

# Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren

Christiane MAIERHOFER<sup>1</sup>, Mathias RÖLLIG<sup>1</sup>, Henrik STEINFURTH<sup>1</sup>,  
Rüdiger MECKE<sup>2</sup>, Michael SCHILLER<sup>2</sup>, Alexa KERNCHEN<sup>2</sup>, Uwe KALISCH<sup>3</sup>,  
Jeannine MEINHARDT<sup>3</sup>, Christiane HENNEN<sup>3</sup>, Torsten ARNOLD<sup>4</sup>, Thomas GROLL<sup>5</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

<sup>3</sup> Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V. (IDK), Halle

<sup>4</sup> Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt Landesmuseum für Vorgeschichte, Halle

<sup>5</sup> Restaurator, Magdeburg

**Kurzfassung.** Im Beitrag werden Verfahren und Strategien basierend auf optischen und thermografischen Methoden zur Lokalisierung, Erfassung und Bewertung von Putzablösungen und Ablösungen von Fassadenelementen vorgestellt. Abgelöste Fassadenbereiche zeigen dabei sowohl geometrische als auch thermische Auffälligkeiten, die im Rahmen eines Monitoring auch über größere Zeiträume verfolgt werden können. Als optische Verfahren werden die Stereophotogrammetrie und die trackingbasierte taktile 3D-Erfassung von Oberflächenmerkmalen eingesetzt. Zur Charakterisierung verdeckter Ablösungen und Bauteile wird die aktive Thermografie mit natürlicher und künstlicher Erwärmung der Bauteiloberfläche verwendet. Systematische Untersuchungen an Probekörpern und Fallstudien (Magdeburger Dom, Wandbild in Cobbelsdorf) zeigen, wie u. a. mit der Verfahrenskombination Ablösungen und Materialinhomogenitäten unterschieden werden können.

## 1 Einführung

Der Erhalt historischer Putze und Fassadenelemente ist sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus materialtechnischen und nicht zuletzt aus denkmalpflegerischen Gründen sinnvoll. Häufig sind Putze über ihre das Mauerwerk schützende Funktion hinaus auch als Träger von Malereien und weiteren Bildinformationen ausgestaltet. Bei Decken und höheren Wänden muss zusätzlich der Sicherheitsaspekt berücksichtigt werden, d. h. das Herabfallen von Bauteilen muss vermieden werden. Nur die sorgfältige und systematische Erfassung von Schäden wie Rissen, Materialverlust, Ablösungen usw. sowie das Beobachten von Veränderungen ermöglichen einen rechtzeitigen Einsatz von Instandsetzungsmaßnahmen und somit eine effiziente Sicherung der Bausubstanz.



Im Bereich des Bauens im Bestand ist die Erhaltung von Putzen bislang eher die Ausnahme. Entsprechend sind zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen zur Erfassung großer Putzflächen, im Sinne eines Monitorings, anders als im Bereich des Natursteins, eher unterrepräsentiert. Es gibt einschlägige Publikationen zur Sanierungspraxis von Putzen, in denen auch diagnostische Aspekte Berücksichtigung finden. Diese konzentrieren sich allerdings zumeist auf eine punktförmige Schadenserfassungen hinsichtlich der Salz- und Feuchtebelastung oder von kleinräumigen Ablösungen, die vornehmlich durch Perkussionstest detektiert werden [1, 2, 3]. Auch für die Erfassung von Rissen und deren Dynamik stehen bereits etablierte Messmethoden zur Verfügung (z. B. Rissmonitore, faseroptische Systeme, 3D-Laserscan, Laserextensometer oder auch potentiometrische Systeme) [4].

Putzablösungen sind durch Ausbeulungen, Abplatzungen und/oder Risse als geometrische Veränderungen an der Oberfläche erkennbar und gehen im Untergrund häufig mit einer Materialzermürbung einher. Die Ablösungen von keramischen Fassadenelementen hingegen bleiben nach außen häufig nicht erkennbar und sind daher mit besonderen Risiken hinsichtlich der Verkehrssicherheit verbunden.

Zerstörungsfreie Untersuchungen von Putzflächen wurden beispielsweise zur Evaluierung von Kalkmörteloberflächen an zahlreichen Denkmalobjekten in Sachsen-Anhalt durchgeführt, wobei es vor allem um eine optisch-haptische Einschätzung von Mörteloberflächen, aber auch um die Prüfung der Haftung zum Untergrund ging. Diese wurde im Wesentlichen durch Perkussionstests ermittelt. In einem Förderprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt erfolgte zerstörungsfrei die Detektion von Hohlstellen im Bereich großformatiger romanischer Wandmalereien. In diesem Zusammenhang wurden auch zahlreiche Labortests zur Hohlstellendetektion mittels aktiver IR-Thermografie durchgeführt [5].

Geometrische Veränderungen können durch Verformungsmessungen basierend auf dem Vergleich von zwei oder mehr 3D-Datensätzen eines Objektes, welche zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden, oder auf dem Vergleich von 3D-Messpunkten mit definierten Referenztopologien nachgewiesen werden. Die Datensätze sind das Resultat von 3D-Oberflächenmessungen. Die Erfassung der 3D-Daten kann je nach Verfahren auf unterschiedliche Weise erfolgen. Im Folgenden werden Verfahren erläutert, welche sich für die Erfassung von Schadensbildern an Putzen und Fassadenelementen eignen. Es wird dabei zwischen antastenden und berührungslosen Verfahren unterschieden. Bei den antastenden Verfahren wird ein Werkzeug über die Objektoberfläche geführt. Die Pose des Werkzeugs wird dabei kontinuierlich mit Hilfe eines Trackingsystems verfolgt, wodurch die Plastizität der Objektoberfläche ermittelt wird. Bei optischen Systemen werden Kamerabilder ausgewertet, um die Pose eines Objektes zu ermitteln. Marker auf dem Messwerkzeug erleichtern die Ortung des Objektes im Kamerabild. Je nach verwendeter Kameratechnik sind Genauigkeiten in der Positionsbestimmung im Submillimeterbereich erreichbar. Bei den berührungslosen Verfahren werden Systeme für die 3D-Vermessung verwendet, die keinen direkten Kontakt zur Objektoberfläche benötigen. Für Verformungsmessungen an Putzen sind die Lichtschnittverfahren bzw. flächenbasierte Alternativen, wie z. B. Verfahren der Photogrammetrie und Laserscanverfahren, zu nennen.

Eine Kombination der aktiven Thermografie mit Verfahren der antastenden und berührungslosen Verformungsmessungen erscheint daher zur Erfassung und Bewertung von Schäden und Ablösungen an Putzen und Fassadenelementen optimal geeignet. Im Folgenden werden zwei Anwendungsbeispiele dieser Verfahrenskombinationen vorgestellt: die Putzritzen am Magdeburger Dom und ein Wandbild in Cobbeledorf.

## 2 Experimentelles

### 2.1 Aktive Thermografie

Verdeckte Hohlstellen und Ablösungen können, auch großflächig, mit aktiven Thermografieverfahren detektiert und charakterisiert werden. Das Verfahren beruht auf einer aktiven Erwärmung der zu untersuchenden Struktur mit einer geeigneten Wärmequelle (auch mit Sonnenstrahlung) und der Beobachtung der Erwärmung und/oder der Abkühlung der Oberfläche mit einer Infrarot-Kamera. Durch die von instationären Wärmetransportprozessen induzierte Temperaturverteilung auf der Bauteiloberfläche können Inhomogenitäten und Feuchte mit von der Umgebung abweichenden thermischen Materialeigenschaften bis zu einer Überdeckung (Tiefe) von 10 cm detektiert werden [6, 7]. Häufig können sich bei der Thermografie jedoch verschiedene Effekte (aktuelle Temperatur der Oberfläche mit zusätzlichen Reflexionen, Verdunstung, Konvektion an der Oberfläche) und Materialeigenschaften (Emissivität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) überlagern [8, 9]. Daher sind Messstrategien erforderlich, die diese Effekte voneinander unterscheiden können, z. B. durch Kombination von passiver und aktiver Thermografie und/oder durch den Einsatz unterschiedlicher Wärmequellen und die Variation der zeitlichen Anregung.

Als homogene und effiziente Wärmequelle zur großflächigen Untersuchung von Fassaden ist prinzipiell auch die Sonne sehr gut geeignet [10]. Da durch Sonnenaufgang bzw. -untergang eher langsame Änderungen der Bestrahlungsintensitäten zu erwarten sind, eignet sich diese Art der Anregung besonders zur Ortung tieferliegender Strukturen. Aber auch Störungen aufgrund einer durchziehenden Bewölkung können zur zeitlich modulierten Anregung genutzt werden. Neben der direkten Sonneneinstrahlung führt auch der Tagesgang der Lufttemperatur zu instationären Wärmeleitungsvorgängen in Außenwänden und ermöglicht daher ebenfalls eine Ortung von Inhomogenitäten. Dieser Effekt wird auch die anderen Messungen immer überlagern. Werden von Außenfassaden nur einzelne Thermogramme und keine Sequenzen erfasst, dann muss immer berücksichtigt werden, dass die momentane Verteilung der Oberflächentemperatur die Wirkung der vorher stattgefundenen Änderungen der Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung ist. Daher können zu unterschiedlichen Zeiten immer verschiedene Strukturen optimal erkannt werden.

Bei den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde eine Mikrobolometer Infrarotkamera mit einer Detektorgröße von 480 x 512 Pixeln, einem NETD (Rauschäquivalente Temperaturdifferenz, Temperaturauflösung) von 60 mK und einer maximalen Bildwiederholrate von 50 Hz eingesetzt. In den folgenden Untersuchungen wurde eine Bildwiederholrate von 5 Hz verwendet. Es kamen verschiedene Objektive zum Einsatz: 30 mm (Normalobjektiv) und 12,5 mm (Weitwinkel). Bei allen Untersuchungen wurde die NUC (Korrektur der Detektorinhomogenität) nicht ausgeschaltet. Bei der Durchführung der NUC sind daher in den Zeitsequenzen kleinere Temperatursprünge unvermeidbar. Bei den Untersuchungen am Magdeburger Dom erfolgte die künstliche Erwärmung mit einem Infrarotstrahler mit einer Aufnahmeleistung von 2,4 kW über eine Zeit von 5 min. Die Abkühlung wurde über 10 min aufgenommen. Bei den Messungen in Cobbelsdorf wurde die Erwärmung durch solare Einstrahlung genutzt. Diese wurde mit dem Hukseflux-Wärmeflussensor gemessen. Da im Laufe der Messung zwischen 11:00 und 16:00 Uhr die Sonne häufig durch Wolken verdeckt wurde, konnten immer wieder Abkühlungskurven erfasst werden.

## 2.2 Trackingbasierte taktile 3D-Erfassung

Für die 3D-Risskartierung wurde ein einfaches Tastwerkzeug eingesetzt, das manuell entlang des Risses geführt und dessen Position und Orientierung im Raum über ein optisches Trackingsystem erfasst wird.



**Bild 1.** Messsystem für die taktile 3D-Erfassung von Rissen

Das übliche Einsatzgebiet dieses Systems ist die Aufnahme von menschlichen Bewegungen für Motion-Capturing-Anwendungen. Für die 3D-Risskartierung werden Messgenauigkeiten im Millimeterbereich benötigt, welche mit dem System erreicht werden können: Messungen zur Bestimmung der Trackinggenauigkeit haben ergeben, dass eine Positionsbestimmung von einzelnen Markern (Infrarotlicht reflektierende Kugeln) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5$  mm möglich ist. Dies kann mit einer Kameraanordnung wie in Bild 1 dargestellt erreicht werden. Hierfür ist eine

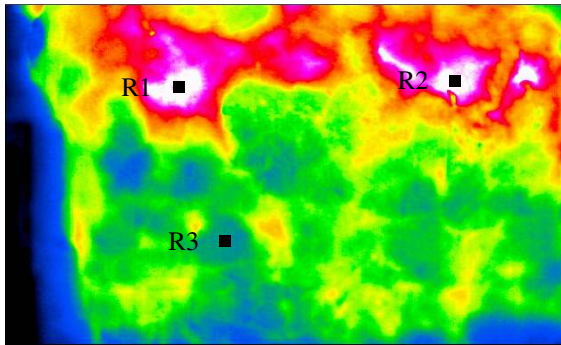
Kalibrierung des Kamerasystems notwendig. Neben dem Tastwerkzeug und dem Trackingsystem kommt außerdem eine Software zum Einsatz, welche speziell für den Zweck der komfortablen Datenaufzeichnung direkt am Objekt entwickelt wurde. Die Aufzeichnung der Daten kann damit entweder für einzelne diskrete Punkte oder kontinuierlich erfolgen. Das gesamte System besteht damit aus den drei Komponenten Trackingsystem, Tastwerkzeug und Softwaremodul.

## 3 Langzeituntersuchungen an den Putzritzungen im Magdeburger Dom

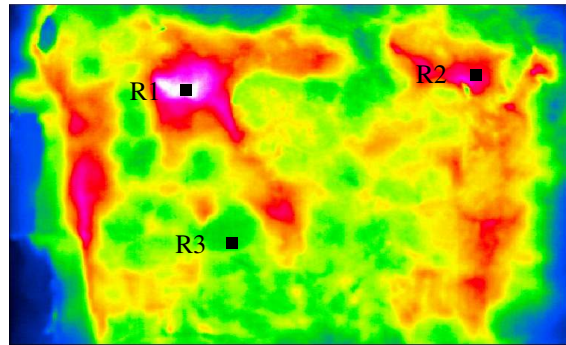
Eines der bedeutendsten Kunstwerke des Magdeburger Doms sind die Putzritzungen am Ostflügel des Kreuzgangs aus dem 13. Jahrhundert. Im Zentralbild werden Kaiser Otto I. und seine beiden Gemahlinnen Editha und Adelheid dargestellt. Von der Putzoberfläche sind nur fragmentarische Restflächen erhalten geblieben. 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 zwischen den verschiedenen aneinandergesetzten Ausflickungen existieren. Im Rahmen zweier vom BBR geförderter Forschungsprojekte wurden begleitend zu Restaurierungsarbeiten von 2011 bis 2015 u. a. Untersuchungen mit aktiver Thermografie an den Putzritzungen durchgeführt. Bild 2 zeigt eine Kartierung der in diesem Zeitraum durchgeführten Verfestigungen an den Putzritzungen. Dabei sind im Bereich des Zentralbildes (markiert) kaum Verfestigungen und eine fast vollständige Laserreinigung der Oberfläche durchgeführt worden.



**Bild 2.** Von 2011 bis 2015 durchgeführte Verfestigungen an den Putzritzungen. Das Rechteck markiert das Zentralbild.



a) Thermogramm 2014, Temperaturdifferenz von 2 bis 15 K



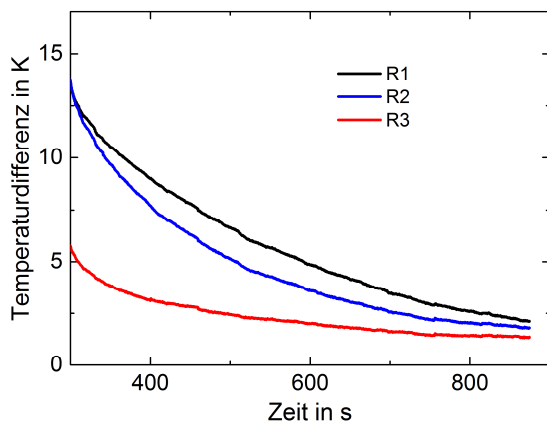
b) Thermogramm 2012, Temperaturdifferenz von 2 bis 16 K



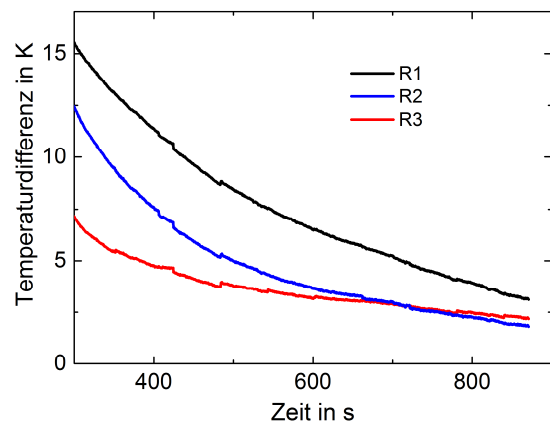
c) Foto des Messbereiches vom August 2013, die Laserreinigung ist noch nicht vollständig abgeschlossen.



d) Vor der Restaurierung, vor 2011. Der Ausschnitt zeigt Adelheid, die zweite Ehefrau von Kaiser Otto I.



e) Abkühlkurven nach der künstlichen Erwärmung 2014 an den Messstellen R1 bis R3 (s. Bild a).



f) Abkühlkurven nach der künstlichen Erwärmung 2012 an den Messstellen R1 bis R3 (s. Bild b).

**Bild 3.** Ergebnisse der Untersuchungen im linken oberen Bereich des Zentralbildes

Messungen mit aktiver Thermografie am Zentralbild wurden im April 2012 und im Oktober 2014 durchgeführt. Zu diesen Zeitpunkten war ein Gerüst vorhanden, so dass die Messflächen mit Hilfe eines Infrarotstrahlers (2400 W) erwärmt werden konnten. Bild 3 zeigt die Thermogramme und Fotos des linken oberen Quadranten des Zentralbildes 2012 vor und 2014 nach der Laserreinigung. Die mittlere Temperatur in den Thermogrammen in Bild a und b ist vor der Laserreinigung (b) geringfügig höher, was vielleicht auf eine etwas stärkere Absorption der Infrarotstrahlung aufgrund der noch dunkleren, verunreinigten Oberfläche zurückzuführen ist. In beiden Thermogrammen sind im oberen Bereich Stellen zu erkennen, die gegenüber ihrer Umgebung ca. 8 K wärmer sind. Dabei kann es sich entweder um Hohlstellen oder um mit Fremdmaterial verfüllte oder ausgebesserte Putzablösungen handeln. Aus diesem Grund wurden in den Bildern e und f die

Abkühlungskurven oberhalb dieser Fehlstellen (R1 und R2) und im Vergleich zu einem kühleren Bereich mit festem Putz (R3) dargestellt. Da die Temperatur oberhalb der Fehlstelle R2 deutlich schneller abfällt als oberhalb der Fehlstelle R1, ist zu vermuten, dass es sich hierbei um eine unverfüllte Hohlstelle handelt, während R1 bereits verfüllt wurde.

## 4 Untersuchungen am Wandgemälde in Cobbelsdorf

### 4.1 Beschreibung des Wandgemäldes

Das Wandbild *Industrialisierte Landwirtschaft* von Erich Enge 1970/71, s. Bild 4 a, befindet sich am ehemaligen Kulturhaus der früheren landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaft (LPG) *Lenin* in Cobbelsdorf. Die Maße betragen H x B: 11 x 18 m. Eigentümer ist jetzt die Flämingland Touristik und Freizeit GmbH Cobbelsdorf. Das Kulturhaus, eine ehemalige Düngerhalle, ist eine Pfeilerkonstruktion, auf der das Dach aufliegt. Die Zwischenräume zwischen den Pfeilern sind mit Hohlblocksteinen aus DDR-Produktion vermauert. Bild 4 b zeigt die Innenansicht der von außen bemalten Wand.

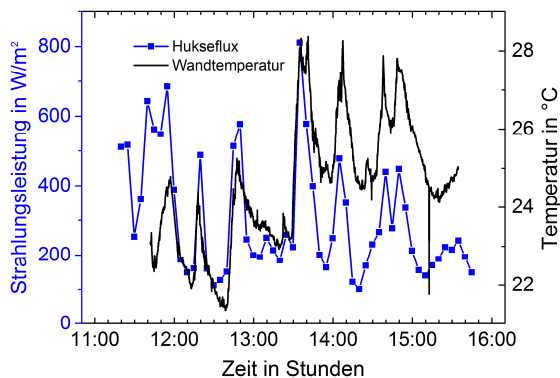
Auf den Untergrund wurde ein dünner, in der Stärke variierender zementhaltiger Putz auf einen Putzträger aus Ziegeldraht aufgezogen. Bei der Malerei handelt es sich um Silikatmalerei auf Basis von *Silikat 68*, einem industriellen Wandanstrich aus DDR-Produktion. Die Voraussetzungen für die Malerei waren nach Aussage von Erich Enge nicht optimal. So war der Putz beispielsweise nicht wie vereinbart drei Wochen vor der Bemalung aufgebracht. Durch einen Schlagregen unmittelbar nach Fertigstellung waren zumindest Teile der Malerei abgespült worden, so dass umfangreiche Ergänzungen und Überarbeitungen notwendig wurden. Trotz unzureichender Voraussetzungen hat sich das Bild bis zur ersten Restaurierung 35 Jahre gehalten, was für die Ausführungsqualität von Erich Enge spricht. Die Konservierung und Restaurierung erfolgte im Oktober/November 2006. Im Mauerwerk gab es vier vom Dach bis zum Sockel durchgehende, teilweise bis zu 4 cm breite und bis zu 12 cm tiefe Risse entlang der Fugen zwischen Pfeilern und Mauerwerk bzw. in deren Umfeld. In diesen Bereichen kam es zu irreversiblen Versprüngen in Wand und Putz. Dort waren mehrere Putzschollen lose im Gefüge. Durch die Korrosion eines Zugankers war eine große Putzscholle am linken Bildrand abgesprengt worden. Teile des Putzes lagen hohl. Aufgrund der verschiedenen Bewegungen zwischen Baukonstruktion (Pfeiler/Mauerwerk) und Putz (mit Putzträger) entstanden im Umfeld der mittleren Risse großflächige hohlliegende Putzschollen. Besonders entlang der Fugen des Mauerwerkes gab es kleine Risse, die wiederum Malschichtverluste zur Folge hatten. Durch den Bewuchs mit wildem Wein am rechten Bildrand wurde die Putzschicht angegriffen.

Die aufwendige Sicherung des umfangreich hohlliegenden Putzes war eine wesentliche Maßnahme der Restaurierung. Die Hinterfüllung der Hohlstellen erfolgte mit acrylatdispersionsgebundenem Mörtel. Der Restaurator beschreibt, dass dennoch perspektivisch durch unterschiedliche Bewegungen neue Risse im Putz nicht ausgeschlossen werden können. Die flächigen Putzergänzungen erfolgten mit einem kalkgebundenem Putz, der Rissverschluss mit einem mineralischen und acrylatdispersionsgebundenem Mörtel. Die farblichen Ergänzungen auf neu hergestellten Putzflächen und verschlossenen Fugen wurden mit Silikatfarben retuschiert. Zur Schaffung einer vertretbaren Gesamtästhetik und Ablesbarkeit des Themas des gealterten und patinierten Bildes wurden störende Fehlstellen (Abwitterungen) in der Malschicht entsprechend der erkennbaren Farbflächen optisch geschlossen und Konturen ergänzt. Darüber hinaus wurden die sich im Bild abzeichnenden Risse entlang der Mauerwerksfugen farblich integriert. Unter dem im Rahmen der Maßnahmen

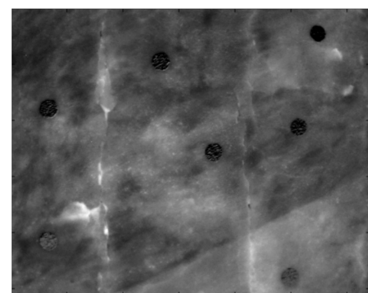
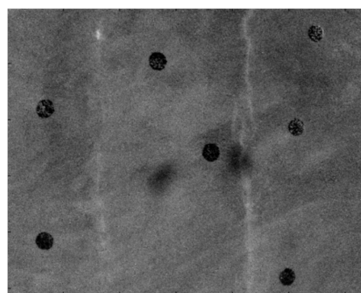
abgenommenen Bewuchs war die Malerei so stark geschädigt, dass sie nur als Fragment sichtbar war. Dort sind erkennbare Formen ergänzt worden.



**Bild 4.** Links: Wandmalerei *Industrialisierte Landwirtschaft* von Erich Enge 1970/71. Rechts: Rückwand des Wandbildes mit senkrechten Pfeilern.



**Bild 5.** Links: Zeitlicher mittlerer Temperaturverlauf auf der Fassade und zeitlicher Verlauf der mit dem Hukseflux-Sensor erfassten Globalstrahlung. Rechts: Thermogramm, aufgenommen 16 Minuten nach dem dritten Maximum gegen 13:56 Uhr. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz in K zum Startbild.



**Bild 6.** Vergleich von zwei Thermogrammen (rechts), die zu verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden, mit dem Ergebnis des Trackingverfahrens (links).

Die Thermografieuntersuchungen des gesamten Wandbildes und eines Ausschnitts im unteren Bereich des linken Trägers erfolgten am 9.9.2014 zwischen 11:00 und 16:00 Uhr. Die zeitlichen Verläufe der Globalstrahlung sowie der mittleren Temperatur auf der Wandoberfläche sind in Bild 5 links dargestellt. Hier ist sehr gut zu erkennen, wie der Temperaturverlauf der Sonneneinstrahlung folgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund ihrer Ausrichtung die Wand erst ab 10:10 Uhr von der Sonne beschienen wurde und sich der Einstrahlwinkel änderte. Bild 5 rechts zeigt ein Thermogramm des Wandbildes gegen 13:56 Uhr, d. h. ca. 16 min nach dem 3. erfassten Temperaturmaximum. Es ist hier die Temperaturdifferenz zu einem Thermogramm dargestellt, das noch im Schatten aufgenommen wurde, bevor die Sonne das Wandbild erreichte. Deutlich ist die Struktur der

beiden Stahlträger zu erkennen sowie der Verlauf von Rissen zwischen den Stahlträgern und dem Dach. Weiterhin ist die Struktur des Mauerwerks zu sehen.

Die Untersuchungen im Bereich des Ausschnitts im unteren Bereich des linken Trägers zeigt Bild 6. Links sind die Ergebnisse des Risstracking dargestellt, die Rissverläufe an der linken und rechten Kante des Trägers zeigen. Diese Risse sind teilweise auch in den beiden ausgewählten Thermogrammen zu erkennen.

## **Ausblick**

Weitere Untersuchungen zur Charakterisierung von Putz-, Fliesen- und Klinkerablösungen an Probekörpern, und von weiteren Ablösungen von Fassadenelementen, z. B. von Dünnschicht-Solarmodulen und von Fliesenbildern, sind im Projekt geplant.

## **Danksagung**

Diese Untersuchungen erfolgen im Projekt ERBE, das im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gefördert wird (Aktenzeichen: SF- SWD – 10.08.18.7-13.42).

## **Referenzen**

- [1] H. Kollmann. Sanierungspraxis Putz. Von der Diagnose bis zur Ausführung, 2010, Praxis kompakt 4, C. Maurer
- [2] T. Dettmering, H. Kollmann. Putze in Bausanierung und Denkmalpflege, 2012, DIN e. V.
- [3] M. Patzner 2012 Ursachen von Putzschäden. In: Die Mappe, Nr. 5, 2012, S. 32-37
- [4] C. Maierhofer, R. Krankenhagen, P. Myrach, M. Röllig, R. Mecke, M. Schiller, T. Seidl, U. Kalisch, C. Hennen, J. Meinhardt, H. Kersten, E. Thomas Groll. Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen. Abschlussbericht 2014, 193 S., Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-9145-4  
<https://www.baufachinformation.de/forschungsbericht/240758>
- [5] Franzen, Löther, Meinhardt-Degen, Weise 2007 Detektierung und Konservierung infolge von Umwelteinflüssen hohlstehender Wandmalereien am Beispiel der national wertvollen mittelalterlichen Kirchen in Kühren und Bad Schmiedeberg, Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ: 21045006, DD 34/2007, 137 S., DOI: 10.5165/hawk-hhg/62
- [6] Maierhofer, Ch., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., and Hillemeier, B.: Application of impulse thermography for non-destructive assessment of concrete structures. Cement & Concrete Composites, 2010, Vol. 28, pp. 393-401
- [7] Franzen, C., Löther, T., Meinhardt-Degen, J., and Weise, S.: Berührungslose Hohlstellendetektion an Wandmalereien. In Natursteinsanierung Stuttgart 2008. Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [8] Maierhofer, Ch., Arndt, R., and Röllig, M.: Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography, Infrared Physics & Technology Vol. 49, Issue 3, 2007, pp. 213-217
- [9] Walther, H. G.: Surface roughness influence on photothermal radiometry. Applied Surface Science 193, no. 1-4, June 5, 2002, pp. 156-166
- [10] Krankenhagen, R., and Maierhofer, Ch.: Pulse phase thermography for characterising large historical building facades after solar heating and shadow cast - a case study. Quantitative InfraRed Thermography Journal 11(1), 2014, pp. 10-28