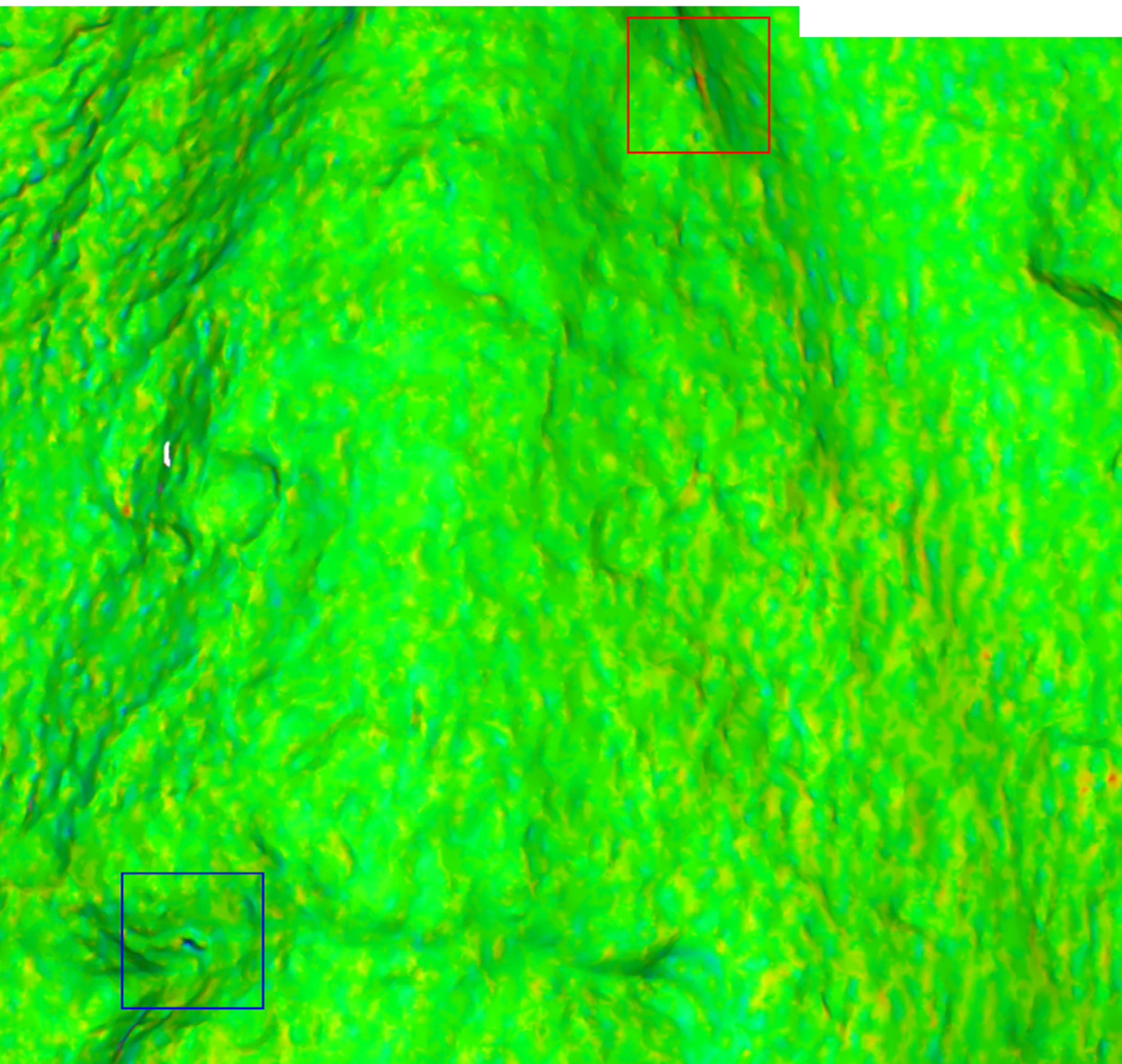


# Objektives Transportmonitoring eines antiken Grabreliefs

Carolin Heinemann, Pascal Ziegler,  
Jens-Arne Dickmann und Peter Eberhard



## Objektives Transportmonitoring eines antiken Grabreliefs

Carolin Heinemann, Pascal Ziegler,  
Jens-Arne Dickmann und Peter Eberhard

Dieser Beitrag dokumentiert das Transportmonitoring eines antiken Grabreliefs. Das Relief reiste von der Archäologischen Sammlung der Universität Freiburg für die Ausstellung „SEUCHEN. Fluch der Vergangenheit – Bedrohung der Zukunft“ 2022 an das Roemer- und Pelizaeus-Museum nach Hildesheim. Da es sich bei dem Relief um ein fragiles Werk handelt, sollte mittels 3D-Streifenprojektion der Zustand vor und nach dem Transport dokumentiert werden, um gegebenenfalls aufgetretene Veränderungen sichtbar zu machen. Zudem wurden mit Hilfe mehrerer Sensoren am Sockel die während der Transportfahrt auftretenden Beschleunigungen gemessen und die entsprechenden Zeitsignale analysiert.

### Objective transport monitoring of an antique tomb relief

*This article documents the transportation monitoring of an ancient funerary relief. The relief traveled from the Archaeological Collection of the University of Freiburg for the exhibition "Epidemics. Curse of the Past - Threat of the Future" to the Roemer and Pelizaeus Museum in Hildesheim in 2022. As the relief is a fragile work, the condition before and after transportation was to be documented using 3D scanning in order to visualize any changes that may have occurred. In addition, several sensors on the base were used to measure the accelerations occurring during the transport journey and the corresponding time signals were analyzed.*



Nicht nur in Museen, sondern auch in anderen Sammlungen spielt der Leihverkehr eine zunehmend wichtigere Rolle. Es ist seit langem bekannt, dass der Transport von Kunst und Kulturgut zu irreversiblen Veränderungen in der komplexen Materialität führen kann, welche die natürliche Alterung des Werks beschleunigen.<sup>1</sup> Um diese möglicherweise beim Transport auftretenden Veränderungen zu erfassen, wurde der Transport eines antiken Grabreliefs (Abb. 1) genau überwacht. Das Relief wurde von der Archäologischen Sammlung der Universität Freiburg für die Ausstellung „SEUCHEN. Fluch der Vergangenheit – Bedrohung der Zukunft“ 2022 an das Roemer- und Pelizaeus-Museum nach Hildesheim überführt.

Der Gedanke eines Monitorings mithilfe von 3D-Modellen ist nicht neu, bereits vor mehr als 20 Jahren war man sich des Mehrwerts bewusst,<sup>2</sup> und Monitoring mit verschiedenen 3D-Methoden wurde dezidiert in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht und verwendet.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Griechisches Grabrelief, 4. Jh. v. Chr., Marmor, 113,0 x 57,0 x 27,5 cm (H x B x T), Inventarnummer S 535, Archäologische Sammlung der Universität Freiburg



Ein metrisches Testobjekt<sup>4</sup> kam in diesem Fall nicht zum Einsatz. Das griechische Grabrelief aus Marmor stammt aus dem 4. Jahrhundert v. Chr. und misst 113 cm x 57 cm x 27,5 cm (H x B x T ohne Aufsockelung). Das Werk ist aufgrund seines Alters und seiner Nutzungsgeschichte vorgeschädigt und insbesondere aufgrund eines bestehenden Risses als fragil einzustufen. Beim Verpacken wurde das Grabrelief nebst Sockel auf den speziell präparierten Boden der Transportkiste geschoben. Dieser Boden stand auf sechs Dämpfungsfüßen.<sup>5</sup> Der Sockel ließ sich auf allen vier Seiten mit gepolsterten Kanthölzern auf der Bodenplatte fixieren, um ein Rutschen in der Kiste zu verhindern. Anschließend wurde das Werk komplett in Tyvek eingeschlagen. Dann erfolgte die Montage der hölzernen Seitenwände der Kiste, und das Relief wurde mit zehn gepolsterten Kanthölzern in der Transportkiste fixiert (Abb. 2). Zudem erhielt die als besonders fragil eingestufte untere rechte Ecke des Reliefs eine Abstützung aus Schaumstoff.



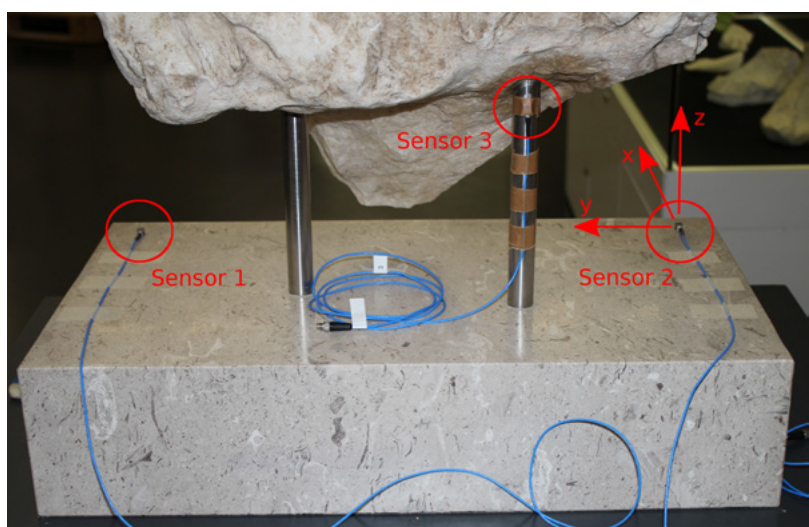
2 Griechisches Grabrelief in Transportkiste verpackt

## Messaufbau und Messverfahren

### Aufbau der mechanischen Messung

Für die vollständige Erfassung der Bewegung des Grabreliefs während des Transports wurden drei triaxiale ICP (Integrated Circuit Piezo-Electric) Beschleunigungssensoren verwendet.<sup>6</sup> Das Gewicht der Beschleunigungssensoren beträgt je 1 g. Die Sensoren wurden aus konservatorischen Gründen sowie aufgrund der Porigkeit des Marmors nicht auf dem Relief selbst, sondern auf dem Sockel bzw. der Ständerung appliziert. Für die Lage der Sensoren wählten die Verantwortlichen drei möglichst weit auseinanderliegende Orte, um eine hohe Auflösung der rotatorischen Bewegungen zu garantieren (Abb. 3). Die Sensoren auf dem Sockel wurden mit Paraloid B 72 (50%ig) in Aceton befestigt, während der Sensor an der Ständerung mithilfe von Montagewachs<sup>7</sup> angebracht war.

Die Signalkonditionierung der Sensoren erfolgte über drei ICP-Versorgungseinheiten<sup>8</sup> mit hundertfacher Signalverstärkung. Für die Messwertaufzeichnung wurde ein Transientenrekorder<sup>9</sup> verwendet. Um auch äußerst kurzzeitige Schockereignisse zeitlich auflösen zu können, kam für den Einladevorgang eine Abtastrate von 10 kHz zum Einsatz. Für die Transportfahrt selbst wurde eine Abtastrate von 5 kHz verwendet. Entsprechend der Speichergröße des Transientenrekorders waren so Messungen bis zu maximal 20 min (Einladevorgang) bzw. 80 min (Transportfahrt) möglich. Zur Energieversorgung des gesamten Messequipments kam eine Autobatterie mit Wechselrichter zum Einsatz.



3 Befestigung der drei dreiachsigen Beschleunigungssensoren auf dem Sockel (Blick auf Reliefrückseite)

## Aufbau der optischen Messung

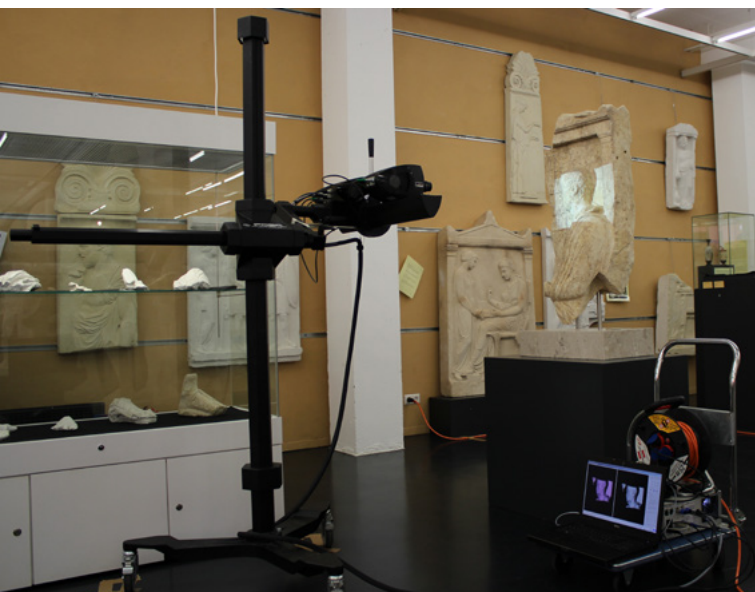
Für die optische Messung kam das Einkamerasystem COMET 5 11MEco<sup>10</sup> mit mittelgroßem Messfeld – FOV (Field of View) 350 – zum Einsatz (Tab. 1). Dieses wurde vor der Aufnahme des Vor- und Nachzustands kalibriert. Zur Ermittlung der benötigten Anzahl an Einzelaufnahmen, Aufnahmepositionen und Belichtungszeiten sind in situ Vorversuche durchgeführt worden. Es wurden insgesamt zwei 3D-Modelle der Oberfläche des Grabreliefs, eines vor und eines nach dem Transport, erstellt (Abb. 4 und Tab. 2). Die Datenaufnahme und -nachbearbeitung erfolgte mit der Software COMET plus 9.91, der Modellvergleich mit der Software INSPECT plus 5.55. Eine für diese Art der optischen Messung kooperative Oberfläche des Objekts soll sich diffus reflektierend verhalten.<sup>11</sup> Dies ist bei Marmor nicht in jedem Fall gegeben, da häufig Transluzenz vorliegt. Bei transluzenten Objekten kann es unter der Oberfläche zu Lichtstreuungen kommen, was die Messposition unter die reale Oberfläche verschiebt. Weiterführende Literatur dazu findet sich in Bezug auf Marmor bei Verwendung von Laserscannern<sup>12</sup> sowie unter Einsatz von Streifenscannern<sup>13</sup>.

**Tabelle 1** Verwendete Sensorkonfiguration des Einkamerasystems (COMET 5 11MEco) und Genauigkeitsmaße

|  |                    |
|--|--------------------|
| Messfeld (FOV)                             | 350                |
| Messvolumen                                | 345 x 230 x 200 mm |
| x,y-Auflösung                              | 85 µm              |
| Auflösungsgrenze (Z)                       | 4 µm               |
| Antastabweichung Form VDI/VDE 2634 Blatt 2 | 25 µm              |

**Tabelle 2** Gesamtanzahl der Einzelscans der 3D-Oberflächenmessung am Grabrelief

| Bezeichnung | Anzahl Einzelscans |    |
|-------------|--------------------|----|
| VZ gesamt   | 129                | 81 |
| NZ gesamt   | 161                | 74 |



**4** 3D-Datenaufnahme des Grabreliefs (rechts) mit Einkamerasystem auf Säulenstativ (links) in Archäologischer Sammlung der Universität Freiburg

## Messergebnisse

### Ergebnisse der mechanischen Messungen

Bei der Analyse der mechanischen Messdaten ergab sich, dass beim Schließen der Transportkiste an zwei der drei Beschleunigungssensoren Kontaktprobleme entstanden sein müssen. Daher konnten nur die Daten eines Beschleunigungssensors (Sensor 2) zur Auswertung der mechanischen Immissionen herangezogen werden. Das bedeutet, dass im Weiteren ausschließlich Aussagen über translatorische (axiale) Beschleunigungen gemacht werden können und Aussagen über rotatorische Beschleunigungen nicht möglich sind.

Die Ergebnisse der mechanischen Messungen beim Einladen in das Fahrzeug sowie Stadt- und Autobahnfahrten werden untergliedert dargestellt. Angegeben werden jeweils die maximal aufgetretenen Beschleunigungen und der quadratische Mittelwert der Beschleunigungen. Weiter wird die prozentuale Häufigkeit von Beschleunigungen in drei Amplitudenbereichen angegeben. Im Rahmen der Messgenauigkeit ist der Mittelwert aller Messungen Null. Von deren Angabe wird daher abgesehen. Die Beschleunigungen werden entsprechend dem in Abbildung 3 dargestellten Koordinatensystem angegeben.

Einladen ins Fahrzeug

Nachdem die Transportkiste verschlossen war, startete die mechanische Messung zur Dokumentation der Belastungen während des Einladevorgangs. Die Transportkiste wurde aufrechtstehend mit einem Hubwagen aus der Ausstellung über Linoleumboden in einen Schwerlastaufzug gefahren und dann in den LKW verladen. Die Vorderseite des Grabreliefs befand sich in Fahrtrichtung und die Transportkiste wurde mit einem Spanngurt an der Seitenwand des LKWs fixiert. Das Messequipment befand sich hinter der Transportkiste, eine Metallstange hielt es an Ort und Stelle (Abb. 5). Die während des Verladens gemessenen Beschleunigungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Es ergeben sich keine Besonderheiten. Der Großteil der Beschleunigungsamplituden liegt unter 0,025 g. Nur wenige Beschleunigungsamplituden übersteigen 0.25 g. Diese traten vereinzelt bei der Hubwagenfahrt über den mit Steinplatten belegten Hof sowie bei der Auffahrt auf die Laderampe des Transport-LKWs auf.



5 a und b Beladen des Transport-LKWs (links) und verladene sowie mit Gurten gesicherte Transportkiste und Messequipment (rechts)



Tabelle 3 Beschleunigungen beim Verladen der Transportkiste

|   | arms [g] | amax [g] | amin [g] | a  < 0.025 g | 0.025 g ≤  a  ≤ 0.25 g | a  > 0.25 g |
|---|----------|----------|----------|--------------|------------------------|-------------|
| x | 0.019    | 0,513    | -0,520   | 96,9%        | 3,1%                   | 0,05%       |
| y | 0,015    | 0,390    | -0,786   | 98,6%        | 1,4%                   | 0,06%       |
| z | 0,020    | 0,916    | -0,740   | 95,9%        | 4,1%                   | 0,01%       |



Stadtfahrt

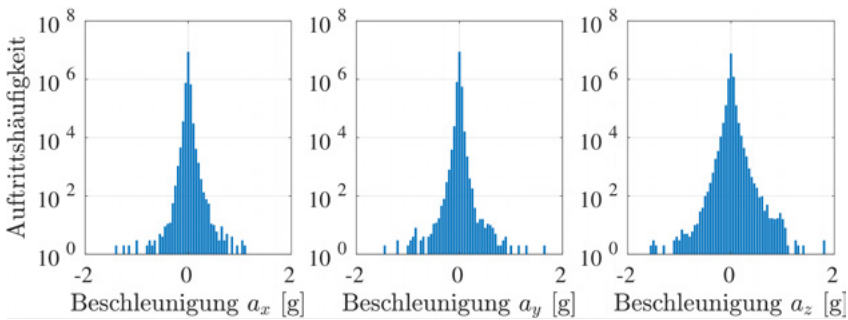
Mit der mit Messsensoren bestückten Transportkiste wurde eine wenige Minuten dauernde Fahrt von der Archäologischen Sammlung bis zur Spedition unternommen. Dabei fand auf dem mit Steinplatten belegten Hof der Archäologischen Sammlung ein Wendemanöver statt, Bordsteinkanten wurden überfahren und dann bis zum Hof der Spedition gefahren. Die Fahrt umfasste eine kurze Fahrt durch die Stadt mit durchschnittlich guter Straßenqualität sowie ein kurzes Stück Bundesstraße mit sehr guter Straßenqualität. Die während der Stadtfahrt gemessenen Beschleunigungen sind in **Tabelle 4** zusammengefasst.

Auch hier liegen die über den größten Teil der Zeit beobachteten Beschleunigungsamplituden unter 0,025 g. Gegenüber dem Verladeprozess steigt jedoch der Anteil der Beschleunigungsamplituden bis 0,25 g deutlich an. Amplituden darüber werden nur mit einem Anteil von unter 1 % beobachtet. Einen Überblick über die Verteilung der auftretenden Beschleunigungen gibt das Histogramm in **Abbildung 6**.

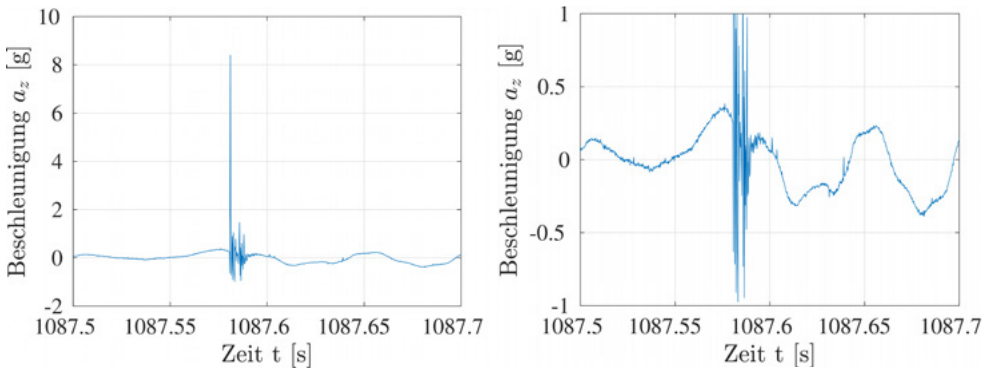
Trotz der vorwiegend sehr kleinen Beschleunigungen treten auch einzelne sehr hohe maximale Beschleunigungen über 8 g auf (**Tab. 4**). In **Abbildung 7** ist der Ausschnitt der Messung dargestellt, in dem diese maximale Beschleunigung auftrat.

Tabelle 4 Beschleunigungen während der Stadtfahrt

|   | arms [g] | amax [g] | amin [g] | $ a  < 0.025 \text{ g}$ | $0.025 \text{ g} \leq  a  \leq 0.25 \text{ g}$ | $ a  > 0.25 \text{ g}$ |
|---|----------|----------|----------|-------------------------|--|------------------------|
| x | 0.020    | 3,246    | -2,232   | 85,4%                   | 14,6%  | 0,06%                  |
| y | 0,019    | 3,265    | -4,737   | 86,2%                   | 13,8%  | 0,05%                  |
| z | 0,033    | 8,402    | -5,254   | 74,3%                   | 25,6%  | 1,00%                  |



6 Histogramm der während der Stadtfahrt aufgetretenen Beschleunigungen in logarithmischer Darstellung



7 a und b Ausschnitt der Stadtfahrt mit maximal aufgetretener Beschleunigungsamplitude in zwei Skalierungen

Die maximale Beschleunigungsamplitude besteht nur aus einer einzigen Schwingungsamplitude, deren Dauer mit etwa 0,2 ms extrem kurz ist. Die dadurch ausgelöste hochfrequente Schwingung ist bereits nach etwa 10 ms praktisch vollständig abgeklungen. Ein solcher Verlauf ist typisch für stoßartige Belastungen, die häufig auch als Schockereignisse bezeichnet werden. Da ein Abheben der Transportkiste aufgrund ihres Gesamtgewichts unter normalen Fahrbedingungen jedoch sehr unwahrscheinlich ist, scheinen zwei Möglichkeiten besonders plausibel. Erstens sind die einzelnen Holzteile der Transportkiste verschraubt. Dadurch ist es möglich, dass es bei der Überfahrt einer Unebenheit zu einer Verwindung der Holzkiste kommt. Werden die dabei entstehenden Spannungen zu groß, erfolgt die Entspannung spontan, oft auch hörbar durch ein „Knacken“. Ein ähnliches Verhalten beobachteten die Autoren bei Untersuchungen an verschraubten Klimakisten, bei denen solche Spannungsspitzen ebenfalls festgestellt wurden, und nach kräftigem Nachziehen der Schrauben fast gänzlich verschwanden. Zweitens wurde die Transportkiste direkt an der Seitenwand der Ladefläche mit einem Spanngurt verzurrt (Abb. 5). Es ist somit auch denkbar, dass die Seitenwand während der Fahrt an die Transportkiste stieß. Da Stöße in extrem kurzen Zeitskalen ablaufen, können auch geringe Stöße zu kurzen, aber erheblichen Beschleunigungen führen. Die Erfassung wird durch die hohe Empfindlichkeit der verwendeten Beschleunigungsaufnehmer in Verbindung mit der hohen Abtastrate ermöglicht. Mit weniger empfindlichen Geräten und bei geringerer Abtastrate wären die Spitzen vermutlich unbeobachtet geblieben. Zu beachten ist auch, dass der Energieinhalt der diskutierten Stöße trotz hoher Amplitude sehr klein ist. Die genannten Erklärungen basieren auf Erfahrungen der Autoren. Eine abschließende Klärung der Ursache dieser Stöße bleibt im Nachhinein jedoch unmöglich.

### Autobahnfahrt

Die Aufzeichnung der Autobahnfahrt umfasst zwei Messreihen zu je 80 min. Der Beginn der ersten Messreihe beinhaltet ca. 5 km Fahrt vom Speditionshof auf die Autobahn. Die zweite Messreihe fand ausschließlich auf der Autobahn statt. Bei beiden Autobahnetappen wurden Geschwindigkeiten von ca. 80 km/h erreicht und typische Fahrmanöver wie Spurwechsel und normale Geschwindigkeitsanpassungen durchgeführt. Die zweite Autobahnetappe beinhaltete zudem einen etwa fünfundzwanzigminütigen Abschnitt mit zähfließendem, später auch stockenden Verkehr. Die erfassten Beschleunigungen sind in den Tabellen 5 und 6 zusammengefasst.

Bei der Autobahnfahrt ist eine deutliche Erhöhung der Beschleunigungsanteile zwischen 0,025 g und 0,25 g zu beobachten, die während des ersten Autobahnabschnitts in vertikaler Richtung auf etwa 60 % ansteigen. Während des zweiten Abschnitts ist der Anteil aufgrund des dabei aufgetretenen Staus geringer. Auch hier treten vereinzelt sehr hohe Beschleunigungsamplituden auf, die dieselben dynamischen Eigenschaften wie bei der Stadtfahrt haben.

Tabelle 5 Beschleunigungen während des Autobahnabschnitts 1

|   | arms [g] | amax [g] | amin [g] | a  < 0.025 g | 0.025 g ≤  a  ≤ 0.25 g | a  > 0.25 g |
|---|----------|----------|----------|--------------|------------------------|-------------|
| x | 0.038    | 6,556    | -4,081   | 47,0%        | 53,0%                  | 0,02%       |
| y | 0,031    | 7,583    | -6,309   | 62,9%        | 37,0%                  | 0,02%       |
| z | 0,061    | 9,974    | -7,505   | 38,8%        | 60,8%                  | 0,41%       |

Tabelle 6 Beschleunigungen während des Autobahnabschnitts 2

|   | arms [g] | amax [g] | amin [g] | a  < 0.025 g | 0.025 g ≤  a  ≤ 0.25 g | a  > 0.25 g |
|---|----------|----------|----------|--------------|------------------------|-------------|
| x | 0.033    | 6,004    | -7,154   | 64,1%        | 35,9%                  | 0,04%       |
| y | 0,030    | 8,980    | -8,928   | 71,3%        | 28,6%                  | 0,03%       |
| z | 0,057    | 9,383    | -12,39   | 49,0%        | 50,6%                  | 0,43%       |

## Ergebnisse der optischen Messung

Ergebnisse der optischen Messungen sind 3D-Modelle, die Oberflächentopografien zeigen. **Tabelle 7** listet einige Metadaten wie die Anzahl der Punkte, Anzahl der Dreiecke und dem Speicherbedarf des Vor- (VZ) und Nachzustandsmodells (NZ) auf. Mittels Modellvergleich wurden lediglich minimale Modellunterschiede ( $< 0,25$  mm) und damit wahrscheinlich minimale Objektveränderungen am Grabrelief nachgewiesen. Es handelt sich wohl um winzige, bereits lediglich aufliegende Partikel, die sich transportinduziert von der Reliefoberfläche gelöst (Modellunterschiede in negativer z-Richtung) und zum Teil andernorts aufgelagert haben (Modellunterschiede in positiver z-Richtung, orthogonal zum 3D-Modell).

**Abbildung 8** zeigt beispielhaft den Vorher-Nachher-Modellvergleich eines Teils des Gesichts in Falschfarben. Das blaue Rechteck markiert einen Bereich, in dem sich kleinste Partikel gelöst haben, wohingegen das rote Rechteck einen Bereich kennzeichnet, in dem Auflagen vorliegen. Die Modellunterschiede liegen in einer Größenordnung von 0,1 mm.

In **Abbildung 9** (links) ist mit schwarzem Rahmen ein Bereich markiert, in dem eine Messlücke vorliegt, sodass sich ein falsch positives Ergebnis zeigt. Die mit blau gekennzeichneten Bereiche weisen auf lokale Objektveränderungen im Bereich von 0,225 mm hin. Die Verortung dieses Bereichs ist in **Abbildung 9** (rechts) in Rot dargestellt.

**Abbildung 10** (links) wiederum zeigt eine minimale Auflagerung in einer Größenordnung von 0,190 mm, die auf einem kleinen Vorsprung zu liegen scheint. Dieser Vorsprung befindet sich auf der rechten unteren Ecke der rechten Seite des Grabreliefs (**Abb. 10** rechts).

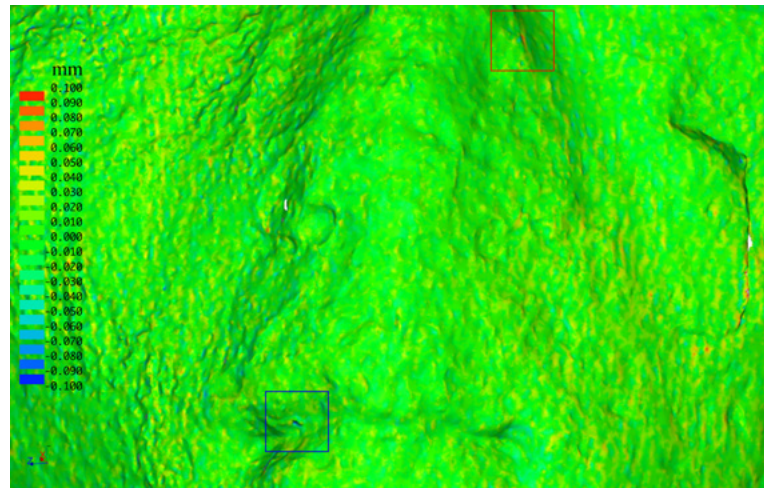
Die Mikroskopaufnahme (**Abb. 11**) zeigt winzige Partikel von insgesamt  $< 1$  mm<sup>2</sup> Größe, die sich transportinduziert von der Oberfläche gelöst haben und nach dem Transport auf dem Sockel zu finden waren.

**Tabelle 7** Metadaten der optischen Messung

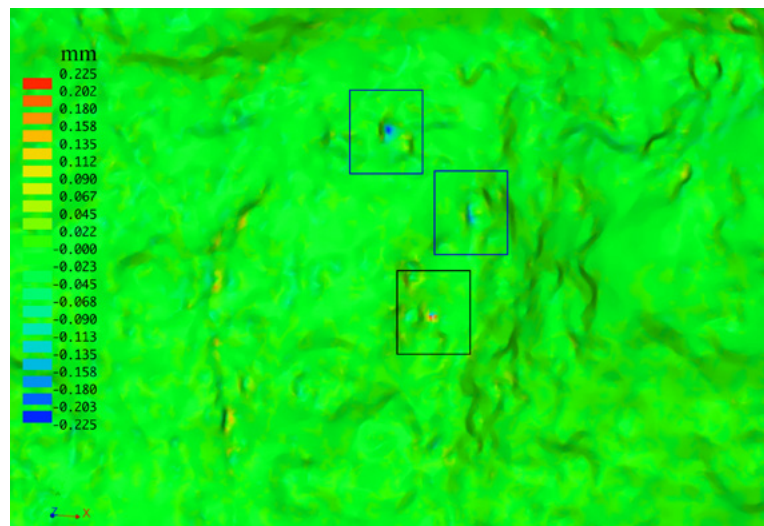
| Bezeichnung     | Anzahl Punkte | Anzahl Dreiecke | Speicherplatz in KB |
|-----------------|---------------|-----------------|---------------------|
| VZ VS           | 7.486.701     | 14.478.121      | 345.140             |
| VZ RS           | 5.238.687     | 10.394.485      | 244.597             |
| VZ gesamt       | 13.941.928    | 27.140.467      | 644.821             |
| NZ VS           | 7.232.834     | 14.067.211      | 334.375             |
| NZ RS           | 4.906.051     | 9.754.650       | 229.303             |
| NZ gesamt       | 13.976.430    | 27.327.339      | 647.820             |
| Vergleich VZ NZ | x             | x               | 1.468.080           |



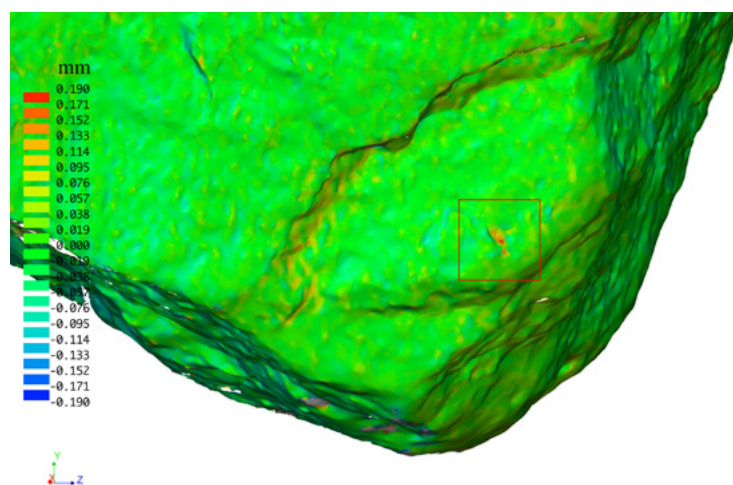
**8 a und b** Griechisches Grabrelief: Vorher-Nachher-Modellvergleich im Bereich des Mundes und der Nase (links) und Verortung des Bereichs am Relief (rechts)

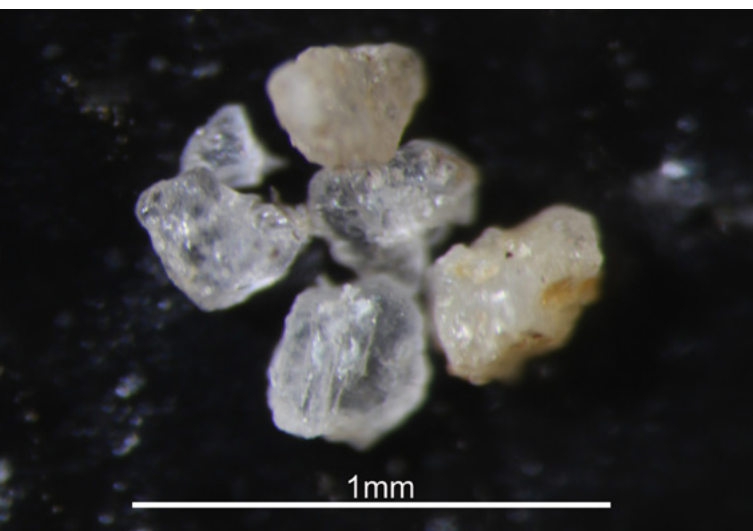


**9 a und b** Griechisches Grabrelief: Detaildarstellung einer Messlücke (links), die auf der Rückseite des Reliefs verortet ist (rechts, Gesamtaufnahme)



**10 a und b** Griechisches Grabrelief: Vorher-Nachher-Modellvergleich (links), verortet im Bereich der rechten unteren Ecke der rechten Seite (rechts, Gesamtaufnahme)





11 Mikroskopaufnahme von Partikeln auf dem Sockel

optischen Messungen ebenfalls nahelegen, nicht per se schädigend wirken, solange die aufgrund der sehr geringen Wirkdauer ins Objekt eingebrachte Energie klein genug ist.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass der auf diese Art durchgeführte Transport lediglich minimale Substanzverluste mit sich brachte. Darüber, in welchem Maß es im Inneren des Reliefs zur Bildung von Mikrorissen gekommen ist, kann naturgemäß keine Aussage getroffen werden. Dieses Monitoring rechtfertigt demnach keine allgemeine Aussage darüber, dass auch künftige Transporte gefahrlos möglich sind. Auch diese müssen sorgfältig auf ihre Notwendigkeit hin überprüft und mit äußerster Umsicht durchgeführt werden.

### Zusammenfassung

Das hier gezeigte Transportmonitoring mittels 3D-Streifenprojektion und Beschleunigungssensoren war erfolgreich und ist für Museumstransporte von Relevanz. Mithilfe der hochgenauen Aufnahme der Oberfläche durch 3D-Streifenprojektion wurden nur minimale Modellunterschiede < 0,25 mm und damit höchstwahrscheinlich minimale transportinduzierte Objektveränderungen am Grabrelief nachgewiesen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass sowohl das Vor- als auch das Nachzustandsmodell kleine Lücken aufweist. Grund hierfür ist die begrenzte Zeit im Rahmen eines Leihvorgangs, die nur eine begrenzte Menge an Aufnahmen der 3D-Streifenprojektion zulässt. Dadurch konnten einige wenige und kleine abgeschattete Bereiche nicht vollständig erfasst werden, sodass für diese keine Aussagen möglich sind. Die Erstellung von Referenzmodellen war aufgrund der Kürze der zur Verfügung stehenden Messzeit nicht möglich. Eine Verschlechterung des Zustands der als besonders fragil eingestuften rechten Ecke des Reliefs konnte nicht beobachtet werden.

Anhand der gleichzeitig mitgemessenen Beschleunigungen zeigte sich einerseits, dass bei diesem Kunsttransport, der nach heutigen Standards und Möglichkeiten durchgeführt wurde, weitestgehend nur kleine Beschleunigungen auftreten. In Relation zu den geringen gemessenen Veränderungen am Objekt kann davon ausgegangen werden, dass die beobachteten Beschleunigungsamplituden mit ihren beobachteten statistischen Verteilungen für dieses Werk nur geringfügig schädigungsrelevante Auswirkungen haben. Dies ist insbesondere für Transporte ähnlicher Objekte von großem Interesse. Andererseits wurden jedoch auch vereinzelte unerwartete sehr hohe maximale Beschleunigungsamplituden beobachtet, die nur mit dem verwendeten sehr hochwertigem Messequipment überhaupt erfasst werden können. Einzelereignisse mit derart hohen Beschleunigungsamplituden müssen jedoch, wie die

### Dank

Großer Dank gilt dem Roemer- und Pelizaeus-Museum Hildesheim GmbH sowie KNAB Art Handling Spedition GmbH und ART SPED Schütz. Ein besonderer Dank geht auch an Christoph Krekel und die Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des 3D-Scanners (Förderungsnummern: KR 3118/1-2, OS 111/34-2).

#### Dr. phil. Carolin Heinemann

Staatsgalerie Stuttgart  
Konrad-Adenauer-Str. 30 – 32  
70173 Stuttgart  
[carolin.heinemann@staatsgalerie.bwl.de](mailto:carolin.heinemann@staatsgalerie.bwl.de)

#### Dr.-Ing. Pascal Ziegler

Institut für Technische und Numerische Mechanik,  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[pascal.ziegler@itm.uni-stuttgart.de](mailto:pascal.ziegler@itm.uni-stuttgart.de)

#### Prof. Dr. Jens-Arne Dickmann

Institut für Archäologische Wissenschaften,  
Archäologische Sammlung der Universität Freiburg  
Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg, Deutschland  
[jens-arne.dickmann@archaeologie.uni-freiburg.de](mailto:jens-arne.dickmann@archaeologie.uni-freiburg.de)

#### Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Institut für Technische und Numerische Mechanik,  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[peter.eberhard@itm.uni-stuttgart.de](mailto:peter.eberhard@itm.uni-stuttgart.de)

## Anmerkungen

- 1 BÄSCHLIN 2007, BÄSCHLIN ET AL. 2015, HEIN/KREKEL 2010
- 2 PIERACCINNI/GUIDI/ATZENI 2001
- 3 u. a. HEIN/KREKEL 2010, EIPPER 2010a, EIPPER 2010b, BARAZZETTI ET AL. 2010, SALONIA/MARCOLONGO/SCOLASTICO 2011, BELLENDORF ET AL. 2011, TRAUFFER 2012, ROBERTS/HALLET 2013, PALMA ET AL. 2019, HEIN 2016, MAIWALD/SCHNEIDER 2017, SCHMIK ET AL. 2018, SAHA ET AL. 2020, SAHA ET AL. 2021, HEINEMANN 2023
- 4 Ein metrisches Testobjekt besteht aus geometrischen Formen bekannter Abmessungen und kann zur Bewertung der Messgenauigkeit sowie zur Überprüfung der Kalibrierung optischer 3D-Messsysteme verwendet werden. Z. B. HESS/ROBSON/HOSSEININAVEH 2014
- 5 Dämpfungselemente, Typ SKIDMATE® - blau, Peli Products Germany GmbH
- 6 TRIAXIAL ACCELEROMETER, Typ PCB 356A03, PCB Piezotronics
- 7 Montagewachs PCB 080A109, PCB Piezotronics
- 8 ICP-Versorgungseinheiten PCB 482C15, PCB Piezotronics
- 9 Transientenrekorder DL850E, Yokogawa
- 10 Steinbichler Optotechnik GmbH
- 11 GÜHRING 2002
- 12 GODIN ET AL. 2001
- 13 AKCA ET AL. 2006, GUIDI ET AL. 2009, MATHYS ET AL. 2015

## Literatur

### AKCA ET AL. 2006:

Devrim Akca, Fabio Remondino, David Novak, Thomas Hanusch, Gerhard Schrotter und Armin Grün, Recording and modelling of cultural heritage objects with coded structured light projection systems. In: S. Campana, M. Forte (Hrsg.), Proceedings of the 2nd International Workshop, From Space to Place: 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, 04.-07. Dezember 2006, Rom. Oxford 2006 S. 375–382. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005748895> [Zugriff: 24.1.2025]

### BÄSCHLIN 2007:

Nathalie Bäschlin, Fragile Kunstwerke auf Reisen - Eine Risikoabschätzung am Beispiel von Paul Klees Ad Parnassum. In: C. Hopfengart und S. Vitali (Hrsg.), Ad Parnassum – auf dem Prüfstand. Kunsthistorische und konservatorische Fragen rund um ein berühmtes Bild. Schriftenreihe des Kunstmuseum Bern, Bd. 10. Bern 2007, S. 57–70

### BÄSCHLIN ET AL. 2015:

Nathalie Bäschlin, Matthias Lächli, Cornelius Palmbach, Anita Hoes, Marcel Ryser, Thomas Fankhauser und Katharina Sautter, Transport fragiler Gemälde – Forschungsergebnisse und Anwendungsbeispiele. In: Zeitschrift für Konservierung und Kunsttechnologie, Bd. 29(2), 2015, S. 211–236

### BARAZZETTI ET AL. 2011:

Luigi Barazzetti, Fabio Remondino, Marco Scaioni, Mauro Lo Brutto, Alessandro Rizzi und Raffaella Brumana, Geometric and Radiometric Analysis of Paintings. In: J. P. Mills, D. M. Barber, P. E. Miller und I. Newton (Hrsg.), Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium 'Close Range Image Measurement Techniques', 21.–24. Juni 2010, Newcastle upon Tyne. 2011, S. 62–67

### DREWELLO ET AL. 2011:

Rainer Drewello, Paul Bellendorf, Max Rahrig und Nils Wetter, 3D-Dokumentation mittelalterlicher Glasmalerei mit der Methode der 3D-Weißlicht-Streifenprojektion. In: F. Bornschein, M. Torge, M. Sabel, I. Feldmann, A. Kohl, N. Sterzing, O. Hahn, R. Drewello, N. Wetter, M. Rahrig und P. Bellendorf (Hrsg.), Konservierung mittelalterlicher Glasmalerei im Kontext spezieller materieller und umweltbedingter Gegebenheiten. Dom zu Erfurt St. Marien, Domkapitel 2010. Stuttgart 2011, S. 142–154.

EIPPER 2010a: Paul-Bernhard Eipper, Ölmalerei-Oberflächenuntersuchung mittels 3D-Streifenprojektion: Untersuchung unbehandelter und behandelter Ölmaleroberflächen durch das 3D-Streifenprojektionsverfahren auf Mikroskopiebasis. Dissertation Universität Witten/Herdecke. Saarbrücken 2010

EIPPER 2010b: Paul-Bernhard Eipper, Untersuchung unbehandelter und wässrig behandelter Ölmaleroberflächen: Messungen von Oberflächenveränderungen mit dem 3D-Streifenprojektionsverfahren. In: Restauro, Heft 2, 2010, S. 98–103

### GUIDI ET AL. 2009:

Gabriele Guidi, Fabio Remondino, Michele Russo und Alessandro Spinetti, Range sensors on marble surfaces: Quantitative evaluation of artifacts. In: F. Remondino, M. R. Shortis und S. F. El-Hakim (Hrsg.), Proceedings of SPIE Videometrics, Range Imaging, and Applications X, Bd. 744703, 2.–3. August 2009, San Diego (CA). Bellingham, Washington 2009, S. 1–12. <https://doi.org/10.1117/12.827251> [Zugriff: 24.1.2025]

### GODIN ET AL. 2001:

Guy Godin, Marc Levoy, Marc Rioux, Luc Cournoyer, Jean-Angelo Beraldin und Francois Blais, An assessment of laser range measurement on marble surfaces. In: National Research Council of Canada (Hrsg.), Proceedings of the 5th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, 01.–04. Oktober 2001, Wien. 2001. [http://graphics.stanford.edu/papers/marble-assessment/marbre\\_gg\\_final2e\\_coul.pdf](http://graphics.stanford.edu/papers/marble-assessment/marbre_gg_final2e_coul.pdf) [Zugriff: 24.1.2025]

### GÜHRING 2002:

Jens Gühring, 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart 2002

### HEIN/KREKEL 2010:

0Niclas Hein und Christoph Krekel, 3D-Weißlicht-Streifenprojektionsscanner zur Untersuchung von Transportschäden an Skulpturen. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Bd. 24(1), 2010, S. 146–159

### HEIN 2016:

Niclas Hein, Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren. Dissertation Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart. Stuttgart 2016

### HEINEMANN 2023:

Carolin Heinemann, Evaluation der Streifenprojektion zur Zustandsanalyse und zum Monitoring von Veränderungsprozessen bei Gemälden. Dissertation Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart. Stuttgart 2023

### HESS/ROBSON/HOSSEININAVEH AHMADABADIAN 2014:

Mona Hess, Stuart Robson und Ali Hosseininaveh Ahmadabadian, A contest of sensors in close range 3D imaging: performance evaluation with a new metric test object. In: F. Remondino, F. Menna (Hrsg.), ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Technical Commission V Symposium, Bd. XL-5, 23.–25. Juni 2014, Riva del Garda, 2014, S. 277–284. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-277-2014> [Zugriff: 24.1.2025]

### MAIWALD/SCHNEIDER 2017:

Ferdinand Maiwald und Danilo Schneider, Erfassung und Analyse dreidimensionaler Deformationen an Gemälden zur Unterstützung des Restaurierungsprozesses. In: Th. P. Kersten (Hrsg.), Kulturelles Erbe erfassen und bewahren – von der Dokumentation zum virtuellen Rundgang, 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 8.–10. März 2017, Würzburg. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Bd. 26. München 2017, S. 55–66

MATHYS ET AL. 2015: Aurore Mathys, Jonathan Brecko, Didier Van den Spiegel und Laurance Cammaert, 3D and Challenging Materials: Guidelines for Different 3D Digitalisation Methods for Museum Collections with Varying Material Optical Properties. In: G. Guidi, J. C. Torres, R. Scopigno, H. Graf, F. Remondino, P. Brunet, J. Barcelo, L. Durantani und S. Hazan (Hrsg.), Proceedings of the 2nd International Congress on Digital Heritage 2015, Bd. 1, 28. September–2. Oktober, Granada. Piscataway, New Jersey 2015, S. 19–26. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7413827> [Zugriff: 24.1.2025]

PALMA ET AL. 2019: Gianpaolo Palma, Paolo Pingi, Eliana Siotto, Roberto Bellucci, Gabriele Guidi und Roberto Scopigno, Deformation Analysis of Leonardo da Vinci's "Adorazione dei Magi" through Temporal Unrelated 3D Digitization. In: Journal of Cultural Heritage, Bd. 38, 2019, S. 174–185



- PERIACCINI/GUIDI/ATZENI 2001:** Massimiliano Pieraccini, Gabriele Guidi und Carlo Atzeni, 3D digitizing of cultural heritage. In: Journal of Cultural Heritage, Bd. 2, 2001, S. 63–70
- ROBERTS/HALLET 2013:** Zoe Roberts und Kathryn Hallett, 3D laser digitization for the condition monitoring of the Da Maiano terracotta roundels – five years on. In: D. Saunders, M. Strlic, C. Korenberg, N. Luxford und K. Birkholzer (Hrsg.), Laser in the Conservation of Artworks IX. London 2013, S. 240–242
- SAHA ET AL. 2020:** Sunita Saha, Piotr Forsys, Jacek Martusewicz und Robert Sitnik, Approach to Analysis the Surface Geometry Change in Cultural Heritage Objects. In: A. El Moataz, D. Mammass, A. Mansouri und F. Nouboud (Hrsg.), Image and Signal Processing. ICISP 2020 – Lecture Notes in Computer Science, Bd. 12119, Cham 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51935-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51935-3_1) [Zugriff: 24.1.2025]
- SAHA ET AL. 2021:** Sunita Saha, Anna Duda-Maczuga, Athanasia Papanikolaou und Robert Sitnik. Approach for Identification of Geometry Change on Cultural Heritage Surface. In: T. Bell, W. Puech, R. Sitnik (Hrsg.), 3D Imaging and Applications 2021, Electronic Imaging 2021, 18.–21. Januar 2021, Online-Tagung. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2021.18.3DIA-064> [Zugriff: 24.1.2025]
- SALONIA/MARCOLONGO/SCOLASTICO 2010:** Paolo Salonia, Andrea Marcolongo und Serena Scolastico, Experimentation of a three-focal photogrammetric survey system as non invasive technique for analysis and monitoring of painting surfaces decay condition. In: R. Radvan, J. F. Asmus, M. Castillejo, P. Pouli, A. Nevin (Hrsg.), Laser in the Conservation of Artworks VIII. London 2010, S. 185–190
- SCHMIK ET AL. 2018:** Jurij Schmik, Amandine Colson, Heidi Hastedt und Thomas Luhmann, Photogrammetrisches Monitoring und Deformationsanalyse der Bremer Hanse-Kogge. In: T. Luhmann, C. Schuhmacher (Hrsg.), Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Berlin 2018, S. 42–54
- TRAUFFER 2012:** Ruben Trauffer, 3D-Dokumentation von Kunst- und Kulturgut mittels Streifenprojektionsverfahren: Grundlagen und Fallstudien. Masterthesis. Hochschule der Künste Bern. Bern 2011

## Abbildungsnachweis

- Abb. 1, 8 rechts, 9 rechts, 10 rechts: Jasmin Hartmann, Archäologische Sammlung der Universität Freiburg
- Abb. 2–7, 8 links, 9 links, 10 links, 11: Institut für Technische und Numerische Mechanik
- Titel:** Detail aus Abb. 8a

## Lizenz

Dieser Beitrag ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 4.0 veröffentlicht.

