

# Zum Genauigkeitspotential aktueller handgeführter 3D-Scanner

Thomas KERSTEN, Deborah STAROSTA und Maren LINDSTAEDT

## Zusammenfassung

Handgeführte Scannersysteme verschiedener Hersteller sind in zunehmendem Maße am Markt in den drei Preissegmenten low-cost, mittlere Preisklasse und high-end verfügbar, jedoch ist über deren geometrische Leistungsfähigkeit bei vielen Anwendern wenig bekannt. Daher hat das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg geometrische Genauigkeitsuntersuchungen mit aktuellen handgeführten 3D-Scannern der oberen Preisklasse durchgeführt, die in diesem Beitrag vorgestellt werden. Für die Untersuchungen standen folgende aktuelle 3D-Handscanner zur Verfügung: Mantis Vision F5-B und PocketScan 3D, der neue Mantis Vision F6 SMART und der FreeScan X7 von Shining 3D. Mit folgenden 3D-Handscannern wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt: Artec Spider, Mantis Vision F5 SR und Creaform HandySCAN 700. Im Rahmen der Untersuchungen über die geometrische Qualität wurden wie in den vorherigen Untersuchungen geeignete Testkörper, wie die Büste von Einstein (Höhe 16 cm), eine Radnabe (beide von der HCU Hamburg) und der sogenannte „Testy“ (Höhe 38 cm) des Instituts für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin benutzt, um Abweichungen und deren Systematiken in 3D-Vergleichen mit der Referenz zu bestimmen. Weitere Prüfungen erfolgten mit zwei geometrisch stabilen Referenzkörpern der Hochschule Bochum: der kreuzförmige Körper mit Kugeln aus Stahl und die ebene Granitplatte. Als Referenz wurden alle verwendeten Testkörper durch zwei Streifenprojektionssysteme (AICON smartSCAN und GOM ATOS I 2M) erfasst. In Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, erfolgten die Prüfungen mit den stabilen Referenzkörpern, um vergleichbare Kenngrößen abzuleiten. In den umfassenden Untersuchungen der verschiedenen Testszenarien wird das Genauigkeitspotential der portablen Aufnahmesysteme zusammengestellt und den Ergebnissen anderer Handscanner aus vorherigen Untersuchungen gegenübergestellt.

## 1 Einleitung

Portable 3D-Scanningsysteme werden heute wegen ihrer hohen Flexibilität, Portabilität und Effizienz zunehmend in vielen unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt. Diese handgeführten 3D-Scanner können auf der einen Seite großmaßstäbige Objekte/Modelle durch die Erfassung verdeckter Bereiche vervollständigen oder andererseits kleine Artefakte aufnehmen. 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. In dem Nahbereich stehen mit Streifenprojektionssystemen und bildbasierten Aufnahmesystemen bereits Messsysteme zur Verfügung, die aufgrund der hohen Genauigkeit als starke Konkurrenz für die 3D-Handscanner gelten. 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. Eingesetzt werden diese Messsysteme in unterschiedlichen Anwendungsgebieten wie Architektur (Maxwell

2017), Denkmalpflege (OUMET et al. 2015), Biologie (FRIEDMAN et al. 2015), Forensik (LARSSON & LETALICK 2013, WIECZOREK & GORAWSKA 2017), Orthopädie (SALLEH et al. 2017, DESSERTY & PALLARI 2018), Konstruktion (SENTHILVEL et al. 2017) und viele andere. In den letzten Jahren hat sich das Angebot handgeführter 3D-Scanner in verschiedenen Preissegmenten (EUR 500 bis EUR 50.000) zunehmend erweitert.

Daher tragen Untersuchungen zur metrischen Qualität und zur Funktionalität der handgeführten 3D-Scanner zum Verständnis, zur Beurteilung und zur Abschätzung des Anwendungsbereiches diese portablen Messsysteme bei. In den letzten beiden Jahren wurden bereits Untersuchungen von 3D-Handscannern veröffentlicht. Erste Untersuchungen von auf dem PrimeSensor basierten 3D-Konsumersensoren (Microsoft Kinect) bezüglich ihrer Wiederhol- und Absolut-Genauigkeit wurden von BOEHM (2014) publiziert. ALLEGRA et al. (2017) untersuchten verschiedene handgeführte 3D-Scanner für Anwendungen in der Denkmalpflege, während LACHAT et al. (2017) nach Untersuchungen Empfehlungen für den praktischen Einsatz des Freestyle<sup>3D</sup> Handscanners bei der Erfassung von gemeißelten und geformten Steinblöcken geben. Erste vergleichende Untersuchungen über die geometrische Genauigkeit verschiedener 3D-Handscanner wurden bereits von KERSTEN et al. (2016a/2016b) veröffentlicht. Anknüpfend an diese Untersuchungen wurden geometrische Genauigkeitsuntersuchungen weiterer aktueller 3D-Handscanner (Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B) durch PRZYBILLA et al. (2018) publiziert. Für die Untersuchungen in diesem Beitrag standen folgende aktuelle 3D-Handscanner zur Verfügung, die nach den gleichen Verfahren und mit den gleichen Test- und Referenzkörpern wie in KERSTEN et al. (2016a/2016b) und PRZYBILLA et al. (2018) an der HafenCity Universität Hamburg getestet wurden: Mantis Vision F5-B und PocketScan 3D, der neue Mantis Vision F6 SMART und der FreeScan X7 von Shining 3D.

## 2 Untersuchte 3D-Handscanner

### 2.1 3D-Handscanner von Mantis Vision

#### 2.1.1 PocketScan 3D

Der PocketScan 3D (120×60×30 mm) ist der leichteste (0,25 kg) und kleinste 3D-Handscanner (Abb. 1) des israelischen Unternehmens Mantis Vision ([www.mantis-vision.com/](http://www.mantis-vision.com/)). Wie alle Messsysteme des Herstellers besteht dieses aus zwei Komponenten: einer Videokamera, allerdings mit zwei Kanälen (Farbe und Tiefe) und einem Projektor. Während der Aufnahme wird ein strukturiertes Lichtmuster (Infrarot) auf das Objekt projiziert und die Farbinformationen werden gespeichert. Dabei wird der Scanner an ein Windows OS basiertes Tablet, Surface oder Laptop über USB 3.0 angeschlossen. Der Messbereich des Systems liegt im Nahbereich zwischen 0,25 – 1,0 m. Die Genauigkeit liegt bei 1 mm für eine Reichweite von 0,5 m (bzw. 2 mm@1 m).

#### 2.1.2 F5-SR und F5-B

Der Mantis Vision F5 (Abb. 1) ist ebenfalls ein auf Musterprojektion basierter handgeführter Scanner mit einem Messbereich von 0,3 m bis 0,8 m (MV F5 Short Range) bzw. 0,5 m bis 4,5 m (MVC F5-B). 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. Die Messgeschwindigkeit beträgt 500.000 Punkte/s und durch Triangulation wird daraus eine Punktwolke berechnet. Die Punktdichte in XY beträgt für ein einzelnes Bild 1,6 mm bei einer Entfernung von 0,5 m (F5-SR) bzw. 3 mm bei einer Entfernung von 1 m (F5-B). Durch die geringe Sensitivität gegenüber dem Umgebungslicht ist das System sowohl bei Dunkelheit als auch bei Tageslicht draußen 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. Beide Messsysteme werden heute nicht mehr hergestellt, da sie durch den neuen F6 SMART ersetzt werden.

### 2.1.3 F6 SMART

Der F6 SMART (Abb. 1) ist seit 2017 als neuester tragbarer Scanner von Mantis Vision auf dem Markt. Der 3D-Handscanner besitzt eine integrierte Farbkamera mit 1,3 Megapixel, wiegt 1 kg und ist eher für große Objekte und Flächen geeignet. Der Scanbereich liegt bei 0,5 – 4,5 m mit einer Genauigkeit von 0,1 – 0,2% in Abhängigkeit von der Scanentfernung. Erfasst wird das aufzunehmende Objekt mit 640.000 Punkten / Sek. Laut Herstellerangaben ist mit einem Messrauschen von weniger als 0,5 mm bei 1 m Distanz zu rechnen. Die farbige 3D-Punktwolke wird mittels des Real-Time-Modus auf dem Bildschirm angezeigt, wodurch eine sofortige Kontrolle auf Vollständigkeit möglich ist. Der Scanner ist mit einer internen Batterie ausgestattet, sodass im Außendienst keine externe Stromquelle benötigt wird.

## 2.2 Artec Spider

Artec Spider (Artec 3D, Luxemburg) ist ein handgeführter 3D-Scanner (Abb. 1), der speziell für CAD-Anwender entwickelt wurde, um kleine Gegenstände mit komplexer Oberflächenstruktur, scharfen Kanten und dünnen Rippen mit 7,5 Bildern bzw. mit 1,0 Mio. Punkten pro Sekunde zu scannen. Das System benötigt eine Aufwärmphase von ca. 30 Minuten und arbeitet mit einem linearen Sichtfeld von  $90 \times 70 \text{ mm}^2$  bis  $180 \times 140 \text{ mm}^2$ . Der Aufnahmebereich liegt zwischen 0,17 und 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 Desктоoptool für Designer, Ingenieure und Erfinder jeder Art“. Anwendungsbeispiele für das System finden sich bei ADAMS et al. (2015) und FRIEDMAN et al. (2015).

## 2.3 Creaform HandySCAN 700

Der HandySCAN 700 (Abb. 1) ist „als die neueste Generation handgeführter 3D-Scanning-Systeme 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 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 Größenbereich 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 275×250 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.

## 2.4 Shining 3D FreeScan X7

Der FreeScan X7 (Abb. 1) ist ein 950 g „leichter portabler Hochgeschwindigkeits-3D-Handscanner“, welcher seit 2017 auf dem Markt verfügbar ist. Der Scanner wird an einen leistungsfähigen Computer mit der Software Shining3D angeschlossen. Zusätzlich ist der Scanner mit einem Netzteil, USB 3.0 Kabel, Zielmarken, einem Lizenzdongle und einer doppelseitigen Kalibrierungstafel ausgestattet. Das System arbeitet wie der HandySCAN 700 nach dem Prinzip der photogrammetrischen Stereoaufnahme. Die technischen Spezifikationen (Tab. 1) und die Handhabung des Messsystems entsprechen denen des HandySCAN 700. Nur die Reichweite des Sensors ist laut Herstellerangaben mit 8 m doppelt so groß wie beim HandySCAN 700. Durch seine handliche Form ist der Scanner anpassungsfähig an komplexe Umgebungen und kann im Innen- und Außendienst eingesetzt werden.

## 2.5 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. 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, 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 Flächengenauigkeit beträgt 0,009 mm. Anwendungsbeispiele des smartSCAN präsentieren SLIZEWSKI et al. (2010) und BATHOW & BREUCKMANN (2011).

**Tabelle 1:** Ausgewählte technische Daten der untersuchten 3D-Handscanner (Herstellerangaben)

System	MV	MG [Pkte/s]	MB [m]	G [mm]	Gewicht [kg]	~Preis [EUR]
Artec Spider	SL/SP	1.000.000	0,17–0,35	~0,05	0,85	15.700
Mantis F5-SR	SL/SP	500.000	0,30–0,80	0,05(@50cm)	1,70	10.000 <sup>2</sup>
Mantis F5-B	SL/SP	500.000	0,50–4,50	0,05(@50cm)	1,70	8.000 <sup>2</sup>
Mantis F6 SMART	SL/SP	640.000	0,50–4,50	0,2%-0,1% <sup>1</sup>	1,00	18.000
PocketScan 3D	SL/SP	600.000	0,25–1,00	2(@1,0m)	0,25	2.000
HandySCAN 700	SP	480.000	0,30–4,00	0,02+0,06/m	0,85	49.000
FreeScan X7	SP	480.000	0,10–8,00	0,02+0,06/m	0,95	35.000

<sup>1</sup> abhängig von Scan-Distanz, <sup>2</sup> Preise für gebrauchte Systeme (Status Jan. 2018), MV = Messverfahren, SL/SP = Strukturiertes Licht/Speckle-Muster, SP = Stereo-Photogrammetrie, MG = Messgeschwindigkeit, MB = Messbereich; G = Genauigkeit

**Abb. 1:** Untersuchte 3D-Handscanner v.l.n.r.: Artec Spider, Mantis F5-SR, Mantis F5-B, Mantis F6 SMART, Mantis PocketScan 3D, 3D Craform HandySCAN 700 und Shining 3D FreeScan X7

### 3 Referenz- und Testkörper

Für den Vergleichstest wurden folgende Objekte genutzt (Abb. 2): 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 beiden 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. 2:** Test- und Referenzkörper für die Untersuchungen der handgeführten Scannersysteme – v.l.n.r. Einstein-Büste, Radnabe, Testy, Referenzkörper HSBO mit Kugeln und Granitplatte.

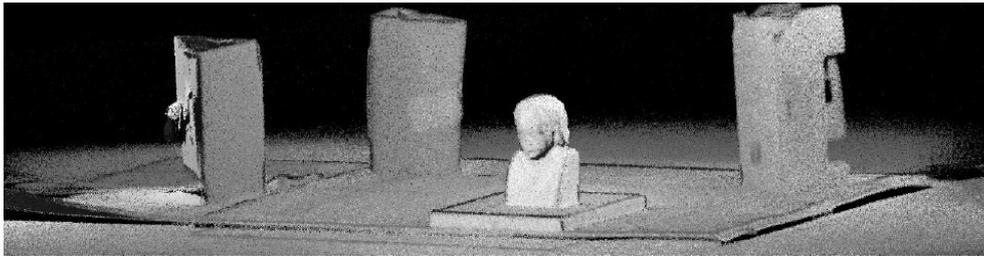
## 4 Aufnahme

Die Messungen mit den unterschiedlichen Handscannern fanden im August (Mantis F5-SR, F5-B, Mantis PocketScan 3D, Artec Spider und HandySCAN 700) und im Oktober 2017 (Mantis F6-Smart und FreeScan X7) an der HafenCity Universität Hamburg im Labor für Geomatik statt. Die Referenzmessungen mit den Streifenprojektionssystemen fanden bereits im Rahmen der ersten Handscanneruntersuchungen im Januar 2016 statt. Da stark reflektierende, spiegelnde, schwarze oder glänzende Oberflächen für die Aufnahmesysteme 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 Aufnahmebedingungen im Labor waren für jeden 3D-Scanner gleich. Die 3D-Scanner wurden während der Objektaufnahme in der Hand gehalten und in einer langsamen gleichmäßigen Bewegung über den zu erfassenden Testkörper geführt. Vor der Erfassung der Testkörper wurden beide photogrammetrischen Stereosysteme HandySCAN 700 und FreeScan X7 anhand der mitgelieferten Kalibrierungstafeln kalibriert, während für den Artec Spider und die Mantis Vision Systeme die entsprechenden aktuellen Kalibrierungsfiles beim Start der Steuerungssoftware ausgewählt wurden.

Für die Aufnahmen mit dem HandySCAN 700 und FreeScan X7 wurden die Test- und Referenzkörper und der nähere Objektraum vorab mit kreisförmigen, selbstklebenden und reflektierenden Zielmarken (Durchmesser circa 11 mm) bestückt. Die Positionierung des Messsystems wird durch Triangulation der Zielmarken in Echtzeit berechnet. 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.

Die handgeführten 3D-Scanner von Mantis Vision wurden während der Objektaufnahme aus einer Entfernung von 0,5 bis 1,5 m (je nach optimaler Distanz für das System) um und über das Aufnahmeobjekt geführt. Die Sensoren (F5-SR, F5-B, PocketScan 3D) wurden über ein USB-Kabel an ein Microsoft Surface 4 angeschlossen und mit der Software Kapla Vision gesteuert. Dabei wurden die erfassten Daten (das aktuelle Frame und das Bild der Infrarotkamera) in Echtzeit auf dem Microsoft Surface angezeigt. Der Mantis Vision F6 SMART wurde über ein USB 3.0 Kabel an einen Laptop mit der Software Echo angeschlossen. Beim Mantis F5-B Scanner werden mögliche Signalabrisse erst im Postprocessing erkannt, sie konnten jedoch durch die manuelle 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. Die Systeme arbeiten ohne Passpunkte, doch sollten im Aufnahmegebiet immer genügend Objektelemente in alle drei Koordinatenrichtungen vorhanden sein (Abb. 3), um so die Echtzeit-Registrierung der Scans zu unterstützen.

Der Artec Spider wurde an einem Tablet mit der Software Artec Studio 9 angeschlossen und benötigt wie bereits oben erwähnt eine Aufwärmphase von circa 30 Minuten. Die Position und Ausrichtung des Scanners wird für jeden Scan mithilfe der Geometrie des Messobjektes und deren Umgebung errechnet (7,5 fps). Für die gesamte Erfassung eines Testkörpers sind mehrere Messungen notwendig, um eine möglichst lückenlose Erfassung zu generieren, da ein Signalverlust durch zum Beispiel schnelle oder ruckartige Bewegungen einen Neustart des Scanvorganges erfordert.



**Abb. 3:** Aufgenommene registrierte Punktwolke des Mantis Vision PocketScan 3D von der Einstein-Büste mit Objektelementen zur Stützung der Echtzeit-Registrierung der Scans.

## 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 gefiltert und vermascht. Für den 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 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 dreidimensionalen 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 Fehlerquadratsumme berechnet wird.

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

### 5.1 Referenzkörper mit Stahlkugeln

Abb. 4 stellt die ermittelte Kenngröße Antastabweichung PF (Form), die ein Indikator für das Messrauschen des Systems ist, für die sieben untersuchten Messsysteme dar. Die Größe des Referenzkörpers entspricht den Messvolumina der meisten untersuchten 3D-Handscanner. Dagegen wird das Abweichungsverhalten der Messsysteme F5-B und F6 SMART in nur einem kleinen Teil des Messvolumens beschrieben. Die Kennlinien der Systeme HandySCAN 700, FreeScan X7 und Artec Spider zeigen nur sehr geringe Abweichungen (bis 1,5 mm), während die Mantis Vision Systeme ein deutlich schlechteres Abweichungsverhalten aufweisen. Die Abweichungen vom Mantis F5-B sind mit 10,5 mm im Durchschnitt unerklärlicherweise recht hoch (siehe auch Tab. 2). Die Software Kapla Vision bietet für die Auswertung der Daten von den Mantis Systemen die Möglichkeit, das Messrauschen mit einem Schieberegler zu reduzieren. Ggf. lässt eine Optimierung der Parameter noch ein Ergebnis mit geringerer Abweichung zu.

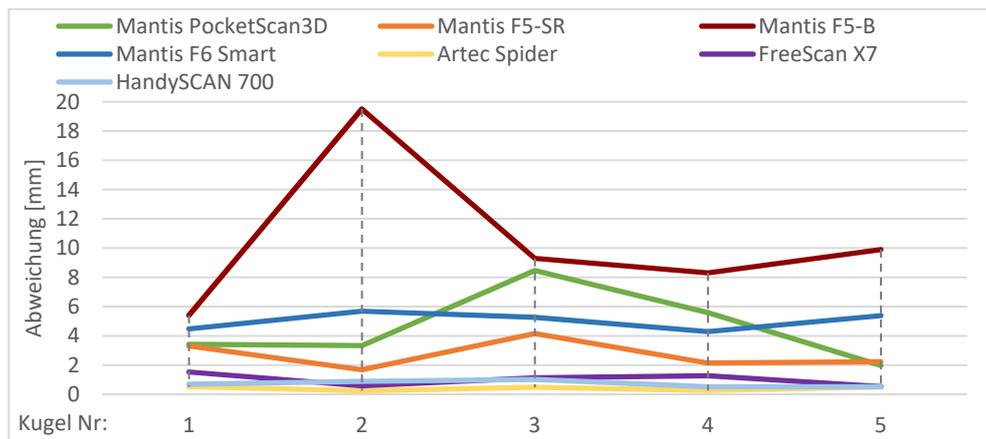


Abb. 4: Kenngröße Antastabweichung PF (Form) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

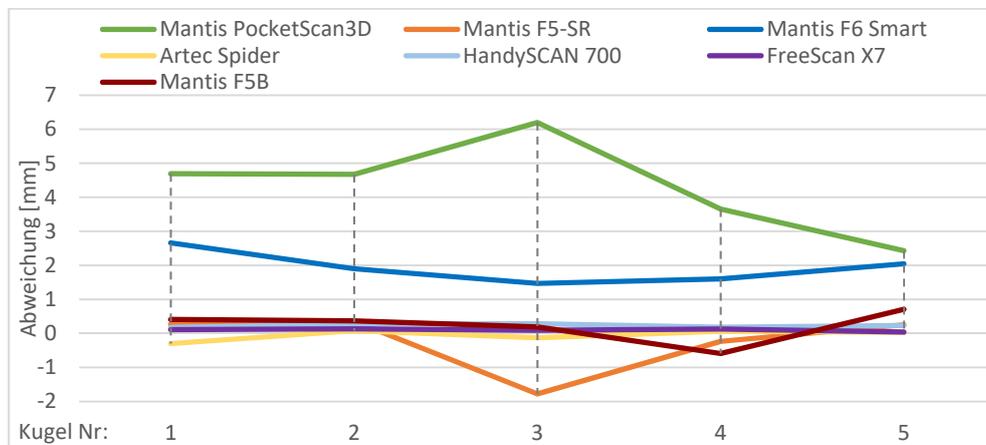


Abb. 5: Kenngröße Antastabweichung PS (Maß) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

Dagegen fällt die Antastabweichung PS (Maß) für den Mantis F5-B sowie für HandySCAN 700, FreeScan X7 und Artec Spider mit geringfügigen Abweichungen bis zu 0,6 mm sehr gut aus (Abb. 5). Die beiden Mantis Vision Systeme PocketScan 3D und F6 SMART weisen hier erwartungsgemäß etwas höhere Abweichungen mit 4,33 mm und 1,94 mm im Durchschnitt auf (Tab. 2).

Die Kenngröße 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 den FreeScan X7 sowie für den Mantis F5-B und F6 SMART liegen hier im Durchschnitt bei weniger als 0,25 mm (Tab. 2). Erstaunlicherweise zeigen hier die beiden Mantis Vision Systeme (F5-B und F6) ein sehr geringes Abweichungsverhalten, während der Artec Spider zwischen -2,4 mm und 1,7 mm stark variiert. Erwartungsgemäß sind die Abweichungen des PocketScan von allen Messsystemen die höchsten (im Durchschnitt 2,9 mm), was auf einen Maßstabsfehler schließen lässt.

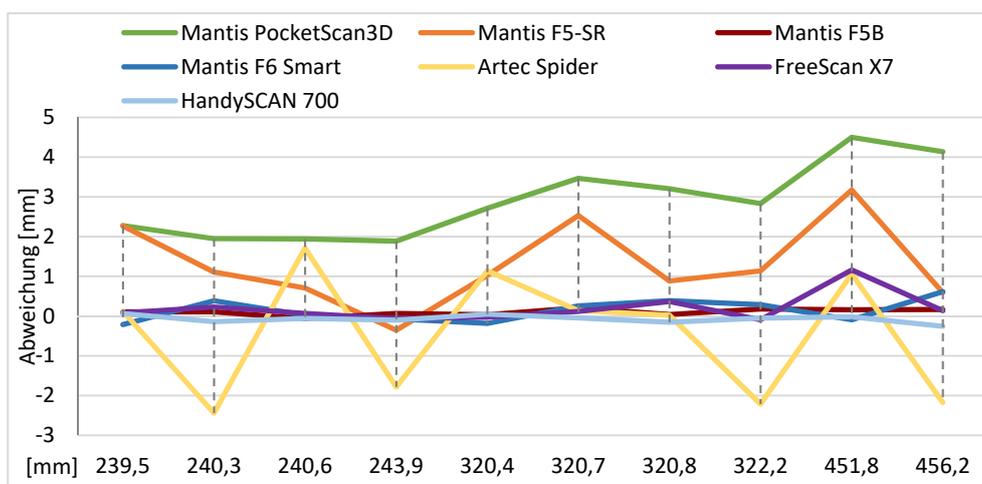


Abb. 6: Kenngröße Kugelabstandsabweichung (SD) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 3

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

System/Kenngrößen	Antast PS (Maß) [mm]	Antast PF (Form) [mm]	Kugelabstand SD [mm]
Mantis PocketScan	4,33	4,56	2,89
Mantis F5-SR	0,58	2,71	1,38
Mantis F5-B	0,45	10,48	0,11
Mantis F6 smart	1,94	5,02	0,25
Artec Spider	0,12	0,41	1,28
FreeScan X7	0,10	1,01	0,23
HandySCAN 700	0,23	0,72	0,10
HandySCAN 700 (2016)	0,20	1,08	0,07

In Tab. 2 sind Mittelwerte der drei Kenngrößen Antastabweichung PF (Form), Antastabweichung PS (Maß) und Kugelabstandsabweichung (SD) für die sieben untersuchten 3D-Handscanner zusammengefasst.

## 5.2 Referenzkörper Granitplatte

Die im Rahmen der Prüfung ermittelte Kenngröße „Ebenheitsmessabweichung“ zeigt die hohe Qualität der beiden photogrammetrischen Stereosysteme HandySCAN 700 und FreeScan X7 (Abb. 7). Wenngleich der Nutzer von einer deutlich geringeren Punktzahl (im Vergleich zum Referenzsystem smartSCAN) ausgehen muss, spiegelt das vorliegende Ergebnis der beiden Handscanner das vorhandene Potential eindeutig wider. Die Oberflächenbeschaffenheit des Referenzkörpers kommt dabei dem Messverfahren dieser Systeme entgegen, so dass die guten Ergebnisse auch durch die Textur des Körpers beeinflusst sind. Dagegen wird hier das höhere Messrauschen der Mantis Vision Systeme deutlich, welches sich bereits bei der Antastabweichung PF (Form) zeigte (Abb. 5). Der Artec Spider hat bei dieser Kenngröße die signifikant größte Abweichung aller untersuchten Systeme. Das ist eher durch die Oberflächenbeschaffenheit der Granitplatte als durch generelles Messrauschen des Messsystems zu begründen, da die Antastabweichung für den Artec Spider sehr niedrig ausfällt (siehe Abb. 4 und 5).

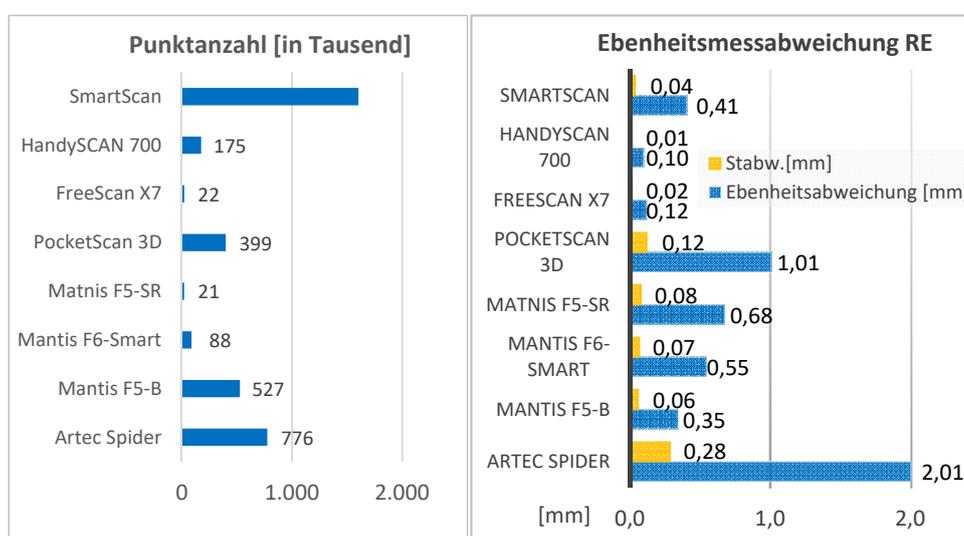


Abb. 7: Kenngröße Ebenheitsmessabweichung (RE) entsprechend VDI/VDE 2634, Blatt 2

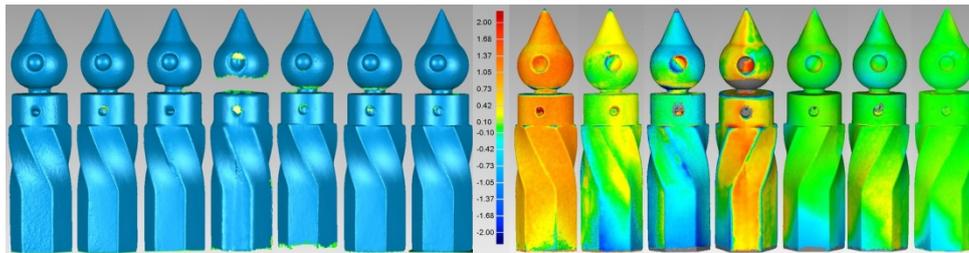
## 5.3 Testkörper Testy, Einsteinbüste und Radnabe

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche mit den drei Testkörpern sind in Tabelle 3 zusammengestellt sowie in Abb. 8 und 9 farblich illustriert. Die jeweilige erreichte durchschnittliche Abweichung zwischen 10 und 110  $\mu\text{m}$  zeigt, dass der HandySCAN 700 im Vergleich zum Referenzsystem hohe Genauigkeiten erzielt, die für den Testkörper Einsteinbüste sogar der der Streifenprojektionssysteme entspricht. Die Ergebnisse mit diesem 3D-Handscanner entsprechen den Resultaten der vorherigen Untersuchungen (KERSTEN et al. 2017), so dass damit eine hohe Wiederholgenauigkeit bestätigt wird. Die Spanne, die sich aus der Diffe-

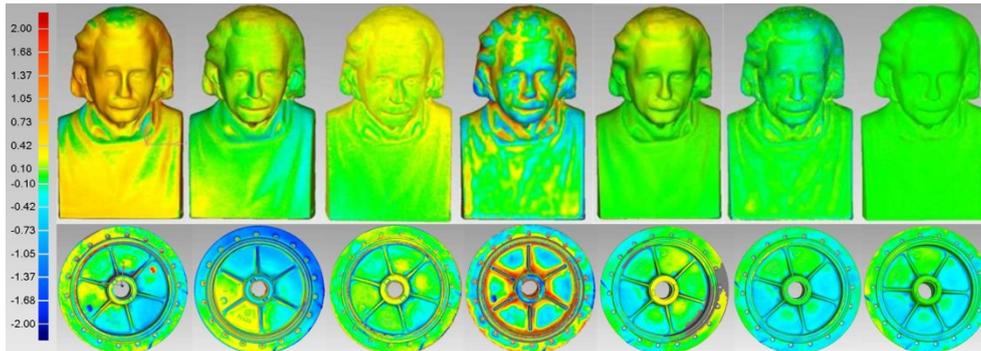
renz der durchschnittlichen negativen und positiven Abweichungen errechnet, liegt für die sieben untersuchten 3D-Handscanner zwischen 0,07 mm und 1,4 mm. Systematische Abweichungen sind für die Mantis Vision Systeme an den drei Testkörpern in Gelb/Orange (PocketScan und F6 SMART) und Blau/Hellblau (F5-B und F5-SR) sichtbar (Abb. 8 und 9). Die Abweichungen beim PocketScan zeigen für die Testkörper Testy und Einstein systematisch zu lange Strecken an, was auf einen nicht exakt bestimmten Maßstab des Messsystems schließen lässt. Bei der Einsteinbüste treten für die 3D-Handscanner Artec Spider, HandySCAN 700 und FreeScan X7 sowie Mantis F5-B und F5-SR nur geringe Abweichungen (Spanne) von bis zu 0,26 mm auf (Tab. 3 und Abb. 9). Die systematischen Abweichungen werden für die Radnabe bei allen untersuchten Systemen in Hellblau angezeigt, die der komplexen Geometrie der Radnabe und der Registrierung von Vorder- und Rückseite geschuldet sind (Abb. 9). Allerdings kann nicht einwandfrei festgestellt werden, ob das aufgetragene Kreidespray einen systematischen Einfluss beim 3D-Vergleich hat. Trotz der komplexen Geometrie konnten alle Handscanner bis auf den Artec Spider die Radnabe komplett erfassen, was in vorherigen Untersuchungen nur mit wenigen Systemen gelang (KERSTEN et al. 2016a). Die Abweichungen liegen aber deutlich über der Messgenauigkeit der untersuchten Messsysteme.

**Tabelle 3:** Durchschnittliche Abweichungen an den drei Testkörpern – 3D-Vergleich mit Geomagic Studio 2012 zwischen dem Referenzsystem ATOS/smartSCAN und den untersuchten 3D-Handscannern.

3D-Scanner	Objekt	# Dreiecke	Ø Abweichung [mm]	Standardabweichung [mm]	Spanne [mm]
PocketScan 3D	Testy	342.029	0,93	0,43	1,13
Mantis F5-SR	Testy	1.566.896	0,04	0,23	0,32
Mantis F5-B	Testy	237.253	-0,35	0,39	0,61
Mantis F6 SMART	Testy	645.309	0,20	0,41	0,63
Artec Spider	Testy	7.775.378	0,03	0,21	0,25
FreeScan X7	Testy	240.748	-0,05	0,24	0,22
HandySCAN 700	Testy	912.025	0,01	0,15	0,16
PocketScan 3D	Einstein	269.890	0,63	0,35	0,90
Mantis F5-SR	Einstein	4.521.688	0,11	0,14	0,25
Mantis F5-B	Einstein	1.511.710	0,19	0,12	0,26
Mantis F6 SMART	Einstein	413.298	0,12	0,55	0,81
Artec Spider	Einstein	2.414.402	0,11	0,10	0,20
FreeScan X7	Einstein	239.897	-0,02	0,11	0,14
HandySCAN 700	Einstein	3.574.231	0,02	0,05	0,07
PocketScan 3D	Radnabe	1.236.568	-0,05	0,50	0,73
Mantis F5-SR	Radnabe	2.470.044	-0,17	0,47	0,76
Mantis F5-B	Radnabe	2.862.140	-0,08	0,36	0,44
Mantis F6 SMART	Radnabe	422.416	0,14	0,86	1,40
Artec Spider	Radnabe	761.736	-0,08	0,25	0,37
FreeScan X7	Radnabe	1.085.103	-0,13	0,24	0,33
HandySCAN 700	Radnabe	7.540.253	0,11	0,22	0,28



**Abb. 8:** 3D-Modelle vom Testy (links) und die 3D-Abweichungsanalyse mit Geomagic 2012 (rechts) in der Reihenfolge (v.l.n.r.) PocketScan, Mantis F5-SR, Mantis F5-B, Mantis F6 SMART, Artec Spider, FreeScan X7 und HandySCAN 700 (Einheit der Farbskala in mm, grün =  $\pm 0,1$  mm)



**Abb. 9:** 3D-Abweichungsanalyse von der Einstein-Büste (oben) und von der Radnabe (unten) mit Geomagic 2012 in der Reihenfolge (v.l.n.r.) PocketScan, Mantis F5-SR, Mantis F5-B, Mantis F6 SMART, Artec Spider, FreeScan X7 und HandySCAN 700 (Einheit der Farbskala in mm, grün =  $\pm 0,1$  mm)

## 6 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse geometrischer Genauigkeitsuntersuchungen von den sieben handgeführten 3D-Scannern Mantis Vision PocketScan, Mantis Vision F5-SR, Mantis Vision F5-B, Mantis Vision F6 SMART, Artec Spider, Shining 3D FreeScan X7 und Creaform HandySCAN 700 vorgestellt. Die Untersuchungsergebnisse gelten nur für dieses Modell des untersuchten Systems, d.h. sie stellen keine allgemeingültige Aussage über die jeweilige Produktreihe der 3D-Handscanner dar. Es konnte gezeigt werden, dass die evaluierten Systeme unterschiedliche Genauigkeiten im 3D-Vergleich von Testkörpern zu den Referenzsystemen und bei der Bestimmung von Kenngrößen in Anlehnung an die VDI/VDE 2634 mit stabilen Referenzkörpern erreicht haben. Die beiden photogrammetrischen Stereosysteme Shining 3D FreeScan X7 und Creaform HandySCAN 700 erzielten die besten Ergebnisse, die bei einigen Tests nicht weit vom verwendeten Referenzsystem entfernt waren. Die hohen Genauigkeiten dieser Systeme werden im Wesentlichen durch die signalisierten Zielmarken im Objektraum und die kurz vor der Objektaufnahme durchgeführte Systemkalibrierung erreicht. Der Artec Spider erreichte Ergebnisse beim 3D-

Vergleich der Testkörper, die signifikant besser waren als bei den ersten Untersuchungen (KERSTEN et al. 2016a), was sicherlich auf die Verwendung der korrekten Kalibrierungsdatei bei diesen Untersuchungen zurückzuführen ist. Allerdings ist mit diesem System die komplette Erfassung des komplexen Objektes Radnabe wieder nicht gelungen. Die durch die Hersteller angegebenen Genauigkeiten konnten nicht für alle untersuchten Systeme in allen Testszenarien eingehalten werden. Die Systemevaluation in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634 ist für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der 3D-Handscanner und für einen Vergleich mit früheren Untersuchungen anderer handgeführter 3D-Scanner geeignet. Allerdings müssen in Zukunft die Referenz- und Testkörper für die Systeme mit größerer Reichweite wie z.B. dem Mantis F6 SMART in der Größe angepasst werden, um aussagekräftige Resultate für das jeweilige Messvolumen präsentieren zu können.

Die in Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 2 und 3, ermittelten Kenngrößen (Antast- und Kugelabstandsabweichungen) weisen nach, dass beim PocketScan 3D 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 für die Mantis Vision Systeme sinnvoll und empfehlenswert.

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 Verlust der automatischen Echtzeit-Registrierung kommt. Jedoch helfen den Mantis Vision Systemen und dem Artec Spider zusätzlich zum Messobjekt platzierte geometrische Elemente im aufzunehmenden Objektraum (als Unterstützung des Matchings) bei der Registrierung der Scans. Die Aufnahme-geschwindigkeit ist mit wenigen Minuten je Objekt bei allen Systemen recht hoch.

In Zukunft sind weitere geometrische Genauigkeitsuntersuchungen von handgeführten 3D-Scannern hinsichtlich Wiederholbarkeit bisher getesteter Messsysteme und Evaluation weiterer und neuer Scanner wie z.B. Faro Freestyle 3D und Objects oder Artec Leo geplant.

## Dank

Die Autoren bedanken sich bei folgenden Institutionen für die Bereitstellung von handgeführten 3D-Scannern: Creaform HandyScan 700 (Ingenieurbüro Hanack und Partner, Hamburg), Shinnig 3D FreeScan X7 (3D-Picture.net, Buchholz in der Nordheide), Mantis Vision F6 smart (Mantis Vision, Israel), Artec Spider (Landeskriminalamt Hamburg) und Mantis Vision F5-SR (MexConsult, Brestedt). Darüber hinaus danken die Autoren folgenden Personen für die Bereitstellung der Test- und Referenzkörper: Testy von MARTIN MISGAISKI-HASS (Humboldt-Universität zu Berlin) sowie Granitplatte und Kugelkörper von Prof. HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA (Hochschule Bochum).

## Literatur

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 Speci-*

- mens of the Ditsong National Museum of Natural History, Pretoria, South Africa. PLoS one*, 10(10), e0139800.
- AMETEK (2016): *Creaform announces major design and performance upgrade for its new MetraSCAN 3D laser scanner*. <https://www.creaform3d.com/en/news/creaform-announces-major-design-and-performance-upgrade-its-new-metrascan-3d-laser-scanner>, (08.02.18)
- Allegra, D., Gallo, G., Inzerillo, L., Lombardo, M., Milotta, F. L. M., Santagati, C. & Stanco, F. (2017): *Hand Held 3D Scanning for Cultural Heritage: Experimenting Low Cost Structure Sensor Scan*. In: Ippolito, A. (ed.), *Handbook of Research on Emerging Technologies for Architectural and Archaeological Heritage*, IGI Global, S. 475-499.
- 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.
- Boehm, J. (2014): *Accuracy Investigation for Structured-light Based Consumer 3D Sensors*. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2014(2), S. 117-127.
- Dessery, Y. & Pallari, J. (2018): *Measurements agreement between low-cost and high-level handheld 3D scanners to scan the knee for designing a 3D printed knee brace*. *PLOS ONE* 13(1): e0190585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190585>.
- 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), S. 25-31.
- 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, S. 271-283.
- Kersten, Th., Przybilla, H.-J. & Lindstaedt, M. (2017): *Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen des handgeführten 3D-Scanners Creaform HandySCAN 700*. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Th. Luhmann/Ch. Schumacher (Hrsg.)*, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 322-332.
- Keller, F., Säger, 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.
- Lachat, E., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2017): *Performance Investigation of a Handheld 3D Scanner to Define Good Practices for Small Artefact 3D Modeling*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2/W5), S. 427-434.

- Larsson, H. & Letalick, D. (2013): *Military forensic use of handheld 3D camera*. Proc. of SPIE 8731, Laser Radar Technology and Applications XVIII, 873111.
- Maxwell, P. (2017): *3D Handheld Scanning of Historic Buildings*. GIM International, 31(5), S. 39-41.
- 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.
- Przybilla, H.-J., Kersten, T., Lindstaedt, M. & Starosta, D. (2018): *Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der handgeführten 3D-Scanner Creaform HandySCAN 700 und Mantis Vision F5-B*. AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1-2/2018, S. 3-12.
- Reulke, R. & Misgaiski, M. (2012): *Test body "Testy" for Laser Scanning and Optical Systems*. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, (6): zum Titelbild.
- Salleh, M. N. B., Fozi, M. A. A., & Lamsali, H. B. (2017): *The Using of 3D Handheld Scanner to Develop a Pressure Garment Model*. Advanced Science Letters, 23(5), S. 4383-4387.
- Senthilvel, M., Soman, R. K., & Varghese, K. (2017): *Comparison of Handheld devices for 3D Reconstruction in Construction*. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 34, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
- 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.
- Wieczorek, T. & Gorawska, A. (2017): *Portable 3D scanners for crime scene investigation*. Studia Informatica, 38(3), S. 135-144.
- Wrona, M. (2014): *Using Optical NIR Handheld Scanner for Close Range 3D Mapping*. 9th International Conference on Environmental Engineering, Procedia Engineering, Vilnius.
- 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), S. 491-494.

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

Starosta, Deborah  
Hanack und Partner Vermessung, Hamburg  
Email-Adresse: d.starosta@hanackundpartner.de