

Untersuchung der Putzritzungen am Magdeburger Dom mit aktiver Thermografie und optischen 3D-Messverfahren

Rainer KRANKENHAGEN *, Ernst Thomas GROLL **, Uwe KALISCH ***,
Christiane MAIERHOFER *, Rüdiger MECKE ****, Jeannine MEINHARDT ***,
Philipp MYRACH *, Michael SCHILLER ****, Thomas SEIDL ****

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

** Restaurator, Magdeburg

*** Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V. (IDK), Halle

**** Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

Kurzfassung. Eines der bedeutendsten Kunstwerke des Magdeburger Doms sind die Putzritzungen am Ostflügel des Kreuzgangs aus dem 13. Jahrhundert. Der größte Teil der einzelnen Putzoberflächen sind Ausbesserungen oder Neuverputzungen aus verschiedenen Restaurierungs- oder Reparaturphasen. In dem von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projekt zur 3D-Kartierung von Bauwerksoberflächen wurden Untersuchungen zur Erfassung der Schäden an diesen Putzritzungen mit optischen 3D-Messverfahren und der aktiven Thermografie durchgeführt. Dabei wurden bei den optischen Verfahren hochauflösende Techniken zur Erfassung der Oberflächentopologie (Stereophotogrammetrie) und zur Vermessung der Rissstrukturen und Ausbeulungen (3D-Trackingverfahren) eingesetzt. Die Zuordnung der Signaturen in den Thermogrammen zu Hohlstellen sowie Materialergänzungen und -ersatz wird diskutiert. Weiterhin erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse mit Messungen an neu freigelegten Putzbereichen.

1. Einführung

Die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauwerken und Bauteilen kann nur dann gewährleistet werden, wenn durch regelmäßige Inspektionen Schäden und Veränderungen am Gebäude rechtzeitig erfasst werden. In vielen Bereichen gibt es dazu noch keine systematische und einheitliche Vorgehensweise. Eine dreidimensionale (3D) Schadenkartierung könnte die Grundlage für eine entsprechende Standardisierung sein. Die digitale 3D-Erfassung von Bauteiloberflächen und Schäden ermöglicht die virtuelle Darstellung von Gebäuden sowie die räumliche Zuordnung der jeweiligen Schädigungen [1, 2]. Werden diese Untersuchungen in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt, so können auch zeitliche Veränderungen am Bauwerk wie z. B. Verformungen, Verwindungen, Risswachstum und Vorwölbungen von Putzoberflächen virtuell dargestellt werden. Größere Gebäudeabschnitte können aktuell schon effektiv mit 3D-Laserscannern und photogrammetrischen Methoden aufgezeichnet werden. In diesem Beitrag wird daher auf

die Detektion von oberflächennahen Schäden mit vergleichsweise hochauflösenden Verfahren eingegangen.

In dem von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projekt „Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen“ wurden für die 3D-Erfassung optische Tracking- und Photogrammetrie-Verfahren entwickelt. Zur Aufnahme thermischer Bilddaten wurde die aktive Thermografie auch zur Untersuchung großer Fassadenflächen eingesetzt, wobei hier eine homogene Erwärmung mit Sonneneinstrahlung und natürliche Abschattung genutzt wurde. Die Verfahren wurden an Fallstudien optimiert, wobei eine der Fallstudien sich mit der Untersuchung der Putzritzungen am Ostflügel des Kreuzgangs des Magdeburger Doms befasst. An diesen Putzritzungen aus dem 13. Jahrhundert werden im Zentralbild Kaiser Otto I. und seine beiden Gemahlinnen Editha und Adelheid dargestellt. Von der Putzoberfläche sind nur noch fragmentarische Restflächen erhalten geblieben. Der größte Teil der einzelnen Putzoberflächen sind Ausbesserungen oder Neuverputzungen aus verschiedenen Restaurierungs- oder Reparaturphasen. Der deutlich kleinere Teil sind die originalen Putzflächen, die nur noch als Inseln vorhanden sind [3]. Umso größer war die Sensation, als im Sommer 2012 noch original erhaltene Putzritzungen hinter einem Epitaph entdeckt wurden, nachdem dieses von der Fassade entfernt wurde. Im Folgenden werden die Untersuchungen an ausgewählten Bereichen einschließlich einem der kürzlich frei gelegten Bereiche vorgestellt.

2. Untersuchungskonzept

Im Projekt wurden Untersuchungen zur Erfassung der Schäden an den Putzritzungen mit optischen 3D-Messverfahren und der aktiven Thermografie durchgeführt. Zunächst erfolgten Messungen an der gesamten Fassade mit aktiver Thermografie, wobei die Erwärmung durch die Sonne ausgenutzt wurde. Danach wurde ein Gerüst mit breiten Laufwegen aufgebaut, von dem aus mit aktiver Thermografie mit Erwärmung durch einen Infrarotstrahler an ausgewählten Messbereichen gemessen wurde. Weitere Untersuchungen zur Erfassung der Oberfläche im Bereich des Zentralbildes erfolgten mit 3D-Stereophotogrammetrie. Eine der Hohlstellen wurde noch genauer mit einem 3D-Trackingverfahren vermessen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Verfahren vorgestellt und durch Überlagerungen der Messergebnisse miteinander verglichen.

3. Untersuchungen mit aktiver Thermografie

Bei einer großflächigen Untersuchung der Putzfassade sollte zunächst die Sonneneinstrahlung als Anregungsquelle für die aktive Thermografie ausgenutzt werden. Deshalb wurde die Messung im Hochsommer bei klarem Himmel ausgeführt, um den maximal möglichen solaren Wärmeeintrag zu erzielen. Unter Verwendung eines 50 mm-Teleobjektivs war es möglich, die IR-Kamera direkt im gegenüber liegenden Teil des Kreuzgangs zu positionieren, was einer Entfernung von etwa 50 m entsprach. Der aus dieser Position erfasste Bildbereich hat eine Ausdehnung von 17 m x 12,8 m und deckt damit den relevanten Teil der Wand mit den Putzritzungen komplett ab. Das Foto in Abb. 1 a zeigt den untersuchten Bereich. Aufgrund der Nord-Süd-Ausrichtung dieses Wandbereiches und der umlaufenden Bebauung erfolgte die direkte Bestrahlung erst in den späten Nachmittagsstunden zwischen 16:00 und 19:25 Uhr. Die höchsten Temperaturen von max. 48°C traten erst unmittelbar vor dem Beginn der erneuten Verschattung ab 19:25 Uhr auf. Das zu diesem Zeitpunkt erfasste Thermogramm ist in Abb. 1 b dargestellt.

Bereiche erhöhter Temperatur, die auf Hohlstellen und Ablösungen hinweisen, sind insbesondere zwischen dem ersten und dem zweiten Fenster (Bereich 1) sowie zwischen dem dritten und dem vierten Fenster (Bereich 2) zu erkennen. Der untere rechte Teil des Bereiches 2 wurde nach den Untersuchungen durch die Restauratoren verfestigt.

Um eine bessere Ortsauflösung zu erhalten, wurden die Bereiche 1 und 2 mit aktiver Thermografie vom Gerüst aus untersucht [4]. Zur Übersicht sind die untersuchten Bereiche in Abb. 1 a rot markiert. In Abb. 2 sind die Thermogramme direkt nach einer Erwärmungszeit von 5 min mit einem Heizlüfter (a) und mit einem IR-Strahler (b) dargestellt. Im Bereich 1 sind zwei deutliche Hohlstellen zu erkennen, die aufgrund von Abplatzungen auch optisch sichtbar sind. Hiervon wurde die unten rechts liegende mit hoher Ortsauflösung mit dem Trackingverfahren untersucht (s. Abschnitt 5). Im Bereich 2 zeichnet sich oben links eine größere warme Stelle ab. Dieser Bereich wurde mit der Stereophotogrammetrie näher untersucht (s. Abschnitt 4).

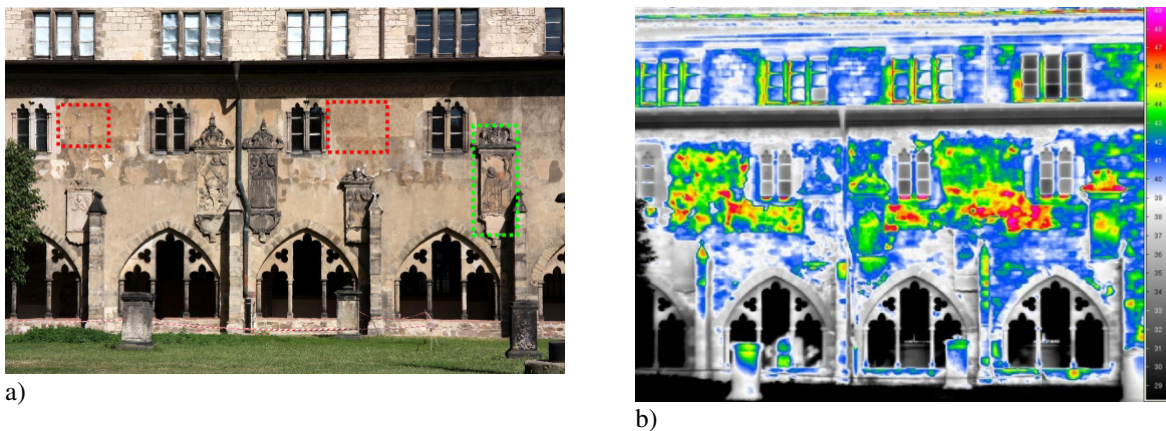


Abb. 1. Thermografie-Untersuchungen der Putzritzungen an der Westfassade des Kreuzgangs des Magdeburger Doms.

a) Ansicht der Fassade, die rot markierten Bereiche (links: Bereich 1 mit 1,5 m x 0,9 m Größe, rechts: Bereich 2 mit 1,8 m x 1,2 m Größe) wurden vom Gerüst aus untersucht. Mit grün ist das später entfernte Epitaph markiert.

b) Thermogramm aufgenommen um 19:25 Uhr am 28.6.2011 nach ca. 3 Stunden Erwärmung durch Sonneneinstrahlung (Temperaturmessbereich: 28 bis 49°C).

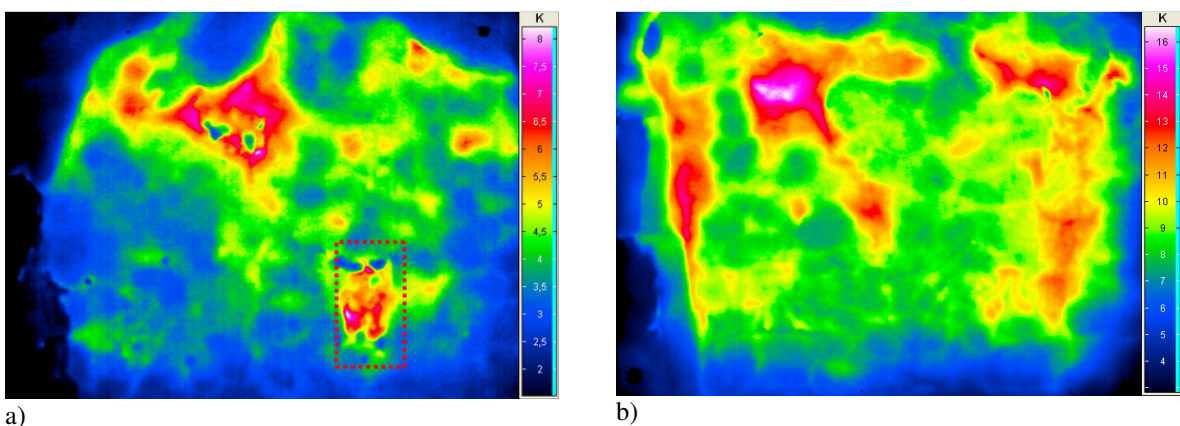


Abb. 2: Thermogramme der in Abb. 1 a markierten Bereiche, aufgenommen direkt nach der Erwärmung.

a) Bereich 1, die Erwärmung erfolgt für 5 min mit einem Heizlüfter (Temperaturskala: 1 bis 8 K nach Abzug des Nullbildes). Der rot markierte Bereich wurde mit dem 3D-Trackingverfahren untersucht.

b) Bereich 2, die Erwärmung erfolgt für 5 min mit einem IR-Strahler (Temperaturskala: 3 bis 16 K nach Abzug des Nullbildes).

Die durch die solare Einstrahlung bzw. externen Wärmequellen erzeugten thermischen Kontraste lagen im Bereich mehrerer Kelvin und waren leicht mit der

verwendeten Bolometerkamera (VarioCam 640 hr) nachweisbar. Es ist in diesem Zusammenhang interessant, die auf diese Weise erhaltene Temperaturverteilung mit den entsprechenden Ergebnissen aus einer „passiven“ Messung zu vergleichen, bei der die thermischen Kontraste nur durch Änderung der Lufttemperatur sowie Abstrahlung aus der Umgebung (nichtsolare Anregung) entstanden. In Abb. 3 werden die entsprechenden Thermogramme direkt miteinander verglichen:

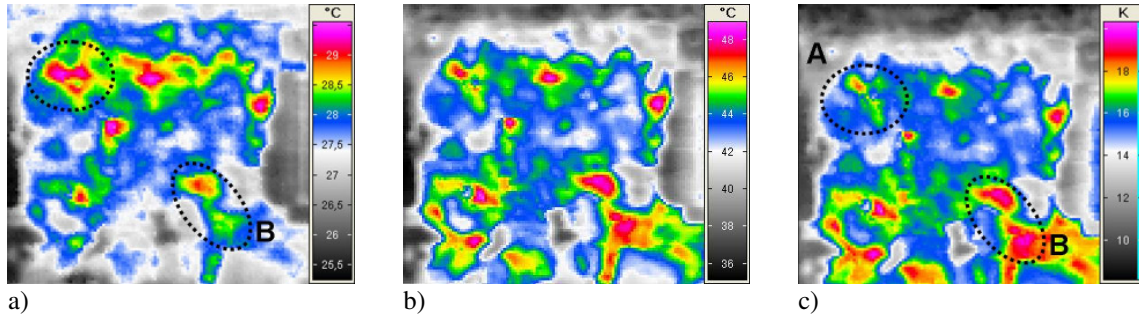


Abb. 3: Vergleich „nichtsolarer“ und solarer Anregung im Bereich zwischen den beiden linken Fenstern
a) Thermogramm um 12:45 Uhr vor Beginn der Bestrahlung (Lufttemperatur ca. 29°C)
b) Thermogramm um 19:25 Uhr nach 3 h intensiver Bestrahlung durch die Sonne
c) Differenzthermogramm von b) und a), Diskussion siehe Text

Im Prinzip waren alle signifikanten Strukturen bereits ohne direkte solare Einstrahlung im Thermogramm erkennbar (vergleiche Abb. 3 a und 3 b), es gibt jedoch auch Unterschiede. Das Differenzthermogramm in Abb. 3 c (das Thermogramm aus Abb. 3 a wurde von dem aus Abb. 3 b abgezogen) hebt diese hervor. So lässt sich gut erkennen, dass der im Bereich A gelegene Hotspot eine dreiarmige Struktur aufweist, wobei die Ablösung oben links offenbar am weitesten fortgeschritten ist. In Abb. 3 a hingegen erscheint die gesamte Struktur während der sehr langsamen Erwärmung (24 h Zyklus) durch laterale Wärmeleitung stark ausgedehnt. Im Bereich B hingegen lässt das Differenzthermogramm zwei etwa gleich warme Bereiche erkennen, während in Abb. 3 a der obere Bereich eine deutlich höhere Temperatur hat. Daraus kann man schlussfolgern, dass die Ursache des unteren Hotspot oberflächennah ist. Dieser Vergleich illustriert noch einmal anschaulich den Informationsgewinn der Puls-thermografie im Vergleich zur einfachen passiven Thermografie.

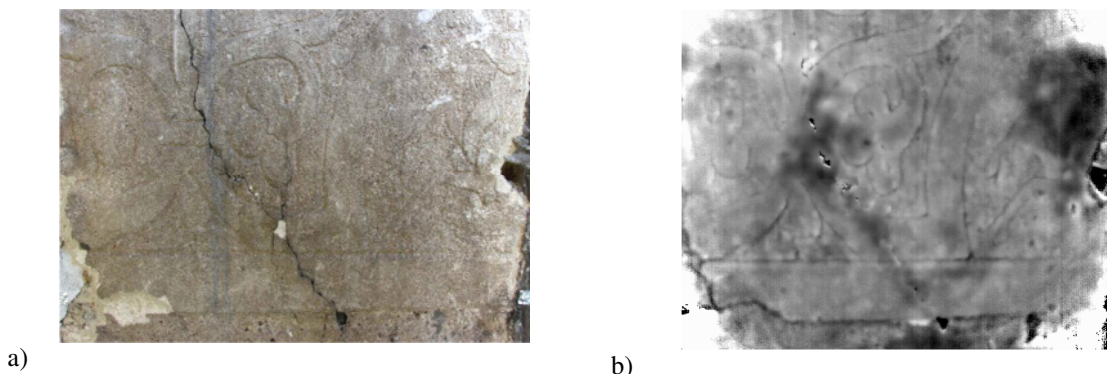


Abb. 4: Ausschnitt aus dem freigelegten Bereich der Putzritzen, der sich unterhalb des abgenommenen Epitaphs befindet. a) Foto, b) Phasenbild der thermografisch erfassten Abkühlungssequenz.

Das Foto in Abb. 4 a zeigt einen Ausschnitt eines Bereichs der Putzritzen, der erst im Juni 2012 frei gelegt wurde. Diese Oberfläche war daher in den letzten 450 Jahren nicht, wie der übrige Teil des Putzes, den Umwelteinflüssen ausgesetzt. Auch hier erfolgte die Charakterisierung mit aktiver Thermografie, jedoch nur mit einer Anregungszeit von 2 min. Die Abkühlung wurde mit der IR-Kamera aufgezeichnet und mittels Puls-Phasen-

Thermografie (PPT [5]) das Phasenbild berechnet, das in Abb. 4 b zu sehen ist. Bereits im Foto ist im Untersuchungsbereich ein deutlicher Riss zu erkennen, die dunkleren Stellen im Phasenbild deuten auf Ablösungen im Rissbereich hin. Zusätzlich ist im Phasenbild die eigentliche Putzritzung sehr deutlich zu sehen, was in den anderen Bereichen praktisch nicht möglich war.

4. Photogrammetrische 3D-Erfassung

Für die Visualisierung von speziellen Oberflächentopologien wie bei den Putzritzungen wurde das Verfahren der Stereophotogrammetrie eingesetzt und weiterentwickelt. Im Gegensatz zu scannenden Verfahren besteht der Vorteil darin, dass für ein Messfeld nur zwei synchrone Bildaufnahmen erforderlich sind und dass eine hohe geometrische Auflösung (im Idealfall ein 3D-Wert pro Pixel) erreicht wird. Um eine hohe räumliche Auflösung zu erreichen, wurde eine Messfeldgröße von 17 x 17 cm bei einem Abstand von 40 cm gewählt. Der gesamte zu untersuchende Bereich wurde schachbrettartig in einzelne Messfelder aufgeteilt, so dass die Messfelder jeweils im Randbereich überlappen. Diese Überlappung ist notwendig, um die Messwerte der Einzelbilder später möglichst nahtlos zusammenfügen zu können. Das Messverfahren selbst ist tolerant bezüglich Abstandsschwankungen oder geringen Abweichungen vom Rastermaß, daher kann es auch von einem Baugerüst aus durchgeführt werden. Die eigentliche Auswertung der Daten erfolgte im Labor und umfasste folgende Schritte:

- a) Berechnung der 3-Daten für ein Messfeld
- b) Bestimmung der tatsächlichen Lagebeziehung der einzelnen Messfelder zueinander unter Verwendung der jeweiligen Überlappungsbereiche
- c) Überführung der Punktdaten des gesamten untersuchten Bereiches in ein Dreiecksnetz



a)



b)

Abb. 5: verwendetes Messsystem für die Stereophotogrammetrie:

- a) Messsystem, bestehend aus zwei AVT Pike Graustufenkameras (2056 x 2062 Pixel) in festem Abstand.
- b) Einsatz des Messsystems auf einem Baugerüst vor den Putzritzungen.

Abb. 5 zeigt den Messaufbau mit den beiden Kameras auf dem Baugerüst. Zur Erfassung des Zentralbildes der Putzritzungen wurde ein Messbereich von 2500 mm x 1000 mm (zwischen dem 3. und 4. Fenster in Abb. 1) ausgewählt. Der Sensor wurde auf einem Stativ in einer definierten Anfangshöhe montiert. Nach jeder Einzelmessung wurde das Stativ in einem vorher definierten Abstand horizontal bewegt (siehe Abb. 5 b). Das Ergebnis der Messungen zeigt Abb. 6 als visualisierten 3D-Datensatz. Die Putzritzungen werden sehr anschaulich wiedergegeben, was bisher noch mit keinem anderen optischen Verfahren möglich war. Die erreichte Ortsauflösung in der Wandebene konnte mit 0,1 mm abgeschätzt werden. Eine Betrachtung der Geometrie des „Ritzgrabens“ ergab, dass sowohl Strichbreite (3 mm bis 7 mm) als auch die Tiefe (1 mm bis 4 mm) starken Variationen unterliegen.



Abb. 6: Visualisierter 3D-Datensatz als Ergebnis der Stereophotogrammetrie an den Putzritzungen vom 24.7.2012. Die Größe des dargestellten Bereiches beträgt 2500 mm x 1000 mm.

Für die Darstellung einer Höhenkartierung des Messbereiches wurde in den 3D-Datensatz zunächst eine gemittelte Referenzebene eingefügt. Zu dieser wurde dann die Differenz zum Originaldatensatz berechnet. Das Ergebnis zeigt die Abb. 7 a. Positive Werte entsprechen Ausbeulungen aus der Ebene heraus und werden rot dargestellt, Eindellungen oder Vertiefungen hingegen blau.

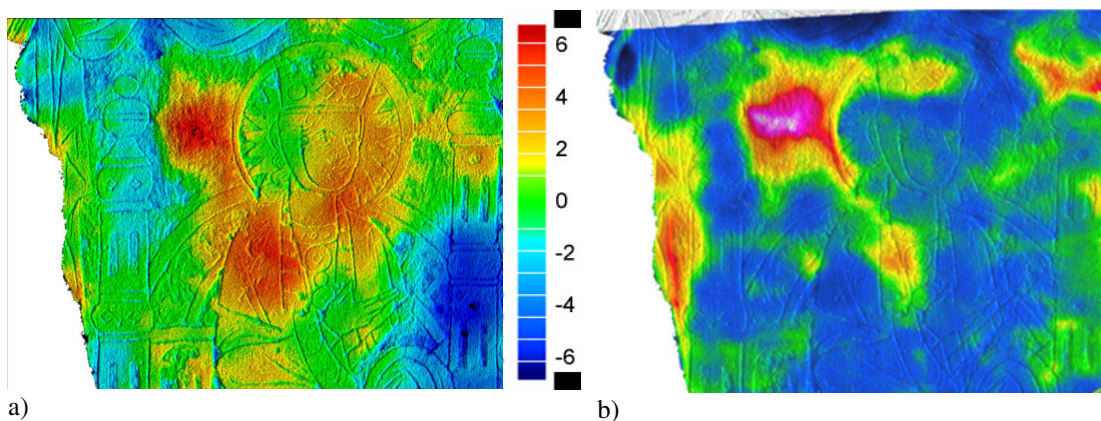


Abb. 7: ausgewählte Ergebnisse der photogrammetrischen 3D-Erfassung

a) Höhenkartierung des Messbereichs als Abweichung von einer angenommenen Ebene, Vorwölbungen sind rot, Eindellungen blau dargestellt, Zahlenangaben in mm

b) Überlagerung der visualisierten Putzritzungen mit Thermogramm aus Abb. 2 b.

Die direkte Überlagerung des entsprechenden Bereichs des Zentralbildes mit einem Thermogramm zeigt Abb. 7 b. Die wärmste Stelle im Thermogramm korreliert demnach eindeutig mit einer Ausbeulung in Abb. 7 a. Dies deutet insgesamt auf eine Hohlstelle hin. Der Hotspot rechts oben im Thermogramm hingegen ist im Topografiebild völlig unauffällig. Hier könnte eine innere Ablösung ohne Verformung der Putzschicht vorliegen.

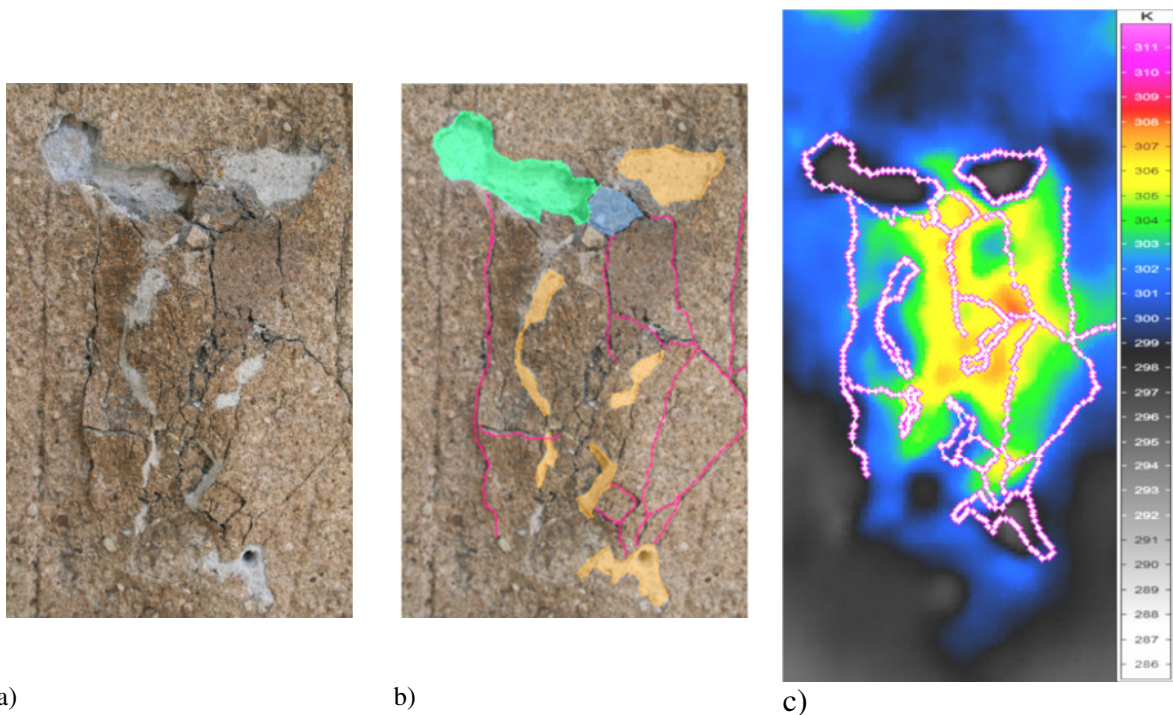
5. Tracking-System

Für die 3D-Kartierung von Rissen direkt am Objekt wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem der Nutzer ein Tastwerkzeug an der Rissoberfläche entlang führt. Dieses Tastwerkzeug besteht aus einem ca. 30 cm langen, geraden Stab, auf dem asymmetrisch drei Marker befestigt sind (Abb. 8). Am vorderen Ende befindet sich eine austauschbare Messspitze, die je nach Bedarf an die Eigenschaften der jeweiligen Objektoberflächen

angepasst werden kann. Die Position der drei Marker im Raum wird aus den Bilddaten einer kalibrierten Anordnung von vier Kameras mit einer laufenden Trackingsoftware kontinuierlich bestimmt. Die Aufzeichnung der Positionsdaten kann entweder für einzelne diskrete Punkte oder kontinuierlich erfolgen, weitere Einzelheiten sind in [6] beschrieben. Verschiedene Messungen zur Bestimmung der Trackinggenauigkeit haben ergeben, dass eine Positionsbestimmung von einzelnen Markern mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm möglich ist.



Abb. 8: Trackingsystem mit Tastsensor im Einsatz.



a) Foto (Makroaufnahme)
 b) 3D Punktwolke der aufgenommenen Rissdaten als Datenfusion mit dem 2D Foto
 c) Datenfusion der 3D Rissdaten mit dem 2D Thermogramm (Daten aus Abb. 2 a).

In Abb. 9 a zeigt eine Makroaufnahme einer Ausbeulung der Putzritzen, welche mit dem Trackingsystem vermessen wurde. Abb. 9 b zeigt das Resultat einer Datenfusion der gemessenen Rissdaten mit dem Foto [7]. Die Rissdaten wurden lagerichtig auf das Foto projiziert und bilden so z. B. die Grundlage für eine traditionelle Kartierung. Aus den 3D Daten können detaillierte Informationen gewonnen werden, die eine solche Kartierung bereichern können. In Abb. 9 c erfolgte auf die gleiche Weise die Datenfusion mit dem Thermogramm. Hier können die wärmeren Bereiche momentanen Putzablösungen

zugeordnet werden. Ausgebesserte Stellen in der oberen Hälfte haben sich hingegen nur gering erwärmt, was ein Indiz für eine gute Haftung am Untergrund ist.

6. Zusammenfassung

Die Entwicklung der Messverfahren und die Messungen im Rahmen der Fallstudien erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Restauratoren und Denkmalpflegern und lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand in die Praxis umsetzen. Bei der Vermessung der Hohlstelle an den Putzritzungen am Magdeburger Dom haben die Restauratoren die Messdaten teilweise selbst erfasst und die Tastwerkzeuge getestet. Die Stereophotogrammetrie ermöglicht eine optimale Visualisierung der Putzritzungen, die so mit Fotos bisher nicht möglich war. Die Ergebnisse der Thermografiemessungen mit solarer Erwärmung lassen sich von Anwendern der herkömmlichen Bauthermografie schnell nutzen. Auch die aktive Thermografie kann mit wenigen Hilfsmitteln einfach realisiert werden.

Zu den vorgestellten Verfahren wurden im Projekt Merkblätter erarbeitet, die zusammen mit dem Abschlussbericht des Projektes über den Fraunhofer IRB Verlag bezogen werden können.

Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-10.33 / II 3 – F20-10-087). Besonderer Dank gilt Herrn Asmus Schriewer, der das Projekt im Auftrag des BBR sehr konstruktiv begleitete und den Mitgliedern der begleitenden Arbeitsgruppe Herrn Matthias Hemmleb, Herrn Ralf Lindemann und Herrn Johannes Vielhaber.

Referenzen

- [1] Wendt, Axel, A concept for feature based data registration by simultaneous consideration of laser scanner data and photogrammetric images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 62, no. 2 (June 2007): 122-134.
- [2] Schaich, M.: Mit digitalen Fotoserien zum 3-D-Modell: Möglichkeiten einer Software. Restauro 5, 2012
- [3] Groll, T.: Putz/Mörtel – Die Putzritzungen des Magdeburger Domes. In: Umwelt – Kultur – Schutz – Innovationen zur Erhaltung des Kulturerbes im Osten Deutschlands. Edition Leipzig, 2001, S. 84-96
- [4] Maierhofer, Ch., Röllig, M., Krankenhagen, R., Integration of active thermography into the assessment of cultural heritage buildings. Journal of modern optics. Vol. 57, No. 18, 2010, pp. 1790-1802
- [5] Maldague, X., Marinetti, S., Pulse phase infrared thermography. J. Appl. Phys. 79, 2694 (1996)
- [6] Seidl T., Mecke, R., Schiller, M., Maierhofer, C., Meinhardt, J. Trackingbasierte 3D-Risskartierung auf Oberflächen; 3D-NordOst 2012 - 15. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten; Tagungsband; S. 87-96; ISBN 978-3-942709-07-1; Berlin; 2012
- [7] Seidl, T., Schiller, M., Mecke, R. Datenfusion und -visualisierung zum Monitoring von Bauteiloberflächen in der Denkmalpflege. Artikel: 9./10. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF 2010; Fraunhofer IFF; ISSN 2191-8783; Magdeburg; 2011