

Structure-from-Motion-Kartierung ultrafeiner Strukturen am Beispiel der Pressbrokatapplikation in der Memminger Frauenkirche

Roland Linck
Andreas Stele

Zusammenfassung

Die drohnengestützte 3D-Vermessung wird bereits seit Jahren auch in der archäologischen Forschung, der Denkmalpflege und der Bau- und Kunstgeschichte eingesetzt. Zusätzlich findet auch die dreidimensionale Kartierung von Fundobjekten mit Hilfe von Structure-from-Motion (SfM) vermehrt Verwendung in den einzelnen Fachbereichen. Dabei stellt sich oft die Frage, bis zu welcher Größe die Unterschiede in der Oberflächentextur, rein basierend auf Fotos, noch auflösbar und darstellbar sind und ab wann andere 3D-Verfahren, wie beispielsweise Laserscanner, zum Einsatz kommen müssen. Im Rahmen des hier vorgestellten Modellprojekts an einer dreidimensionalen Applikation auf einer mittelalterlichen Wandmalerei, einem sogenannten Pressbrokat, stellte sich heraus, dass selbst Reliefunterschiede im Submillimeterbereich noch visualisiert und dokumentiert werden können.

Schlüsselbegriffe

Structure-from-Motion, SfM, 3D-Kartierung, ultrafeine Befunde, Bayern

Abstract – *Structure-from-Motion Mapping of Ultra-Faint Structures Using the Example of the Tin-Relief Application in the Frauenkirche in Memmingen*

Drone-based 3D documentation has already been applied for years in archaeological research as well as in heritage protection and building or art history. In addition, a three-dimensional mapping of objects with the aid of structure-from-motion (SfM) technology is becoming common in these fields. In using them, the question arises of down to what size small variations in the surface texture can be resolved simply from photos or if other methods for 3D documentation, e.g. laser scanners, have to be used. Within the framework of this pilot project showing results of three-dimensional applications on a medieval wall painting, a so-called tin-relief, we prove that even ultra-faint variations on a submillimetre scale can be visualized and documented.

Keywords

Structure from motion, SfM, 3D model, ultra-faint features, Bavaria

1. Einführung

Während photogrammetrische Vermessungen im Bereich der Grabungsdokumentation bereits seit einiger Zeit eingesetzt werden,¹ gibt es bisher wenige Studien zur Verwendbarkeit von Nahbereichsphotogrammetrie in Zusammenhang mit archäologischen Einzelfunden.² Im Gegensatz zu bisherigen Studien, die zumeist ausschließlich mobile Funde behandeln, welche ein methodisch breiteres Spektrum an Aufnahmetechniken zulassen, zielte das hier behandelte Projekt darauf ab, den Teil einer Wandmalerei, d. h. ein immobiles Objekt, zu vermessen, was die Methodenauswahl stark einschränkte. Vergleichbare Ansätze sind bisher nur für die Petroglyphen in Palpa (Peru),³ einem römischen Mosaik in Cantillana (Spanien)⁴ oder einer Deformationsmessung an der Bremer Hansekogge⁵ publiziert. Anhand eines Modellprojekts an einer Pressbrokatapplikation in der Memminger Frauenkirche (Bayern) wurden deshalb die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens der Nahbereichsphotogrammetrie getestet. Die zugehörigen Ergebnisse könnten dann auch auf die 3D-Dokumentation von kleinen archäologischen Fundstücken übertragen werden, die oftmals auch nur geringe Reliefunterschiede aufweisen.

1 REINHARD 2013. – BOFINGER, STEFFEN 2014. – BENAVIDES LÓPEZ et al. 2016. – BADILLO, MYERS, PETERSON 2020. – BRANDOLINI et al. 2020.

2 FRISCHER 2014. – JAGEMANN 2015. – CLINI et al. 2016. – NEAMȚU, COMES, POPESCU 2016. – BREUER et al. 2017. – KATSICHTI et al. 2019. – MAGNANI et al. 2020. – RODRÍGUEZ-MARTIN, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ 2020.

3 LINDSTAEDT et al. 2007.

4 MARÍN-BUZÓN et al. 2021.

5 SCHMIK et al. 2018.

Bisher werden zu diesem Zweck oft Streiflichtscanner eingesetzt, welche eine Auflösung von bis zu 10 µm liefern. So konnten hiermit beispielsweise Gefäße wie antike Vasen⁶ oder der berühmte Tassilo-Kelch aus dem Stift Kremsmünster (Oberösterreich),⁷ assyrische Keilschrifttafeln⁸ oder Reliefs in Angkor (Kambodscha)⁹ dreidimensional kartiert werden. Jedoch ist für dieses Verfahren ein teurer Spezialscanner notwendig, sodass Photogrammetrie eine kostengünstige Alternative darstellt.

Brokatstoffe waren im Mittelalter ein Zeichen für das Privileg hoher weltlicher und geistlicher Würdenträger.¹⁰ Aufgrund dieses Stellenwerts ist es nicht verwunderlich, dass auch in der Malerei versucht wurde, Brokatstoff insbesondere zur Darstellung bedeutender Heiligenfiguren zu adaptieren.¹¹ Der sogenannte Pressbrokat stellt dabei das Verfahren dar, welches den echten Prunkstoff unter Darstellung der plastischen Struktur am realistischsten imitieren kann.¹² Zumeist wurde die Methode bei Gemälden (wie Altarbildern o. ä.) oder Skulpturen eingesetzt.¹³ Im Bereich der Wandmalerei gibt es hingegen in Deutschland heute nur mehr wenige erhaltene Beispiele von Pressbrokatapplikationen. Neben der hier behandelten Frauenkirche in Memmingen sind dies die Kirche St. Martin in Oberwesel (Rheinland-Pfalz),¹⁴ die Chorhalle des Doms zu Aachen (Nordrhein-Westfalen)¹⁵ und die Margarethenkapelle des Konstanzer Münsters (Baden-Württemberg).¹⁶ Es handelt sich hierbei somit um die erstmalige Erhaltung dieser Malereitechnik bei Kirchenfresken in Bayern. Entdeckt und dokumentiert wurde die Pressbrokatapplikation am Kanzelpfeiler der Frauenkirche in Memmingen 2005 durch Jan Menath (Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, BLfD).¹⁷ Im Anschluss wurde der innere Aufbau des Pressbrokats von der Firma „Labor Drewello & Weißmann“ unter anderem mittels Querschleif analysiert.¹⁸ Aufgrund der Lage der Malerei am Kanzelaufgang war es mit den Standardverfahren bisher immer nur möglich, den Pressbrokat partiell zu dokumentieren und zu erfassen. Somit gab es nie

eine Gesamtaufnahme des Pressbrokats auf dem Gewand. Auch der Versuch der Kartierung mittels Streiflichtscanner scheiterte in diesem Fall, da sich die einzelnen Scans aufgrund fehlender Höhenunterschiede nicht zusammensetzen ließen. Erstmals gelang es nun im Jahr 2023 mit Hilfe einer Structure-from-Motion (SfM)-Aufnahme, den kompletten Bereich zusammenhängend und zudem in 3D zu erfassen. Neben der Dokumentation der Gesamtmalerei auf dem Kanzelpfeiler war ein wichtiger Bestandteil des Projekts auch die Analyse der Pressbrokatapplikation in Bezug auf die verwendete Werkzeugform. Die hochpräzise Aufnahme der Rillen und Erhebungen des Pressbrokats stellte dabei eine Herausforderung an das Verfahren des SfM dar, da unklar war, ob solch ultrafeine Strukturen sich überhaupt in 3D erfassen lassen. Auch an publizierten ähnlichen Projekten ist dazu wenig bekannt. Einzig eine SfM-basierte Erfassung von Rissen in einer Wandmalerei im Wiener Stephansdom¹⁹ sowie die Dokumentation eines wenige Millimeter dickeren Farbauftrags im Bereich von Heiligenscheindarstellungen in der Kirche von Asinou (Zypern)²⁰ wurden hierzu publiziert. Beide Artikel beschreiben die Erfassung von Strukturen im Millimeterbereich mittels SfM. Hinzu kommt eine Publikation von erhaltenen Vorritzungen für eine frühere Wandmalerei in der Kirche St. Leonhard in Haging (Bayern, Landkreis Ebersberg), die mit Hilfe von terrestrischem Laserscanning durchgeführt wurde.²¹

2. Zur Lage und Geschichte der Memminger Frauenkirche

Die Frauenkirche liegt im Südosten der Memminger Altstadt direkt an der Stadtmauer und wurde erst im 14. Jahrhundert Teil der befestigten Stadt.²² Zuvor war sie von einer Kirchhofmauer und einem Wassergraben umgeben.²³ Der älteste Kirchenbau im Bereich der Frauenkirche ist bereits für das 8./9. Jahrhundert überliefert, wobei der heutige Bau im Wesentlichen die gotische Frauenkirche darstellt, die 1456–1460 auf der romanischen Vorgängerbasilika errichtet wurde. Die Bedeutung der Memminger Frauenkirche im späten Mittelalter lässt sich daran erkennen, dass dort die Synoden des Kapitels Memmingen, zu denen auch das Kloster Ottobeuren gehörte, abgehalten wurden. Im Jahr 1504 besuchte sogar der deutsche Kaiser Maximilian I. bei seinem Aufenthalt in Memmingen eine Messe in der Memminger Frauenkirche. Bereits 1525 wurde jedoch die Reformation in Memmingen eingeführt und die Frauenkirche zur

6 KARL et al. 2022.

7 CRAMER, HEINZ 2019.

8 BOGACZ, MARA 2022. – HOMBURG et al. 2022.

9 SCHÄFER et al. 2011.

10 STRAUB 1984.

11 OELLERMANN 1967.

12 OELLERMANN 1967. – STRAUB 1984.

13 BRACHERT 1964. – STRAUB 1984.

14 KNÜPFER 2005.

15 HEINEN et al. 2002.

16 REINERS 1955. – KRAUS 1987. – EBERHARDT 2007.

17 MENATH 2021.

18 DREWELLO 2016.

19 VERHOEVEN, SANTNER, TRINKS 2021.

20 THEMISTOCLEOUS et al. 2018.

21 DOBLER 2013.

22 BRAUN 1914. – BREUER 1959.

23 HAFFELDER 2011.



Abb. 1. Kanzelpfeiler der Memminger Frauenkirche. – a. Foto mit Fresko der Maria mit Kind. Das Gewand der Maria zielt die Pressbrukatapplikation (Foto: R. Linck, BLFD). – b. Lage des Pfeilers innerhalb der Kirche markiert mit rotem Rechteck (Grundrissplan: verändert nach BREUER 1959). – c. Panoramaabwicklung aller Seiten des Kanzelpfeilers zur Visualisierung des gesamten Bildzyklus (Erstellung: R. Linck, BLFD).

Simultankirche erklärt, d. h. sie wurde durch beide Konfessionen genutzt. Nach einer zwischenzeitlichen Nutzung als Magazin während der Napoleonischen Kriege (1797–1805) wurde die Frauenkirche seit 1811 endgültig eine evangelische Pfarrkirche. Im 2. Weltkrieg erlitt sie eine Teilzerstörung, die bis 1954 wieder beseitigt wurde.²⁴

Die heutige gotische dreischiffige Basilika wurde ab 1450 in Langhaus und Chor mit mittelalterlichen Wandmalereien verziert. Dieser spätgotische Freskenzyklus der Strigelschule gilt als bedeutendster in Süddeutschland und stellt noch heute den kunsthistorischen Wert der Kirche dar.²⁵ Die Wandmalereien wurden nach 1639 überdeckt und erst 1890–1894 wieder aufgedeckt und bis 1901 restauriert.²⁶ Das für die hier vorgestellte Untersuchung relevante Fresko befindet sich auf der westlichen Seite des Kanzelpfeilers (Abb. 1a–b). Dort ist Maria mit Kind dargestellt, die in einer Kapelle sitzt. Sie ist von Engeln umgeben, die auf Konsolen stehen oder aus Fensteröffnungen schauen. Zudem befindet sich auf der Nordseite des Pfeilers noch die Malerei eines von Engeln gehaltenen Teppichs (Abb. 1c).²⁷ Die Pressbrokatapplikation wurde dabei zur Darstellung des Mariengewands verwendet. Ursprünglich waren wohl alle Wandfresken der Frauenkirche mit Pressbrokat belegt, der jedoch im Zuge einer unsachgemäßen Restaurierung am Ende des 19. Jahrhunderts vermutlich nicht erkannt und deshalb zerstört wurde. Die zumindest partielle Erhaltung am Kanzelpfeiler ist der Tatsache zu verdanken, dass dieser Pfeiler damals nicht restauriert wurde.

3. Historische Einordnung und Bedeutung von Pressbrokat

Der Kunststil des Pressbrokats ist im Wesentlichen auf den deutschsprachigen Raum, Flandern und Spanien in der Zeit von 1140–1530 beschränkt.²⁸ Da sich heute keine zugehörigen Herstellungstools erhalten haben, beschränkt sich die Kenntnis zur Technik auf Überlieferungen wie dem sogenannten Tegernseer Manuskript, auch *liber illuministarum* genannt, welches aus der Zeit um 1500 stammt.²⁹ Grundlage der Methode ist ein Model, das die gewünschte Verzierung, wie beispielsweise Riefen, Punkte, Blüten oder Halbmonde, zeigt.³⁰ Diese feinen Linien ahmen die im Original eingewebten Metallfäden und die Stoffstruktur des Brokats

nach.³¹ Zum Material des Modells lässt sich nur spekulieren, da sich über die Jahrhunderte keine Vorlagen erhalten haben. Sie bestanden wohl entweder aus Metall oder Hartholz.³² Einige Autor:innen halten Metallmodel für wahrscheinlicher, da die Rillen zumeist sehr exakt und gleichmäßig tief ausgeführt sind und diese Präzision nur im Metallstich erzielbar ist.³³ Viele Pressbrokatapplikationen haben jedoch einen abgerundeten, weichen Querschnitt, der bei Verwendung von Metall mit erheblichem Aufwand und nur mittels abgeflachten Werkzeugs hergestellt werden konnte. Deshalb tendieren andere Autor:innen eher zu einem Holzmodell.³⁴ Abschließend geklärt wurde diese Frage bisher jedoch nicht. Das Model wurde anschließend mit dünner Zinnfolie ausgelegt, die durch Schlagen und Reiben in die Rillen gedrückt wird.³⁵ Zur Dämpfung des Schlags wurde nasser Werg (d. h. Flachs- oder Hanffasern geringer Qualität, die bei der Verarbeitung der Pflanzenfasern als Abfall anfallen) verwendet, der zwischen Hammer und Folie gelegt und anschließend wieder entfernt wurde.³⁶ Darauf wurde eine dickflüssige Prägemasse aus Kreide, Papierfasern und Pigmenten in Leim, Harzen, Wachs oder Ölen aufgetragen.³⁷ Die Rückseite wurde mit Hilfe eines Messers glatt abgezogen, sodass eine einfach applizierbare dünne Folie entstand, die nur 1 mm Dicke oder weniger besaß.³⁸ Anschließend wurde die erkaltete feste Masse aus dem Model entnommen, auf der Oberfläche appliziert und die Oberseite vergoldet oder bemalt.³⁹ Die Zinnfolie zwischen Prägemasse und Model sorgte hierbei dafür, dass der Pressbrokat einfach entnommen werden konnte.⁴⁰ Größere, flächige Pressbrokatapplikationen wurden durch aneinandergesetzte und in Rapport hergestellte Einzelmodel generiert.⁴¹

4. Methodik von SfM, verwendete Messanordnung und Datenverarbeitung

4.1. Structure-from-Motion

Das hier für die 3D-Vermessung verwendete Verfahren Structure-from-Motion (SfM bzw. übersetzt „Struktur aus Bewegung“) beruht darauf, dass sich aufgrund der

24 HAFELDER 2011.

25 HAFELDER 2011.

26 BRAUN 1914. – BREUER 1959.

27 BREUER 1959. – HAFELDER 2011.

28 BERGER 1912. – STRAUB 1984. – PALM 2020.

29 BRACHERT 1964. – HECHT 1980. – WESTHOFF, HAHN 1996.

30 WESTHOFF, HAHN 1996.

31 PALM 2020.

32 WESTHOFF, HAHN 1996. – FÜCKER 2023.

33 OELLERMANN 1967.

34 HECHT 1980.

35 HECHT 1980. – WESTHOFF, HAHN 1996. – CHLUMSKÁ, ŠEFCŮ 2008.

36 HECHT 1980.

37 OELLERMANN 1967. – HECHT 1980. – WESTHOFF, HAHN 1996.

38 OELLERMANN 1967. – STRAUB 1984.

39 OELLERMANN 1967. – HECHT 1980. – STRAUB 1984. – WESTHOFF, HAHN 1996.

40 STRAUB 1984. – CHLUMSKÁ, ŠEFCŮ 2008.

41 FÜCKER 2023.

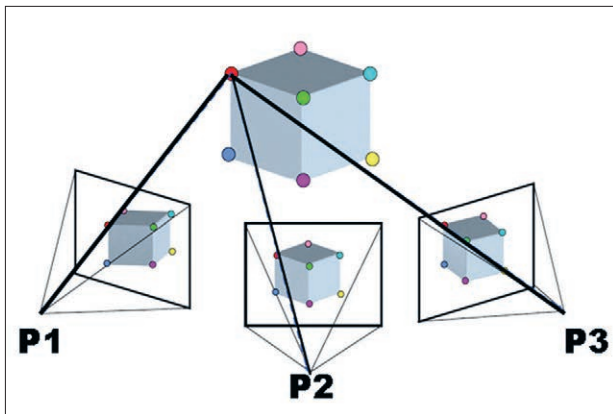


Abb. 2. Vereinfachtes Schema der Funktionsweise von Structure-from-Motion (© https://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion#/media/Fichier:Sfm1.jpg, CC BY-SA 4.0, letzter Zugriff 17.10.2024).

Bewegung der Kamera auch der Abstand zwischen zwei Bildern ändert, sodass dieser als Parameter zur Rekonstruktion des fotografierten Objekts verwendet werden kann. Es wird dabei von einer festen Geometrie ausgegangen, die aus unterschiedlichen Perspektiven und Standorten aufgenommen wird (Abb. 2).⁴² Das Prinzip funktioniert somit ähnlich wie das stereoskopische Sehen beim menschlichen Auge, bei dem sich der Abstand zu einem Objekt ebenfalls mit der Augenbewegung ändert.⁴³ Deshalb ist eine sehr hohe Überlappung zwischen den Einzelaufnahmen von mindestens 70–80 % in alle Richtungen notwendig. Wichtig für eine erfolgreiche SfM-Aufnahme ist zudem die Qualität der Aufnahmen, neben einer hohen Auflösung sowie einer hohen Tiefenschärfe ist normalerweise auch eine Vermeidung von Schlagschatten empfehlenswert. Jedoch wurde auf Letzteres im Falle der hier vorgestellten Aufnahmen am Pressbrotat verzichtet. Anstelle dessen wurde ein extremes Streiflicht mittels eines starken Scheinwerfers flach von der Seite erzeugt, um die kleinen Rillen als Schattenwurf besser zu visualisieren (Abb. 3). Eine andere Art der Beleuchtung war aufgrund der Position der Wandmalerei an der engen Wendeltreppe zur Kanzel auch nicht praktisch umsetzbar. Die Einzelbilder werden im Anschluss in einer Spezialsoftware und einer leistungsfähigen Workstation anhand von identischen Punkten zu einem Gesamtmodell verknüpft, aus dem das Objekt dreidimensional rekonstruiert werden



Abb. 3. Foto der verwendeten Messanordnung bestehend aus Stativ mit horizontal verschiebbarem Arm und Kamera sowie Scheinwerfer zur Erzeugung von Streiflicht (im Hintergrund, ausgeschaltet) (Foto: T. Gericke, BLfD).

kann.⁴⁴ Über Fixpunkte und deren Abstände zueinander lässt sich daraus eine maßstäbliche Ansicht erstellen, die auch zu Kartierungszwecken geeignet ist. Hierfür wurden vier eindeutig in den Einzelaufnahmen erkennbare Passpunkte verwendet und deren exakter Abstand mit Millimetergenauigkeit mittels Zollstock ermittelt.

4.2. Verwendete Messanordnung

Die Aufnahmen des Pressbrotats wurden mit Hilfe einer handelsüblichen Systemkamera Panasonic Lumix GX800 mit einem Live-MOS-Sensor und 16 Megapixel Auflösung sowie einem Panasonic Lumix-Festbrennweitenobjektiv von 32 mm durchgeführt, was einer Brennweite von 64 mm im 35 mm-Äquivalent entspricht. Die Festbrennweite gewährleistet, dass die gewonnenen Aufnahmen alle die gleiche Brennweite haben, da nur dann eine Verarbeitung mittels SfM erfolgen kann. Um parallele Reihen an Fotos sicherzustellen, wurde die Kamera auf einem Stativ mit horizontal bewegbarem Auslegearm montiert (Abb. 3). Die waagrecht ausgerichtete Kamera wurde dann jeweils um 3 cm zwischen den Einzelfotos weiterbewegt. Insgesamt wurden so 39 parallele Spuren erzeugt und die notwendige Überlappung von mehr als 70 % zwischen allen Bildpaaren sichergestellt. Nur die höher gelegenen Bereiche der Malerei, die jedoch keine Pressbrotatapplikation mehr besitzen, mussten über einen schrägen Aufnahmewinkel erfasst werden, da das Stativ aufgrund der Treppe des Kanzelaufgangs nicht höher montiert und aus Platzgründen auch keine Leiter aufgestellt werden konnte. Die Datengrundlage für die

⁴² TORRES et al. 2012.

⁴³ REINHARD 2013.

⁴⁴ LUHMANN 2010.

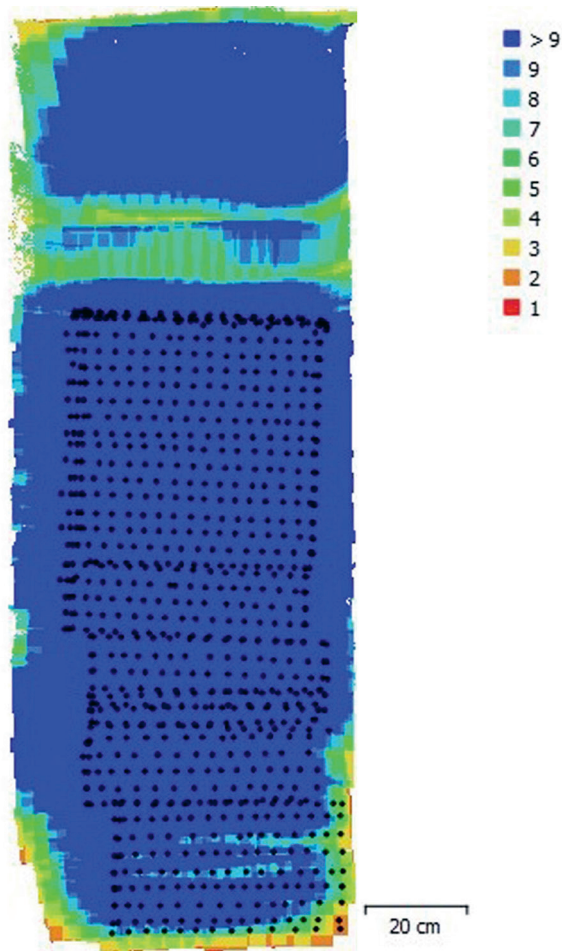


Abb. 4. Schematische Darstellung der Überlappung aller Einzelbilder der SfM-Vermessung des Pressbrokats, der im zentralen Bereich mit einer Überlappung von > 9 Einzelfotos liegt. Die reduzierte Überlappung Richtung oberen Bildrand resultiert daraus, dass die Kamera hier nur mehr nach oben geschwenkt und nicht das Stativ weiter nach oben ausgefahren werden konnte.

SfM-Verarbeitung der $2 \times 0,5$ m großen Malerei am Kanzelpeiler waren insgesamt 886 Einzelfotos. Dies resultierte in einer Überlappung von mehr als neun Fotos in fast allen Bereichen des Freskos (Abb. 4). Nur am unteren Ende sowie am Übergang zwischen horizontaler und schräger Aufnahmegeometrie reduzierte sie sich auf eine immer noch ausreichend hohe fünf- bis siebenfache Überlappung.

4.3. Datenverarbeitung

Um aus den Einzelfotos ein 3D-Modell zu erzeugen, wurde die Software Agisoft Metashape Professional (Version 2.0.0.0 build 15597) auf einer Workstation HP Pavilion 790 mit Intel Core i7-Prozessor (16 GB RAM) und einer Grafikkarte NVIDIA GeForce GTX-1080 verwendet. Zunächst wurden die nicht relevanten Bereiche in den

Einzelphotos maskiert und die durchschnittliche Qualität berechnet. Diese gibt Metashape mit 75,5 % scharfer Bereiche in den Fotos an. Die weiteren Prozessierungsschritte und -parameter waren wie folgt:

- Alignment:
 - Accuracy: highest
 - Key Point Limit: 40.000
- Dense Point Cloud:
 - Quality: high
 - Filtering mode: moderate

Als Resultat ergab sich eine Punktwolke mit 228 Millionen Punkten. Daraus wurde ein Oberflächenmodell sowie ein Orthofoto gerechnet, das in QGIS 2.18.23 und Golden Software Surfer 13 weiter analysiert wurde. Auf die Erzeugung eines Meshs wurde verzichtet, da dieses bei der Weiterverarbeitung keinen Mehrwert geboten hätte.

5. Resultate

Erstmals gelang es uns nun, eine hochauflösende und verzerrungsfreie Gesamtansicht der Malerei auf dem Kanzelpeiler der Memminger Frauenkirche zu erstellen, die das komplette Kunstwerk der Maria mit Kind zeigt und nicht nur einzelne Ausschnitte (Abb. 5). Die Auflösung liegt dabei bei 0,4 mm/Pixel, sodass selbst kleinste Details erkannt und dokumentiert werden können. Somit ist nicht nur eine Kartierung und Analyse des Pressbrokats möglich, sondern es lassen sich auch weitere Erkenntnisse zu Malstil und Erhaltungszustand gewinnen. In Bezug auf den Pressbrokat lässt sich in der maßstäblich dargestellten Gesamtansicht aus Abbildung 5 die Gesamtfläche der erhaltenen Pressbrokatapplikation erfassen. Wie Abbildung 6 zeigt, haben sich insgesamt noch 32 cm² Pressbrokat in einer Vielzahl an einzelnen, mehr oder weniger großen Partien, erhalten. Es ist dabei eine Konzentration der erhaltenen Reste im oberen und mittleren Teil der Wandmalerei identifizierbar. Aufgrund der hohen Auflösung der Daten können diese Areale hochgenau kartiert werden und es ist zudem eine Unterscheidung in Pressbrokat und stellenweise nur mehr erhaltener farbiger Grundierung möglich. Die Größe der zusammenhängenden Pressbrokatareale schwankt zwischen 0,4 mm² und 7 cm², wobei die Teilbereiche im Schnitt 26 mm² groß sind. Anhand dieser Werte ist ablesbar, dass sich heute leider nur mehr sehr kleine Areale dieser kunsthistorisch bedeutenden Maltechnik erhalten haben.

Die SfM-Erfassung des Freskos ermöglicht zusätzlich eine dreidimensionale Darstellung der Oberflächentextur mit einer Auflösung von 0,8 mm/Pixel. Dadurch lassen sich eindeutig die ultrafeinen Erhebungen und Rillen des Pressbrokats identifizieren (Abb. 7a). Wie der Profilschnitt in Abbildung 7b zeigt, besitzen sowohl die Erhebungen der



Abb. 5. Verzerrungsfreie Gesamtansicht des Marienfreskos auf dem Kanzelpfeiler der Memminger Frauenkirche. Die Ausschnitte dienen zur Visualisierung der hohen Auflösung von 0,4 mm/Pixel.

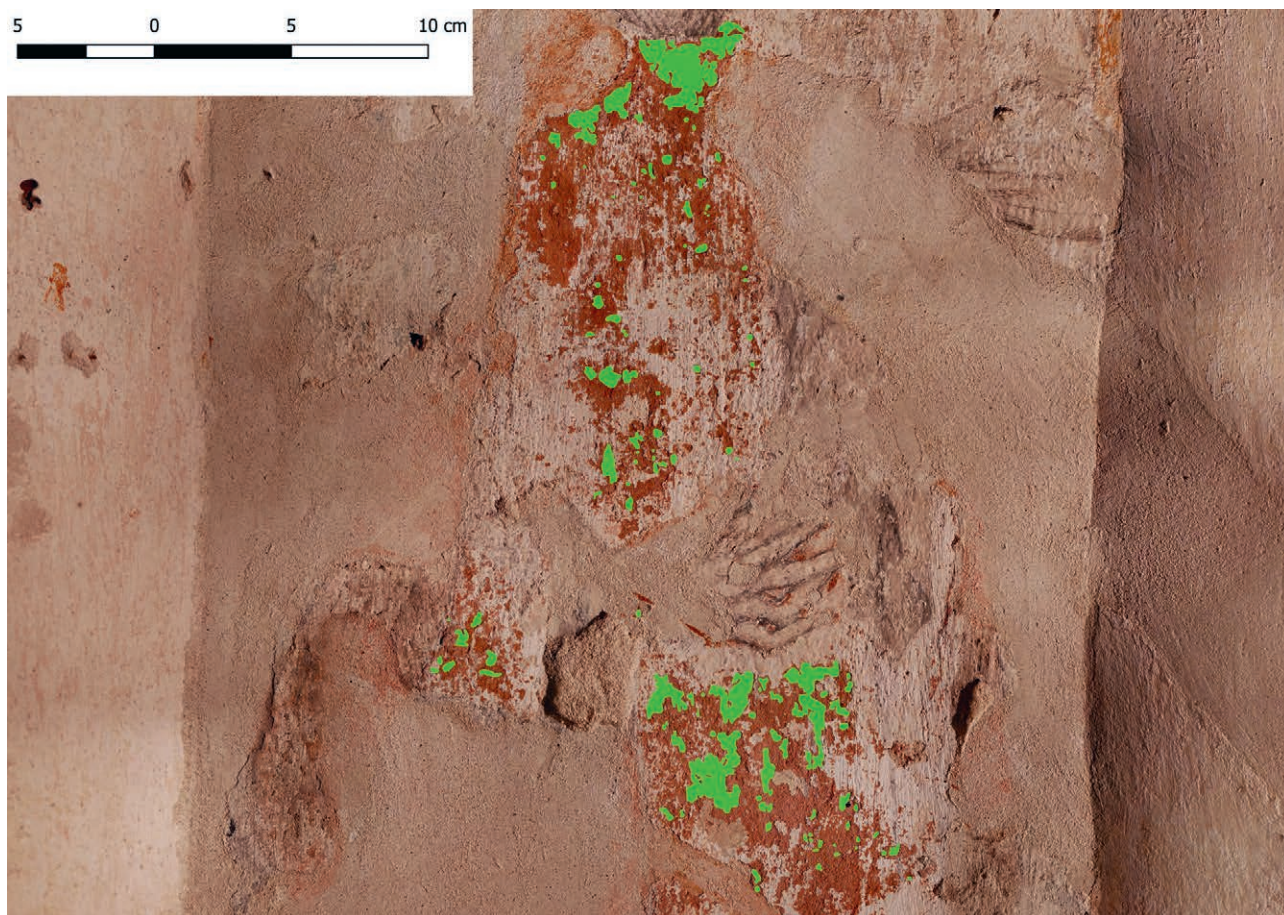


Abb. 6. Kartierung der Bereiche des Wandfreskos mit erhaltenen Pressbrokatresten in Hellgrün.

Applikation als auch die dazwischenliegenden Rillen eine Breite von 0,7 mm. Die Tiefe der Rillen beträgt nur wenige Zehntel Millimeter. Somit ist man definitiv im Bereich der Grenzen des Verfahrens angelangt, da die extrem schwach ausgeprägten Reliefunterschiede stellenweise bereits im Rauschen des Schummerungsbildes untergehen und damit teils nicht mehr eindeutig kartiert werden können. Dabei zeigt sich auch, dass der Erhaltungszustand des Pressbrokats insbesondere im unteren Teil der Wandmalerei noch relativ gut ist und die Reliefunterschiede hier besonders deutlich ausfallen. Unter Berücksichtigung der oben genannten Rillenbreite von 0,7 mm für den Pressbrokat in der Frauenkirche erhält man 14 Rillen pro Zentimeter. Laut Thomas Brachert oder Eike Oellermann wäre die Herstellung einer derartigen Applikation nur mit Hilfe eines Metallmodells möglich, da es im Mittelalter keine Möglichkeit gab, mehr als 6–10 Rillen pro Zentimeter in Holz zu ritzen.⁴⁵

⁴⁵ BRACHERT 1964. – OELLERMANN 1967.

Dem widerspricht jedoch Brigitte Hecht mit der Behauptung, dass das Handwerksgeschick der mittelalterlichen Formschnneider durchaus gut genug war, um mit entsprechenden Sticheln anstatt von Schnitzmessern auch feinere und engere Riefen mit bis zu 18 Rillen pro Zentimeter herzustellen.⁴⁶

Anhand des verzerrungsfreien Profilschnitts durch den Pressbrokat soll auch versucht werden, einen Hinweis auf die Form des zur Herstellung der Rillen verwendeten Werkzeugs zu erlangen. Wie Abbildung 7b zeigt, handelt es sich sowohl bei den Erhebungen wie auch den Rillen dazwischen um eher flache und abgerundete Strukturen. Somit ist davon auszugehen, dass das verwendete Werkzeug ebenfalls eine eher runde Form besaß. In Frage käme für derartige U-förmige Rillen im Falle eines Holzmodells ein Schnitzmesser.⁴⁷ Damit dürfte es jedoch schwierig gewesen

⁴⁶ HECHT 1980.

⁴⁷ HECHT 1980.

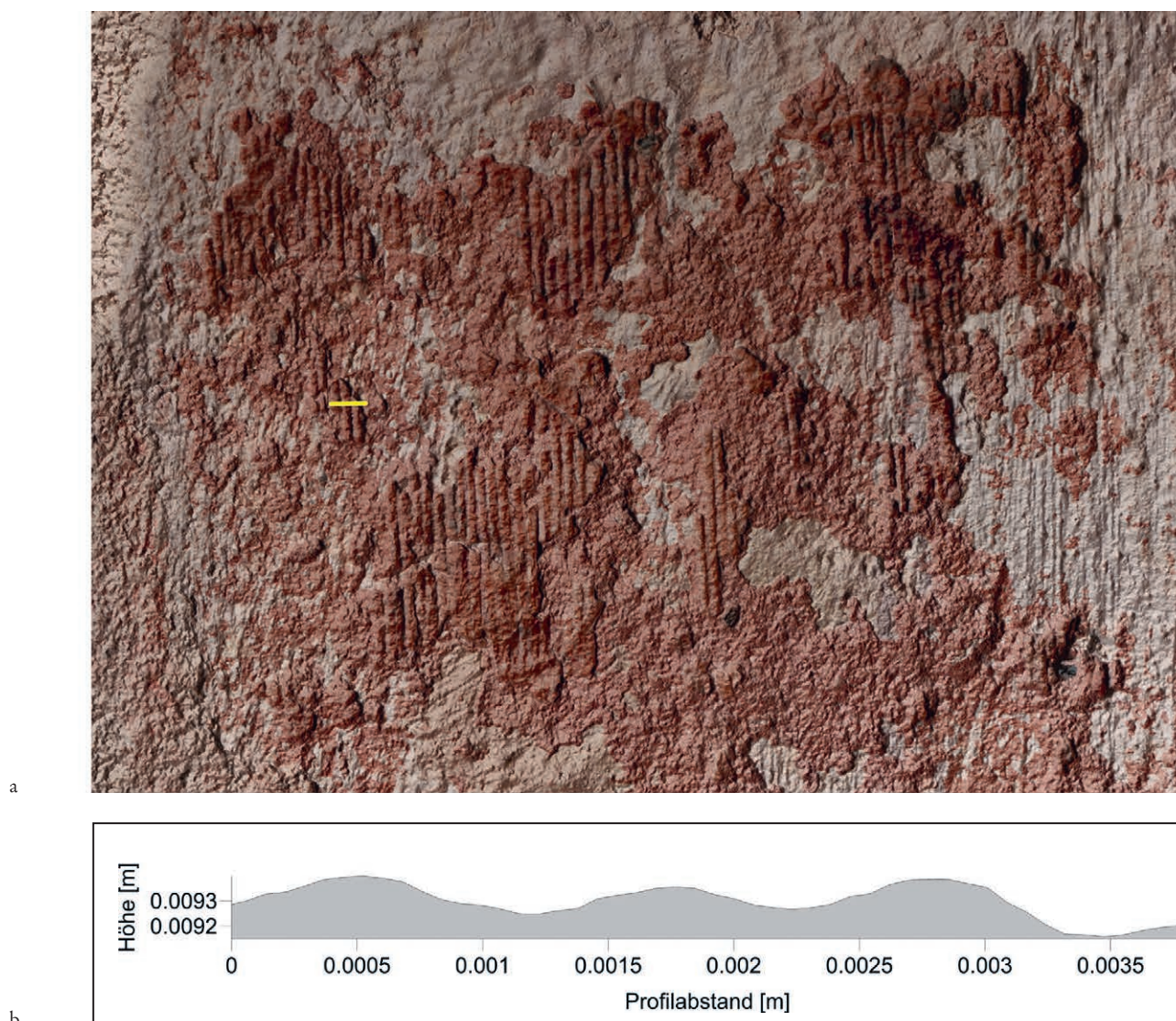


Abb. 7. Schummerungsbild zur dreidimensionalen Kartierung der Pressbrokatoberfläche. –
 a. Ausschnitt aus der verzerrungsfreien Gesamtansicht (halbtransparent überlagert mit RGB-Farbwerten) mit Profilschnitt in Gelb markiert. –
 b. Querschnitt durch drei Pressbrokatrillen mit x-y-Achsenverhältnis von 1:1, d. h. ohne Überhöhung.

sein, Riefen in entsprechend engem Abstand herzustellen. Deshalb wurde entweder doch ein Metallmodell verwendet oder die Form der Rillen kann durch SfM leider nicht korrekt wiedergegeben werden, da das optische Auflösungsvermögen des verwendeten Kamera-Equipments erreicht wurde.

Die große Menge an Rohdaten wird, wie bei allen Messdaten der Arbeitsgruppe üblich, auf den internen Servern archiviert und steht damit auch zukünftig für weitere Analysen, z. B. mit neuer Software oder anderen Forschungsansätzen zur Verfügung. Die Ergebnisse können nun für die Restaurierung und Konservierung dieser in Bayern einzigartigen Wandmalerei genutzt werden.

6. Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse der 3D-Vermessung des Pressbrokats in der Memminger Frauenkirche zeigen eindrucksvoll, dass selbst sehr feine Reliefunterschiede von wenigen Millimetern Breite und Tiefe mit Hilfe des SfM-Verfahrens hochauflösend dargestellt werden können. In dieser Methode steckt somit sehr viel Potential, auch für archäologische und kunsthistorische Fragestellungen, das bisher oft noch nicht ausgeschöpft wird. Bezogen auf den Pressbrokat in Memmingen ließen sich mit Hilfe der vorliegenden Daten einige bisher offene Fragen, wie die Gesamtverteilung und erhaltene Fläche der Applikation, erstmals beantworten. Auch Hinweise auf damals zur Herstellung verwendete

Werkzeuge konnten aus den Daten gewonnen werden. Dies zeigt einmal mehr das enorme Potential, das in solchen digitalen Datensätzen steckt.

Danksagung

Wir bedanken uns bei unserem Kollegen Dr. Jan Menath (BLfD, Referat „Restaurierung Bau- und Kunstdenkmäler“) für die Initialisierung des Projektes und die fachliche Diskussion über die Ergebnisse. Zudem möchten wir Tatjana Gericke (BLfD, Referat „Zentrallabor & Geo-Erkundung“) für ihre Hilfe bei den Aufnahmen vor Ort danken. Unser weiterer Dank gilt der Evangelisch-Lutherischen Kirchengemeinde „Unser Frauen“ in Memmingen für die Erlaubnis, das Testprojekt in ihrer Kirche durchzuführen.

Literatur

- BADILLO, MYERS, PETERSON 2020
A. E. BADILLO, J. A. MYERS, R. J. PETERSON, SfM photogrammetric field methods for historic burial excavations: the case of Bethel cemetery, *Advances In Archaeological Practice* 8/2, 2020, 151–161. doi: 10.1017/aap.2020.16.
- BENAVIDES LÓPEZ et al. 2016
J. A. BENAVIDES LÓPEZ, G. ARANDA JIMÉNEZ, M. SÁNCHEZ ROMERO, E. ALARCÓN GARCÍA, S. FERNÁNDEZ MARTÍN, A. LOZANO MEDINA, J. A. ESQUIVEL GUERRERO, 3D modelling in archaeology: the application of structure from motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain), *Journal of Archaeological Science: Reports* 10, 2016, 495–506. doi: 10.1016/j.jasrep.2016.11.022.
- BERGER 1912
E. BERGER, Quellen und Technik der Fresko-, Oel- und Temperamalerei des Mittelalters von der byzantinischen Zeit bis einschließlich der „Erfindung der Ölmalerei“ durch die Brüder van Eyck. München 1912.
- BOFINGER, STEFFEN 2014
J. BOFINGER, C. STEFFEN, Die fliegende Kamera: Neue Methoden der archäologischen Fotodokumentation aus der Luft, *Denkmalpflege in Baden-Württemberg* 2/2014, 2014, 108–112.
- BOGACZ, MARA 2022
B. BOGACZ, H. MARA, Digital Assyriology – advances in visual culture analysis, *Journal on Computing and Cultural Heritage* 15/2, 2022. doi: 10.1145/3491239.
- BRACHERT 1964
T. BRACHERT, Pressbrokat-Applikationen, ein Hilfsmittel für die Stilkritik, dargestellt an einer Werkstatt der Spätgotik, Jahresbericht des Schweizerischen Instituts für Kunstwissenschaft 1963, 1964, 37–47.
- BRANDOLINI et al. 2020
F. BRANDOLINI, M. CREMASCHI, G. S. MARIANI, A. ZERBONI, S. LISCHI, M. DEGLI ESPOSTI, SfM-Photogrammetry for fast recording of archaeological features in remote areas, *Archaeologia e Calcolatori* 31/2, 2020, 33–45. doi: 10.19282/ac.31.2.2020.04.
- BRAUN 1914
F. BRAUN, Die Stadtpfarrkirche zu Unser Frauen in Memmingen: Ein Beitrag zur Geschichte des oberschwäbischen Kirchenbaus. Kempten – München 1914.
- BREUER 1959
T. BREUER, Stadt und Landkreis Memmingen. München 1959.
- BREUER et al. 2017
M. BREUER, R. M. CZICHON, M. KOCH, M. LEHMANN, D. P. MIELKE, Photogrammetrische 3D-Dokumentation von Nassholzfunden aus Oymağaç Höyük/Nerik (Provinz Samsun/TR), *Restaurierung und Archäologie* 10, 2017, 47–62. doi: 10.11588/ra.2017.0.75392.
- CHLUMSKÁ, ŠEFCŮ 2008
Š. CHLUMSKÁ, R. ŠEFCŮ, The tin-relief technique on the panel paintings of the Rakovník, Rokycany and Litoměřice Altars. In: *Technologia Artis* 6/2008: Výtvarné a materiálové aspekty při hodnocení původu a stáří uměleckého díla. Prag 2008, 66–97.
- CLINI et al. 2016
P. CLINI, N. FRAPICCINI, M. MENGONI, R. NESPECA, L. RUGGERI, SfM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts. In: L. HALOUNOVA, V. ŠAFÁŘ, F. REMONDINO, J. HODAČ, K. PAVELKA, M. SHORTIS, F. RINAUDO, M. SCAIONI, J. BOEHM, D. RIEKE-ZAPP (Hrsg.), XXIII ISPRS Congress, Commission V, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B5, Prag 2016, 229–236. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-229-2016.
- CRAMER, HEINZ 2019
A. CRAMER, G. HEINZ, 3D-Digitalisierung und Erstellung eines interaktiven 3D-Analysewerkzeugs. In: E. WAMERS (Hrsg.), *Der Tassilo-Liutpirc-Kelch im Stift Kremsmünster: Geschichte, Archäologie, Kunst. Schriften des Archäologischen Museums Frankfurt* 32, Regensburg 2019, 41–48.
- DOBLER 2013
G. DOBLER, Laserscanaufnahmen an den Wandmalereien der Kirche St. Leonhard in Haging, *Denkmalpflege Informationen* 154, 2013, 26–29.
- DREWELLO 2016
R. DREWELLO, Analyseergebnis AN2924: Memmingen, Ev.-Luth. Stadtpfarrkirche. Unpublizierter Messbericht vom 18.07.2016.
- EBERHARDT 2007
T. EBERHARDT, Die spätgotischen Wandmalereien am Grabmal des Bischofs Otto III. von Hachberg in der Margarethenkapelle des Konstanzer Münsters: Untersuchungen zum Bestand, Zustand und zum Konservierungskonzept. Diplomarbeit, Technische Hochschule Köln 2007.
- FRISCHER 2014
B. FRISCHER, 3D data capture, restoration and online publication of sculpture. In: F. REMONDINO, S. CAMPANA (Hrsg.), *3D Reconstruction and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices. British Archaeological Reports International Series* 2598, Oxford 2014, 137–144.
- FÜCKER 2023
B. FÜCKER, Materialität im Kontext: Studien zur Kunsttechnik spätmittelalterlicher Tafelmalerei aus Bayern, Österreich und Südtirol am Germanischen Nationalmuseum. Veröffentlichung des Instituts für Kunsttechnik und Konservierung am Germanischen Nationalmuseum 12, Nürnberg 2023.
- HAFELDER 2011
T. HAFELDER, Unser Frauen Memmingen. Schnell Kunstführer Nr. 1404, Regensburg 2011.
- HECHT 1980
B. HECHT, Betrachtungen über Pressbrokate: Rekonstruktionsversuche unter besonderer Berücksichtigung des sog. Tegernseer Manuskripts, *Restaurio* 86/1, 1980, 22–49.

- HEINEN et al. 2002
 S. HEINEN, V. KRÜSEL, G. MAUL, U. RIECKE, S. SALOMON, Die Restaurierung der Wandmalereien in der Aachener Chorrhale. In: U. MAINZER (Hrsg.), Die gotische Chorrhale des Aachener Doms und ihre Ausstattung: Baugeschichte, Bauforschung, Sanierung. Arbeitsheft der rheinischen Denkmalpflege 58, Petersberg 2002, 229–256.
- HOMBURG et al. 2022
 T. HOMBURG, R. ZWICK, H. MARA, K.-C. BRUHN, Annotated 3D-models of cuneiform tablets, *Journal of Open Archaeology Data* 10/4, 2022, 1–8. doi: 10.5334/joad.92.
- JAGEMANN 2015
 E. JAGEMANN, Nahbereichsfotogrammetrie als Methode zur archäologischen Funddokumentation und -analyse. Masterarbeit, Freie Universität Berlin 2015.
- KARL et al. 2022
 S. KARL, P. HOUSKA, S. LENGAUER, J. HARING, E. TRINKL, R. PREINER, Advances in digital pottery analysis, *Information Technology* 64/6, 2022, 195–216. doi: 10.1515/itit-2022-0006.
- KATSICHTI et al. 2019
 V. KATSICHTI, G. KONGOIANNI, A. GEORGOPOULOS, 3D documentation of frail archaeological finds using low-cost instrumentation. In: P. GRUSSENMEYER, A. MURTIYOSO, H. MACHER, R. ASSI (Hrsg.), ISPRS TC II 6th International Workshop LowCost 3D: Sensors, Algorithms, Applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W17, Straßburg 2019, 157–164. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-157-2019.
- KNÜPFER 2005
 D. KNÜPFER, Die Wandmalerei „Heiliger Christophorus“ in der Pfarrkirche St. Martin, Oberwesel: Umgang mit Folgeschäden eines historischen Trockenlegungsversuches mit Falzbaupappe. Diplomarbeit, Technische Hochschule Köln 2005.
- KRAUS 1987
 F. X. KRAUS, Die Kunstdenkmäler des Kreises Konstanz. Freiburg 1987.
- LINDSTAEDT et al. 2007
 M. LINDSTAEDT, T. KERSTEN, M. SAUERBIER, J. PETERHANS, P. FUX, Terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie zur archäologischen Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara in Peru. In: T. LUHMANN, C. MÜLLER (Hrsg.), Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Heidelberg 2007, 328–337.
- LUHMANN 2010
 T. LUHMANN, Nahbereichsfotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Berlin 2010.
- MAGNANI et al. 2020
 M. MAGNANI, M. DOUGLASS, W. SCHRODER, J. REEVES, D. R. BRAUN, The digital revolution to come: photogrammetry in archaeological practice, *American Antiquity* 85/4, 2020, 737–760. doi: 10.1017/aaq.2020.59.
- MARÍN-BUZÓN et al. 2021
 C. MARÍN-BUZÓN, A. M. PÉREZ-ROMERO, M. J. LEÓN-BONILLO, R. MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, J. C. MEJÍAS-GARCÍA, F. MANZANO-AGUGLIARO, Photogrammetry (SfM) vs. terrestrial laser scanning (TLS) for archaeological excavations: mosaic of Cantillana (Spain) as a case study, *Applied Sciences* 11/24, 2021, 11994. doi: 10.3390/app112411994.
- MENATH 2021
 J. MENATH, Studien zur Wandmalerei des 15. und 16. Jahrhunderts in Bayerisch-Schwaben/Allgäu. Dissertation, Hochschule für Bildende Künste Dresden 2021, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-752558> (letzter Zugriff 17.10.2024).
- NEAMȚU, COMES, POPESCU 2016
 C. NEAMȚU, R. COMES, D. POPESCU, Methodology to create digital and virtual 3D artefacts in archaeology, *Journal of Ancient History and Archaeology* 3/4, 2016, 65–74. doi: 10.14795/j.v3i4.206.
- OELLERMANN 1967
 E. OELLERMANN, Zur Imitation textiler Strukturen in der spätgotischen Faß- und Flachmalerei, *Bericht des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* 25, 1967, 159–174.
- PALM 2020
 U. PALM, Das Pressbrokat: eine aufwändige Verzierungstechnik der Gotik, *Landesmuseum Württemberg Blog*, 10.12.2020, <https://blog.landmuseum-stuttgart.de/das-pressbrokat-eine-aufwaendige-verzierungs-technik-der-gotik/> (letzter Zugriff 17.10.2024).
- REINERS 1955
 H. REINERS, Das Münster Unserer Lieben Frau zu Konstanz. Die Kunstdenkmäler Südbadens 1, Lindau – Konstanz 1955.
- REINHARD 2013
 J. REINHARD, Structure-from-Motion-Photogrammetrie mit Agisoft PhotoScan: Erste Erfahrungen aus der Grabungspraxis. In: U. LIEBERWIRTH, I. HERZOG (Hrsg.), 3D-Anwendungen in der Archäologie. Berlin 2013, 17–44. doi: 10.17171/3-34.
- RODRÍGUEZ-MARTIN, RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ 2020
 M. RODRÍGUEZ-MARTIN, P. RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, Suitability of automatic photogrammetric reconstruction configurations for small archaeological remains, *Sensors* 20, 2020, 2936. doi: 10.3390/s20102936.
- SCHÄFER et al. 2011
 A. SCHÄFER, H. MARA, J. FREUDENREICH, B. BREUCKMANN, C. DÜFFORT, G. BOCK, Large Scale Angkor Style Reliefs: High Definition 3D Acquisition and Improved Visualization Using Local Feature Estimation. 39th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), 12–16 April 2011. Beijing 2011.
- SCHMIK et al. 2018
 J. SCHMIK, A. COLSON, H. HASTEDT, T. LUHMANN, Photogrammetrisches Monitoring und Deformationsanalyse der Bremer Hanse-Kogge. In: T. LUHMANN, C. SCHUMACHER (Hrsg.), Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Offenbach 2018, 42–54.
- STRAUB 1984
 R. E. STRAUB, Tafel- und Tüchleinmalerei des Mittelalters. In: H. KÜHN, H. ROSEN-RUNGE, R. E. STRAUB, M. KOLLER (Hrsg.), Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei. Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken 1, Stuttgart 1984, 176–178.
- THEMISTOCLEOUS et al. 2018
 K. THEMISTOCLEOUS, M. IOANNIDES, S. GEORGIU, D. HADJIMITSIS, The innovative documentation of cultural heritage using H-BIM: case study of Asinou church. In: U. MICHEL, K. SCHULZ (Hrsg.), *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX*. Proceedings of SPIE 10790. Bellingham, Washington 2018, 1079008. doi: 10.1117/12.2325453.

TORRES et al. 2012

J. C. TORRES, G. ARROYO, C. ROMO, J. DE HARO, 3D digitization using structure from motion. In: I. NAVAZO, G. PATOW (Hrsg.), XII Spanish Computer Graphics Conference (CEIG) 2012, 12–14 September 2012. Jaén 2012.

VERHOEVEN, SANTNER, TRINKS 2021

G. VERHOEVEN, M. SANTNER, I. TRINKS, Bildbasierte 3D-Modellierung der Wandmalerei in der Bischofstorvorhalle im Wiener Stephansdom, Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege 75/1–2, 2021, 163–174. doi: 10.5281/zenodo.5029639.

WESTHOFF, HAHN 1996

H. WESTHOFF, R. HAHN, Verzierungstechniken in Malerei und Skulptur. In: H. WESTHOFF, R. HAHN, A. KOLLMANN, A. KLÖPFER (Hrsg.), Graviert, Gemalt, Gepresst: Spätgotische Retabelverzierungen in Schwaben. Ulm 1996, 26–30.

Roland Linck

*Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat Z V „Zentrallabor & Geo-Erkundung“
Hofgraben 4
80539 München
Deutschland
roland.linck@blfd.bayern.de*

 orcid.org/0000-0002-8812-8732

Andreas Stele

*Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat Z V „Zentrallabor & Geo-Erkundung“
Hofgraben 4
80539 München
Deutschland
andreas.stele@blfd.bayern.de*

 orcid.org/0000-0001-7164-9315