

Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg

Maren LINDSTAEDT, Thomas KERSTEN, Klaus MECHELKE und Tanja GRAEGER

Zusammenfassung

Geometrische Untersuchungen terrestrischer Laserscanner sind auch heute noch ein aktuelles Thema, zumal standardisierte Prüfverfahren und Kenngrößen zwar vorgeschlagen, aber noch nicht festgelegt sind. In diesem Kontext haben sich im Juni 2011 verschiedene Hochschulen, Hersteller und Anwender an der HafenCity Universität (HCU) Hamburg zu einem Workshop zusammengefunden, um verschiedene terrestrische Laserscanner in unterschiedlichen Prüfverfahren zu untersuchen. In diesem Beitrag werden die wichtigsten Ergebnisse der geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen von elf verschiedenen Scannern vorgestellt, die sich im Rahmen des Workshops den Prüfverfahren (Bestimmung der 3D-Punktgenauigkeit in einem 3D-Testfeld, Streckenmessgenauigkeit bis 20 m auf einer Komparatorbahn und Einfluss des Einfallswinkels auf die 3D-Punktgenauigkeit) unterzogen haben. Ergänzend wurden aus den Messungen des Testfeldes einige Kenngrößen von HEISTER (2006) und KERN (2008) berechnet. Als wesentliches Ergebnis aus dem Workshop konnte festgehalten werden, dass es immer schwieriger wird, für die Prüfverfahren genaue Referenzdaten bereit zu stellen, da die terrestrischen Laserscanner mit jeder neuen Generation besser und genauer werden. Die Angaben der technischen Spezifikationen von den Herstellern konnten bei den untersuchten Scannern eingehalten werden.

1 Einleitung

Terrestrisches Laserscanning ist ein heutzutage anerkanntes Messverfahren, das sich seit mehr als zehn Jahren für die unterschiedlichsten Anwendungen wie in der Architektur, der Archäologie, im Industrie- und Anlagenbau, für topographische Aufnahmen, im Schiffbau oder in der Forensik und in vielen anderen Bereichen etabliert hat. Ebenso verschieden wie die Anwendungen sind auch die Anforderungen an die Geräte, denn die Kriterien Reichweite, Genauigkeit und Geschwindigkeit sind hier nicht immer miteinander in Einklang zu bringen. So ist es für den manchmal auch fachfremden Anwender oft schwierig, den richtigen Scanner für die jeweils geforderte Aufgabenstellung zu finden. Diese Tatsache wird noch durch die heterogene Darstellung der technischen Scannerspezifikationen der Hersteller erschwert, da u.a. bei den Genauigkeitsangaben kaum ein direkter Vergleich möglich ist. Ein weiteres Problem stellen fehlende standardisierte Prüfverfahren für Laserscanning-Systeme dar, die zu einem verbesserten Verständnis der Systeme beitragen könnten. Einige Autoren berichten über die Ergebnisse verschiedener Scanneruntersuchungen (JOHANSSON 2003, BOEHLER et al. 2004, CLARK & ROBSON 2004, LICHTI & FRANKE 2005, NEITZEL 2006, RESHETYUK 2006, SCHULZ 2007, WEHMANN et al. 2007) und weitere Autoren schla-

gen unterschiedliche Prüfverfahren vor (HEISTER 2006, GOTTWALD 2008, GOTTWALD et al. 2008, GORDON 2008, KERN 2008, KERN & HUXHAGEN 2008).

Daher wurde während der Oldenburger 3D-Tage 2011 im Arbeitskreis „Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern“ intensiv über mögliche Standards für Prüfverfahren diskutiert. Als ein Ergebnis dieser Diskussion wurde festgehalten, im Jahr 2011 einen praktischen Workshop über Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner an einer Hochschule durchzuführen. Das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning und das Geodätische Labor der HafenCity Universität Hamburg haben vom 14. bis zum 17. Juni 2011 diesen Workshop organisiert, bei dem Teilnehmer von elf verschiedenen Institutionen die Prüfeinrichtungen der HCU für ihre Laserscanner genutzt haben. Zu den Prüfeinrichtungen der HCU gehören neben dem 3D-Testfeld eine Komparatorbahn (Länge 20 m), eine Steinplatte zur Untersuchung des Einflusses des Auftreffwinkels, eine Box für die Beurteilung des Auflösungsvermögens und eine Vergleichsstrecke (Länge 400 m) im Außenbereich. In diesen Prüfeinrichtungen der HCU Hamburg wurden seit 2004 immer wieder aktuelle Laserscanner untersucht, deren Ergebnisse in vielen Publikationen zusammengefasst sind (KERSTEN et al. 2004, KERSTEN et al. 2005, MECHELKE et al. 2007, MECHELKE et al. 2008, LINDSTAEDT et al. 2009, KERSTEN et al. 2009, LINDSTAEDT et al. 2011).

Die wichtigsten Ergebnisse des Workshops vom Juni 2011 werden in diesem Beitrag zusammengefasst. Nach einer kurzen Vorstellung der untersuchten Laserscanner und der beteiligten Institutionen im Kapitel 2 werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Testfeld sowie die Berechnung verschiedener Kenngrößen (Kapitel 3), der Streckenmessgenauigkeit (Kapitel 4) und des Auftreffwinkels (Kapitel 5) vorgestellt.

2 Untersuchte Laserscanningsysteme

Für die gemeinsamen Untersuchungen im Juni 2011 wurden insgesamt zwölf verschiedene Laserscanner eingesetzt. Acht von diesen Geräten arbeiten nach dem Phasendifferenzverfahren, vier nach dem Impulslaufzeitverfahren. Folgende Geräte und Institutionen waren an dem Workshop beteiligt: Hochschule Bochum (IMAGER 5006, Riegl VZ-400, IMAGER 5010), Jade Hochschule (IMAGER 5006i), Landeskriminalamt Hamburg (IMAGER 5006h), Ingenieurbüro dhp:i Hamburg-Harburg (IMAGER 5006i), Leica Heerbrugg (Leica C10), i3mainz der FH Mainz (Faro Photon 80, Leica HDS 6000), Lufthansa Technik (Faro Photon 120), Riegl Measurement Systems, Horn (Riegl VZ-1000) und die HCU Hamburg (Riegl VZ-400). Einige dieser Geräte sind in Abb. 1 dargestellt, für detaillierte technische Spezifikationen wird auf die entsprechenden Webseiten der Gerätehersteller verwiesen.



Abb. 1: Auswahl der an der HCU Hamburg untersuchten Laserscanner: v.l.n.r. Leica HDS 6000, Riegl VZ-400, Faro Photon 120, Leica C10, IMAGER 5010

3 Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen

3.1 3D-Testfeld

Das 3D-Testfeld der HCU Hamburg wurde bereits im Jahr 2003 zur Untersuchung von terrestrischen Laserscannern eingerichtet (KERSTEN et al. 2004). Insgesamt können 53 Referenzpunkte in dem Testfeld über drei Ebenen verteilt signalisiert werden. Um den Arbeitsaufwand während des Workshops bei so vielen Teilnehmern überschaubar zu gestalten, wurden im Juni 2011 jedoch nur 19 Punkte ausgesucht, deren räumliche Verteilung sich möglichst an die VDI/VDE 2634 (Blatt 2 und 3) anlehnt. Außerdem konnten so alle Punkte gleichzeitig mit den vorhandenen 19 Kugeln bestückt werden.

Die Netzmessung zur Bestimmung der Referenzpunkte erfolgte von fünf Standpunkten auf drei Ebenen mit einem Leica TCRP 1201 auf Leica Miniprismen, die statt der Kugeln (Durchmesser 199 mm) und der Goecke-Targets in die entsprechenden Wandbolzen geschraubt wurden. So wurde jedes Prisma von mindestens drei Standpunkten aus angezielt und dessen Zentrum in einer 3D-Netzausgleichung mit einer Genauigkeit besser 1 mm bestimmt. In einer ersten Auswertung wurden von allen Scannern alle Strecken in allen Kombinationen zwischen den Referenzpunkten berechnet und mit den Referenzstrecken aus der Netzausgleichung verglichen. Da hier für alle Scanner tendenziell schlechtere Ergebnisse als in vorherigen Untersuchungen erreicht wurden (Abb. 2), stellte sich die Frage nach der Qualität der Referenzdaten. Eine stichprobenartige Transformation von 3D-Punkten verschiedener Scannerstationen aufeinander brachte deutlich bessere Ergebnisse, während bei der Transformation der gescannten Kugelzentren auf die Referenzpunkte fehlerhafte Punkte nicht eindeutig zu lokalisieren waren.

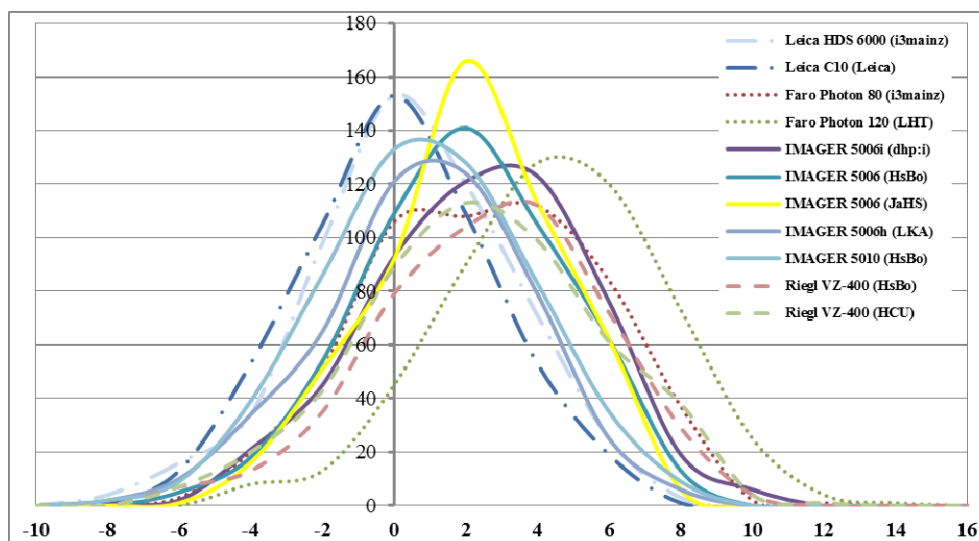


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der Streckendifferenzen im Testfeld für elf Scanner

Daher wurde entschieden, im Juli 2011 eine weitere Kontrollmessung im Testfeld durchzuführen. Um den Aufwand so gering wie möglich zu halten, wurde die Netzmessung auf die gelben Goecke-Targets (Durchmesser 6 cm) durchgeführt. Direkt im Anschluß wurden diese Goecke-Targets ohne Umbau mit dem Riegl VZ-400 der HCU Hamburg gescannt. Die Ergebnisse der Streckenvergleiche aus den Scandaten und den Referenzstrecken der Tachymetermessungen waren ähnlich schlecht wie bei der ersten Auswertung, was vermutlich auf eine – zu diesem Zeitpunkt leider noch nicht bekannte – fehlerhafte Nahbereichskorrektur des Riegl-Scanners zurückzuführen ist. Somit konnte der Fehler im 3D-Testfeld noch nicht eindeutig bestimmt werden, aber die Vermutung lag nahe, dass die Kugelzentren nicht präzise mit den Zentren der Miniprismen zusammenpassten. Um diesen möglichen Fehler zu überprüfen, wurden die Kugelzentren im Januar 2012 über eine direkte geodätische Messung der Kugeln bestimmt und mit den Zentren der Leica Miniprismen verglichen. Dabei zeigte sich nun eindeutig, dass (a) die Kugelzentren nur mit einer Genauigkeit von 2 mm geodätisch bestimmt werden konnten und dass (b) die Prismenzentren nicht exakt den Kugelzentren entsprechen. Somit waren die zuerst berechneten Ergebnisse in Abb. 2 aufgrund der nicht exakten Referenz nicht aussagekräftig. Für die beiden Scanner IMAGER 5006h und 5010 der HCU Hamburg wurden im Anschluss an die direkte Kugelzentrenbestimmung diese Kugeln gescannt und nochmals alle Strecken berechnet. Als Ergebnis dieser Berechnungen wurden signifikant geringere Abweichungen bei den Streckendifferenzen erreicht und der Shift fällt geringer aus (Abb. 3). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Bestimmung der Kugelzentren nur mit einer Genauigkeit von 2 mm erfolgte, was somit als Referenz nicht mehr genau genug für diese Laserscanner ist.

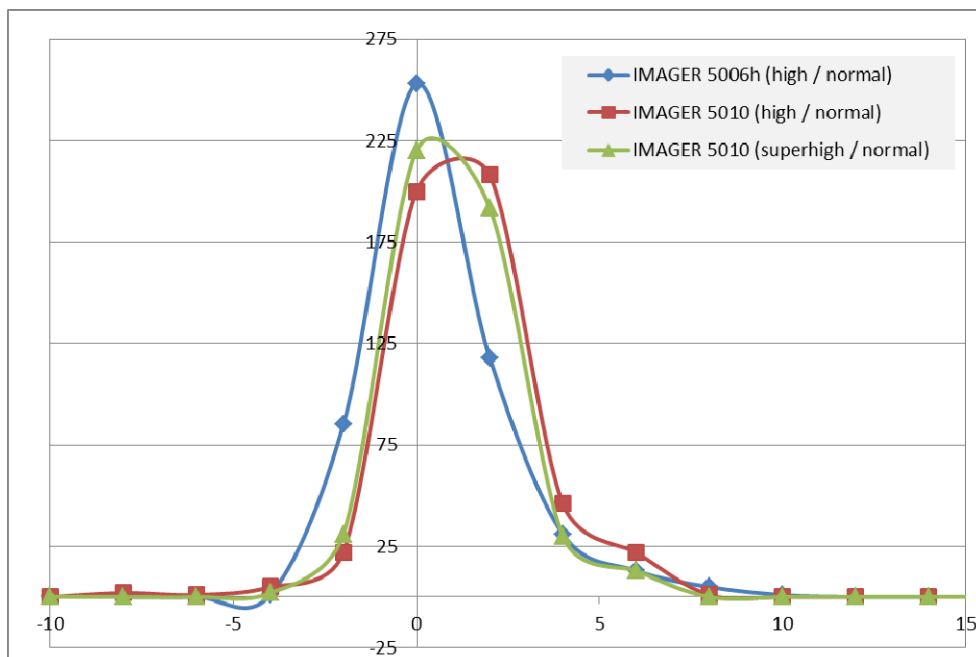


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Streckendifferenzen zwischen den Kugelzentren abgeleitet aus Scandaten und aus tachymetrisch bestimmten Kugelzentren

Als mögliche Alternative wird zukünftig die Bestimmung der Kugeln über Lasertracker oder sogar die Installation anderer Targets zur genaueren Bestimmung der Zentren geprüft. In Zusammenarbeit mit dem DESY in Hamburg wurde ein Target entwickelt, dass in das Punktnest eines Lasertrackers gesetzt werden kann (Abb. 4). So könnte eine stabile und hochgenaue Bestimmung des Zentrums gewährleistet werden. Kugeln können jedoch weiterhin als geometrische Prüfkörper bei der Bestimmung der Kenngrößen nach HEISTER (2006) und KERN (2008) verwendet werden.



Abb. 4: In Zusammenarbeit mit dem DESY Hamburg entwickeltes Target mit stabiler Befestigung im Punktnest eines Lasertrackers

3.2 Kenngrößen nach HEISTER (2006) und KERN (2008)

Unabhängig von den Referenzmessungen zum 3D-Testfeld sind die gescannten Kugeln genutzt worden, um verschiedene Kenngrößen nach HEISTER (2006) und KERN (2008) aus den Punktwolken der Kugeln abzuleiten. Hier werden die Kugelradiusabweichung, die Antastabweichung bzw. mittlere Antastabweichung und die Antast-Messunsicherheit näher betrachtet. Für diese Kenngrößen wurden gescannte Kugeln jeweils von der ersten Scannerposition im gesamten Raum verteilt ausgewählt, wobei so weit wie möglich immer dieselben zehn Kugeln benutzt wurden. Für das Kugelfitting wurden die Kugeln manuell aus der Punktwolke ausgeschnitten und mit einer Matlab-Routine in die Punktwolke gefittet, so dass für alle Scanner identische Bedingungen herrschten. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse je nach verwendeter Scanauflösung in vier Gruppen aufgeteilt. Die von KERN (2008) definierte Kugelradiusabweichung zeigt in Abb. 5 vom Sollradius abweichende systematische Differenzen für die zehn Kugeln für jeden Scanner. Die Impulslaufzeitsscanner liefern trotz der höchsten Auflösung auf der Kugel aufgrund des Messverfahrens nicht die besten Ergebnisse. Die besten und einheitlichsten Zahlen ergaben sich bei Auflösungen von 1,5 mm @ 10 m, hier liegen so gut wie alle Abweichungen im Bereich von ± 1 mm (Abb. 5 unten links). Bei einer Auflösung von 6 mm @ 10 m sind die Abweichungen gerade im Bereich von sehr wenigen Punkten auf der Kugel (<1000) bereits bis 3 mm groß.

Der zweite berechnete Parameter ist die mittlere Antastabweichung (HEISTER, 2006), welche die Spanne der Abstände zur ausgeglichenen Kugel beschreibt. Für die Berechnung werden die radialen Abweichungen aller Messpunkte aller Kugeln verwendet, die in Abb. 6

für die untersuchten Scanner zusammengefasst sind. Auch hier ist das Ergebnis der Impuls-laufzeitscanner wieder etwas schlechter als das der meisten Phasendifferenzscanner. Unter Berücksichtigung der kurzen Entfernungen von bis zu 20 m im Testfeld ist das Ergebnis nicht überraschend. Insgesamt ergeben sich für höhere Auflösungen bessere Resultate, jedoch ist das Ergebnis des IMAGER 5010 auffällig, der bei gleicher Auflösung doppelt so gute Werte erzielte wie die übrigen Instrumente.

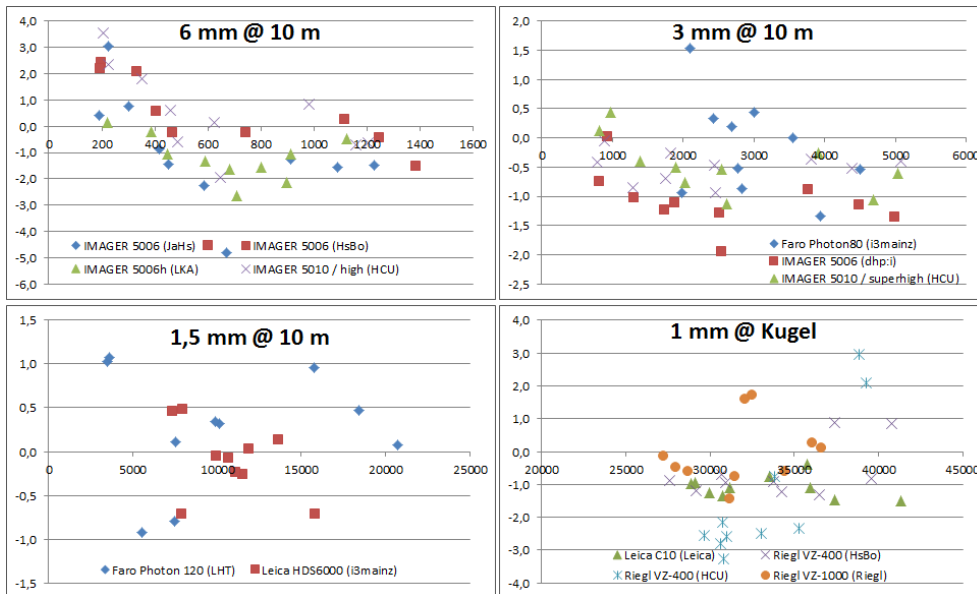


Abb. 5: Kugelradienabweichung für je 10 Kugeln in Abhängigkeit von der Punktzahl auf der Kugel im Diagramm aufgetragen

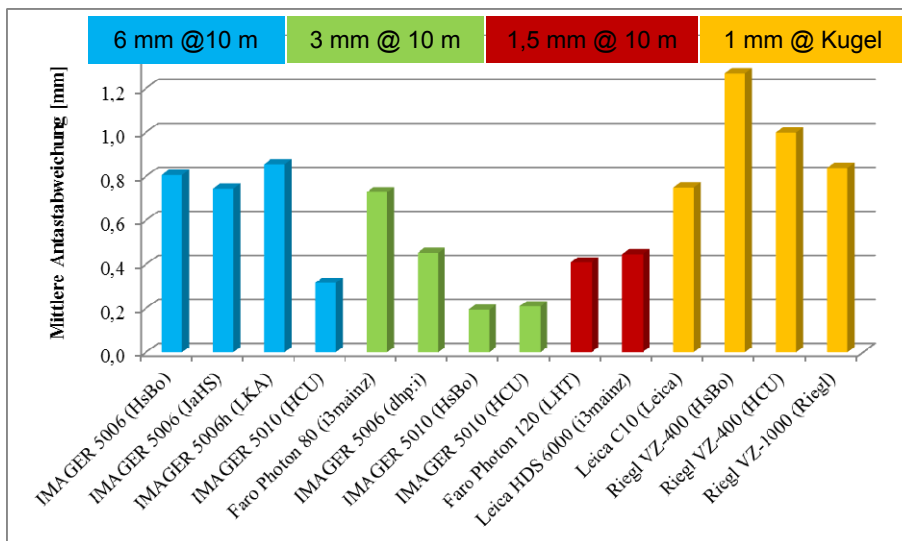


Abb. 6: Mittlere Antastabweichung nach HEISTER (2006)

Der letzte hier dargestellte Parameter ist die Antast-Messunsicherheit, der sich als Mittelwert der Standardabweichungen der geschätzten Kugelradien berechnet. Die in Abb. 7 zusammengefassten Ergebnisse zeigen, dass die Impulslaufzeitscanner bei der Antast-Messunsicherheit etwas besser als bei der mittleren Antastabweichung geworden sind, aber dass immer noch eine klare Abhängigkeit von der gewählten Auflösung besteht.

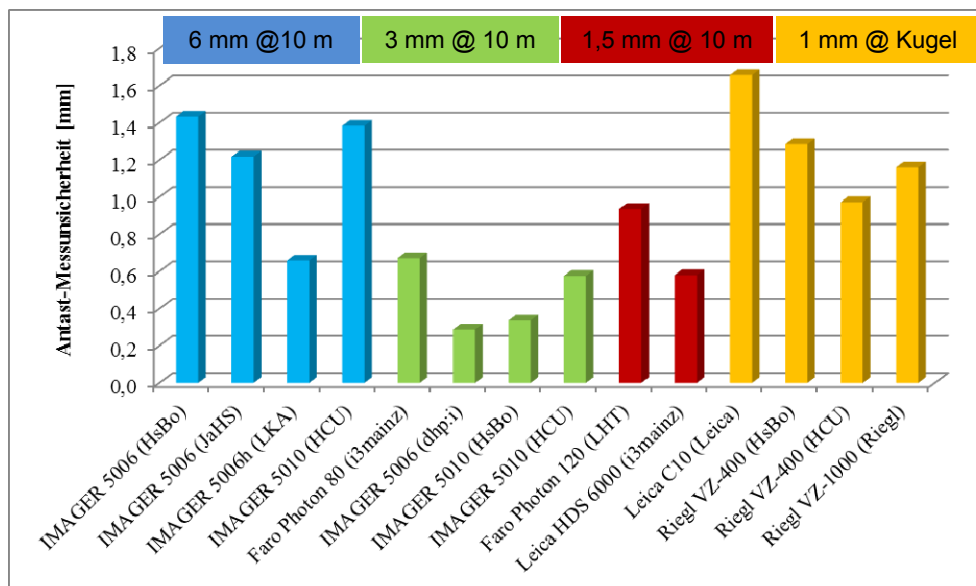


Abb. 7: Antast-Messunsicherheit nach HEISTER (2006)

4 Streckenmessgenauigkeit

Die Streckenmessgenauigkeit für den Nahbereich wurde auf der Komparatorbahn der HCU (maximale Distanz 20 m) durchgeführt. Die jeweiligen Referenzstrecken wurden mit einem Leica TM30 bestimmt. Mit jedem Scanner wurde mindestens ein Durchgang von einem bis 20 Meter auf das vom Hersteller empfohlene Target gescannt (Black & White Target, Kugel, Goecke Reflex-Target, HDS-Target), das in 1-Meter-Abständen auf der Bahn platziert wurde (Abb. 8). Grundsätzlich wurde eine hohe Scanauflösung eingestellt, wie z.B. 1 mm auf die Kugel beim Riegl VZ-400. Für die Streckenbestimmung wurde das Kugelfitting bzw. die automatische Target-Erkennung der Herstellersoftware eingesetzt.

In Abb.9 sind die Abweichungen der gescannten Distanzen zur jeweiligen Referenzstrecke als Ergebnisse für sieben untersuchte Scanner graphisch zusammengefasst. Die Abweichungen liegen für die meisten Scanner zwischen Null und zwei Millimetern, das heißt die ermittelten Strecken sind in den meisten Fällen etwas zu kurz gegenüber der Referenz. Geringfügig höhere Abweichungen als die übrigen Scanner weist der IMAGER 5006h des LKA auf, da mit diesem Scanner im Gegensatz zu den anderen IMAGER die Zielzeichen mit der geringsten Qualitätsstufe (low) gescannt wurden.

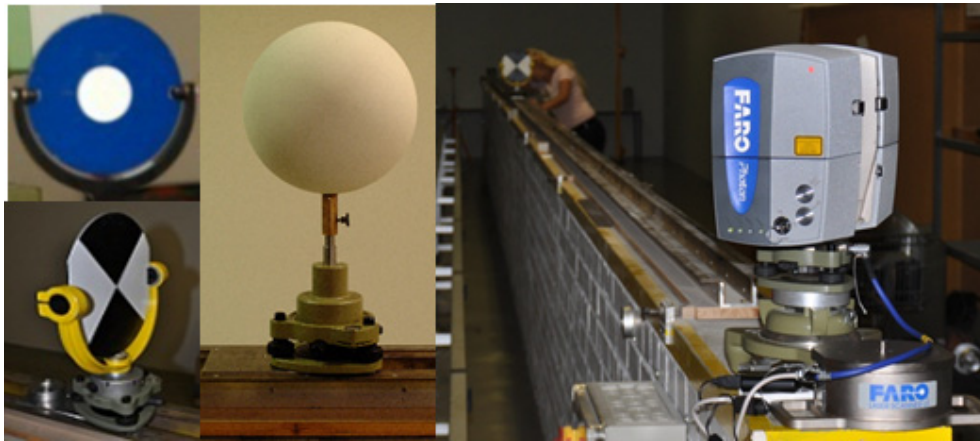


Abb. 8: HDS und s/w Target sowie Kugel (199 mm) zur Untersuchung der Streckenmessgenauigkeit (links) und der Scanner Faro Photon auf der HCU-Komparatorbahn (rechts)

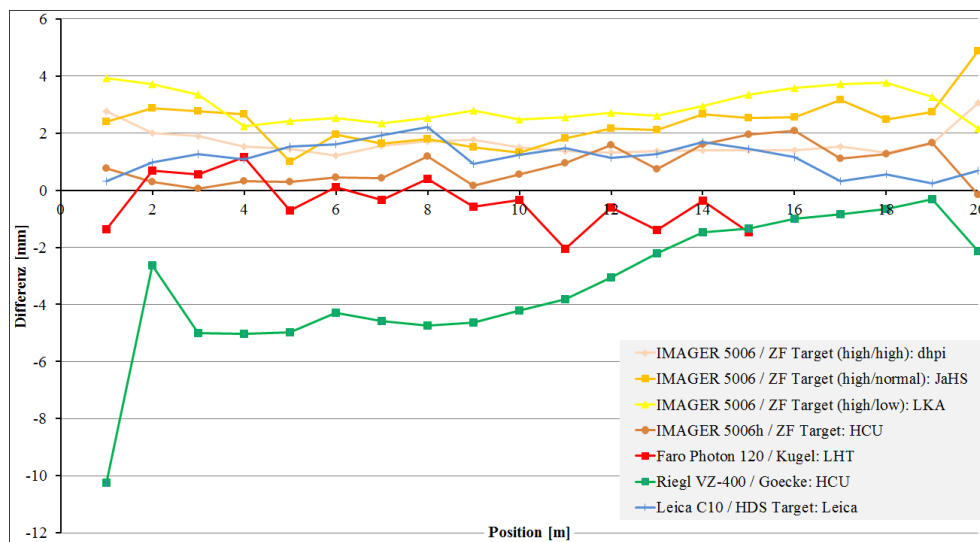


Abb. 9: Streckenmessgenauigkeit auf der Komparatorbahn bei Messung auf Hersteller-Zielzeichen

Einzig der Riegl VZ-400 der HCU weicht hier deutlich von allen anderen Resultaten ab, erst ab einer Strecke von ca. 15 m bewegen sich diese Differenzen im Bereich der anderen Geräte. Zur weiteren Überprüfung wurden mit diesem Scanner drei weitere unabhängige Messungen (Juli und Dezember 2011) durchgeführt, die das gleiche Resultat lieferten. Nach Rücksprache mit der Firma Riegl ist dieser Fehler auf eine fehlerhafte Nahbereichskorrektur

tur dieses speziellen Gerätes zurückzuführen, was durch einen Geräteservice behoben werden kann.

5 Einfluss des Auftreffwinkels auf die 3D-Punktgenauigkeit

Für eine nähere Betrachtung des Einflusses des Auftreffwinkels auf die Streckenmessung wurde eine ebene Steinplatte in einem schwenkbaren Rahmen montiert (MECHELKE et al. 2008). Die Platte wurde für die Messung in 10° -Schritten zunehmend verschwenkt, so dass sich der Auftreffwinkel des Laserstrahls von anfangs senkrecht (90°) bis annähernd parallel zur Platte (5°) ändert. Als Referenz wurden vier Kugeln vor der Platte montiert, die ebenso mit gedreht wurden. Da die Punktwolken der Kugeln unabhängig von der Plattenposition immer gleich bleiben, wurden diese zur Definition einer Referenzebene genutzt. Die Messungen wurden mit einem Abstand von ca. 10 m zur Platte durchgeführt. Für die Auswertung wurde der erste Abstand zwischen Referenzebene der vier Kugeln und der Ebene der Platte bei einem Auftreffwinkel von 90° als Sollabstand festgelegt, alle Differenzen berechnen sich zu diesem Abstand. Bei einem senkrechten Auftreffen auf die Oberfläche bildet sich der Laserstrahl als Kreis ab, bei einem schräg auftreffenden Strahl ist er jedoch ellipsenförmig. Ein daraus resultierender Einfluss auf die Streckenmessung dürfte sich in einer sich kontinuierlich ändernden Streckenlänge für jede Position bemerkbar machen.

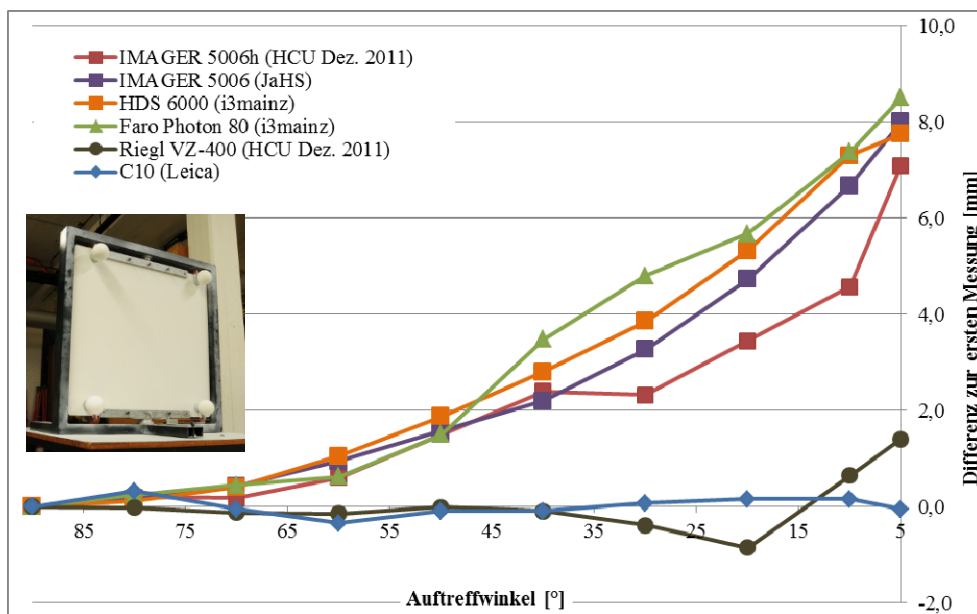


Abb. 10: Auftreffwinkel auf Granitplatte bei einer Scandistanz von ca. 10 m

Die Ergebnisse in Abb. 10 bestätigen frühere Resultate der HCU aus den Jahren 2007-2009 (MECHELKE et al. 2007, MECHELKE et al. 2008, LINDSTAEDT et al. 2009). Während sich die Differenzen der Impulslaufzeitscanner nicht wesentlich ändern und um Null einpendeln, lässt sich bei allen Phasendifferenzscannern ein deutlicher Trend erkennen. Die Abstände

zur Referenzebene werden immer größer und somit die gemessenen Strecken immer länger. Gravierend werden diese Differenzen aber erst bei einem in der Praxis unrealistischen Auftreffwinkel kleiner als 45° , vorher liegen alle Resultate in einem Bereich von 2 mm.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der an der HCU Hamburg im Juni 2011 durchgeführte Workshop über Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner hat gezeigt, dass dieses Aufgabengebiet weiterhin sehr schwierig bleibt, da die Anforderungen an die Prüfverfahren durch die immer besser werdenden Laserscanner stetig steigen. Während des Workshops konnten elf verschiedene terrestrische Laserscanner von unterschiedlichen Herstellern durch zahlreiche Anwender in den Prüfverfahren der HCU Hamburg getestet werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse der untersuchten Laserscanner decken sich in vieler Hinsicht mit Ergebnissen, die in früheren Untersuchungen an der HCU Hamburg erreicht wurden (MECHELKE et al. 2007; KERSTEN et al. 2009, LINDSTAEDT et al. 2009, LINDSTAEDT et al. 2011). Dennoch muss man auch die Schwierigkeit berücksichtigen, für jeden Scanner mit seinen unterschiedlichen technischen Spezifikationen realitätsnahe und praktische Untersuchungsbedingungen (z.B. Messvolumen) zu schaffen. Die erzielten Ergebnisse bestätigen die Angaben in den technischen Spezifikationen der Hersteller bis auf eine Ausnahme. Der RIEGL VZ-400 der HCU zeigte bei Distanzen unter 15 m höhere Abweichungen als erwartet, die auf eine fehlerhafte Nahbereichskorrektur im System zurückzuführen sind und die durch einen Service behoben werden kann.

In den Untersuchungen zeigte es sich auch, dass das 3D-Testfeld der HCU Hamburg den gestiegenen Anforderungen der heutigen terrestrischen Laserscanner nicht mehr gerecht wird. Die Zentren der Kugeln können im 3D-Testfeld nicht mehr mit einer signifikant höheren Genauigkeit bestimmt werden, um sie bei den Tests als Referenz zu verwenden. Der häufige Gebrauch der Plastikugeln mit den entsprechenden Adaptern verursachte in dieser Kampagne bereits nur eine Genauigkeit von 2-3 mm für die Zentrumskoordinaten, die letztendlich zu ungenau für die untersuchten Scanner ist. Daher müssen für zukünftige Untersuchungen stabilere Zielmarken im Testfeld befestigt werden (siehe z.B. Abb. 4).

Wir sind heute zwar immer noch weit entfernt von Standards für Prüfverfahren, Kenngrößen und benutzerfreundlicher Kalibrierung der Laserscanningsysteme, aber bereits die vielen Untersuchungen in den verschiedenen Hochschulen haben sicherlich zu einem besseren Verständnis der Systeme beigetragen. Die bei den Untersuchungen berechneten Kenngrößen lassen eine Vergleichbarkeit zu anderen und früheren Untersuchungen zu. Allerdings müssen wir uns hinterfragen, ob die Kenngrößen praxisrelevant und nicht zu akademisch sind. Trotzdem zeigen die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse nur einen Ausschnitt der möglichen zu untersuchenden Bewertungskriterien für terrestrische Laserscanner. Gerade im Hinblick auf Funktionalität sollte jedoch immer das Gesamtsystem, bestehend aus Hard- und Software betrachtet werden, denn die Handhabung eines Systems ist subjektiv und lässt sich wie auch weitere Parameter nicht in Zahlen fassen. Daher sind Kenngrößen nur Zahlen, die die praktische Erfahrung mit einem System nicht ersetzen können. Der DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement plant für das terrestrische Laserscanning ein Merkblatt (www.dvw.de/merkblatt) herauszugeben, um die anerkannten Regeln der Technik in einem bestimmten Bereich durch

konkrete Verfahrensanweisungen, Best-Practice Beispiele oder Beschreibungen zur Nutzung der neuen Technologie zu dokumentieren. Das liegt sicherlich auf dem richtigen Weg zu einer anerkannten Richtlinie.

Literatur

- Boehler, W., Bordas Vicent, M. & A. Marbs (2003): *Investigating Laser Scanner Accuracy*. Proceedings of XIXth CIPA Symposium, Antalya, Turkey, Sept. 30 – Oct. 4.
- Clark, J. & S. Robson (2004): *Accuracy of measurements made with CYRAX 2500 laser scanner against surfaces of known colour*. IAPRS, Vol. XXXV, Commission IV, Part B4, S. 1031-1037.
- Gordon, B. (2008): *Diskussion von Feldprüfverfahren zur Messunsicherheitsbestimmung für terrestrische Laserscanner*. Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 125-142.
- Gottwald, R. (2008): *Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners - A Contribution to a Future ISO Standard*. FIG Working Week 2008, Stockholm, Schweden, 14.-19. Juni 2008.
- Gottwald, R., Heister, H. & R. Staiger (2008): *Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung*. Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 91-110.
- Heister, H. (2006): *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 35-44.
- Johansson, M. (2003): *Explorations into the behaviour of three different high-resolution ground-based laser scanners in the built environment*. Proceedings of the CIPA WG 6 Int. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, S. 33-38.
- Kern, F. (2008): *Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 7. Oldenburger 3D-Tage 2008, Th. Luhmann, Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 306–316.
- Kern, F. & U. Huxhagen (2008): *Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 111-124.
- Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K. & C. Acevedo Pardo (2004): *Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 3. Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 98-107.
- Kersten, Th., Sternberg, H. & K. Mechelke (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, S. 122-131.

- Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M. & H. Sternberg (2009): *Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems*. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Heft 4, S. 301-316.
- Lichti, D. D. & J. Franke (2005): *Self-calibration of the iQsun 880 laser scanner*. Optical 3-D Measurement Techniques VII, Gruen & Kahmen (Eds.), Vol. I, S. 112-121.
- Lindstaedt, M., Kersten, Th., Mechelke, K., Graeger, T. & H. Sternberg (2009): *Phasen im Vergleich - Erste Untersuchungsergebnisse der Phasenvergleichsscanner FARO Photon und Trimble FX*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 53-64.
- Lindstaedt, M., Graeger, T., Mechelke, K. & Th. Kersten (2011): *Terrestrische Laserscanner im Prüfstand – Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-400, Leica C10 und Faro Photon 120*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 4-14.
- Mechelke, K., Kersten, Th. & M. Lindstaedt (2007): *Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems*. 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, (Eds. Gruen/Kahmen), Zurich, July 9-12, Vol. I, S. 319-327.
- Mechelke, K., Kersten, Th. & M. Lindstaedt (2008): *Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme - Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 7. Oldenburger 3D-Tage 2008, Th. Luhmann, Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 317-328.
- Neitzel, F. (2006): *Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip*. Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 15-34.
- Reshetyuk, Y. (2006): *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. Licentiate thesis in Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 151 pages.
- Schulz, T. (2007): *Calibration of Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy*. Dissertation No. 17036, ETH Zurich.
- Wehmann, W., Zyl, Ch. van, Kramer, H., Widiger, D. & R. Zimmermann (2007): *Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3, S. 175–180.

Adressen:

Maren Lindstaedt, Thomas Kersten, Tanja Graeger
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, email [maren.lindstaedt, thomas.kersten, tanja.graeger]@hcu-hamburg.de

Klaus Mechelke

HafenCity Universität Hamburg, Geodätisches Labor
Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, email klaus.mechelke@hcu-hamburg.de