Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der handgeführten 3D-Scanner Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B¹

Geometrical Accuracy Investigations of the Handheld Scanning Systems Creaform HandySCAN 700 and Mantis Vision F5-B

Heinz-Jürgen Przybilla, Thomas P. Kersten, Maren Lindstaedt, Deborah Starosta

In der optischen 3D-Messtechnik sind flächenhaft erfassende Scannersysteme nicht mehr aus dem Alltag wegzudenken. Objektcharakteristika, wie Größe, Gestalt und/oder Oberfläche, sind maßgebliche Kenngrößen bei der Auswahl eines hierfür geeigneten Messsystems. Handgeführte 3D-Scanner, die aktuell von einer Vielzahl unterschiedlicher Hersteller angeboten werden, sind in zunehmendem Maß am Markt verfügbar. Die Spannweite der Preise reicht von wenigen hundert bis zu mehreren zehntausend Euro. Neben einer Einordnung in ein entsprechendes Preissegment ist die Information über die Leistungsfähigkeit eines handgeführten 3D-Scanners ein wesentliches Kaufargument. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, reproduzierbare Aussagen über die geometrische Leistungsfähigkeit zweier ausgewählter, marktgängiger Systeme zu geben.

In einer Kooperation des Labors für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg und der Hochschule Bochum (Labor für Photogrammetrie) wurden geometrische Genauigkeitsuntersuchungen mit den handgeführten 3D-Scannern HandySCAN 700 von Creaform und dem Mantis Vision F5-B durchgeführt, die in diesem Beitrag vorgestellt werden. Im Rahmen der Untersuchungen zur geometrischen Qualität der High-End-Systeme wurden geeignete Testkörper und geometrisch stabile Referenzkörper benutzt, um Abweichungen und deren Systematiken in 3D-Vergleichen mit der Referenz zu bestimmen. Als Referenz wurden alle verwendeten Test- und Referenzkörper durch zwei Streifenprojektionssysteme (AICON smartSCAN und GOM ATOS I 2M) erfasst. In den Untersuchungen der verschiedenen Testszenarien stellte sich der HandySCAN 700 als ein sehr genaues portables Aufnahmesystem heraus, das in dem Bereich der Referenzsysteme lag, jedoch auch preislich hier einzuordnen ist. Der etwas günstigere Mantis Vision F5-B konnte die Qualität der Referenzsysteme jedoch nicht erreichen. Die umfassenden Ergebnisse der verschiedenen Testszenarien werden in diesem Beitrag vorgestellt und kritisch diskutiert.

Schlüsselwörter: 3D-Handscanner, 3D-Vergleich, Genauigkeitsuntersuchung, Referenzkörper, VDI/VDE-Richtlinie 2634

In optical 3D measurement technology area-based scanning systems are no more than everyday life. Object characteristics, such as size, shape and/or surface, are decisive parameters when selecting a

¹ Überarbeiteter und erweiterter Beitrag der Oldenburger 3D-Tage 2017

suitable measuring system. Handheld 3D scanners, which are currently offered by a variety of different manufacturers, are increasingly available on the market. The range of prices starts at a few hundred Euros, but can also achieve several tens of thousands of Euros. In addition to being classified into a corresponding price segment, therefore, the information on the performance of a handheld 3D scanner is a major purchasing argument. The aim of the presented investigations is therefore to provide reproducible information about the geometric performance of the two selected, marketbased systems.

In a collaboration of the Laboratory for Photogrammetry & Laser Scanning of the HafenCity University Hamburg and the Bochum University of Applied Sciences (Laboratory for Photogrammetry), geometric accuracy investigations were carried out with the HandySCAN 700 handheld 3D scanner from Creaform and the Mantis Vision F5-B, presented in this article. In the framework of these comparative investigations geometrically stable reference bodies were used. The appropriate reference data were acquired by measurement with two structured light projection systems (AICON smartSCAN and GOM ATOS I 2M). In the investigations of the different test scenarios the HandySCAN 700 emerged as a very accurate portable recording system, which was in the accuracy range of the reference systems, but also priced here. However, the cheaper Mantis Vision F5-B could not reach the accuracy range of the reference systems. The comprehensive results of the different test scenarios are presented and critically discussed in this contribution.

Keywords: 3D handheld scanner, 3D comparison, accuracy investigation, reference bodies, VDI/VDE guideline 2634

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren hat sich das Angebot handgeführter 3D-Scanner in verschiedenen Preissegmenten (500 Euro bis 50 000 Euro) zunehmend erweitert. Typische Anwendungsbereiche dieser 3D-Scanner beschränken sich zumeist auf den Nahbereich, d. h. für Messaufgaben mit Distanzen unter einem Meter bis zu einigen wenigen Metern. Aufgrund der aktuellen technologischen Vielfalt im Bereich der 3D-Scanner ist es jedoch eine Herausforderung, für eine konkrete Anwendung ein geeignetes 3D-Scanningsystem zu wählen.

Günstige Preise sowie die einfache Handhabung können handgeführte 3D-Scanner zu einer signifikanten Konkurrenz der teuren, aber auch präzisen Streifenlichtprojektionssysteme werden lassen. Es stellt sich daher die Frage, wie genau und effizient diese 3D-Scanner im Vergleich zu klassischen Streifenlichtprojektionssystemen sind und welche Qualität der Anwender für die aufgenommenen 3D-Daten erwarten kann. Erste Untersuchungen von Systemen aus dem Gaming-Bereich sowie von sogenannten Low-Cost-Systemen (Streifenprojektionssystem David SLS-1 und Kinect v1/ReconstructMe) zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte /Hieronymus et al. 2011/, /Omelanowsky et al. 2013/, /Böhm 2014/ haben wie erwartet gezeigt, dass weder Stabilität noch Qualität dieser Systeme derzeit mit den High-End-Systemen mithalten können. Weitere vergleichende Untersuchungen verschiedener Handscanner mit Referenz- und Testkörpern bestätigten die ersten Untersuchungsergebnisse /Kersten et al. 2016a/, /Kersten et al. 2016b/. Mit dem Creaform HandySCAN 700 und dem Mantis Vision F5-B sind seit einiger Zeit zwei Messsysteme im höheren Preissegment auf dem Markt verfügbar. Der HandySCAN 700 arbeitet nach dem Prinzip der Zweibild-Photogrammetrie und kann nach Herstellerangaben eine Genauigkeit im Bereich der hochwertigen Streifenprojektionssysteme erreichen (*Tab. 1*). Diesen Genauigkeitsbereich erreicht der Mantis Vision F5-B aufgrund der geringeren Auflösung (gemäß der technischen Spezifikation) nicht.

Im diesem Beitrag werden geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der handgeführten 3D-Scanner Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B vorgestellt, ähnlich wie sie bereits mit weiteren handgeführten Systemen erfolgt sind /Kersten et al. 2016a/, /Kersten et al. 2016b/. Hierzu wurden verschiedene Referenz- und Testkörper eingesetzt, deren Datensätze aus Messungen mit High-End-Streifenprojektionssystemen (AICON 3D Systems smartSCAN und GOM ATOS I 2M) basieren.

System	Laserklasse	Messrate Messungen/s	Auflösung in mm	Messbereich in m	Genauigkeit in mm	Gewicht in kg	Preis in Euro
HandySCAN 700	2M	480 000	0,05	0,1 bis 0,3	bis zu 0,03	0,85	49 000
Mantis Vision F5-B	1M	500 000	0,50	0,5 bis 4,5	0,05 (auf 50 cm)	1,70	18000

Tab. 1 | Ausgewählte technische Daten des Creaform HandySCAN 700 und des Mantis Vision F5-B (nach Herstellerangaben)



Abb. 1 | 3D Test- und Referenzkörper für die Untersuchungen der handgeführten Scannersysteme: Einstein-Büste, Radnabe, Testy, Referenzkörper HSBO mit Kugeln und Granitplatte (v.l.)

2 REFERENZ- UND TESTKÖRPER

Für den Vergleichstest wurden folgende Objekte genutzt (*Abb.* 1): eine Büste von Einstein aus Gips (Höhe 160 mm), eine Radnabe aus Gusseisen mit den Dimensionen 232 mm × 120 mm × 232 mm und ein sogenannter "Testy" (Höhe 380 mm) des Instituts für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin /Reulke & Misgaiski 2012/. Weitere Prüfungen erfolgten mit den folgenden geometrisch stabilen Referenzkörpern der Hochschule Bochum: ein kreuzförmiger Körper mit Kugeln aus Stahl (max. Abstand 450 mm von fünf Kugeln mit einem Durchmesser von 65 mm) und eine ebene Granitplatte (Größe 300 mm × 300 mm).

3 UNTERSUCHTE SCANNERSYSTEME

3.1 Creaform HandySCAN 700

Der HandySCAN 700 ist als neueste Generation handgeführter 3D-Scanning-Systeme von Creaform (https://www.creaform3d.com/ de) im Mai 2014 als tragbares 3D-Messsystem für 3D-Ingenieur-Dienstleistungen eingeführt worden /Ametek 2016/. Creaform wurde in Lévis (Québec, Kanada) im Mai 2002 gegründet und ist jetzt ein Teil von AMETEK Ultra Precision Technologies. Der tragbare 3D-Scanner ist mit Netzteil, USB-3.0-Kabel, USB-Stick, mit Ziel-

marken zur Sensorpositionierung, einem Notebook-Computer mit der Software VXelements und mit einem Kalibrierungsboard ausgestattet. Zwei an der Vorderseite des Sensors integrierte Kameras (Abb. 2 links) erfassen 60 Bilder pro Sekunde. Technische Daten über die Kameras werden vom Hersteller nicht publiziert. Mit sieben Laserfadenkreuzen (Abb. 2 rechts) als Lichtquelle (plus einer zusätzlichen Linie für schwer zugängliche Bereiche) ist das System in der Lage, 480000 Messungen pro Sekunde zu erfassen und so eine Punktwolke für die 3D-Vermaschung zu generieren. Die Sensorpositionierung wird in Echtzeit durch räumliche Rückwärtsschnitte nach automatischer Messung von retro-reflektierenden Zielmarken im Objektraum berechnet, während die 3D-Koordinaten der Zielmarken durch Vorwärtsschnitte bestimmt werden. Der empfohlene Größenbereich des aufzunehmenden Bauteils beträgt 0,1 m bis 4,0 m, wobei der Messsensor einen Abstand von nur 0,3 m zum erfassenden Objekt aufweisen sollte. Die Auflösung des Sensors beträgt dann 0,05 mm, während der Scan-Bereich 275 mm × 250 mm mit einer Schärfentiefe von 250 mm aufweist. Die wichtigsten technischen Daten des Systems sind in Tab. 1 zusammengefasst. /Ouimet et al. 2015/ zeigen eine Anwendung des älteren Systems HandySCAN 3D für die Dokumentation von Skulpturelementen am kanadischen Parlamentsgebäude. /Starosta 2016/ untersucht die Einsatzfähigkeit des 3D-Scanners HandvSCAN 700.



Abb. 2 | Sensorsystem Creaform HandySCAN 700 (links), Kalibrierplatte (Mitte) und Laserfadenkreuze am Aufnahmeobjekt (rechts)



Abb. 3 | Sensorsystem Mantis Vision F5-B mit Microsoft Surface (links), mit Notebook (Mitte) und Sensorkopf (rechts)



Abb. 4 | Aufnahme mit dem Creaform HandySCAN 700 - Referenzkörper HSB0 mit Kugeln (links) und Granitplatte (Mitte) sowie Testkörper Testy (rechts)

3.2 Mantis Vision F5-B

Der Mantis Vision F5-B (http://www.mantis-vision.com) ist ein auf Musterprojektion basierter handgeführter 3D-Scanner mit einem Messbereich von 0,5 m bis 4,5 m. Die Hardware des Sensors besteht aus zwei Modulen: einer Videokamera und einem Projektor, welche in den Handgriff eingelassen sind (Abb. 3). Der Projektor emittiert infrarotes Licht (firmeneigenes Muster) auf das Objekt, welches als codiertes Licht von der Videokamera erfasst wird. Der Triangulationsalgorithmus berechnet daraus eine Punktwolke (500 000 Punkte/s). Die Punktdichte in XY beträgt für ein einzelnes Bild 3 mm bei einer Entfernung von 1 m. Durch die geringe Sensitivität gegenüber dem Umgebungslicht ist das System sowohl bei Dunkelheit als auch bei Tageslicht einsetzbar. /Wrona 2014/ und /Zhang et al. 2015/ beschreiben verschiedene Anwendungen für den Scanner. /Larsson & Letalick 2013/ testeten die Leistungsfähigkeit des Mantis-Vision-F5-Sensors und untersuchten die Einsatzfähigkeit für militärisch-forensische Anwendungen.

3.3 Referenzsysteme – GOM ATOS I 2M und smartSCAN 3D

Der ATOS (Advanced Topometric Sensor) I 2M der Gesellschaft für optische Messtechnik GmbH (GOM) aus Braunschweig ist ein Streifenprojektionssystem, das aus zwei CCD-Kameras mit der Auflösung 1624 \times 1236 Pixel und einem Projektor besteht. Je nach verwendetem Objektiv können Messfelder mit 500 mm \times 400 mm oder 250 mm \times 200 mm eingesetzt werden. Der ATOS I 2M wurde in verschiedenen Anwendungen als Erfassungs- und Referenzsystem eingesetzt /Keller et al. 2011/, /Rau & Yeh 2012/, /Kersten & Lindstaedt 2012/, /Omelanowsky et al. 2013/.

Der smartSCAN 3D der Firma AICON 3D Systems GmbH ist ein Streifenprojektionssystem (Weißlichtscanner), der nach dem kombinierten Gray-Code/Phase-Shift-Verfahren arbeitet. Die Systemkameras (hier mit einer Kameraauflösung von 5 Megapixel) nehmen das projizierte Streifenmuster (Lichtquelle: LED weiß, alternativ grün, blau oder rot) unter einem vordefinierten Betrachtungswinkel in einer Messsequenz von etwa einer Sekunde auf. Der Scanner besitzt einen Messbereich von 30 mm bis 1 500 mm, abhängig von der Basis zwischen den Kameras. Anwendungsbeispiele des smartSCAN präsentieren /Slizewski et al. 2010/ und /Bathow & Breuckmann 2011/.

4 AUFNAHME

Die Testmessungen mit dem HandySCAN 700 fanden am 6. Juli 2016 und die Aufnahmen mit dem Mantis Vision F5-B im August 2017 an der HafenCity Universität Hamburg im Labor für Geomatik statt. Da stark reflektierende, spiegelnde, schwarze oder glänzende Oberflächen für Aufnahmesysteme mit aktiver optischer Projektion ein Problem darstellen, wurden die Kugeln des Referenzkörpers HSBO sowie die Radnabe vor der Aufnahme mit Kalkspray eingesprüht, um aus den glänzenden Metallkörpern matte und damit diffus streuende Oberflächen zu erzeugen.

4.1 Creaform HandySCAN 700

Die Positionierung des Messsystems wird durch Triangulation von kreisförmigen, selbstklebenden und reflektierenden Zielmarken (Durchmesser circa 11 mm), die auf dem aufzunehmenden Objekt oder im Objektraum verteilt sind, in Echtzeit berechnet (*Abb. 4 Mitte*). Die Anzahl und die Verteilung der Zielzeichen hängen von Größe und Form des Aufnahmeobjekts ab, wobei der Mindestabstand zwischen den Targets gemäß Herstellerangaben 20 mm und der Maximalabstand 100 mm betragen sollte.

Vor der Aufnahme erfolgt die Kalibrierung des HandySCAN 700 anhand einer mitgelieferten und individuellen, an den Scanner angepassten Kalibrierungstafel und der Software VXelements. Die Kalibrierungstafel ist eine mit 42 Positionstargets versehene beschichtete, verzugsfreie Glasplatte, die zum Schutz in einem gepolsterten Koffer untergebracht ist (Abb. 2 Mitte). Für die Systemkalibrierung werden vierzehn Zweibildaufnahmen aus verschiedenen Richtungen auf die Glasplatte erstellt, wobei mit der letzten Aufnahme der Kalibriervorgang in insgesamt zwei Minuten beendet und der Scanner kalibriert ist. Die Kalibrierung des Geräts ist vor jedem Projektstart sowie bei Temperaturänderungen (von über 10 Grad) oder minderer Oberflächenqualität (stark verschmutzte, unregelmäßige oder wechselnde Oberflächen) durchzuführen, um geometrisch korrekte Messdaten zu erhalten. Die Kalibrierung des Messsystems und der Aufnahmevorgang sind in /Starosta 2016/ detailliert beschrieben. Zur weiteren Konfiguration gehört u.a. die Einstellung der Belichtungsdauer des Sensors (automatisch oder manuell), die sich je nach Beschaffenheit der zu scannenden Oberfläche richtet. Zur Objektaufnahme kann der HandySCAN sowohl senkrecht als auch geneigt über die Objektoberfläche geführt wer-



Abb. 5 | Aufnahmesituation mit dem Mantis Vision F5-B beim Testkörper "Radnabe"

den (*Abb. 4*). Dabei ist darauf zu achten, dass für die automatische Positionierung des Scanners mindestens vier gute verteilte Positionstargets pro Messung erforderlich sind. Während des Scanvorgangs wird zur Qualitätskontrolle des Messvorgangs im 3D-Viewer eine Farbskala (grün = optimal, gelb bis rot = zu gering und blau = zu groß) mit dem Abstand zwischen Scanner und Objekt angezeigt. Der ideale Abstand des Sensors zu kleinen Objekten beträgt circa 30 cm, wobei auch ein integrierter Farb-LED-Abstandsmesser am Kopf des Scanners generell die richtige Messentfernung zum Gegenstand anzeigt.

Während der Aufnahme werden Laserlinien auf das Objekt projiziert, wobei gleichzeitig die Form des Gegenstands durch die Kameras erfasst und simultan auf dem Bildschirm im 3D-Viewer sichtbar wird. Durch die Informationen über die abgelenkten Laserlinien und die Linienpositionen wird mithilfe der Sensorposition die 3D-Oberfläche in Echtzeit erstellt. Auch ein Verlust oder eine Unterbrechung des Trackings kann abgefangen werden, indem der Sensor zur Fortführung der Messung über eine bereits gescannte Fläche und deren Zielmarken positioniert wird. Falls es für eine Optimierung der Sensorpositionierung erforderlich ist, können während einer Unterbrechung weitere Targets im Objektraum angebracht werden. Durch die visuelle Online-Kontrolle wird der Scanvorgang erst nach lückenloser Erfassung beendet. Alle Daten wurden als internes Format (CSF) gespeichert und anschließend als STL-Datei exportiert.

4.2 Mantis Vision F5-B

Der handgeführte 3D-Scanner wurde während der Objektaufnahme aus einer Entfernung von ca. 50 cm in einer langsamen, gleichförmigen Bewegung um und über das Aufnahmeobjekt geführt. Der Sensor wird über ein angeschlossenes Notebook oder ein Microsoft Surface 4 gesteuert. Dabei wurden die erfassten Daten (das aktuelle Frame und das Bild der Infrarotkamera) in Echtzeit auf dem angeschlossenen Computer angezeigt (*Abb. 5 rechts*). Beim Mantis-F5-B-Scanner werden mögliche Signalabrisse erst im Postprocessing erkannt, sie können jedoch durch die Registrierung behoben werden. Die Datenfrequenz liegt bei 10 fps (frames per second), eine typische Aufnahme von einer Minute führt also zu ca. 15 Mio. Punkten. Das System arbeitet ohne Passpunkte, doch sollten im Aufnahmefeld immer genügend Objektelemente in alle drei Koordinatenrichtungen vorhanden sein (*Abb. 5 links*).

5 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Die Testkörper (Testy, Radnabe und Einstein-Büste) wurden mit den Streifenprojektionssystemen sehr detailliert und präzise erfasst sowie in Geomagic Studio 2012 modelliert. Für Testy dienten die durch das ATOS-System erfassten Daten als Referenz, während bei der Radnabe und der Einsteinbüste die Daten des smartSCAN genutzt wurden. Zur Abnahme und Überwachung

optischer Messsysteme mit flächenhafter Antastung bildet die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, ein anerkanntes Regelwerk /VDI/VDE 2002 & 2006/. Im Rahmen fest definierter Prüfszenarien werden mittels geeigneter Testobjekte (Artefakte) verschiedene Kenngrößen zur Bewertung der Qualität eines Messsystems ermittelt bzw. bezüglich der Herstellerangaben überprüft. Ziel ist es dabei auch, über die Betriebsdauer eines Systems Aussagen zu dessen Messqualität machen zu können.

In Anlehnung an die Richtlinie erfolgten die Prüfungen mit dem Kugeltestkörper der HSBO sowie mit der Granitplatte. Die im Bewertungsprozess ableitbaren Kenngrößen sind:

- Antastabweichung PS (Maß) die Differenz aus gemessenem Durchmesser und kalibriertem Durchmesser der Kugel.
- Antastabweichung PF (Form) die Spanne der radialen Abstände der Messpunkte von einer berechneten Ausgleichskugel. Die Ausgleichskugel wird nach der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme bei freiem Radius bestimmt.
- Kugelabstandsabweichung SD Differenz zwischen dem gemessenen Wert und dem kalibrierten Wert eines Abstands zweier Kugelmittelpunkte. Anders als in der VDI/VDE 2634 Blatt 2 wird der gemessene Abstand aus den Messwerten mehrerer, flächenhafter Antastungen abgeleitet. Der Grenzwert SD der zulässigen Kugelabstandsabweichung ist die Kenngröße Kugelabstandsabweichung. Sie wird als längenunabhängige Größe spezifiziert und muss im gesamten spezifizierten Messvolumen eingehalten werden.
- Ebenheitsmessabweichung RE die Spanne der vorzeichenbehafteten Abstände der Messpunkte von der Ausgleichsebene, die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet wird.

Die Auswertung der Datensätze und Berechnung der Kenngrößen erfolgte in Geomagic Studio.

5.1 Referenzkörper Hochschule Bochum

Abb. 6 stellt die ermittelten Kenngrößen Antastabweichung dar. Durch die Kenngröße wird das Abweichungsverhalten des Messsystems in einem kleinen Teil des Messvolumens beschrieben. Es erfolgt vorab keine Datenfilterung. Die Kennlinien der Referenzsysteme smartSCAN und ATOS beziehen sich hierbei auf eine Vergleichsmessung des Kugelkörpers mit einem Lasertracker API T3, während der HandySCAN und der Mantis Vision F5-B sich auf das smartSCAN-System referenzieren.

Kenngrößen	HandySCAN 700	Mantis Vision F5-B	SmartSCAN	Atos I 2M
Mittelwert Antastabweichung PS (Maß)	0,197 mm	0,453 mm	0,085 mm	0,045 mm
Mittelwert Antastabweichung PF (Form)	1,080 mm	10,480 mm	0,180 mm	0,771 mm
Mittelwert Kugelabstandsabweichung SD	0,070 mm	0,111 mm	0,095 mm	0,102 mm
Ebenheitsmessabweichung RE (Spanne)	0,106 mm	3,980 mm	0,408 mm	0,654 mm

Tab. 2 | Kenngrößen nach VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3

Abb. 6 | Kenngrößen Antastabweichung PS/PF (Maß/Form) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

Abb. 7 | Kenngröße Kugelabstandsabweichung (SD) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 3

Während die Antastabweichung PS (Maß) bei beiden getesteten Systemen nur geringfügig schlechter als bei den Streifenprojektionssystemen ausfällt, ist die Antastabweichung PF (Form), die ein Indikator für das Messrauschen eines Systems ist, beim Mantis Vision F5-B im Vergleich zu den Streifenprojektionssystemen und zum HandySCAN 700 erheblich größer (*Abb. 6* und *Tab. 2*). Ob hier eventuelle Abhängigkeiten, die sich aus den Bedingungen der Messumgebung und der Ausgestaltung der Oberfläche des Prüfkörpers ergeben (homogen graue Kugeln), auf das Messverfahren des Scanners vorliegen, muss im Rahmen erweiterter Untersuchungen geprüft werden.

Die Kugelabstandsabweichung dient dazu, die Fähigkeit des Messsystems zur Längenmessung aus mehreren unterschiedlichen Einzelansichten zu prüfen. Durch Mittelungseffekte ist in der Kugelabstandsabweichung die Antastabweichung nicht vollständig enthalten /VDI/VDE 2006/. Die erzielten Ergebnisse für den HandySCAN 700 und dem Mantis Vision F5-B liegen hier in der gleichen Größenordnung wie die Referenzsysteme (*Abb. 7*), wobei der HandySCAN 700 bessere und der F5-B leicht schlechtere Resultate als die Referenzsysteme erzielten.

5.2 Referenzkörper Granitplatte

Die im Rahmen der Prüfung ermittelte Kenngröße "Ebenheitsmessabweichung" zeigt die hohe Qualität des HandySCAN-Systems (*Abb. 8*). Wenngleich der Nutzer von einer deutlich geringeren Punktanzahl (im Vergleich zum smartSCAN) ausgehen muss, spiegelt

das vorliegende Ergebnis des Handscanners das vorhandene Potenzial eindeutig wider. Die Oberflächenbeschaffenheit des Referenzkörpers kommt dabei dem Messverfahren des HandySCANs entgegen, sodass die guten Ergebnisse auch durch die Textur des Körpers beeinflusst sind. Dagegen wird hier das Messrauschen des Mantis Vision F5-B deutlich, welches sich bereits bei der Antastabweichung PF (Form) zeigte (*Abb. 6 rechts*).

Abb. 8 | Kenngröße Ebenheitsmessabweichung (RE) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

5.3 Testkörper Testy, Einsteinbüste und Radnabe

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche mit den drei Testkörpern sind in

Tab. 3 zusammengestellt sowie in den *Abb. 9* bis *Abb. 11* farblich illustriert. Die zwei untersuchten Systeme weisen dabei sowohl in der Genauigkeit als auch in der Vollständigkeit deutliche Unterschiede auf.

HandySCAN 700: Die jeweilige erreichte durchschnittliche Abweichung zwischen 0,024 mm und 0,111 mm zeigt, dass der HandySCAN 700 im Vergleich zum Referenzsystem hohe Genauigkeiten erzielt, die für den Testkörper Einsteinbüste sogar dem der Streifenprojektionssysteme entspricht. Die Spanne, die sich aus der Differenz der durchschnittlichen negativen und positiven Abweichungen errechnet, liegt zwischen 0,1 mm und 0,3 mm. Geringe systematische Abweichungen sind an den Produktionsnähten des oberen Testkörpers Testy in Gelb sichtbar (Abb. 9). Bei der Einsteinbüste fallen einige Abweichungen auf der Rückseite und bei der eingravierten Schrift auf (Abb. 10). Systematische Abweichungen werden auf beiden Seiten der Radnabe in Hellblau angezeigt, die der komplexen Geometrie des Objekts und der Registrierung von Vorder- und Rückseite geschuldet sind (Abb. 11). Die Abweichungen liegen aber deutlich über der Messgenauigkeit des Messsystems. Trotz der komplexen Geometrie konnte der HandySCAN alle drei Testkörper komplett erfassen, was in vorherigen Untersuchungen nur mit wenigen Systemen gelang /Kersten et al. 2016a/.

Mantis Vision F5-B: Die erreichten durchschnittlichen Abweichungen (zwischen 0,131 mm und 0,238 mm) zeigen, dass der Mantis Vision F5-B im Vergleich zum Referenzsystem signifikant geringere Genauigkeiten erzielt. Die Spanne liegt hier zwischen 0,341 mm und 1,035 mm (*Tab. 3*). Systematische Abweichungen sind an den Testkörpern in Gelb und Hellblau sichtbar (*Abb. 9* bis *Abb. 11*). Bei der Einsteinbüste ist

3D-Scanner	Objekt	Anzahl Dreiecke	Durchschnittliche Abweichung in mm	Standard- abweichung in mm	Spanne in mm
HandySCAN	Testy	1 236 568	0,064	0,130	0,185
Mantis Vision F5-B	Testy	2 036 699	-0,238	0,714	0,569
HandySCAN	Einstein	1 100 302	0,024	0,046	0,064
Mantis Vision F5-B	Einstein	1 004 214	0,182	0,168	0,341
HandySCAN	Radnabe	7 257 962	-0,111	0,199	0,270
Mantis Vision F5-B	Radnabe	1013382	0,131	1,035	1,140

 Tab. 3
 I
 Durchschnittliche Abweichungen an den Testkörpern – 3D-Vergleich mit Geomagic Studio

 2012 zwischen dem Referenzsystem ATOS/smartSCAN und den untersuchten 3D-Handscannern
 Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B

Abb. 9 | 3D-Abweichungsanalyse mit Geomagic 2012 mit jeweils zwei Ansichten des Testy – Darstellung des Referenzkörpers mit Abweichungen zu den Daten des HandySCAN 700 (links) und des Mantis Vision F5-B (rechts) (Einheit der Farbskala in mm)

Abb. 10 | 3D-Abweichungsanalyse mit Geomagic 2012 – Vorder- und Rückseite der Einstein-Büste. HandySCAN 700 (links) und Mantis Vision F5-B (rechts) (Einheit der Farbskala in mm)

H.-J. Przybilla, Th. P. Kersten, M. Lindstaedt, D. Starosta – Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der handgeführten 3D-Scanner Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B

Abb. 11 | 3D-Abweichungsanalyse mit Geomagic 2012 – Vorder- und Rückseite der Radnabe; oben: Creaform HandySCAN 700, unten: Mantis Vision F5-B (Einheit der Farbskala in mm)

die eingravierte Schrift aufgrund der Auflösung nicht zu identifizieren (*Abb. 10*). Die 3D-Abweichungen der Radnabe wurden für die Vorder- und Rückseite getrennt berechnet und anschließend gemittelt (*Tab. 3*). Die Abweichungen liegen auch hier deutlich über der Messgenauigkeit des Messsystems. Die komplexe Geometrie der drei Testkörper konnte der Mantis Vision F5-B nicht komplett erfassen, sodass hieraus wenige kleine bis mittelgroße Löcher in den Datensätzen resultierten. Dieser Effekt konnte auch bei vorherigen Untersuchungen alternativer Systeme beobachtet werden /Kersten et al. 2016a/.

6 FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurden die Ergebnisse geometrischer Genauigkeitsuntersuchungen der handgeführten 3D-Scanners Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass der HandySCAN 700 die Genauigkeit und die Qualität der Referenzdaten aus Messungen von High-End-Streifenprojektionssystemen nahezu erreichen kann. Die durch den Hersteller angegebenen hohen Genauigkeiten von bis zu 30 Mikrometer konnten bei den vorliegenden Untersuchungen mit diesem System jedoch nicht vollständig bestätigt werden. Die verwendeten Referenz- und Testkörper entsprechen dabei durchaus dem typischen Anwendungsspektrum des getesteten 3D-Scanners. Die hohen Genauigkeiten des Systems werden im Wesentlichen durch die signalisierten Zielmarken im Objektraum erreicht.

Der Mantis Vision F5-B konnte die Genauigkeit und die Qualität der Referenzdaten erwartungsgemäß nicht erreichen, da die tech-

nischen Spezifikationen des Systems eine 3D-Streckenmessgenauigkeit von 0,5 mm auf 1 m vorgeben. Die in den technischen Spezifikationen aufgeführte 3D-Punktgenauigkeit von bis 50 µm auf 50 cm konnte in den Untersuchungen nicht nachgewiesen werden. Die Systemgenauigkeit lag eher im Bereich von 0,2 mm bis 0,3 mm, was einer, im Vergleich zum Creaform HandySCAN 700, schlechteren Genauigkeit um den Faktor 1:10 entspricht. Der F5-B nutzt keine signalisierten Zielmarken, jedoch helfen zusätzlich zum Messobjekt platzierte geometrische Elemente im aufzunehmenden Objektraum (als Unterstützung des Matchings) bei der Registrierung der Scans.

Die Handhabung der Systeme ist grundsätzlich einfach, jedoch erfordert die Aufnahme durch langsame, gleichförmige Bewegungen – um und über dem Aufnahmeobjekt – eine entsprechende Erfahrung seitens der Nutzer, damit es nicht zum Signalabriss kommt. Die Aufnahmegeschwindigkeit ist mit wenigen Minuten je Objekt recht hoch. Der große Vorteil des flexiblen Einsatzes durch die einfache und schnelle Handführung wird beim HandySCAN 700 leider durch die erforderli-

che und aufwendige Bestückung des Objektraums durch Zielmarken teilweise kompensiert. Hier muss auch für den Fall, dass ein Objekt nicht mit Targets beklebt werden kann oder darf, aufwendig ein Referenzrahmen mittels Targets geschaffen werden, um eine Objektmessung realisieren zu können.

Die in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, ermittelten Kenngrößen (Antast-, Kugelabstands- und Ebenheitsmessabweichungen) weisen nach, dass der Creaform HandySCAN 700 gegenüber den Streifenprojektionssystemen ein ähnlich hohes Genauigkeitspotenzial aufweist. Bei den Kugelabstands- und Ebenheitsmessabweichungen wurden sogar bessere Werte erreicht. Es ist positiv zu bewerten, dass der Anwender vor dem Messeinsatz eine Kalibrierung des Sensorsystems durchführen kann – eine Maßnahme, die zur Erfassung qualitativ hochwertiger metrischer Daten beiträgt. Beim Mantis Vision F5-B wird durch die Antast- und Ebenheitsmessabweichungen das signifikant höhere Messrauschen im Vergleich zum HandySCAN 700 dokumentiert. Bei der ermittelten Kenngröße Kugelabstandsabweichung zeigt der F5-B jedoch ein Resultat, das den Ergebnissen des höherwertigen 3D-Scanners HandySCAN 700 und der Referenzsysteme entspricht.

Die im Rahmen des Beitrags untersuchten Systeme sind ausgewählte Beispiele für den stetig wachsenden Markt der 3D-Handscanner, der sich sowohl durch ein breites Spektrum erreichbarer Messgenauigkeiten als auch durch eine breit gefächerte Kostenskala auszeichnet. Technologisch betrachtet basiert ein Großteil der Systeme auf dem Triangulationsprinzip, bei dem ein Kamerasensor ein projiziertes Muster (regelmäßig oder auch als sogenanntes "Speckle Muster" ausgeprägt) erfasst. Dieser Prozess setzt eine stabile Sensororientierung für einen längeren Zeitraum voraus, die durch einen geeigneten optisch-mechanischen Aufbau erreicht werden muss. Eine hieraus für den Nutzer ableitbare Konsequenz ist, dass der Hersteller das Messsystem mit entsprechenden Prüfprozeduren ausstatten muss, um die Einsatzfähigkeit des Systems innerhalb der gesetzten Spezifikationen zu gewährleisten. Diese selbstverständliche Anforderung wird nur von wenigen Herstellern erfüllt, sodass davon ausgegangen werden kann, dass im Laufe des Betriebs Veränderungen am Messsystem nicht oder nur eingeschränkt erkannt werden können. Eine erforderliche Korrektur durch eine vom Nutzer durchgeführte Kalibrierung erfolgt dann nicht.

3D-Handscanner erzeugen Punktwolken, die aus einer Folge von zueinander zu orientierenden "Teilpunktwolken" resultieren. Die Orientierung stützt sich dabei sowohl auf etablierte Verfahrensansätze, wie den "Iterative Closest Point"-(ICP-)Algorithmus, als auch auf weitere Sensorik des Gesamtsystems. Weitere Orientierungsinformationen könnten in Zukunft durch leistungsfähigere MEMS-basierte inertiale Messeinheiten (Drehwinkel im Raum und Beschleunigungen), GNSS (Sensorposition) und (niedrig auflösende) 3D-Kameras (grobe Approximation der erfassten Objektoberfläche) bereitgestellt werden. Somit sind Verbesserungen zur Bestimmung der Sensortrajektorie zukünftig zu erwarten, da stetig steigende Anforderungen auch bei anderen Anwendungen (z. B. beim Einsatz von UAV, sowohl für Navigationszwecke als auch zur direkten Georeferenzieruna), diese Entwicklung unterstützen. Ein erweitertes, leistungsfähigeres Multi-Sensor-System bietet Potenzial für eine beschleunigte und gleichzeitig präzisere Objektvermessung.

Die erfolgreiche Weiterentwicklung der 3D-Handscanner hängt stark von der Akzeptanz im Markt und einem erkennbaren Mehrwert des Systems ab. Zukünftig werden 3D-Handscanner auch zum typischen Werkzeug der Geodäten gehören, da diese Systeme stetig steigend für Messaufgaben in der Industrie, z. B. im Bereich des "rapid prototyping" und "reverse engineering", genutzt werden. Hier bietet das flexible Messkonzept der 3D-Handscanner – unter hinreichender Berücksichtigung der Datenqualität – eine hohe Effizienz. Gerade für das terrestrische Laserscanning stellen diese Aufnahmesysteme bei der Erfassung lokal schwer zugänglicher Objektbereiche und der Fusion mit den TLS-Punktwolken eine optimale Ergänzung dar.

Forschungsprojekte, wie das von Google initiierte "Project Tango" /Marder-Eppstein 2016/, nutzen die technologischen Ansätze der Handscannersysteme und adressieren diese gleichzeitig in den Massenmarkt, z. B. durch die Erfassung lokaler Räume und Einbindung dieser Szenen in virtuelle Welten. Mit dem Produkt "Face ID" zur Gesichtserkennung liefert die Firma Apple derzeit die aktuelle Generation des iPhones aus /Ozaki & Ikenoue 2017/. Der hierin integrierte (und miniaturisierte) PrimeSense-Sensor bildet konzeptionell die Basis einer Vielzahl von 3D-Handscannern.

DANK

Die Autoren bedanken sich beim Ingenieurbüro Hanack und Partner (Hamburg) für die Bereitstellung des Creaform HandySCAN 700 und bei Herrn Martin Misgaiski-Hass (Humboldt-Universität zu Berlin) für die Bereitstellung des Testkörpers Testy.

LITERATUR

AMETEK (2016): Creaform announces major design and performance upgrade for its new MetraSCAN 3D laser scanner. http://www.ametek.com/ pressreleases/news/2016/april/

creaformannouncesmajordesignandperformanceupgrade?news_lang=en (31.10.2016).

Bathow, C.; Breuckmann, B. (2011): High-definition 3D acquisition of archaeological objects: An overview of various challenging projects all over the world. In: 23rd CIPA Symposium, September 11-16, 2001, Prag, Tschechien, 12-16.

照 Heidelberg

Beim **Vermessungsamt der Stadt Heidelberg** ist zum nächstmöglichen Zeitpunkt eine Stelle als

Vermessungsingenieurin / Vermessungsingenieur

in der Abteilung Vermessung / Bodenordnung unbefristet in Vollzeit zu besetzen.

Die Bezahlung erfolgt nach Entgeltgruppe 12 des Tarifvertrags für den öffentlichen Dienst (TVöD-V). Bei Vorliegen der beamtenrechtlichen Voraussetzungen ist auch eine Beschäftigung im Beamtenverhältnis mit einer Besoldung bis Besoldungsgruppe A 12 LBesGBW möglich.

Ihr künftiger Aufgabenbereich

Die Abteilung Vermessung / Bodenordnung ist mit aktuell 16 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zuständig für die vermessungstechnische Begleitung ingenieurtechnischer und baurechtlicher Projekte sowie Arbeiten zur hoheitlichen Liegenschaftsvermessung im Stadtgebiet Heidelberg. Zum Aufgabengebiet der Stelle gehören alle in diesem Gesamtzusammenhang anfallenden Tätigkeiten sowie auch sämtliche baubegleitenden Vermessungsaufgaben bei städtischen Vorhaben ebenso wie Grenzänderungen, Grenzfeststellungen und Gebäudeaufnahmen. Auch die Aufnahme baulicher Veränderungen zur nachhaltigen Dokumentation im städtischen Geoinformationssystem sind der Aufgabenträgerin / dem Aufgabenträger zugeordnet. Die Mitwirkung bei Deformationsbeobachtungen rundet das Aufgabenfeld ab. Von der zukünftigen Stelleninhaberin bzw. vom zukünftigen Stelleninhaber wird die selbständige Planung, Vorbereitung und Durchführung der anstehenden Messaufgaben im Außen- und Innendienst ebenso erwartet, wie die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten zur Fortführung des Liegenschaftskatasters bzw. zur Abgabe an unsere Kundinnen und Kunden. Um den künftigen Herausforderungen der Digitalisierung gerecht zu werden, wird von jedem Mitarbeiter erwartet, dass er sich im Rahmen seiner Fachverfahren in das Geodatenmanagement und die Betreuung der einschlägigen Mess- und Rechenverfahren einbringt.

Die detaillierte Stellenausschreibung mit den notwendigen Qualifikationen sowie weiteren Informationen finden Sie unter **www.heidelberg.de/stellenausschreibungen**.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?

Wenn wir Sie neugierig gemacht haben und Sie unser Team im Vermessungsamt verstärken möchten, freuen wir uns über Ihre Bewerbung mit aussagekräftigen Unterlagen bis spätestens 23. Februar 2018 bei der

Stadt Heidelberg Personal- und Organisationsamt Postfach 10 55 20, 69045 Heidelberg

oder per E-Mail an: bewerbung@heidelberg.de

Böhm, J., (2014): Accuracy Investigation for Structured-Light Based Consumer 3D Sensors. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG) (2014)2, 117–127.

Hieronymus, J.; Misgaiski, M.; Reulke, R. (2011): Genauigkeitsvergleich von 3D-Sensoren aus dem Freizeit- und Spielemarkt. In: Luhmann, Th.; Müller, Chr. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Wichmann, Berlin/Offenbach, 232–241.

Keller, F.; Sänger, J.; Kersten, Th. P.; Schiewe, J. (2011): Historisches 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg – Automatisierte Generierung und Darstellung innerhalb der Google Earth Engine. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), (2001)3, 155–169.

Kersten, Th. P.; Przybilla, H.-J.; Lindstaedt, M. (2016a): Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), (2016)5/6, 271–283.

Kersten, Th. P.; Przybilla, H.-J.; Lindstaedt, M.; Tschirschwitz, F.; Misgaiski-Hass, M. (2016b): Genauigkeitsuntersuchungen handgeführter Scannersysteme. In: Kersten, Th. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., 25, 271–287.

Larsson, H.; Letalick, D. (2013): Military forensic use of handheld 3D camera. Proc. of SPIE 8731, Laser Radar Technology and Applications XVIII, 873111.

Marder-Eppstein, E. (2016): Project Tango. ACM SIGGRAPH 2016 Real-Time Live!, 40.

Omelanowsky, D.; Kersten, Th. P.; Lindstaedt, M. (2013): Untersuchungen von Low-Cost-Systemen zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte. In: Luhmann, Th.; Müller, Chr. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013. Wichmann, Berlin/ Offenbach, 217–228.

Ouimet, C.; Gregg, J.; Kretz, S.; Chandler, C.; Hayes, J. (2015): Documentation and dissemination of the sculptural elements of Canada's Parliamentary Buildings: Methodology development and evolution, a case study. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(2015)5, 347–352.

Ozaki, S.; Ikenoue, S. (2017): Information processing devices and methods facilitating face-ID-based user login. U.S. Patent No. 9,727,777. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, D. C.

Reulke, R.; Misgaiski, M. (2012): Test body "Testy" for Laser Scanning and Optical Systems. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), (2012)6, zum Titelbild.

Starosta, D. (2016): Untersuchung der Einsatzfähigkeit des 3D-Scanners "Handy-SCAN 700". Bachelorarbeit, Studiengang Geomatik, HafenCity Universität Hamburg.

Slizewski, A.; Friess, M.; Semal, P. (2010): Surface scanning of anthropological specimens: nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems. In: Quartär, 57(2010), 179–187.

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

VDI/VDE (2006): Optische 3-D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten. VDI/VDE-Richtlinie 2634, Blatt 3, Beuth, Berlin.

Wrona, M. (2014): Using Optical NIR Handheld Scanner for Close Range 3D Mapping. The 9th International Conference on Environmental Engineering 2014, 22.–23. Mai 2014, Vilnius, Litauen. http://dx.doi.org/10.3846/enviro.2014.253.

Zhang, W.; Wang, C.; Xi, X. (2015): 3D Scan of Ornamental Column (huabiao) Using Terrestrial Lidar and Hand-held Imager. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(2015)5/W7, 491–494.

Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla

HOCHSCHULE BOCHUM FACHBEREICH GEODÄSIE I LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE

Lennershofstr. 140 | 44801 Bochum heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas P. Kersten

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE & LASERSCANNING

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg thomas.kersten@hcu-hamburg.de

Dipl.-Ing. Maren Lindstaedt

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE & LASERSCANNING

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

B. Sc. Geomatik Deborah Starosta

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE & LASERSCANNING

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg deborah.starosta@hcu-hamburg.de

Manuskript eingereicht: 26.08.2017 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

