

# **Terrestrische Laserscanner im Prüfstand – Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen aktueller terrestrischer Laserscanner**

Maren LINDSTAEDT, Tanja GRAEGER, Klaus MECHELKE, Thomas KERSTEN

## **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen aktueller terrestrischer Laserscanner vorgestellt, die im Jahr 2010 an der HafenCity Universität (HCU) Hamburg durchgeführt wurden. Es wurden die folgenden vier Laserscanner unterschiedlichen Prüfverfahren unterzogen: der Faro Photon 120 und der IMAGER 5006i von Zoller + Fröhlich als Phasendifferenzscanner sowie der Leica C10 und der Riegler VZ-400, die mit dem Laufzeitverfahren arbeiten. Mit den Scannern wurde im HCU 3D-Testfeld gemessen, um die 3D-Punktgenauigkeit und verschiedene Kenngrößen nach Heister (2006) und Kern (2008) zu ermitteln. Die aktuellen Ergebnisse werden den Resultaten früherer Kampagnen gegenüber gestellt. Zusätzlich wurde die Streckenmessgenauigkeit der vier Scanner im Nahbereich bis 20m auf der Komparatorbahn und im Bereich größerer Entfernungen mit Distanzen bis zu 430m auf der Hamburger Vergleichsstrecke untersucht. Aus den dargestellten Ergebnissen kann der Anwender kritisch entsprechende Rückschlüsse auf mögliche Qualität und Einsetzbarkeit der untersuchten Scanner ziehen.

## **1 Einleitung**

Das terrestrische Laserscanning hat sich in den vergangenen zehn Jahren in der Geomatik und verwandten Fachdisziplinen als eine anerkannte Messmethode etabliert. Es tritt nicht nur in Konkurrenz zu bekannten und bewährten Methoden wie Photogrammetrie oder Tachymetrie, sondern es bietet die Chance zur Kombination mehrerer Messverfahren. Trotz eines stetig zunehmenden Kreises von Anwendern dieser Technologie stellt das Laserscanning für viele andere immer noch ein finanzielles und technisches Wagnis mit ungewissem Ausgang dar. Den farbigen Prospekten mit illustrativen Anwendungsbeispielen der Hersteller stehen hohe Anschaffungskosten für Hard- und Software sowie Schulungskosten für Mitarbeiter gegenüber. Hinzu kommt oft die Schwierigkeit, sich für ein Gerät entscheiden zu müssen; scheint es doch für jede Anwendung einen speziellen Scanner zu geben, der sich am besten eignet, andersherum jedoch keinen Scanner, der für alle Anwendungen einsetzbar scheint. Zusätzlich erschwert wird die Sache dadurch, dass sich die technischen Spezifikationen (Datenblätter) der Hersteller selten miteinander vergleichen lassen. Es gibt keine einheitlichen Angaben zu Messgenauigkeiten, so dass ein Vergleich der Systeme schwer fällt.

Um mehr Transparenz bei der Bewertung der Scanner zu schaffen, beschäftigen sich seit einigen Jahren vor allem Hochschulen mit verschiedenen Untersuchungen von terrestrischen Laserscannern (u. a. BÖHLER et al. 2003; INGENSAND et al. 2003, KERSTEN et al. 2005, MECHELKE et al. 2007, GOTTWALD et al. 2008, KERN & HUXHAGEN 2008, KERSTEN

et al. 2009). Doch auch hier zeigt sich, dass jede Hochschule ihre eigenen Prüfverfahren und Untersuchungen entwickelt, die zwar einen direkten Vergleich mehrerer Scanner ermöglichen, aber einen Vergleich der Ergebnisse verschiedener Hochschulen untereinander eher erschweren. Um hier für eine Vereinheitlichung zu sorgen, haben HEISTER (2006) und KERN (2008) einheitliche Kenngrößen zur Prüfung von Laserscannern vorgeschlagen.

Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse der geometrischen Scanneruntersuchungen an der HafenCity Universität Hamburg aus dem Jahr 2010 zusammen. Es wurden die vier damals aktuellen Modelle Riegl VZ-400, Leica C10 (beide Laufzeitverfahren), Faro Photon 120 und IMAGER 5006i der Firma Zoller + Fröhlich (beide Phasendifferenzverfahren) getestet. Es werden Untersuchungsergebnisse aus dem 3D-Testfeld zur 3D-Punktgenauigkeit und die Berechnung von Kenngrößen nach Heister und Kern vorgestellt sowie Untersuchungen zur Streckenmessgenauigkeit sowohl im Nahbereich als auch auf größere Distanzen.

## 2 Untersuchte terrestrische Laserscanningsysteme

Die in Kapitel 3 vorgestellten Untersuchungen wurden mit den Anfang des Jahres 2010 aktuellen Modellen von vier verschiedenen Herstellern durchgeführt: Leica C10, Riegl VZ-400, Faro Photon 120 und IMAGER 5006i von Z+F. Die ersten beiden Scanner arbeiten nach dem Impulslaufzeitverfahren, haben aber inzwischen beide eine hohe Messrate von 50.000 (C10) bzw. 120.000 (VZ-400) Punkten pro Sekunde. Die Reichweiten der beiden Geräte liegen mit mehreren hundert Metern (C10 = 300 m, VZ-400 = 600 m) deutlich über denen der beiden Phasenscanner Photon 120 (120 m) und IMAGER 5006i (80 m), die aber den Vorteil der noch deutlich höheren Messraten von bis zu 1 Million Punkten pro Sekunde besitzen. Der Leica C10 hat als einziges Gerät eine integrierte hochauflösende Kamera (4 Megapixel), bei allen anderen Scannern lässt sich aber eine Kamera adaptieren und mit entsprechenden Software-Funktionen können Farbwerte auf die Punktwolke aufgebracht werden. Als Besonderheit bietet Riegl die Möglichkeit der Mehrfachecho-Aufzeichnung und der Full-Waveform-Auswertung als Resultat der Echo-Digitalisierung. Die wichtigsten technischen Spezifikationen (laut Hersteller) der Scanner sind in Tab. 1 zusammengefasst, während die Geräte in Abb.1 dargestellt sind.

**Tabelle 1:** Technische Spezifikationen der untersuchten terrestrischen Laserscanner

Scanner/Kriterium	Leica C10	Faro Photon 120	Riegl VZ-400	Z+F IMA- GER 5006i
Messverfahren	Impuls	Phase	Impuls	Phase
Gesichtsfeld [°]	360 x 270	360 x 320	360 x 100	360 x 310
Scandistanz [m]	300	120	600	< 79
Scangeschwindigkeit	50.000pts/s	976.000pts/s	125.000pts/s	500.000px/s
Winkelauflös. H/V [°]	0,0023	0,009	0,0005°	0,0018
Laserspotgröße	4,5mm/50m	11,3mm/50m	16mm/50m	14mm/50m
Wellenlänge [nm]	532	785	Nahes Infrarot	658
3D Punktgenauigkeit	6mm	keine Angabe	keine Angabe	10mm/50m
Distanzgenauigkeit	4mm bis 50m	2mm/25m	5mm/100m	6mm/50m
Kamera	integriert	Aufsatz	Aufsatz	Aufsatz
Neigungssensor	ja	ja	ja	ja



**Abb. 1:** Untersuchte terrestrische Laserscanner v.l.n.r.: Leica C10, Faro Photon 120, Riegl VZ-400 und IMAGER 5006i von Zoller & Fröhlich.

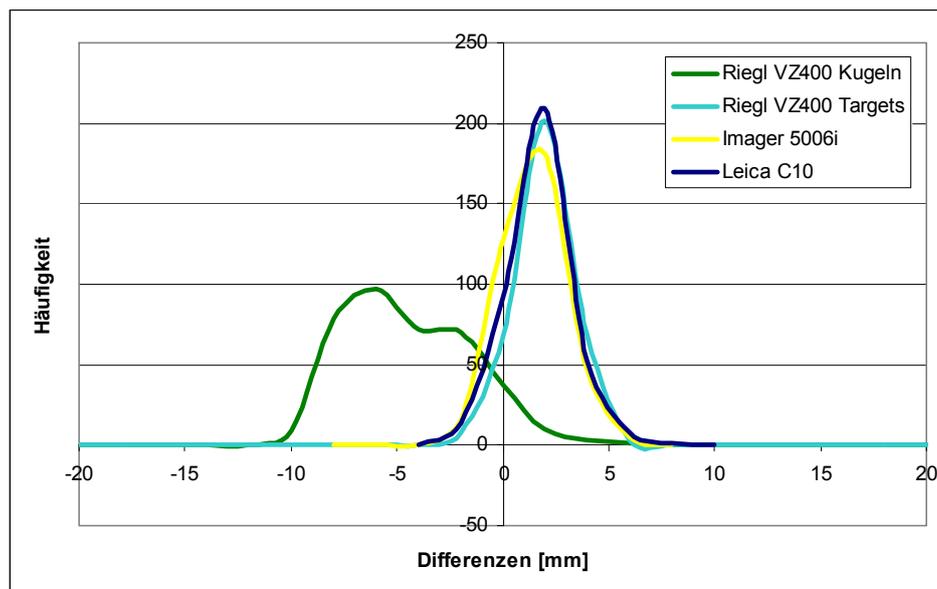
### 3 Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen

#### 3.1 3D-Testfeld

Das 3D-Testfeld der HCU Hamburg wurde 2003 konzipiert. Es besteht aus 53 fest vermarkten Punkten die wahlweise mit Prismen, Kugeln oder Targets ausgestattet werden können. Weitere Details über das Testfeld sind unter in KERSTEN et al. (2005) zu finden. Neben den gleichen Untersuchungen, die schon seit mehreren Jahren an der HCU durchgeführt wurden, sind ebenso wie in 2009 auch wieder verschiedene Kenngrößen nach HEISTER (2006) und KERN (2008) berechnet worden. Bei der Untersuchung im Testfeld ist die Genauigkeit eines 3D-Laserscannersystems durch eine Kombination von Abweichungen und Messunsicherheiten beeinflusst, die nicht separat bestimmt werden können: Distanz- und Winkelmessung des Scanners, Einpassung der Kugeln in die Punktwolke und Zentrierfehler der Kugeln. Somit kann hier nur eine Aussage über das Gesamtsystem getroffen werden, nicht über einzelne Komponenten.

Die Messungen im Testfeld erfolgten je Scanner nach bewährtem Schema von fünf bzw. sechs Standpunkten aus, die sich wie folgt räumlich verteilen: einer bzw. zwei im Erdgeschoss, zwei im ersten Stock, einer auf halber Höhe zwischen erstem und zweitem Stock und einer im zweiten Stock. Von den insgesamt 53 verfügbaren Punkten wurden 30 mit Kugeln signalisiert. Diese besitzen einen Durchmesser von 199 mm und bestehen aus mattweiß lackiertem Plastik. Für die verschiedenen Scanner wurden folgende Auflösungen eingestellt: für den Faro Photon die Auflösung  $\frac{1}{2}$  (entspricht 3 mm auf 10 m) ohne Rauschunterdrückung, für den Leica C10 eine Auflösung von 3 mm auf 20 m, für den Riegl VZ-400 2 mm auf der Kugel und für den IMAGER 5006i wurde die Einstellung Super High gewählt. Mit dem Riegl VZ-400 wurden zusätzlich zu den Kugeln von allen Stationen auch die reflektierenden Göcke-Targets gescannt. Die Referenzkoordinaten der Punkte wurden durch eine Netzmessung von fünf Standpunkten mit einem Leica TM30 (Distanzmessgenauigkeit 1 mm + 1 ppm und Winkelmessgenauigkeit 0.3 mgon) und anschließender Ausgleichung bestimmt. Die Standardabweichungen der 3D-Koordinaten lagen hier unter 0,5mm.

Zur Bestimmung des jeweiligen Kugelzentrums  $i$  wurde wie in vorherigen Untersuchungskampagnen das Programm RealWorks Survey der Firma Trimble eingesetzt, so dass dieser Schritt für alle Scanner unter gleichen Bedingungen stattfand. Dafür wurden Messdaten manuell so bereinigt, dass nur die Punkte auf der Kugel für die Berechnung des Kugelzentrums verwendet wurden. Die Ergebnisse des Kugelfittings wurden in einer früheren Messkampagne mit einem selbst entwickelten Matlab-Programm überprüft. Ebenso wurde die Registrierung der einzelnen Standpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem mit der Software RealWorks Survey durchgeführt. Für eine erste Analyse wurden wieder alle Kugeln in das System des ersten Standpunktes überführt und die Koordinaten der Kugeln wurden jeweils gemittelt. Dann wurden zwischen den Kugeln alle möglichen Streckenkombinationen berechnet und die Abweichungen zu den Strecken aus der Tachymetermessung in einer Häufigkeitsverteilung dargestellt (Abb. 2). Dabei wurde festgestellt, dass die gescannten Daten des Faro Photon 120 offensichtlich fehlerhaft waren, da die Abweichungen der 3D-Strecken bei bis zu 5cm lagen. Eingesetzt wurde der Scanner auf einem Karbonstativ, das auch sonst mit diesem Scanner verwendet wird, allerdings nur in Rundumscans. Bei dieser Untersuchung wurden jedoch einzelne Bereiche (Ausschnitte) gescannt. Durch die hohe Drehgeschwindigkeit des Scanners in der Qualitätsstufe 1 kommt es beim Abbremsen zu leichten Stativbewegungen zwischen den einzelnen Aufnahmen. Diese Annahme wird auch damit bestätigt, dass Strecken von Kugeln innerhalb einer Aufnahme zueinander passen. Somit wurden für den Faro Photon nur die möglichen Kenngrößen berechnet, da ein 3D-Streckenvergleich nicht mehr möglich war.



**Abb. 2:** Verteilung der Kugelabstandsabweichungen nach Berechnung aller Streckenkombinationen

Betrachtet man die Abbildung 2, so sind für den IMAGER und den Leica C10 sehr homogene Glockenkurven mit einem kleinen Versatz ins Positive zu erkennen. Die Kurve des

IMAGER ähnelt sehr denen in den vorigen Untersuchungskampagnen, mit dem Unterschied, dass die Spanne mit 8,7 mm beim jetzigen Modell 5006i deutlich kleiner ist als beim vorherigen Modell 5006 (16,1 mm in 2008). Das Ergebnis der C10 (Spanne 9,7 mm) deckt sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen der Vorgänger ScanStation 1 (Spanne 11,9 mm in 2008) und ScanStation 2 (Spanne 9,7 mm). Dagegen ergibt sich für den Riegl VZ-400 eine sehr große Streuung der Werte, die noch dazu deutlich ins Negative verschoben ist. Diese systematischen Abweichungen in den Streckenkombinationen sind vermutlich auf eine fehlende automatische interne Messwert-Korrektur aus der Laborkalibrierung zurückzuführen (siehe auch Kap. 4). Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der Göcke-Targets, so deckt sich diese Kurve nahezu mit denen vom IMAGER und Leica C10.

**Tabelle 2:** Abweichungen der 3D-Strecken im Testfeld bei Registrierung aller Stationen

Scanner	Anzahl 3D-Punkte	Anzahl Strecken	$\Delta L_{min}$ [mm]	$\Delta L_{max}$ [mm]	Spanne [mm]
Riegl VZ-400 Kugeln	28	378	-11,1	4,4	15,5
Riegl VZ-400 Targets	27	351	-3,5	4,8	8,3
IMAGER 5006i	28	378	-3,3	5,4	8,7
Leica C10	28	378	-3,6	6,1	9,7

Die ersten berechneten Kenngrößen sind die mittlere Kugelabstandsabweichung  $\Delta L$  und die Abstands-Messunsicherheit  $u_L$  (Berechnung s. Tab. 3 und Tab.4) nach HEISTER (2006). Die Streckenverteilung erfolgte in Anlehnung an VDI/VDE 2634 (2002), es wurden sieben Strecken aus unabhängigen Kugelpaaren gebildet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 und Tab. 4 zusammengefasst.

**Tabelle 3:** Ergebnisse für die Kenngröße Kugelabstandsabweichung  $\Delta L$

	#Strecken	$\Delta L_1$ [mm]	$\Delta L_2$ [mm]	#Strecken	$\Delta L_3$ [mm]
Riegl VZ-400 Kugeln	7	4,6	4	378	5,5
Riegl VZ-400 Targets	7	1,3	0,8	351	1,4
IMAGER 5006i	7	1,6	1,2	378	1,2
Leica C10	7	1,5	1,3	378	1,3

$\Delta L_1$ : Mittel aus 4 Stationen, stationsweise berechnet, 7 Strecken  
 $\Delta L_2$ : alle 5 Stationen registriert, 7 Strecken  
 $\Delta L_3$ : alle 5 Stationen registriert, alle Strecken

$$\Delta L_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\Delta L_j|$$

**Tabelle 4:** Ergebnisse für die Kenngröße Abstands-Messunsicherheit  $u_L$

	#Strecken	$u_{L1}$ [mm]	$u_{L2}$ [mm]	#Strecken	$u_{L3}$ [mm]
Riegl VZ-400 Kugeln	7	5,3	5,0	378	6,2
Riegl VZ-400 Targets	7	1,7	1,0	351	1,7
IMAGER 5006i	7	2,0	1,5	378	1,6
Leica C10	7	1,8	1,5	378	1,7

$u_{L1}$ : Mittel aus 4 Stationen, stationsweise berechnet, 7 Strecken  
 $u_{L2}$ : alle 5 Stationen registriert, 7 Strecken  
 $u_{L3}$ : alle 5 Stationen registriert, alle Strecken

$$u_L = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^7 \Delta L_j^2}{7}}$$

Es liefern sowohl der IMAGER 5006i als auch der Leica C10 mit Kugeln sehr gute Ergebnisse, die für die beiden Kenngrößen zwischen 1 und 2 mm liegen. Dagegen weicht das Ergebnis des Riegl VZ-400 mit der Kugel aus den gleichen Gründen wie beim Streckenvergleich im Testfeld deutlich ab, während das Ergebnis mit den Targets sehr gut zu den Ergebnissen der anderen Scanner passt. Zusätzlich zur Berechnung von Strecken aus Kugelpaaren wurde die Berechnung von  $\Delta L$  nach Vorschlag von KERN (2008) als 6-Parameter-Transformation mit festem Maßstab durchgeführt. Dabei werden die Kugelmitelpunkte auf die Sollkoordinaten aus der Netzmessung transformiert und die Standardabweichungen der 3D-Koordinaten dienen als Maß für  $\Delta L$ . Vorteil dabei ist, dass alle Orientierungen der Kugeln im Raum und zum Scanner berücksichtigt werden. Dementsprechend ist das Ergebnis hier dann auch noch eine Stufe besser als bei der Auswahl einzelner Strecken (Tab. 5).

**Tabelle 5:** Kugelabstandsabweichung  $\Delta L$  aus Berechnung einer 6-Parameter-Transformation

	#Strecken	$\Delta L_1$ [mm]	$\Delta L_2$ [mm]	#Stationen
Riegl VZ-400 Kugeln	28	1,9	1,3	378
Riegl VZ-400 Targets	27	0,7	0,5	351
IMAGER 5006i	28	0,9	0,6	378
Leica C10	28	0,7	0,5	378
$\Delta L_1$ : Mittel aus allen Stationen, stationsweise berechnet				
$\Delta L_2$ : alle Stationen registriert				

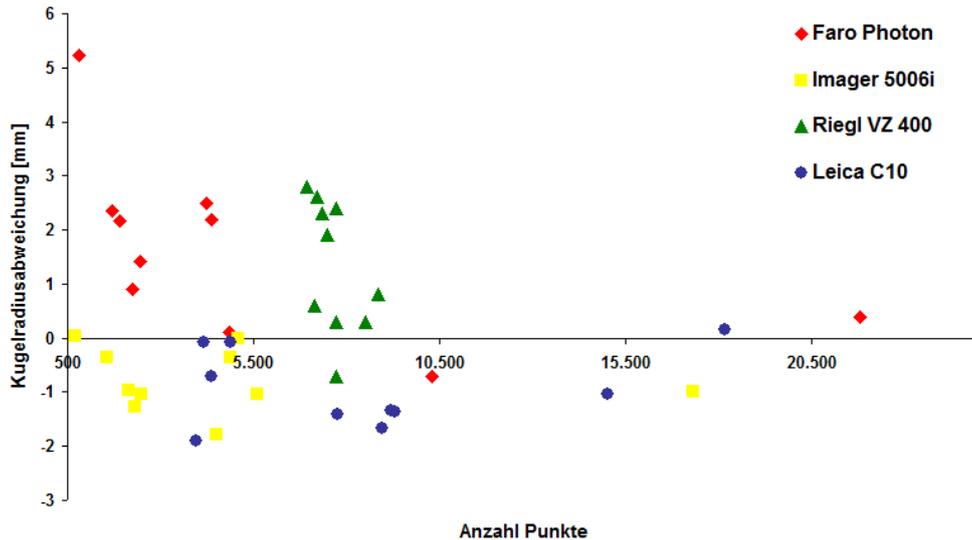
Die dritte berechnete Kenngröße ist die Kugelradiusabweichung (Tab. 6). Sie beschreibt die Differenz zwischen einer mit freiem Radius in einer Punktwolke eingepassten Kugel und der Kugelsollgröße.

**Tabelle 6:** Ergebnisse für die Kenngröße Kugelradiusabweichung

	# Kugeln	# Punkte / Kugel $\emptyset$	$\Delta r_{\min}$ [mm]	$\Delta r_{\max}$ [mm]	$\emptyset \Delta r$ [mm]
Riegl VZ-400	10	7668	-0,7	2,8	1,33
Faro Photon 120	10	5466	-0,7	5,2	1,65
IMAGER 5006i	10	4655	-1,8	0,1	-0,8
Leica C10	10	8568	-1,9	0,2	-0,9
$\Delta r_{\min}$ : Kugelradiusabweichung minimal					$R_K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i$
$\Delta r_{\max}$ : Kugelradiusabweichung maximal					
$\emptyset \Delta r$ : Kugelradiusabweichung Mittel für 10 Kugeln					

Anhand der Kugelradienabweichungen können systematische lokale Formabweichungen aufgezeigt werden. In der Tabelle 6 ist dabei ein Durchschnittswert der Differenzen zur Sollgröße von jeweils zehn Kugeln angegeben. Nimmt man die Abbildung 3 dazu, dann ist zu sehen, dass die Anzahl der Punkte auf der Kugel keinen Einfluss auf die Berechnung der Kugelgröße hat. Die Abweichungen des Faro Photon und des Riegl VZ-400 liegen fast alle im positiven Bereich, d.h. diese berechneten Kugeln sind zu klein, während die Abweichungen von IMAGER 5006i und Leica C10 im Negativen liegen, die Kugeln somit zu groß sind.

Weitere berechnete Kenngrößen sind die Antastabweichung und die Antast-Messunsicherheit (HEISTER 2006) sowie die Antastabweichung nach KERN (2008), s. Tab. 7. Die Antastabweichung beschreibt das zu erwartende Rauschen auf der Objektoberfläche, die zugehörige Antast-Messunsicherheit ergibt sich als Mittelwert der Standardabweichungen der geschätzten Kugelradien.



**Abb. 3:** Kugelradiusabweichung in Abhängigkeit von der Punktzahl auf der Kugel

Tabelle 7 zeigt sehr ähnliche Ergebnisse für die verschiedenen Geräte. Im Vergleich ist der 5006i noch etwas besser als sein Vorgängermodell der IMAGER 5006 im Jahr 2008. Dagegen sind die Zahlen beim Faro Photon 120 deutlich schlechter als beim Vorgänger Photon 80 (LINDSTAEDT et al. 2009), was mit der hier nicht aktivierten Rauschunterdrückung zu erklären ist.

**Tabelle 7:** Ergebnisse für die Kenngrößen Antastabweichung und Antast-Messunsicherheit

	# Ku- geln	Mittlere An- tastabweichung (Heister, 06) $R_H$	Antast- abweichung (Kern, 08) $R_K$	Antast-Mess- unsicherheit (Heister, 06) $u_R$
Riegli VZ-400	10	0,8	1,1	1,1
Faro Photon 120 RR0	10	0,9	1,2	1,3
IMAGER 5006i	10	0,3	0,5	0,6
Leica C10	10	1,2	1,6	1,4
alle Werte in mm				
$R_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad R_K = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad u_R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10} s_{Rj}^2}{10}}$				

### 3.2 Streckenmessgenauigkeit auf der Vergleichsstrecke

Für die Untersuchung zur Streckenmessgenauigkeit wurde die Hamburger Vergleichsstrecke auf dem Friedhof in Ohlsdorf genutzt. Sie besteht aus sieben Granitpfeilern mit einer maximalen Streckenlänge von 430m. Um auch den Faro Photon 120 untersuchen zu können, der nur eine maximale Reichweite von 120m besitzt, wurden zwischen den Pfeilern Stative in Abständen von zehn Metern jeweils auf Pfeilerhöhe bis zur Distanz von 120m aufgestellt. Die Bestimmung der Referenzstrecken erfolgte mit einem Leica TM30.

Es wurden für die drei untersuchten Scanner verschiedene Zielzeichen eingesetzt: Für den Riegl VZ-400 zwei Göcke-Targets (5 cm und 10 cm Reflexmarke) und die Kugel mit 199 mm Durchmesser. Für den Leica C10 wurden die 199 mm Kugel und das HDS-Target verwendet und für den Faro Photon 120 kam die 199 mm-Kugel zum Einsatz.

Beim Scanning wurden zuerst die Targets mit dem VZ-400 unter Verwendung der Standardeinstellungen für Targets gescannt. Die Kugeln wurden anschließend als Objekte mit einer immer gleich gewählten maximalen Auflösung von 1 mm auf dem Objekt erfasst. Mit dem Faro Photon 120 wurden die Kugeln jeweils mit der höchsten Qualität (Auflösung 1/1 und Qualität 4) gescannt, während mit der Leica C10 die HDS-Targets als Target-Scan erfasst und die Kugeln wiederum als Objekt gescannt wurden.

Die Koordinaten der Riegl-Targets wurden direkt aus der Software RiSCAN PRO übernommen, wohingegen die gescannten Kugeln als ASCII-Dateien exportiert wurden und das Kugelfitting wieder in RealWorks Survey durchgeführt wurde. Ebenso wurde mit den gescannten Kugeln des Faro Photon vorgegangen. Die Koordinaten der Leica HDS-Targets wurden aus der Software Leica Cyclone übernommen und die Kugeln wurden sowohl in RealWorks Survey als auch in Cyclone eingepasst.

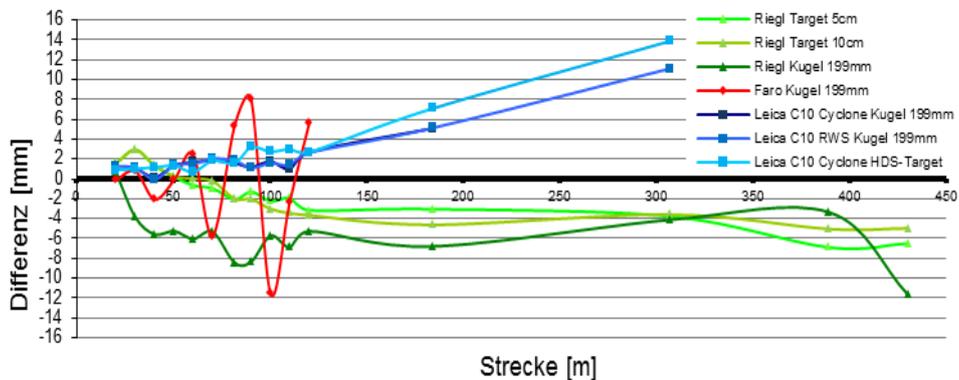


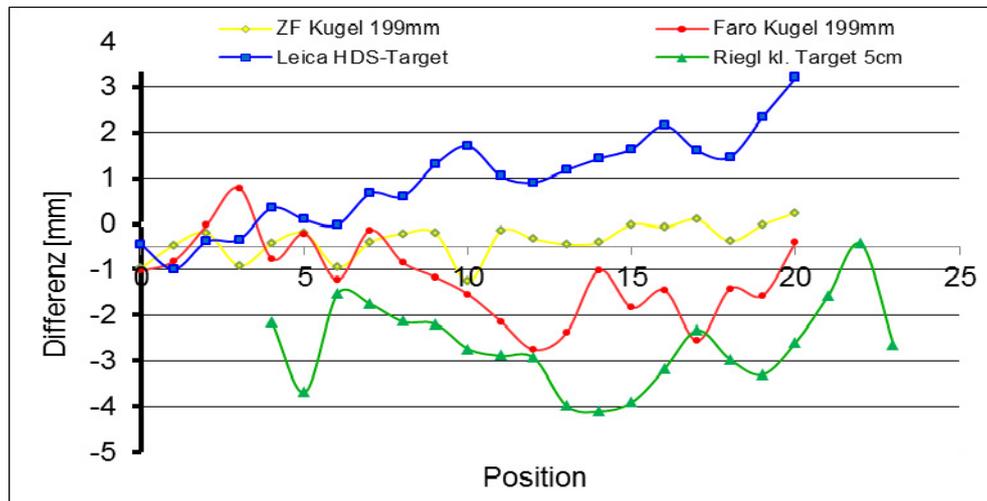
Abb. 4: Vergleich von gescannten Strecken auf unterschiedliche Zielzeichen zu Referenzstrecken

In Abb. 4 sind die Streckendifferenzen der drei Scanner mit unterschiedlichen Zielzeichen zu den Sollstrecken dargestellt. Sind die Ergebnisse für die Göcke-Targets des Riegl VZ-400 für die ersten hundert Meter noch etwas schwankend, so pendeln sie sich für die gesamte restliche Strecke bei relativ konstanten -4 mm ein. Die Ergebnisse der Kugeln liegen beim VZ-400 von vornerein deutlich im negativen Bereich, werden bei zunehmender Dis-

tanz dann noch besser als auf den kürzeren Strecken. Dagegen liegen die Resultate des Leica C10 im positiven Bereich, d.h. die gemessenen Strecken sind hier alle zu kurz. Dieser Trend zeigt sich auch unabhängig von Kugel oder HDS-Target, d.h. beide Kurven sehen recht ähnlich aus (Abb.4), die der Kugel ist sogar noch geringfügig besser als die des Targets. Auf jeden Fall zeigt sich eine deutliche Zunahme der Differenzen ab einer Strecke von ca. 100 m, die eventuell ähnlich wie Untersuchungen der ScanStation 2 auf einen Maßstabsfaktor schließen lässt (MECHELKE et al. 2008).

### 3.3 Streckenmessgenauigkeit auf der Komparatorbahn

Für diese Untersuchung wurden die vier Scanner auf der 20 m langen Komparatorbahn im Messkeller der HafenCity Universität Hamburg am Standort City Nord eingesetzt. Verwendete Zielzeichen waren hier die vom Hersteller empfohlenen bzw. für möglich ausgewiesenen Objekte: reflektierendes Target (5 cm) für Riegl, 199 mm Kugel (Faro und IMAGER), Leica HDS Target. Die Abstände der Kugeln zum Scanner wurden in ein Meter-Schritten erhöht, die Scanauflösungen der Geräte waren wie folgt eingestellt: Riegl VZ-400 maximal, für den IMAGER 5006i „ultra high“ und für den Faro Photon 3.1 mm auf 10 m (Auflösung  $\frac{1}{2}$ , Q1). Das Kugelfitting wurde auch hier wieder in RealWorks Survey durchgeführt, die Koordinaten der hersteller-spezifischen Targets wurden aus der jeweiligen Scansoftware übernommen.



**Abb. 5:** Streckendifferenzen für Strecken bis 20 m auf Hersteller-Zielzeichen

Die Differenzen der gescannten Strecken zu Referenzstrecken sind in Abb. 5 dargestellt. Das beste Ergebnis liefert hier erneut der IMAGER 5006i, dessen Werte sich am dichtesten an der Nulllinie befinden. Das Leica HDS-Target liegt leicht im positiven Bereich, während der Faro Photon 120 und der Riegl VZ-400 eher negative Werte liefern, was sich sehr gut mit dem Resultat der langen Strecken auf der Vergleichsstrecke deckt. Auffällig ist, dass der erste Messwert des Riegl VZ-400 bei 4m liegt, da auf kürzeren Distanzen keine Messungen möglich waren.

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

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). Man muss jedoch dabei berücksichtigen, dass es sehr schwierig ist, für jeden Scanner mit den unterschiedlichen Spezifikationen realitätsnahe und praktische Untersuchungsbedingungen (z.B. Messvolumen) zu schaffen. Mit diesen Ergebnissen werden die technischen Spezifikationen der Hersteller bis auf zwei Ausnahmen bestätigt. Die Analyse der Scandaten des RIEGL VZ-400 (mit der Seriennummer S9997462) auf Kugeln im 3D-Testfeld zeigt einen deutlichen systematischen Messfehler in der Distanzmessung auf die jeweilige Messentfernung. Wie der Hersteller mitteilt, liegen diese Messfehler klar außerhalb der typischen Messgenauigkeit der Geräte der Type RIEGL VZ-400. Der beobachtete systematische Messfehler entspricht in seiner Größe und in seinem Verlauf in diesem Messbereich genau jener in der Laborkalibrierung ermittelten systematischen Abweichung, die vor Auslieferung der Geräte ermittelt und intern abgespeichert wird. Es wird vom Hersteller vermutet, dass aus bisher unbekanntem Gründen eben diese Kalibrierwerte nicht angewendet wurden. Ohne eine Untersuchung im 3D-Testfeld hätte man diese Systematik bei der Entfernungsmessung nicht aufgedeckt. Die Ergebnisse des Photon 120 müssen durch Untersuchungen weiterer Scanner des Typs verifiziert werden. Die Untersuchungen zur Distanzmessgenauigkeit deuten beim Scanner Leica C10 wie in vorherigen Tests auf einen Maßstabsfaktor hin, der aber als systematischer Fehler zu kalibrieren wäre.

Trotzdem zeigen diese Ergebnisse nur einen Ausschnitt der möglichen zu untersuchenden Bewertungskriterien. 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.

Die hier berechneten Kenngrößen lassen eine Vergleichbarkeit zu anderen Untersuchungen zu (GORDON 2008 und KERN 2008). Allerdings muss auch darauf geachtet werden, dass die entwickelten Prüfverfahren nicht zu akademisch werden und für die Praxis keinen Wert mehr darstellen. Somit ergibt sich daraus die Forderung nach felddauglichen Verfahren, die dem Anwender die Möglichkeit geben, sein System wenigstens zu überprüfen, auch wenn es keine Möglichkeit einer Kalibrierung im Felde gibt. Erste Vorschläge hierzu machen GORDON (2008) und GOTTWALD et al. (2008). Abschließend bleibt zu hoffen, dass die Scanneruntersuchungen der Hochschulen zur Verbesserung der Systeme beitragen.

## 5 Literatur

Gordon, B. (2008): *Diskussion von Feldprüfverfahren zur Messunsicherheitsbestimmung für terrestrische Laserscanner* Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 125-142.

- Gottwald, R., Heister, H. & R. Staiger (2008): *Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung*. Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 91-110.
- Heister, H. (2006): *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 35-44.
- Ingensand, H., Ryf, A. & T. Schulz (2003): *Performances and Experiences in Terrestrial Laser Scanning*. Optical 3-D Measurement Techniques VI, Grün/Kahmen (Eds.), pp. 236-243.
- 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.), Vol. I, pp. 122-131.
- Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H., (2009): *Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems*. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 4, pp. 301-314.
- Kern, F. (2008): *Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann, Heidelberg, pp. 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, pp. 111-124.
- Lindstaedt, M., Kersten, Th., Mechelke, K., Graeger, T., Sternberg, H., (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 und Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 53-64.
- Mechelke, K., Kersten, Th. & M. Lindstaedt (2007): *Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems*. Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Gruen/Kahmen (Eds.), Vol. I, pp. 319-327.
- VDI/VDE 2634 (2002): *Optische 3D-Messsysteme – Systeme mit flächenhafter Antastung*. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), VDI/VDE Richtlinien, Düsseldorf, August, 2002.

Adressen:

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