

Erfassung und Analyse dreidimensionaler Deformationen an Gemälden zur Unterstützung des Restaurierungsprozesses

FERDINAND MAIWALD¹ & DANILO SCHNEIDER¹

Zusammenfassung: Der Beitrag befasst sich mit der photogrammetrischen Erfassung und Analyse dreidimensionaler Deformationen an Gemälden. Im Zuge einer Restaurierung durch die Staatlichen Kunstsammlungen Dresdens wurde in drei Epochen ein historisches Gemälde von der Firma fokus GmbH Leipzig aus verschiedenen Positionen fotografiert. Mittels Structure-from-Motion wurden aus diesen Aufnahmen Punktwolken erzeugt und epochenweise miteinander verglichen. So konnte eine maximale Wölbung von bis zu 6,3 cm festgestellt werden aber auch kleinere Deformationen und Risse konnten gut sichtbar gemacht werden. Verschiedene Visualisierungen können eine hilfreiche Ergänzung zu klassischen Schadenskartierungen sein. Insgesamt wurde nachgewiesen, dass photogrammetrische Methoden sehr gut zur Überwachung eines Restaurierungsprozesses geeignet sind.

1 Einleitung

Dieser Beitrag befasst sich mit der photogrammetrischen Erfassung und Analyse dreidimensionaler Deformationen an Gemälden. Das untersuchte Gemälde von Lukas Cranach dem Älteren aus dem Jahr 1506 wurde im Zuge der Restaurierung, durchgeführt von den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden, von der Firma fokus GmbH Leipzig mehrfach mit einer Nikon D800 aufgenommen. Das Gemälde weist einige Besonderheiten auf, die für die Analyse der photogrammetrischen Ergebnisse relevant sind. Bei dem Bild handelt es sich um die Innenseite des linken Flügels des Katharinenaltars von Lukas Cranach dem Älteren und es zeigt drei Heilige. Dieser Flügel war ursprünglich beidseitig bemalt, wurde jedoch wahrscheinlich im Zuge einer Restaurierung im 18. Jahrhundert in der Mitte vertikal auseinandergesägt (MARX 1996). Die daraus resultierende Stärke der Holztafel beträgt aus diesem Grund nur noch 2,6 – 4,0 mm. Diese geringe Dicke erschwert zum einen die Restaurierung und lässt zum anderen schneller temperatur- sowie luftdruckbedingte Deformationen zu.

Die Ölfarbe des Gemäldes ist direkt auf sieben miteinander verklebten Lindenholzbrettern aufgebracht, die mit Hilfe eines Stützsystems auf der Rückseite (die sogenannte Parkettierung) stabilisiert wurden. Dieses Stützsystem aus Quer- und Längsleisten (Flachparkett) sollte ursprünglich eine Bewegung der Holztafel vermeiden (NICOLAUS 2003). Durch die feste Gitterstruktur dieser Parkettierung entstanden allerdings Spannungen in dem Gemälde und infolgedessen Risse in der Holztafel. Deshalb sollte das Gemälde von den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden erneut restauriert werden. Ziel der Arbeit war eine dreidimensionale photogrammetrische Rekonstruktion des Gemäldes sowie eine Abschätzung der Größenordnung von Verformungen und die Beurteilung der Deformationen in verschiedenen Epochen. Alle drei Epochen wurden mehrfach in Form eines konvergenten Bildverbandes fotografiert:

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01062 Dresden, E-Mail: [ferdinand.maiwald, danilo.schneider]@tu-dresden.de

- In Epoche 1 war auf der Rückseite der Holztafel noch das alte nahezu starre Stützsystem aufgebracht, welches Spannungen auf das Gemälde ausübte, die sich in Rissen und kleinen Wellen zeigten.
- In Epoche 2 wurde die Holztafel ohne Stützsystem in liegender Position aufgenommen (Abb. 1). In diesem Zustand konnte sich das Gemälde ohne mechanischen Zwang deformieren, was zu einer großflächigen Wölbung führte.
- In Epoche 3 wurde durch die Restauratoren ein neues Stützsystem auf der Rückseite angebracht. Dieses soll zum einen eine Wölbung des Gemäldes minimieren und zum anderen starke Spannungen in der Holztafel und damit die Bildung von Rissen vermeiden. Es soll damit einen Kompromiss zwischen den Zuständen aus Epoche 1 (starres Stützsystem) und aus Epoche 2 (kein Stützsystem) darstellen.

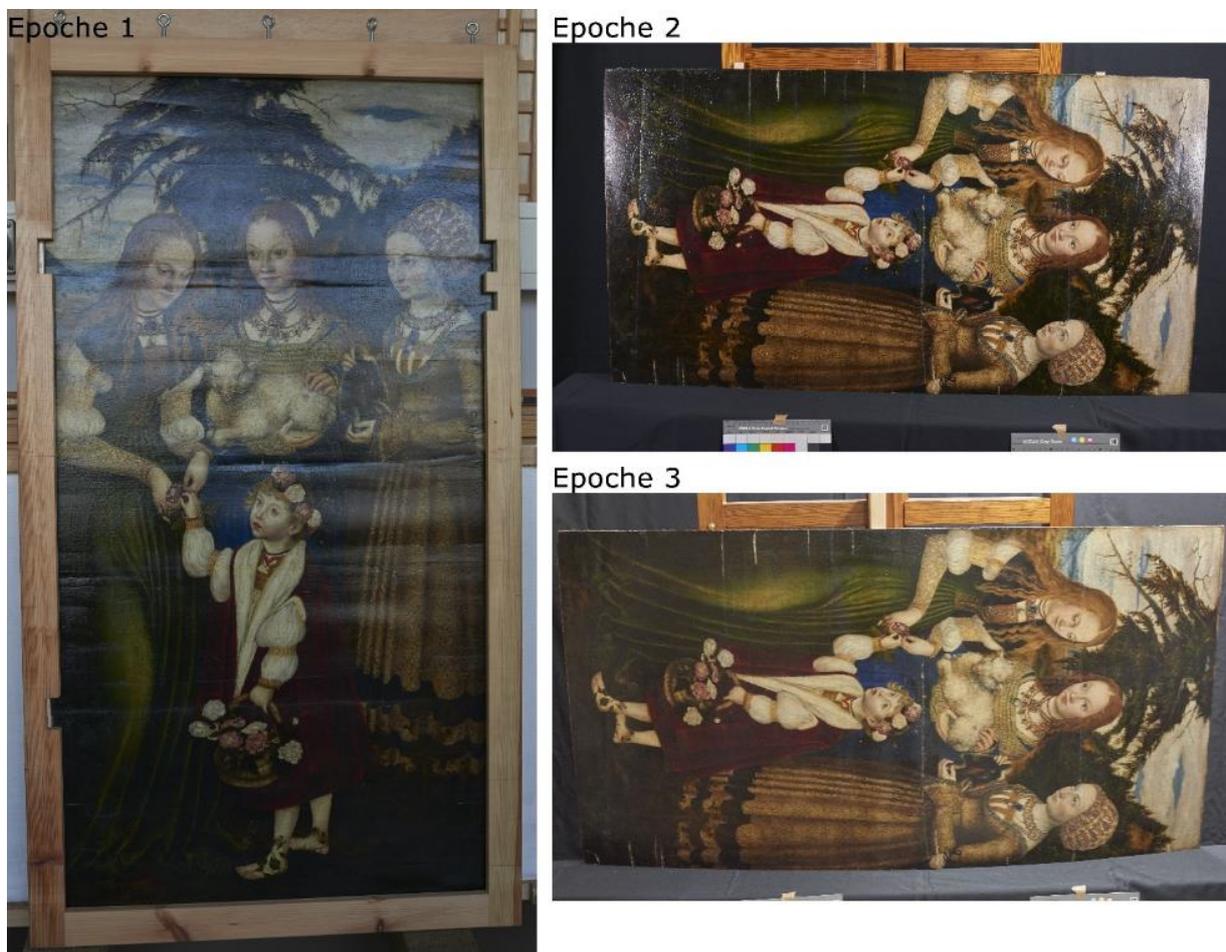


Abb. 1: Lage des Gemäldes zum Aufnahmezeitpunkt in den verschiedenen Epochen

Die dreidimensionale Aufnahme des Gemäldes sollte berührungslos erfolgen. Deshalb kamen ausschließlich optische (bildbasierte und scannende) Verfahren in Frage (LUHMANN 2010). An einem Testobjekt mit ähnlichen Eigenschaften wie beim Cranach-Gemälde wurden deshalb die Methoden Structure-from-Motion (SfM) und Streifenlichtscanning miteinander verglichen. Am Cranach-Gemälde kam nur SfM zum Einsatz. Insbesondere sollte geprüft werden, ob trotz der teilweise sehr kontrastarmen Textur ein zuverlässiges Bildmatching durchgeführt werden kann (LOWE 2004).

2 Datenakquisition

In den verschiedenen Epochen wurden Aufnahmen von der fokus GmbH Leipzig gemacht. In der ersten Epoche wurden 23 Fotos, in der zweiten 22 Fotos und in dritten Epoche 26 Fotos des Gemäldes mit einer Nikon D800 unter Verwendung eines Polarisationsfilters aufgenommen. Der Polarisationsfilter diente der Minimierung von Reflexionen, welche durch die Ölfarbe hervorgerufen wird. Nach der SfM-Prozessierung stellte sich heraus, dass bei der Bildaufnahme im Hinblick auf eine bessere Qualität der Ergebnisse noch Optimierungspotenzial bestand. Insbesondere sind eine größere Anzahl von Fotos und eine bessere Aufnahmekonfiguration, insbesondere größere Schnittwinkel homologer Bildstrahlen im Objektraum wünschenswert, sofern die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Bildpunktzuordnung nicht darunter leidet (SOOT et al. 2015). Durch gute Konvergenzwinkel der Aufnahmeachsen werden systematische Abweichungen aufgrund von ungenauen Schätzungen der inneren Orientierung der Kamera vermieden. Diese Abweichungen können sich beispielsweise als sog. Dome-Effekt äußern, bei dem sich in der Mitte der entstandenen Punktwolke eine systematische Wölbung bildet. Diese Verformung entsteht vor allem auf Grund der ungenauen Schätzung der radial-symmetrischen Verzeichnung, kann aber durch konvergente Aufnahmen vermieden werden (WACKROW et al. 2008).

Für die Erstellung der Punktwolken mittels Structure-from-Motion lieferte die Software Agisoft Photoscan für das Testobjekt sowie für das Cranach-Gemälde die vollständigsten Ergebnisse. Softwarelösungen wie VisualSFM, SURE und Apero (Tab. 1) konnten keine lückenlose Punktwolke des Gemäldes erstellen.

Tab. 1: Auflistung der verwendeten Programme zur Berechnung der Punktwolke für das Testobjekt

Programm	Algorithmus	Lizenz	Webseite
Agisoft Photoscan	Firmeneigen	Kostenpflichtig	http://www.agisoft.com/
VisualSFM	PMVS/CMVS	Open-source	http://ccwu.me/vsfm/
SURE	Semi Global Matching	14-tägige Testversion	http://www.nframes.com/
Apero	Micmac	Open-source	http://logiciels.ign.fr/?Micmac

Oft wurden vor allem texturarme Bereiche nicht rekonstruiert. Es ist anzunehmen, dass die inhomogenen Ergebnisse durch unterschiedliche Algorithmen zur Punktwolkenberechnung in den Programmen hervorgerufen wurden (KERSTEN & LINDSTAEDT 2012). Da die verwendete Kamera vor der Messung nicht kalibriert wurde, wurden die Kameraparameter simultan in allen verwendeten Programmen mitgeschätzt. Nach der Erstellung der Punktwolke wurde diese abgespeichert und zur weiteren Verarbeitung in CloudCompare im „Polygon File Format“ (.ply) importiert. Anschließend erfolgte die manuelle Bereinigung der Punktwolke. Die Skalierung der Punktwolken erfolgte über die Kenntnis der Seitenlängen des Gemäldes von 121,3 cm × 63,6 cm (MARX 1996). Besser wären hierbei absolute Messungen mit übergeordneter Genauigkeit gewesen, um letztendlich auch absolute Deformationen bestimmen zu können. Denkbar wäre die Einrichtung eines Messtisches oder die Anbringung von Zielmarken, die zusätzlich zum Objekt in den Aufnahmen zu sehen sind. Allerdings sprachen praktische Bedingungen, die durch die Restauratoren vorgegeben wurden, gegen diese Maßnahmen. Die unbearbeitete und die bearbeitete Punktwolke sind in Abbildung 2 gegenübergestellt. Vor der Bearbeitung zeigt die erstellte Punktwolke noch die Staffelei sowie Teile des Tisches. Diese Punkte waren für weitere Berechnungen nicht notwendig und wurden manuell entfernt. Zusätzlich wurde die Punktwolke skaliert und so gedreht, so dass die z-Achse des Koordinatensystems in die Bildebene zeigt.

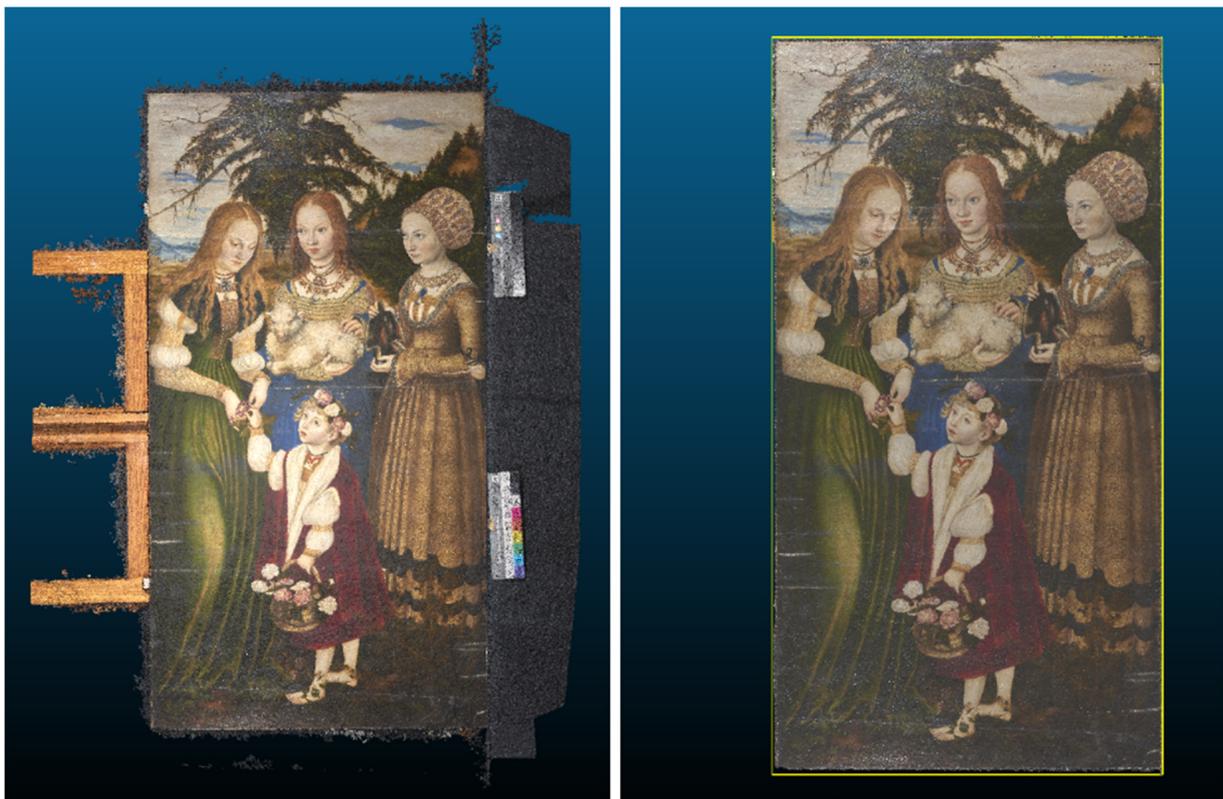


Abb. 2: Vergleich der unbearbeiteten Punktwolke aus Agisoft Photoscan (links) mit der bearbeiteten Punktwolke aus CloudCompare (rechts)

3 Untersuchungen am Cranach-Gemälde

Nach der Bereinigung der Punktwolken wurden nach Absprache mit den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden verschiedene Ansätze zur Visualisierung der Deformationen verfolgt. Das Interesse der Restauratoren lag vor allem an der gezielten Betrachtung der einzelnen Zustände (Epochen) und der Darstellung von zwei verschiedenen Eigenschaften. Die erste Eigenschaft ist die Wölbung des Gemäldes, d.h. die Abweichungen der Holztafel zu einer festgelegten Bezugsebene. Die zweite Eigenschaft ist die sog. Binnenstruktur und stellt die deutlich kleineren Abweichungen des Gemäldes zu einer mathematisch festgelegten Fläche dar. Als mathematische Fläche wurde eine sog. Quadrik, d.h. eine spezielle Polynomfläche, gewählt und in die Punktwolke eingepasst (Abb. 3). Die Berechnung und Analyse von Wölbung und Binnenstruktur soll in den nächsten Abschnitten genauer beschrieben werden.

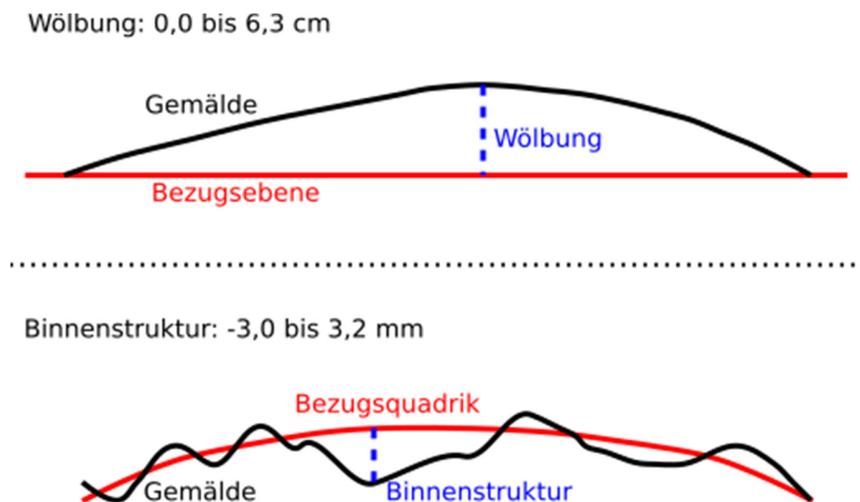


Abb. 3: Schematische Darstellung der Wölbung und der Binnenstruktur und deren Größenordnung

3.1 Analyse der Wölbung

Die Wölbung wurde durch den orthogonalen Abstand jedes Punktes der mittels SfM erzeugten Punktwolke zu einer Bezugsebene berechnet. Optimal wäre die Festlegung dieser Bezugsebene durch einen Messtisch bzw. ein absolutes Koordinatensystem. Aus praktischen Gründen war diese Lösung nicht umsetzbar. Es blieben somit verschiedene Möglichkeiten die Bezugsebene anhand der Messdaten selbst in CloudCompare festzulegen. Ansätze waren (a) die Definition der Ebene durch alle Punkte der Punktwolke als mittlere Ebene, (b) durch die vier Ecken des Gemäldes oder (c) durch drei Punkte. Eine mittlere Ebene durch alle Punkte wurde aufgrund von Ausreißerpunkten vor allem unterhalb der Punktwolke ausgeschlossen. Wenn nur drei einzelne Punkte zur Ebenenfestlegung verwendet werden, wird die mögliche Deformation einer Ecke nicht erfasst. Somit fiel die Wahl auf die Berechnung einer mittleren Ebene durch die vier Ecken des Gemäldes, womit zumindest eine geringe Redundanz erreicht wurde. Für die Berechnung der Eckpunkte wurden in den vier Ecken des Gemäldes Quadrate in der Größe von $0,5 \text{ cm}^2$ selektiert,

die von den Randbereichen der Punktwolke etwa einen Abstand von 1,0 cm haben. Ein solches Quadrat umfasst ca. 100 Einzelpunkte. Mittels des Statistical-Outlier-Removal-Filters (SOR) wurden pro Quadrat zuerst ca. 5-10 Ausreißerpunkte entfernt. Aus allen verbliebenen Punkten wurde jeweils der Schwerpunkt berechnet und als Eckpunkt definiert. Aus den vier so bestimmten Eckpunkten wurde in CloudCompare eine mittlere Ebene berechnet. Durch die geringe Überbestimmung wurde für jeden der Eckpunkte der verbleibende senkrechte Abstand zur jeweiligen mittleren Ebene bestimmt und als Indiz für eine mögliche übermäßige Deformation einer der 4 Ecken herangezogen. Tabelle 2 zeigt die mittleren quadratischen Abstände zur Bezugsebene. Aufgrund der kleinen Werte (nur bei Epoche 2 geringfügig größer als 1 mm) kann davon ausgegangen werden, dass die beschriebene Vorgehensweise zur Festlegung der Bezugsebene für alle 3 Epochen berechtigt ist.

Tab. 2: RMS der Abstände der vier Eckpunkte zur jeweiligen Bezugsebene

	Epoche 1	Epoche 2	Epoche 3
RMS der Abstände (mm)	0,069	1,219	0,809

Für die Berechnung der Wölbung wurde die auf diese Weise bestimmte Bezugsebene als Referenz und die SfM-Punktwolke als zu vergleichende Punktwolke festgelegt. Für die Berechnung wurde die Funktion „Cloud-to-Mesh“ verwendet, wobei die mittlere Ebene seitens CloudCompare als dreiecksvermaschtes Netz definiert wird (LEE & SCHACHTER 1980). Daraufhin wurden die Distanzen der Punktwolke zur mittleren Ebene in Normalenrichtung der Ebene berechnet und nach dem Eliminieren von Ausreißern farbskaliert dargestellt (Abb. 4).

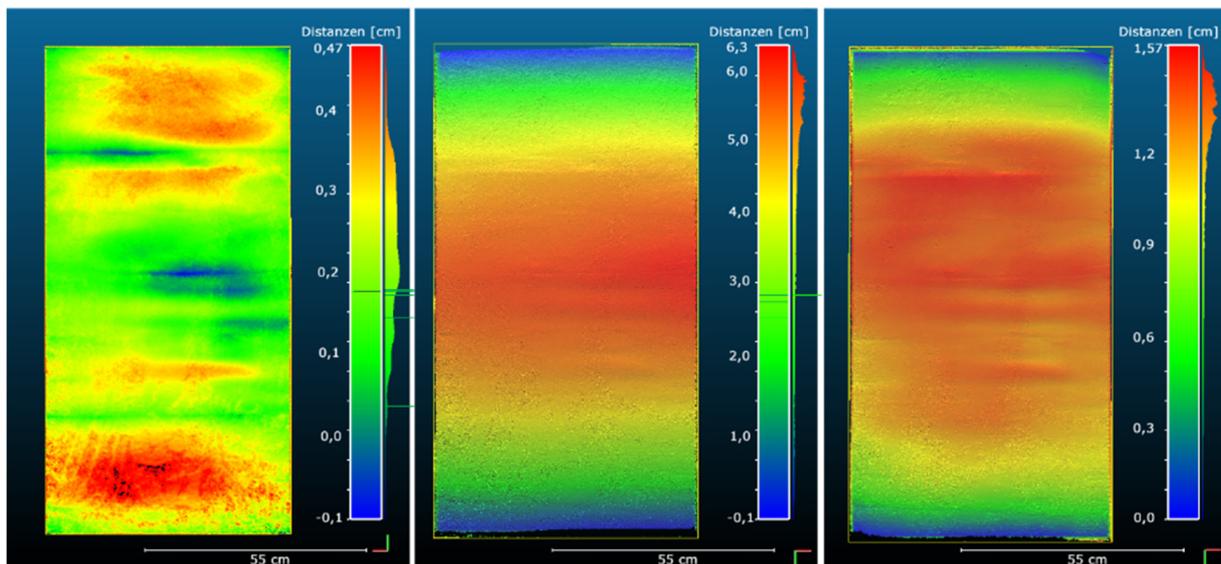


Abb. 4: Distanzen der mittels SfM erzeugten Punktwolke zu der jeweiligen Bezugsebene in allen Epochen; Aufsteigende Werte von Blau über Grün nach Rot; Links: Epoche 1 mit Distanzen von -0,1 cm bis 0,5 cm; Mitte: Epoche 2 mit Distanzen von -0,1 cm bis 6,3 cm; Rechts: Epoche 3 mit Distanzen von 0,0 cm bis 1,6 cm

Die Abbildung bestätigt die Erwartungen der Restauratoren und zeigt die Größenverhältnisse der Wölbung auf. In Epoche 1 war das Gemälde nicht bzw. kaum gewölbt, weshalb die Punktwolke sowohl unter als auch über der Bezugsebene lag. Die Holztafel glich in diesem Zustand einer starren Ebene mit den bereits angedeuteten Rissen in der Gemäldefläche. Diese sind bereits in der Darstellung der Wölbung in der oberen Bildhälfte als blaue horizontale Linien sichtbar. Die maximale Abweichung von der Bezugsebene trat am unteren Ende der Tafel mit einer Größenordnung von 0,47 cm auf.

In Epoche 2 lag die Tafel ohne Stützsystem auf der Seite und zeigte eine sehr starke Wölbung, die in der Mitte des Gemäldes maximal 6,30 cm aufweist. Epoche 3 zeigt einen ähnlichen Farbverlauf wie Epoche 2, allerdings sind die maximalen Abweichungen in der Bildmitte mit 1,57 cm deutlich geringer. Das neue Stützsystem der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden sollte eine starke Wölbung vermeiden und das Gemälde gleichzeitig stabilisieren. Der geglättete Farbverlauf (im Vergleich zu Epoche 1) und die geringere Wölbung (im Vergleich zu Epoche 3) bestätigt die mit der neuen Restaurierungsmethode beabsichtigte Wirkung.

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Epochen herzustellen, wurden zusätzlich Längsprofile über die Gemäldefläche erstellt. Für die Berechnung wurden die eingefärbten Punktwolken reduziert. Die ermittelten Distanzen zur Bezugsebene wurden hierbei auf ein Gitter in z-Richtung (in die Bildebene) projiziert, wobei die Rastergröße des Gitters mit 1 cm² festgelegt wurde. Jeder Zelle des Gitters wurde der Mittelwert der projizierten Distanzen als Wert zugeordnet. Auf diese Weise konnten 64 Längsprofile über das 64 cm breite Gemälde erstellt werden. Die weitere Berechnung und Visualisierung der Profile wurde für jede Epoche in MATLAB realisiert (Abb. 5).

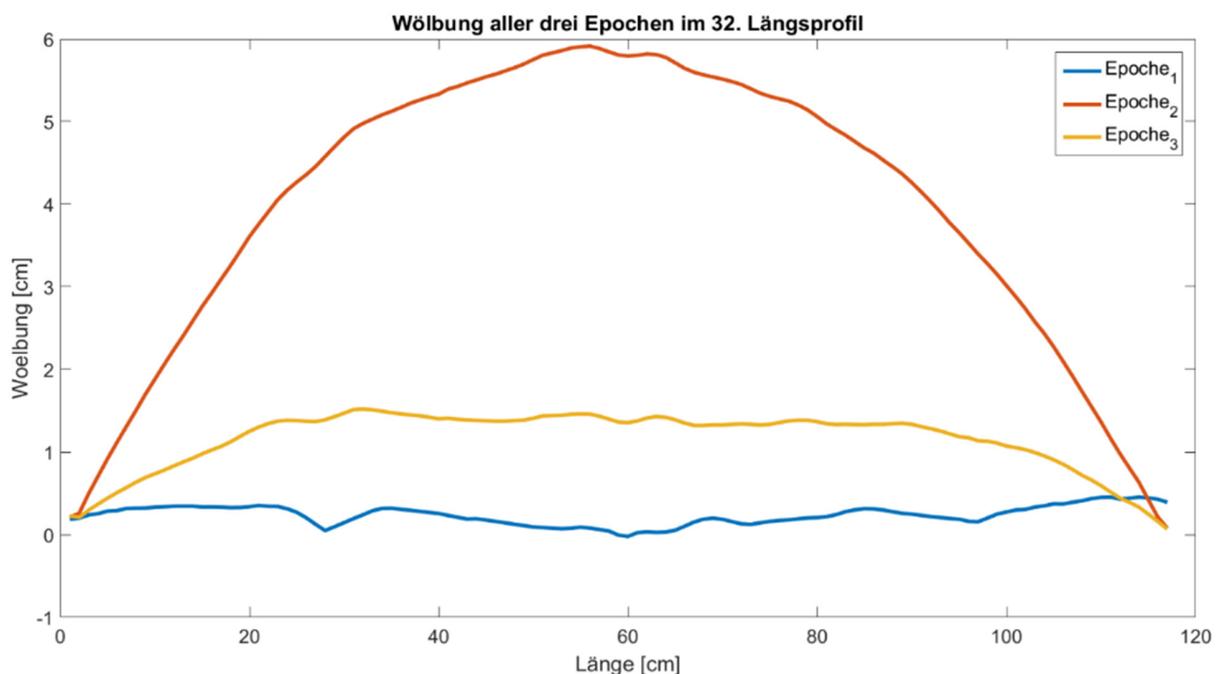


Abb. 5: Ausgewähltes Längsprofil (ca. in der Mitte der Holztafel) in allen drei Epochen

Auch in dieser Darstellung sieht man die bereits beschriebenen Eigenheiten der verschiedenen Epochen sehr gut. Epoche 2 zeigt die größte Wölbung. Epoche 1 gleicht einer Ebene und es sind bereits kleine Einschnitte (z.B. bei ca. 27 cm) in der Holztafel zu erkennen. Epoche 3 zeigt nur eine geringe Wölbung sowie keine Unstetigkeiten im Profilverlauf und deshalb vermutlich keine Risse.

3.2 Analyse der Binnenstruktur

Die Binnenstruktur des Gemäldes wurde aus dem Abstand der mittels SfM generierten Punktwolke und einer mathematischen definierten Fläche berechnet. Die mathematische Fläche sollte hierbei die Wölbung möglichst gut repräsentieren und die im Maßstab deutlich kleineren Deformationen aufzeigen.

Für die Untersuchungen wurde eine Methode gewählt, die sowohl die komplette Punktwolke berücksichtigt als auch eine konsistente Darstellung der Ergebnisse erlaubt. Deshalb wurde die in CloudCompare vorhandene Funktion „Fit Quadric“ verwendet, die eine Einpassung einer Quadrik, d.h. einer zweidimensionalen Polynomfläche in die Punktwolke erlaubt. In CloudCompare wird eine 2,5D-Quadrik der folgenden Form verwendet:

$$a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 = z \quad (1)$$

Typische Formen für 2,5D-Quadriken sind elliptische bzw. hyperbolische Paraboloiden. Im Falle der Annäherung an die Gemäldeform (bzw. die Wölbung) beschreibt die Quadrik immer ein elliptisches Paraboloid. Lediglich in den Randbereichen (oberer und unterer Rand) des Gemäldes kam es zu Abweichungen, da sich die Holztafel in diesen Teilen stärker krümmt.

Nach der Berechnung der Quadrik für jede Epoche konnte wie schon bei der Wölbung die Differenz zwischen Bezugsfläche und SfM-Punktwolke berechnet werden. Da die Deformationen der Binnenstruktur alle ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen, konnte eine einheitliche Farbskala für alle drei Epochen festgelegt werden (Abb. 6).

Die Abweichungen zur jeweiligen Bezugsquadrik liegen in jeder Epoche im Wertebereich von - 3,0 mm bis 3,2 mm. Für Epoche 1 ist die berechnete Bezugsquadrik fast identisch mit der Bezugsebene (siehe Kap. 3.1), da das Gemälde hier nahezu keine Wölbung aufweist, weshalb sich ein ähnliches Deformationsbild wie in Abbildung 4 ergibt.

Epoche 2 und 3 zeigen wie schon bei der Analyse der Wölbung einen ähnlichen Farbverlauf. Feine Risse in der Holztafel sind hier nicht zu erkennen und die Farbverläufe sind insgesamt glatter. Auffällig war der große rote Bereich im oberen Drittel an dessen Stelle in Epoche 1 noch ein Riss vorhanden war. Dieser rote Bereich konnte nach Angaben der Restauratoren durch eine Verklebung der Holztafel und eine damit verbundene Aufwölbung der Klebeschicht erklärt werden. Generell glich der Farbverlauf in Epoche 3 (neues Stützsystem) dem Verlauf in Epoche 2 (ohne stützende Parkettierung), wobei jedoch in Epoche 3 die Wölbung deutlich reduziert werden konnte (vgl. Kap. 3.1).

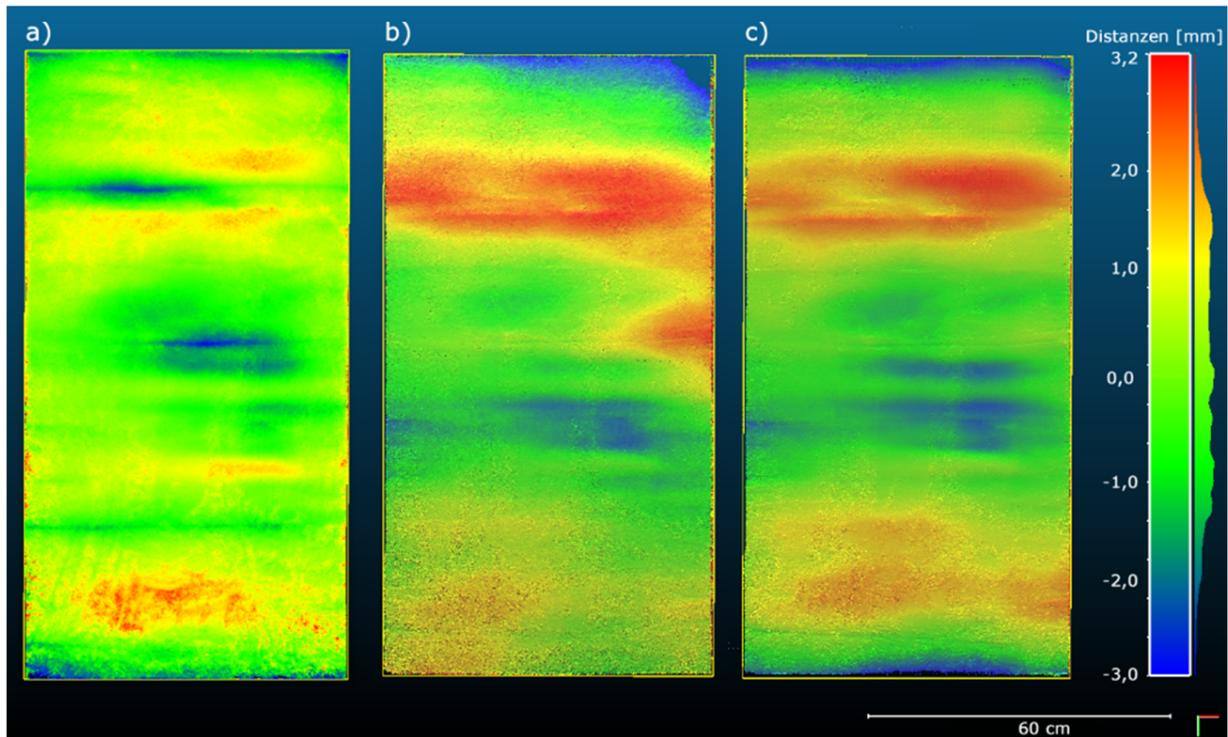


Abb. 6: Distanzen der mittels SfM erzeugten Punktwolke zu der jeweiligen Bezugsquadrik in allen Epochen; Aufsteigende Werte von Blau über Grün nach Rot von -3,0 mm bis 3,2 mm; a) Epoche 1; b) Epoche 2; c) Epoche 3

Zusätzlich zu dieser Visualisierung wurden auch für die Binnenstruktur alle Punktwolken auf ein gleichmäßiges Raster projiziert, um anschließend Profildarstellungen erzeugen zu können. Da die Abweichungen der Binnenstruktur einen deutlich geringeren Wertebereich besitzen, wurden diese zunächst auf Plausibilität überprüft. Hierfür wurde eine vor der Restaurierung händisch erzeugte Schadenskartierung der Restauratoren herangezogen. Risse, die in dieser Kartierung auftauchen, sollten auch in einem Längsprofil über die farbkodierte Darstellung der Gemäldefläche sichtbar werden (Abb. 7).

Die Abbildung zeigt, dass die Schadenskartierung mit den erzeugten Längsprofilen übereinstimmt. Risse und weitere kleine Unstetigkeiten in der Oberflächenstruktur werden in der Profildarstellung sichtbar. Nach Informationen der Restauratoren durchtrennten schmale Risse die komplette Holztafel und im Profil müsste somit eine Lücke an der Stelle eines Risses sichtbar sein. Zum einen aufgrund des flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren und zusätzlich aufgrund der Projektion der Punktwolke auf ein gleichmäßiges Raster mit großer Rasterweite wurde für diese Stellen stattdessen lediglich ein sehr niedriger Wert berechnet, der zumindest auf einen Riss hindeutet.

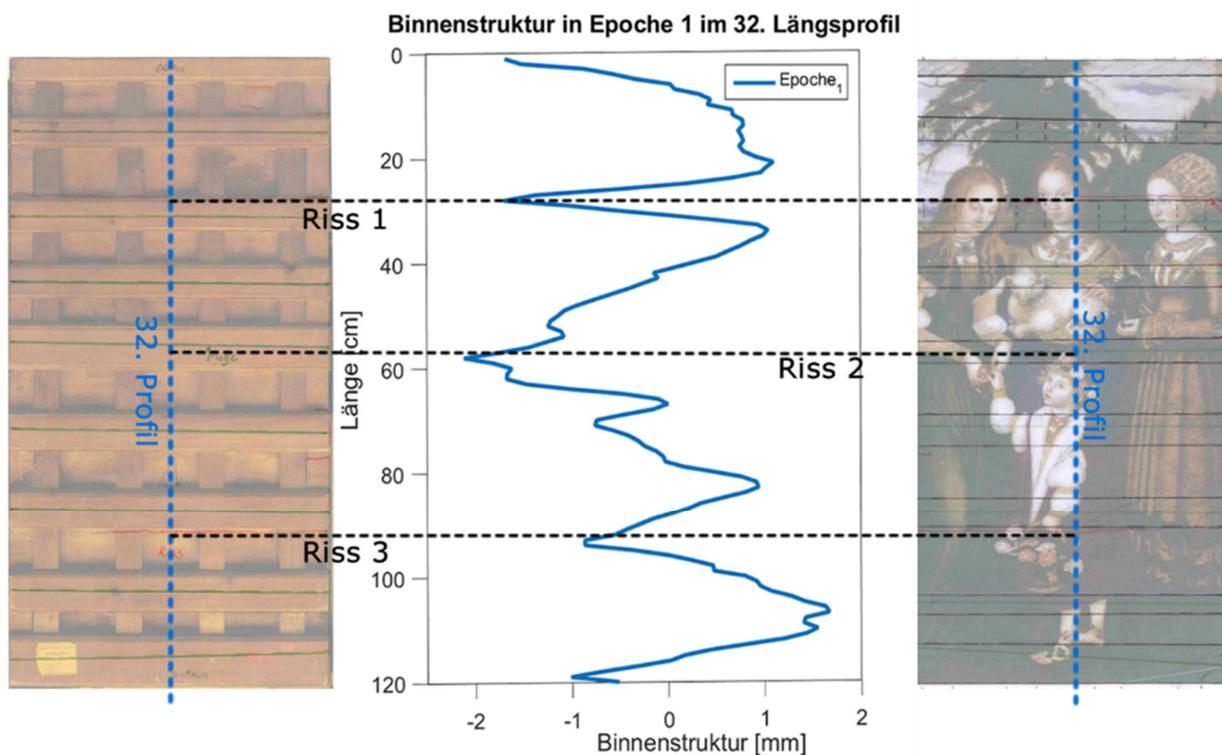


Abb. 7: Vergleich eines Längsprofils über die Binnenstruktur mit der Schadenskartierung der Vorder- und Rückseite (Michael Schweiger, Staatliche Kunstsammlungen Dresden) des Gemäldes vor der Restaurierung; Die Abbildung zeigt drei Risse, die sich auch im Längsprofil deutlich widerspiegeln.

Eine weitere Möglichkeit der Visualisierung bot die Darstellung der ursprünglichen Schadenskartierung mit der darübergelegten farbkodierten transparenten Punktwolke (Abb. 8). In dieser Abbildung sind nicht nur die einzelnen Risse und Besonderheiten des ursprünglichen Gemäldes sichtbar. Man kann zudem erkennen wie weit sich die Deformationen ausbreiten und an welchen Stellen sie ineinander übergehen. Eine exakte Lokalisierung der größten Schäden und der weniger deformierten Bereiche ist auf einen Blick zu erfassen.

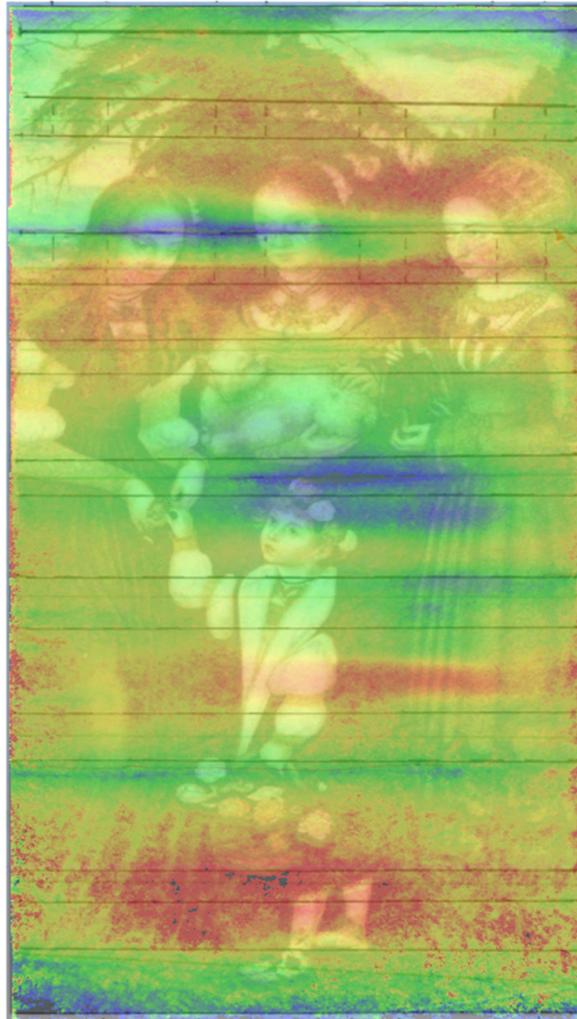


Abb. 8: Schadenskartierung der Vorderseite (Michael Schweiger, Staatliche Kunstsammlungen Dresden) überlagert mit der semi-transparenten Binnenstrukturdarstellung von Epoche 1

4 Fazit & Ausblick

Die Arbeit zeigt, dass photogrammetrische Methoden für die Beurteilung der Wirkung verschiedener Restaurierungsverfahren bzw. zur Überwachung des Restaurierungsvorganges geeignet sind. Für die Anwendung kamen ausschließlich berührungslose Techniken in Frage, wobei vor allem Structure-from-Motion (SfM) als Werkzeug für die Deformationsanalyse zum Einsatz kam. Durch vergleichende Messungen mit einem Streifenlichtscanner an einem Testobjekt zusätzlich zu SfM konnte nachgewiesen werden, dass die Genauigkeitsanforderungen im Millimeter- und Submillimeterbereich erreicht wurden.

Von den in den Arbeiten verwendeten Programmen zur Erstellung einer Punktwolke aus mehreren Aufnahmen, hat sich bei einem flachen Gemälde vor allem Agisoft Photoscan als zuverlässig erwiesen. Punktwolken, die mit diesem Programm berechnet wurden, konnten das Gemälde fast

vollständig repräsentieren. Aufnahmen des Cranach-Gemäldes wurden in drei verschiedenen Epochen mit altem Stützsystem (Parkettierung), ohne Stützsystem und mit neuem Stützsystem gemacht, wobei für jede Epoche Wölbung und Binnenstruktur analysiert wurden. Die Ergebnisse bestätigten die Erwartungen der Restauratoren und konnten zum Verständnis von Prozessen die während der Restaurierung ablaufen, sowie zur messtechnischen und objektiven Beurteilung der Effekte verschiedener Restaurierungsmethoden beitragen. Visualisierungen der produzierten dreidimensionalen Daten beispielsweise eine Profildarstellung oder eine Überlagerung einer farbkodierten Punktwolke können die Schadenskartierung vor der Restaurierung sinnvoll unterstützen. Zudem können Restaurierungs- und Zwischenergebnisse besser erfasst und dokumentiert werden. Der gleiche Arbeitsablauf soll auch in Zukunft angewandt werden, um zu späteren Zeitpunkten weitere Zustände des Gemäldes zu untersuchen. Denkbar wäre auch die abgewandelte Anwendung auf Leinwandgemälde oder die Automatisierung der Visualisierung um schneller Ergebnisse einer Restaurierung abschätzen zu können.

5 Literaturverzeichnis

- HORN, B., 1987: Closed-form solutions of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A* **4**(4), 629-642.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2012: Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele. *Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS 2012)*, Schriftenreihe des DVW, Band 69, Beiträge zum 121. DVW-Seminar am 13. und 14. Dezember 2012 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, 25-46.
- LEE, D. T. & SCHACHTER B. J., 2004: Two Algorithms for Constructing a Delauney Triangulation. *International Journal of Computer Vision* **9**(3), 219-242.
- LOWE, D. G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* **60**(2), 91-110.
- LUHMANN, T., 2010: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach.
- MARX, H., 1996: *Lukas Cranach der Ältere. Der linke Flügel (Innenseite) des Katharinenaltars von 1506: Staatliche Kunstsammlungen Dresden, Gemäldegalerie Alter Meister. Kulturstiftung der Länder (Hrsg.)*.
- NICOLAUS, K., 2003: *DuMonts Handbuch der Gemäldekunde: Gemälde erkennen und bestimmen*. DuMont Buchverlag, Köln.
- SOOT, M., SCHULZE, M. & MULSOW, C., 2015: Untersuchung zur Genauigkeit der Kamerakalibrierung über Merkmalspunkten in SfM-Werkzeugen. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger Tage 2015*, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 269-277.
- WACKROW, R., CHANDLER, J. H. & GARDNER, T., 2008: Minimising systematic errors in DEMs caused by an inaccurate lens model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**, B5, 1-6.