

Aufbau eines photogrammetrischen Messsystems mit Raspberry-Pi-Kameras als Low-Cost-Sensoren für die Aufnahme von kleinen Objekten

Florian Timm¹, Thomas P. Kersten¹, & Kay Zobel¹

Zusammenfassung

In Museen besteht häufig der Wunsch, den Bestand an Exponaten zu digitalisieren, um sie z. B. in virtuellen Ausstellungen online zu präsentieren oder um den Bestand digital zu archivieren. Für die dreidimensionale Erfassung bietet sich neben dem Laserscanning vor allem die Photogrammetrie an. Um große Sammlungen effizient digitalisieren zu können, sollte dieser Prozess automatisiert werden. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde an der HafenCity Universität Hamburg ein kostengünstiges Messsystem mit 24 Raspberry-Pi-Kameras entwickelt, das kleine Objekte automatisch simultan aufnimmt und daraus mit Hilfe des Structure-from-Motion-Verfahrens in entsprechender Auswertesoftware 3D-Modelle erstellt. Zur Überprüfung der Genauigkeit und Vollständigkeit wurden die erfassten und generierten Daten mit Referenzdaten verglichen. Dabei konnten Genauigkeiten von 0,1–0,5 mm erreicht werden.

Schlagwörter 3D · Mehrkammersystem · Photogrammetrie · Raspberry Pi · Structure-from-Motion

1 Einleitung

Die Digitalisierung von Kulturgütern in Museen eröffnet diesen neue, vielfältige Möglichkeiten. So kann beispielsweise eine digitale Präsentation des Bestands erstellt werden, die einen weltweiten Zugriff auf die Objekte ermöglicht. Darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit, das äußere Erscheinungsbild der Objekte virtuell zu konservieren und sie so beispielsweise vor Zerstörung durch Naturgewalten, kriegerische Auseinandersetzungen oder Vandalismus zu schützen. Die Photogrammetrie, insbesondere das Verfahren Structure-from-Motion (SfM), bietet hier die Möglichkeit, Objekte mit Kameras zu erfassen und daraus ein texturiertes, dreidimensionales Modell zu berechnen. Dies erfordert jedoch in der Regel viele manuelle Arbeitsschritte oder teure Aufnahme- und Auswertesysteme.

1.1 Problemstellung

In dem Projekt wird ein automatisiertes photogrammetrisches System entwickelt, das die dreidimensionale Erfassung kleiner Objekte mit kostengünstiger Hard- und Software ermöglicht. Das Ziel besteht darin, manuelle Arbeitsschritte zu minimieren und eine benutzerfreundliche Lösung zu schaffen, die nach einer ersten Systemkalibrierung auch von fachfremdem Personal bedient werden kann. Das System ist so konzipiert, dass es einerseits leicht nachgebaut und

andererseits mit frei verfügbarer Open-Source-Software eingesetzt werden kann.

1.2 Fachlicher Kontext

In der Literatur werden verschiedene Ansätze für Kamerasysteme beschrieben, die sich vor allem in der Wahl der Kameratechnologie und der Größe der Zielobjekte unterscheiden. Ein frühes Beispiel ist das Leica-POM-System (Luhmann, 1990), welches mit einer Mehrkameraanordnung und einem Drehteller Kanten von Objekten zur Qualitätskontrolle vermessen konnte.

Garsthagen (2021) hat mit Pi3dScan ein ähnliches System wie das hier entwickelte vorgestellt. Auch hier werden Raspberry-Pi-Kameramodule verwendet, allerdings in deutlich größerer Anzahl – es werden 100 empfohlen. Außerdem ist das System für deutlich größere Objekte wie ganze Menschen ausgelegt und als kommerzielles Projekt konzipiert. Es werden nur kommerzielle SfM-Softwarepakete unterstützt.

Die verschiedenen SfM-Softwarepakete wurden von Kersten et al. (2012) auf ihre Anwendbarkeit in den Bereichen Architektur, Denkmalpflege und Archäologie untersucht. Schon damals wurden Ergebnisse erzielt, die mit Laserscannern vergleichbar waren. Open-Source-Lösungen waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht so weit entwickelt, eine positive Entwicklung war jedoch bereits absehbar.

¹ HafenCity Universität Hamburg, Henning-Voscherau-Platz 1, D-20457 Hamburg
E-Mail: [florian.timm, thomas.kersten, kay.zobel]@hcu-hamburg.de

2 Aufbau des Messsystems

Das entwickelte Messsystem besteht aus mehreren modularen Komponenten, die eine simultane Bildaufnahme bei einheitlicher Belichtung und präziser Fokussierung gewährleisten. Kern des Systems ist ein Array aus 24 Raspberry-Pi-Kameramodulen, die auf einem stabilen Aluminiumrahmen montiert sind (siehe Abb. 1). Die Kameras werden von einem zentralen Raspberry Pi 4 gesteuert, der die Kameras auslöst, die Daten an eine zentrale Stelle überträgt, Näherungswerte für die innere und äußere Orientierung ermittelt, vorab ausgleicht und an eine externe Structure-from-Motion-Software - wahlweise die kommerzielle Software Agisoft Metashape oder die Open-Source-Software OpenDroneMap - überträgt. Die Auswahl dieser Komponenten, ihr Zusammenspiel und ihre Kalibrierung werden im Folgenden beschrieben.

2.1 Kameras

Die Auswahl der Kameratechnik hat wesentlichen Einfluss auf den Kostenrahmen eines Mehrkammersystems. Dem entsprechend sollten hier kostengünstige, aber dennoch qualitativ ausreichende Kameras zum Einsatz kommen. Neben dem Mikrocontrollerboard ESP-CAM bieten sich hier vor allem die Raspberry-Pi-Kameramodule an, die bereits in anderen Projekten an der HafenCity Universität Hamburg eingesetzt und getestet wurden (Kersten et al., 2016). Die älteren Kameramodule v1 und v2 bieten sich aufgrund ihrer manuellen Fokussierung und der damit vermuteten höheren Stabilität der inneren Orientierung an. Allerdings hat das Modul v1 eine Naheinstellgrenze von 1 m, sodass das System deutlich

größer dimensioniert werden muss als die aufzunehmenden Objekte. Das Kameramodul v2 hat eine Naheinstellgrenze von 10 cm, jedoch müsste hier bei jedem Objektwechsel manuell nachfokussiert werden, da die Schärfentiefe insbesondere im Makrobereich aufgrund der sehr großen Blendenöffnung gering ist. Aus diesem Grund wurde trotz der vermutlich instabileren inneren Orientierung das Kameramodul 3 (siehe Abb. 1 rechts) gewählt. Dieses Modul hat eine geometrische Auflösung von 12 Megapixeln und eine Brennweite von 4,74 mm (Raspberry Pi Foundation, 2023). Die Pixelgröße beträgt 1,4 μm und liegt damit in der Größenordnung von Smartphone-Kameras. Jedes Kameramodul wird von einem Raspberry Pi Zero W gesteuert.

Bei den verwendeten Kameras ist die geringe Schärfentiefe problematisch. Für die Kalibrierung und Untersuchung der Kameras wurde hier auch der Ansatz des Focus-Stacking ausprobiert, bei dem Aufnahmen mit verschiedenen Fokussentfernungen zu einem Bild kombiniert werden. Dieser Ansatz wurde beispielsweise von Clini et al. (2016) erfolgreich bei Makroaufnahmen mit einer Spiegelreflexkamera angewendet. Bei der Untersuchung der Raspberry-Pi-Kamera führte dies jedoch zu keinen nennenswerten Verbesserungen des resultierenden 3D-Modells.

2.2 Rahmen

Als Rahmenmaterial wurden Konstruktionsprofile aus Aluminium verwendet (siehe Abb. 1 links). Diese sind allseitig mit einer Nut versehen. An diesen wurden die Kameras mit Winkeln befestigt, sodass die Kameras in den Nuten in Höhe und Neigung frei verstellbar sind. Zusätzlich wurden Passpunkthalterungen am Rahmen montiert. Der Rahmen ist in



Abbildung 1 links: Komponenten des Messsystems (3D-Visualisierung); rechts: Raspberry Pi Zero W mit Kameramodul 3 und Haltewinkel (noch ohne Bohrung)

drei Teile von jeweils $80\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ zerlegbar, was einen kompakten Transport ermöglicht. Die Lage der signalisierten Passpunkte bleibt dabei weitgehend unverändert, sodass eine Neukalibrierung nicht zwingend erforderlich ist.

2.3 Beleuchtung

Zur gleichmäßigen Ausleuchtung wurden an den Innenseiten der vertikalen Aluminiumprofile RGB-LED-Streifen montiert. Diese sind über den Raspberry Pi 4 steuerbar und können in Dreierblöcken ein- und ausgeschaltet sowie farblich verändert werden. Die Farben dienen vor allem als Statusanzeige für den Benutzer. Zur Unterdrückung von Fremdlicht und Reflexionen wurde das System mit einem Stoffdiffusor ausgestattet (siehe Abb. 2). Dieser besitzt an zwei Seiten Bereiche, die sich per Reißverschluss öffnen lassen und zum Einlegen von Objekten dienen.

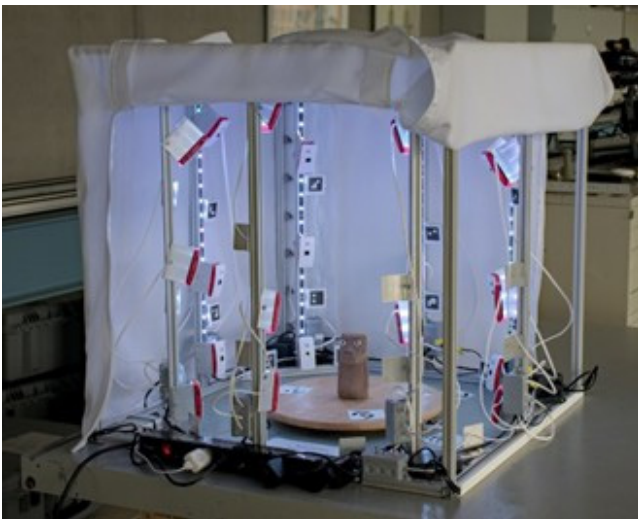


Abbildung 2 Kamerasystem mit hochgeklapptem Stoffdiffusor

2.4 Weitere Komponenten

Neben der bereits erwähnten Hardware wurde noch ein Raspberry Pi 4 integriert, der die Gesamtsteuerung des Systems übernimmt. Ursprünglich war geplant, dass dieser auch das WLAN-Netzwerk zur Datenübertragung bereitstellt. Es zeigte sich jedoch in ersten Versuchen, dass die maximale Anzahl der WLAN-Clients des Raspberry Pi 4 auf fünf Geräte beschränkt ist und des Weiteren die Übertragungsgeschwindigkeit nicht ausreicht. Daher wurde ein Mini-WLAN-Router (TP-Link TL-WR902AC) zusätzlich montiert, der dann die Netzwerkverbindung bereitstellt. Außerdem wurde eine Energieverteilung installiert, welche die 24 Raspberry Pi Zero W mit 5 Volt und die LED-Streifen mit 12 Volt Spannung versorgt. Für den Raspberry Pi 4 und den

Mini-WLAN-Router wurden die jeweiligen Netzteile genutzt.

2.5 Software

Aus softwaretechnischer Sicht setzt sich das System aus vier Teilen zusammen: die Kamerasteuerung, die Systemsteuerung, eine Desktop-Connectivity-Software und eine externe SfM-Software. Die Software auf den Raspberry-Pi-Computern wurde hierbei in Python, die Desktopsoftware in Java geschrieben. Beide Sprachen sind plattformunabhängig. Python hat den Vorteil, dass sich Bibliotheken wie OpenCV relativ einfach nutzen lassen. Zudem ist Python im Universitätskontext weit verbreitet, was die Weiterentwicklung des Systems durch andere Studierende erleichtert. Java hat wiederum den Vorteil, dass dessen Laufzeitumgebung sowie die API von Agisoft Metashape direkt in ein Paket integriert werden können und der genutzte Computer somit keine weiteren Installationen benötigt. Dadurch ist die Portabilität der Software größer.

Der Raspberry Pi 4 übernimmt die gesamte Systemsteuerung und erhält vom Benutzer den Befehl, die Bildaufnahme zu starten. Dies kann über das von ihm bereitgestellte Webinterface, über angeschlossene Hardwaretaster oder über die Desktopsoftware erfolgen. Anschließend führen alle Kameras eine automatische Fokussierung und Belichtungsmessung durch, die Belichtungsdaten der Kameras werden gemittelt und die Bilder mit diesen gemittelten Einstellungen aufgenommen. Während die Bilddaten übertragen werden, werden auf den 24 Raspberry Pi Zero W die Bildkoordinaten der eingebauten ArUco-Marker (Passpunkte) bestimmt. Auf dem Raspberry Pi 4 werden diese Zielzeichen verwendet, um die Kamerapositionen und eine Vorausgleichung zu berechnen. Die berechneten Werte werden zusammen mit den Bilddaten als Näherung über die Desktop-Software an die SfM-Software übergeben. Diese führt dann eine Kamerakalibrierung und finale Bildorientierung in einer Bündelblockausgleichung durch und berechnet eine dichte Punktwolke und das vermaschte 3D-Modell.

2.6 Systemkalibrierung

Die Kalibrierung des Aufnahmesystems erfolgte mithilfe kalibrierter Maßstäbe sowie ArUco- und ringkodierter Messmarken. Die ArUco-Marker wurden photogrammetrisch mithilfe einer externen Spiegelreflexkamera und der Maßstäbe in einem lokalen metrischen Koordinatensystem bestimmt. Zusätzlich wurde die jeweilige Kamerakonstante der Raspberry-Pi-Kameras in Abhängigkeit von der Fokussierentfernung berechnet. Anschließend wurden mit allen Kameras Aufnahmen mit einer für alle Kameras identischen Fokussierentfernung pro Aufnahme durchgeführt. Dies wurde mit unterschiedlichen Fokussierabständen wiederholt. Bei der Auswertung wurden alle Kameras als identisch angenommen, um eine grobe Bestimmung der äußeren und inneren Orientierung durchzuführen. Anschließend wurde dieser Datensatz unter Berücksichtigung dieser Näherungswerte erneut berechnet und eine simultane Kalibrierung der Kameras durchgeführt. Aus diesen Werten konnten schließlich lineare Zusammenhänge zwischen Fokussierung, Kamerakonstante, Bildhauptpunkt und Verzeichnung ermittelt werden.

3 Genauigkeitsuntersuchungen

Um die Genauigkeit des entwickelten Systems zu überprüfen, wurden drei Referenzobjekte sowohl mit dem Multikamerasystem als auch mit einem hochpräzisen Streifenprojektionssystem (Zeiss GOM ATOS 5) aufgenommen. Die Ergebnisse des Messsystems ATOS 5, welches eine Genauigkeit im Bereich von 10 bis 30 Mikrometern bietet (GDV Systems + Solutions GmbH, 2024), dienten als Referenz für den Vergleich der resultierenden 3D-Modelle. Bei den Referenzobjekten handelte es sich um eine Moai-Figur (Höhe 14 cm, siehe Abb. 3 links) sowie zwei Gipsfiguren in Form einer Einsteinbüste (Höhe 15 cm, siehe Abb. 3 Mitte) und

eines kerzenähnlichen Objekts, im Folgenden „Testy“ genannt (Höhe 38 cm, siehe Abb. 3 rechts).

Der Moai eignet sich aufgrund seiner farbigen Textur und rauen Struktur für eine photogrammetrische Erfassung. Im Hals- und Bauchbereich befinden sich Einschnitte und stärker geneigte Flächen, die die Erfassung erschweren könnten. Der Testy und die Einstein-Büste sind hingegen weiße Gipsmodelle, welche außer leichten Verschmutzungen keine Textur aufweisen. Dafür hat gerade der Testy einige sehr starke Einschnürungen und auch zwei Sacklöcher, welche eine vollständige Erfassung erschweren.



Abbildung 3 Verwendete Referenzkörper Moai, Einstein-Büste und „Testy“

Da die erwartete Genauigkeit des ATOS 5 etwa zehnmal besser ist als die des entwickelten Systems, wurden diese Daten als quasi-wahre Werte verwendet. Die Bildaufnahmen wurden in Agisoft Metashape 1.8.5 mit der Einstellung „hohe Qualität“ ausgewertet. Die resultierende Punktwolke wurde anschließend mit den jeweiligen 3D-Modellen des ATOS 5 in CloudCompare (Girardet-Montaut, 2026) verglichen, um den jeweiligen Abstand der Punkte zu ermitteln. Daraus wurden die mittlere Abweichung als Maß für die Maßstabgenauigkeit, die Standardabweichung als Maß für die Streuung ermittelt. Mit den 24 Kameras wurde für Objekte mit texturierter Oberfläche eine Standardabweichung im Bereich der erwarteten Genauigkeit von 0,1 bis 0,5 mm

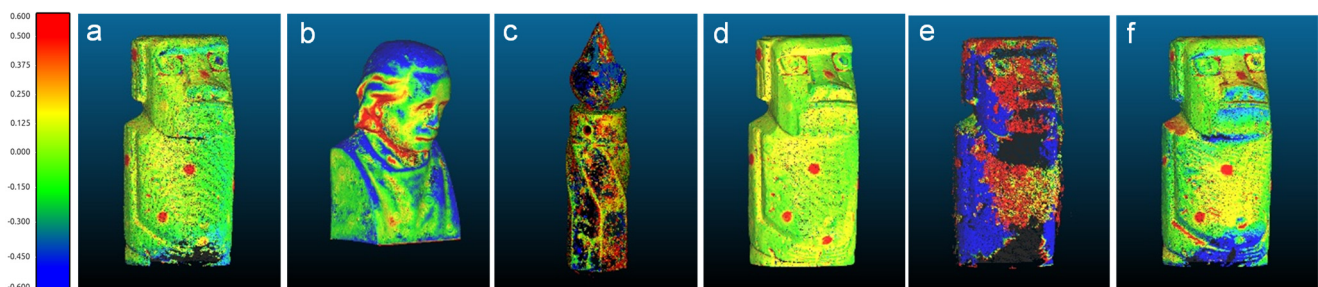


Abbildung 4 Farbkodierte Abweichungen zur Referenz für verschiedene Objekte und unterschiedliche Kameraanzahl [Skala -0,5 mm (blau) bis +0,5 mm (rot)]

erreicht, z. B. für den Moai 0,16 mm (siehe Abb. 4a). Bei den einfarbigen Objekten (Einstein-Büste und Testy) wurden hingegen schlechtere Ergebnisse erzielt, insbesondere in Bezug auf die Flächenabdeckung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Abweichungen an den mit 24 Kameras aufgenommenen Objekten im Vergleich zur Referenz

	Abb.	Durchsch. Abweich.	Standard- Abweich.	Maximale Abweich.
Moai	3a	-0,024 mm	0,16 mm	2,57 mm
Einstein	3b	0,001 mm	0,36 mm	-3,64 mm
Testy	3c	-0,047 mm	0,64 mm	11,56 mm

Weitere Tests wurden mit einem Drehteller durchgeführt, um einerseits die Anzahl der Kameras zu reduzieren und andererseits die Genauigkeit und Abdeckung mit den 24 Kameras zu verbessern.

Bei diesen weiteren Untersuchungen wurden noch zwei zusätzliche Parameter eingeführt, da die drei vorherigen aus Tabelle 1 hier nicht mit den visuellen Ergebnissen übereinstimmten. Hierzu wurde die Punktwolke auf eine Dichte von 1 mm ausgedünnt und die Anzahl der übrigen Punkte ins Verhältnis zur Anzahl der genauso ausgedünnten Vergleichsdaten des ATOS 5 (siehe Tabelle 2, Zeile 1) gesetzt. Außerdem wurde bestimmt, welcher Anteil dieser Punkte innerhalb eines Puffers von 1 mm um das Mesh aus den Vergleichsdaten liegt. Dieser Anteil wurde dann als der Anteil der nicht als grobe Fehler anzusehenden Punkte angenommen (siehe Spalte „Richtigkeit“).

Zur Erhöhung der Vollständigkeit wurden fünf Aufnahmen mit jeweils 1/32 Drehung zwischen den Aufnahmen durchgeführt (siehe Tabelle 2, Zeile 3). Dadurch wurde die Oberfläche vollständig erfasst und wies keine Lücken im Rahmen der Auswertung mehr auf – die Punktzahl der ausgedünnten Punktwolke lag in der gleichen Größenordnung wie die der Vergleichsdaten. Die Genauigkeit der Daten erhöhte sich geringfügig.

Bei der Verwendung weniger Kameras wurden einige Kameras abgeschaltet und diese Positionen der Kameras relativ zum Objekt durch die Drehungen ausgeglichen. Es zeigte sich, dass mit zwölf Kameras und einer zweiten Aufnahme nach einer Drehung um 45 Grad (siehe Abb. 4f sowie siehe Tabelle 2, Zeile 6) eine ähnliche Genauigkeit, Abdeckung und Richtigkeit wie zuvor bei der Nutzung von nur einer Aufnahme mit allen 24 Kameras erreicht wurde. Der Zeitaufwand stieg jedoch, da der Schritt, mehr als eine Aufnahme durchzuführen, bisher nicht automatisiert wurde und so manuelle Schritte zum Zusammenführen der beiden Aufnahmen notwendig waren.

Mit weniger Kameras war das Ergebnis trotz Drehung nicht mehr zufriedenstellend, insbesondere in Hinblick auf die deutlich komplexere Auswertung der Daten. Die Datenqualität war beim Einsatz von 16 Kameras ohne Drehung (siehe Abb. 4e bzw. siehe Tabelle 2, Zeile 4) nicht akzeptabel. Die weiteren Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt, wobei Zeilen mit nicht akzeptablen Ergebnissen rot hinterlegt wurden.

Tabelle 2 Ergebnisse mit unterschiedlicher Kameraanzahl und Nutzung eines Drehtellers für die Aufnahme des Moai

	Abbildung Anzahl Kameras	Anzahl Aufnahmen Anzahl Bilder	Standard- abweichung	Maximale Abweichung	Anzahl Punkte	Abdeckung	Richtigkeit
1 ATOS 5					346.830	100,0 %	100,0 %
2 Standard	4a 24	1 24	0,18 mm	2,52 mm	628.727	93,1 %	99,9 %
3 Feinschritt-Drehung	4d 24	4×1/32 96	0,14 mm	1,42 mm	758.364	100,2 %	100,0 %
4 2 von 3 Kameras	4e 16	1 16	1,20 mm	7,74 mm	596.979	68,4 %	70,4 %
5 Jede zweite Kamera	12	1 12	0,49 mm	4,01 mm	346.830	54,9 %	94,1 %
6 ...mit Drehung	4f 12	2×1/8 24	0,25 mm	1,44 mm	760.538	95,7 %	99,8 %
7 Kameras auf einer Ebene	6	4×1/8 24	1,57 mm	1,44 mm	753.062	77,8 %	68,6 %
8 ...mit zusätzlichen Markern	6	5×1/8 30	0,29 mm	2,50 mm	640.810	94,2 %	98,9 %

4 Fazit und Ausblick

Das entwickelte Messsystem zeigt, dass sich kleine Objekte mit einer Kombination aus Raspberry-Pi-Kameras und Open-Source-Software kostengünstig in 3D erfassen lassen. Mit einer erreichten Genauigkeit im Bereich von 0,1 bis 0,5 mm erfüllt das System die Anforderungen vieler Anwendungsbereiche, insbesondere der Digitalisierung des kulturellen Erbes, der Dokumentation archäologischer Objekte und der Erstellung virtueller Museumspräsentationen.

Die Materialkosten betragen etwa 1.900 Euro, sodass von einem Low-Cost-System gesprochen werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Abdeckung der Objektfläche bei der Aufnahme durch die Integration eines Drehtellers signifikant verbessert, insbesondere bei komplexen Geometrien mit starken Vertiefungen oder unregelmäßigen Oberflächen. Dadurch werden Lücken in der Punktwolke reduziert und die Vollständigkeit der erzeugten 3D-Modelle erhöht. Für eine zukünftige Optimierung erscheint die vollständige Integration des Drehtellers in die Steuerungssoftware als eine vielversprechende Option. Dies würde eine automatisierte Aufnahme und Verarbeitung der Drehpositionen ermöglichen und den Arbeitsablauf weiter vereinfachen.

Weitere Verbesserungspotentiale liegen in der Kamerapositionierung, z. B. durch den Einbau zweier Nadirkameras und die Integration einer Musterprojektion für texturarme Objekte. Das photogrammetrische Messsystem bietet somit an einigen Stellen noch Optimierungsmöglichkeiten, die z. B. zu einer besseren Erfassung größerer oder texturarmer Objekte führen können. Insgesamt zeigt sich aber, dass der Einsatz von Raspberry-Pi-Kameramodulen auf einem festen Rahmen bereits in diesem Entwicklungsstadium gute Ergebnisse bei sehr geringem Personalaufwand während der Bilddatenerfassung liefert.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei Ingo Jahn und Claudia Rajczak von der GDV Systems + Solutions GmbH in Bad Schwartau, die die Referenzobjekte mit einem Zeiss GOM ATOS 5 Streifenprojektionssystem gescannt haben.

Literaturverzeichnis

- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R. & Ruggeri, L. (2016): SfM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 229–236, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-229-2016>.
- Garsthagen, R. (2021). Raspberry Pi 3D Scanner. Zoetermeer, Niederlande, <https://www.pi3dscan.com>, letzter Zugriff: 26.01.2026.
- GDV Systems + Solutions GmbH (2024). 3D-Scanning. GDV Systems + Solutions GmbH, Bad Schwartau, <https://gdv-systems.de/dienstleistungen/messsysteme/3d-scanning.html>, letzter Zugriff: 26.01.2026.
- Girardeau-Montaut, D. (2026). CloudCompare - 3D point cloud and mesh processing software. Open Source Project. <http://www.cloudcompare.org/>, letzter Zugriff: 26.01.2026.
- Kersten, T., Lindstaedt, M., Mechelke, K., & Zobel, K. (2012). Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. In: Seyfert, E. (Hrsg.), 32. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 137–148, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Potsdam, <https://www.dgpf.de/src/pub/DGPF2012.pdf>, letzter Zugriff: 26.01.2026.
- Kersten, T., Stallmann, D., & Tschirschwitz, F. (2016). Development of a new low-cost Indoor Mapping System – System Design, System Calibration and First Results. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5: 55–62, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-55-2016>.
- Luhmann, T. (1990). An integrated System for Real-time and On-line Applications in Industrial Photogrammetry. *ISPRS Commission V Symposium*, Gruen, A. & Baltsavias, E. (Hrsg.), Zürich, 488–495, <https://doi.org/10.14463/KXP:1662442289>.
- Raspberry Pi Foundation (2023). Raspberry Pi Documentation - Camera. Raspberry Pi Foundation, <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>, letzter Zugriff: 26.01.2026.