

Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen

Christiane Maierhofer¹, Rainer Krankenhagen¹, Philipp Myrach¹, Mathias Röllig¹, Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Thomas Seidl², Uwe Kalisch³, Christiane Hennen³, Jeannine Meinhardt³, Henning Kersten³, Ernst Thomas Groll⁴

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FB 8.4

²Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)

³Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK)

⁴Ernst Thomas Groll, Restaurator

Aktenzeichen: **SF-10.08.18.7-10.33 / II 3 - F20-10-087**

1 Ziel der Forschungsaufgabe

Das vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderte Forschungsprojekt „Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen“ wurde an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Fachgruppe 8.4 „Akustische und elektromagnetische Verfahren“ zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), dem Institut für Diagnostik und Konservierung in Sachsen und Sachsen-Anhalt (IDK) und dem Restaurator Herrn Thomas Groll bearbeitet. Projektstart war der 1.1.2010, die ursprünglich vorgesehene Laufzeit von 24 Monaten wurde kostenneutral um 6 Monate verlängert, so dass das Projekt am 30.6.2013 endete.

Die 3D-Kartierung von Bauwerksschäden ist eine wichtige Voraussetzung für die dreidimensionale und zeitaufgelöste Darstellung von Veränderungen am Bauwerk, wie z. B. von Verformungen, Verwindungen und Risswachstum. Daher reiht sich dieses Projekt ebenso wie das Vorgängerprojekt „Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und –grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren“ in ein Gesamtkonzept zur Erfassung und Darstellung der Veränderungen geometrischer und stofflicher Parameter ein. Später lassen sich daraus CAD-Modelle generieren, die wiederum für numerische Simulationen zu den mechanischen und thermischen Eigenschaften des Bauteils genutzt werden können.

Ziel des aktuellen Projektes war die Entwicklung eines Verfahrens zur effizienten und wiederholbaren 3D-Schadenkartierung an u. U. fragilen Bauteiloberflächen, das ein Visualisieren, Monitoring und Bewerten der zeitlichen Entwicklung der Schäden und Formänderungen ermöglicht. Die 3D-Kartierung basiert dabei u. a. wie im Vorgängerprojekt auf der Überlagerung von 3D-Geometriedaten und 2D-Bildaten sowie insbesondere auf der vor-Ort Erfassung von 3D-Oberflächenmerkmalen. Der Schwerpunkt des aktuellen Projektes lag jedoch auf der Detektion von oberflächennahen Schäden und insbesondere von Rissen. Für die 3D-Erfassung der von oberflächennahen Rissen wurde ein Messverfahren entwickelt, das auf einem optischen Trackingverfahren basiert. Außerdem wurde ein Photogrammetrieverfahren eingesetzt, um ausgewählte Oberflächenmerkmale zu digitalisieren. Zur Erfassung thermischer Bilddaten wurde die aktive Thermografie hinsichtlich der Detektion und Charakterisierung von Rissen weiterentwickelt. Weiterhin wurden mit der Thermografie auch große Fassadenflächen untersucht, wobei hier eine homogene Erwärmung mit Sonneneinstrahlung und natürlicher Abschattung genutzt wurde. Zusätzlich wurden Bestimmungen der Risttiefe mit Ultraschall-Messungen (1D) durchgeführt.

Im Laufe des Projektes wurden die Verfahren weiterentwickelt und entsprechend der jeweiligen Anwendung optimiert. Dazu wurden zu Beginn des Projektes zwei Fallstudien ausgewählt, die unterschiedliche Schadensaspekte und Materialien repräsentierten und sowohl Detailuntersuchungen als auch großflächige Messungen ermöglichten:

- Giebichensteinbrücke in Halle (1926-1928):
 - Untersuchung der Rissstrukturen an zwei Skulpturen begleitend zu den Instandsetzungsarbeiten
 - Untersuchung des Brückenkörpers hinsichtlich Fehlstellen und Inhomogenitäten
- Putzritzungen am Magdeburger Dom (13. Jahrhundert):
 - Untersuchung einzelner Bereiche zur Erfassung und Visualisierung der Putzritzungen und Vermessung geschädigter Bereiche
 - Untersuchung der gesamten Fassade zur Klassifizierung unterschiedlicher Schadensbereiche

Ausgewählte Bereiche wurden jeweils mit mehreren Verfahren untersucht, Teile der Ergebnisse der Schadenkartierung werden weiter unten im Kurzbericht in den Fallstudien vorgestellt.

Für die einzelnen Verfahren wurden Merkblätter erarbeitet. Für die Risscharakterisierung wurde ein Katalog erstellt, der Anwender und Nutzer bei der Auswahl der geeigneten Verfahren für die Untersuchung von Rissen unterstützen soll.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Die Verfügbarkeit von Verfahren wie die 3D-Visualisierung, die einen Überblick über die Dynamik der Bewegung und Verformung eines Bauwerkes geben können, ist eine ideale Voraussetzung, um statisch relevante Problembereiche auszuwählen und weit vor dem eigentlichen Schadensfall zu überwachen. Im Folgenden wird ausgeführt, welche Verfahrensweiterentwicklungen erfolgt sind und wie mit diesen Verfahren wiederholende Messungen zur Rissuntersuchung und zur Untersuchung weiterer Schäden wie Putzablösungen durchgeführt werden können. Die Messergebnisse dieser Verfahren können gleichzeitig dreidimensional erfasst und in die 3D-Visualisierung eingebunden werden.

Konkrete Ziele des Projektes waren:

- Weiterentwicklung von 3D-Verfahren zur Risscharakterisierung
- Weiterentwicklung der aktiven Thermografie als bildgebendes Verfahren zur Risscharakterisierung
- Untersuchung großer Bauteilstrukturen zur Schadensklassifizierung
- Ergänzung eines 3D-Modells für die Schadensklassifizierung und
- Entwicklung eines 3D-Kartierungssystems mit Mess-, Visualisierungs- und Monitoringtool

Die Durchführung des Projektes erfolgte im Rahmen von Arbeitspaketen, deren Inhalte und Ergebnisse in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete des Projektes

AP	Titel	Beschreibung
1	Anforderungsanalyse und Konzeption des 3D-Kartierungssystems	Es wurden eine Zusammenfassung über gängige Kartierungsverfahren erstellt und gewünschte Funktionalitäten für ein neues 3D-Kartierungssystem spezifiziert. Letzteres diente als Leitfaden für die Entwicklung eines trackingbasierten Messverfahrens, mit dem Oberflächenmerkmale vom Anwender direkt am Messobjekt (z.B. Risse an Fassaden) erfasst werden können.
2	Vergleich und Bewertung verschiedener Verfahren der Rissmesstechnik	Rissmonitoringsysteme, die an Gebäuden, Skulpturen oder Reliefs eingesetzt werden, müssen einer Vielzahl von Anforderungen genügen. Hierfür stehen verschiedene Sensoren und Methoden zur Verfügung, die in einem Katalog zu Verfahren der Rissmesstechniken vergleichend gegenübergestellt wurden.
3	Weiterentwicklung bildgebender Rissmesstechniken	Es wurden systematische Untersuchungen zur Charakterisierung von künstlichen Rissen (Nuten) und echten Rissen mit aktiver Thermografie durchgeführt. Die Interpretation der Messdaten erforderte die Entwicklung von Modellen zur Überlagerung optischer und thermischer Einflüsse. Dadurch konnten senkrecht

AP	Titel	Beschreibung
		zur Oberfläche verlaufende Risse von schrägen unterschieden werden. Weiterhin können Risswinkel abgeschätzt bzw. über eine spätere Kalibrierung ermittelt werden. Aussagen zu Risstiefen sind bisher nicht möglich.
4	Entwicklung und Optimierung von Auswertetools: Selektions- und Navigationsmodi im 3D-Datensatz	Für die 3D-Kartierung direkt am Objekt wurde eine Software entwickelt, die den gesamten Verarbeitungsprozess begleitet. Diese beinhaltet u. a. Funktionen zum Kalibrieren der Messwerkzeuge, zur Aufnahme der Messdaten direkt am Objekt, zur Exploration und Betrachtung der Daten mittels verschiedener Navigationsmöglichkeiten, zur Selektion, Auswertung und Analyse der aufgenommenen 3D-Daten und zur Aufbereitung der Daten für eine effektive Weiterverarbeitung.
5	Visualisierung der kartierten Merkmale, Verformungen und Schäden	Die entwickelte Software umfasst verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten der 3D-Daten. Hierzu zählen z.B. das einfache Ein- und Ausblenden sowie Einfärben von Datenbereichen auf Basis einer Klassifikation, welche aus den Messdaten extrahiert wird. Eine transparente Darstellung mit Überblendung der Messdaten ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Messreihen und bildet die Grundlage für ein Monitoring. Ein wesentlicher Teil der Software ist die Möglichkeit, 3D-Daten mit 2D-Bildern zu fusionieren.
6	Entwicklung eines Monitoringverfahrens mittels 3D-Kartierung	Die Messwerkzeuge und Software-Tools, welche in AP4 und AP5 entwickelt wurden, bilden die Grundlage für ein Monitoringverfahren auf Basis der unterschiedlichen 3D-Daten. Mit Hilfe der Analysetools und der Visualisierung ist eine Auswertung und Darstellung von Schadensentwicklungen über einen längeren Zeitraum möglich. Grundlage dieser Darstellung ist die Fusion der 3D-Daten mit 2D-Bilddaten (z.B. Fotos oder Thermogrammen) sowie die Anreicherung dieser fusionierten Datensätze mit weiteren Metadaten.
7	Datenaustausch und -export	Die aufgenommenen 3D-Daten werden in einem xml-Format abgespeichert. In diesem Format sind Informationen über die Position, die Art und die Zuordnung einzelner Messpunkte gespeichert. Das Ergebnis der Fusionierung mit 2D-Bildern wird als PNG-Bild mit Alphakanal gespeichert. Eine Überlagerung kann dann mit einer gängigen Grafiksoftware (z. B. Photoshop, Gimp, ...) vorgenommen werden.
8	Technologieentwicklung und Testmessungen an Modellkörpern	Für die Laboruntersuchungen an künstlichen und echten Rissen mit aktiver Thermografie und Ultraschall wurden Sandsteinblöcke aus Cottaer und Postauer Sandstein verwendet. Für die künstlichen Risse wurden Nuten mit Wasserstrahlschneiden hergestellt, für echte Risse wurden Prismen gebrochen.
9	Anwendungsoptimierung vor Ort	Die Skulpturen der Giebichensteinbrücke, die Brücke selbst und die Putzritzen am Magdeburger Dom wurden mit den entwickelten Verfahren in unterschiedlichen Kombinationen untersucht. Die Messergebnisse wurden mit dem Restaurator diskutiert.
10	Dokumentation	Zur 3D-Risskartierung mit dem trackingbasierten Verfahren, zur Stereophotogrammetrie, zur Risstiefenbestimmung mit Ultraschall und zur aktiven Thermografie wurden Merkblätter erstellt, die dem Forschungsbericht als Anlage beigelegt sind.

3 Darstellung der Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Gerätereiterentwicklungen

3.1.1 Trackingbasierte 3D-Kartierung von Oberflächenmerkmalen

Für die 3D-Kartierung von Rissen direkt am Objekt wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem der Nutzer ein Tastwerkzeug an der Rissoberfläche entlang führt. Die Lage des Werkzeugs im Raum wird dabei kontinuierlich bestimmt und aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten dienen als Grundlage für eine Kartierung der Risse. Die Lage des Werkzeugs wird mit Hilfe eines optischen Trackingsystems bestimmt. Als Tracking wird die kontinuierliche Positionsbestimmung eines wieder erkennbaren Objektes (hier: bekannte Anordnung von optischen Markern) bezeichnet. Mit den Informationen des Trackingsystems kann die Pose, d.h. Position und Orientierung, der Messspitze bestimmt werden. 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. Das gesamte System besteht damit aus den drei Komponenten Trackingsystem, Tastwerkzeug und Softwaremodul. Die Aufzeichnung der Daten kann entweder für

einzelne diskrete Punkt oder kontinuierlich erfolgen. Für die Bewegungserfassung des Tastwerkzeugs wurde ein Infrarot(IR)-Trackingsystem der Firma Natural Point verwendet.

Das übliche Einsatzgebiet dieses Systems ist die Erfassung von menschlichen Bewegungen für Motion-Capturing-Anwendungen. Dabei werden jedoch Abweichungen bei der Positionsbestimmung der Marker im Zentimeter-Bereich toleriert, da im Allgemeinen eine Nachbearbeitung und Korrektur der Daten vorgenommen wird. An das Verfahren zur Kartierung von Rissen werden deutlich höhere Anforderungen gestellt, d.h. es können nur Abweichungen im Millimeterbereich akzeptiert werden. Um eine verlässliche Angabe über die tatsächlich erreichbare Positionsgenauigkeit zu erhalten, wurden ausführliche Genauigkeitsuntersuchungen am Trackingsystem durchgeführt. Die verschiedenen Messungen zur Bestimmung der Trackinggenauigkeit haben ergeben, dass eine Positionsbestimmung von einzelnen Markern mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm möglich ist. Diese Genauigkeit kann mit einer Kameraanordnung, wie in Abb. 1 dargestellt, erreicht werden. Hierfür ist eine sehr gute Kalibrierung des Kamerasystems notwendig.



Abb. 1: Trackingsystem mit Tastsensor im Einsatz

3.1.2 Photogrammetrische 3D-Erfassung

Für die Visualisierung von Oberflächentopologien wie den weiter unten aufgeführten Putzritzungen wurde die Stereo-Photogrammetrie weiterentwickelt und eingesetzt. Dieses Verfahren hat die Vorteile, dass für eine Messposition nur eine Bildaufnahme erforderlich ist und dass eine hohe geometrische Auflösung (im Idealfall ein 3D-Wert pro Pixel) erreicht wird. Die schnelle Datenaufnahme war für die Messaufgabe erforderlich, da keine konstante Position zwischen Messobjekt und Messsystem über längere Messzeiten garantiert werden konnte. Die hohe Auflösung ist für eine Registrierung der Einzelaufnahmen zueinander relevant. Für das eingesetzte Verfahren ist eine möglichst stochastische Textur auf dem Messobjekt erforderlich. Dies wird in der Regel durch die Projektion eines geeigneten Musters erreicht, beim ausgewählten Messobjekt war dies allerdings aufgrund der Putzstruktur nicht erforderlich.

Nach der Messung werden in einem ersten Schritt die 3D-Daten aus jeweils zwei Einzelaufnahmen erzeugt. Dies erfolgt mit Hilfe der Kamerakalibrierung und der Auswahl eines geeigneten Korrelationsverfahrens, dessen Parameter auf die aufgenommene Textur der Objekt Oberfläche angepasst werden müssen. Um 3D-Daten vom gesamten Messobjekt zu erhalten, müssen in einem zweiten Schritt mehrere Messaufnahmen zueinander registriert werden. Eine automatische Registrierung war durch die flache Topologie der 3D-Daten nicht möglich. Deshalb wurde ein manueller Schritt zur Grobausrichtung der Daten zueinander eingeführt. Hierzu müssen korrespondierende Punkte in beiden Datensätzen erkannt und zugeordnet werden, was über eine Einfärbung der jeweiligen Texturinformation eines Datensatzes erleichtert wird, s. Abb. 2 links. Nach der manuellen Registrierung kann dann eine Feinanpassung mit dem „Iterative Closest Point“-Verfahren durchgeführt werden. Zusätzlich sollte für die Registrierung ein fester Überlappungsbereich der einzelnen Aufnahmen festgelegt werden, hier wurde jeweils ca. 1/3 des Bildbereiches dafür ausgewählt. Zuletzt wurden die Punktdaten mit einem Programm in ein Dreiecknetz überführt, s. Abb. 2 rechts.

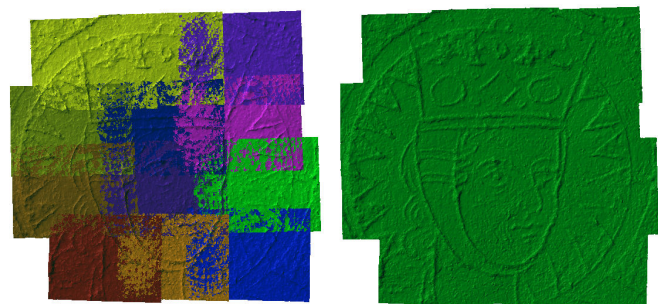


Abb. 2: Ergebnisse der photogrammetrischen 3D-Erfassung: Zusammengeführte Einzelmessungen (links) und das Messergebnis als 3D-Datensatz (rechts).

3.1.3 Aktive Thermografie für Rissuntersuchungen

Mit thermografischen Verfahren lassen sich sowohl zur Oberfläche hin offene Risse als auch verdeckte Risse orten und zumindest teilweise charakterisieren.

Im Rahmen des Projektes wurden nur zur Oberfläche hin offene Risse untersucht. Verschiedene Untersuchungen an Sandsteinprobekörpern im Labor mit gesägten Nuten und echten Rissen haben ergeben, dass diese nach einer instationären Erwärmung der Oberfläche (1 min) durch einen IR-Strahler gut detektiert werden können, s. Abb. 3. Dabei erscheinen insbesondere die Nuten direkt nach der Erwärmung zunächst als kühlere (dunkle) Linien, während der Abkühlung erfolgt jedoch eine Kontrastumkehr (Abb. 3).

Dieses *Nachleuchten* lässt sich anhand des in Abb. 4 dargestellten Schemas erklären. Kurz nach der Anregung ist nur das Material in geringer Tiefe parallel zur Oberfläche erwärmt. Die Oberfläche hat also eine höhere Temperatur als der Boden des Risses. Der Riss erscheint daher kalt (dunkel). Im weiteren Zeitverlauf diffundiert die Wärme weiter in den Probekörper hinein und erwärmt dabei auch die Rissflanken. Nach Beendigung der externen Erwärmung beginnt eine oberflächige Abkühlung, verursacht durch Konvektion und Abstrahlung in die Umgebung. Beide Verlustprozesse sind an den Rissflanken deutlich verringert. Die Rissflanken bleiben daher länger warm als die äußere Oberfläche.

Dieser Effekt lässt sich jedoch nur bei nahezu senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Rissen beobachten. Bei schräg in den Probekörper einlaufenden Rissen ist dieser Kontrast nicht mehr so eindeutig zu sehen. In Abb. 4 unten ist zu sehen, wie durch den schrägen Riss der Wärmetransport in das Innere der Struktur behindert wird. Dadurch erscheinen die Bereiche an der Oberfläche oberhalb des Risses wärmer. Eine Ortung der Risse sowie eine Abschätzung des Risswinkels und der Risstiefe sind damit möglich. Je nach Risswinkel bildet sich ein anderer Temperaturverlauf über dem Riss aus.

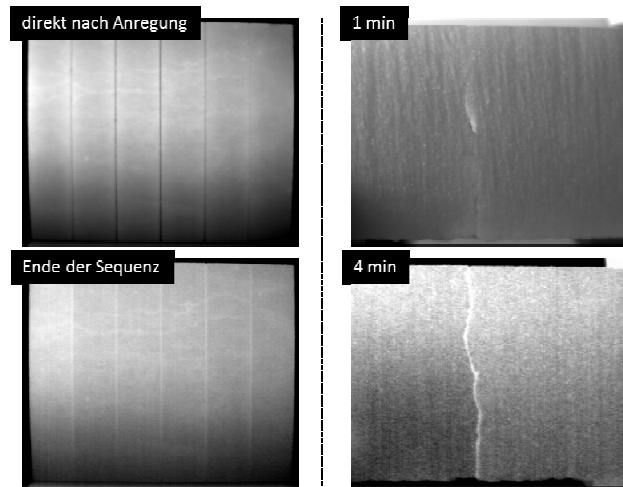


Abb. 3: Thermogramme des Cottaer Sandsteinprobekörpers mit Nuten (links) und mit einem echten Riss (rechts) nach 1 Minute Erwärmung mit einem IR-Strahler (oben) und nach 4 Minuten Abkühlung (unten). Es kommt zu einer Kontrastumkehr, bei der die Nuten und der Riss später relativ zur Umgebung wärmer erscheinen.

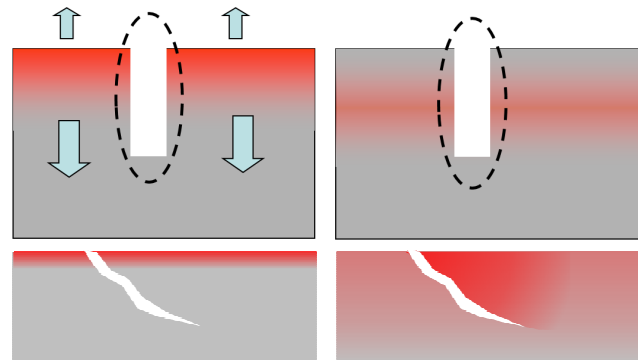


Abb. 4: Schematische Darstellung der Kontrastentstehung an Rissen. **Oben:** Senkrechte Risse: Kurz nach der Erwärmung ist nur die Oberfläche erwärmt, die Nuten erscheinen kalt, weil man in das noch kühle Innere schaut (links). Die Nutflanken kühlen sich langsamer als die äußere Oberfläche ab, da Konvektion und Strahlungsverluste deutlich verringert sind (rechts). **Unten:** Schräge Risse: Der Wärmetransport in das Innere der Struktur wird behindert und es entsteht an der Oberfläche ein Bereich höherer Temperatur.

3.2 Ergebnisse der Fallstudien

3.2.1 Putzritzungen am Magdeburger Dom

Eines der bedeutendsten Kunstwerke des Magdeburger Doms sind die Putzritzungen am Ostflügel des Kreuzgangs aus dem 13. Jahrhundert, s. Abb. 5 links. Im Zentralbild werden Kaiser Otto I. und seine beiden Gemahlinnen Editha und Adelheid dargestellt (nicht im Bild erkennbar). Von der Putzoberfläche sind nur noch fragmentarische Restflächen erhalten geblieben. Der größte Teil der einzelnen Putzoberflächen sind Ausbesserungen oder Neuperputzungen aus verschiedenen Restaurierungs- oder Reparaturphasen, der deutlich kleinere Teil sind die originalen Putzflächen, die

nur noch als Inseln zwischen den verschiedenen aneinandergesetzten Ausflückungen existieren. Während der Projektlaufzeit wurden im Rahmen von Restaurierungsmaßnahmen Teilbereiche unterhalb der Fenster neu verfestigt und teilweise neu verputzt und der Originalputz im Zentralbild an der Oberfläche gereinigt.

Im Projekt sollten noch nicht erkannte Schädigungen (Ablösungen) geortet und bekannte Hohlstellen genauer vermessen werden. Weiterhin sollte mit den Rissortungsverfahren und hier insbesondere mit der berührungsfreien photogrammetrischen 3D-Vermessung versucht werden, die Putzritzen optimal darzustellen.

Zur Ortung von Hohlstellen wurden Thermografiesequenzen während der Erwärmung durch Sonneneinstrahlung und nach Abschattung durch einen Turm des Doms aufgenommen. In Abb. 5 rechts ist ein Thermogramm der Fassade nach mehreren Stunden Sonneneinstrahlung dargestellt. Hohlstellen sind als deutlich wärmere Bereiche zu erkennen. Insbesondere im Bereich unterhalb des Zentralbildes häufen sich diese. Dies ist auch der Bereich, der später im Laufe des Projektes verfestigt wurde.

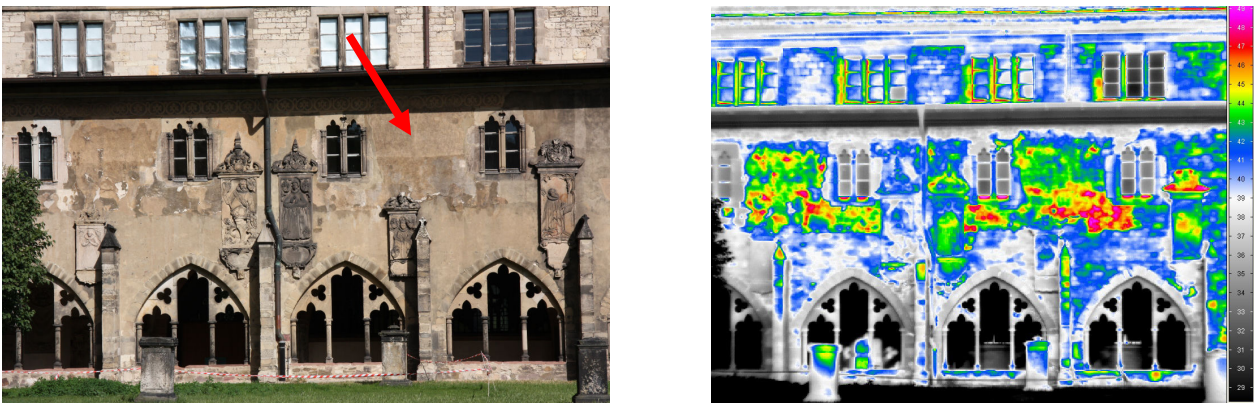


Abb. 5: Putzritzen an der Westfassade des Kreuzgangs des Magdeburger Doms. Links: Ansicht der Fassade, der Pfeil weist auf die Position des Zentralbildes. Rechts: Thermogramm der Fassade nach mehreren Stunden Sonneneinstrahlung.

Die möglichst vollständige dreidimensionale Erfassung der Putzritzen für das Zentralbild erfolgte mit der Photogrammetrie. Auf Basis der dreidimensionalen Daten wurden Visualisierungsmethoden erprobt, die eine bessere Sichtbarkeit der Putzritzen ermöglichen. Die Messungen erfolgten nach dem Aufbau eines Gerüsts an der Westfassade mit sehr breiten Laufwegen. Zur Erfassung des Zentralbildes wurde ein Messbereich von 2500 mm x 1000 mm 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. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass der Sensor immer parallel zur Wand ausgerichtet blieb. Das Ergebnis der Messungen zeigt Abb. 6 links als visualisierten 3D-Datensatz. Eine direkte Überlagerung eines Ausschnitts des Zentralbildes mit einem Thermogramm zeigt Abb. 6. rechts. Das Thermogramm wurde nach aktiver Erwärmung vom Gerüst aus aufgenommen und zeigt daher eine deutlich höhere räumliche Auflösung als das Übersichtsbild in Abb. 5 rechts. Die größeren Hohlstellen (wärmere, d. h. rote Bereiche) können mit Hilfe der Überlagerung von Thermogramm und 3D-Daten einfach geortet werden.



Abb. 6: Visualisierung der Putzritzen. Links: 3D-Datensatz als Ergebnis der Photogrammetrie. Rechts: Überlagerung eines Teilbereiches mit einem Thermogramm, das vom Baugerüst aus erfasst wurde.

3.2.2 Skulpturen der Giebichensteinbrücke

1926 bis 1928 wurde unterhalb der Burgruine Giebichenstein in Halle eine neue Brücke über die Saale errichtet. Auf die flankierenden Eisbrecher wurden zwei Tierskulpturen - eine Kuh zur Versinnbildlichung der ländlichen Seite und ein Pferd auf der Stadtseite – gesetzt. Die genaue Herstellungsweise der Betonskulpturen ist nicht bekannt, nur, dass es sich um einen gestampften Vollkörper aus Portlandzement als Bindemittel und einem Zuschlaggemisch aus Quarzsand, Porphyrspalt und Kupferschlacke in unterschiedlichen Kornfraktionen handelt. Erste Schäden sowohl an den Skulpturen als auch an der Brücke wurden bereits kurz nach der Fertigstellung in Form eines Risskrakeeles auf der Oberfläche festgestellt. Im Laufe der Jahrzehnte haben sich die Risse auf mehrere Millimeter geweitet und vertieft. Die Skulpturen wurden 2011 und 2012 im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes zur denkmalgerechten Betoninstandsetzung restauriert. Das Restaurierungsvorhaben hatte die Reduktion des Feuchteintrages in die Skulpturen durch den Verschluss der zahlreichen Risse und Kiesnester zum Ziel. Im Rahmen des Projektes 3D-Kartierung sollten an ausgewählten Bereichen die Risse begleitend zur Restaurierung mit dem Tracking-Verfahren und mit der aktiven Thermografie erfasst und mit der manuellen Risskartierung verglichen werden.

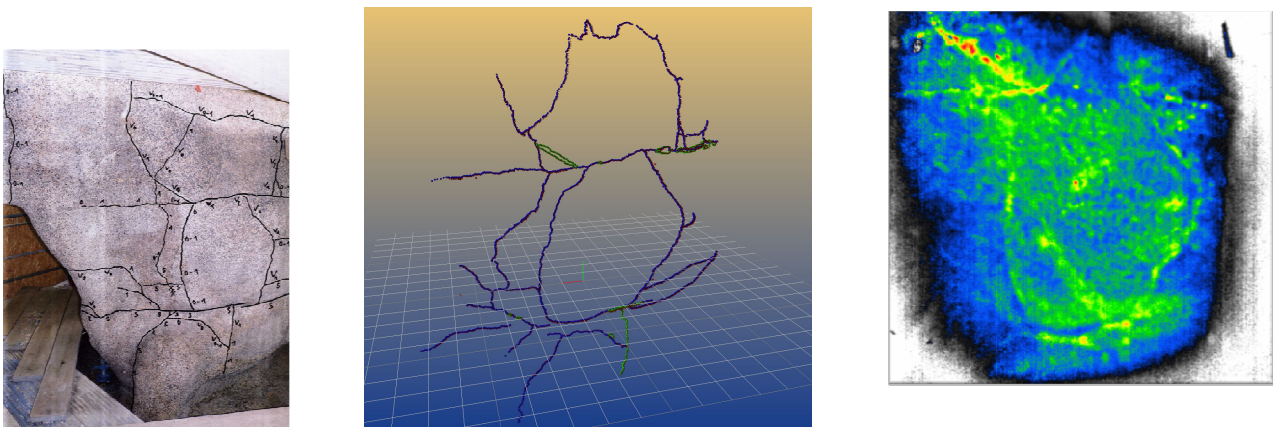


Abb. 7: Links: Manuell kartierte Risse an der Kuh der Giebichensteinbrücke. Mitte: 3D-Kartierung der Risse mit dem Trackingsystem. Rechts: Phasenbild einer Thermografiesequenz.

Abb. 7 links zeigt einen Ausschnitt der manuellen Risskartierung im Brustbereich der Kuh. Für die Kuh wurde in Summe eine Risslänge von 222 m erfasst, von der ca. 50 % verpresst werden sollte. Die manuelle Kartierung wurde als Vorlage für die Erfassung mit der trackingbasierten 3D-Risskartierung verwendet. Mit dem Trackingsystem wurden in diesem Bereich 41 Risse mit insgesamt 4451 Messpunkten aufgenommen. Neben den Rissen wurden bei der Vermessung ebenfalls mehrere Referenzpunkte aufgenommen, die durch farbige Plättchen an der Skulptur markiert wurden, so dass sie in Fotos gut sichtbar sind. Das Ergebnis der 3D-Kartierung ist ein 3D-Datensatz, der in Abb. 7 Mitte dargestellt ist. Die Rissstruktur stimmt gut mit der manuell erfassten überein und zeigt etwas genauere Details. Die für die aktive Thermografie notwendige Wärme wurde mit einem IR-Strahler (2,4 kW) eingebracht. Dieser wurde in einem Abstand von 5 bis 15 cm über der zu untersuchenden Stelle geführt, wobei eine möglichst homogene Erwärmung durch die gleichzeitige Beobachtung mit einer IR-Kamera kontrolliert wurde. Dies war bei den Messungen aufgrund der stark gewölbten Oberflächen nur schwer zu erreichen. Daher wurde die Abkühlsequenz mit der Puls-Phasen-Thermografie ausgewertet. In Abb. 7 rechts ist ein Phasenbild des Messbereichs dargestellt, in dem die Risse wesentlich besser als im Thermogramm zu erkennen sind. Die Risse können hier mit einer vergleichbaren Auflösung wie bei der manuellen Kartierung dargestellt werden, liefern aber auch nur 2D-Bilder. Zusammenfassend eignet sich hier für eine genaue 3D-Erfassung der Risse das Trackingverfahren am besten.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Konkret wurden im Projektzeitraum die folgenden Innovationen erreicht:

- Entwicklung und Qualifizierung eines neuen Rissmessverfahrens für die dreidimensionale Kartierung von Rissen und Rissstrukturen basierend auf einem 3D-Trackingverfahren. Dazu wur-

den umfassende Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt und neue Tastwerkzeuge entwickelt und optimiert.

- Mit der Optimierung der 3D-Photogrammetrie wurde ein berührungsfreies Verfahren gefunden, mit dem die Putzritzungen am Magdeburger Dom optimal visualisiert werden konnten. Bisher konnten Fotos auch bei idealer Beleuchtung die Putzritzungen nicht genügend kontrastreich darstellen.
- Weiterentwicklung der aktiven Thermografie zur effektiven Risskartierung, wobei hier zwischen senkrecht und schräg zur Oberfläche verlaufenden Rissen unterschieden werden kann. Bei homogenen Materialien kann zudem der Risswinkel abgeschätzt werden.
- Thermografiesequenzen großer Fassadenflächen, die während der Erwärmung durch die Sonne und/oder Abkühlung durch Abschattung erfasst wurden, liefern sehr viele Informationen zu Fehlstellen und Materialinhomogenitäten.
- Die Verfahren zur Risskartierung werden durch die quantitative Risstiefenbestimmung mit Ultraschall optimal ergänzt.
- Effiziente 3D-Kartierung aus den Ergebnissen der Einzelverfahren. Die Verfahrenskombination ermöglicht eine eindeutige Klassifizierung von Fehlstellen und Inhomogenitäten.
- Zu den Einzelverfahren der Risskartierung wurden vier Merkblätter erarbeitet.
- Zur Hilfestellung bei der Auswahl von Rissmessverfahren zur Rissanalyse wurde ein Katalog erstellt.

Zusammenfassend stehen mit den im Projektzeitraum entwickelten Verfahren zuverlässige Hilfsmittel für Monitoringanwendungen zur Verfügung. Die gewonnenen Daten und insbesondere deren Kombination durch die Datenfusion erlauben dabei eine umfassende Bewertung der untersuchten Strukturen. Im Projekt konnte diese prinzipielle Anwendbarkeit der Datenfusion anhand unterschiedlicher Fallstudien und mit unterschiedlichem Bildmaterial (Fotos und Thermogramme) nachgewiesen werden.

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. Da die 3D-Photogrammetrie eine optimale Visualisierung der Putzritzungen ermöglichte, die so mit Fotos bisher nicht möglich war, ist geplant, diese Darstellung den Besuchern des Magdeburger Doms in einem Flyer zur Verfügung zu stellen. Die Ergebnisse der Thermografiemessungen mit solarer Erwärmung und Abkühlung durch Abschattung lassen sich von Anwendern der herkömmlichen Bauthermografie schnell nutzen. Auch die aktive Thermografie kann mit wenigen Hilfsmitteln einfach realisiert werden. Bisher gibt es jedoch nur wenige kommerzielle Softwareprodukte, die eine Bearbeitung der zeitlich versetzten Abkühlungskurven derart ermöglichen, dass eine Puls-Phasen-Auswertung der Sequenzen möglich wird.

Die Merkblätter zu diesen Verfahren sowie zur Risstiefenbestimmung mit Ultraschall sollen zukünftige Nutzer über die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen informieren und damit zu einer schnellen Verbreitung der Verfahren beitragen. Zielgruppen sind Bauingenieure, Architekten, Restauratoren und Denkmalpfleger, Bauthermografen und Vermessungsingenieure. Eine Übersicht zu Rissmessverfahren bietet der im Projekt erarbeitete Katalog. Die Merkblätter und der Katalog zu den Rissmessverfahren können zusammen mit dem Abschlussbericht des Projektes demnächst über den Fraunhofer IRB Verlag bezogen werden.

Dank

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). Die Verantwortung für den Inhalt des Kurzberichtes liegt bei den Autoren. 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. Herrn Hemmleb und Herrn Lindemann danken wir für viele Beiträge und Diskussionen während der regelmäßigen Projekttreffen sowie für Ergänzungen des Literaturmaterials.