

# Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen aktueller terrestrischer Laserscanner im Labor und im Feld<sup>1</sup>

## Investigations into the Geometric Accuracy of Latest Terrestrial Laser Scanners in the Laboratory and in the Field

Thomas P. Kersten, Maren Lindstaedt, Mathias Stange

Dieser Beitrag fasst die geometrischen Untersuchungen aktueller terrestrischer Laserscanner an der HafenCity Universität Hamburg zusammen und gibt einen Überblick über das geodätische Genauigkeitspotenzial der Scanner neuester Generation. Für die Untersuchungen werden drei verschiedene voneinander unabhängige Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner zur Untersuchung der geometrischen Genauigkeit unter Laborbedingungen vorgestellt: a) Streckenmessgenauigkeit zu S/W-Zieltafeln und Kugeln auf der 20-m-Komparatorbahn, b) Vergleich von Raumstrecken im 3D-Testfeld auf S/W-Zieltafeln und c) Untersuchung der Ebenheitsabweichung in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634 /VDI/VDE 2002/ auf eine ebene Steinplatte. Die Referenzmessungen wurden sowohl mit der Totalstation Leica TS60 als auch mit dem Lasertracker Leica AT960 realisiert. Die Ergebnisse der geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen im Labor zeigen für fast alle Scanner sehr geringe Abweichungen im Bereich von 1–2 Millimetern, was den Herstellerangaben entspricht.

Zusätzlich wurden fünf Laserscanner in Anlehnung an das DVW-Merkblatt 7-2014 zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern im Außengelände der HafenCity Universität Hamburg getestet. Für die Durchführung des sogenannten Feldprüfverfahrens wurden ausschließlich die Standardausrüstung und -software der beiden Hersteller verwendet. Das gesamte Feldprüfverfahren inklusive Datenerfassung und Auswertung konnte innerhalb von jeweils vier bis fünf Stunden umgesetzt werden. Bei allen Messsystemen konnten erwartungsgemäß keine signifikanten Distanz- bzw. Winkelabweichungen festgestellt werden, sodass die geprüften Laserscanner unter Berücksichtigung des erfassten Messvolumens als einsatztauglich bezeichnet werden können.

**Schlüsselwörter:** 3D-Testfeld, Ebenheitsabweichung, Feldprüfverfahren, Streckenmessgenauigkeit, VDI/VDE 2634

*This paper summarizes the geometrical investigations of current terrestrial laser scanners at the HafenCity University Hamburg and gives an overview of the geodetic accuracy potential of the latest generation of scanners. Three different independent test methods are presented to investigate geometric accuracy of terrestrial laser scanners under laboratory conditions: (a) distance measurement accuracy to B/W targets and spheres on the 20 m comparator track, (b) comparison of spatial distances in the 3D test field on*

<sup>1</sup> Überarbeitete und ergänzte Fassung des Beitrags für die Oldenburger 3D-Tage 2020.

*B/W targets and (c) investigation of the flatness measurement error following the guideline VDI/VDE 2634 /VDI/VDE 2002/ on a flat stone slab. The reference measurements were realized with the Leica TS60 total station as well as with the Leica AT960 laser tracker. The results of the geometric accuracy tests in the laboratory show very small deviations in the range of 1–2 millimetres for almost all scanners, which corresponds to the manufacturer's specifications.*

*In addition, five laser scanners were tested in accordance with DVW instruction sheet 7-2014 for standardised testing of terrestrial laser scanners in the outdoor area of HafenCity University Hamburg. For the execution of the so-called field test procedure, only the standard equipment and software of the respective manufacturers were used. The entire field test procedure, including data acquisition and evaluation, was completed within four to five hours. As expected, no significant distance or angle deviations were detected in any of the measurement systems, so that the tested laser scanners are ready-to-use, taking into account the measurement volume recorded.*

**Keywords:** 3D test field, flatness measurement error, field test procedure, distance measurement accuracy, VDI/VDE 2634

## 1 EINLEITUNG

Der Einsatz von terrestrischen Laserscannern hat sich seit 15 Jahren im Berufsalltag der Geodäten etabliert. Die aktuellen Geräte gehören mittlerweile der vierten Generation an und sind hinsichtlich ihrer Genauigkeit kaum noch zu verbessern. Dennoch sollte die vom Hersteller angegebene Genauigkeit von Zeit zu Zeit überprüft werden, um eine entsprechende Angabe auch gewährleisten zu können.

Die HafenCity Universität Hamburg (HCU) beschäftigt sich seit 2004 mit der Untersuchung von terrestrischen Laserscanning-Systemen /Kersten et al. 2009/, /Lindstaedt et al. 2009, 2011, 2012/; seit 2016 ist am neuen Standort in der HafenCity ein genaueres Testfeld entstanden, das dem gesteigerten Genauigkeitsniveau der neuen Scanner als Referenz dienen kann. Dieses und die 20-m-Komparatorbahn werden neben der Lehre auch zur Untersuchung und Überprüfung verschiedener Laserscanner eingesetzt /Blaskow et al. 2018/. Einrichtungen, wie das Landeskriminalamt Hamburg, lassen ihre terrestrischen Laserscanner jährlich im Rahmen ihrer notwendigen Zertifizierungen an der HCU überprüfen. Neben der HCU beschäftigen sich auch weitere Hochschulen mit der Untersuchung von Laserscanner-Systemen. /Holst et al. 2018/ haben die diversen Testszenarien der verschiedenen Hochschulen zusammengestellt.

Zusätzlich zu den drei Untersuchungen im Labor wurde in den Jahren 2019 und 2020 auch das Feldprüfverfahren des DVW

gemäß Merkblatt Nr. 7 durchgeführt /Neitzel et al. 2014/, was ursprünglich auf die Publikation von /Gottwald 2008/ zurückgeht. Dieses Verfahren ist in seiner Erweiterung 2018 als ISO 17123-9 veröffentlicht worden, die mit diesem Teil 9 nun auch Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner berücksichtigt. Die Ergebnisse des Feldprüfverfahrens für die fünf untersuchten Laserscanner Z+F IMAGER 5016 (3x), Leica RTC 360 und Faro Focus<sup>3D</sup> X330 werden in Kapitel 4 vorgestellt. Aktuelle Publikationen zum Feldprüfverfahren gemäß DVW-Merkblatt gibt es nach Auffassung der Autoren nicht.

## 2 DIE UNTERSUCHTEN TERRESTRISCHEN LASERSCANNER

Für die Untersuchungen im Labor und im Feld standen im Jahr 2019 mit dem Z+F IMAGER 5016 vom Landeskriminalamt Hamburg (LKA) und dem Leica RTC360 vom Ingenieurbüro Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i) zwei aktuelle und innovative Systeme zur Verfügung (Abb. 1). Beide Geräte haben eine angegebene Distanzmessgenauigkeit von 1 mm + 10 ppm sowie eine Winkelgenauigkeit von 0,004° bzw. 0,005°. Während die Distanzmessung des IMAGER 5016 auf dem Phasenvergleichsverfahren basiert, kommt beim Leica RTC360 eine Kombination aus Phasendifferenz-

und Impulslaufzeitverfahren zum Einsatz. Durch weitere integrierte Sensorik, wie Neigungsmesser und Kamera, sowie umfangreiche Software sind die Systeme flexibel und effizient einsetzbar. Im Jahr 2020 wurden neben den zwei älteren Laserscannern Faro Focus<sup>3D</sup> X330 und IMAGER 5010 der HCU drei weitere IMAGER 5016 (2 × LKA und 1 × HCU) getestet. Die technischen Spezifikationen der untersuchten Scanner sind in Tab. 1 zusammengefasst.



Abb. 1 | Terrestrische Laserscanner Z+F IMAGER 5016 (links), Leica RTC360 (Mitte) und Faro Focus<sup>3D</sup> X330 (rechts)

Spezifikation	Z+F IMAGER 5016 /5010	Leica RTC360	Faro Focus <sup>3D</sup> X330
Distanzmessverfahren	Phase	Impuls & Phase	Phase
Gesichtsfeld H/V	360° / 320°	360° / 300°	360° / 300°
Scandistanz	0,3–365 m / 0,3–187 m	0,5–130 m	0,6–330 m
Scangeschwindigkeit	max. 1,1 Mio. Pkte./Sek.	bis zu 2 Mio. Pkte./Sek.	bis zu 1 Mio. Pkte./Sek.
Winkelgenauigkeit H/V	0,004° / 0,007°	0,005°	keine Angaben
Distanzgenauigkeit	1 mm + 10 ppm	1 mm + 10 ppm	2 mm + 0,3 mm @ 25 m
Auflösung	sechsstufig, von 1 ... 12 mm @ 10 m	dreistufig, 3 / 6 / 12 mm @ 10 m	keine Angaben
Entfernungsrauschen	0,3–0,5 mm @ 10 m	0,4 mm @ 10 m	0,3 mm @ 10 m
3D-Punktgenauigkeit	keine Angaben	5,3 mm @ 40 m	keine Angaben
Kamera	integriert	integriert	integriert
Neigungssensor	dynamischer Kompensator	inertiale Messeinheit	Zweiachskompensator
Abmessung (B×T×H)	150 × 258 × 328 mm / 170 × 286 × 395 mm	120 × 240 × 230 mm	240 × 200 × 100 mm
Gewicht	6,5 kg / 9,8 kg	5,4 kg	5,2 kg

Tab. 1 | Technische Spezifikationen der getesteten Laserscanner

### 3 GEOMETRISCHE GENAUIGKEITSUNTERSUCHUNGEN IM LABOR

#### 3.1 Das 3D-Testfeld

Das genutzte Testfeld wurde im Jahr 2016 im Neubau der HCU Hamburg im Geodätischen Labor eingerichtet. Im Gegensatz zum Testfeld am alten Standort /Kersten et al. 2009/, /Lindstaedt et al. 2009/, /Lindstaedt et al. 2011/, /Lindstaedt et al. 2012/ hat es ein signifikant kleineres Messvolumen und erstreckt sich nur über ein Stockwerk. Durch die Länge des Labors ergeben sich jedoch Referenzstrecken bis zu einer Länge von 35 m. Das Testfeld besteht aus 20 an den Wänden und an der Decke verteilten Messpunkten

(Abb. 3), die durch Punktnester realisiert sind. Für den Einsatz mit einem Laserscanning-System werden spezielle Adapter genutzt, die die Platzierung eines B/W-Targets auf dem Punktnest ermöglichen (Abb. 2). Um eine hochgenaue Referenzmessung zu realisieren, können Corner-Cube-Reflektoren zusammen mit einem Lasertracker genutzt werden. Die Untersuchung im 3D-Testfeld gibt eine Aussage über mehrere Fehleranteile eines Systems, die hier nicht separat bestimmt werden können. Neben der Distanz- und der Winkelgenauigkeit des Scanners beeinflusst auch der Algorithmus des Target-Fittings in der jeweiligen Software das Ergebnis. Daher ist es wichtig, die zum System zugehörige Software auch für die Auswertung des jeweiligen Datensatzes zu nutzen, um eine Aussage zum Gesamtsystem treffen zu können.



Abb. 2 | Terrestrische Laserscanner Z+F IMAGER 5016 (links) und Leica RTC360 (Mitte) im 3D-Testfeld, Zielzeichen (rechts)

Die Erfassung des Testfelds erfolgte für jeden Scanner von den jeweils vier gleichen Standpunkten aus (Abb. 3). Die Auflösung für den IMAGER 5016 und 5010 wurde auf high (6 mm @ 10 m) mit der Qualität balanced bzw. normal gesetzt, beim Faro Focus wurde die Auflösung auf 1/5 (7,7 mm @ 10 m) mit der Qualität 3x verwendet und beim RTC360 wurde für die Auflösung die höchste Stufe gewählt (3 mm @ 10 m). Durch auftretende Verdeckungen konnten nicht immer alle Targets in jedem Scan erfasst werden, aber meistens waren es zwischen 16 und 18 Zielzeichen. Die für die Auswertung zugrunde liegende Referenzmessung wurde mit einem Leica ATR 960 Lasertracker im Jahr 2019 durchgeführt. Die Targets wurden von jeweils drei verschiedenen Standpunkten erfasst, transformiert und anschließend gemittelt. Die Genauigkeit des Lasertrackers liegt laut Herstellerspezifikation bei  $U_{x,y,z} = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ . Somit lagen für die Auswertung Referenzkoordinaten in übergeordneter Genauigkeit vor.

Die anschließende Auswertung wurde in der jeweiligen Hersteller-Software Z+F LaserControl, Leica Cyclone Register 360 und Faro Scene durchgeführt. Das Target-Fitting ist in allen Programmen implementiert und wurde für die Daten der Z+F-Scanner und des Faro-Scanners automatisiert durchgeführt, während die Targets des RTC360 teilweise nachträglich noch angepasst bzw. korrigiert werden mussten. Von den maximal 760 Strecken für vier Standpunkte wurden 613 Strecken für den IMAGER 5016 und 666 Strecken für den RTC360 ausgewertet. Die aus den Koordinaten berechneten Strecken wurden mit den Strecken aus der Referenzmessung verglichen und die Differenzen in ein Häufigkeitsdiagramm eingetragen (Abb. 4). Bei beiden IMAGER 5016 ergibt sich ein von Null um +0,5 mm verschobenes Maximum mit einer ansonsten fast idealen und identischen Normalverteilung; die Spanne (als Summe der maximalen negativen und positiven Abweichung) der Werte liegt bei 3,9 mm bzw. 3,8 mm. Die Kurve des RTC360 ist dagegen etwas flacher und breiter, die Spanne ist mit 8,0 mm doppelt so groß. Dafür ist das Maximum nicht von Null verschoben, 160 Werte wurden hier zu Null klassifiziert. Eine Abweichung von max.  $\pm 1$  mm wurde für die IMAGER 5016 in 93,1 % bzw. 92,4 %, beim RTC360 in 77,6 %, beim IMAGER 5010 in 75,7 % und beim Faro Focus in 40,5 % aller Werte eingehalten. Der jeweils errechnete Mittelwert aus den Streckendifferenzen (Ist–Soll) zeigt nur eine geringe systematische Messabweichung des jeweiligen Messinstruments für den untersuchten Messbereich der Referenzstrecken an (Tab. 2). Die Referenzstrecken liegen in einem Bereich zwischen 1,8 m und 35,9 m (minimale und maximale 3D-Strecke). Die Scanner messen die Raumstrecken zwischen 0,3 mm im Mittel länger und –0,6 mm im Mittel kürzer (Tab. 2).

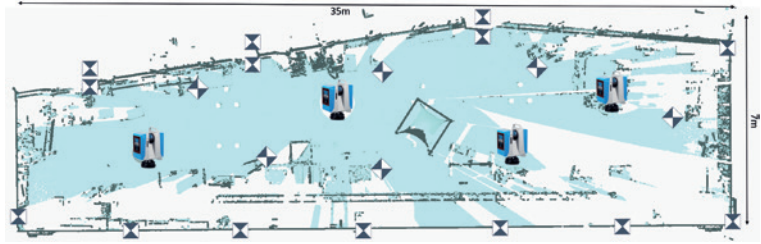


Abb. 3 | Verteilung der Zielzeichen und der Scanner-Standpunkte im 3D-Testfeld der HCU Hamburg

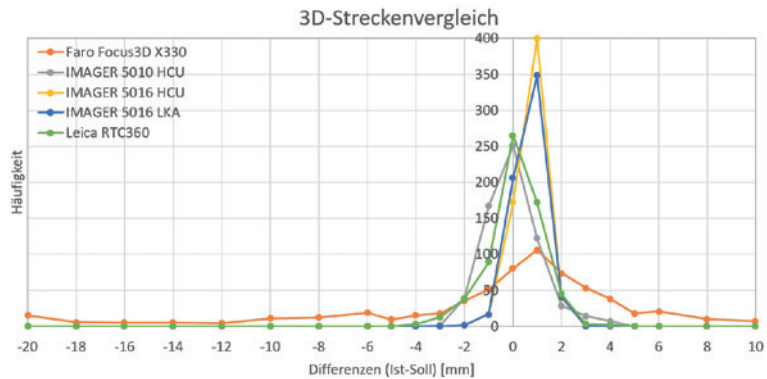


Abb. 4 | Ergebnisse des 3D-Streckenvergleichs im 3D-Testfeld

Streckenvergleich (3D)	ZF 5016 LKA	Faro Focus	ZF 5010 HCU	ZF 5016 HCU	RTC360
Anzahl Strecken	613	630	630	630	666
Minimum	-2,1 mm	-33,4 mm	-3,1 mm	-2,1 mm	-4,5 mm
Maximum	1,8 mm	23,9 mm	3,7 mm	1,7 mm	3,5 mm
Spanne	3,9 mm	57,3 mm	6,8 mm	3,8 mm	8,0 mm
Mittelwert	0,2 mm	-0,6 mm	-0,4 mm	0,3 mm	-0,3 mm
Stdbw. Mittelwert	0,4 mm	4,0 mm	0,8 mm	0,4 mm	0,8 mm
$S^{3D}$ in -1 ... +1 mm	93,1 %	40,5 %	75,7 %	92,4 %	77,6 %

Tab. 2 | Ergebnisse des 3D-Streckenvergleichs im 3D-Testfeld

### 3.2 Die 20-m-Komparatorbahn

Die Streckengenauigkeit wurde auf der 20-m-Komparatorbahn im Labor an der HCU Hamburg untersucht. Auf der Bahn lassen sich beliebige Strecken bis 20 m Länge realisieren und für die Messung aus einer Richtung mit dem Laserscanner und aus der anderen Richtung mit dem Referenzmesssystem bestimmen. Das B/W-Target bzw. die Kugel (199 mm Durchmesser) sind auf einem Schlitten montiert, ebenso ein Corner-Cube-Reflektor, zu dem die Referenzmessung erfolgt. Mit dem Schlitten werden Strecken von einem bis zu 20 m in Meterabständen realisiert. Der Messaufbau ist in Abb. 5 dargestellt.

Die Referenzstrecken wurden 2019 mit einer Leica TS60 Totalstation gemessen, die laut Hersteller eine Genauigkeit von 0,6 mm + 2 ppm bei Messung auf einem Corner Cube aufweist. 2020 wurden die Referenzstrecken mit dem Lasertracker Leica ATR 960 bestimmt. Für alle Scanner wurden jeweils zwei Durchgänge gemessen, einer auf das Target und einer auf die Kugel. Die

Auflösung der IMAGER 5016 und 5010 wurde jeweils auf high mit der Qualität normal gesetzt (6 mm @ 10 m), für den Faro Focus wurde die Auflösung 1/5 mit der Qualität 3x (7,7 mm @ 10 m) und für den RTC360 wurde die höchste Stufe (3 mm @ 10 m) gewählt. Während mit den IMAGER-Scannern und dem Faro Focus jeweils nur ein kleiner Ausschnitt mit dem Target erfasst wurde, musste aufgrund der nicht vorhandenen Funktionalität eines Ausschnitt-Scans beim RTC360 jedes Mal ein kompletter Panorama-Scan erfasst werden. Aufgrund der hohen Scangeschwindigkeit führte dies zwar nicht zu einer deutlich längeren Scandauer, doch die erfasste Datenmenge für alle drei Untersuchungen betrug mehr als das 100-fache gegenüber den IMAGER-Scannern. Dieses Datenvolumen zog dann zwangsläufig eine längere Datenbearbeitung nach sich.

Im Diagramm in Abb. 6 sind die Ergebnisse der Messungen auf das B/W-Target dargestellt. Alle Scanner weisen geringe Abweichungen zur Referenz zwischen -1,0 mm und +1,6 mm auf. Die Abweichungen des IMAGER 5016 (LKA) bewegen sich sowohl im positiven als auch im negativen Bereich um Null herum, was der Mittelwert von -0,07 mm bestätigt. Beim RTC360 (Mittelwert +0,5 mm), beim IMAGER 5016 (HCU) (Mittelwert +0,2 mm) und beim Faro Focus (Mittelwert +0,7 mm) hingegen sind die Abweichungen bis auf ein bis zwei Ausnahmen alle positiv, das heißt die Strecken sind generell minimal zu kurz. Nur der IMAGER 5010 weist Abweichungen tendenziell im negativen Bereich auf (Mittelwert -0,5 mm), d.h. die Strecken sind dann minimal zu lang gemessen.

Bei den Messungen auf die Kugeln als Zielzeichen sieht das Ergebnis etwas anders aus (Abb. 7), denn die Abweichungen sind bis auf ein paar Ausnahmen für alle Scanner tendenziell negativ. Beim IMAGER 5016 (LKA) sind alle Abweichungen negativ, d.h. die Strecken sind damit geringfügig zu lang gemessen. Beim RTC werden die Ergebnisse ab einer Entfernung von 15 m signifikant schlechter, denn bis dahin liegen sie im ähnlichen Bereich von

±1 mm. Ab 15 m werden die Abweichungen bis -3,2 mm groß, wobei zu vermuten ist, dass ein nicht ausreichend genaues Target-Fitting der Kugeln verantwortlich sein könnte, da dieses schwankende Ergebnisse lieferte und teilweise mehrfach angewandt werden musste. Der IMAGER 5016 (HCU) hat die geringsten Abweichungen mit einem Mittelwert von -0,05 mm.



Abb. 5 | Von links: Leica RTC360, Z+F IMAGER 5016, Leica TS60 (Referenzmesssystem 2019) sowie Zielzeichen und Kugel auf dem Schlitten

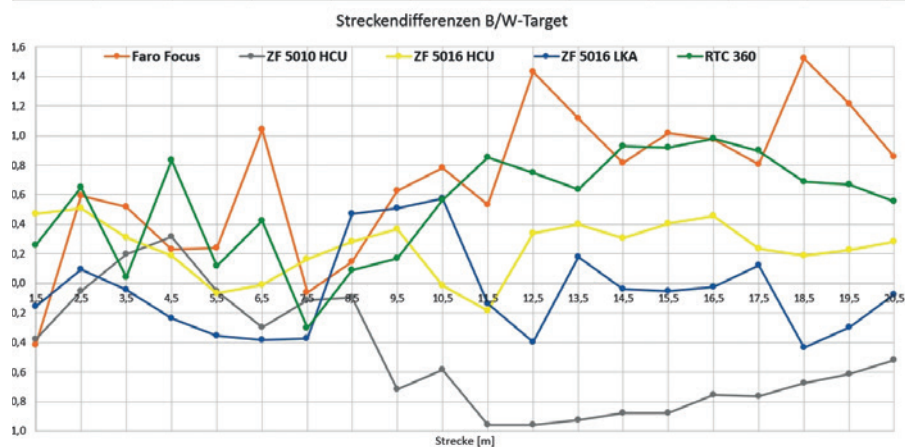


Abb. 6 | Streckenmessgenauigkeit auf der 20-m-Komparatorbahn bei Messungen jeweils auf ein B/W-Target

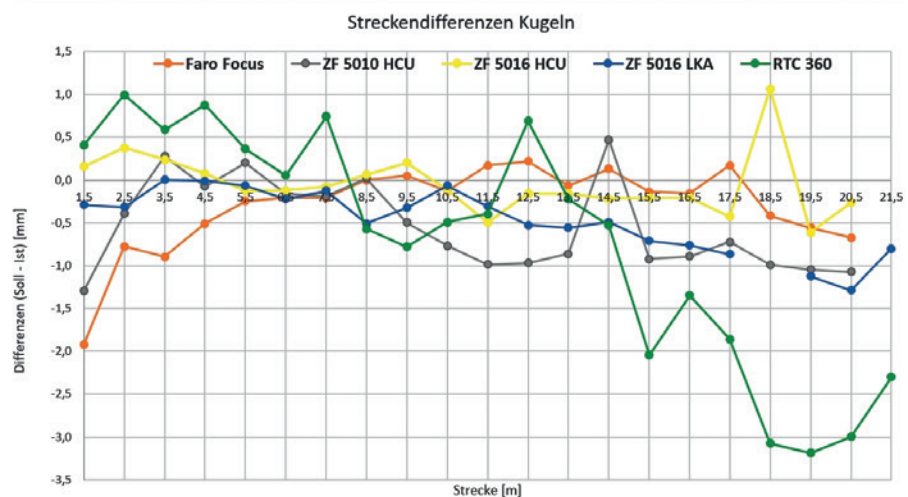


Abb. 7 | Streckenmessgenauigkeit auf der 20-m-Komparatorbahn bei Messungen jeweils auf eine Kugel (Durchmesser 199 mm)

### 3.3 Die ebene Steinplatte

Mit der Messung auf die Steinplatte wird nach VDI/VDE 2634 /VDI/ VDE 2002, Blatt 2/ die Ebenheitsmessabweichung bestimmt. Dabei werden die Spanne der vorzeichenbehafteten Abstände der Messpunkte betrachtet und die Standardabweichung der ausgeglichenen Ebene in den Messpunkten. Somit kann eine Aussage über das Messrauschen getroffen werden.

Die beiden Scanner IMAGER 5016 und Leica RTC 360 wurden in einer Entfernung von 9,5 m zur Steinplatte aufgestellt und für jedes Gerät wurden 2019 unter konstanten Laborbedingungen Scans in verschiedenen Auflösungen gemacht. Die zur Platte gehörenden Punkte wurden ausgeschnitten und es wurde eine Best-Fit-Ebene durch alle ungefilterten Punktwolken mit der Software GOM Inspect gerechnet.

Das Diagramm in Abb. 8 zeigt für den IMAGER 5016 (LKA) einen deutlichen linearen Zusammenhang zwischen steigender Auflösung (bzw. Punktzahl) und der Messabweichung. Die absolute Abweichung (Spanne der vorzeichenbehafteten Abstände der Messpunkte) steigt von 0,6 mm bei der niedrigsten Auflösung bis auf 1,7 mm für die höchste Auflösung. Da die Temperatur im Gerät konstant blieb, stellen die Abweichungen das Messrauschen des Instruments dar, die sich mit zunehmender Auflösung leicht erhöhen. Für den IMAGER 5016 (HCU) konnte ein sehr ähnliches Ergebnis mit einer absoluten Abweichung von 0,5 mm für die Auflösung middle und 1,5 mm für die Auflösung ultrahigh im Jahr 2020 bestätigt werden. Dieses Ergebnis ist jedoch in den Abb. 8 und Abb. 9 nicht mit dargestellt. Beim RTC360 hingegen sind die drei Ergebnisse der absoluten Abweichungen zwischen 2,3 mm und 2,5 mm nahezu

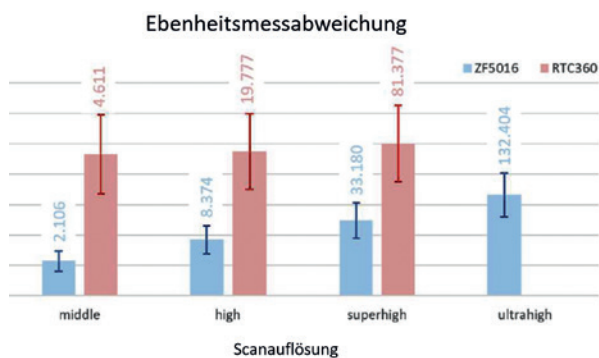


Abb. 8 | Ebenheitsmessabweichung mit Angabe der gemessenen Punktzahl

identisch bzw. systematisch konstant (Abb. 9). Die höhere Punktzahl für den RTC360 liegt vermutlich in dem kombinierten Messverfahren von Impuls- und Phasenvergleichsverfahren begründet. Die Standardabweichung des Z+F IMAGER 5016 ist mit max. 0,36 mm niedriger als die des RTC360 mit max. 0,65 mm, doch beide Geräte liegen deutlich unter 1 mm.

### 4 DAS FELDRÜFVERFAHREN

Die Überprüfung von terrestrischen Laserscannern im Labor oder im Testfeld ist eine Methode der Geräteüberprüfung, die nicht jedem Anwender möglich ist. Besonders Testfelder, die einen erhöhten Platzbedarf aufweisen, sind in erster Linie an Universitäten und Instituten zu finden, in kleineren Büros ist diese Möglichkeit oftmals nicht gegeben. Durch die Entwicklung des DVW-Merkblatts 07-2014 sind standardisierte Verfahren zur Überprüfung der Laserscanner geschaffen, die allen Anwendern möglich sind und einen begrenzten zeitlichen Aufwand erfordern. Dabei geht es um systematische Instrumentenabweichungen, die aus der Distanzmessung oder den Achsmechaniken resultieren /Neitzel et al. 2014/. Diese sind teilweise den Abweichungen eines Tachymeters identisch, lassen sich aber nicht durch eine Vollsatzauswertung eliminieren /Holst et al. 2019/. So ist das Verfahren nach DVW-Merkblatt herstellerunabhängig und gibt eine Möglichkeit, die Herstellerangaben mit den im Feldprüfverfahren erreichten Genauigkeiten zu vergleichen. Werden hierbei zu große Abweichungen festgestellt, empfiehlt sich die Einsendung des Geräts zur Kalibrierung, falls nicht vom Hersteller schon eine Möglichkeit der Eingabe von Korrekturwerten vorgesehen ist.

Nach den oben vorgestellten im Labor durchgeführten Untersuchungen wurden die beiden TLS-Systeme 2019 dem Feldprüfverfahren unterzogen, um einerseits ihre Einsatztauglichkeit nachzuweisen, und um andererseits die Methode des Feldprüfverfahrens an der HCU Hamburg umzusetzen und für zukünftige Untersuchungen einen geeigneten Aufbau an einem geeigneten Ort einzurichten. Im September 2020 wurden mit zwei IMAGER 5016 und einem Faro Focus<sup>3D</sup> X330 drei weitere Scanner durch das Feldprüfverfahren getestet.

Der Messaufbau wurde direkt vor dem Gebäude der HCU Hamburg an dem westlich gelegenen Henning-Voscherau-Platz durchgeführt. Hier sind die Gegebenheiten vorhanden, alle nach DVW-Merkblatt vorgegebenen Anforderungen weitestgehend einzuhalten,

Scanner	Auflösung	Auflösung @ 10 m	abs. Abweichung	Standardabweichung	Punkte
ZF5016	middle	12 mm	0,57 mm	0,17 mm	2 106
	high	6 mm	0,92 mm	0,23 mm	8 374
	superhigh	3 mm	1,23 mm	0,29 mm	33 180
	ultrahigh	1 mm	1,66 mm	0,36 mm	132 404
RTC360	middle	12 mm	2,33 mm	0,65 mm	4 611
	high	6 mm	2,37 mm	0,62 mm	19 777
	superhigh	3 mm	2,50 mm	0,63 mm	81 337

Abb. 9 | Ergebnisse der Ebenheitsmessabweichung (2019)

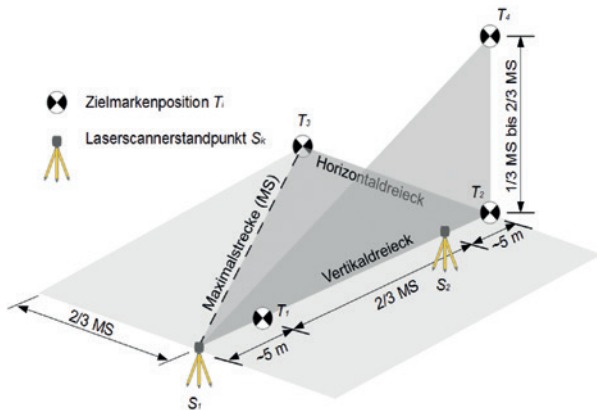


Abb. 10 | Schematischer Messaufbau des Feldprüfverfahrens (links, nach DWV-Merkblatt 07-2014) und Übersicht des Messaufbaus vor dem HCU-Gebäude (rechts)

denn sowohl der notwendige Platz für längere Horizontalstrecken als auch die Möglichkeit eines erhöht positionierten Targets für das Vertikaldreieck sind gegeben. Eine Übersicht der Örtlichkeit mit den installierten Targets (blaue Kreise) ist in Abb. 10 (rechts) zu sehen.

Die Durchführung der Messungen erfolgte für die Scanner im Jahr 2019 in jeweils ca. zwei Stunden und im Jahr 2020 in jeweils ca. drei Stunden, weil zusätzlich sechs Zielzeichen rechtwinklig zum Standpunkt 1 im Abstand von 5 bis 30 m für die Bestimmung von  $u_T$  gescannt wurden. Für jeden Standpunkt wurden die Zielmarken jeweils viermal gemessen, wobei für die Auflösung die großen Streckenlängen berücksichtigt wurden. Somit wurde mit dem Leica RTC360 jeweils die höchste Auflösungsstufe (3 mm @ 10 m) gewählt und ein Rundumscan durchgeführt, beim IMAGER 5016 hingegen wurden nach einem Panoramascan nur Ausschnittscans der Targets mit der höchsten Auflösung von 1 mm auf 10 m Entfernung aufgenommen. Für den Faro-Scanner erfolgten alle Scans als 360°-Scans mit den Parametern Auflösung 1/1 und Qualität 1x (1,5 mm @ 10 m, geringe Messrauschkompression), die jeweils ohne Farbaufnahme knapp 15 Minuten dauerten.

Nach Abschluss aller Messungen werden nur noch die Koordinaten der Targets aus allen Scans benötigt. Daher wurde in der jeweiligen Software das Target-Fitting durchgeführt und die ermittelten Target-Koordinaten wurden exportiert und in das standardisierte Excel-Formular eingegeben. Aus den Koordinaten wurden Strecken und schließlich Streckendifferenzen gebildet. Um die Signifikanz der auftretenden Differenzen zu beurteilen, musste für die untersuchten Geräte jeweils eine Messunsicherheit  $u_T$  der Zielmarkenzentren definiert werden. Während dieser Parameter 2019 für die beiden untersuchten Scanner aus Herstellerangaben abgeleitet wurde, konnte die Messunsicherheit  $u_T$  2020 für die drei Scanner rechnerisch aus Mehrfachmessungen der Zielmarkenzentren und einer resultierenden Standardabweichung der Zielmarkenzentrumskoordinaten ermittelt werden (Tab. 3). Aus der Unsicherheitsgröße  $u_T$  wird die Vergleichsgröße der Streckendifferenzen mit  $u_\Delta = 4 \times u_T$  zur endgültigen Beurteilung des Geräts abgeleitet (Tab. 3).

Die Ergebnisse des Feldprüfverfahrens sind für die fünf untersuchten Scanner gemäß Berech-

nungsformular des DWV-Merkblatts in Tab. 3 zusammengestellt. Für die drei IMAGER 5016 beträgt die Differenz  $\Delta_{1,2}$   $-1,7$  mm,  $-2,4$  mm und  $-2,1$  mm und liegt damit deutlich jeweils unter der Vergleichsgröße (2,3 mm / 8,0 mm / 4,4 mm) für alle Entfernungen. Somit ist keine signifikante Streckenabweichung festzustellen. Für die Differenzen  $\Delta_{1,4}$  und  $\Delta_{3,4}$  sind zwischen  $-0,2$  mm und  $-3,0$  mm ebenfalls nur geringe Abweichungen zu erkennen und somit keine signifikanten Fehler in der Winkelmessung zu detektieren.

Der RTC360 liefert für die Differenz  $\Delta_{1,2}$  mit 6,0 mm den höchsten Wert aller Scanner, allerdings stellt dieser Wert dennoch keinen Hinweis auf eine Streckenabweichung dar, weil die entscheidende Vergleichsgröße den gleichen Wert hat. Die Differenzen  $\Delta_{1,4}$  und  $\Delta_{3,4}$  sind mit 3,0 mm und 0,2 mm deutlich geringer und zeigen ebenfalls keine Fehler in der Winkelmessung an.

Beim Faro X330 sind die Streckendifferenzen  $\Delta_{1,2}$  und  $\Delta_{1,4}$  im Niveau der beiden 2020 getesteten IMAGER 5016, jedoch die Differenz  $\Delta_{3,4}$  ist mit 11,1 mm die höchste aller Scanner. Dennoch gibt die konstante und systematische Distanzmessabweichung  $\Delta_{\text{Messabw.}}$  mit 1,1 mm ( $\Delta_{1,2}/2$ ) keinen Hinweis auf eine Streckenabweichung, da die Vergleichsgröße einen hohen Wert von 13,2 mm aufweist.

Parameter	Z+F 5016 LKA (2019)	RTC360 2019	Faro Focus X330	Z+F 5016 GT17	Z+F 5016 GT18
$u_T$	0,6 mm	1,5 mm	3,3 mm	2,0 mm	1,1 mm
$u_\Delta$	2,4 mm	6,0 mm	13,2 mm	8,0 mm	4,4 mm
$\Delta_{1,2}$	-1,7 mm	6,0 mm	2,2 mm	-2,4 mm	-2,1 mm
$\Delta_{1,3}$	0,1 mm	5,2 mm	3,1 mm	-3,0 mm	-2,0 mm
$\Delta_{1,4}$	-0,2 mm	3,0 mm	3,1 mm	-3,0 mm	-1,5 mm
$\Delta_{2,3}$	-6,2 mm	0,8 mm	2,6 mm	-3,1 mm	-3,7 mm
$\Delta_{2,4}$	2,1 mm	3,8 mm	3,3 mm	0,4 mm	0,5 mm
$\Delta_{3,4}$	-2,2 mm	0,2 mm	11,1 mm	-2,9 mm	0,5 mm
$\Delta_{\text{Messabw.}}$	-0,8 mm	3,0 mm	1,1 mm	-1,2 mm	-1,1 mm

Tab. 3 | Ergebnisse des Feldprüfverfahrens von fünf verschiedenen Scannern (2019, 2020) gemäß Berechnungsformular des DWV-Merkblatts – Messunsicherheit  $u_T$ , Vergleichsgröße  $u_\Delta$ , Streckendifferenzen  $\Delta_{i,j}$  und konstante, systematische Distanzmessabweichung  $\Delta_{\text{Messabw.}}$ .

Zudem werden im Berechnungsformular keine Fehler in der Winkelmessung angezeigt.

Die Überprüfung der Laserscanner durch das Feldprüfverfahren hat ergeben, dass alle Scanner einsatztauglich sind und dass mit den ermittelten Streckendifferenzen keine signifikanten Strecken- und Winkelabweichungen bei allen Instrumenten vorliegen.

### FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurden erfolgreiche Untersuchungen im Labor und im Feld für aktuelle terrestrischen Laserscanner vorgestellt. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigen für alle Scanner ein hohes Genauigkeitsniveau, die den Herstellerangaben entsprechen. Dabei konnten mit dem Z+F IMAGER 5016 erstmals auch drei Laserscanner desselben Typs untersucht und verglichen werden. In den Untersuchungen wurden sehr gute Genauigkeiten für den Z+F IMAGER 5016 (LKA) erzielt, der in allen Testszenarien 2019 im Labor (3D-Testfeld, 20-m-Komparatorbahn und ebene Steinplatte) etwas besser als der Leica RTC360 abschnitt. Die Ergebnisse gelten zwar nur für die untersuchten Instrumente, doch sie wurden im Fall vom IMAGER 5016 mit dem Instrument der HCU 2020 bestätigt. Das Ergebnis des Scanners Faro Focus<sup>3D</sup> X330 im 3D-Testfeld fällt gegenüber den anderen Scannern deutlich schlechter aus. Generell werden bei den Untersuchungen die Laserscanner als Gesamtsystem, bestehend aus Hard- und Software (mit den entsprechenden Auswertelgorithmen), betrachtet.

Im Feldprüfverfahren wurden neben den terrestrischen Laserscannern Z+F IMAGER 5016 und Leica RTC360 im Jahr 2019 zwei weitere Z+F IMAGER 5016 und ein Faro Focus<sup>3D</sup> X330 im Jahr 2020 getestet. Das Feldprüfverfahren hat für alle Scanner jeweils einen halben Tag in Anspruch genommen. Dabei war für den erforderlichen Messaufbau gemäß DVW-Merkblatt (horizontales und vertikales Dreieck, siehe Abb. 11) mit dem Henning-Voscherau-Platz vor dem HCU-Gebäude eine entsprechend geeignete Umgebung verfügbar, was jedoch in der Praxis nicht überall der Fall sein dürfte. Der Messaufbau für das Feldprüfverfahren konnte an diesem Platz bis auf die Parameter  $a_2$  und  $a_3$  weitestgehend eingehalten werden, wie man anhand der abgeleiteten Parameter aus den Scan-

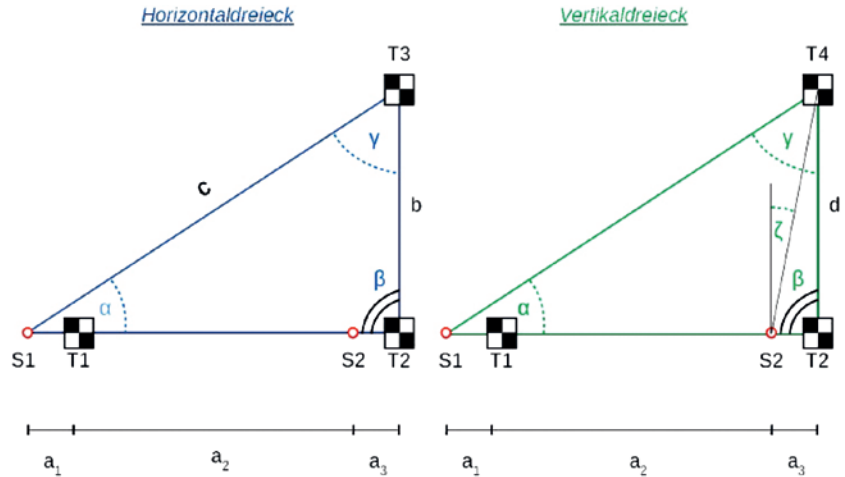


Abb. 11 | Unterteilung des schematischen Messaufbaus des Feldprüfverfahrens in Horizontal- (links) und Vertikaldreieck (rechts) zur Kennzeichnung der Parameter in Tab. 3

daten vom IMAGER 5016 (2019) in Tab. 4 erkennen kann. Die Ergebnisse des Feldprüfverfahrens zeigten für alle Scanner keine signifikanten Distanz- bzw. Winkelabweichungen, sodass damit die Einsatztauglichkeit nachgewiesen werden konnte. Da jedoch die Ergebnisse des Feldprüfverfahrens von der Messunsicherheit  $u_T$  bzw. von der Vergleichsgröße  $u_\Delta$  abhängen, wäre es wünschens-

Anforderungen gemäß DVW-Merkblatt		Messwerte	Check
Raumgerade	S1, T1, S2, T2 in Flucht	0,61 gon	✓
Horizontaldreieck	Rechter Winkel $\beta$ in T2	105,0 gon	✓
Vertikaldreieck ( $\beta \approx 90^\circ, \zeta \approx 30^\circ$ )	Rechter Winkel $\beta$ in T2	98,5 gon	✓
	Kippwinkel ( $\zeta$ ) in S2 zu T4	27,8 gon	✓
$a_1$	ca. 5 m	5,3 m	✓
$a_2$	$2/3 c = 31,7$ m	21,6 m	(✓)
$a_3$	ca. 5 m	8,6 m	(✓)
$b$	$2/3 c = 31,7$ m	29,2 m	✓
$c$	Maximalstrecke	47,6 m	-
$d$	$1/3 c$ bis $2/3 c = 15,9$ m bis 31,7 m	17,6 m	✓

Tab. 4 | Überprüfung des Messaufbaus für das Feldprüfverfahren anhand der Scandaten vom IMAGER 5016 aus dem Jahr 2019

Scanner	Test	# Standpkt.	# Scans	Scandauer	Daten
	20-m-Bahn, S/W-Target	1	20	56 min	0,3 GB
	20-m-Bahn, Kugel	1	21	29 min	0,4 GB
	3D-Testfeld	4	4	34 min	0,5 GB
	Steinplatte	1	4	8 min	0,1 GB
	20-m-Bahn, S/W-Target	21	21	49 min	59,7 GB
	20-m-Bahn, Kugel	21	21	48 min	59,7 GB
	3D-Testfeld	4	4	36 min	14,2 GB
	Steinplatte	1	3	5 min	3,7 GB

Tab. 5 | Generierte Datenmenge bei den Untersuchungen für zwei Scanner im Vergleich



wert, wenn die Systemhersteller diesen Wert eindeutig in ihren technischen Spezifikationen angeben würden.

Bei den Untersuchungen wurden auch kritische Aspekte festgestellt. Ein Export der ermittelten Zielmarkenkoordinaten konnte in Z+F LaserControl und in Faro Scene durchgeführt werden, während diese Option in Leica Cyclone Register 360 nicht vorhanden war. Außerdem wurden bei den verschiedenen Testszenarien unterschiedlich große Datenmengen erzeugt (Tab. 5). Während mit dem IMAGER 5016 eine Datenmenge von 1,3 GB erzeugt wurde, generierte der Leica RTC360 eine um den Faktor 100 größere Datenmenge von 137,3 GB.

Die Untersuchungen terrestrischer Laserscanner werden auch in Zukunft an der HCU Hamburg durchgeführt, da sie auch sehr gut in die Lehrveranstaltung „Terrestrisches Laserscanning 2“ des Masterstudiengangs Geodäsie und Geoinformatik eingebunden werden können. Eine regelmäßige Untersuchung derselben Scanner lässt dann auch Aussagen über die Langzeitstabilität der untersuchten Scanner zu.

## DANK

Die Autoren bedanken sich beim Landeskriminalamt Hamburg (Tatortrekonstruktion) für die Bereitstellung der IMAGER 5016 und die Unterstützung bei den Messungen. Dem Ingenieurbüro Dr. Hesse und Partner (dhp:i) gilt der Dank für die Ausleihe des RTC 360. Ein besonderer Dank geht an die drei HCU-Masterstudierenden Viviana Wöhnke, Timo Bendixen und Karl Leiseder für die Datenauswertung der Feldprüfverfahren und für die Aufnahmen und Messungen im Labor im Jahr 2020. Zudem bedanken wir uns bei Klaus Mechelke (HCU) für die Einmessung des Testfelds mit dem Lasertracker Leica ATR 960 im Jahr 2019.

## LITERATUR

Blaskow, R.; Lindstaedt, M.; Schneider, D.; Kersten, T. (2018): Untersuchungen zum Genauigkeitspotential des terrestrischen Laserscanners Leica BLK360. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, Berlin/Offenbach, 284–295.

Gottwald, R. (2008): Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners – A Contribution to a Future ISO Standard. FIG Working Week 2008, Stockholm, Schweden.

Holst, C.; Jurek, T.; Blome, M.; Marschel, L.; Petersen, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M.; Wehmann, W.; Wunderlich, T.; Wasmeier, P.; Wiedemann, W.; Kern, F.; Kuhlmann, H. (2018): Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten? In: Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018), Schriftenreihe des DVW 93 (Beiträge zum 177. DVW-Seminar am 14. und 14. Dezember 2018 in Fulda). Wißner, Augsburg, 9–40.

Kersten, T.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M.; Sternberg, H. (2009): Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (2009)4, 301–316.

Lindstaedt, M.; Graeger, T.; Mechelke, K.; Kersten, T. (2011): Terrestrische Laserscanner im Prüfstand – Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-400, Leica C10 und Faro Photon 120. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011. Wichmann, Berlin/Offenbach, 4–14.

Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T.; Sternberg, H. (2009): Phasen im Vergleich – Erste Untersuchungsergebnisse der Phasenvergleichsscanner FARO Photon und Trimble FX. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. Wichmann, Heidelberg, 53–64.

Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, Berlin/Offenbach, 264–275.

Neitzel, F.; Gordon, B.; Wujanz, D. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt 7-2014. <https://www.dvw.de/veroeffentlichungen/standpunkte/1149-verfahren-zur-standardisierten-ueberpruefung-von-terrestrischen-laserscannern-tls> (07.02.2021).

VDI/VDE (2002): Optische 3-D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. VDI/VDE-Richtlinie 2634, Blatt 2. Beuth, Berlin.

**Prof. Dr.-Ing. Thomas P. Kersten**

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG  
LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE  
& LASERSCANNING

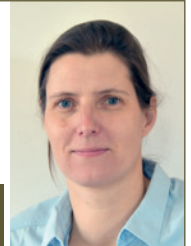
Henning-Voscherau-Platz 1 | 20457 Hamburg  
thomas.kersten@hcu-hamburg.de



**Dipl.-Ing. Maren Lindstaedt**

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG  
LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE  
& LASERSCANNING

Henning-Voscherau-Platz 1 | 20457 Hamburg  
maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de



**Mathias Stange, M. Sc.**

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG  
LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE  
& LASERSCANNING

Henning-Voscherau-Platz 1 | 20457 Hamburg  
mathias.stange@gmx.eu



Manuskript eingereicht: 06.12.2020 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet