

# ÖZKD

Österreichische Zeitschrift für  
Kunst und Denkmalpflege

LXXV • 2021 • Heft 1/2

Das imaginäre „Retabel“

Linie, Form und Farbe – Zusammenhänge von  
Steinbildwerk und Wandmalerei

Albrecht Dürer und die Unterzeichnung

Nürnberger in Wien – Wiener in Nürnberg

Bildbasierte 3D-Modellierung der Wandmalerei

## ALBRECHT DÜRER IN WIEN? Die Illusion eines Flügelaltars im Stephansdom



TITELBILD:

Gesicht der hl. Margareta, rechter Flügel des Wandbildes in der Bischofstorvorhalle, St. Stephan, Wien

Foto: Erwin Pokorny

Umschlaggestaltung: Bundesdenkmalamt, Markus Santner, Johannes Thaler

# Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege

LXXV · 2021 · HEFT 1/2

VERLAG BERGER · HORN/WIEN

Die „ÖSTERREICHISCHE ZEITSCHRIFT FÜR KUNST UND DENKMALPFLEGE“

erscheint in der Nachfolge der „Mittheilungen der k. k. Central-Commission zur Erforschung und Erhaltung der Baudenkmale“ (Band I / 1856 – Band XIX / 1874), der „Mittheilungen der k. k. Central-Commission zur Erforschung und Erhaltung der Kunst- und historischen Denkmale“, Neue Folge (Band I / 1875 – Band XXVIII / 1902), der „Mittheilungen der k. k. Central-Commission für Erforschung und Erhaltung der Kunst- und historischen Denkmale“, III. Folge (Band I/1902 – Band IX/1910), der „Mitteilungen der k. k. Zentral-Kommission für Denkmalpflege“, III. Folge (Band X / 1911 – Band XVI / 1918), der „Mitteilungen des Staatsdenkmalamtes“ (Band I / 1919, der ganzen Folge Band 63), der „Mitteilungen des Bundesdenkmalamtes“ (Band II / 1924, der ganzen Folge Band 64–68), der „Zeitschrift für Denkmalpflege“ (Band I / 1926/27 – Band III / 1928/29), der Zeitschrift „Die Denkmalpflege: Zeitschrift für Denkmalpflege und Heimatschutz“ (Band IV / 1930 – Band VII / 1933), der Zeitschrift „Deutsche Kunst und Denkmalpflege“ (Band VIII / 1934 – Band XVI / 1944), der Zeitschrift „Österreichische Zeitschrift für Denkmalpflege“ (Band I / 1947 – Band V / 1951) und erscheint ab dem Jahrgang 1952 (Band VI) unter dem Titel „Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege“.

Die vorliegende Publikation basiert auf dem Forschungsprojekt  
„Dürerzeitliche Wandmalerei im Wiener Stephansdom“ (2018-2021).  
Projektleitung: Markus SANTNER

IMPRESSUM:

Herausgeber: Bundesdenkmalamt, PAUL MAHRINGER

Konzeption und inhaltliche Redaktion: Markus SANTNER, Michael RAINER, Bernd EULER-ROLLE  
Verantwortliche Redaktion: Johannes THALER

Satz und Layout: Martin Spiegelhofer, Berger-Crossmedia

Hersteller: Druckerei Berger, Horn  
ISSN: 0029-9626

# Inhalt

- 5 *Markus Santner*  
Vorwort
- 7 *Bernd Euler-Rolle / Markus Santner*  
Zum Projekt „Dürerzeitliche Wandmalerei im Wiener Stephansdom“ – Die Denkmalpflege und die Wissenschaften
- 11 BILDSTRECKE
- BEITRÄGE
- 51 *Franz Zehetner*  
Das Bischofstor im Wiener Stephansdom als Ort fürstlicher, privater und staatlicher Repräsentation
- 63 *Michael Rainer*  
Das imaginäre „Retabel“. Die frühneuzeitliche Interdependenz von Plastischem und Gemaltem in der Vorhalle des Bischofstores in St. Stephan in Wien
- 77 *Markus Santner / Robert Linke / Anna Luib / Christoph Herm*  
Linie, Form und Farbe – Werktechnische Zusammenhänge von Steinbildwerk und Wandmalerei in der Form eines Flügelaltars um 1511 im Wiener Stephansdom
- 97 *Erwin Pokorny*  
Albrecht Dürer und die Unterzeichnung in der Bischofstor-Vorhalle des Wiener Stephansdomes
- 119 *Thomas Schauerte*  
Nürnberger in Wien – Wiener in Nürnberg. Das Netzwerk hinter den Wandmalereien beim Bischofstor des Stephansdoms
- 131 *Renate Kohn, unter Mitarbeit von Christina Wais-Wolf*  
Memoria und veneratio im Stephansdom – Der „Schrein“ des „Flügelaltars“ in der Vorhalle des Bischofstors
- 145 *Jörg Riedel / Markus Santner / Robert Linke*  
Die Konservierung und Restaurierung des Wandbildes in der Bischofstorvorhalle von St. Stephan – eine Wiederentdeckung
- 153 *Annette T. Keller / Roland Lenz*  
Reflexion, Absorption und Lumineszenz – Strahlendiagnostische Phänomene zu kompositionellen, maltechnischen und materialspezifischen Fragestellungen am Wandbild in der Vorhalle des Bischofstores im Wiener Stephansdom
- 163 *Geert Verhoeven / Markus Santner / Immo Trinks*  
Bildbasierte 3D-Modellierung der Wandmalerei in der Bischofstorvorhalle im Wiener Stephansdom

175	ENGLISH ABSTRACTS / ENGLISCHE KURZFASSUNGEN
178	MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER DIESES HEFTES
180	ABBILDUNGSNACHWEIS

# Bildbasierte 3D-Modellierung der Wandmalerei in der Bischofstorvorhalle im Wiener Stephansdom

Die Mitarbeiter des Wiener Ludwig Boltzmann Instituts für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie wurden im November 2019 von Frau Dr. Renáta Burszan im Rahmen des Forschungsprojektes „Dürerzeitliche Wandmalerei im Wiener Stephansdom“<sup>1</sup> kontaktiert bezüglich der Möglichkeiten, das Wandbild in der Bischofstorvorhalle im Wiener Stephansdom mit nicht-invasiven Methoden, wie beispielsweise hochauflösenden Bodenradarmessungen, untersuchen zu können. Die Wandmalerei zeigt ein gemaltes Tritptychon, welches aus zwei verschiedenen Malphasen (Phase 1 um 1510; Phase 2 circa 1515 – circa 1580) besteht. Die ältere umliegende Malerei setzt sich zusammen aus zwei Flügeln mit jeweils einer stehenden weiblichen Heiligenfigur und einer Art Predella mit wappenhaltenden Putti. Die jüngere Malerei innen als Schrein zeigt eine stehende männliche Heiligenfigur mit einem Kirchenmodell und in der Predellazone einen knieenden Stifter und einen Putto. Dementsprechend besitzt das Wandbild auch zwei unterschiedliche Putzflächen, die durch eine auffallende Putzkante voneinander getrennt sind.<sup>2</sup> Diese Putzkante bildet den Umriss eines Epitaphs, der ursprünglich mit sehr großer Wahrscheinlichkeit während der ersten Malphase montiert gewesen ist. Eine der Fragestellungen war daher, ob sich im Untergrund Spuren einer Befestigung eines Epitaphs nachweisen ließen. Im Zuge restauratorischer Untersuchungen der Wandoberfläche mittels Streiflicht konnten an bestimmten Stellen bereits Deformationen und starke Rissbildungen im Malputz festgestellt werden. An einigen der vermuteten Verankerungspositionen des Epitaphs konnten durch eine aktive Infrarot-Thermografie thermische Anomalien festgestellt werden, die jedoch nicht an allen Stellen eindeutig

interpretiert werden konnten.<sup>3</sup> Während der Einsatz von sehr hochfrequenten Bodenradarantennen (1,3 GHz oder höher), welche in einem dichten Messraster über die zu untersuchende Fläche geführt werden müssten, hier unter Umständen Klarheit verschaffen könnte, wurde vorgeschlagen, zunächst die Oberfläche selber hochauflösend dreidimensional zu erfassen. Ein detailliertes Oberflächenmodell könnte als Grundlage für die Analyse von bisher noch nicht durchgeführten höchstauflösenden Radarmessungen dienen.<sup>4</sup> Daher wurde beschlossen, experimentell die entsprechende Oberfläche, welche mit einer Wandmalerei bedeckt ist, über ein bildbasiertes Verfahren dreidimensional zu dokumentieren.

Der folgende Abschnitt bietet eine kurze Einführung zu den wesentlichen Grundlagen der bildbasierten dreidimensionalen Oberflächenmodellierung. Anschliessend werden die projektspezifischen Schritte zur fotografischen Datenaufnahme, -bearbeitung und -visualisierung beschrieben. Eine Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit aus kunstwissenschaftlicher Sicht sowie eine Präsentation des Forschungspotentials, das sich aus der geometrischen Analyse detaillierter digitaler Oberflächenmodelle ergibt, beschließt diesen Beitrag.

<sup>3</sup> Ebenda.

<sup>4</sup> Die Idee, mittels eines einfachen Metalldetektors für das Aufspüren von E-Leitungen die in der IR-Thermografie nicht eindeutig interpretierbaren, ursprünglichen Verankerungen des Epitaphs zu verifizieren, brachte keine weiteren Erkenntnisse. Die verfüllten Verankerungslöcher und damit einhergehenden Strukturveränderungen im Mauerwerk hätten eventuell noch mit einer hochfrequenten Radarantenne nicht-invasiv untersucht werden können, was aufgrund von Zeit- und Kostengründen bisher noch nicht umgesetzt wurde.

<sup>1</sup> Siehe dazu den Beitrag *Euler-Rolle / Santner* in diesem Band.

<sup>2</sup> Siehe dazu den Beitrag *Santner et al.* in diesem Band.

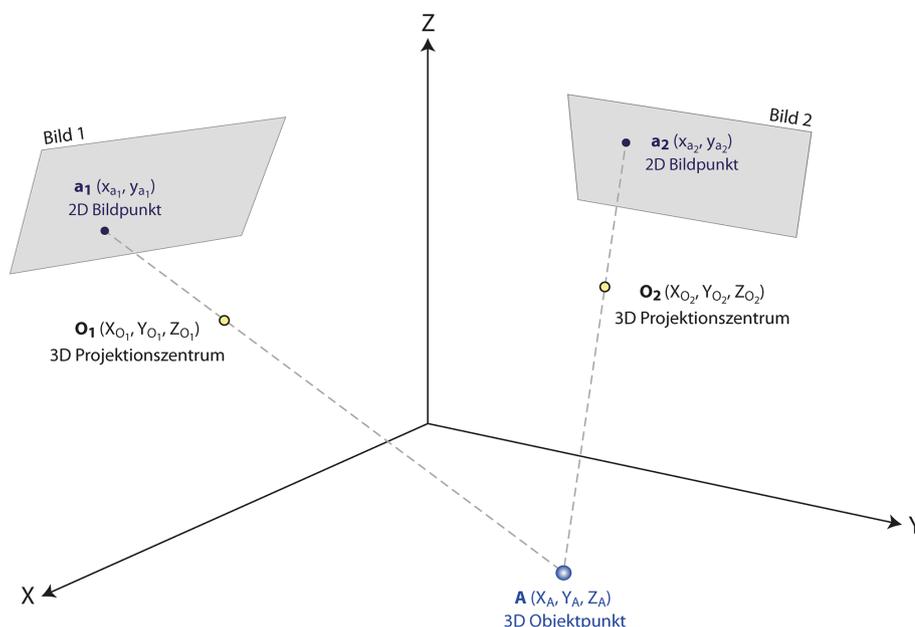


Abb. 1: Das Prinzip der Triangulierung zur bildbasierten 3D-Oberflächenmodellierung

## BILDBASIERTE 3D-OBERFLÄCHEN-MODELLIERUNG

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die dreidimensionale (3D) Oberflächengeometrie eines Objektes zu digitalisieren. Ein möglicher Ansatz ist die bildbasierte 3D-Oberflächenmodellierung, auf Englisch „Image-Based Modelling“ (IBM) genannt. Image-Based Modelling umfasst verschiedene Techniken, die alle darauf basieren, dass ein zu digitalisierendes 3D-Objekt von verschiedenen Orten aus fotografiert wird, um anschließend aus den Bildaufnahmen digitale 3D-Oberflächendaten zu extrahieren. Image-Based Modelling stand sowohl im Fokus der Forschungsfelder der Fotogrammetrie<sup>5</sup> als auch der Computervision.<sup>6</sup> Daraus hervorgehend haben sich in den vergangenen zehn Jahren hybride, fotogrammetrische und Computervision-basierte Ansätze<sup>7</sup> zur dreidimensionalen Dokumentation von Kulturdenkmälern und –gütern durchgesetzt. Diese hybriden Ansätze beruhen im Kern auf fotogrammetrischen Prinzipien und stützen sich hauptsächlich auf die aus dem Bereich der Computervision kommenden Algorithmen „Structure from Motion“ (SfM) (Struktur aus Bewegung) und „Multi-View-Stereo“ (Stereoskopie aus

multiplen Bildaufnahmen), welche es erlauben, digitale 3D-Oberflächen aus überlappend aufgenommenen Fotos zu berechnen.

Die Extrahierung einer digitalen 3D-Oberfläche aus einem Satz von Fotografien wird über das Prinzip der Triangulierung ermöglicht (Abb. 1). Diese erlaubt es eine „Sichtverbindung“, das heißt einen „optischen Strahl“ zwischen jedem 2D-Pixel (Bildpunkt) eines digitalen Bildes, dem optischen Zentrum oder Projektionszentrum der Kamera, die dieses Bild erzeugt hat, und den realen Objektpunkten, welche diese Pixel darstellen, abzuleiten. Nehmen wir an, dass sich die optischen Strahlen von mindestens zwei Pixeln, zugehörig zum selben realen Oberflächenpunkt, in zwei verschiedenen Fotos, welche von unterschiedlichen Positionen aus aufgenommen wurden, kreuzen, so können mathematisch die 3D-Koordinaten jenes Objektpunktes berechnet werden, der sich an diesem Schnittpunkt befindet (Abb. 1). Damit dieses Prinzip funktionieren kann ist es notwendig, die Position und Ausrichtung der Kamera im dreidimensionalen Raum während der Bildaufnahme zu kennen. Diese sechs Parameter werden als die äußere Orientierung der Kamera bezeichnet. Darüber hinaus muss man auch die bildgebende Geometrie des abbildenden Systems, d.h. der Kamera, bekannt sein, welche die innere Orientierung genannt wird.

Ein SfM-Algorithmus kann die Parameter der äußeren und inneren Kameraorientierung automatisch dann bestimmen, wenn die Fotografien zu einem hohen Grad überlappen und die Bilder nach bestimmten Regeln aufgenommen wurden. Um dies zu erreichen, stützt sich SfM

<sup>5</sup> Karl Kraus, Photogrammetry: Geometry from images and laser scans, Berlin-New York 2007, S. 459.

<sup>6</sup> Richard Szeliski, Computer vision: Algorithms and applications. Texts in Computer Science, New York 2011, S. 812.

<sup>7</sup> Wolfgang Förstner / Bernhard P. Wrobel, Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction, Geometry and Computing 11, Cham 2016, S. 816.

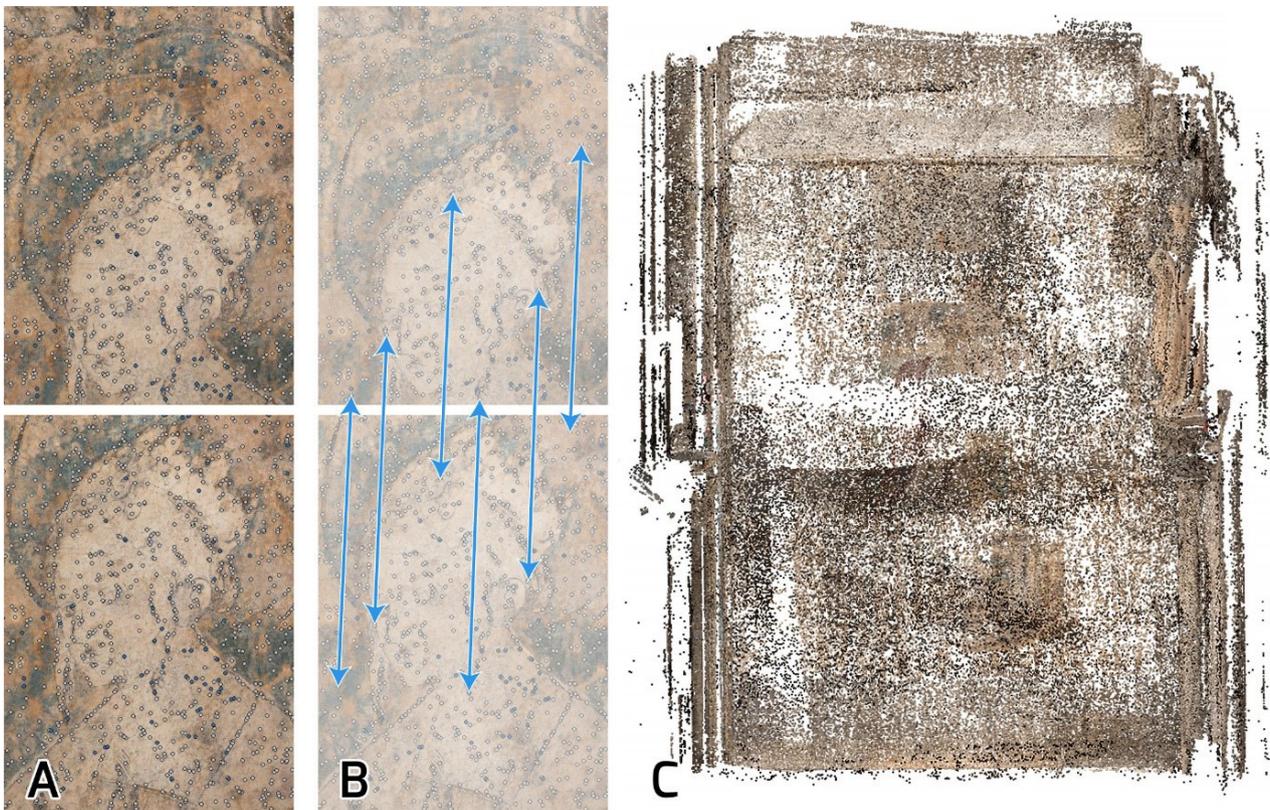


Abb. 2A: Von der Software Metashape automatisch erkannte Merkmalspunkte in zwei überlappenden Bildern; blaue Kreise: Verknüpfungspunkte/ Merkmalspunkte, die in mindestens zwei Fotos gefunden wurden; graue Kreise: Merkmalspunkte, für die der SfM-Algorithmus keine Übereinstimmung unter den anderen Fotos finden konnte; B: Übereinstimmungen zwischen Verknüpfungspunkten; C: Visualisierung der spärlichen Punktwolke an Verknüpfungspunkten, die als Nebenprodukt des SfM-Algorithmus erzeugt wurde

auf Algorithmen, welche lokale 2D-Merkmalspunkte in jedem Bild erkennen (Abb. 2A) und mathematisch mit einem Deskriptor beschreiben. Alle Deskriptoren werden zwischen allen Bildern des Bildsatzes abgeglichen, indem jeder Merkmalspunkt eines Bildes mit den anderen Merkmalspunkten der übrigen Bilder verglichen wird. Ein sogenannter Verknüpfungspunkt wird gefunden, wenn zwei Deskriptoren übereinstimmen (Abb. 2A). Mit diesem Satz an Verknüpfungspunkten als Eingabe kann dann die äußere und innere Orientierung der Kamera für diese Aufnahmen durch den SfM-Algorithmus bestimmt werden. Dieser Prozess erzeugt dabei auch eine spärliche Wolke von Objektpunkten. Jeder dieser Punkte repräsentiert die Position eines gültigen Bildverknüpfungspunktes im dreidimensionalen Raum (Abb. 2C). Sobald die äußeren und inneren Orientierungen der Kamera für alle Bilder bekannt sind, können die optischen Strahlen aller Pixel sämtlicher Aufnahmen bestimmt werden. Eine dichte 3D-Oberfläche wird dann am Schnittpunkt der Strahlen gefunden, die von Pixeln ausgehen, welche denselben Objektpunkt darstellen. Dieser Prozess der dichten 3D-Geometrieextraktion wird durch den Multi-View-Stereo-Algorithmus realisiert.

## BILDAUFNAHME

### *Fotografischer Aufbau*

Die fotografische Aufnahme des Wandbildes im Stephansdom fand am 9. November 2020 statt. Mit einer Nikon D750 24-Megapixel Spiegelreflexkamera wurden konventionelle RGB-Farbfotos aufgenommen, die den Anteil der reflektierten sichtbaren Strahlung digital darstellen. Das Nikon-Gehäuse war mit einem Tamron SP 24–70 mm F/2.8 Di VC USD Objektiv ausgestattet. Die Brennweite des Objektivs wurde bei 24 mm arretiert und der Fokusring mit Klebeband bei einem Fokussierungsabstand von circa 43 cm – gemessen vom optischen Zentrum des Objektivs – fixiert. Diese Kamera-Objektiv-Kombination wurde auf einer Stereostange montiert, an deren linker Seite ein Godox AD200 Pro Taschenblitzgerät angebracht war. Das Blitzgerät bestand aus dem runden Godox H200R Blitzkopf mit aufgesetztem Kuppeldiffusor. Eine Godox X2T Funk-Fernsteuerung, die auf dem Blitzschuh der D750 montiert war, steuerte und löste das Blitzgerät kabellos aus. Diese Anordnung ermöglichte eine Belichtungszeit von 1/200 s, was sicher-



Abb. 3: Der orange Farbstich der Originalfotos und der Beleuchtungsgradient (sichtbar in A) wurden in den bearbeiteten Bildern (sichtbar in B) entfernt

stellte, dass kamerabedingte Bewegungsunschärfen verursacht durch das händische Halten der Kamera die Aufnahmen nicht negativ beeinflussen konnten. Letztere wurden als verlustfrei komprimierte 14-Bit-RAW-Bilder bei ISO 100 aufgenommen. Eine Blende von  $f/11$  sorgte für ausreichende Tiefenschärfen bei gleichzeitiger Vermeidung unnötiger Beugungsunschärfe.

Erwähnenswert ist, dass die Kombination aus Blitzlicht und kurzer Verschlusszeit jegliches Umgebungslicht ausschaltete, d. h. es gab effektiv nur eine Beleuchtungsquelle für die Bildaufnahmen. Letzteres ist für die exakte Bestimmung des Weißabgleichs der Fotos unerlässlich (Abb. 3A und B). Ungeachtet dieses korrekten Weißabgleichs muss betont werden, dass die Fotos mit Blick auf eine optimale 3D-Oberflächenmodellierung und nicht auf Farbgenauigkeit aufgenommen wurden. Um farbgetreue Aufnahmen zu erzielen bräuchte man einen anderen Beleuchtungsaufbau mit mindestens zwei stativgestützten Blitzköpfen in großen Softboxen. Ein solcher studioähnlicher Beleuchtungsaufbau würde jedoch die Bildaufnahme immens erschweren und den Zeitaufwand erheblich verlängern, da man das Wandbild nur über ein provisorisches Gerüst mit schmalen Holzbrettern aus der Nähe abfotografieren kann. Außerdem würde man eine suboptimale Bildverteilung für die 3D-Oberflächenextraktion riskieren, da die Beleuchtungsstative die Positionierung der Kamera stören könnten. Diese Überlegungen führten zur Verwendung des Stereobalken-Aufbaus mit einem drahtlos ausgelösten Taschenblitz auf der linken Seite der Kamera. Abb. 3a zeigt, dass diese Einzelblitzlösung trotz der Verwendung eines Kuppeldiffusors in jeder Aufnahme einen deutlichen Beleuchtungsgradienten erzeugte. Obwohl dieser Gradient bei der Konvertierung jedes RAW-Fotos in das endgültige

JPEG-Bild weitgehend entfernt wurde (Abb. 3A),<sup>8</sup> kann diese Vorgehensweise keine Farbgenauigkeit garantieren.

#### *Verteilung der Kamerapositionen*

Viele Projekte die Image-Based Modelling für die Digitalisierung von kulturell bedeutenden Objekten einsetzen, haben kein anderes explizites Ziel, als die „bloße Erzeugung eines 3D-Modells“. Um jedoch eine 3D-Oberfläche mit einer bestimmten Genauigkeit, Vollständigkeit und einem gewissen Grad an räumlicher Detaillierung zu erreichen, müssen die Aufnahmen auch nach bestimmten Richtlinien erfasst werden. Einer der wichtigsten Parameter ist dabei die räumliche Auflösung der Bilder, da diese die geometrischen Details definiert, welche in der modellierten 3D-Oberfläche sichtbar sein werden. Die räumliche Bildauflösung ist ein komplizierter Begriff.<sup>9</sup> Einer seiner wichtigsten bestimmenden Faktoren ist die sogenannte „Ground Sampling Distance“ (Abstand der abgetasteten Punkte auf der abgebildeten Fläche; Abb. 4).

Die Ground Sampling Distance (GSD) ist ein geometrisches Konzept. Dies wird deutlich, wenn man einige der anderen Variablen betrachtet, welche die Geometrie der Fotoaufnahme beschreiben (Abb. 4). Ein bildgebender Sensor in einer digitalen Fotokamera besteht aus einer zweidimensionalen Anordnung einzelner Sensorelemente, wobei der Elementabstand, der sogenannte photosite pitch  $p$ , dem Abstand vom Zentrum einer Photosite zum Zentrum eines benachbarten

<sup>8</sup> Siehe dazu auch den Abschnitt zur Entwicklung der RAW-Dateien.

<sup>9</sup> Geert J. J. Verhoeven, Resolving some spatial resolution issues – Part 1: Between line pairs and sampling distance, AARGnews 57, 2018, S. 25–34.– Geert J. J. Verhoeven, Resolving some spatial resolution issues – Part 2: When diffraction takes over, AARGnews 59, 2019, S. 12–23.

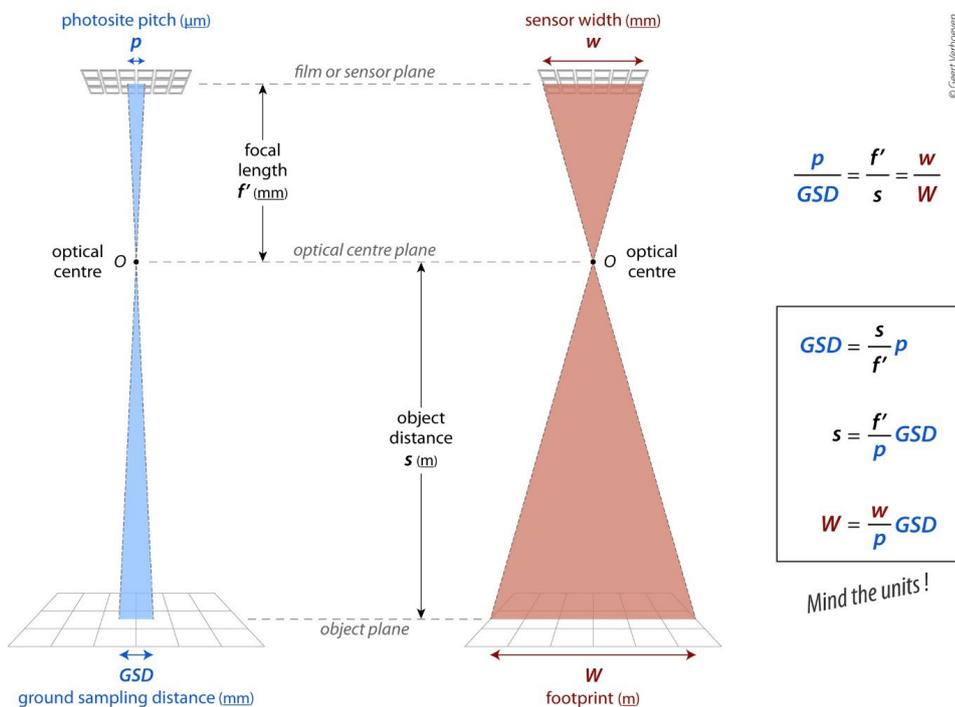


Abb. 4: Ableitung der rein geometriebasierten Gleichungen, die für alle Arten der optischen Abbildung grundlegend sind

Elements entspricht. Der Sensor befindet sich immer in einem bestimmten Abstand zum Projektions- oder optischen Zentrum  $O$  des abbildenden Systems. Dieser Abstand ist gleich der Brennweite  $f'$  (engl. focal length) des Objektivs. Der Abstand zwischen dem optischen Zentrum und der fotografierten Szene ist die Objektweite  $s$  (engl. object distance). Kennt man den photosite pitch  $p$ , die Objektivbrennweite  $f'$  und die Objektweite  $s$ , so kann man die GSD der Abbildungssituation berechnen. Abb. 4 zeigt, dass die GSD einem bestimmten Abstand – gemessen auf der Oberfläche des abgebildeten Objektes – entspricht, der sich aus der Projektion des photosite pitches auf das Objekt ergibt. Da die GSD den horizontal oder vertikal gemessenen Szenenabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abtaststellen angibt (und jedes Bildpixel einem dieser Abtastpunkte entspricht), ist die GSD einer der Schlüsselfaktoren für die Bestimmung der räumlichen Auflösung eines Bildes (neben Objekt-contrast, Objektivqualität, Beleuchtung usw.).

Das Ziel der Oberflächendigitalisierung dieses Wandbildes war, ein 3D-Modell zu erstellen, welches alle geometrischen Details gleich oder größer als 0,25 mm darstellen kann. Da zur Auflösung eines räumlichen Merkmals zwei bis drei Pixel erforderlich sind, benötigten die Aufnahmen eine GSD von 0,125 mm oder geringer. Bei einem Objekt-Abstand von 43 cm (was den oben erwähnten Fokussierabstand von 43 cm erklärt) konnte eine GSD von 0,1 mm erreicht werden:

$$\frac{43 \text{ cm}}{24 \text{ mm}} \cdot 6 \mu\text{m} = \frac{430 \text{ mm}}{24 \text{ mm}} \cdot 0,006 \text{ mm} = 0,1 \text{ mm}$$

Da die bildbasierte 3D-Oberflächenextraktion auf einer Kombination von Structure-from-Motion- und Multi-View-Stereo-Ansätzen beruht, ist eine hohe Bildüberlappung von größter Bedeutung. Das gesamte Wandbild wurde mittels 25 fotografischen Aufnahmesäulen, bestehend aus jeweils etwa 100 Bildern, abgedeckt (Abb. 5). Diese 2.500 Bilder decken in etwa eine Fläche von 2,4 m mal 3,6 m ab, was einer Überlappung von circa 92% innerhalb einer Säule (in Längsrichtung), und von 85% senkrecht zur Säule (lateral) entspricht. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei diesen Angaben um globale Durchschnittswerte handelt; Längs- und Lateralüberlappungen zwischen benachbarten Aufnahmen sind nicht unveränderlich, sondern variieren geringfügig aufgrund der handgeführten Bildaufnahme während der gesamten Bilderfassung (Abb. 5). Die Kamera war querformatig ausgerichtet und hatte bei allen 2.500 Aufnahmen ihre optische Achse senkrecht zur Wandfläche. Fast 300 Bilder ergänzten diesen Bildsatz: konvergente Aufnahmen (d.h. mit geneigter optischer Achse) und Aufnahmen, bei denen die Kamera um 180°, 90° im bzw. 90° gegen den Uhrzeigersinn um ihre optische Achse gedreht wurde. Einige dieser Aufnahmen wiesen auch einen vergrößerten Objekt-Abstand auf. Diese Änderung des Bildmaßstabs (innerhalb und zwischen den Bildern) und die Kameradrehung ist wichtig um die Genauig-



Abb. 5: Verteilung der Kamerapositionen für die 2.790 Aufnahmen vor dem Wandbild; die beiden horizontalen Lücken zeigen die Position der Gerüstbretter an; die Aufnahme einer weiteren vertikalen Reihe an Fotos ganz links wäre wünschenswert gewesen, wurde aber durch das Gerüst und die angrenzende Wand verhindert

keit der vom SfM-Algorithmus berechneten inneren und äußeren Orientierungen zu erhöhen. Abb. 5 zeigt die äußere Orientierung aller 2.790 Fotos (mit anderen Worten: sie zeigt die Kamerapositionen von denen aus die Fotos aufgenommen wurden).

## DATENBEARBEITUNG

### *Entwicklung der RAW-Dateien*

Nachdem alle RAW-Dateien mit Metadaten versehen worden waren, wurden sie mit Adobe Photoshop Lightroom Classic 10.1 in 8-Bit-JPEGs „entwickelt“. Während dieser Konvertierung wurde der Weißabgleich anhand eines Satzes an Fotos durchgeführt, welche ein X-Rite

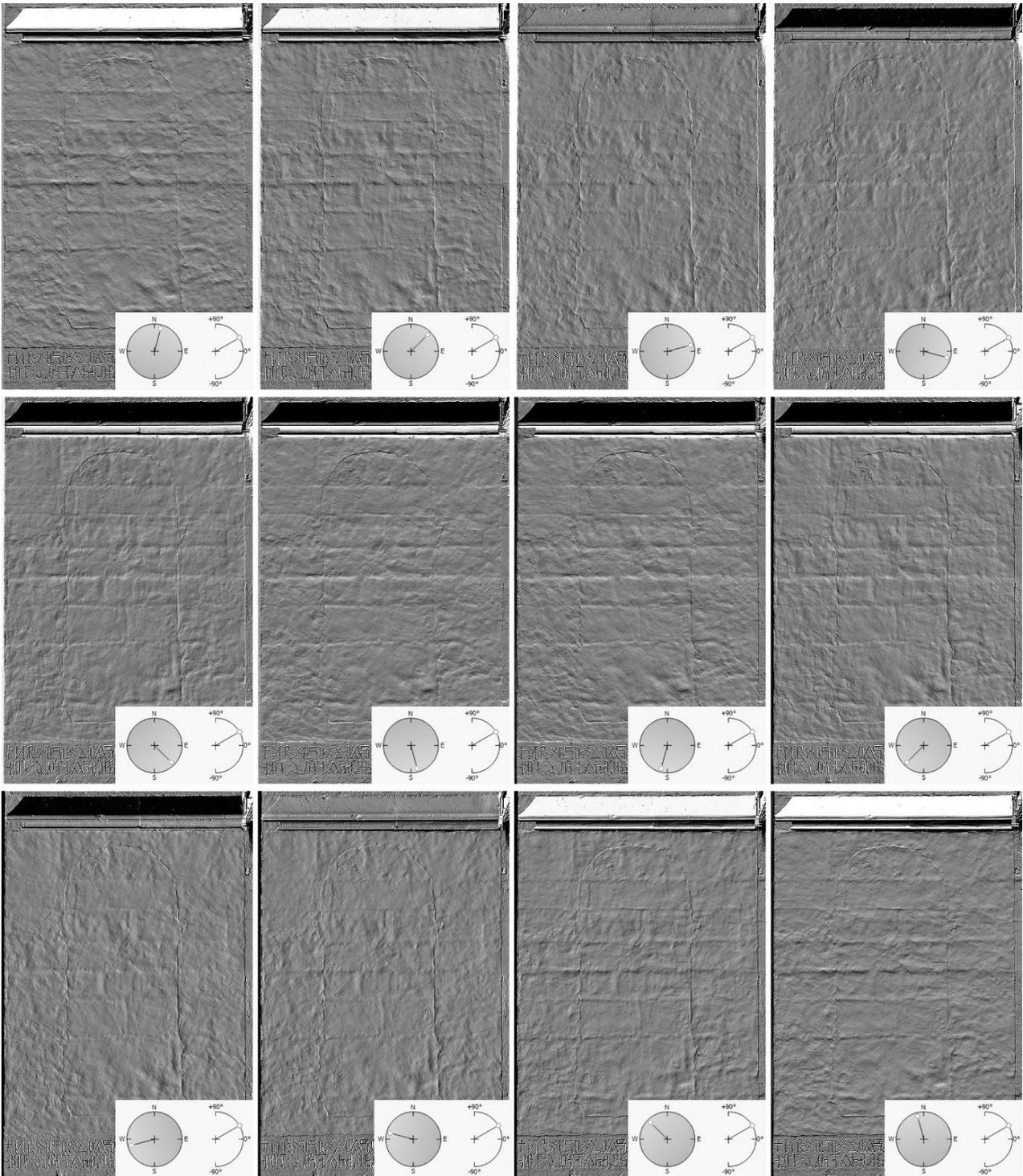


Abb. 6: Visualisierung der 2,5D-Bildfläche als Hillshading-Darstellungen; die Höhe der Beleuchtungsquelle wird konstant bei  $30^\circ$  gehalten, während ihr Azimut in  $30^\circ$ -Schritten verändert wird (die jeweiligen Beleuchtungsrichtungen werden durch die Kompasseneinschübe dargestellt); der Kontrast aller Hillshade-Darstellungen wurde erhöht, um die Sichtbarkeit zu verbessern

ColorChecker-Passfoto zeigen. Diese Bilder unterstützten auch die Erstellung eines Kamera-DNG-Profiles mit der Software ColorChecker Camera Calibration 2.0.0 von X-Rite. Nach Anwendung dieses Profils auf alle Fotos

wurden die Objektiv-Vignettierung sowie der durch das einzelne Blitzgerät verursachte Beleuchtungsgradient entfernt (Abb. 3). Die durch das Objektiv verursachte geometrische Bildverzerrung wurde belassen, da sie im

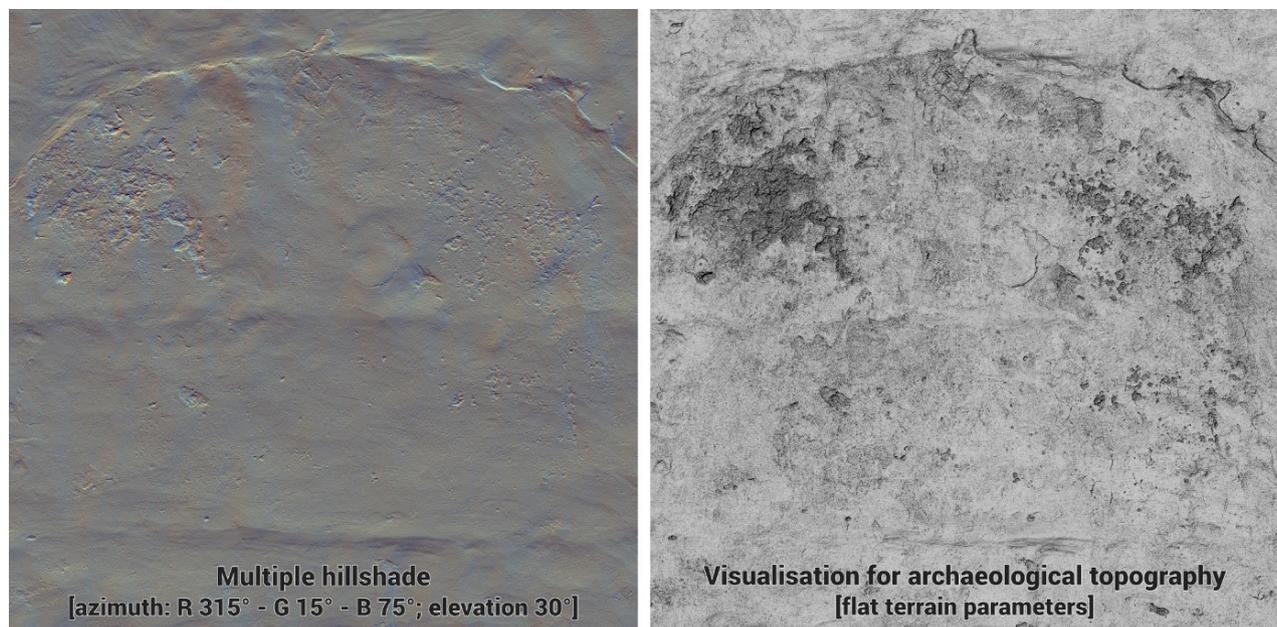


Abb. 7: Zwei unterschiedliche Techniken zur Visualisierung desselben Ausschnitts der digitalisierten Wandoberfläche

SfM-Schritt des Image-Based Modelling-Verfahrens berücksichtigt wird.

#### *Bildbasierte 3D-Oberflächenmodellierung*

Es gibt viele verschiedene Softwarepakete für Struktur-from-Motion/Multi-View-Stereo-Anwendungen. Dieser Bildsatz wurde mit Agisoft Metashape Professional 1.7.0 bearbeitet. Innerhalb von Metashape wurde für den SfM-Schritt eine Begrenzung für die maximale Anzahl an Merkmalspunkten von 40.000 und eine Limitierung auf 4.000 Verknüpfungspunkte für jedes Foto verwendet. Die berechnete äußere Orientierung (d.h. die Position und Winkeldrehung der Kameras im Raum) ist in Abb. 5 dargestellt. Da die Ausgabe eines jeden SfM-Algorithmus in einem beliebigen Koordinatenreferenzsystem ausgedrückt wird, entspricht das 3D-Modell der realen Szene bis auf einen globalen Skalierungsfaktor drei Rotationen und drei Translationen. Ein absoluter Maßstab wurde für das Image-Based Modelling-Ergebnis anhand von vier Abständen ermittelt, die *in situ* mit einem Glasfasermaßband gemessen wurden, welches vollständig in Millimeterskalierung eingeteilt war. Die horizontalen und vertikalen Abstände überstiegen jeweils die maximale Breite und Höhe des Wandbildes, um den Skalierungsfehler zu minimieren. Nach der Bestimmung dieser Abstände auf dem 3D-Modell betrug der quadratische Mittelwert des Skalierungsfehlers 0,8 mm, was bedeutet, dass man reale Abstände auf der 3D-Oberfläche mit Millimetergenauig-

keit messen kann. Anschließend wurde das skalierte 3D-Oberflächenmodell gedreht, bis es in einem kartesischen XYZ-Koordinatensystem ausgerichtet war, dessen Ursprung links unten im Bild liegt. Die X-Achse verläuft parallel zur unteren Kante des Wandbildes, während die Z-Achse in Richtung der längsten Bildseite zeigt (Abb. 5). Die Y-Achse gibt also die Tiefe des Wandbildes an. Da die Oberfläche des Bildes als nahezu perfekt vertikal angenommen wird, befindet sich der größte Teil der digitalen Oberfläche bei  $Y = 0$ .

Das skalierte und gedrehte Ergebnis des SfM-Prozesses diente als Eingabe für den nachfolgenden Multi-View-Stereo-Schritt. Nach Ausschluss aller Fotos mit einem Objektstand von mehr als 43 cm, oder einer sehr schrägen Aufnahmeorientierung, wurde das dichte 3D-Oberflächenmodell aus den verbleibenden 2.684 Fotos berechnet. Einige angrenzende architektonische Elemente wurden herausgeschnitten, was zu einem endgültigen 3D-Modell bestehend aus etwa 121 Millionen Dreiecksflächen führte, welche die Oberfläche des Wandbildes, die Inschrift darunter und das hervorstehende architektonische Element darüber darstellen (Abb. 5).

#### *Ableitungen: 2,5D-Raster und Orthofoto-Mosaik*

Die resultierende 3D-Oberfläche wurde in eine 2,5D-Rasterfläche mit einer Zellengröße von 0,1 mm umgewandelt. Obwohl eine 2,5D-Rasterdatei nur einen Höhenwert pro Zelle speichert (und somit nicht

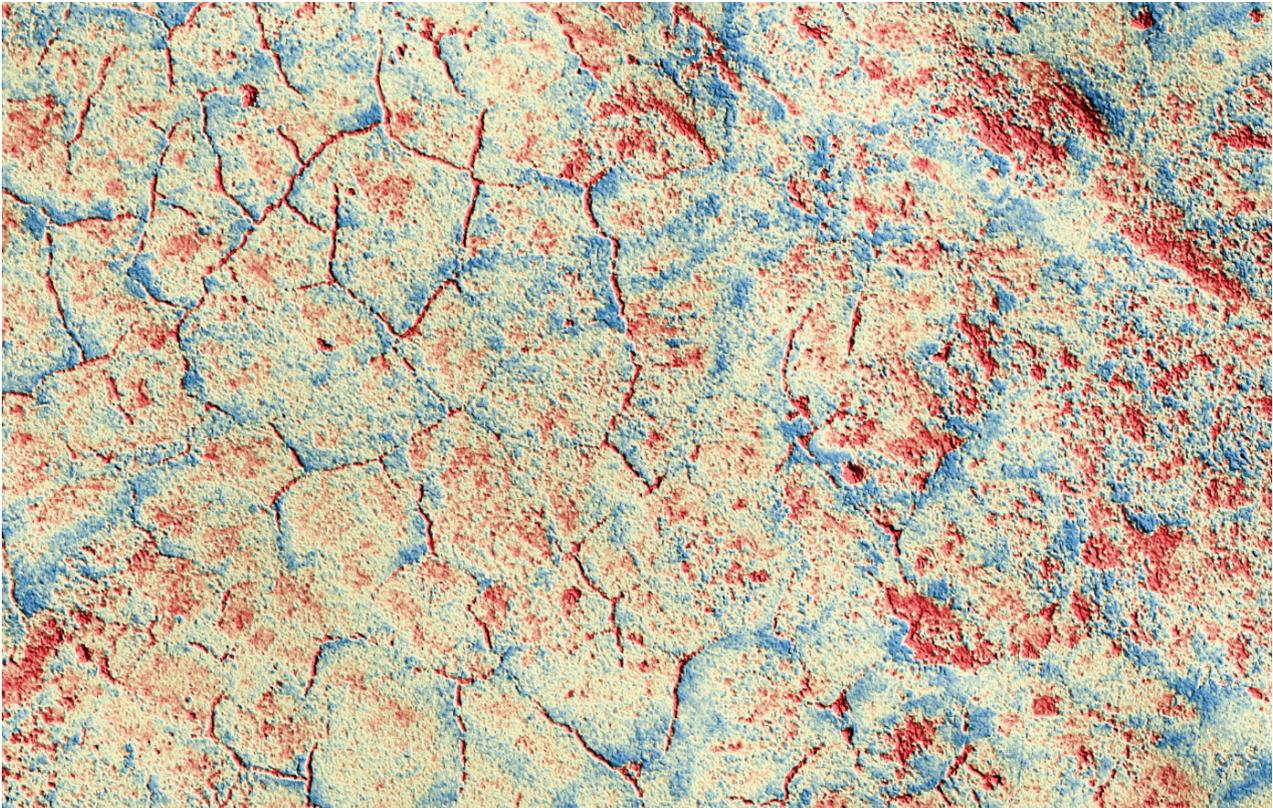


Abb. 8: Visualisierung der Malputzfläche als Überlagerung von gelb-rot-blau farbkodiertem Local Relief Model (Radius 30 Pixel, Wertebereich [-80, 80]  $\mu\text{m}$ ) mit omnidirektionaler Hillshading-Darstellung; rot eingefärbte Bereiche liegen tiefer als ihre Umgebungsfäche, während blaue Bereiche höher liegen; die Rissbreite liegt zwischen 0,6 und 0,9 mm

vollständig dreidimensional ist), so ist sie dennoch ausreichend um die Oberfläche des Wandbildes darzustellen, da keine Überhänge enthalten sind. Außerdem sind 2,5D-Höhenfelldraster immer noch besser für eine schnelle Umsetzung von Reliefvisualisierungen geeignet. Durch die Kombination des 2,5D-Rasters, bzw. 3D-Netzes, mit den im SfM-Schritt berechneten inneren und äußeren Kameraparametern ist es möglich, jedes Foto zu orthorektifizieren und die Ergebnisse zu einem riesigen Mosaikbild zusammenzufügen. Dieses Orthofoto-Mosaik stellt eine „verzerrungsfreie und maßstabgetreue Abbildung“ der bemalten Fläche dar. Metashape kann dieses Orthofoto-Mosaik automatisch generieren, aber das Endergebnis bedurfte noch einiger manueller Feinabstimmungen sowohl in Metashape als auch in Adobe Photoshop (Version 22.1.1). Identisch zur 2,5D-Rasterfläche weist das Orthofoto-Mosaik eine Zellgröße von 0,1 mm auf. Beide Produkte haben in etwa eine Breite von 22.100 Bildpixeln und eine Höhe von 34.500 Bildpixeln, was also ungefähr 762 Megapixeln entspricht.

## DATENVISUALISIERUNG

Lokale topografische Höhenvariationen werden im Allgemeinen mit Techniken visualisiert, die von Kartografen oder Personen aus dem Bereich der (archäologischen) Fernerkundung entwickelt wurden. Ein einfacher, beliebter Algorithmus zur Visualisierung von Höhenunterschieden, die in 2,5D-Rasterdateien kodiert sind, heißt „Hillshading“ (Schummerung oder Schattierung). Im Wesentlichen simuliert dieser Prozeß Schatten, die von einer Beleuchtungsquelle erzeugt werden, welche sich in einer bestimmten Höhe und in einem bestimmten Seitenwinkel über der Oberfläche befindet. In Abb. 6 sind zwölf Hillshading-Ergebnisse für die Oberfläche des Wandbildes dargestellt. Bei allen zwölf Darstellungen befindet sich die Beleuchtungsquelle konstant in einer Höhe von 30°. Der Seitenwinkel (Azimut) wurde jedoch in 30°-Schritten geändert: 15°, 45°, 75°, 105°, 135°, 165°, 195°, 225°, 255°, 285°, 315° und 345°. Die Hillshading-Technik ist sehr einfach zu interpretieren, auch von Laien. Sie ist eine digitale Annäherung an Fotografie mit Streiflicht. Sie hat jedoch zwei Vorteile: Man kann die Beleuchtungsquelle an jeder beliebigen Position platzieren, und die reale Farbe

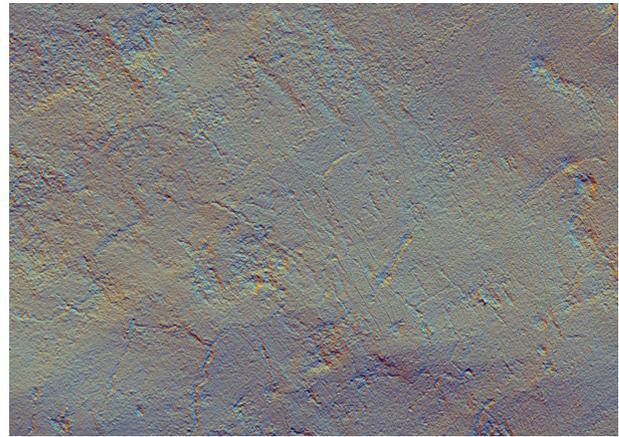


Abb. 9A und B: Detailansicht der Predella rechts mit wappenhaltenden Putti; die Unterzeichnungslinien stammen von der Konstruktion des Gewölbes; B: auffällige Spuren sind gut erkennbar (Multiple hillshading 315°-15°-75° azimuth -30° elevation)

der Szene behindert nicht das „Lesen“ und Erkennen topografischer Strukturen. Wie die Streiflicht-Fotografie schränkt auch die digitale Höhenschattierung die Visualisierung des Reliefs in hell beleuchtete und schattige Bereiche ein. Darüber hinaus werden lineare Strukturen, die parallel zur einfallenden Beleuchtung verlaufen, nicht sichtbar. Deshalb ist es unerlässlich, den Einfallswinkel der Beleuchtungsquelle zu verändern oder auf andere Techniken zurückzugreifen. Eine solche weitere Technik ist die Erstellung eines Farbkomposits aus drei verschiedenen Hillshades (Abb. 7). Dieser Ansatz ist als Mehrfach-Hillshade bekannt und kann einige Nachteile eines einzelnen Hillshades ausgleichen. Andere einfache Darstellungstechniken visualisieren die Neigung der Oberfläche, oder die relative Höhe der Rasterzellen innerhalb eines gewissen Umkreises um jeden Oberflächenpunkt. Es gibt auch kompliziertere Techniken, die alle auf die Hervorhebung bestimmter topografischer Merkmale zugeschnitten sind. Jede Visualisierungsmethode verwendet einen oder mehrere einstellbare Parameter und es können sogar unterschiedliche Reliefdarstellungen zusammengeführt werden. Letzteres wird durch das rechte Bild in Abb. 7 veranschaulicht, welches eine komplexe Mischung aus Himmelsansichtsfaktor, positiver Offenheit, Neigung, und Hillshade Darstellung präsentiert. Diese Visualisierungstechnik wird gelegentlich verwendet um archäologische Bodenmerkmale in flachem Gelände besser hervorzuheben und wahrnehmbar zu gestalten.<sup>10</sup> Da es eine nahezu unbegrenzte Anzahl an Möglichkeiten gibt, Oberflächenvariationen zu

visualisieren und hervorzuheben, obliegt es in der Regel dem Spezialisten der das Höhenmodell interpretiert, die am besten geeigneten Visualisierungsmethode(n) für die jeweiligen (mikro)topografischen Eigenschaften des vorliegenden Datensatzes auszuwählen.

#### BEOBACHTUNGEN ZUR WERKTECHNIK

Welche neuen Erkenntnisse konnten nun für das aus zwei unterschiedlichen Malphasen bestehende Wandbild in der Bischofstorvorhalle im Wiener Stephansdom durch diese hochauflösende dreidimensionale Oberflächenerfassung gewonnen werden? Mit dem visualisierten Oberflächenmodell war eine Untersuchung der Textur der beiden Malputzoberflächen mit verschiedenen Beleuchtungswinkeln (Hillshading) möglich. Im Vergleich zur Normal- oder Streiflichtuntersuchung im Zuge der restauratorischen Befundung konnten durch die lokalen topografischen Höhenvariationen mit einer Zellengröße von nur 0,1 mm feinste Strukturen sichtbar gemacht und somit weitere Spuren des Herstellungsprozesses der Wandmalerei entdeckt werden.

Die dreidimensionale Darstellung der Höhenvariationen zeigen den Ablauf des Putzauftrages sowie die teilweise entstandenen Putzüberlappungen, die Unregelmäßigkeiten des circa 5 mm dicken Kalkmörtelputzes aufgrund der Lagerfugen im darunter befindlichen Steinquadermauerwerk, oder auch die Struktur und Richtung von Werkzeugspuren. An der inneren, jüngeren Wandfläche kann man auch erkennen, wie präzise und in kleinen Putzportionen man an die bereits vorhandene umliegende Putzfläche herangearbeitet hat. Die Art des Putzauftrages und die Bearbeitung der Oberfläche hinter-

<sup>10</sup> Žiga Kokalj / Maja Somrak, Why Not a Single Image?: Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping, Remote Sensing 11 (7), 2019, S. 747.

lässt also verschiedenste Merkmale. Die Oberflächen-topografie des Malputzes zeigt neben der Degradationen durch spätere Schadensprozesse auch noch andere Unregelmäßigkeiten, wie zum Beispiel auffallend viele Frühschwundrisse im rechten unteren Wandbildbereich, die im Zuge des Trocknungsprozesses entstanden sind und auf eine zu hohe Bindemittelanreicherung hinweisen (Abb. 8).

Durch die maßstabsgerechte Aufnahme erfolgte gleichzeitig auch eine exakte Vermessung des Wandbildes. Deformationen und Rissbildungen im Malputz des hl. Leopold zeigen den Bereich der ehemaligen Aufhängepositionen des Epitaphs von Hans Rechwein in der Bildmitte. Dieser war ursprünglich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit den gemalten Flügeln um 1511 als plastischer Schrein eines illusionierten Flügelaltars an dieser Stelle montiert gewesen. Durch die 3D-Modellierung konnte die Vermutung, die bereits durch die IR-Thermografieaufnahme<sup>11</sup> und Streiflichtuntersuchung der Wandfläche vorlag, bestätigt werden, dass sich im Malputz des hl. Leopold die einstigen Stellen der Verklammerung abzeichnen. Der Kalkputzmörtel bildete im Zuge seiner Trocknung charakteristische Risse aus, welche die ehemaligen Aufhängepositionen zeigen und damit die Annahme verstärkten, dass der Epitaph an dieser Stelle montiert gewesen ist. Durch die Montage des Epitaphs ergab sich noch ein weiterer Befund im Grenzverlauf der Putznaht von der umliegenden älteren Malputzfläche zur inneren jüngeren Putzfläche, die sich am 3D-Modell genau nachvollziehen lässt. Die ältere Putzfläche bildet im Übergang eine leicht ansteigende Putznase. Der Epitaph besitzt eine unregelmäßig gearbeitete Rückseite, die in der heutigen Montage wenige Meter neben dem Bischofstor im Langhaus auch erkennbar ist, wodurch ein Spalt zwischen Stein und Wand besteht. Dieser Spalt dürfte ursprünglich mit Kalkmörtel verschlossen gewesen sein, um einen nahtlosen Übergang vom Steinbildwerk zur Wandmalerei zu schaffen, worauf auch die Putznase hindeutet.

Für die Übertragung der vermuteten konzeptuellen Entwurfsskizze auf die Wandfläche<sup>12</sup> konnten durch das Image-Based Modelling Verfahren weitere wichtige Informationen gewonnen werden. Feine waagrechte Abdrücke in beiden Malputzphasen geben Hinweise über die Verwendung einer Holzlatte oder eines Holzlineals zur Einteilung bestimmter Darstellungselemente. Bereits

in der Streiflichtaufnahme<sup>13</sup> wurden im Bereich der rundbogigen Lünette einige markante und regelmäßige Löcher im Malputz festgestellt, die im Zusammenhang mit dem ehemaligen Epitaph in der Mitte interpretiert wurden. Mittels der dreidimensionalen Oberflächenvisualisierung konnten in der älteren Wandmalerei um 1511 nun weitere kleinere Löcher im Malputz, die häufig entlang der Unterzeichnungslinien verlaufen, entdeckt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass man zur Übertragung der Einteilung der Rahmenflügel und der Predellazone des illusionierten Flügelaltars an der Wand Markierungs- oder Konstruktionspunkte in den Malputz setzte. Möglicherweise wurde damit im Zuge des Übertragungsprozesses des künstlerischen Entwurfs ein Karton o. ä. an der Wandoberfläche befestigt, oder sie dienten zur Orientierung für eine Kohlevorzeichnung.<sup>14</sup>

Einige der Unterzeichnungslinien zeigen in der 3D-Visualisierung unter der Betrachtung verschiedenster Schattierungen eine Auffälligkeit, deren Entstehung noch nicht interpretiert werden konnte (Abb. 9A und B). Von werktechnischer Seite könnte es sich um einen Pinselabdruck im noch feuchten Malputz handeln, oder vielleicht um Oberflächenstrukturen, die sich im Zuge des Karbonatisierungs- oder Trocknungsprozesses gebildet haben. Dies könnte ein Hinweis auf eine freskale Bindung der Unterzeichnung sein, die im Rahmen der bisherigen naturwissenschaftlichen Untersuchungen noch nicht letztgültig erklärt werden konnte.<sup>15</sup> Der Effekt könnte aber auch von der Bildschärfung stammen, jedoch würde man Bilder mit einer noch geringeren GSD benötigen, um diese Frage beantworten zu können. Einige Linien scheinen sich dadurch zu charakterisieren, dass sie in der Mitte vertieft und im Randbereich etwas erhöht sind. Die im Vergleich zur älteren Malphase noch besser erhaltenen Farbschichten der jüngeren Malphase lassen sich in der Oberflächenmorphologie gut charakterisieren. Die Visualisierung und Überlagerung von einzelnen Farbschichten durch die 3D-Modellierung lässt aber für künftige Untersuchungen anderer Kunstwerke noch viele weitere Möglichkeiten der Beobachtung und damit auf einen großen Erkenntnisgewinn hoffen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die dreidimensionale topografische Oberflächenvisualisierung des so vielschichtigen und interessanten Wiener Wandbildes neue Erkenntnisse zur Vorgehensweise der Künstler und deren Werktechnik gewonnen

<sup>11</sup> Die IR-Thermografie wurde durch Frau Anna Luib und Team der Uni Bamberg durchgeführt.

<sup>12</sup> Zu Übertragungstechnik siehe den Beitrag von *Santner et al.* in diesem Band.

<sup>13</sup> Die multispektralen Aufnahmen wurden von Annette Keller durchgeführt. Siehe dazu den Beitrag von *Keller / Lenz* in diesem Band.

<sup>14</sup> Mögliche Übertragungstechniken werden im Beitrag *Santner et al.* genauer beschrieben.

<sup>15</sup> Siehe dazu *Santner et al.* in diesem Band.

werden konnten. Die hohe Auflösung in Kombination mit der überaus exakten Erfassung der Struktur der Oberflächen gibt weitere Einblicke in die Genese und den Herstellungsprozess des Kunstwerks. Die Methode

des Image-Based Modelling hat sich also als eine sehr interessante Ergänzung zu den bereits angewendeten Verfahren in der Erforschung und Untersuchung der Wandmalerei erwiesen.