

Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen des handgeführten 3D-Scanners Creaform HandySCAN 700

Thomas P. KERSTEN, Heinz-Jürgen PRZYBILLA und Maren LINDSTAEDT

Zusammenfassung

Handgeführte Scannersysteme diverser Hersteller sind in zunehmendem Maße am Markt in verschiedenen Preissegmenten verfügbar, jedoch ist über deren geometrische Leistungsfähigkeit bei vielen Anwendern wenig bekannt. Daher hat das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit der Hochschule Bochum (Labor für Photogrammetrie) geometrische Genauigkeitsuntersuchungen mit dem handgeführten 3D-Scanner HandySCAN 700 von Creaform durchgeführt, die in diesem Beitrag vorgestellt werden. Im Rahmen der Untersuchungen zur geometrischen Qualität des high-end Systems 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 Genauigkeitsbereich der Referenzsysteme lag, jedoch auch preislich hier einzuordnen ist.

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das Angebot handgeführter 3D-Scanner in verschiedenen Preissegmenten (EUR 500 bis EUR 50.000) 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 diese handgeführten 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 und 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 ist seit

2014 ein Messsystem auf dem Markt verfügbar, das nach dem Prinzip der Zweibild-Photogrammetrie arbeitet und das nach Herstellerangaben eine Genauigkeit im Bereich der hochwertigen Streifenprojektionssysteme erreichen kann (Tab. 1).

Im diesem Beitrag werden geometrische Genauigkeitsuntersuchungen des handgeführten 3D-Scanners Creaform HandySCAN 700 vorgestellt, ähnlich wie sie bereits mit anderen handgeführten Systemen erfolgt ist (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) stammen.

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 Aluminiumguss mit den Dimensionen 232×120×232 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 300×300 mm).



Abb. 1: Test- und Referenzkörper für die Untersuchungen der handgeführten Scanner-systeme – v.l.n.r. Einstein-Büste, Radnabe, Testy, Referenzkörper HSBO mit Kugeln und Granitplatte.

3 Untersuchtes Scannersystem

3.1 Creaform HandySCAN 700

Der HandySCAN 700 ist als die neueste Generation handgeführter 3D-Scanning-Systemen von Creaform 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 Zielmarken zur Sensorpositionierung, einem Notebook-Computer mit der Software VXelements und mit einem Kalibrierungsboard ausgestattet. Zwei an der Vorderseite des Sensors integrierte Kameras 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, 480.000 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 Koordinaten der Zielmarken durch Vorwärtsschnitte bestimmt werden. Der empfohlene Größbereich des aufzunehmenden Bauteils beträgt 0.1 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 x 250 mm mit einer Schärfentiefe von 250 mm aufweist. Die wichtigsten technischen Daten des Systems sind in Tab. 1 zusammengefasst. OUMET 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 HandySCAN 700.

Tabelle 1: Ausgewählte technische Daten des Creaform HandySCAN 700 (Herstellerangaben)

Laser-klasse	Messrate [Mess./s]	Auflösung [mm]	Messbereich [m]	Genauigkeit [mm]	Gewicht [kg]	Preis [EUR]
2M	480.000	0.05	0.1 – 0.3	bis zu 0.03	0.85	49.000



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

3.2 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 1624×1236 Pixel und einem Projektor besteht. Je nach verwendetem Objektiv können Messfelder mit 500×400 mm² oder 250×200 mm² eingesetzt werden. Die Genauigkeit des Systems beträgt ca. 0.02 mm. 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 Megapixeln) 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 1500 mm, abhängig von der Basis zwischen den Kameras. Seine Genauigkeit beträgt 0.009 mm auf die Fläche. 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 an der HafenCity Universität Hamburg im Labor für Geomatik statt. Da stark reflektierende, spiegelnde, schwarze oder glänzende Oberflächen für das Aufnahmesystem 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.

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. 3). Die Anzahl und die Verteilung der Zielzeichen hängen von Größe und Form des Aufnahmeobjektes ab, wobei der Mindestabstand zwischen den Targets gemäß Herstellerangaben 20 mm und der Maximalabstand 100 mm betragen sollte.

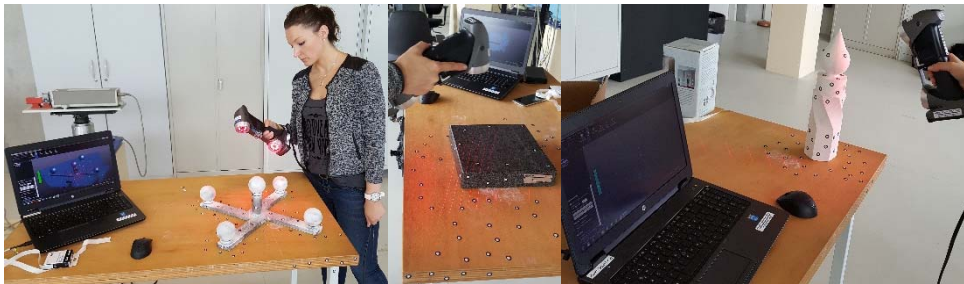


Abb. 3: Aufnahme mit dem Craeform HandySCAN 700 – Referenzkörper HSBO mit Kugeln (links) und Granitplatte (Mitte) sowie Testkörper Testy (rechts)

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 Gerätes 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 werden. 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 Messvorganges 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 in den 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.

5 Auswertung und Ergebnisse

Die Testkörper (Testy, Radnabe und Einstein-Büste) wurden mit den Streifenprojektionssystemen sehr detailliert und präzise aufgenommen 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 Prüfzenarien 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. 4 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 sich auf das smartSCAN-System referenziert.

Während die Antastabweichung PS (Maß) nur geringfügig schlechter als bei den Streifenprojektionssystemen ausfällt, ist die Antastabweichung PF (Form), die ein Indikator für das Messrauschen des Systems ist, im Vergleich deutlich größer als beim smartSCAN und auch noch erkennbar schlechter als beim ATOS. Ob hier eventuelle Abhängigkeiten, die sich aus der Ausgestaltung der Oberfläche des Prüfkörpers ergeben (homogen graue Kugeln) auf das Messverfahren des Scanners vorliegen, muss im Rahmen erweiterter Untersuchungen geprüft werden.

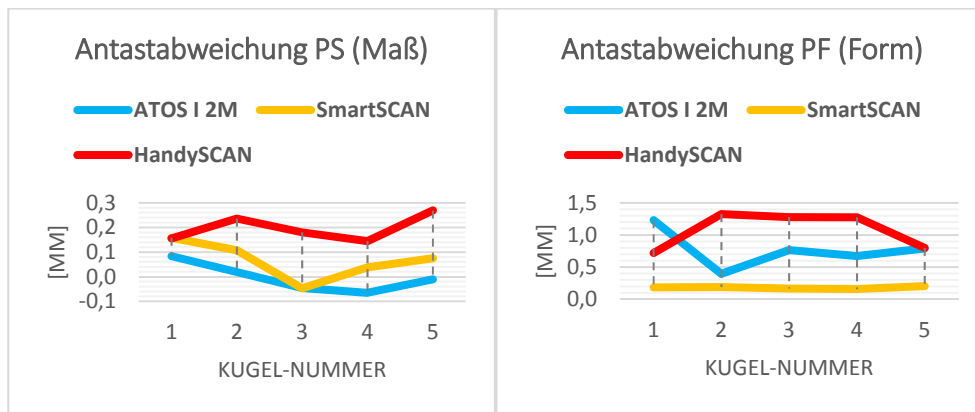


Abb. 4: Kenngröße Antastabweichung PS/PF (Maß/Form) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

Tabelle 2: Kenngrößen nach VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3

Kenngrößen	HandySCAN	SmartSCAN	Atos I 2M
Mittelwert Antastabweichung PS (Maß)	0.197 mm	0.085 mm	0.045 mm
Mittelwert Antastabweichung PF (Form)	1.080 mm	0.180 mm	0.771 mm
Mittelwert Kugelabstandsabweichung SD	0.070 mm	0.095 mm	0.102 mm
Ebenheitsmessabweichung RE (Spanne)	0.106 mm	0.408 mm	0.654 mm

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 liegen hier in der gleichen Größenordnung wie die Referenzsysteme.

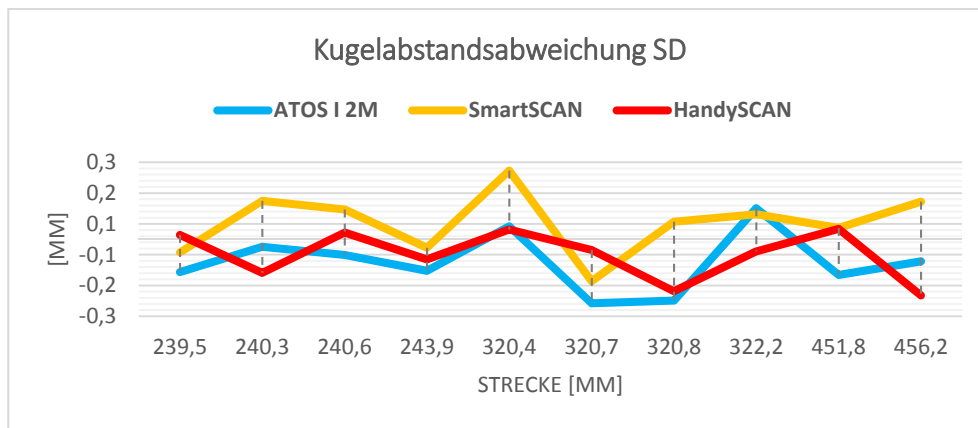


Abb. 5: Kenngröße Kugelabstandsabweichung (SD) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 3

5.2 Referenzkörper Granitplatte

Die im Rahmen der Prüfung ermittelte Kenngröße „Ebenheitsmessabweichung“ zeigt die hohe Qualität des HandySCAN Systems. Wenngleich der Nutzer von einer deutlich geringeren Punktzahl (im Vergleich zum smartSCAN) ausgehen muss, spiegelt das vorliegende Ergebnis des Handscanners das vorhandene Potential eindeutig wider.

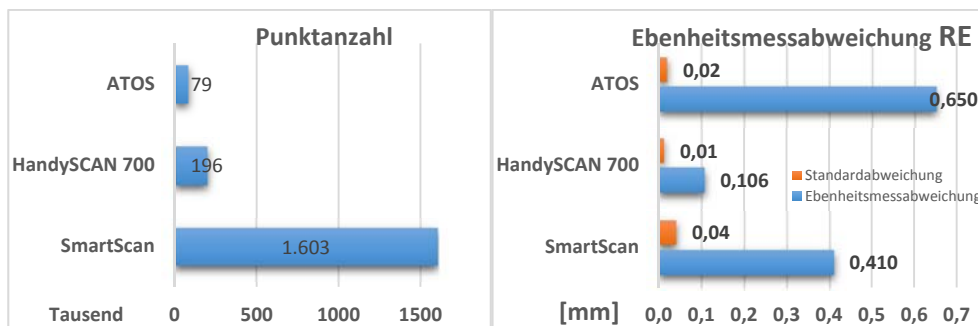


Abb. 6: Kenngröße Ebenheitsmessabweichung (RE) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

5.3 Testkörper Testy, Einsteinbüste und Radnabe

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche mit den drei Testkörpern sind in Tabelle 3 zusammengestellt sowie in Abb. 7 und 8 farblich illustriert. Die jeweilige erreichte durchschnittliche Abweichung zwischen 24 und 111 μm 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. 7). Bei der Einsteinbüste fallen einige Abweichungen auf der Rückseite und bei der eingravierten Schrift auf. Systematische Abweichungen werden auf beiden Seiten der Radnabe in Hellblau angezeigt, die der komplexen Geometrie der Radnabe und der Registrierung von Vorder- und Rückseite geschuldet sind (Abb. 8). 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).

Tabelle 3: Durchschnittliche Abweichungen an den Testkörpern – 3D-Vergleich mit Geomagic Studio 2012 zwischen dem Referenzsystem ATOS/smartSCAN und dem Creaform HandySCAN 700.

Objekt	# Dreiecke	Durchschnittl. Abw.	Standardabw.	Spanne
Testy	1.236.568	0.064 mm	0.130 mm	0.185 mm
Einstein	1.100.302	0.024 mm	0.046 mm	0.064 mm
Radnabe	7.257.962	-0.111 mm	0.199 mm	0.270 mm

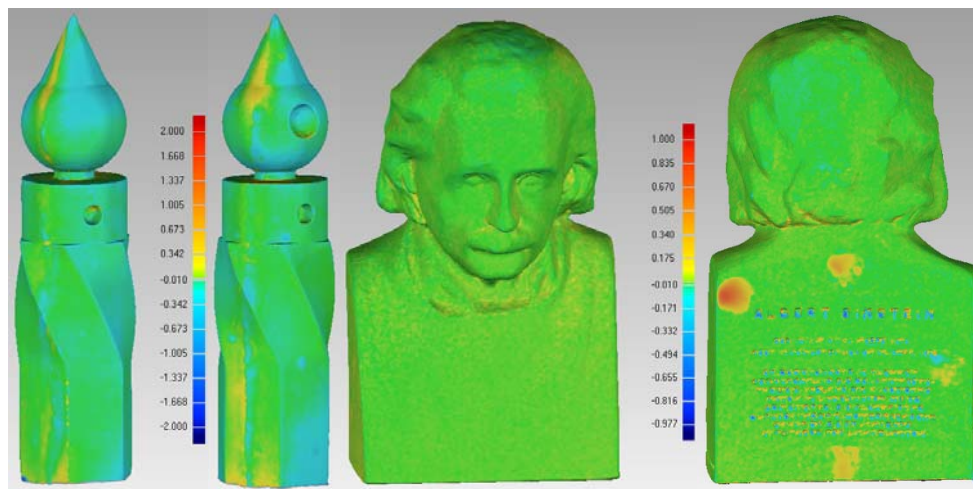


Abb. 7: 3D-Abweichungsanalyse mit Geomagic 2012 – Je zwei Ansichten von Testy (links) und der Einstein-Büste (rechts) (Einheit der Farbskala in mm)

6 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse geometrischer Genauigkeitsuntersuchungen des handgeführten 3D-Scanners Creaform HandySCAN 700 vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass das evaluierte System die Genauigkeit und die Qualität der Referenzdaten aus Messungen von High-End Streifenprojektionssystemen fast erreichen kann. Die durch den Hersteller angegebenen hohen Genauigkeiten von bis zu 30 μm konnten bei den vorliegenden

Untersuchungen jedoch nicht vollständig bestätigt werden. Die verwendeten Test- und Referenzkörper entsprechen dabei durchaus dem typischen Anwendungsspektrum des getesteten 3D-Scanners.

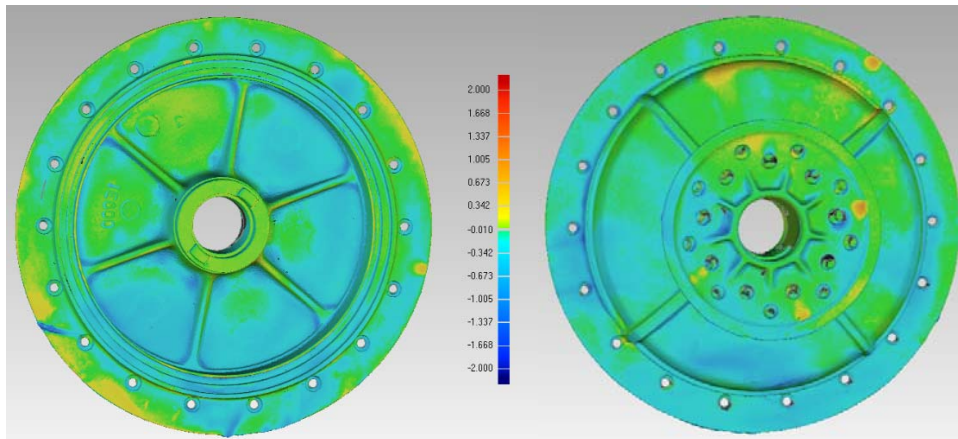


Abb. 8: 3D-Abweichungsanalyse mit Geomagic 2012 für die Vorder- und Rückseite der Radnabe (Einheit der Farbskala in mm)

Die Handhabung des Systems 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 Signalabbruch kommt. Die Aufnahmegeschwindigkeit ist mit wenigen Minuten je Objekt recht hoch. Der große Vorteil des flexiblen Einsatzes durch die einfache und schnelle Handführung wird leider durch die erforderliche und aufwändige Bestückung des Objektraumes durch Zielzeichen teilweise kompensiert. Hier muss auch für den Fall, dass ein Objekt nicht mit Targets beklebt werden kann oder darf, aufwändig ein Referenzrahmen mit 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 Genauigkeitspotential aufweist. Bei den Kugelabstands- und Ebenheitsmessabweichungen wurden sogar bessere Werte erreicht. Es ist auch positiv zu bewerten, dass der Anwender vor System-einsatz eine Kalibrierung des Sensorsystems durchführen kann und somit zu qualitativ hochwertigen metrischen Daten beiträgt.

Dank

Die Autoren bedanken sich beim Ingenieurbüro Hanack und Partner (Hamburg) für die Bereitstellung des Creaform HandyScan 700. Besonderer Dank gilt Frau DEBORAH STAROSTA für die tatkräftige Unterstützung bei der Datenerfassung der Referenz- und Testkörper. Darüber hinaus danken den Autoren 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/creaformannouncesma-jordesignandperformanceupgrade?news_lang=en, letzter Zugriff 31.10.16.
- Bathow, C. & Breuckmann, B. (2011): *High-definition 3D acquisition of archaeological objects: An overview of various challenging projects all over the world*. 23rd CIPA Symposium, S. 12-16.
- Keller, F., Sänger, J., Kersten, T. & Schiewe, J. (2011): *Historisches 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg - Automatisierte Generierung und Darstellung innerhalb der Google Earth Engine*. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, (3), S. 155-169.
- Kersten, T., Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F. & Misgaiski-Hass, M. (2016a): *Genauigkeitsuntersuchungen handgeführter Scannersysteme*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 25, T. Kersten (Hrsg.), S. 271-287.
- Kersten, T., Przybilla, H.-J. & Lindstaedt, M. (2016b): *Investigations into the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems*. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 5/6 (im Druck).
- Omelanowsky, D., Kersten, T. & Lindstaedt, M. (2013): *Untersuchungen von Low-Cost Systemen zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 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*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40 (5), S. 347-352.
- Reulke, R. & Misgaiski, M. (2012): *Test body "Testy" for Laser Scanning and Optical Systems*. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, (6): zum Titelbild.
- Starosta, D. (2016): *Untersuchung der Einsatzfahigkeit des 3D-Scanners „HandySCAN 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*. Quartär, 57, S. 179-187.
- VDI/VDE, (2002): *Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*. VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 2, Beuth Verlag, Berlin.
- VDI/VDE, (2006): *Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 3, Beuth Verlag, Berlin.

Kersten, Thomas; Lindstaedt, Maren
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning,
Email-Adresse: [Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt]@hcu-hamburg.de

Przybilla, Heinz-Jürgen
Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, Labor für Photogrammetrie
Email-Adresse: heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de