

Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten?

Christoph Holst | Tobias Jurek | Martin Blome | Lars Marschel | Michael Petersen |
Thomas P. Kersten | Klaus Mechelke | Maren Lindstaedt | Wolffried Wehmann |
Thomas Wunderlich | Peter Wasmeier | Wolfgang Wiedemann | Fredie Kern |
Heiner Kuhlmann

1 Motivation und Zielsetzung von TLS-Prüffeldern

Die Genauigkeit der Messpunkte hängt beim terrestrischen Laserscanning (TLS) von einer Vielzahl von Faktoren und Einflüssen ab. Diese lassen sich in die Kategorien zufällige und systematische Abweichungen einteilen. Die Abweichungen werden verursacht durch scannerinterne Abweichungen, atmosphärische Bedingungen, die Messkonfiguration und die Objektoberfläche, die reflektorlos angemessen wird (Kuhlmann und Holst 2017). Die resultierende Größenordnung der Abweichungen ist u. a. auch abhängig vom Messprinzip des Laserscanners (inkl. genutzte Laserwellenlänge, Strahldivergenz) und den Einstellungen am Instrument (Messfrequenz, Mittelung etc.).

Die Abweichungen, die aufgrund von atmosphärischen Bedingungen, der Messkonfiguration und der Objektoberfläche wirken, hängen in erheblichem Maße von der beim Laserscan vorliegenden Messsituation ab: Wie groß sind die Messdistanzen, wie groß der Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Messoberfläche, welche Lufttemperatur und -feuchte liegt vor, aus welchem Material (Beton, Holz, Kunststoff, ...) besteht die Reflexionsfläche und wie ist sie beschaffen (Rauigkeit, Temperatur, Feuchte, ...)? Diese Größen beeinflussen fast ausschließlich die vom Laserscanner durchgeführte Distanzmessung. Die Winkelmessungen sind kaum vom Zielobjekt und seiner Ausrichtung beeinflusst; sie werden vom TLS in einem festen Raster eingestellt und zeitlich interpoliert und nicht im herkömmlichen Sinne gemessen, da keine Zielung erfolgt.

Dahingegen beschreiben scannerinterne Abweichungen die Messunsicherheit, die sich allein durch die hardware- und softwarebedingte Konstruktion des Laserscanners ergibt. Die hier zugrundeliegenden Abweichungen sind aus der Tachymetrie größtenteils bekannt: Horizontal- und/oder Vertikalwinkelmessungen werden durch Achsabweichungen (vor allem Zielachsabweichung, Kippachsabweichung, Höhenindexabweichung) beeinflusst, die Distanzmessung durch die Nullpunktabweichung und den Maßstab. Weitere Einflüsse, wie z. B. Achsexzentrizitäten oder periodische Distanzabweichungen, sind bei geo-

dätischen Laserscannern aufgrund ihrer geringen Beträge in der Regel nicht von Relevanz.

TLS-Prüffelder haben das Ziel, die Auswirkung dieser scannerinternen Abweichungen auf die Genauigkeit der Messpunkte oder daraus abgeleiteter Größen zu beschreiben und schlussendlich zu attestieren, ob das Instrument innerhalb seiner vom Hersteller beschriebenen Genauigkeit arbeitet. Die Notwendigkeit von TLS-Prüffeldern ergibt sich daraus, dass die Hersteller von terrestrischen Laserscannern unterschiedliche Kenngrößen angeben, um die Genauigkeit des Instruments näher zu spezifizieren. Dadurch ist die Vergleichbarkeit zwischen den Instrumenten verschiedener Hersteller erschwert, mitunter sogar nicht einmal zwischen verschiedenen Baureihen desselben Herstellers.

Die Messung und Auswertung im Rahmen einer TLS-Prüfung sollte möglichst standardisiert ablaufen, sodass Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Instrumenten vergleichbar sind. Prüfungen sollten auch weitestgehend ortsungebunden mit wenig Aufwand durchgeführt werden können. In diesem Zuge entstand z. B. das DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014), das ein standardisiertes Vorgehen als Feldprüfverfahren beschreibt, um zu ermitteln, ob der Laserscanner entsprechend seiner Genauigkeitsklasse funktionstüchtig ist oder nicht. Als mögliche Ursachen für zu hohe Abweichungen können gemäß des Prüffeldaufbaus Achsabweichungen oder die Nullpunktabweichung in Betracht kommen.

Bei den hier vorgestellten – überwiegend ortsgebundenen – Prüffeldern existieren hingegen Referenzpunkte, die bereits mit übergeordneter Genauigkeit koordiniert sind. Diese erlauben es zudem, große Maßstabsabweichungen und ggf. auch Abweichungen von der Lotrechten zu bestimmen. Diese Art von Prüffeldern, die vornehmlich auf der Berechnung von Abstandsabweichungen zwischen koordinierten Zielmarken im gesamten Messvolumen beruhen, sind beim ÖbVI Petersen, der HafenCity Universität Hamburg, der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, der Technischen Universität München, der Hochschule Mainz und der Universität Bonn installiert. Teilweise sind diese Prüfungen noch erweiterbar, um die Messgenauigkeit auch im Lokalen untersuchen zu können, z. B. mit Hilfe der Antastabweichung, Kugelradienabweichung und des Auflösungsvermögens. Diese Untersuchung im Lokalen wird im folgenden Beitrag jedoch nicht fokussiert.

Die o. g. Prüffelder existieren zum Teil erst wenige Jahre, mitunter aber auch seit ca. 15 Jahren. Teilweise wurden die TLS-Prüffelder aus kommerziellen Zwecken errichtet, teilweise aus wissenschaftlichen und teilweise auch aus Lehrzwecken, um Studierenden die Auswirkungen von Messabweichungen eingängiger erläutern zu können. Daraus ergibt sich, dass viele unterschiedliche Laserscanner einmalig, eine ganze Reihe von Scannern aber auch sehr oft geprüft wurde. Der vorliegende Artikel hat das Ziel, die aus diesen Prüfungen resultierenden

empirischen Ergebnisse gebündelt zu präsentieren. Damit verfolgen wir zwei Zwecke:

- Wir möchten die erreichbare Messgenauigkeit verschiedener Laserscanner miteinander vergleichen und beurteilen, ob die Herstellerangaben eingehalten werden bzw. ob sie gerechtfertigt sind.
- Wir möchten Auskunft geben, ob es zu Auffälligkeiten bei einzelnen Herstellern oder Baureihen gekommen ist.

Die für diese Analysen verwendeten empirischen Ergebnisse wurden nicht unmittelbar für diesen Beitrag erzeugt, sodass einzelne Hersteller und Baureihen überproportional oft geprüft wurden und manche gar nicht. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass einzelne Baureihen im Hochschulwesen und Ingenieurbüros häufiger im Einsatz sind als andere. Dennoch geben die in den folgenden Kapiteln diskutierten Ergebnisse einen guten Anhaltspunkt über das Genauigkeitspotenzial terrestrischer Laserscanner.

2 Beschreibung und empirische Ergebnisse der TLS-Prüffelder

2.1 Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation

2.1.1 Beschreibung des Prüffeldes

Das TLS-Prüffeld der Uni Bonn ist an das im DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014) beschriebene Feldprüfverfahren angelehnt. Demnach werden mehrere Zielzeichen von verschiedenen Standpunkten gescannt, die Strecken zwischen verschiedenen Zielzeichenkoordinaten berechnet und standpunktabhängige Abweichungen dieser Strecken herausgearbeitet. Als Erweiterung werden im vorliegenden Feldprüfverfahren

- eine größere Anzahl an Zielzeichen verwendet, was zu einer besseren räumlichen Verteilung führt,
- Sollstrecken eingebunden und
- es findet eine Zwei-Lagen-Messung und Auswertung statt, wenn der Scanner eine Zwei-Lagen-Messung zulässt.

Detailliertere Angaben zum Prüffeld sind in [Tab. 1](#) gegeben, [Abb. 1](#) zeigt das Prüffeld in der Aufsicht. Hierbei sind die TLS-Standpunkte mit SP1 und SP2 bezeichnet, die Zielpunkte ZP4 bis ZP6 sind Bolzen im Boden, über denen ein Zielzeichen zentriert wird und die Zielpunkte ZP1 bis ZP3 und ZP7 werden über Bolzen in der Häuserwand zentriert. Die Zielpunkte HP1 und HP2 sind Hochpunkte mit einer Höhe von ca. 16 m über Boden; diese werden ebenfalls über

Tab. 1: Steckbrief Prüffeld Uni Bonn

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Additionskonstante ▪ Zielachs-, Kippachs-, Höhenindex-abweichung
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lage 1 vs. Lage 2 bei Zielpunkten ▪ Lage 1 vs. Lage 2 bei Strecken zwischen Zielpunkten ▪ SP1 vs. SP2 bei Strecken zwischen Zielpunkten (pro Lage) ▪ Ist vs. Soll bei Strecken zwischen Zielpunkten (pro SP und Lage)
Berechnung von Kalibrierparametern	Nein
Zieldefinition	schwarz-weiße Tilt & Turn Targets
Anzahl an Zielpunkten	9
Vermarktungsart	Bolzen in Boden oder Wand
Referenzwerte vorhanden?	Ja
Anzahl Instrumentenstandpunkte	2
Geprüfte Zielweiten	5 m bis 45 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	30 gon bis 100 gon (Horizont)
Maximaler Höhenunterschied	15 m

Bolzen in der Häuserwand zentriert. Die Zielpunkte werden jeweils mit den beim Hersteller käuflichen schwarz-weißen Tilt & Turn Targets bestückt und die Zielzeichenzentren werden mit der Herstellersoftware geschätzt.

2.1.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Zur Prüfung, ob der Laserscanner die Genauigkeitsspezifikationen einhält oder nicht, werden die neun Zielzeichen von den zwei Standpunkten SP1 und SP2 in mehreren Vollsätzen gescannt und die Zielzeichenkoordinaten jeweils geschätzt. Anschließend werden die Raumstrecken zwischen verschiedenen Zielzeichen berechnet – insgesamt 36 Stück – und es wird herausgearbeitet, wie stark sich diese Raumstrecken unterscheiden, wenn sie

- von SP1 oder SP2 gemessen werden,
- in erster oder zweiter Lage gemessen werden oder
- mit einem Referenzinstrument (hier: Tachymeter) verglichen werden.

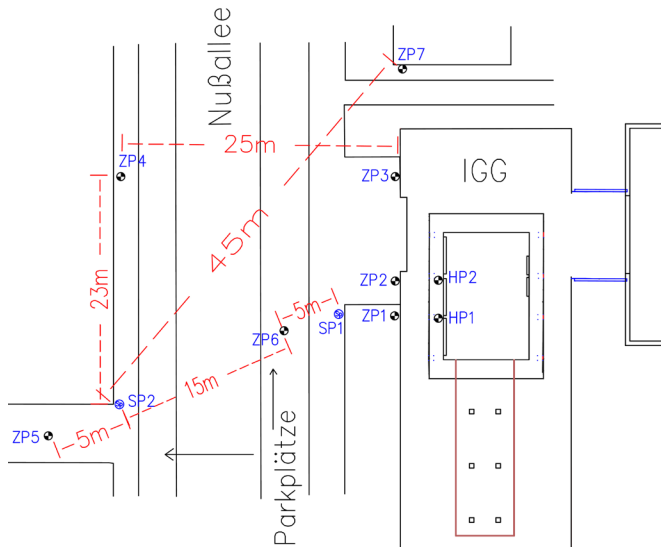


Abb. 1:
Skizze Prüffeld
Uni Bonn

Außerdem werden die Koordinaten des Zielpunktes zwischen einer Messung in erster und zweiter Lage unmittelbar miteinander verglichen. Zur Beurteilung, ob Abweichungen jeweils signifikant sind, wird jeweils eine Varianzfortpflanzung ausgehend von der Unsicherheit der Zielzeichenbestimmung berechnet und es wird von einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % ausgegangen. Die zugehörigen Gleichungen sind dem DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014) zu entnehmen.

2.1.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

Das Institut für Geodäsie und Geoinformation besitzt von Leica Geosystems einen HDS6100, eine ScanStation P20 und einen BLK360. Diese drei Geräte wurden in einem Praktikum des Studiengangs B. Sc. Geodäsie und Geoinformation insgesamt 30-mal auf dem o. g. TLS-Prüffeld untersucht (8-mal HDS6100, 16-mal P20, 6-mal BLK360). Tab. 2 beschreibt die Ergebnisse, wobei wir uns der Übersicht halber jeweils auf eine der in Tab. 1 genannten Prüfgrößen beschränken.

Aus Tab. 1 geht hervor, dass die ausgewählten Prüfgrößen beim geprüften HDS6100 in den Jahren 2016/2017 im Mittel eingehalten werden (siehe auch Abb. 2), nur einzelne Prüfungen aus diesen Jahren zeigen hin und wieder eine Abweichung auf, die zu hoch ist. Daher sollte eine Prüfung bei Auffälligkeiten immer wiederholt werden. Im Jahr 2018 ist der Laserscanner gestürzt, was an den Prüfergebnissen aus 2018 auch ersichtlich wird: Diese Ergebnisse deuten

darauf hin, dass erhebliche Achsabweichungen vorliegen, sodass die Messgenauigkeit des Laserscanners signifikant schlechter als vom Hersteller spezifiziert ist. Der Laserscanner sollte zur Qualitätssicherung kalibriert werden.

Die ScanStation P20 weist zwischen den Jahren keine unterschiedlichen Ergebnisse auf (Abb. 3) und alle Werte – auch die der einzelnen Prüfungen – liegen innerhalb der erlaubten Messgenauigkeit. Der Laserscanner ist somit funktions-tüchtig.

Gleiches gilt für den BLK360 (Abb. 4). Da der BLK360 nicht in zwei Lagen messen kann, stellen wir hier die Differenz zwischen den Zielzeichenstrecken dar, die durch das Scannen von unterschiedlichen Standpunkten entstehen. Zwar sind diese Differenzen deutlich höher als bei den vorherigen Scannern, sie streuen aber zufällig. Dies deutet also darauf hin, dass der Scanner generell eine niedrigere Genauigkeit als die ScanStation P20 und der HDS6100 hat, was einerseits vom Hersteller auch angegeben wird und was andererseits aufgrund seines Verkaufspreises und seiner vorgesehenen Einsatzbestimmung nicht verwundert.

Tab. 2: Ergebnisse Prüffeld Uni Bonn

Prüfling	Leica HDS6100	Leica ScanStation P20	Leica BLK360
# Prüfungen	8	16	6
Ausgewählte Prüfgröße	Lage 1 vs. Lage 2 bei Zielpunkten (Abb. 2)	Lage 1 vs. Lage 2 bei Zielpunkten (Abb. 3)	SP1 vs. SP2 bei Strecken zwischen Zielpunkten (Abb. 4)
Mittlere absolute Abweichung	0,5 bis 8 mm (2016/17) 1 bis 13 mm (2018)	0,5 bis 4,5 mm	2 bis 11 mm
Höchste absolute Abweichung	12 mm (2016/17) 15 mm (2018)	5 mm	19 mm
Zulässige Abweichung	5 mm	5 mm	> 20 mm
Ergebnis (grün, gelb, rot)	gelb (2016/17) rot (2018)	grün	grün
Hinweise auf systematische Abweichungen	Achsabweichungen seit 2018 nach Sturz	Nein	Nein

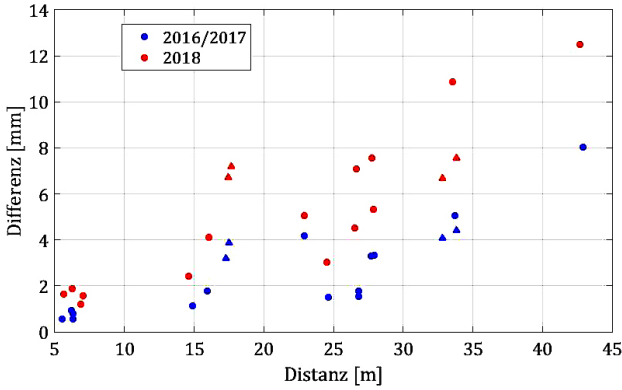


Abb. 2: Differenz zwischen der Zielzeichenkoordinate aus erster und zweiter Lage beim HDS6100, sortiert nach der gemessenen Distanz. Hochpunkte sind als Dreiecke gekennzeichnet.

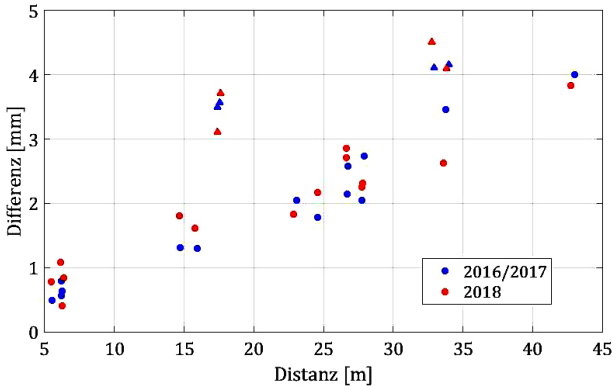


Abb. 3: Differenz zwischen der Zielzeichenkoordinate aus erster und zweiter Lage bei der P20, sortiert nach der gemessenen Distanz. Hochpunkte sind als Dreiecke gekennzeichnet.

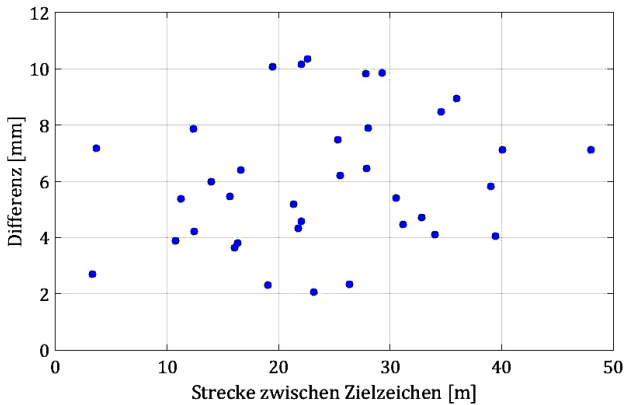


Abb. 4: Differenzen zwischen den Zielzeichenstrecken, aufgenommen von SP1 und SP2, gemittelt über sechs Prüfungen

2.1.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Aus den dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass die drei getesteten Scanner innerhalb der vom Hersteller proklamierten Genauigkeit arbeiten. Für den Leica HDS6100 gilt dies nur bis zum Jahr 2018, da er zu diesem Zeitpunkt durch einen Sturz beschädigt wurde. Dies konnte mit Hilfe des TLS-Prüffeldes zuverlässig aufgedeckt werden. Wir gehen von erheblichen Achsabweichungen aus, die zu kalibrieren sind. Für die Leica P20 konnten wir durch eine große Anzahl an Prüfungen Differenzen zwischen erster und zweiter Lage von im Mittel maximal 5 mm bei Distanzen bis 45 m feststellen, was sicher innerhalb der Spezifikationen des Herstellers liegt. Auch der BLK360 zeigt keine Auffälligkeiten auf, bei Streckendifferenzen von im Mittel maximal 11 mm.

2.2 ÖbVI Petersen, Gelsenkirchen

2.2.1 Beschreibung des Prüffeldes

Das Prüffeld (Abb. 5) der Firma ÖbVI Petersen befindet sich auf dem Innenhofparkplatz der Firma und wurde im Zuge der Diplomarbeit von Eva Feldmann 2011 aufgebaut. Es besteht aus fünf bodennahen Zielpunkten (ZP1–ZP6),

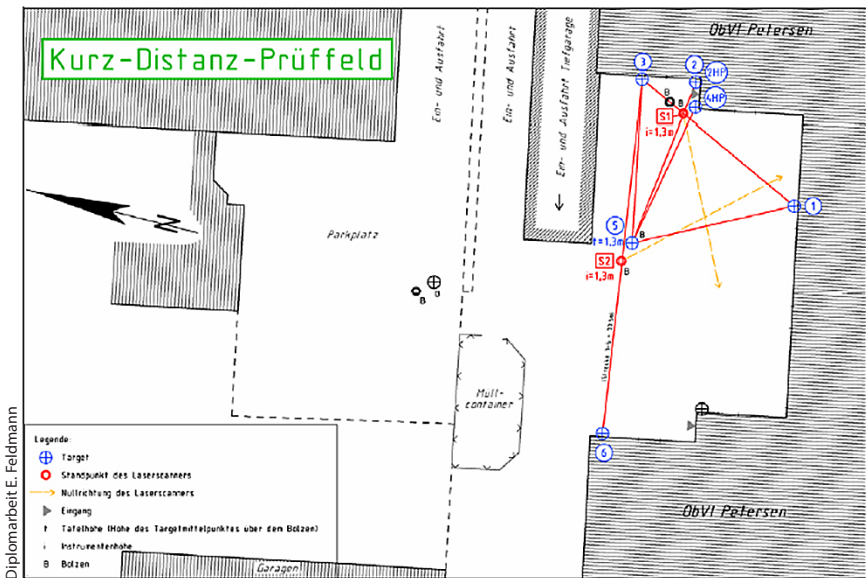


Abb. 5: Skizze Prüffeld

Tab. 3: Steckbrief Prüffeld ÖbVI Petersen

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maßstabsabweichung ▪ Additionskonstante ▪ Zielachsabweichung ▪ Kippachsabweichung ▪ Höhenindexabweichung
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lage 1 vs. Lage 2 bei Strecken zwischen Zielpunkten ▪ Schrägstreckenvergleich 1. und 2. Lage vs. Sollstrecke
Berechnung von Kalibrierparametern	nein
Zieldefinition	schwarz-weiße Tilt & Turn Targets
Anzahl an Zielpunkten	7
Vermarktungsart	Bolzen für Adapter in Hauswand
Referenzwerte vorhanden?	Ja
Anzahl Instrumentenstandpunkte	2
Geprüfte Zielweiten	1,9 m bis 20 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	ca. 100 gon und 190 gon
Maximaler Höhenunterschied	ca. 8,5 m

zwei hochgelegenen Zielen (2HP und 4HP, ca. 8,5 m hoch) und zwei Scannerstandpunkten SP1 und SP2. Die Zielpunkte werden mit Tilt & Turn Targets signalisiert, welche mit Hilfe entsprechender Bolzen in der Hausfassade für die Zielpunkte ZP1 bis 4 und 6 befestigt werden. Der ZP5 ist ein Bodenpunkt, der mit Hilfe eines Stativs über einem Bolzen aufgebaut wird. Das Prüffeld verfügt über ein Referenznetz, wodurch neben der Zwei-Lagen-Prüfung auch noch ein Soll-Ist-Streckenvergleich möglich ist (Tab. 3).

2.2.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Vor der Prüfung wird der zu prüfende Scanner aufgewärmt. Anschließend werden von den beiden Scannerstandpunkten SP1 und SP2 mindestens zwei Vollscans von 360° (Zwei-Lagen-Messung) durchgeführt. Die ermittelten Koordinaten der Zielpunkte von beiden Lagen werden danach in ein vba-basiertes Prüfprogramm eingelesen. In diesem Programm werden die Streckendifferenzen zwischen erster und zweiter Lage und die Streckendifferenzen zur Sollstrecke

berechnet. Die Beurteilung, ob der Scanner die Anforderungen erfüllt, wird in einer GRÜN und ROT Klassifizierung angegeben (Feldmann 2011). Dabei gibt der Prüfer die höchstzulässige Streckendifferenz an. Das Ergebnis wird als ROT detektiert, sobald die höchstzulässige Differenz überschritten wird. Zusätzlich wird zur besseren Beurteilung noch die Ober-/Unterkonfidenzintervallgrenze berechnet. Eine detailliertere Beschreibung des Prüfprogramms befindet sich in Feldmann et al. (2011).

2.2.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

IMAGER 5006

Der firmeneigene IMAGER 5006h ist der am häufigsten geprüften Scanner. Insgesamt wurde dieser Scanner siebenmal geprüft. Bei allen Prüfungen erfüllte der Scanner die gestellten Anforderungen. Die maximale Abweichung lag nur ein einziges Mal über der vorgegebenen maximalen Abweichung; im Mittel wurde eine Abweichung von 1,7 mm im Vergleich von der ersten zur zweiten Lage erreicht. Beim Vergleich zu den Sollstrecken lag die mittlere absolute Abweichung bei 1,2 mm (Abb. 6 und Tab. 4).

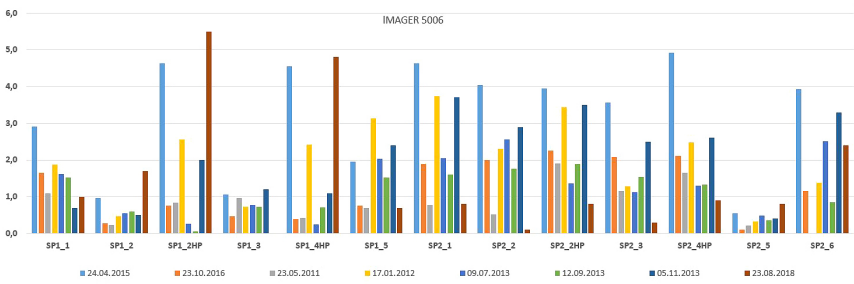


Abb. 6: Schrägstreckendifferenz zwischen erster und zweiter Lage des IMAGER 5006

IMAGER 5010

Die firmeneigenen IMAGER 5010 wurden insgesamt dreimal geprüft. Bei den ersten beiden Prüfungen erreichten sie die vorgegebenen Anforderungen. Die absolute mittlere Abweichung lag bei 2,3 mm bzw. 1,4 mm. Bei der dritten Prüfung waren die Abweichungen bis zu 11,9 mm groß. Bei genauerer Betrachtung der Messungen in LaserControl (vgl. Abb. 7 und Tab. 4) zeigte sich, dass der Scanner nicht mehr innerhalb der Vorgaben misst und wurde demzufolge zur Überprüfung zum Hersteller geschickt.

Tab. 4: Ergebnisse Prüffeld ÖbVI Petersen

Prüfling	IMAGER 5006h	IMAGER 5010 (3057)	IMAGER 5010 (3370)	IMAGER 5010 div. 5 Prüflinge
# Prüfungen	7-mal	3-mal	1-mal	1-mal
Ausgewählte Prüfgröße	Differenz zwischen Lage 1 und Lage 2	Differenz zwischen Lage 1 und Lage 2	Differenz zwischen Lage 1 und Lage 2	Differenz zwischen Lage 1 und Lage 2
	Schrägstreckendifferenzen	Schrägstreckendifferenzen	Schrägstreckendifferenzen	Schrägstreckendifferenzen
Mittlere absolute Abweichung	1,7 mm	2,3 mm	1,4 mm	2,5 mm
	1,2 mm	1,4 mm	0,9 mm	1,1 mm
Höchste absolute Abweichung	5 mm	11,9 mm (letzte Prüfung – Scanner defekt)	3 mm	5 mm
Zulässige Abweichung	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Ergebnis (grün, gelb, rot)	grün	rot	grün	
Hinweise auf systematische Abweichungen	Keine	Fehler – Scanner nicht mehr Arbeitsbereich (vgl. Bild)	Keine	

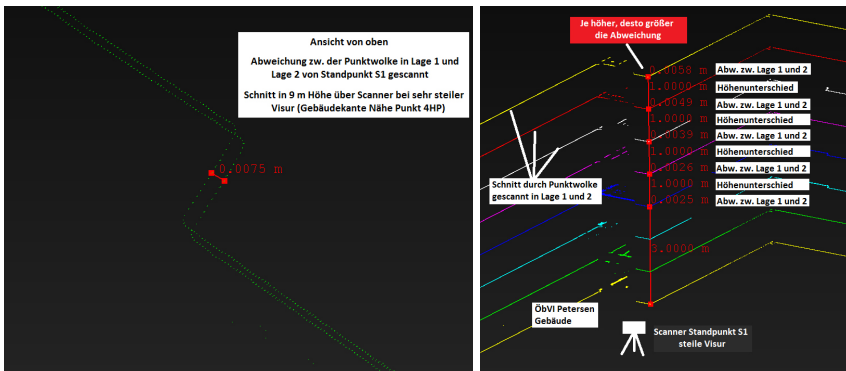


Abb. 7: Messungen in LaserControl

Scanner der IMAGER 5010 Serie

Insgesamt wurden auf dem Prüffeld weitere sechs Prüfungen mit „Fremd“-Scannern – also nicht firmeneigenen Instrumenten – der IMAGER 5010 Serie durchgeführt. Bei der nachfolgenden Betrachtung wurden alle Messungen bzw. Auswertungen berücksichtigt. Die durchschnittliche Distanzabweichung bei der Zwei-Lagen-Messung liegt bei 2,5 mm und beim Vergleich zu den Sollstrecken liegt die Abweichung im Mittel bei 1,1 mm (Tab. 4).

2.2.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Unsere Erfahrungen als Anwender zeigen, dass Prüfungen auch „Zeit“ kosten! Vor allem in der letzten Zeit konnten daher leider nicht mehr allzu viele Prüfungen auf dem firmeneigenen Prüffeld durchgeführt werden. Dieses hat hauptsächlich mit der hohen Auslastung zu tun, die sich darin zeigt, dass die Scanner während der normalen Arbeitszeit nicht für Prüfungen zur Verfügung stehen und wenig Zeit für neues Personal in die Einarbeitung der Prüfroutinen zur Verfügung steht. Eine Prüfung außerhalb der normalen Arbeitszeit ist bei unserem Prüffeld leider deutlich aufwendiger, da der Innenhof dann seine eigentliche Funktion als Parkplatz zu erfüllen hat und demgemäß mit den firmeneigenen Fahrzeugen vollgestellt ist und die Sichten auf die Zielpunkte verdeckt sind!

Dennoch sind wir fest der Überzeugung, dass sich unsere Prüfstrecke bereits vielfach bewährt hat. Neben den „GRÜN“-getesteten Instrumenten, die ein sicheres Gefühl verbreiten, haben allein die – bereits bei zwei Instrumenten – festgestellten Abweichungen bzw. nicht-erfüllten Anforderungen dazu geführt, dass diese beiden Scanner zur Überprüfung zum Hersteller geschickt und dort auch repariert und kalibriert werden mussten. Dieses zeigt, wie wichtig Prüfungen sind, denn die Instrumente führten ohne besondere Vorkommnisse oder Auffälligkeiten zu fehlerbehafteten Messungen. Der wirtschaftliche Schaden hätte groß werden können!

2.3 Hafencity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning

2.3.1 Beschreibung des Prüffeldes

Geometrische Untersuchungen verschiedener terrestrischer Laserscanner wurden in der Hafencity Universität Hamburg seit 2004 durchgeführt. Die umfangreichen Ergebnisse sind in zahlreichen Publikationen veröffentlicht worden (Kersten et al. 2004, Kersten et al. 2005, Sternberg et al. 2005, Mechelke et al. 2007, Mechelke et al. 2008, Kersten et al. 2009, Lindstaedt et al. 2009, Lindstaedt

et al. 2011, Lindstaedt et al. 2012). Am alten Standort der HCU Hamburg in der Hebebrandstraße 1 (City Nord) wurden neben einem fest installierten 3D-Testfeld (30 m × 20 m × 12 m) als Prüffeld für Raumstrecken auch eine 20 m-Komparatorbahn im Labor für Distanzen verwendet. Zusätzlich wurden Untersuchungen auf einer fest installierten (amtliche) Vergleichsstrecke im Friedhof Hamburg-Ohlsdorf (für Distanzen bis 500 m) und auf verschiedenen temporär eingerichteten Vergleichsstrecken auf dem Campus für die Streckenmessgenauigkeit von Laserscannern durchgeführt. Außerdem wurden die Laserscanner in zwei weiteren Szenarien geprüft: (a) Einfluss des Auftreffwinkels auf die Streckenmessgenauigkeit durch Messung auf eine ebene schwenkbare Steinplatte (regelmäßige Untersuchung) und (b) Einfluss und Genauigkeit des Neigungssensors terrestrischer Laserscanner (einmalige Untersuchung, siehe Kersten et al. 2009).

Nach dem Umzug der Hochschule in das neue Gebäude in der HafenCity wurde im Geodätischen Labor (Raum 3.002) ein neues 3D-Testfeld mit neuen Zielzeichen installiert (siehe Blaskow et al. 2018), das für die aktuellen TLS-Untersuchungen (auch im Rahmen des Masterstudienganges Geodäsie & Geoinformatik) eingesetzt wird. Im alten 3D-Testfeld (Abb. 8) wurden schwenkbare Zielzeichen, Kugeln unterschiedlicher Größe ($d = 76 - 199$ mm) und drehbare

Tab. 5: Steckbrief Prüffeld HCU Hamburg (altes 3D-Testfeld, Abb. 2)

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	▪ Raumstrecken
Prüfgrößen	▪ Streckenabweichung Soll/Ist, Kenngrößen nach Heister (2007) und Kern (2008)
Berechnung von Kalibrierparametern	keine
Zieldefinition ($d =$ Durchmesser)	schwenkbare b/w-Zielzeichen, Kugeln ($d = 76 - 199$ mm) und schwenkbare Targets mit Reflexfolie ($d = 60$ mm)
Anzahl an Zielpunkten	variabel, 19 bis 53
Vermarkungsart	M8-Gewinde im Boden und an der Wand
Referenzwerte vorhanden?	ja
Anzahl Scannerstandpunkte	5 auf verschiedenen Stockwerken
Geprüfte Zielweiten	1,5 m bis 33,0 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	–
Maximaler Höhenunterschied	12,40 m

Targets mit Reflexfolie ($d = 60$ mm) verwendet, während im neuen Testfeld (Größe $35 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) ausschließlich ebene, mit einem Magnet fixierte Schwarz-weiß-Targets (Punktnester) benutzt werden, die mit einem sehr genauen Lasertracker eingemessen werden. Die 20-m-Komparatorbahn und die ebene schwenkbare Steinplatte wurden auch im neuen Laborraum eingerichtet und werden auch weiterhin für TLS-Untersuchungen verwendet.

Im Folgenden werden nur Ergebnisse von Untersuchungen im alten 3D-Testfeld aus den Jahren 2004 bis 2012 präsentiert. Dabei ist die Genauigkeit eines 3D-Laserscannersystems durch eine Kombination von folgenden Fehlern beeinflusst, die nicht separat bestimmt wurden: Distanz- und Winkelmessung, Einpassung der Kugeln in die Punktwolke oder Messung der Zielzeichen in der Punktwolke und Zentrierfehler der Kugeln bzw. Targets.

In [Tab. 5](#) sind die technischen Spezifikationen des alten 3D-Testfeldes auf dem Campus City Nord zusammengefasst.

2.3.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

In der Halle des Gebäudes D am alten Hochschul-Campus der City Nord wurde das 3D-Testfeld 2003 dauerhaft angelegt. Dazu wurden 53 Referenzpunkte, die sowohl mit Prismen als auch mit Kugeln oder Zieltafeln signalisiert werden konnten, über drei Ebenen (siehe [Abb. 8](#)) auf dem Boden, in den Wänden oder an Betonpfeilern in Form von Gewinden (M8) verankert. Für die Signalisierung der Referenzpunkte wurden spezielle Adapter gebaut, um eine genaue, stabile und wiederholbare Einpassung der Kugeln oder Zieltafeln zu garantieren.

Die Referenzpunkte wurden vor der Messkampagne mit einem Präzisions-tachymeter von fünf Standpunkten aus gemessen und in einer zwangsfreien



Abb. 8: Altes 3D-Testfeld der HafenCity Universität Hamburg für geometrische Untersuchungen terrestrischer Laserscanner (Campus City Nord)

3D-Netzausgleichung mit PANDA mit einer Standardabweichung von kleiner als 1 mm in einem lokalen Netz bestimmt.

Gemäß der Richtlinie VDI/VDE 2634 (Blatt 2 und 3) erfolgen die Abnahme und Überwachung von flächenhaft messenden optischen 3D-Messsystemen durch die Messung kalibrierter Prüfkörper in regelmäßigen Intervallen. Ein wichtiger Qualitätsparameter stellt die Kugelabstandsabweichung, ähnlich wie in der ISO 10360 definiert, dar. Anstelle von kalibrierten Prüfkörpern im Objekt-raum wurden an der HCU Hamburg Referenzdistanzen zwischen den Kugeln für die Genauigkeitsuntersuchung von terrestrischen Laserscannern verwendet.

Im Rahmen der verschiedenen durchgeführten Messkampagnen im 3D-Testfeld wurden für alle untersuchten Instrumente von fünf Scannerstandpunkten auf drei Etagen Kugeln mit einem Durchmesser von 199 mm (einmal auch 145 mm) je nach Messkampagne auf 29 bis 53 Referenzpunkten gescannt. Die Punktwolken aller Kugeln wurden in RealWorks Survey manuell segmentiert, so dass in der bereinigten Punktwolke der Kugelmittelpunkt jeweils mit definiertem Radius bestimmt wurde. Alle Kugelkoordinaten der fünf Scannerstandpunkte wurden in RealWorks Survey in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Anschließend wurden aus den bestimmten Kugelkoordinaten und den Referenzkoordinaten in allen möglichen Kombinationen Strecken berechnet und miteinander verglichen. In einigen Untersuchungen wurden zusätzlich sieben Strecken, die in Anlehnung der Richtlinie VDI/VDE 2634 im Testfeld definiert wurden, für den Vergleich mit der Referenz herangezogen. Diese Ergebnisse sind aber nicht in Tab. 4 enthalten, sondern müssen den in Kap. 2.1 aufgeführten Publikationen entnommen werden.

2.3.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

Seit 2004 wurden folgende terrestrische Laserscanner an der HCU Hamburg getestet: Trimble (Mensi) GS100 und GS200, Trimble GX und FX, Leica Scanstation 1/2, HDS6000, C10 und BLK360, FARO LS 880 HE und Photon 80/120, Z+F IMAGER 5006/5006i/5006h und 5010, Riegl LMS-Z420i, VZ-400 und VZ-1000. Die Ergebnisse der im alten 3D-Testfeld untersuchten Scanner sind in Tab. 6 zusammengefasst, wobei manche Scanner mehrfach geprüft wurden, jedoch nur maximal zwei Ergebnisse in Tab. 6 dargestellt sind. Die Scanner von Riegl hatte im Testfeld sowohl auf Kugeln als auch die Reflexfolien (Goecke-Tar-get) gescannt, was in Tab. 6 auch gekennzeichnet ist.

2.3.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Aus den Untersuchungen leiten sich folgende Rückschlüsse ab: (a) Die terrestrischen Laserscanner haben sich in ihrer technischen Entwicklung hinsicht-

lich Streckenmessgenauigkeit verbessert, so dass das Testfeld auf dem Campus City Nord letztendlich nicht mehr den gesteigerten Ansprüchen genügte, (b) die Wiederholbarkeit ist bei den meisten Scanner sehr gut, d. h. die Untersuchungsergebnisse konnten in der Wiederholung sehr oft bestätigt werden, (c) es soll-

Tab. 6: Ergebnisse 3D-Testfeld HCU Hamburg [in mm]

Prüfling	Trimble	Leica	Z+F	FARO	Riegl
	GS100	ScanSt 1	5006	LS 880	Z420i ²
	GS200	ScanSt 2	5006i	Photon 80	VZ-400 ¹
	GX	HDS6000	5006h	Photon 120	VZ-400 ²
	FX	C10	5010		
# Prüfungen	2	2	2	1	1
	1	1	2	2	1
	1	2	1	1	2
	1	2	1		
Prüfgröße	Raumstreckenvergleich (Soll/Ist)				
Mittlere absolute Abweichung	3,1 2,4 6,5 4,6	3,6/1,8 2,6 6,7/2,3 1,3/2,2	1,8/2,1 1,2/2,8 2,3 2,4	5,0 2,3/2,8 2,8	6,5 1,4 2,9/2,9
Höchste absolute Abweichung	14,2/xx 8,6 1 23,0	9,2/6,4 8,6 27,7/9,0 6,1/8,4	7,5/7,7 5,4/9,0 9,2 8,5	41,1 9,8/10,5 6,9	19,8 4,8 11,9/8,8
Zulässige Abweichung ³	n/a n/a 7 n/a	4 4 5 4	7,5 1,8–6,5 0,4–6,8 0,3–2,7	3 (@ 25 m) 2 (@ 25 m) 4	10 5 5
Spanne (ΔL_{\max} – ΔL_{\min})	17,4 n/a 43,6 30,8	11,5/11,8 13,4 13,0/16,2 9,7/15,1	14,0/13,4 8,7/17,2 16,3 15,6	71,8 15,0/17,6 8,4	26,3 8,3 18,1/16,1
Systematische Abweichungen	–2,7 n/a 5,5 –3,8	–3,6/–0,7 –2,2 0,2/–0,5 0,8/0,8	0,3/–0,4 0,5/1,4 0,1 0,0	0,1 1,5/1,5 1,5	6,3 1,0 1,5/1,7

¹ Scans von Zielzeichen mit Reflexfolie

² Scans von Kugeln ($d = 199$ mm)

³ Streckenmessgenauigkeit auf 50 m

ten die herstellereigenen Zielzeichen verwendet werden, was insbesondere beim Riegl-Scanner in den Ergebnissen deutlich wurde, da das Zielzeichen mit Reflexfolie deutlich besser abschnitt als die verwendeten Kugeln.

Beim Riegl VZ-400 der HCU wurde bei mehreren Untersuchungen (Juli und Dezember 2011) festgestellt, dass bei kurzen Strecken bis max. 15 m signifikant höhere Differenzen in den Strecken gegenüber der Referenz aufgetreten sind. Nach Rücksprache mit der Firma Riegl war dieser Fehler auf eine fehlerhafte Nahbereichskorrektur dieses speziellen Gerätes zurückzuführen, was durch einen Geräteservice behoben wurde.

Bei einem Scanner eines anderen Herstellers trat bei der Distanz 50 m eine signifikante Abweichung zur Referenz auf, was an einem falschen Kalibrierungsfile lag. Die Untersuchungen in den verschiedenen Hochschulen tragen zu einem besseren Verständnis der Systeme bei und ermöglichen die Aufdeckung von Kalibrierungsfehlern, was im praktischen Projekteinsatz eher nicht möglich ist.

2.4 Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Geoinformation

2.4.1 Beschreibung des Prüffelds

Das TLS-Prüffeld der HTW Dresden beruht auf einem Soll-Ist-Vergleich zu koordinatenmäßig sehr genau bekannten Zielmarken. Dazu wurde im Laborgebäude LGS der HTW Dresden ein festes Prüffeld installiert. Dieses Testfeld befindet sich in einer geschlossenen Halle im Laborgebäude Schnorrstraße (LGS-Halle). Das Gebäude ist eine ca. 70 m lange, 25 m breite und 12 m hohe

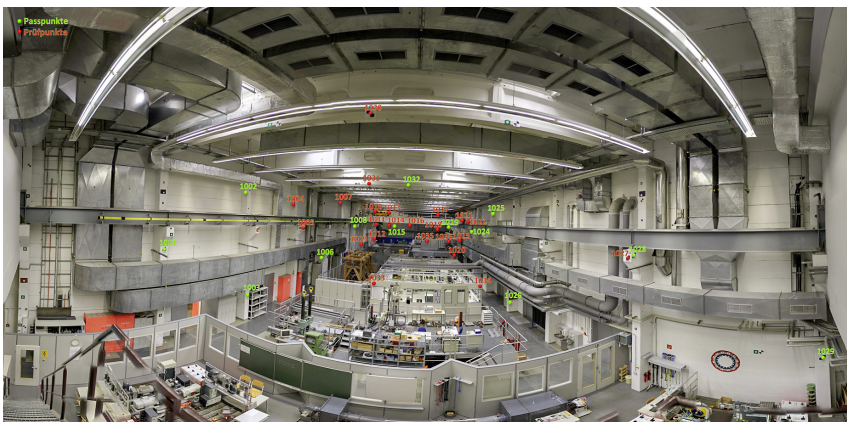


Abb. 9: Übersicht über das Passpunktnetz der HTW Dresden für Scanner der Firma FARO

doppelwandige klimatisierte Industriehalle, in der sich mehrere Labore der HTWD mit zahlreichen bodennahen Einbauten befinden. Das Testfeld wurde als hierarchisches Netz in drei Stufen so angelegt, dass es jederzeit erweiterbar und für Scanner unterschiedlicher Hersteller nutzbar ist. Aufbauend auf einem Basisnetz aus sechs stabil vermarkten Bodenpunkten mit einer 3D-Koordinatengenauigkeit von besser als 1,0 mm im Hallenboden existiert als zweite Ordnung ein Festpunktfeld für Scanner der Firma Trimble (weiße Trimble-Kugeln vor einem dunklen Hintergrund), RIEGL (Passmarken aus Reflexfolie des Typs RIEGL Flat), Leica (HDS- und Black & White-Zielmarken) Zoller + Fröhlich sowie FARO (überwiegend Schachbrett-Zielmarken). Diese Ziele wurden in unterschiedlichen Höhen von 1 m bis 10 m über dem Hallenboden signalisiert (siehe [Abb. 9](#) und [Tab. 7](#)). Die 3D-Genauigkeit dieser insgesamt 166 stabilen Festpunkte, die noch einmal in Passpunkt und Prüfpunkte unterteilt werden, ist

Tab. 7: Steckbrief Prüffeld HTW Dresden

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Koordinatenabweichungen ▪ Höhenabweichungen ▪ Streckengenauigkeit (bis 60 m) ▪ Additionskonstante ▪ Winkelabweichungen ▪ Höhenindexabweichung ▪ Einfluss unterschiedlicher Targets ▪ Auflösungsvermögen
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soll-Ist-Koordinatenvergleich ▪ Koordinatenunterschiede bei Scannen in 2 Lagen für unterschiedliche Prüfpunkte ▪ Referenzierungsgenauigkeit
Berechnung von Kalibrierparametern	Nein
Zieldefinition	7 unterschiedliche Targets
Anzahl an Zielpunkten	insgesamt 187
Vermarktungsart	Klebummarken oder Bolzen in der Wand
Referenzwerte vorhanden?	Ja (hochgenau)
Anzahl Instrumentenstandpunkte	3 jedoch beliebig erweiterbar
Geprüfte Zielweiten	5 m bis 63 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	50 gon bis 130 gon
Maximaler Höhenunterschied	10,5 m

stets besser als 2 mm. Alle Punkte wurden im Abstand von zwei bis drei Jahren insgesamt fünfmal jeweils doppelt im Abstand von 3 bis 4 Wochen bestimmt, um die Unveränderlichkeit zu garantieren.

Zusätzlich gibt es ein Netz sogenannter natürlicher Punkte in der gleichen Halle, um realistische Ergebnisse über die erreichbaren Genauigkeiten von schwieriger erfassbaren topographischen Detailpunkten zu erhalten. Es besteht aus 21 markanten Schrauben, Nieten oder Metallecken, die alle mit einer räumlichen Punktgenauigkeit von besser als 4 mm tachymetrisch bestimmt wurden. Sie sind bedingt durch ihre unterschiedliche Form ungenauer anzielbar und können von den Scannern nicht automatisch als Zielmarken extrahiert, sondern nur als Punktwolkenobjekte erfasst werden.

2.4.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Die Prüfung besteht darin, dass man den Scanner nach Aufbau auf einer Metallplattform in ca. 6 m Höhe über dem Hallenboden oder auf einem anderen Punkt durch Scannen von sechs Prüfmarken stationiert und die Referenzierungsgenauigkeit überprüft. Danach werden 10 bis 30 Prüfpunkte hoher Genauigkeit ebenfalls hochauflösend gescannt, die sich in unterschiedlichen Entfernungen, Höhen, bzw. Richtungen befinden, wobei im Regelfall auch unterschiedliche Zielmarken genutzt werden. Damit ist es im TLS-Prüffeld der HTW Dresden möglich, aus den Soll-Ist-Koordinatenvergleichen Lage-, Höhen- und 3D-Punktgenauigkeiten sowie daraus abgeleitet Strecken- und Winkelgenauigkeiten für die zu untersuchenden Scanner und somit gerätebezogene Systemgenauigkeiten zu ermitteln (Abb. 10).

Zusätzlich besteht die Möglichkeit zu weiteren Spezialuntersuchungen im gleichen Prüffeld einschließlich der Kalibrierung der Mounting von Spiegelreflexkameras auf entsprechenden Scannern der Firma RIEGL. So kann beispielsweise das Auflösungsvermögen eines Scanners in unterschiedlichen Entfernungen durch Scannen eines 3D-Siemenssterns bestimmt werden.

2.4.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

An der HTW Dresden wurden seit Einrichtung des TLS-Prüffeldes 2006 mehr als 150 Scannerprüfungen von etwa 45 unterschiedlichen Geräten bzw. 17 Gerätetypen von sieben verschiedenen Herstellern (RIEGL, Leica, Trimble, FARO, Z&F, Callidus, Surphaser) durchgeführt. Das betraf Prototypen, Nullseriengeräte, Scanner im Zusammenhang mit Abschluss- oder Projektarbeiten aber auch kommerzielle Geräteprüfungen von defekten oder Problemgeräten (z. B. Geräte mit Sturzschäden). Aufgrund dieses breiten Spektrums ist es nicht möglich, hier einzelne Ergebnisse zu veröffentlichen. Verallgemeinert kann lediglich werden,

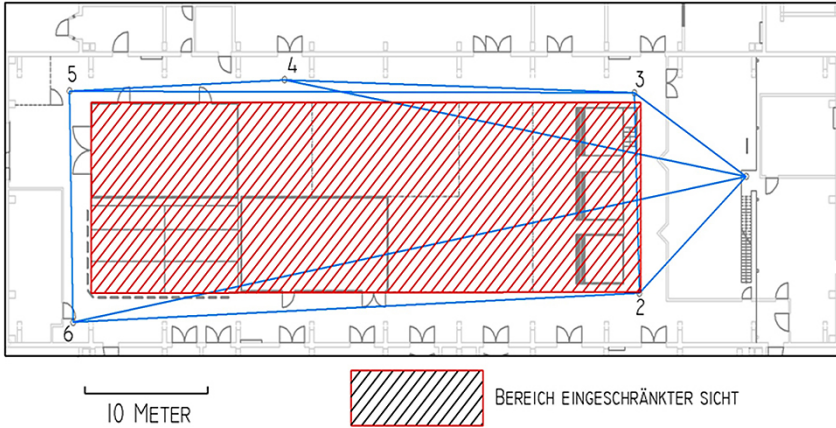


Abb. 10: Skizze des Basisnetzes zur Prüfmartenbestimmung des Prüffeldes der HTW Dresden. Anmerkung: Die Punkte 1 bis 6 sind im Stahlbeton vermarkte Bolzen des Basisnetzes mit einer 3D-Genauigkeit von $\leq 1,0$ mm, auf die sich die Koordinaten der übrigen 166 Prüfmarten beziehen, wobei sich der Punkt 1 ca. 6 m über dem Hallenboden befindet. Im rot schraffierten Bereich befinden sich nur Punkte an der Decke, im übrigen Bereich an den Seitenwänden, wo die Prüfmarten mittels Verklebungen fest vermarkt sind.

dass mehrheitlich besonders gute Ergebnisse bei TLS-Prüfungen von Scannern der Firmen Z&F und Leica festgestellt wurden. Einzelne Ergebnisse können Wehmann et al. (2007, 2008, 2009a, b, 2012, 2013) entnommen werden.

Neben den Geräteprüfungen in unserem TLS-Prüffeld erfolgen weiterhin Geräteuntersuchungen nach dem DVW-Prüfverfahren sowie dem Triangle-Verfahren nach Tüxsen und Gottwald, die Bestandteile der Praktika im Lehrgebiet „Terrestrisches Laserscanning“ im 6. Semesters der Bachelorausbildung im Studiengang Vermessung/Geoinformatik sind sowie vereinzelt auch Untersuchungen in unserem Reichweitentestfeld auf dem Dach des Zentralgebäudes der HTW (für Reichweiten bis 1200 m).

2.5 Technische Universität München, Geodätisches Prüflabor

2.5.1 Beschreibung des Prüffeldes

Das Testfeld der TU München ist im Rahmen einer Diplomarbeit im Jahr 2012 (Reidl 2012) als Prüffeld für Instrumentenabweichungen (Achsabweichungen) und zur Systemkalibrierung erstellt worden. Es ist installiert in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft und als 3D-Testfeld

Tab. 8: Steckbrief Prüffeld TU München

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zielachsabweichung ▪ Zielachsexzentrizität ▪ Kippachsabweichung ▪ Höhenindexabweichung
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messgrößen in Lage 1 und Lage 2 vs. Werte aus ausgeglichene Koordinaten
Berechnung von Kalibrierparametern	Achsabweichungen
Zieldefinition	Herstellerspezifisch beliebig
Anzahl an Zielpunkten	12
Vermarkungsart	Schraubbolzen
Referenzwerte vorhanden?	Nein
Anzahl Instrumentenstandpunkte	5
Geprüfte Zielweiten	3 m bis 29 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	0 gon bis 160 gon

mit einem Kalibriervolumen von $29 \times 5 \times 10 \text{ m}^3$ konzipiert. Es besteht aus fünf Standpunkten sowie bis zu 12 als Schraubbolzen vermarkten Zielpunkten, die im gesamten Messvolumen der Scanner (inkl. der Zenitrichtung, in die einzelne Achsabweichungen besonders stark wirken) verteilt sind und mit beliebigen Herstellertargets bestückt werden können. Die Messungen finden in zwei Lagen statt und werden im Rahmen einer freien Netzausgleichung ohne Kenntnis von Sollkoordinaten kombiniert (Abb. 11 und Tab. 8).



Abb. 11: Das Prüffeld nutzt den freien Raum in der Hallenmitte. Als Standpunkte dienen Stativpunkte auf verschiedenen Ebenen auf den Umläufen und zentralen Konsolen.

2.5.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Die Zielpunkte werden von den Standpunkten in beiden Lagen aufgenommen. Die Auswertung der Targets erfolgt in der jeweiligen Herstellersoftware. Aus den lokalen Standpunktkoordinaten werden polare Messgrößen für eine freie Ausgleichung rückgerechnet. Die Auswertung erfolgt in mehreren Stufen:

- Freie Netzausgleichung ohne Zenitpunkte
- Bei Abweichungen:
 - Kalibrierung von Ziel-, Kippachsabweichung und Zielachsexzentrizität mit Hz-Ablesungen mit Zenitpunkten
 - Kalibrierung der Höhenindexabweichung aus V-Ablesungen ohne Zenitpunkte

Tab. 9: Ergebnisse Prüffeld TU München

Prüfling	ScanStation P20 (1 Prüfling)	Leica HDS7000 / Z+F Imager 5010 (1 Prüfling)	ScanStation P20 (1 Prüfling)	Leica HDS7000 / Z+F Imager 5010 (1 Prüfling)
# Prüfungen	2	2	2	2
Ausgewählte Prüfgröße	Std.Abw. der Streckenmessung	Std.Abw. der Streckenmessung	Std.Abw. der Richtungsmessung	Std.Abw. der Richtungsmessung
Mittlere absolute Abweichung	0,57 mm	1,07 mm	1,30 mgon	2,97 mgon
Höchste absolute Abweichung	–	–	–	–
Zulässige Abweichung	2 mm / 10 m	1,6 mm / 10 m	2,47 mgon	7,96 mgon
Ergebnis (grün, gelb, rot)	grün	grün	grün	grün
Hinweise auf systematische Abweichungen	–	–	Kipp- (4,2 mgon) und Höhenindexabweichung (1,24 mgon)	Kipp- (11,99 mgon) und Höhenindexabweichung (-4,47 mgon)

- Erneute freie Netzausgleichung im korrigierten Modell ohne Zenitpunkte
- Ableitung von Genauigkeiten aus den ausgeglichenen Koordinaten der Zielpunkte

Zur Beurteilung signifikanter Instrumentenfehler wird ein t -Test durchgeführt.

2.5.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

Bisher sind im Labor der TUM keine umfangreichen Prüfmessungen durchgeführt worden. Die existierenden vollständigen Prüfungen stammen aus der Anlage des Kalibrierfelds (Tab. 9).

2.5.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Die Werte der polaren Messgrößen liegen deutlich unter den spezifizierten Genauigkeiten. Ein direkter Vergleich mit den Spezifikationen des Messrauschens eines Einzelpunkts ist jedoch aus der Gruppenverbesserung des Ausgleichungsmodells nicht möglich, so dass die Resultate lediglich einen Anhaltspunkt liefern.

2.6 Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz – i3mainz

2.6.1 Prüfkonzept, Beschreibung des Prüffelds und Beschreibung des Prüfvorgangs

Die Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laserscannersystemen wurde in den Jahren 2008 bis 2011 am i3mainz erarbeitet und an verschiedenen TLS angewendet, wobei verschiedene Realisierungen von Prüffeldern genutzt wurden. Ziel und Zweck sind wie folgt festgelegt: „Die ... Richtlinie enthält praxisnahe Abnahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von terrestrischen Laserscannern (Impulslaufzeitverfahren und Phasenvergleichsverfahren) hinsichtlich ihrer Genauigkeit. ... Die Kenngrößen dienen der Spezifikation der TLS-Systeme sowie dem Vergleich unterschiedlicher Messsysteme.“ (Kern 2010)

Mit der Prüfung soll also ausschließlich die Leistungsfähigkeit der TLS objektiv quantifiziert werden. Etwaige Instrumentenabweichungen können nicht damit nicht aufgedeckt werden. In den Kenngrößen fließt bewusst eine Vielzahl der (unbekannten) systematischen und zufälligen Einflüssen des TLS-Systems ein und liefern so Orientierungsparameter darüber, welche Qualität die Punktwolken im Rahmen eines konkreten Dokumentationsprojektes haben/haben

werden. Werden die Kenngrößen mit den Herstellerangaben verglichen kann mit den Kenngrößen auch die Gebrauchsfähigkeit bzw. der Justierungszustand des TLS beurteilt werden. Wobei hier das Problem der „Umrechnung“ von Standardabweichung in Kenngrößen besteht, da in den Datenblättern die Kenngrößen nicht explizit aufgeführt werden. Das Prüfverfahren steht somit in der Philosophie der VDI\VDE-Richtlinien, wie sie auch für bildbasierte Messsysteme (VDI/VDE 2634), existieren und regelmäßig angewendet werden.

Die TLS-Prüfrichtlinie definiert die Kenngrößen Abstandsabweichung, Antastabweichung, Kugelradienabweichung und Auflösungsvermögen, welche allesamt als abhängig von der Messentfernung, den Betriebs- und Umweltbedingungen sowie im Besonderen von den Reflektionseigenschaften der Zielobjekte angesehen werden müssen. Zu ihrer Bestimmung sind Prüfkörper notwendig. Die Abstandabweichung wird aus dem Vergleich von Soll- zu Ist-Positionen von Zielmarken in einem 3D-Prüffeld abgeleitet. Die Antastabweichung beschreibt das Rauschen der Messpunkte an einer Objektoberfläche. Hier bieten sich als Prüfkörper Referenzkugeln (z. B. TLS-Passkugeln) und Referenzebenen (z. B. Kodak-Grauwertkarte) an. Anhand der Referenzkugeln kann auch die Kugelradienabweichung berechnet werden. Mit einem Böhler-Stern, der ein beliebig orientiertes Mauerfugenbild verschiedener Fugenbreiten und -tiefen abstrahieren soll, kann das Auflösungsvermögen bewertet werden. Das Auflösungsvermögen wird u. a. davon beeinflusst, wie gut die Fähigkeit des TLS ist, Tiefensprünge an Kanten zu erfassen und wie „fein“ der Messstrahl (Strahldivergenz, Verarbeitung von Mischsignalen) ist.

Das am i3mainz im Labor „Instrumentenkunde“ ($L \times B \times H$: 20 m \times 7 m \times 4,6 m) dauerhaft eingerichtete Prüffeld zur Bestimmung der Kenngrößen besteht aus ca. 20 räumlich verteilten Zielmarken („Schachbrett“ und „Weißer Kreis“). Von drei bis fünf Standpunkten aus (Messpfeiler) werden diese gescannt. Zeitgleich wird der Böhler-Stern in Kippachshöhe und orthogonal zur Messrichtung aufgestellt sowie ca. 10 Passkugeln (FARO, $r = 73,1$ mm) räumlich verteilt. Pro Standpunkt werden Vollpanorama-Scans gemessen. Mit diesem Aufbau lassen sich die Kenngrößen für einen Messbereich von 1 m bis 15 m ableiten. Zusätzliche Messungen über größere Messentfernungen werden im Außenbereich des Campus der Hochschule Mainz durchgeführt. An die TLS werden keine besonderen Anforderungen wie z. B. gesonderte Messung in zwei Lagen gestellt. Die Auswertung der Punktwolken erfolgt in der Regel mit der Software des Hardware-Herstellers, soweit diese die Bestimmung der Kennwerte erlaubt. Ansonsten kommen Eigenentwicklungen des i3mainz zum Einsatz, die das PTG-Format für den Austausch der Punktwolken verwenden (Tab. 10).

Tab. 10: Steckbrief Prüfverfahren i3mainz

Kriterium	Realisierung
Abstandsabweichung	Zielmarken mit Soll-Koordinaten
Antastabweichung	Prüfkörper Kugel Prüfkörper Ebene
Kugelradienabweichung	Prüfkörper Kugel mit bekanntem Radius
Antastabweichung	Prüfkörper Böhler-Stern (bekannte Spaltenbreite und -tiefe)
Berechnung von Kalibrierparametern	Nein
Zieldefinition	Schachbrett, Weißer Kreis
Anzahl an Zielpunkten	ca. 20 Zielmarken ca. 10 Kugeln ca. 10 Ebenen 1 Böhler-Stern
Referenzwerte notwendig?	ja
Anzahl Instrumentenstandpunkte	3 bis 5
Geprüfte Zielweiten/Messvolumen	1 m bis 15 m / 20 m × 7 m × 4 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	gesamter Messbereich des TLS (theoretisch)
Maximaler Höhenunterschied	4,60 m
Messdauer, gesamt	ca. 2 h (inkl. Auf-/Abbau)
Auswertung	6-Parameter-Transformation Hersteller-Software, Eigenentwicklungen

2.6.2 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

In den letzten Jahren sind für institutseigene und andere TLS der Hersteller Leica (HDS 3000, HDS 6000, HDS 7000, C10, P20, P40), Zoller + Fröhlich (Imager 5010) und FARO (LS 880, Photon 80, Focus 3D, Focus X130) Prüfungen – meist im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten – durchgeführt worden. Aktuell wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Baumann 2018) parallel für die Leica Scanstation P20 und Leica Scanstation P40 des i3mainz die Kenngrößen der TLS-Prüfungsrichtlinie bestimmt. Hinsichtlich des Auflösungsvermögens konnten dabei keine praxisrelevanten Unterschiede festgestellt werden. Beide Geräte liefern erst bei „Fugen“ mit einer Breite resp. Tiefe von mehr als 10 mm realitätsnahe Werte. Auch die Kugelradienabweichungen sind für P20 und P40

Tab. 11: Abstandsabweichung für P20 und P40

Standpunkt	Anzahl Zielmarken „Schachbrett“	Abstandsabweichung ΔL [mm]	
		P20	P40
1	8	3,393	4,017
2	8	3,161	3,226
3	8	3,063	3,399
4	8	3,186	2,845
1 bis 4	32	3,020	3,398
	Herstellerangaben:	3D-Position:	3D-Lagegenauigkeit:
	Leica 2013,	3 mm @ 50 m	3 mm bei 50 m
	Hexagon 2017	6 mm @ 100 m	6 mm bei 100 m
		Zielmarkenerfassung:	Zielmarkenerfassung:
		Standardabweichung von 2 mm bei 50 m	Standardabweichung von 2 mm bei 50 m

nahezu gleich mit $R_k < 1$ mm und im untersuchten Messbereich von 1 m bis 14 m entfernungsunabhängig.

Interessant ist der Vergleich der Abstandsabweichungen (Tab. 11) zwischen den Geräten und mit den Herstellerangaben. Die P20 und P40 haben im Nahbereich ein ΔL von etwas mehr als 3 mm, wobei die P40 schlechter ist als die P20. Der Hersteller gibt für beide Geräte eine Zielmarkenerfassungs-Standardabweichung von 2 mm (@ 50 m) für „Schwarz-weiß-Zielmarken“ an. Dies kann als Untergrenze für die zu erwartende Abstandsabweichung interpretiert werden, da damit nur die „Zielgenauigkeit“ des TLS bewertet wird. Da die Abstandsabweichung durch eine 6-Parameter-Transformation zu mehreren im Raum verteilten Referenzpunkten berechnet wird sind darin noch weitere Einflüsse enthalten (Instrumentenabweichungen wie z. B. Achsabweichungen). Mit der 3D-Positionsgenauigkeit 3 mm @ 50 m gibt der Hersteller hier ein vergleichbares Maß an.

In der Abb. 12 sind die Antastabweichungen R_{Ebene} gemessen auf eine 20 cm x 20 cm große Kodak-Grauwertkarte über einen Messbereich von 5 m bis 120 m dargestellt. Der Wert für die P20 bei 120 m entstammt einer sehr kleinen Stichprobe ($n < 10$) und ist daher mit Vorsicht zu beurteilen. Hier zeigt sich für die P40 ein deutlich geringes „Rauschen“ – Faktor 2,5 gegenüber der P20. In dünner Linienbreite sind zum Vergleich die Herstellerangaben eingezeichnet. Wie man sieht konnten die Herstellerangaben nicht reproduziert werden. Dies könnte daran liegen, dass die benutzte Grauwertkarte andere Reflektionseigenschaften hat als die vom Hersteller genutzten Referenzmaterialien.

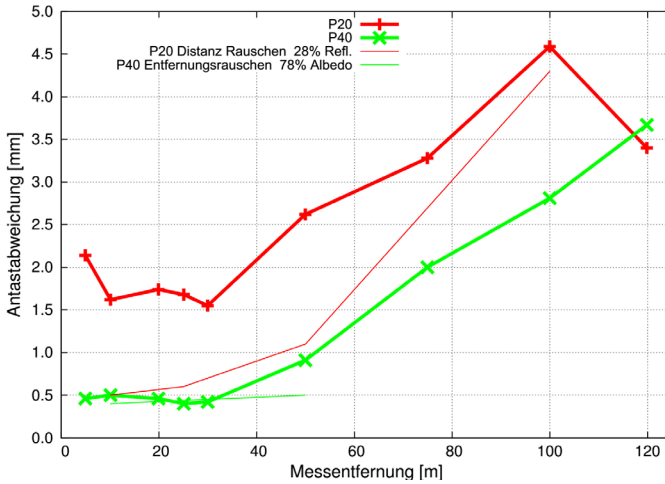


Abb. 12: Antastabweichung an einer Kodak-Grauwertkarte für P20 und P40 sowie Herstellerangaben

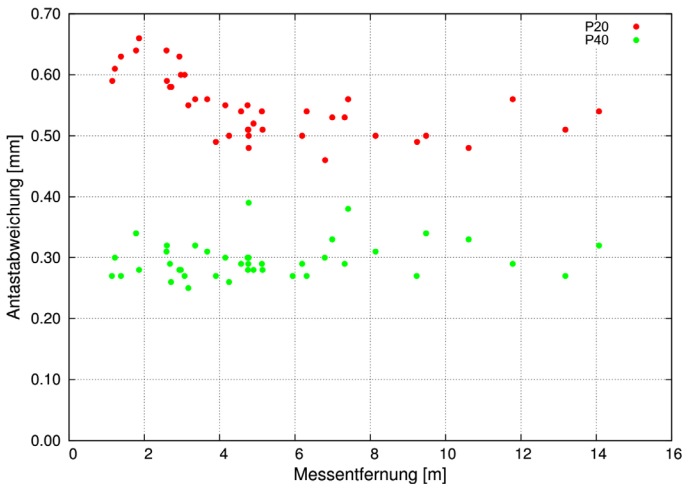


Abb. 13: Antastabweichung an Referenzkugeln für P20 und P40

Die Antastabweichungen R_{Kugel} gemessen auf Kugeloberflächen ist bei der P40 deutlich geringer als bei der P20. Die Abb. 13 zeigt für die P40 ein um den Faktor 2 geringeres Rauschen im Messbereich von 1 m bis 14 m.

2.6.3 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Die Bestimmung eines Maßes für das Auflösungsvermögen ist ein schweres Unterfangen (Kern 2011). Zuverlässige Werte konnten bislang nur bei älteren Impulsscannern bestimmen werden. Auch wenn die Qualitätsangaben (Dis-

tanz-, Positionsgenauigkeit und Rauschen) der Hersteller allesamt im niedrigen mm-Bereich liegen, so sind die TLS meist nicht dazu geeignet, feine Detailstrukturen mit einer hoch dynamischen Tiefenvariation unterhalb von 10 mm maßgetreu wiederzugeben. Ein Fugenbild einer Fassadenaufnahme zum Beispiel ist daher optisch sauber – geringes Oberflächenrauschen – aber geometrisch systematisch verzerrt. Über die Entwicklungsgeschichte der TLS-Geräte hinweg wurden die Reichweite, die Messgeschwindigkeit und das Messrauschen erfolgreich optimiert. Modernere Geräte haben auch eine bessere Abstandabweichung. Das Problem der geringen Kantenschärfe besteht leider weiterhin.

3 Zusammenstellung der empirischen Ergebnisse

Kap. 2 beschreibt sechs verschiedene Prüffelder und die empirischen Ergebnisse von einer Vielzahl getesteter terrestrischer Laserscanner. Diese Analyse betrachtet die empirischen Ergebnisse von ca. 35 Prüflingen, wobei sich diese in der Regel auf einmalige Prüfmessungen beziehen, teilweise aber auch auf Mittelwerte von insgesamt 16 Prüfmessungen. Die bei der Prüfung verwendeten TLS-Prüffelder unterscheiden sich erheblich in ihrer Realisierung: Sie reichen

- von sieben fest installierten Zielpunkten bis hin zu mehr 150 Zielpunkten,
- von zwei TLS-Standpunkten bis hin zu fünf TLS-Standpunkten,
- von 20 m geprüfter Maximaldistanz bis hin zu mehr als 60 m geprüfter Maximaldistanz,
- von 4 m Höhenunterschied bis zu mehr als 12 m Höhenunterschied,
- von dem reinen Vergleich zwischen Zielzeichenkoordinaten bis hin zu zusätzlichen Analysen wie z. B. dem Auflösungsvermögen.

Aus dieser Variation wird ersichtlich, dass TLS-Prüffelder zwar alle zum Ziel haben, die erreichbare Messgenauigkeit terrestrischer Laserscanner in einem gewissen Messbereich zu analysieren, aber dennoch unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Dahingegen teilen alle TLS-Prüffelder das Vorgehen zur Ermittlung der Prüfgrößen: Die Auswirkung möglicher systematischer Abweichungen wird offenbart, indem die Messungen des Laserscanners verglichen werden, entweder mit einem Sollwert, der Messung in anderer Lage oder der Messung von einem anderen Standpunkt.

Aufgrund dieser Tatsache lassen sich die Ergebnisse der Prüflinge, ermittelt an unterschiedlichen TLS-Prüffeldern, auch in ihrer Aussage vergleichen, wenn auch nicht unbedingt anhand exakter Zahlenwerte zu empirisch bestimmten Messabweichungen. Übereinstimmend können wir daher auf Basis der Prüflinge der sechs TLS-Prüffelder festhalten:

- In der Regel deuten die Ergebnisse der geprüften Laserscanner darauf hin, dass die Spezifikationen des Herstellers eingehalten werden.
- Die Genauigkeit ist in der Regel sogar besser als angegeben.
- Weder einzelne Baureihen noch einzelne Hersteller fallen bei den Prüfmesungen negativ auf. Vielmehr sind die erzielten Genauigkeiten in vielen Fällen deutlich höher, als spezifiziert.
- Vereinzelt sind Teilergebnisse außerhalb der spezifizierten Größen. Dies kann in einigen Fällen auch auf die Ungenauigkeit der Messdurchführung – die nicht exakt abgeschätzt wurde – oder die immer vorhandene Irrtumswahrscheinlichkeit zurückzuführen sein. Daher sollte im Fall einer Ablehnung des Laserscanners immer eine erneute Prüfung stattfinden. In den meisten Fällen bestätigt diese Wiederholungsprüfung die Funktionstüchtigkeit des Laserscanners.
- Von den 35 Prüflingen wurden vier Prüflinge in verschiedenen TLS-Prüffeldern auffällig. Ursächlich hierfür waren ein Sturz, eine fehlerhafte Nahbereichskorrektur und ein falsches Kalibrierfile im Laserscanner. In einem Fall ist die Ursache unbekannt und evtl. auf eine lange Nutzungsdauer zurückzuführen.

4 Fazit und Ausblick

Im Gesamten zeigen diese Ergebnisse, dass die geprüften terrestrischen Laserscanner in der Regel mindestens so genau messen, wie in den Spezifikationen angegeben. Hierbei beziehen wir uns – wie im gesamten Artikel – immer nur auf die instrumentelle Unsicherheit, die bei einer Messung auf die o. g. Zielpunktdefinitionen in den o. g. Messvolumina wirkt. Im Rahmen dieser Einschränkung können sich Nutzer der hier beschriebenen Baureihen terrestrischen Laserscanner daher mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit darauf verlassen, dass ihr Instrument mindestens entsprechend der spezifizierten Genauigkeit arbeitet. Nur in begründeten Ausnahmefällen liegen geringere Genauigkeiten vor, hierbei gibt es jedoch weder auffällige Hersteller noch auffällige Baureihen.

Die Aufgabe von TLS-Prüffeldern sollte daher weiter sein, diese auffälligen Laserscanner vor einem Messjob zu identifizieren, um während der Messaufgabe im Feld nicht von einer schlechten Messgenauigkeit überrascht zu werden.

Die Universitäten und Hochschulen bieten sich auch weiterhin an, neue Generationen von terrestrischen Laserscanner in ihren Einrichtungen und Prüffeldern geometrisch zu untersuchen, um die Ergebnisse (u. a. mit den Herstellern) zu diskutieren und anschließend zu veröffentlichen.

In Zukunft könnte sich anbieten, einen Ringversuch mit den unterschiedlichen TLS-Prüffeldern und mehreren terrestrischen Laserscannern, ähnlich wie

bereits 2011 an der HCU Hamburg erfolgt (Lindstaedt et al. 2012), durchzuführen. So könnten die aus den Prüffeldern ermittelten empirischen Ergebnisse zwischen den verschiedenen Standorten vergleichbarer werden. Des Weiteren ließen sich Stärken und Schwächen einzelner TLS-Prüffelder besser aufdecken.

Literatur

- Baumann, P. (2018): Genauigkeitsuntersuchungen von terrestrischen Laserscannern. Hochschule Mainz, Bachelorarbeit, Standnummer B300, unveröffentlicht.
- 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, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 284–295.
- Feldmann, E. (2011): Entwicklung und Erprobung eines praxisnahen Feldverfahrens zur Prüfung terrestrischer Laserscanner. Diplomarbeit, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik, unveröffentlicht.
- Feldmann, E.; Petersen, M.; Staiger, R. (2011): Erste Erfahrungen mit Feldprüfverfahren für terrestrische Laserscanner. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge. DVW-Schriftenreihe, Band 66, Wißner-Verlag, Augsburg, 77–94.
- Heister, H. (2006): Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TSL 2006). DVW-Schriftenreihe, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, 35–44.
- Hexagon (2017): Leica ScanStation P30/P40. (Technische Daten).
- Kern, F. (2008): Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, Heidelberg, 306–316.
- Kern, F. (2010): Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laserscanner-Systemen (Entwurf V.1.0.1). Offenes Forum Terrestrisches Laserscanning. www.laserscanning.org/documents/TLSRichtlinie_07.pdf.
- Kern, F. (2015): Qualitätssicherung beim TLS mittels Prüfkörper und Kenngrößen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2015 – TLS 2015. DVW-Schriftenreihe. Band 81, Wißner-Verlag, Augsburg, 107–122.
- Kern, F.; Mehlig, S.; Siegrist, B. (2011): Geometrische Qualität von aus Einzelphotos zusammengesetzten Panoramen. In: Seyfert, E. (Hrsg.): 29. Wissenschaftliche Jahrestagung der DGPF – Mainz – Geodaten – Eine Ressource des 21. Jahrhunderts. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 20, 129–136.
- Kersten, T.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M.; Sternberg, H. (2009): Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 4, 301–316.
- Kersten, T.; Sternberg, H.; Mechelke, K. (2005): Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Mensi GS100. Optical 3-D Measurement Techniques VII, Gruen/Kahmen (Eds.), Vienna 2005, Vol. I, 122–131.

- Kersten, T.; Sternberg, H.; Mechelke, K.; Acevedo Pardo, C. (2004): Terrestrischer Laser-scanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Wichmann, Heidelberg, 98–107.
- Kuhlmann, H.; Holst, C. (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In: Freeden, W.; Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie: 5 Bände, Springer, Berlin Heidelberg.
- Leica (2013): Leica ScanStation P20. (Technische Daten). Leica Geosystems AG.
- 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.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 4–14.
- 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.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 264–275.
- 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.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. Wichmann, Heidelberg, 53–64.
- Mechelke, K.; Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2007): Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Gruen/Kahmen (Eds.), Zurich, July 9–12, Vol. I, 319–327.
- Mechelke, K.; Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2008): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme – Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, Heidelberg, 317–328.
- Neitzel, F.; Gordon, B.; Wujanz, D. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt 7-2014. www.dvw.de/merkblatt, letzter Zugriff 10/2018.
- Reidl, F. (2012): Konzept und Durchführung einer Systemkalibrierung von terrestrischen Laserscannern. Master's Thesis an der TU München, unveröffentlicht.
- Sternberg, H.; Kersten, T.; Conseil, N. (2005): Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Wichmann, Heidelberg, 56–65.
- Wehmann, W.; Kramer, H.; van Zyl, C.; Widiger, D.; Zimmermann, R. (2007): Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2007, 132. Jg., 175–180.

- Wehmann, W.; van Zyl, C.; Kramer, H.; Heyne C.; Koschemann, D. (2008): Untersuchungen des Laserscanners GX von Trimble in den Prüffeldern der HTW Dresden. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, Heidelberg, 337–344.
- Wehmann, W.; van Zyl, C.; Schmiedel, M.; Träbert, M. (2009a): Erste Untersuchungen des neuen Phasenvergleichsscanners PHOTON 120 von FARO. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009). Yes, we Scan! DVW-Schriftenreihe, Band 60, Wißner-Verlag, Augsburg, 31–47.
- Wehmann, W.; van Zyl, C.; Ullrich, J.; Richardt, A.; Staeck, C.; Voss, S. (2009b): Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Laserscanner ScanStation 2 und HDS 6000 von Leica sowie LMS-Z420i von Riegl und Erarbeitung einfacher Prüfroutinen für diese Scanner. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. Wichmann, Heidelberg, 31–44.
- Wehmann, W.; Freitag, J.; Kruschwitz, T. (2012): Vergleichende Untersuchungen zur effektiven Erfassung von Gebäudeteilen und Innenräumen mittels Laserscanning und Videotachymetrie. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, Heidelberg, 276–285.
- Wehmann, W.; Attrodt, A.; Kanters, M.; Vogel, A. (2013): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes des FARO Focus 3D 120 im Terrestrischen Laserscanning. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013. Wichmann, Heidelberg, 46–55.

Kontakt

Dr.-Ing. Christoph Holst | Tobias Jurek | Martin Blome | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Nußallee 17, 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de | t.jurek@igg.uni-bonn.de | m.blome@igg.uni-bonn.de |
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

Lars Marschel | Michael Petersen
ÖbVI Petersen, Hagenstraße 7, 45894 Gelsenkirchen
lars.marschel@oebvi-petersen.de | michael.petersen@oebvi-petersen.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas P. Kersten | Klaus Mechelke | Maren Lindstaedt
HafenCity Universität Hamburg, Überseeallee 16, 20457 Hamburg
thomas.kersten@hcu-hamburg.de | klaus.mechelke@hcu-hamburg.de |
maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

Prof. Dr.-Ing. Wolffried Wehmann
HTW Dresden, Fakultät Geoinformation, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
wolffried.wehmann@htw-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich | Dr.-Ing. Peter Wasmeier | Wolfgang Wiedemann
Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie, Arcisstraße 21, 80333 München
th.wunderlich@tum.de | p.wasmeier@tum.de | w.wiedemann@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern
Hochschule Mainz – i3mainz, Lucy-Hillebrand-Straße 2, 55 128 Mainz
fredie.kern@hs-mainz.de