherheitsmodellierung beschrieben, durch welche eine Qualitätssicherung der 3D-Objekterfassung ermöglicht wird.

4.1 Punktgenaue Georeferenzierung

Im Abschnitt 3.3 wurde bereits die Funktionsweise von Synchronisierung und Georeferenzierung des k-TLS-basierten MSS erläutert. Hieraus ist festzustellen, dass nur für den ersten Punkt des Profils eine punktgenaue Georeferenzierung erfolgt. Da sich die Plattform jedoch während einer Profilaufnahme fortbewegt, werden alle folgenden Punkte nicht exakt georeferenziert. Je nach Messumgebung und gewählter Plattform (vgl. Abschnitte 2 und 3.2) sind sehr dynamische Bewegungen möglich. Beispielsweise entsteht bei einer Drehrate von 10 gon/s, eine Verdrehung von 0,2 gon/s zwischen zwei aufeinander folgenden Profilen. Unter der Annahme, dass der Profilschscan mit einer Drehfrequenz von 50 Hz erfolgt, ergibt sich bei einer Messentfernung von 10 m eine Abweichung von 3 cm am Objekt. Daraus ist abzuleiten, dass zum einen ein entsprechendes Plattformdesign mit Dämpfungselementen benötigt wird (s. Abschnitt 3.2). Zum anderen sollte die Georeferenzierung der mobilen Plattform punktweise erfolgen.

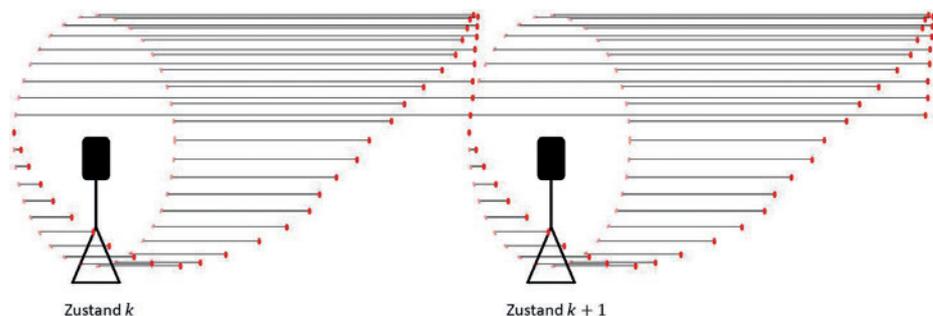


Abb. 6 | Das Prinzip der punktweisen Georeferenzierung beim entwickelten k-TLS-basierten MSS

Nur so wird gewährleistet, dass die zentrale Genauigkeitsanforderung (Objekterfassung mit $\sigma_{3D} = 1$ mm) erreicht wird.

Ein erster Ansatz, die Bewegung während der Profilmessung zu berücksichtigen, stellt eine lineare Interpolation zwischen zwei aufeinander folgenden Profilen dar. Bei einer einfachen Plattform, ohne Dämpfungselemente, ist eine gleichförmige und lineare Bewegung jedoch nur in einer Laborumgebung (ebener Boden) realisierbar. Bei ersten k-TLS-basierten Messungen im Labor des GIH mit einem einfachen Rollwagen bei 50 Hz Rotationsfrequenz und mit einem Objektstand > 5 m konnte eine Genauigkeit von 1–2 mm erreicht werden (s. /Dorndorf et al. 2015/).

Eine Verbesserung stellt die Verwendung eines Filtermodells dar. Hierbei erfolgt die Berücksichtigung der Bewegung im Rahmen einer Prädiktion zwischen den einzelnen Zuständen der Georeferenzierung. Durch die Wahl eines geeigneten physikalischen Modells, wie z. B. eine Pendelbewegung, kann die Bewegungsart der mobilen Plattform bestmöglich berücksichtigt werden. Die Implementierung des physikalischen Modells erfolgt nach /Pentenrieder 2005/.

Da das klassische Kalman-Filter auf lineare Zustandsraummodelle beschränkt ist und es sich hier um eine (hoch) nichtlineare Bewegungsform handelt, wird ein iterativer Extended-Kalman-Filter (IEKF) gewählt und implementiert. Als Beobachtungen werden die vom Lasertracker zur T-Probe gemessenen Translationen und Rotationen eingeführt. Für die Berücksichtigung der Messunsicherheiten im stochastischen Modell werden die vom Hersteller in /Hexagon Metrology 2013/ angegebenen MPE entsprechend nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) in Standardabweichungen überführt /JCGM 1995/. Für jeden einzelnen Zustand (Epoche k) werden neben den erfassten Translationen $\mathbf{t}^{(k)}$ und Rotationen $\mathbf{r}^{(k)}$ die Geschwindigkeiten $\mathbf{v}^{(k)}$ und Beschleunigungen $\mathbf{a}^{(k)}$ sowie die Winkelgeschwindigkeiten $\boldsymbol{\omega}^{(k)}$ und Winkelbeschleunigungen $\boldsymbol{\alpha}^{(k)}$ bestimmt. Somit ergibt sich als Zustandsvektor:

$$\mathbf{x}^{(k)} = (\mathbf{t}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)}, \mathbf{a}^{(k)}, \mathbf{r}^{(k)}, \boldsymbol{\omega}^{(k)}, \boldsymbol{\alpha}^{(k)}). \quad (4)$$

Der funktionale Zusammenhang ergibt sich aus:

$$\mathbf{l}^{(k)} = \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix}^b = \mathbf{h}(\mathbf{x}_+^{(k)}, \Delta t). \quad (5)$$

Hierbei ist $\mathbf{x}_+^{(k)}$ der Zustandsvektor und $\mathbf{l}^{(k)}$ der Beobachtungsvektor des k-TLS-basierten MSS. Der Vektor $\mathbf{l}^{(k)}$ beinhaltet die zwischen dem Lasertracker (l) und der T-Probe (b) erfassten Translationen \mathbf{t} und Rotationen \mathbf{r} . Als Δt wird die Zeitspanne zwischen den einzelnen Punkten des Profils bezeichnet. Weiterhin kann von einer

gleichen Anzahl an Punkten pro Profil und einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit ausgegangen werden.

Durch die im iEKF bestimmten Größen ist eine Verschiebung der erfassten Profilpunkte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zuständen k und $k + 1$, entsprechend der Bewegung der Plattform, möglich. Das Prinzip der Verschiebung ist in *Abb. 6* dargestellt.

Für weitere Informationen zur erfolgten Umsetzung und Implementierung sei auf /Hartmann et al. 2018/ verwiesen.

4.2 Unsicherheitsmodellierung und Prozessierung

Wie im Abschnitt 1 erwähnt, spielt die Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung eine entscheidende Rolle. Eine wichtige Größe, um die Qualität der entsprechenden Produktionsschritte beurteilen zu können, ist die Gesamtunsicherheit bei der 3D-Objekterfassung mit dem hier beschriebenen k-TLS-basierten MSS. Dazu müssen zunächst die Unsicherheiten der Einzelprozesse, wie der Stationierung des Lasertrackers im übergeordneten Referenzkoordinatensystem, die Referenzierung der mobilen Plattform, die Synchronisierung und Systemkalibrierung sowie der 3D-Objekterfassung mit dem Laserscanner bestimmt werden. Aus Testmessungen konnte abgeleitet werden, dass die 3D-Objekterfassung durch den Laserscanner, die Georeferenzierung der mobilen Plattform und die Systemkalibrierung die größten Anteile am Gesamtunsicherheitsbudget bei der k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung haben. Die beiden letztgenannten sind spezifische Größen beim k-TLS. Ihre Minimierung stellt zugleich eine der wesentlichsten Herausforderung dar. In beiden Fällen sind je drei Translationen und drei Rotationen zu bestimmen. Den Angaben der Abschnitte 3.1 und 3.3 ist zu entnehmen, dass die Genauigkeit der Translationen σ_{Trans} in einer Größenordnung von wenigen Zehntelmillimetern liegt.

Als deutlich kritischer hinsichtlich der Gesamtunsicherheit sind die Rotationen zu betrachten. Diese betragen bei der Systemkalibrierung $\sigma_{\text{Rot}} \leq 4$ mgon. Zur Evaluierung der vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten bei der Georeferenzierung erfolgten Testmessungen mit dem Leica AT960LR und einer T-Probe am GIH. Hierbei wurden zwischen dem Lasertracker und der T-Probe die 6 DoF in unterschiedlichen Konstellationen gemessen, bei welchen der Auftreffwinkel und die Entfernung variiert wurden. Durch einen Vergleich mit einem hochgenau bestimmten Referenznetz

konnte abgeleitet werden, dass die erhaltenen Genauigkeiten unter den angegebenen Werten des Herstellers liegen, welche mit $\sigma_{\text{Rot}} \leq 0,01^\circ$ angegeben werden (s. /Hexagon Metrology 2013/). Die Berechnung der Unsicherheit der 3D-Objekterfassung durch den Laserscanner erfolgt durch Varianz-Fortpflanzung der Standardabweichungen der Streckenmessung sowie der Richtungs- und Vertikalwinkelmessung, welche analog zur beschriebenen Vorgehensweise bei der Systemkalibrierung (s. Abschnitt 3.3) gewonnen werden. Aus dem GUM ergeben sich für die Berechnung der Unsicherheit einer Zielgröße zwei Möglichkeiten. Zum einen durch eine Varianz-Fortpflanzung und zum anderen durch eine Monte-Carlo-Simulation (MCS). Aufgrund des komplexen funktionalen Zusammenhangs wurde hier die MCS gewählt. Die Gesamtunsicherheit der k-TLS-basierten 3D-Objektaufnahme setzt sich zusammen aus den erläuterten Einzelunsicherheiten /Stenz et al. 2020/. Auf der linken Seite der *Abb. 7* ist die berechnete 3D-Unsicherheit einer k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung eines Mockups der Fr.-Lürssen-Werft (FLW) farblich codiert dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der Gesamtunsicherheiten unter 1,5 mm liegt. Der Anstieg von unten links (blau) bis oben rechts (rot) ist auf die unterschiedliche Messentfernung von 4–7 m zwischen Objekt und Laserscanner zurückzuführen. Die Messung erfolgte mit dem Z+F IMAGER 5010, welcher auf einer Plattform mit Seilzugsystem montiert wurde (*Abb. 3*). An dem zylindrischen Element (unterer rechter Teil) ist an den Rändern ein Anstieg der Gesamtunsicherheit zu erkennen; dies ist auf eine geringere Intensität, welche aus einem schlechteren Auftreffwinkel resultiert, zurückzuführen. Auf der rechten Seite der *Abb. 7* sind die mit dem M3C2-Algorithmus nach /Lague et al. 2013/ berechneten Distanzen (Abweichungen) zwischen einer mit s-TLS- und k-TLS-basierten 3D-Objekterfassung dargestellt. Der Mittelwert beträgt 0,14 mm und die Standardabweichung $\sigma = 1,00$ mm. Die Prozessierung der k-TLS-basierten Punktwolke erfolgte dabei wie in Abschnitt 4.1 beschrieben. Eine zusätzliche Minimierung bzw. Glättung konnte durch eine Filterung in beide Richtungen (vorwärts und rückwärts) erreicht werden. Die 3D-Objekterfassung mit s-TLS erfolgte durch eine Aufstellung bei einer mittleren Distanz von 5 m und mit dem Z+F IMAGER 5010. Die Transformation erfolgte über neun am Rande des Mockups befestigte und mit Lasertracker bestimmte Referenzpunkte, detaillierte Informationen sind in /Stenz et al. 2017/ gegeben.

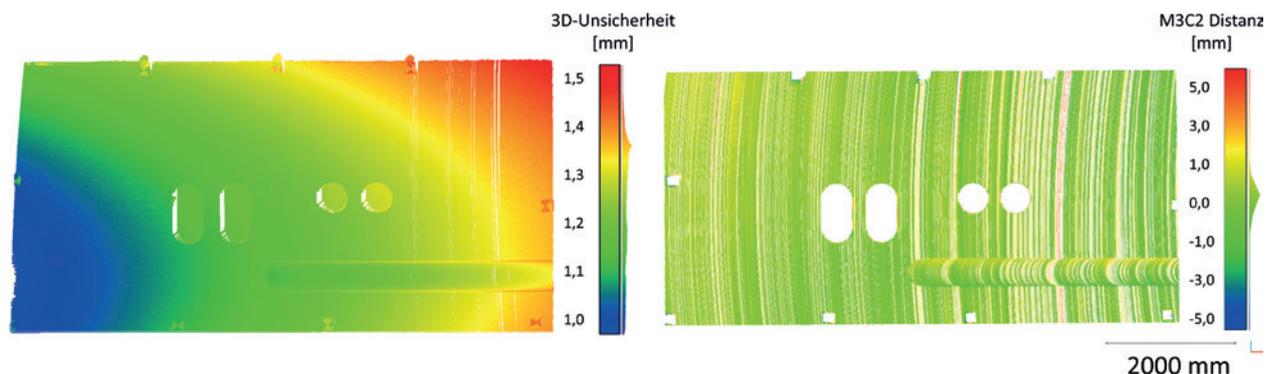


Abb. 7 | Links: farbcodierte Darstellung einer mittels MCS berechneten 3D-Gesamtunsicherheit (k-TLS-basierte 3D-Objekterfassung) nach /Ehrhorn 2019/. Rechts: berechnete M3C2-Distanzen zwischen k-TLS- und s-TLS-basierter 3D-Objekterfassung eines Mockups auf der FLW /Hartmann et al. 2018/.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine k-TLS-basierte 3D-Objektaufnahme im Nahbereich von bis zu 7 m mit der geforderten Genauigkeit von $\sigma_{3D} = 1$ mm möglich ist. Dies zeigen die in der Unsicherheitsmodellierung bestimmten Werte und wird durch die im Rahmen der Validierung berechneten M3C2-Distanzen bestätigt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass auch die Unsicherheit der statischen Objektaufnahme in den Vergleich der beiden Punktwolken einget.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Um Deutschlands weltweite Stellung als modernen und innovativen Standort in der industriellen Fertigung zu sichern bzw. weiter auszubauen, wird eine zunehmende Digitalisierung und Automatisierung der Arbeitsschritte angestrebt. Als wesentliche Anforderungen an die industrielle Messtechnik ergeben sich hier eine effiziente 3D-Objekterfassung und eine Überprüfung der einzelnen Produktionsschritte im Rahmen der Qualitätssicherung. Aus geodätischer Sicht sind vor allem die Arbeitsschritte 3D-Objekterfassung, Prozessierung und Validierung der Daten und die Flächenmodellierung von Interesse. Um eine möglichst effiziente und zugleich den hohen Genauigkeitsanforderungen ($\sigma_{3D} = 1$ mm) entsprechende 3D-Objekterfassung zu gewährleisten, wurde ein neuartiges k-TLS-basiertes MSS entwickelt. Hierbei wird ein im Profilmodus arbeitender Laserscanner auf einer bewegten Plattform am Objekt vorbei bewegt, welche durch einen Lasertracker hochgenau georeferenziert wird. Die wesentlichen Erneuerungen und Entwicklungen betreffen die Themen: mobile Plattformen (Aufbau und Dämpfung), Systemkalibrierung zwischen den einzelnen Sensoren, hochgenaue und punktweise Georeferenzierung durch ein Filtermodell und eine abschließende Gesamtunsicherheitsbestimmung für die Qualitätssicherung.

Eine Anwendung des k-TLS-basierten MSS ist die Fertigung von Mega-Yachten mit einer Ausdehnung von bis zu ca. 200 m. Aktuell erfolgt hier die 3D-Objekterfassung meist durch s-TLS, welches jedoch zu einer Standpunktzahl von 60–70 bei der Erfassung eines einzelnen Schiffsdecks führen kann. Durch die in diesem Beitrag vorgestellten Erneuerungen und Entwicklungen ist eine Verkürzung der Erfassungsdauer von bis zu 70 % möglich.

Weitere Aufgabenfelder sind beispielsweise eine echtzeitnahe Prozessierung der Daten, welche dem Operateur vor Ort die Möglichkeit gibt, die Qualität und die Vollständigkeit zeitnah zu bewerten. Des Weiteren sind weitere Plattformen denkbar, wie z. B. UAV oder Tragesysteme, um eine möglichst optimale Objekterfassung unter unterschiedlichsten örtlichen Begebenheiten zu ermöglichen.

6 DANKSAGUNG

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Alle Autoren bedanken sich beim gesamten Konsortium für die Unterstützung bei den vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Diese sind Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekts „Exakte

und schnelle Geometrieerfassung sowie Datenauswertung von Schiffsoberflächen für effiziente Beschichtungsprozesse – FINISH“.

LITERATUR

Buchholz, H.; Reiter, K. (2010): OFIN – Optimierung und Beurteilung des Oberflächenfinishes im Yachtbau. In: Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik. Tagungsband der Statustagung 2010. Schriftenreihe Projektträger Jülich. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 71–88.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Industrie 4.0 – Digitale Transformation in der Industrie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html> (09.07.2021).

Dorndorf, A.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I.; Hesse, C. (2015): Validierung und Kalibrierung eines TLS-basierten Multi-Sensor-Systems. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015. Wichmann, Berlin/Offenbach, 85–97.

Ehm, M.; Hesse, C. (2012): Entwicklung eines kinematischen Laserscansystems für Anwendungen im Schiffbau. In: Go-3D 2012, Computergraphik für die Praxis. Rostock, 31–36.

Ehrhorn, A. (2019): Unsicherheitsmodellierung eines k-TLS basierten Multi-Sensor-Systems. Unveröffentlichte Masterarbeit, Geodätisches Institut, Universität Hannover.

Gierschner, F.; Kenneweg, R.; Ambrosat, T.; Geist, M.; Böß, V.; Hartmann, J.; Flügge, W.; Denkena, B. (2021): Automatisierte Modellierung als Beitrag für die Qualitätssicherung in der industriellen Produktion. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 128(2021)4.

Gräfe, G. (2008): Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation, Institut für Geodäsie, Universität der Bundeswehr München. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München 84/2009. Neubiberg.

Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Strübing, T.; Neumann, I. (2017): Determination of Position and Orientation of LiDAR Sensors on Multisensor Platforms. In: Journal of Surveying Engineering 143(2017)4.

Hartmann, J.; Trusheim, P.; Alkhatib, H.; Paffenholz, J.-A.; Diener, D.; Neumann, I. (2018): High Accurate Pointwise (Geo-)Referencing of a k-TLS Based Multi-Sensor-System. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4, 81–88.

Hartmann, J.; Gösseln, I. von; Schild, N.; Dorndorf, A.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2019): Optimisation of the calibration process of a k-tls based multi-sensor-system by genetic algorithms. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13, 1655–1662.

Heinz, E.; Eling, C.; Wieland, M.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2016): Development of a Portable Mobile Laser Scanning System with Special Focus on the System Calibration and Evaluation. In: Proceedings of the 5th International Conference on Machine Control and Guidance (MCG), October 5–6, 2016, Vichy, France.

Heinz, E.; Eling, C.; Wieland, M.; Klingbeil, L. M.; Kuhlmann, H. (2017): Analysis of different reference plane setups for the calibration of a mobile laser scanning system. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2017. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz. Wichmann, Berlin/Offenbach, 131–146.

Heinz, E.; Holst, C.; Kuhlmann, H.; Klingbeil, L. (2020): Design and Evaluation of a Permanently Installed Plane-Based Calibration Field for Mobile Laser Scanning Systems. In: Remote Sensing 12(2020)3. DOI: 10.3390/rs12030555.

Hesse, C. (2007): Hochoflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, 608. München.

Hexagon Metrology (2014): Produktbroschüre Leica Absolute Tracker AT960. <https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960> (13. 12. 2020).

Hexagon Metrology (2013): Systemspezifikationen für mobile KGM. <https://metrology.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=9158> (04.01.2020).

JCGM (1995): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections, ISO/IEC Guide 98-3). Joint Committee for Guides in Metrology, Bureau International des Poids et Mesures.

Jian, Z.; Ravani, B. (2016): Bore-sight Calibration of Mobile Laser Scanner Using an External Fixture. In: Journal of Applied Geodesy 10(2016)3, 175–183.

Keller, F. (2016): Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden (Dissertation). Shaker, Aachen.

Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the rangitikei canyon (n-z). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82(2013), 10–26.

Le Scouarnec, R.; Touzé, T.; Lacambre, J. B.; Seube, N. (2014): A new Reliable Bore-sight Calibration Method for Mobile Laser Scanning Applications. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W1, 67–72.

Leica Geosystems AG (2016): Datenblatt Leica ProScan. https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_proscan_ds.ashx?la=en (01. 12. 2020).

Luhmann, T. (2020): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter, Berlin/Boston. <https://doi.org/10.1515/9783110607253>.

Mettenleiter, M.; Härtl, F.; Kresser, S.; Fröhlich, C. (2015): Laserscanning: Phasenbasierte Lasermetestechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung. Moderne Industrie, München.

NavVis GmbH (2020): Datenblatt NavVis VLX. <https://www.navvis.com/resources/brochures/navvis-vlx> (17. 12. 2020).

Paffenholz, J.-A. (2012): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors. PhD thesis, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, 689. München.

Pentzenrieder, K. (2005): Sensor fusion using the kalman filter. <http://campar.in.tum.de/Chair/KalmanFilter> (11. 12. 2020).

Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2017): A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. In: Sensors 17(2017)8, 1886. DOI: 10.3390/s17081886.

Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2020): High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications – Approaches of Quality Assessment. In: Remote Sensing 12(2020)2, 290. DOI: 10.3390/rs12020290.

Strübing, T.; Neumann, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 138(2013)3, 210–221.

Trimble Applanix (2019): Datenblatt Trimble Indoor Mobile Mapping Solution (TIMMS). https://www.applanix.com/downloads/products/specs/TIMMS_Datasheet_DE_A4.pdf (14.01.2021).

Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 125(2017), 146–155.

Zoller + Fröhlich GmbH (2010): Technisches Datenblatt IMAGER 5010. https://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Broschueren/Broschure_IMAGER_5010_de_comp.pdf (22. 11. 2020).

Dipl.-Ing. Jens Hartmann

LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
GEODÄTISCHES INSTITUT (GIH)

Nienburger Str. 1 | 30167 Hannover
hartmann@gih.uni-hannover.de



Ing. Aaron Bachmann

FR. LÜRSEN WERFT GMBH & CO. KG

Industriestraße 9 | 27809 Lemwerder
aaron.bachmann@luerssen.de



Dr.-Ing. Bernhard Urban

FR. LÜRSEN WERFT GMBH & CO. KG

Industriestraße 9 | 27809 Lemwerder
bernhard.urban@luerssen.de



Dr.-Ing. Christian Hesse

DR. HESSE UND PARTNER INGENIEURE

Veritaskai 6 | 21079 Hamburg
ch@dipi.com



Dipl.-Ing. Fabian Gierschner

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR
GROSSSTRUKTUREN IN DER
PRODUKTIONSTECHNIK IGP

Albert-Einstein-Straße 30 | 18059 Rostock
fabian.gierschner@igp.fraunhofer.de



Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann

LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
GEODÄTISCHES INSTITUT (GIH)

Nienburger Str. 1 | 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de



Manuskript eingereicht: 29.04.2021 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet



gis.Radio

hier gibt's GIS auf's Ohr!

Der Geo-IT-Podcast.

Immer hintergründig, immer aktuell, mit Beiträgen, Reportagen und Interviews.

**Jetzt
reinhören:**
[www.gispoint.de/
gisradio](http://www.gispoint.de/gisradio)

www.gispoint.de/gisradio

