

# Genauigkeitsuntersuchungen handgeführter Scannersysteme

THOMAS P. KERSTEN<sup>1</sup>, HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA<sup>2</sup>, MAREN LINDSTAEDT<sup>1</sup>,  
FELIX TSCHIRSCHWITZ<sup>1</sup> & MARTIN MISGAISKI-HASS<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Handgeführte Scannersysteme verschiedener Hersteller sind in zunehmendem Maße am Markt 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) sowie der Humboldt-Universität zu Berlin (Institut für Informatik) geometrische Genauigkeitsuntersuchungen mit folgenden Systemen durchgeführt: DOTProduct DPI-7, Artec Spider, Mantis Vision F5 SR, Kinect v1 + v2, Structure Sensor und Google's Project Tango. Im Rahmen dieser vergleichenden Untersuchungen wurden geometrisch stabile Referenzkörper eingesetzt. Die zugehörigen Referenzdaten wurden durch Messung mit zwei Streifenprojektionssystemen (smartSCAN und GOM ATOS I 2M) erfasst. Die umfassenden Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Testszenarien werden in diesem Beitrag vorgestellt und kritisch diskutiert.*

## 1 Einleitung

In den letzten Jahren wurde der Markt zunehmend mit sogenannten handgeführten 3D-Scannern im unteren bis mittleren Preissegment (EUR 500 bis 20.000) erweitert. Die typischen 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. TALLIG et al. (2015) stellen eine Konzeption und Verifikation für Auswahlverfahren von 3D-Scantechnologien mit einem vielseitigen Kriterienkatalog vor.

Durch den günstigen Preis und die teilweise einfache Handhabung stellen diese handgeführten Scanner ggf. eine signifikante Konkurrenz zu den teuren und präzisen Streifenlichtprojektionssystemen dar. Es stellt sich daher die Frage, wie genau diese 3D-Scanner im Vergleich zu klassischen Streifenlichtprojektionssystemen sind (z. B. der Hersteller GOM, Steinbichler, AICON u. a.) und welche Qualität der Anwender für die aufgenommenen 3D-Daten erwarten kann. Dazu gibt es in der Literatur bereits erste veröffentlichte Ergebnisse, z. B. von Systemen aus dem Spielbereich 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). Hier hat sich wie erwartet gezeigt, dass weder Stabilität noch die Qualität dieser Systeme mit den High-End Systemen derzeit mithalten können.

---

<sup>1</sup> HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Überseeallee 16, D-20457 Hamburg, E-Mail: [Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt, Felix.Tschirschwitz]@hcu-hamburg.de

<sup>2</sup> Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, Labor für Photogrammetrie, Lennerhofstraße 140, D-44801 Bochum, E-Mail: heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

<sup>3</sup> Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Rudower Chaussee 25, D-12489 Berlin-Adlershof, E-Mail: martin.misgaiski@informatik.hu-berlin.de

Im nachfolgenden Beitrag werden geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener handgeführter 3D-Scanner vorgestellt. Hierzu wurden verschiedene Referenzkörper eingesetzt, deren Datensätze aus Messungen mit High-End Streifenprojektionssystemen (AICON 3D Systems smartSCAN und GOM ATOS I 2M) stammen.

## 2 Referenzkörper

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  $232 \times 120 \times 232 \text{ mm}^3$  und vier sogenannte „Testys“ (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  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ). Als Referenzobjekt für größere Flächenaufnahmen diente die Wand des 3D-Testfeldes der HCU Hamburg, die mit einem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5010 der Firma Zoller+Fröhlich mit der Auflösung high (6 mm @ 10 m) von drei Standpunkten erfasst wurde.

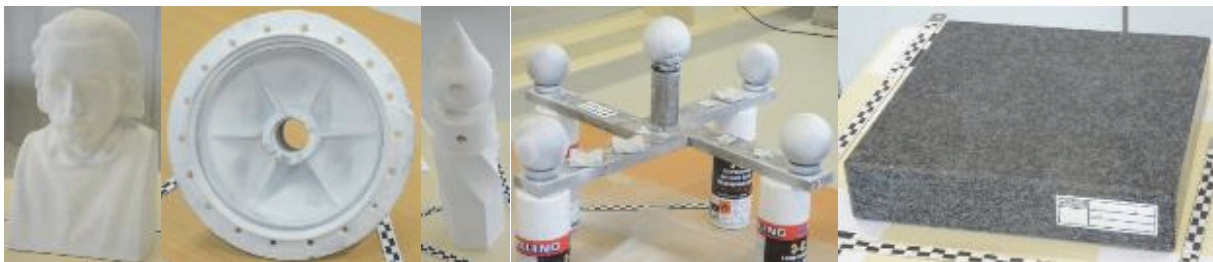


Abb. 1: Referenzkörper für die Untersuchungen der handgeführten Scannersysteme – v.l.n.r. Einstein-Büste, Radnabe, Testy, Testkörper HSBO mit Kugeln und Granitplatte.

## 3 Untersuchte Scannersysteme

Folgende handgeführte Scannersysteme standen zur Verfügung (Abb. 2), von denen ausgewählte technische Daten in Tabelle 1 zusammengefasst sind: drei DotProduct DPI-7 (Landeskriminalamt Hamburg (LKA), Hochschule Bochum (HSBO) und Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i)), Artec Spider (LKA), Mantis Vision F5 Short Range (MexConsult), Kinect v1 und v2 (HCU Hamburg), Structure Sensor (Humboldt-Universität zu Berlin) und Google's Project Tango (dhp:i). Außerdem wurden alle Objekte mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D800 und einem Smartphone Galaxy Note 1 aufgenommen.



Abb. 2: Untersuchte handgeführte Scannersysteme (v.l.n.r.): DPI-7, Artec Spider, Mantis Vision F5, Kinect v2 (oben), Kinect v1, Structure Sensor und Google's Project Tango (unten).

Tab. 1: Ausgewählte technische Daten der untersuchten 3D-Scanner (Herstellerangaben)

System	Messverfahren	Messbereich [m]	Genauigkeit [mm]	Gewicht [kg]	Preis [EUR]
DPI-7 SR (dhp:i)	Musterprojektion	0,60 – 1,20	2 (auf 1m)	< 1,00	5.000
DPI-7 LR (LKA/HSBO)	Musterprojektion	0,60 – 3,30	2 (auf 1m)	< 1,00	5.000
Artec Spider	Musterprojektion	0,17 – 0,35	0,05	< 1,00	15.700
Mantis F5 SR	Musterprojektion	0,30 – 0,80	0,05 (auf 50cm)	1,70	15.000
Structure Sensor	Musterprojektion	0,40 – 3,50	0,5 (auf 40cm)	0,10	450
Kinect v1	Musterprojektion	0,80 – 4,00	5 (auf 1,5m)	1,36	100
Kinect v2	Time-of-flight	0,40 – 4,50	keine Info	2,04	200
Google's Project Tango	Time-of-flight	0,50 – 4,00	keine Info	0,37	450
ATOS I 2M	Streifenlicht	0,16 – 1,28	0,02	3,50	50.000
smartSCAN	Streifenlicht	0,03 – 1,50	0,009 (Fläche)	4,00	80.000

### 3.1 DotProduct DPI-7

Wesentlicher Bestandteil der Hardware des DPI-7 Scanners (DotProduct, USA) ist ein PrimeSense Sensor, wie er auch in der Kinect v1 verbaut ist (NIR-Projektor sowie NIR- und RGB-Kamera). Nach einem Kaltstart benötigt das System ca. 20 Minuten Aufwärmzeit. Die Steuerung des Sensors erfolgt über ein angeschlossenes Android-Tablet mit der Software Phi.3D. Zur Ausrichtung der Punktwolke werden die internen Beschleunigungsmesser und Gyroskope des Tablets genutzt. Bei ausreichender Überdeckung (Prüfung über visuelle Farbinformation am Tablet) erfolgt eine Vorregistrierung durch einen ICP-Algorithmus (BESL & MCKAY 1992). Nach Abschluss des Scanvorganges schließt sich eine Optimierung der Registrierung an, bei der auch fehlerhafte Punkte (z. B. Mixed Pixel) eliminiert werden. Eine Untersuchung zum DPI-7 findet sich in JAHRAUS et al. (2015), eine Anwendung in AHERN & SPRING (2015).

### 3.2 Artec Spider

Artec Spider (Artec 3D, Luxemburg) ist ein handgeführter 3D-Scanner, der speziell für CAD-Anwender entwickelt wurde, um kleine Gegenstände mit komplexer Oberflächenstruktur, scharfen Kanten und dünnen Rippen mit 7,5 Bildern oder mit 1,0 Mio. Punkten pro Sekunde zu scannen. Das System benötigt eine Aufwärmphase von ca. 30 Minuten und arbeitet mit einem linearen

Sichtfeld zwischen  $90 \times 70 \text{ mm}^2$  bis  $180 \times 140 \text{ mm}^2$ . Der Aufnahmebereich liegt zwischen 0,17 - 0,35 m. Der Artec Spider nutzt eine Musterprojektion mit blauen LEDs als Lichtquelle und eine Farbkamera mit 1,3 Megapixel (24-bit Radiometrie) für die Texturierung der Objekte. In Verbindung mit der Artec Studio Software ist er (laut Hersteller) „ein Desktoptool für Designer, Ingenieure und Erfinder jeder Art“. Anwendungsbeispiele für das System finden sich bei ADAMS et al. (2015), FRIEDMAN et al. (2015) sowie INZERILLO et al. (2015).

### 3.3 Mantis Vision F5 Short Range

Der Mantis Vision F5 (Israel) ist ein auf Musterprojektion basierender handgeführter Scanner mit einem Messbereich von 0,5 m - 4,5 m (MVC F5) bzw. 0,3 m - 0,8 m (MV F5 Short Range). Die Hardware des Sensors besteht aus zwei Modulen: einer Videokamera und einem Projektor, welche in den Handgriff eingelassen sind. Der Projektor emittiert infrarotes Licht (firmeneigenes Muster) auf das Objekt, welches als kodiertes 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 1,6 mm bei einer Entfernung von 0,5 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.

### 3.4 Structure Sensor

Der Structure Sensor wurde von der Firma Occipital (USA) entwickelt und wird heute auch als iSense™ 3D-Scanner für iPad vermarktet. Der Sensor wird an einem iPad oder iPhone 6 (Structure App) adaptiert, welches mit einem PC (Mac OS X oder Windows) mit Nvidia Grafikkarte mit CUDA Funktionalität über WLAN kommuniziert. Die Datenprozessierung erfolgt auf dem PC mit der Software Skanect Pro. Skanect Pro bietet dabei Funktionen, wie z. B. Punktwolkenreduktion oder automatische Eliminierung von Artefakten. Der Sensor selbst besteht aus einem NIR-Laser-Projektor und einer NIR-Kamera (Auflösung in Pixel von  $640 \times 480$  bei 30 Bildern pro Sekunde (fps) bzw.  $320 \times 240$  mit 60 fps). Zusätzlich werden die RGB-Kamera und Lagesensorik des iPads verwendet. Letztere ermöglicht eine Positionungsverfolgung während des Scanvorgangs. Somit ist es möglich, texturierte und orientierte 3D-Scans zu erstellen. Der Aufnahmebereich beträgt 0,4 m bis 3,5 m, wobei die Tiefengenauigkeit mit steigender Entfernung abnimmt, bei 40 cm 0,15% (0,5 mm), bei 100 cm 0,3% und bei 350 cm 1,1% (35 mm). Sämtliche Daten werden in Echtzeit an Skanect Pro übertragen, dort verarbeitet und gespeichert.

### 3.5 Kinect v1 & Kinect v2

Die Kinect v1 wurde von Microsoft zusammen mit der Firma PrimeSense als Hardware zur Steuerung der Videospielekonsole Xbox 360 entwickelt und ist somit quasi einer der ersten am Markt verfügbaren low-cost 3D-Sensoren. Das Funktionsprinzip der Kinect v1 ist detailliert in WUJANZ et al. (2011) beschrieben. Genauigkeitsuntersuchungen der Kinect v1 finden sich in WUJANZ et al. (2011), KHOSHELHAM (2011), CHOW et al. (2012), SMISEK et al. (2013) sowie GONZALEZ-JORGE et al. (2013).

Die Kinect v2 besteht aus einer HD-Weitwinkelkamera mit einer Auflösung von  $1920 \times 1080$  Pixel bei 30 fps und einem IR-Sensor mit  $512 \times 424$  Pixel. Drei IR-Projektoren beleuchten aktiv die zu

beobachtende Szene. Die RGB-Kamera erfasst die Farbinformationen, während die IR-Kamera simultan sowohl eine Tiefenkarte als auch IR-Bilddaten in Echtzeit erfasst. LACHAT et al. (2015) stellen geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der Kinect v2 vor.

### **3.6 Google's Project Tango**

Google's Project Tango verbindet 3D Motion Tracking mit Tiefenmessungen, um dem mobilen Gerät die eigene Position und die Bewegung durch den Raum mitzuteilen. Es handelt sich also um ein Tablet, das als Multi-Sensor-System zur Navigation und Orientierung im Raum in Echtzeit agiert. Das Tablet besitzt eine RGB-D Kamera mit Fisheye-Objektiv (170° Sichtfeld) und Tiefensensor (Infineon 3D-Bildsensorchip IRS1645C mit 160 x 120 Pixeln) zur Erfassung von dichten Punktwolken. Als weitere Sensoren sind im System eine RGB-IR Kamera mit 4 MPixel, eine Frontkamera mit 1 MPixel und fixiertem Fokus, ein Beschleunigungsmesser, ein Barometer, ein Kompass, GPS und ein Gyroskop enthalten. Dazu kommen noch ein IR-Projektor (von Mantis Vision) und ein Blitzlicht. Mit dieser Hardware und entsprechend entwickelter Software wird die 3D-Bewegung durch die Motion-Tracking-Kamera verfolgt, laufend die Position und Orientierung bestimmt und eine Umgebungskarte aus 0,25 Million 3D-Messungen pro Sekunde erstellt. LOIANNO et al. (2015) zeigen, dass das Project Tango in mobilen Anwendungen (als Sensor auf einem UAV) eingesetzt wird. Den Einsatz für Aufnahmen von Innenräumen stellen WINTERHALTER et al. (2015) und KLINGENSMITH et al. (2015) vor.

### **3.7 Kameras – Nikon D800 und Smartphone Galaxy Note 1**

Parallel zu den handgeführten 3D-Scannern wurden Aufnahmen mit einer Nikon D800 sowie dem Smartphone Galaxy Note 1 erstellt. Die Auswertung der Bildverbände erfolgte mit der SfM-Software Agisoft PhotoScan (Version 1.2.3). Die Nikon D800 ist eine DSLR-Kamera mit einer Sensorgröße (CMOS) von 35,9×24,0 mm<sup>2</sup> und 36,3 Mio. Pixeln. Die Kamera des Smartphones verfügt über einen deutlich kleineren Sensor mit vermutlich 4,5×3,4 mm<sup>2</sup> (8 MPixel) und einem Objektiv mit Festbrennweite von 3,97 mm. Beispiele für die Auswertung von Bildverbänden ähnlicher Objekte wurden bereits publiziert (KERSTEN & LINDSTAEDT 2012, OMELANOWSKY et al. 2013).

### **3.8 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 mm<sup>2</sup> oder 250×200 mm<sup>2</sup> 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 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 ein Messbereich, abhängig von der Basis zwischen den Kameras, von 30 mm bis 1500 mm.

Anwendungsbeispiele des smartSCAN präsentieren SLIZEWSKI et al. (2010) und BATHOW & BREUCKMANN (2011).

## 4 Aufnahme

Die Testmessungen mit den handgeführten Scannern fanden am 5. und 6. Januar 2016 an der HafenCity Universität Hamburg im Labor für Geomatik statt. An verschiedenen Arbeitsplätzen wurden die Referenzkörper durch die zu untersuchenden 3D-Scanner, die Kameras sowie die beiden Referenzsysteme erfasst. Vor der Aufnahme wurden die Kugeln des Testkörpers HSBO sowie die Radnabe mit Kalkspray eingesprüht, um aus den glänzenden Metallkörpern matte und damit diffus streuende Oberflächen zu erzeugen. Tabelle 2 zeigt die Aufnahmen der verschiedenen Objekte, sortiert nach eingesetzten Systemen.

Tab. 2: Zusammenstellung der durchgeführten Aufnahmen nach Systemen und Objekten

System	T1	T2	T3	T4	Einstein	Radnabe	Platte	RK HSBO	Testfeld
DPI-7 (dhp:i)	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-
DPI-7 (LKA)	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-
DPI-7 (HSBO)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Artec Spider	✓	-	-	-	✓	✓	✓	-	-
Mantis F5 SR	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-
Structure Sensor	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-
Kinect v1	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Kinect v2	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Google's Project Tango	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
Nikon D800	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Galaxy Note 1	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
ATOS I 2M	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-
smartSCAN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
T .... Testy, RK .... Referenzkörper									

Die handgeführten 3D-Scanner wurden während der Objektaufnahme in einer langsamen, gleichförmigen Bewegung um und über das Aufnahmeobjekt geführt. Dabei wurden die erfassten Daten bei fast allen Systemen in Echtzeit auf dem angeschlossenen Computer (Kinect, Artec Spider) oder auf dem Tablet (Structure Sensor, Google's Project Tango) angezeigt.

Bei den **DPI-7** sind zu schnelle oder abrupte Bewegungen bei der Datenerfassung zu vermeiden, da sie unweigerlich zu einem Signalabriss führen. In diesem Fall muss der Operateur das System über einem bereits hinreichend erfassten Bereich des Objektes neu orientieren. Die Erfahrung des Bedieners übt somit einen nicht unwesentlichen Einfluss auf Geschwindigkeit und Qualität der Datenerfassung aus. Der Status der Datenerfassung (z. B. Vollständigkeit) wird während der Messung (durch entsprechende Farbcodierung) direkt auf dem Bildschirm des angeschlossenen Tablets angezeigt.

Die Aufnahme erfolgt beim **Artec Spider** nach der Aufwärmzeit wie beim DPI-7, d. h. durch langsame, gleichförmige Bewegung um das Objekt wird ein Signalabriss verhindert. Die Datenerfassung dauerte mit diesem System zwischen 2 und 10 Minuten pro Objekt.

Beim **Mantis F5 Scanner** werden mögliche Signalabriss erst im Postprocessing erkannt, sie können jedoch durch die Registrierung behoben werden. Die Datenfrequenz liegt bei 10 fps, eine

typische Aufnahme von einer Minute führt also zu ca. 15 Mio. Punkten. Das System arbeitet ohne Passpunkte, doch es sollten im Aufnahmebereich immer genügend Objektelemente in alle drei Koordinatenrichtungen vorhanden sein.

Alle räumlichen Testobjekte konnten mit dem **Structure Sensor** durch langsame und gleichmäßige Handführung in etwa 1 Minute aufgenommen werden. Die Aufnahme der Granitplatte erfolgte dagegen in nur 15 Sekunden. Die Nachbearbeitung der erfassten Daten dauerte je nach Objekt auf dem verwendeten Macbook zwischen 10 und 15 Minuten. Darin enthalten waren die Segmentierung des Objektes, die Dreiecksvermaschung sowie die Texturierung.

Auch das **Project Tango** wurde während der Aufnahme langsam und gleichmäßig über das Objekt geführt. Dabei zeigte sich schnell, dass dieser Sensor wegen der großen Pixelgröße am Boden von ca. 3 cm für die Aufnahme der kleinen Referenzkörper nicht geeignet ist. Daher wurde mit diesem Sensor nur das 3D-Testfeld aufgenommen.

Die mit der **Nikon D800** und dem **Smartphone Galaxy Note 1** aufgenommenen Objekte wurden durch einen Rundum-Bildverband aus verschiedenen Höhen erfasst. Die Objektaufnahme mit der Nikon D800 (alle Objekte mit Brennweite 85 mm, Testfeld mit 24 mm, Sensorempfindlichkeit ISO 200, Blende 22) erfolgte wegen der langen Belichtungszeiten von einem Stativ, während das Note 1 aus der Hand frei bedient wurde. Bei beiden Kameras war der Fokus auf „automatisch“ eingestellt. Mit der Nikon wurden Bildverbände mit 40 bis 80 Fotos aufgenommen, die je nach Objekt zwischen 20 und 45 Minuten dauerten. Die Freihandaufnahmen mit dem Galaxy Note 1 (Bildverbände mit 28 bis 68 Fotos) erfolgten mit drei bis sechs Minuten deutlich schneller.

Zur Messung der Objekte mit den Streifenprojektionssystemen **ATOS I 2M** und **smartSCAN** wurden diese auf Drehtellern positioniert. Beide Systeme wurden zu Beginn der Messtage kalibriert. Alle Objekte wurden in mehreren Scans aufgenommen, die in der jeweiligen Systemsoftware automatisch registriert wurden und daher mit jeder weiteren Aufnahme das Modell des Objektes vervollständigten. Beim ATOS wurden für die jeweilige Registrierung des Folgescans Zielmarken verwendet, die auf dem Drehteller und teilweise auf dem Objekt aufgeklebt waren. Die Registrierengenauigkeit lag zwischen 0,023 mm und 0,041 mm. Die Anzahl der Einzelscans variierte von 24 (Granitplatte) bis 120 Aufnahmen (Radnabe). Die Verknüpfung der Scans des smartSCAN erfolgte unter Nutzung von „Matchinghilfen“ - kleinen geometrischen Körpern mit signifikanten Oberflächenstrukturen, insbesondere Kanten, die im Objektraum verteilt angeordnet wurden.

## 5 Auswertung und Ergebnisse

Für die Auswertung lagen die Daten der einzelnen Referenzkörper der verschiedenen Messsysteme in unterschiedlichen Formaten vor. Einige Systeme lieferten Punktwolken (DPI-7), andere generierten bereits 3D-Modelle durch Dreiecksvermaschung on the Fly (Project Tango, Kinect v1 / v2) oder nachträglich in der System-Software (Structure Sensor, Mantis F5, Artec Spider, ATOS, smartSCAN). Die Kameras lieferten Fotos als Bildverbände, aus denen später mittels Dense Image Matching Punktwolken und nachfolgend Dreiecksvermaschungen generiert wurden (Agisoft PhotoScan). Zur Skalierung der Punktwolken wurden in den Fotos drei kalibrierte Maßstäbe

(Länge 140 mm, 290 mm und 480 mm) gemessen und in den Bündelausgleichungen mit Genauigkeiten von 0,1 - 0,6 mm ausgeglichen.

Die Referenzkörper (Testy, Radnabe und Einstein-Büste) wurden mit den Streifenprojektionssystemen sehr detailliert und präzise aufgenommen sowie in Geomagic Studio 2012 modelliert. Für Testy 1, 2 und 3 dienten die durch das ATOS-System erfassten Daten als Referenzdatensatz, während bei Testy 4, der Radnabe sowie der Einsteinbüste die Daten des smartSCAN als Referenz fungierten.

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. 3 stellt die ermittelten Kenngrößen *Antastabweichung* dar. Es erfolgt vorab keine Datenfilterung. Die Kennlinien des Referenzsystems smartSCAN beziehen sich hierbei auf eine Vergleichsmessung des Kugelkörpers mit einem Lasertracker API T3, während alle anderen Graphen sich auf das smartSCAN-System referenzieren.

Bezogen auf die *Antastabweichung PS* (Abb. 3 links) ist auffällig, dass einige Sensoren (DPI7-HSBO, Mantis, Galaxy Note 1) systematische Abweichungen aufzeigen, d. h. zu kleine oder zu große Messwerte liefern, die insgesamt betrachtet auf ein Maßstabsproblem hinweisen. Gegenüber dem Referenzsystem ist die *Antastabweichung PS* um den Faktor 5 - 35 größer.

Die *Antastabweichung PF* (Abb. 3 rechts) zeigt das Rauschverhalten der Sensoren. Die Spanne der radialen Abweichung von der Ausgleichskugel ist hierbei insbesondere bei den Kamerasystemen auffällig groß. Ein Grund hierfür dürfte in der homogen grauen Oberfläche der



Kugeln liegen, die für die Messungen mit den Scannern mit Kalkspray behandelt wurden, jedoch durch diese Oberflächenausgestaltung weniger geeignet für das Dense Image Matching sind. Die Ergebnisse für die DPI-7-Handscanner sind für alle Systeme homogen und pendeln sich bei einer *Antastabweichung PF* von ca. 10 mm ein. Beim Mantis-Scanner liegt der Wert im Mittel unter 2 mm. Der Structure Sensor zeigt hier mit unter 4 mm ein ebenfalls erstaunlich gutes Rauschverhalten.

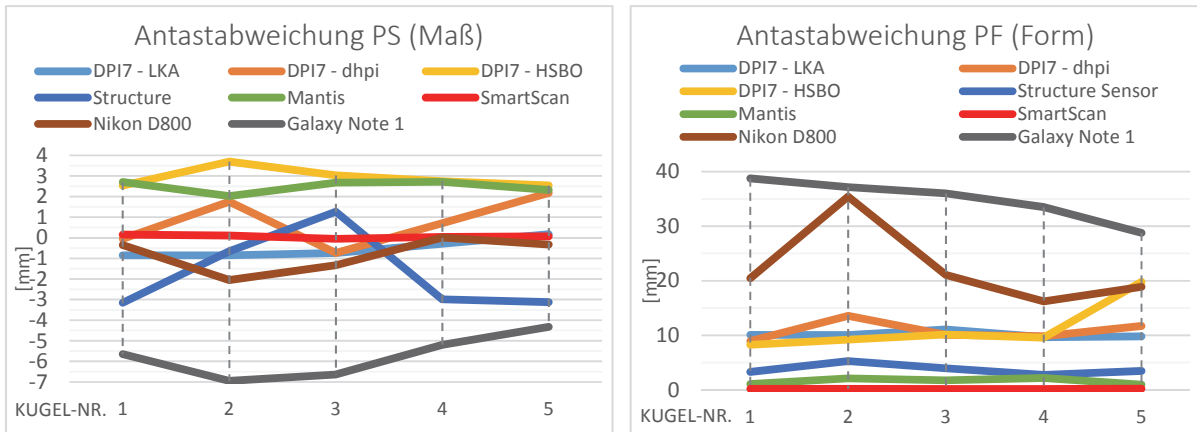


Abb. 3: Kenngröße Antastabweichung (PS / PF) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2.

Die in Abbildung 4 dargestellten *Kugelabstandsabweichungen SD* zeigen für nahezu alle Systeme systematisch positive oder negative Abweichungen. Besonders ausgeprägt sind diese Effekte beim Mantis F5 sowie dem Structure Sensor (im Mittel ca. 1% der Streckenlänge). Das bereits erwähnte Maßstabsproblem der Scanner ist hier als Hauptursache zu vermuten.

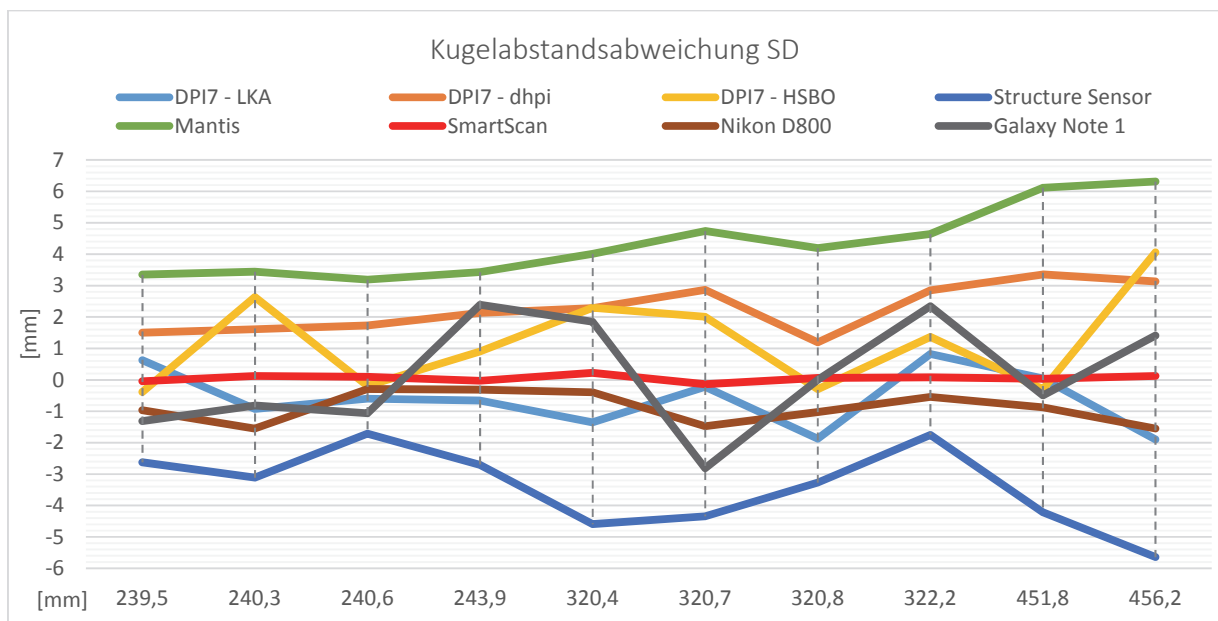


Abb. 4: Kenngröße Kugelabstandsabweichung (SD) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 3.

## 5.2 Referenzkörper Granitplatte

Die Diagramme der Abb. 5 geben die Ergebnisse zur *Ebenheitsmessabweichung*  $R_E$  wieder. Auch hier ist eine Abhängigkeit zwischen der Ausgestaltung der Objektoberfläche (Granitplatte mit zufälligen Mustern, bestehend aus hellen und dunklen Bereichen) und dem Messprinzip des jeweiligen Sensors erkennbar. Wie aus den Daten der Streifenprojektoren smartSCAN und ATOS erkennbar ist, sind beide Systeme in der Lage, die Oberfläche der Platte mit nahezu gleicher Qualität zu messen, wenngleich die Punktzahl signifikant unterschiedlich ist. Ein Grund ist in den verschiedenartigen Projektor-Einheiten der Scanner zu vermuten (eine aktuelle LED-Beleuchtung beim smartSCAN bzw. Halogenlicht beim ATOS), ein anderer in der unterschiedlichen Auflösung der Kameras.

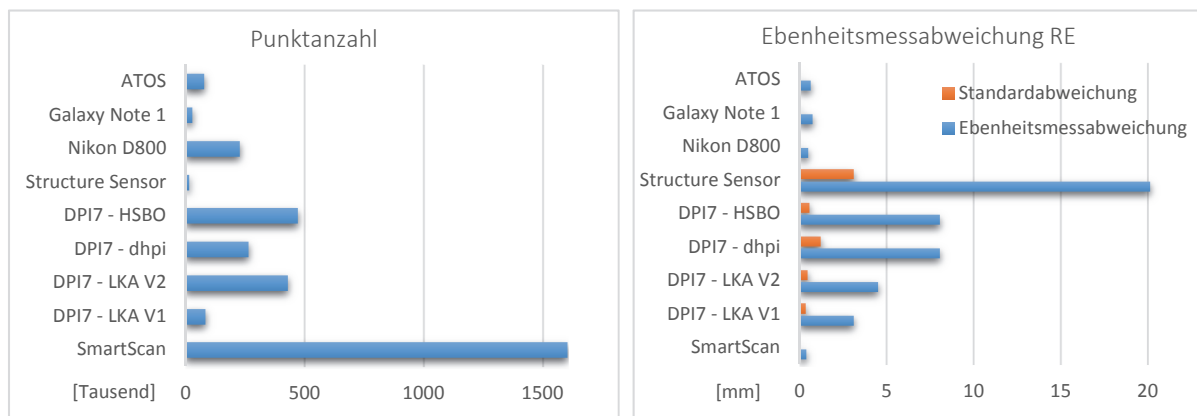


Abb. 5: Kenngröße Ebenheitsmessabweichung ( $R_E$ ) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2.

Die durch Bildtriangulation und Dense Image Matching erfassten Granitplatten weisen Ebenheitsmessabweichungen auf, die in einer zu den Streifenprojektionssystemen vergleichbaren Genauigkeitsklasse liegen. Der Messmethodik kommt hier sicherlich die natürliche Oberflächenstruktur der Granitplatte entgegen, die für das Dense Image Matching von Vorteil ist. Letzteres erweist sich für die Systeme mit aktiver Projektion dagegen eher als Nachteil. Insbesondere der Structure Sensor liefert hier vergleichsweise wenige Messdaten (ca. 15.000 Punkte), die zudem extrem streuen (Abb. 5).

Interessant ist auch noch der bei den DPI-7 Scannern zu erkennende Effekt, dass offensichtlich kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der erfassten Punktmenge und der Qualität der Oberflächenmessung existiert.

## 5.3 Referenzkörper Testy

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche mit den vier Testys sind in Tabelle 3 zusammengestellt sowie in Abb. 6 farblich illustriert. Die durchschnittliche Abweichung zeigt, dass die zwei Streifenprojektionssysteme sehr geringe Abweichungen zueinander von 4  $\mu\text{m}$  bzw. 12  $\mu\text{m}$  aufweisen und dass sogar die Spanne, die sich aus der Differenz der durchschnittlichen negativen und positiven Abweichungen errechnet, mit 30  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  sehr gering ist. Damit ist die gute Qualität der Streifenprojektionssysteme als Referenzsystem mit einer übergeordneten Genauigkeit bestätigt. Die beste Qualität konnte mit den Modellen, die aus den Bildverbänden der D800

abgeleitet wurden, erreicht werden, welche durch die geringe Abweichung von bis zu 70 µm und die visuelle Kontrolle (Abb. 6) nachgewiesen wurden. Alle anderen 3D-Scanner konnten diese Genauigkeiten nicht erreichen. Kaum ein System konnte den Testy aufgrund der komplexen Geometrie komplett erfassen und einige Systeme zeigen offensichtlich systematische Maßstabsunterschiede.

Tab. 3: Durchschnittliche Abweichungen an den Testys – 3D-Vergleich mit Geomagic Studio zwischen den untersuchten Systemen und dem Referenzsystem ATOS (Dreiecke ca. 250.000). Einheit [mm]

System	T	#Dreiecke	Ø	SD	Sp
DPI-7 dhp:i	2	588.221	2,16	2,55	3,86
DPI-7 LKA	1	466.114	1,17	0,76	1,81
DPI-7 LKA	2	448.993	1,03	1,09	1,92
DPI-7 HSBO	1	466.846	0,73	1,21	1,71
DPI-7 HSBO	2	554.247	2,01	2,16	3,24
DPI-7 HSBO	3	173.908	1,57	1,19	2,84
DPI-7 HSBO	4	639.945	0,70	1,18	2,07
Artec Spider	1	2.621.776	-1,05	0,85	1,60
Mantis F5	3	4.371.360	0,72	0,67	1,33
Kinect v1	2	76.703	0,61	3,91	6,60
Kinect v2	2	80.267	-2,68	4,28	8,52
StructureSensor	3	99.340	-0,24	1,01	1,63
Nikon D800	1	2.059.835	0,09	0,09	0,18
Nikon D800	2	2.609.969	0,22	0,21	0,47
Nikon D800	4	2.145.685	0,07	0,11	0,18
Galaxy Note 1	2	322.148	0,64	1,19	2,05
smartSCAN	2	1.156.735	-0,012	0,02	0,03
smartSCAN	3	2.626.807	-0,004	0,03	0,05

T... Testy, SD... Standardabweichung, Sp... Spanne

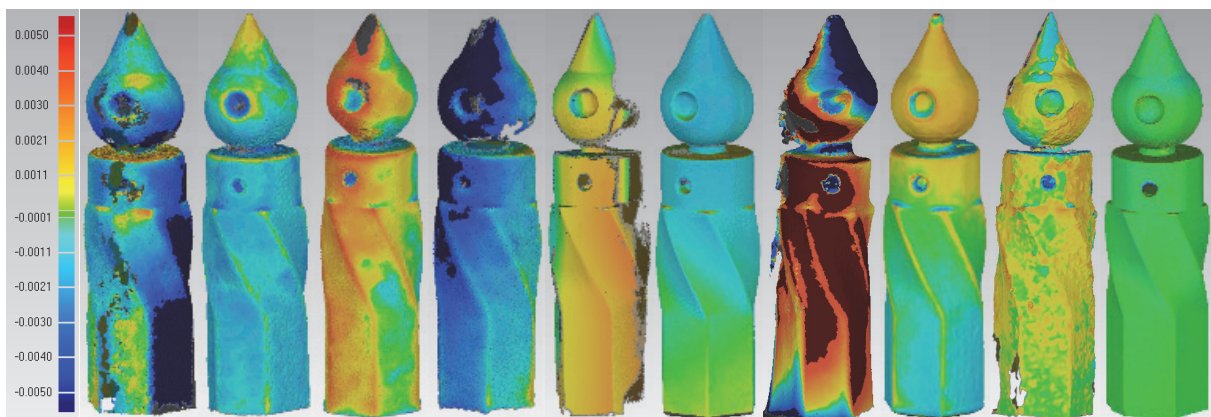
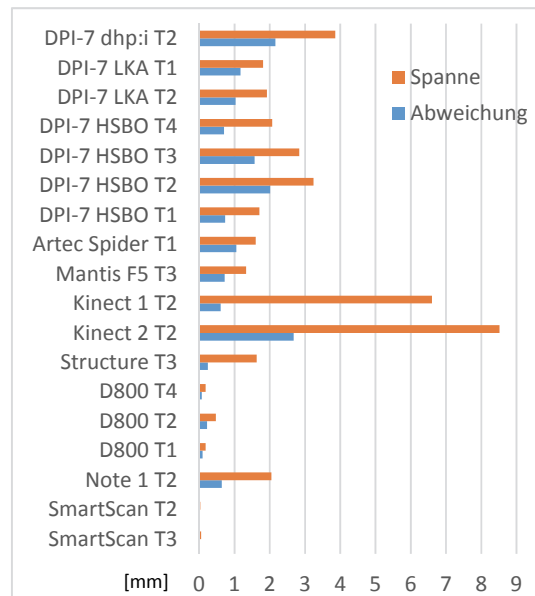


Abb. 6: Abweichungen [m] an verschiedenen Testys nach 3D-Vergleich zur ATOS-Referenz (Testdaten vs. Referenz) (v.l.n.r) – DPI-7 dhp:i T2, DPI-7 LKA T1, DPI-7 HSBO T1, DPI-7 HSBO T2, Artec Spider T1, Mantis F5 T3, Kinect v2 T2, Structure Sensor T3, Galaxy Note 1 T2, Nikon D800 T1.

### 5.4 Referenzkörper Einstein-Büste

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche mit der Einstein-Büste sind in Tabelle 4 zusammengestellt und in Abb. 7 farblich präsentiert. Das beste numerische Ergebnis erreichte wiederum die Nikon D800, obwohl das 3D-Modell an einigen Stellen wegen der homogenen weißen Oberfläche stark rauscht. Es ist jedoch interessant, dass die Ergebnisse der beiden Dreiecksvermaschungen der Nikon-D800

mit stark unterschiedlicher Auflösung (Faktor 3,7) gleich sind. Aus den Bilddaten des Galaxy Note 1 konnte kein richtiges Modell generiert werden, obwohl die Zahlen in Tabelle 4 ein optimistisches Ergebnis wiedergeben. Aus den Daten der 3D-Scanner DPI-7 und Artec Spider konnten nur Modelle mit einigen großen Lücken erstellt werden. Die hohen Abweichungen bei den DPI-7 zeigen, dass sie mit den homogenen weißen Oberflächenstrukturen der Einstein-Büste nicht zurechtgekommen sind. Auch die beiden höher eingeschätzten Systeme Mantis F5 und Artec Spider haben bei diesem Objekt die vom Hersteller spezifizierten Genauigkeiten nicht erreicht.

Tab. 4: Abweichungen an der Einstein-Büste – 3D-Vergleich mit Geomagic zwischen den untersuchten Systemen und dem Referenzsystem smartSCAN (Dreiecke 1.110.302). Einheit [mm]

System	#Dreiecke	Ø Abw.	SD	Sp
DPI-7 dhp:i	175.696	0,86	1,81	2,57
DPI-7 LKA	167.556	2,20	2,36	3,53
DPI-7 HSBO	77.896	0,88	1,28	2,10
Artec Spider	1.299.298	0,04	0,26	0,45
Mantis F5	8.089.764	0,23	0,25	0,42
Kinect v1	Keine verwertbaren Daten verfügbar			
Kinect v2	Keine verwertbaren Daten verfügbar			
Structure Sensor	1.114.088	0,19	2,68	2,62
D800 V1	3.699.360	0,04	0,11	0,19
D800 V2	99.998	0,03	0,13	0,20
Galaxy Note 1	1.984.979	-0,19	0,94	1,33
ATOS	769.262	0,01	0,02	0,03
SD... Standardabweichung, Sp... Spanne				

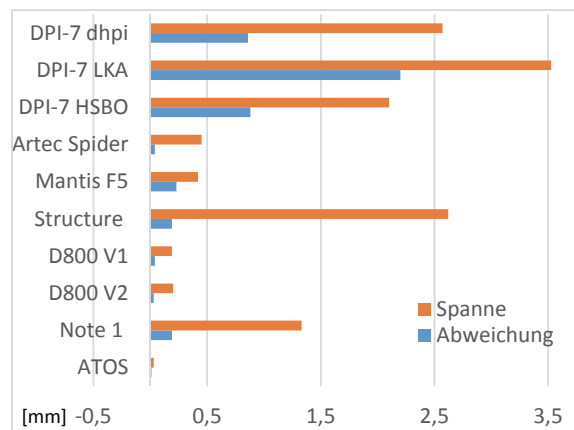


Abb. 7: Abweichungen [m] an der Einstein-Büste nach 3D-Vergleich (Testdaten vs. Referenzdaten) (v.l.n.r) - DPI-7 dhp:i, DPI-7 LKA, DPI-7 HSBO, Artec Spider, Mantis F5, Structure Sensor, Nikon D800, Galaxy Note 1. Farbskala: Grün < 0,0001 m, rot < 0,005 m und blau > -0,005 m.

## 5.5 Referenzkörper Radnabe

Den komplexesten und schwierigsten Referenzkörper stellte die Radnabe dar. Aufgrund ihrer Symmetrie lässt sich diese nur an einigen wenigen kleinen Objektteilen eindeutig ausrichten, einem gerillten Profil auf der Rückseite und einer erhabenen Schrift im Inneren. Wenn diese in den Scans aufgrund von niedriger Auflösung nicht erkennbar waren, ließ sich das Objekt nicht zum Referenzobjekt ausrichten und somit nicht vergleichen. Außer mit dem smartSCAN, der die Referenzdaten lieferte, wurde mit keinem der untersuchten Systeme ein kompletter Datensatz generiert, da die Radnabe nur aus einer Position aufgenommen und nicht gedreht wurde. Die generierten 3D-Modelle der untersuchten Scanner bzw. Systeme und die Abweichungen zwischen Testdaten und Referenzmodell sind in Abb. 8 farblich dargestellt. Darin zeigt sich, dass neben den beiden Streifenprojektionssystemen der Mantis F5 und die Nikon D800 die optisch besten

Ergebnisse lieferten. Der visuelle Eindruck wird auch durch die Ergebnisse in Tabelle 5 bestätigt, d. h. die geringsten durchschnittlichen Abweichungen weisen die beiden genannten Systeme auf. Dagegen zeigen einige Systeme signifikante systematische Effekte. Der Structure Sensor hat bei diesem Referenzkörper die größten Abweichungen von allen untersuchten Systemen. Er konnte, wie auch der Mantis F5 und der Artec Spider, bei dieser Untersuchung die vom Hersteller angegebene Genauigkeitsspezifikation nicht einhalten. Die anderen Systeme erreichen die spezifizierten Genauigkeiten, allerdings sind sie aufgrund der optischen Qualität des generierten Modells für diese industrielle Anwendung eher ungeeignet.

Tab. 5: Radnabe im 3D-Vergleich mit Geomagic Studio zwischen den untersuchten Systemen und dem Referenzsystem smartSCAN (Dreiecke 6.352.367). Einheit [mm]

System	#Dreiecke	Ø Abw.	SD	Sp
DPI-7 dhp:i	454.234	0,66	1,42	2,19
DPI-7 LKA	Keine Regis. der Scans möglich			
DPI-7 HSBO	Keine Regis. der Scans möglich			
Artec Spider	1.193.774	0,54	2,22	3,00
Mantis F5	5.494.803	0,29	0,60	1,06
Kinect v1	96.477	-0,15	2,20	2,96
Kinect v2	140.701	-0,74	1,94	3,08
Structure Sensor	1.114.088	1,43	1,61	2,67
Nikon D800	5.225.836	0,04	0,38	0,47
Galaxy Note 1	661.749	-0,26	0,77	1,06
ATOS	642.677	-0,18	0,27	0,33
SD...Standardabweichung, Sp.... Spanne				

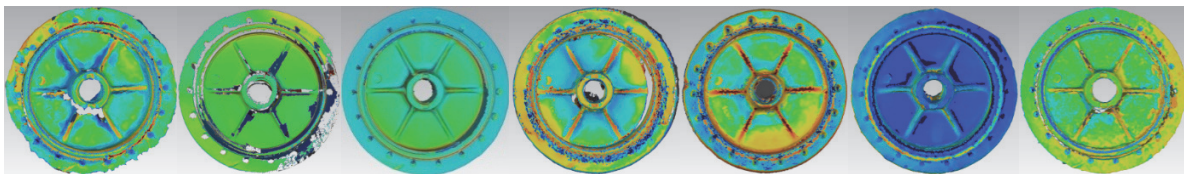
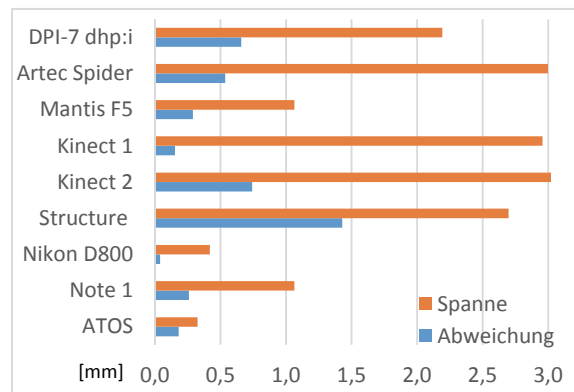


Abb. 8: Abweichungen [m] an der Radnabe - 3D-Vergleich mit Geomagic (Testdaten vs. Referenzdaten) (v.l.n.r.) – DPI-7 dhp:i, Artec Spider, Mantis F5, Kinect v1, Kinect v2, Structure Sensor und Galaxy Note 1. Farbskala: Grün < 0,0001 m, rot < 0,005 m und blau > -0,005 m.

### 5.6 3D-Testfeldwand

Das temporäre 3D-Testfeld der HCU umfasst ca. 40 schwarz-weiße Zielzeichen aus Papier (DIN A4) auf zwei Wandebenen sowie vorgelagerten Säulen. Die Dimension des Testfeldes von ca. 3×3×2 m<sup>3</sup> erlaubt eine Untersuchung unter Testbedingungen, die dem Messvolumen einzelner Sensoren eher entsprechen als die Aufnahme kleiner Referenzkörper. Der 3D-Vergleich erfolgte mit den Ebenen der Wand, des Bodens sowie der Säulen. Als Referenz wurde das Testfeld mit einem IMAGER 5010 von drei Standpunkten gescannt. Die Registrierung der drei Scans erfolgte mit einer Standardabweichung von besser als 2 mm. Verglichen wurden hier die Sensoren, die aufgrund ihrer Eigenschaften auch für größere Objekte gute Ergebnisse versprechen, namentlich die Kinect v2, DPI-7, Google's Project Tango sowie die Nikon D800.

Eine Registrierung der Testdatensätze zur Referenz erfolgte über den ICP-Algorithmus, da außer mit dem Datensatz der Nikon D800 keine Registrierung über die im Testfeld vorhandenen Zielmarken (Passpunktkoordinaten) durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche sind in Abb. 9 dargestellt. Die geringste Abweichung zeigt der Datensatz der Nikon D800. Größere

Abweichungen zeigten sich nur im Nahbereich an einer Säule sowie in Form von groben Ausreißern am Übergang von Boden zur Wandfläche, die manuell gefiltert wurden. Für dieses Objekt zeigt die Kinect v2 ein relativ gutes Ergebnis. Durch die Glättung bei der Erfassung wird die Wandfläche gleichmäßig sehr gut dargestellt. Größere Unterschiede zeigen sich entsprechend des flachen Auftreffwinkels auf den Seiten der Sockel sowie auf der Bodenfläche. Bei den Daten des DPI-7 zeigt sich ein Problem in der Registrierung der Einzelscans als verkettete Registrierung bei gestreckten Objekten. Die Wandfläche erscheint dabei als Ausschnitt einer Zylinderoberfläche, sodass die Randflächen deutlich von der Sollfläche abweichen. Es ist allerdings auch nicht auszuschließen, dass die Datenerfassung in den Randbereichen nicht hinreichend erfolgte. Für den Vergleich wurde mit dem Project Tango nur ein kleiner Ausschnitt des Testfelds erfasst. Dieser relativ dünn besetzte Datensatz zeigt große Ausreißer bei Punkten entlang der Bodenebene sowie zwischen den Oberflächen der Säulen.

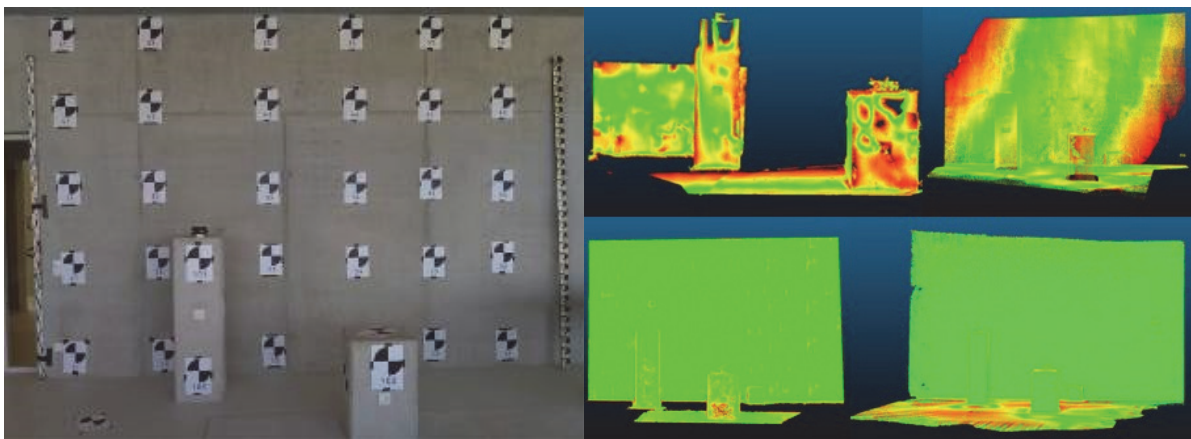


Abb. 9: 3D-Testfeld der HCU Hamburg (links), Abweichungen im HCU 3D-Testfeld – 3D-Vergleich mit CloudCompare (Referenzdaten vs. Testdaten) (v.l.n.r.) – Google's Project Tango, DPI-7 HSBO (oben), Nikon D800 und Kinect v2 (unten), Farbskala: Grün 0 mm, rot 25 mm Abweichung.

## 6 Fazit und Ausblick

Im Beitrag wurden die Ergebnisse vergleichender geometrischer Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener handgeführter 3D-Scanner vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die evaluierten Systeme die Genauigkeiten und die Qualität der Referenzdaten aus Messungen von High-End Streifenprojektionssystemen aktuell nicht erreichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle verwendeten Referenzkörper dem (jeweils typischen) Anwendungsspektrum der getesteten 3D-Scanner optimal entsprechen.

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 Signalabbruch kommt. Die Aufnahmegeschwindigkeit ist bei allen eingesetzten Systemen mit wenigen Minuten je Objekt recht hoch.

Die in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, ermittelten Kenngrößen (Antast- und Kugelabstandsabweichungen) weisen nach, dass bei einigen Handscannern der Geräte-Maßstab nicht exakt bestimmt wurde, bzw. auf Grund eines mechanisch zu wenig soliden

Aufbaus des Sensors möglicherweise nicht stabil ist. Prozeduren zur Feldprüfung bzw. einer einfachen, durch den Anwender durchführbaren Selbstkalibrierung, sind hier sinnvoll und notwendig. Die Ergebnisse zur Ebenheitsmessabweichung dokumentieren, dass die bildbasierten Aufnahmeverfahren mit den Kameras sehr geringe Abweichungen gegenüber den Streifenprojektionssystemen haben, während die Systeme mit aktiver Projektion um den Faktor 8 - 50 höhere Abweichungen aufweisen als das Referenzsystem. Das Signal-Rauschverhältnis ist hier verbesserungsbedürftig.

Die zwei im höheren Preissegment angesiedelten Systeme Mantis F5 und Artec Spider konnten die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten bei den Untersuchungen mit den Referenzkörpern Testy, Radnabe und Einstein-Büste nicht einhalten. Allerdings müssen auch der visuelle Zustand und die Vollständigkeit der erfassten Messobjekte neben den reinen Genauigkeitswerten (durchschnittliche Abweichung und Spanne) als Kriterien zur Beurteilung der gesamten Qualität eines untersuchten Systems herangezogen werden. Die visuelle Qualität der Modelle war beim Mantis F5 besser als bei den anderen handgeführten Scannern. Mit den Daten der DPI-7 und dem Artec Spider konnten wegen der vielen Löcher in den Datensätzen keine zufriedenstellenden Modelle der Referenzkörper generiert werden.

Die Ergebnisse der Nikon D800 waren von allen Systemen die besten, d. h. sie zeigen, dass diese Kamera in Kombination mit entsprechender Auswertesoftware gegenüber den handgeführten Scannern eine genaue und preiswerte Alternative darstellt. Die Qualität, der aus den Daten des Galaxy Note 1 erstellten Modelle, war wegen der tlw. großen Löcher nicht brauchbar. Allerdings bleibt abzuwarten, wie die neue Generation der Smartphone-Kameras bei zukünftigen Tests abschneiden wird. Es hat sich auch gezeigt, dass die Qualität eines mit einem bestimmten System generierten Modells sehr stark von der Erfahrung des Operators abhängt. Weitere verfügbare, aber noch nicht ausgewertete Daten des FARO Freestyle stehen für ergänzende Analysen bereit. Zukünftige Untersuchungen sollen im Rahmen alternativer Testszenarien, z. B. mit größeren Referenzkörpern durchgeführt werden.

## 7 Dank

Die Autoren bedanken sich beim Landeskriminalamt Hamburg, bei Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i) und bei MexConsult für die Bereitstellung der Aufnahmesysteme. Ein besonderer Dank gebührt den Masterstudierenden des Studienganges Geomatik der HCU Hamburg, den Studierenden der Hochschule Bochum und den Mitarbeitern des Landeskriminalamtes Hamburg für die tatkräftige Unterstützung bei der Datenerfassung.

## 8 Literaturverzeichnis

- ADAMS, J.W., OLAH, A., MCCURRY, M.R. & POTZE, S., 2015: Surface Model and Tomographic Archive of Fossil Primate and Other Mammal Holotype and Paratype Specimens of the Ditsong National Museum of Natural History, Pretoria, South Africa. *PloS one*, **10** (10), e0139800.
- AHERN, C., & SPRING, R., 2015: Handheld 3D Capture. *GeoInformatics* **18** (2), 18-19.

- BATHOW, C. & BREUCKMANN, B., 2011: High-definition 3D acquisition of archaeological objects: An overview of various challenging projects all over the world. 23<sup>rd</sup> CIPA Symposium, 12-16.
- BESL, P.J., & MCKAY, N.D., 1992: Method for registration of 3-D shapes. Robotics-DL tentative, International Society for Optics and Photonics, 586-606.
- BÖHM, J., 2014 Accuracy Investigation for Structured-light Based Consumer 3D Sensors. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, (2), 117-127.
- CHOW, J., ANG, K., LICHTI, D., & TESKEY, W., 2012: Performance analysis of a low-cost triangulation-based 3D camera: Microsoft Kinect system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39**, 175-180.
- FRIEDMAN, C., JOEL, B.W., SCHULT, A.R. & LEFTWICH, M.C., 2015: Noninvasive 3D Geometry Extraction of a Sea Lion Foreflipper. *Journal of Aero Aqua Bio-Mechanisms* **4** (1), 25-31.
- GONZALEZ-JORGE, H., RIVEIRO, B., VAZQUEZ-FERNANDEZ, E., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J., & ARIAS, P., 2013: Metrological evaluation of microsoft kinect and asus xtion sensors. *Measurement* **46** (6), 1800-1806.
- HIERONYMUS, J., MISGAISKI, M. & REULKE, R., 2011: Genauigkeitsvergleich von 3D-Sensoren aus dem Freizeit- und Spielmarkt. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011*, T. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 232-241.
- INZERILLO, L., DI MINO, G., DI PAOLA, F. & NOTO, S., 2015: The Diagnostics of Road Surface Distresses Through Image-Based Modeling Techniques. *Experimental Survey on Laboratory-Rutted Samples. Life Safety and Security* **3** (8), 31-35.
- JAHRAUS, A., LICHTI, D. & DAWSON, P., 2015: Self-Calibration of a Structured Light Based Scanner for Use in Archeological Applications. *Proceedings SPIE 9528, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII*, 95280E.
- 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), 155-169.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2012: Image-Based Low Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. *EuroMed 2012 - Int. Conference on Cultural Heritage*, Ioannides, M.; Fritsch, D.; Leissner, J.; Davies, R.; Remondino, F. & Caffo, R. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Volume **7616**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-10.
- KHOSHELHAM, K., 2011: Accuracy Analysis of Kinect Depth Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (5/W12), 133-138.
- KLINGENSMITH, M., DRYANOVSKI, I., SRINIVASA, S.S. & XIAO, J., 2015: CHISEL: Real Time Large Scale 3D Reconstruction Onboard a Mobile Device using Spatially-Hashed Signed Distance Fields. *Proceedings of Robotics: Science and Systems 2015*.
- LACHAT, E., MACHER, H., LANDES, T. & GRUSSENMEYER, P., 2015: Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect v2 Sensor) Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modeling. *Remote Sensing* **7** (10), 13070-13097.



- LOIANNI, G., CROSS, G., QU, C., MULGAONKAR, Y., HESCH, J.A., & KUMAR, V., 2015: Flying smartphones: Automated flight enabled by consumer electronics. *Robotics & Automation Magazine* **22** (2), 24-32.
- OMELANOWSKY, D., KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2013: Untersuchungen von Low-Cost Systemen zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Mess-technik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013*, T. Luhmann & C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 217-228.
- RAU, J. Y. & YEH, P. C., 2012: A semi-automatic image-based close range 3D modeling pipeline using a multi-camera configuration. *Sensors* **12** (8), 11271-11293.
- REULKE, R. & MISGAISKI, M., 2012: Test body “Testy” for Laser Scanning and Optical Systems. *PFG – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, **6**, zum Titelbild.
- 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**, 179-187.
- SMISEK, J., JANCOSEK, M. & PAJDLA, T., 2013: 3D with Kinect. *Consumer Depth Cameras for Computer Vision*, Springer London, 3-25.
- TALLIG, G., ZENDER, R. & LUCKE, U., 2015: Konzeption und Verifikation eines Auswahlverfahrens für 3D-Scantechnologien. *Proceedings der Pre-Conference Workshops der 13. E-Learning Fachtagung Informatik*, S. Rathmayer & H. Pongratz (Hrsg.), München, 19-27.
- 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.
- WINTERHALTER, W., FLECKENSTEIN, F., STEDER, B., SPINELLO, L., & BURGARD, W., 2015: Accurate indoor localization for RGB-D smartphones and tablets given 2D floor plans. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3138-3143.
- WRONA, M., 2014: Using Optical NIR Handheld Scanner for Close Range 3D Mapping. *The 9<sup>th</sup> International Conference on Environmental Engineering 2014*, Procedia Engineering, Vilnius.
- WUJANZ, D., WEISBRICH, S. & NEITZEL, F., 2011: 3D-Mapping mit dem Microsoft® Kinect Sensor – erste Untersuchungsergebnisse. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Mess-technik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011*, T. Luhmann & C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 274-283.
- ZHANG, W., WANG, C., & XI, X., 2015: 3D Scan of Ornamental Column (huabiao) Using Terrestrial LiDAR and Hand-held Imager. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40** (5/W7), 491-494.