

3D Kartierung von Rissen in historischem Beton mit thermografischen, optischen und Ultraschall-Verfahren

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

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

** 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. In dem von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projekt zur „3D Kartierung von Bauwerksoberflächen“ wurden Verfahren zur Ortung von Rissen und Rissverläufen an historischen Gebäuden und Skulpturen weiterentwickelt und optimiert. Diese neuen Entwicklungen zur effizienten 3D Erfassung, Darstellung und zum Monitoring von Rissen basieren auf der aktiven Thermografie, einem Trackingsystem und Ultraschall.

Systematische Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und zu Messgenauigkeiten der Messverfahren im Labor wurden durch den kombinierten Einsatz der Verfahren an Skulpturen aus historischem Beton an der Giebichensteinbrücke in Halle ergänzt.

1 Einführung

Bisher gibt es zur Zustandsdokumentation von historischen Gebäuden und Bauteilen keine Regelungen zur systematischen und standardisierten Erfassung der Rissstruktur. Konventionelle Verfahren basieren auf fotografischen Dokumentationen und Zeichnungen mit den generellen Nachteilen und Grenzen der Verzerrungen und Verdeckungen der Risse bei zweidimensionalen Projektionen. In der Regel werden zur Risskartierung manuelle Techniken und zum Rissmonitoring nur lokale Rissensoren eingesetzt, die manuell vor Ort oder über eine Fernüberwachung kontrolliert werden können. Zur Risscharakterisierung, wie z. B. der Bestimmung der Risstiefe, gibt es zurzeit noch keine zufriedenstellenden Lösungen.

Im Rahmen des von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projektes zur „3D Kartierung von Bauwerksoberflächen“ wurden Verfahren zur Ortung von Rissen und Rissverläufen an historischen Gebäuden und Skulpturen weiterentwickelt und optimiert [1]. Mit dem Trackingverfahren und einem neu entwickelten Tastwerkzeug ist eine kontinuierliche Erfassung der Rissposition, der Rissklaffung und der Orientierung der Risskanten möglich. Dazu wird das Tastwerkzeug entlang des Risses bewegt und dessen Position und Orientierung im Raum erfasst. Das Trackingsystem besteht aus mehreren Kameras, die die Infrarot(IR)-Strahlung der retroreflektierenden Marker erfassen, die am Tastinstrument angebracht sind [2]. Mit der aktiven Thermografie können durch räumlich

inhomogene Erwärmung der Oberfläche die Risse über die Störung des lateralen Wärmefflusses nachgewiesen werden [3]. Aber auch eine homogene Erwärmung ermöglicht es, senkrechte und schräge Risse über Temperaturgradienten entlang der Rissflanken und einen gestörten Wärmeffluss senkrecht zur Oberfläche zu detektieren. Zumindest vom Ansatz Ansatz her ist es hier auch möglich, Informationen über Risstiefen zu erhalten. Genauere Risstiefenmessungen sind mit dem Ultraschallverfahren über Laufzeitmessungen möglich [4]. Hierfür muss die Rissposition aber bereits bekannt sein.

Im Folgenden werden die Verfahren im Einzelnen sowie deren gemeinsame Anwendung zur Risskartierung an einer Skulptur aus historischem Beton an der Giebichensteinbrücke in Halle beschrieben.

2 Entwicklung von Verfahren zur Rissortung und -charakterisierung

2.1 3D Erfassung des Rissverlaufs mit einem optischen Trackingsystem

Bei diesem Verfahren werden die Risse mit einem stiftähnlichen Tastwerkzeug, auf dessen ca. 30 cm langen Stab drei Marker asymmetrisch zueinander verteilt sind, erfasst und verfolgt. Die Messspitze am vorderen Ende ist austauschbar und lässt sich an die Oberflächengegebenheiten anpassen (s. Abb. 1 a). Für die Erfassung der Lage des Tastwerkzeugs im Raum wurde ein IR-Trackingsystem mit mehreren Kameras verwendet (s. Abb. 1 b), deren Lagebeziehung zueinander durch eine Kalibrierung des Systems bekannt ist. Die Lagebestimmung erfolgt dann direkt aus den Bilddaten. Zur Steuerung der Datenaufnahme wird dem Nutzer ein Wiimote-Controller zur Verfügung gestellt (s. Abb. 1 c). Systematische Untersuchungen zu Messgenauigkeiten des Systems wurden bezüglich der Anzahl der verwendeten Kameras, der Anordnung der Kameras, der Distanz des Messobjektes zu den Kameras und der Position des Objektes im Messraum (Genauigkeit in den Randbereichen) durchgeführt. Diese Untersuchungen ergaben, dass mit dem IR-Trackingsystem unter optimalen Bedingungen eine Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ mm erreicht werden kann. Hierzu sollten sämtliche Kameras auf einen Punkt (Fokuspunkt) fokussiert sein, der ca. 2,0 m vom Messsystem entfernt ist. Das zu untersuchende Objekt sollte dann in einem Bereich von $\pm 0,5$ m in allen drei Raumachsen um den Fokuspunkt des Trackingsystems orientiert sein. Außerhalb dieses Bereiches treten höhere Messungenauigkeiten auf. Dazu ist eine sehr genaue Kalibrierung der Kameras zueinander erforderlich, die nach Aufbau des Messsystems vor Ort vorgenommen werden kann.

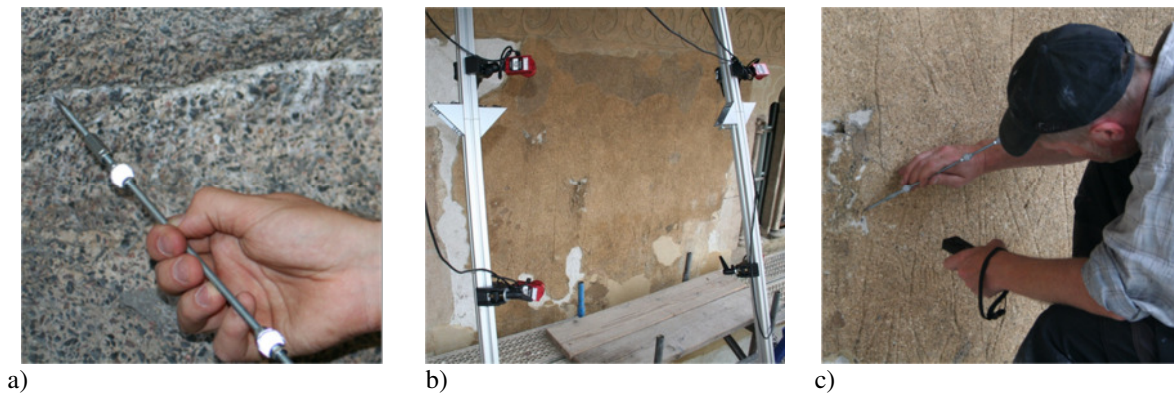


Abb. 1. Aufbau und Funktionsweise des Risstrackingsystems. a) Tastwerkzeug mit austauschbarer Spitze. b) Trackingsystem mit vier Kameras. c) Steuerung beim Risstracking mit Wiimote-Controller.

2.2 Bestimmung der Risstiefe mit Ultraschall

Falls die Risstiefe nicht taktil vermessen werden kann, ist eine Risstiefenbestimmung an mineralischen Baustoffen zerstörungsfrei aktuell nur mit dem Ultraschallverfahren möglich. Hierzu werden zwei Einzelprüfköpfe als Sende- und Empfangsprüfkopf zu beiden Seiten des Risses positioniert. Entsprechend der Risstiefe zwischen den beiden Prüfköpfen verlängert sich die Laufzeit und ermöglicht so eine Bestimmung der Risstiefe, s. Abb. 2 a. Voraussetzung ist dabei eine deutliche Materialtrennung der Rissflanken.

Für die Messungen sollten Sender und Empfänger möglichst in gleichem Abstand zum Riss so positioniert werden, dass Sender, Empfänger und zu erwartende Risspitze ein gleichschenkliges Dreieck bilden. Als Koppelmittel sollte ein Material verwendet werden, das sich nach der Messung wieder gut entfernen lässt und möglichst keine Flecken hinterlässt, z. B. Feinschamotteton oder Knete auf Silikonbasis. Da die Ankopplung über eine Fläche erfolgt und die Messungen nur auf der Oberfläche stattfinden, muss der genaue Ankopplungspunkt bestimmt werden. Dazu erfolgt die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit des ungestörten Materials in Transmission und anschließend im gleichen Bereich eine Oberflächenmessung mit definiertem Abstand. Die Messung des Abstandes erfolgt zwischen Außenkante des Ultraschallsenders und Spitze des Empfängers. Anhand der so ermittelten Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit des Materials kann der relevante Abstand ermittelt werden. Für die Berechnung des Korrekturwertes des Messkopfes wird von diesem Wert der zuvor manuell ermittelte Abstand subtrahiert. So kann die Distanz zwischen Sender und Empfänger immer genau von der Außenkante des Senders bis zur Empfängerspitze gemessen und anschließend der Korrekturwert des Ultraschallsenders addiert werden. Gemessen wird in der Regel die Laufzeit des Signals, das den Empfänger zuerst erreicht, d. h. das Signal der Druckwelle (p-Welle).

Für die Durchführung der Messungen muss daher zunächst der Riss identifiziert und in seinem Verlauf verstanden werden. Die Messpunkte müssen angepasst an die Rissgeometrie, die Risslänge oder das Risspolygon und die zu erwartenden Risstiefe ausgewählt werden (s. Abb. 2 b).

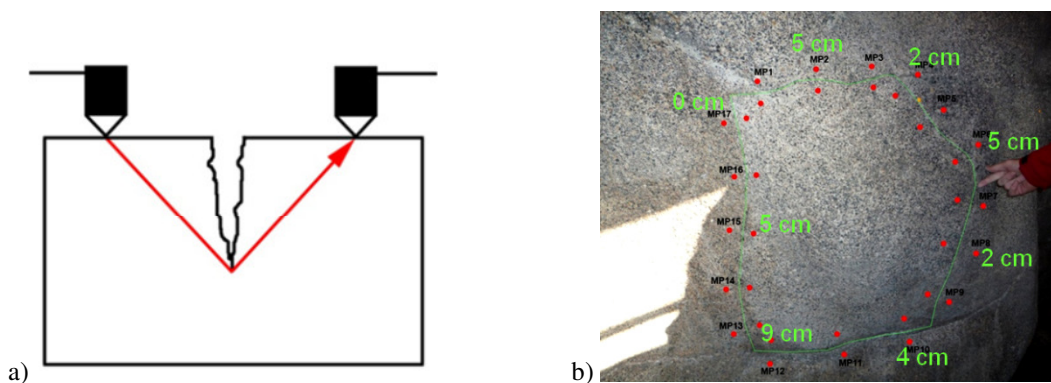


Abb. 2. Risstiefenbestimmung mit Ultraschall. a) Verfahrensprinzip. b) Risspolygon mit Messpunkten.

2.3 Risscharakterisierung mit aktiver Thermografie

Mit flächiger Erwärmung eignen sich aktive Thermografieverfahren im Bauwesen sehr gut zur Ortung von Ablösungen und Fehlstellen mit einer Orientierung parallel zur Oberfläche, wie z. B. Putzablösungen oder Hohlstellen. Diese behindern den Wärmefluss in das Innere des Bauteils und zeichnen sich daher auf der Oberfläche als wärmere Bereiche ab. Defekte mit einer Orientierung senkrecht zur Oberfläche sind mit flächiger Anregung schwieriger nachzuweisen. Laboruntersuchungen an Sandsteinprobekörpern mit gesägten Nuten und

echten Rissen mit einem Verlauf senkrecht zur Oberfläche und zur Oberfläche hin offen haben ergeben, dass diese nach einer instationären Erwärmung der Oberfläche (1 min) durch einen IR-Strahler gut detektiert werden können, s. Abb. 3 für echte Risse. Dabei erscheinen insbesondere die Nuten direkt nach der Erwärmung zunächst als kühlere Linien im Thermogramm (etwas schwächer ist dieser Effekt auch am natürlichen Riss in Abb. 3 a zu erkennen), während der Abkühlung erfolgt jedoch eine Kontrastumkehr (s. Abb. 3 b).

Dieses Nachleuchten lässt sich anhand des in Abb. 3 c und d 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. Im weiteren Zeitverlauf diffundiert die Wärme weiter in den Probekörper hinein und erwärmt dabei auch die Rissflanken. Nach Beendigung der externen Erwärmung beginnt gleichzeitig die Abkühlung der Oberfläche, 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.

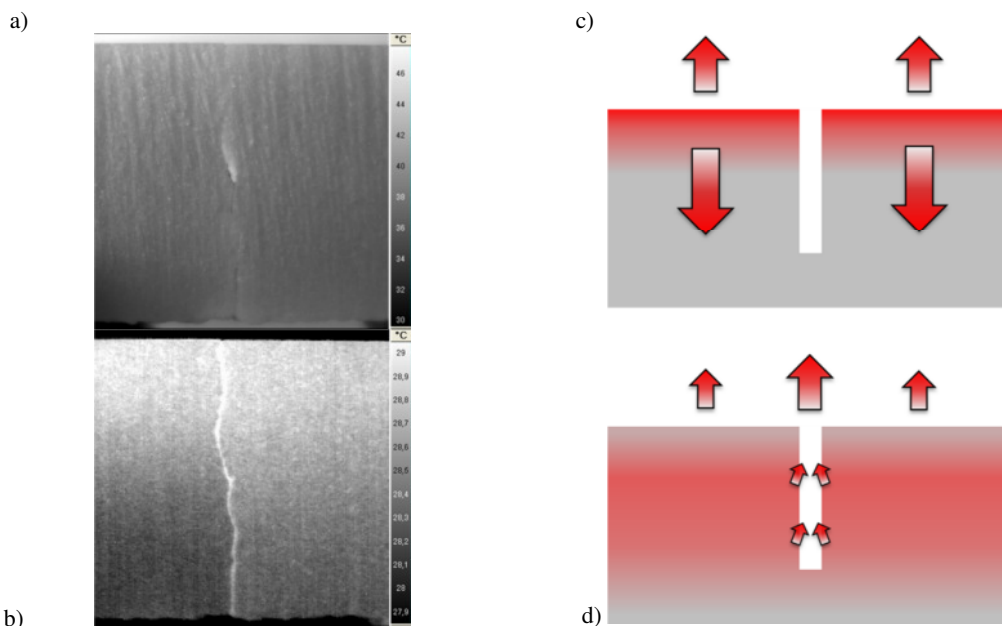


Abb. 3. a) und b): Thermogramme von Cottaer Sandsteinen mit echten senkrechten Rissen nach 1 min Erwärmung mit einem IR-Strahler und nach 4 min Abkühlung.

c) und d): Schematische Darstellung der Temperaturentwicklung an der Oberfläche im Bereich senkrechter Risse nach der Erwärmung. Kurz nach der Erwärmung erscheint der Riss kälter als seine Umgebung (c). Nachdem die Wärme in das Bauteil hineindiffundiert ist und die Oberfläche sich schon wieder abgekühlt hat, erscheinen die Rissflanken und der Rissboden noch wärmer als die Oberfläche, da im Riss Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion im Vergleich zur Oberfläche wesentlich reduziert sind. Dadurch erscheint der Risse wärmer und ein Nachleuchteffekt ist zu erkennen.

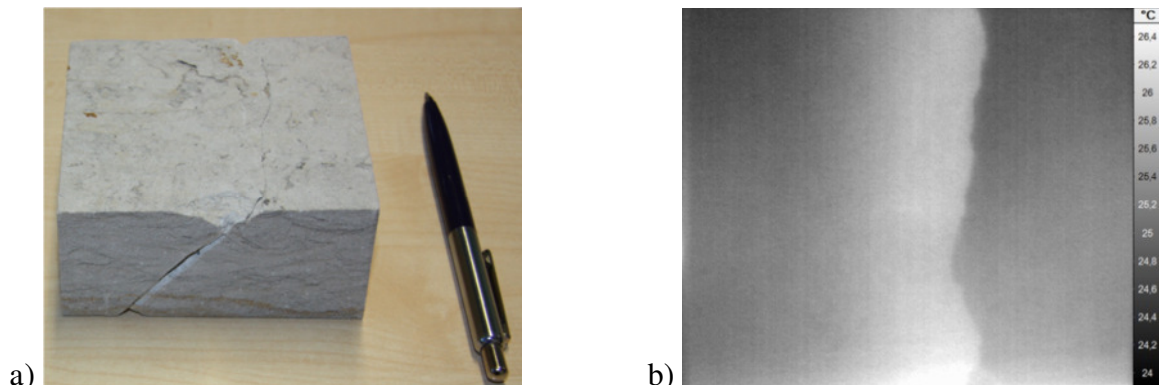


Abb. 4. a) Schräger natürlicher Riss im Sandstein. b) Temperaturkontrast oberhalb des schrägen Risses nach der Erwärmung.

Dieser Effekt ist jedoch nur bei nahezu senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Rissen zu beobachten. Bei schräg in den Probekörper einlaufenden Rissen wie in Abb. 4 a ist dieses Nachleuchten nicht mehr zu sehen. Stattdessen bildet sich entlang des Risses eine Temperaturstufe heraus, s. Thermogramm in Abb. 4 b. Durch den schrägen Riss ist der Wärmetransport in das Innere der Struktur behindert, wodurch die Bereiche an der Oberfläche oberhalb des Risses wärmer erscheinen. 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.

3. Ergebnisse an der Giebichensteinbrücke in Halle

3.1 Die historische Betonbrücke

1926 bis 1928 wurde unterhalb der Burgruine Giebichenstein eine neue Brücke 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. Bei beiden Figuren handelt es sich aber um einen gestampften Vollkörper aus Portlandzement als Bindemittel und einem Zuschlaggemisch aus Quarzsand, Porphyrsplitt und Kupferschlacke in unterschiedlichen Kornfraktionen [5]. Erste Schäden sowohl an den Skulpturen als auch an der Brücke wurden bereits kurz nach der Fertigstellung in Form eines Risskrakelees auf der Oberfläche festgestellt. Im Laufe der Jahrzehnte haben sich die Risse auf mehrere Millimeter geweitet und vertieft. Von 2011 bis 2012 wurden die Skulpturen im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes zur denkmalgerechten Betoninstandsetzung restauriert. Ziel dieser Maßnahmen war die Reduzierung des Feuchteintrags durch Verfüllung und Verschließung der Risse sowie durch den Auftrag einer wasserabweisenden Schlämme. Im Rahmen des BBR-Projektes wurden die Risse in ausgewählten Bereichen begleitend mit dem Tracking-Verfahren und mit der aktiven Thermografie erfasst und mit der manuellen Risskartierung verglichen. Die manuelle Risskartierung der Kuh ist in Abb. 5 dargestellt. Hier wurde eine Risslänge von insgesamt 222 m ermittelt. 50 % der Risse wurden durch ein Injektionsverfahren verfüllt. Die grünen Linien markieren dabei die Risse, die sich in den letzten 9 Jahren wesentlich verändert oder neu hinzugekommen sind.

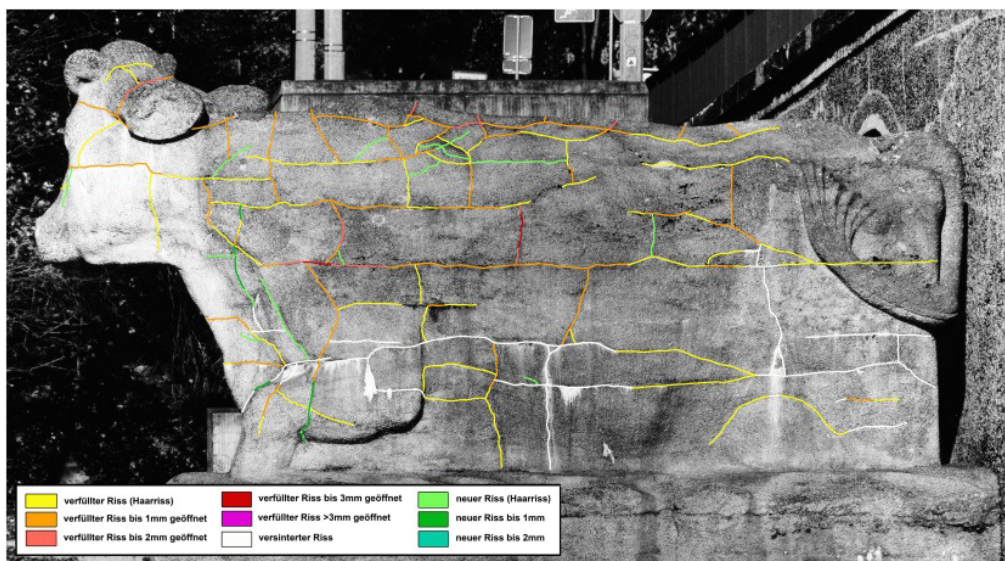


Abb. 5. Manuelle Risskartierung an der Kuh in der Giebichensteinbrücke in Halle (Saale).

3.2 3D Erfassung der Rissgeometrien mit dem Tracking-Verfahren

Abb. 6 a zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der manuellen Risskartierung im linken Brustbereich der Kuh. Das Ergebnis der 3D Kartierung dieser Risse mit dem Trackingsystem ist in Abb. 6 b, die anschließende Überlagerung mit einem Foto mit Hilfe von sechs Passpunkten in Abb. 6 c dargestellt. In diesem Messbereich wurden 41 Risse mit insgesamt 4451 Messpunkten erfasst. Einschließlich Auf- und Abbau der Messgeräte dauerten diese Messungen ca. 3 h. Im Vergleich zur manuellen Kartierung weist die des Trackingverfahrens im Wesentlichen den gleichen Verlauf auf; es sind aber deutlich mehr Details zu erkennen. Da die Rissgeometrien als 3D Datensatz vorliegen, können Risslängen direkt berechnet werden. Zusätzlich sind eine Überlagerung mit Fotos aus verschiedenen Kameraperspektiven sowie ein direkter Vergleich von Kartierungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst wurden, möglich.

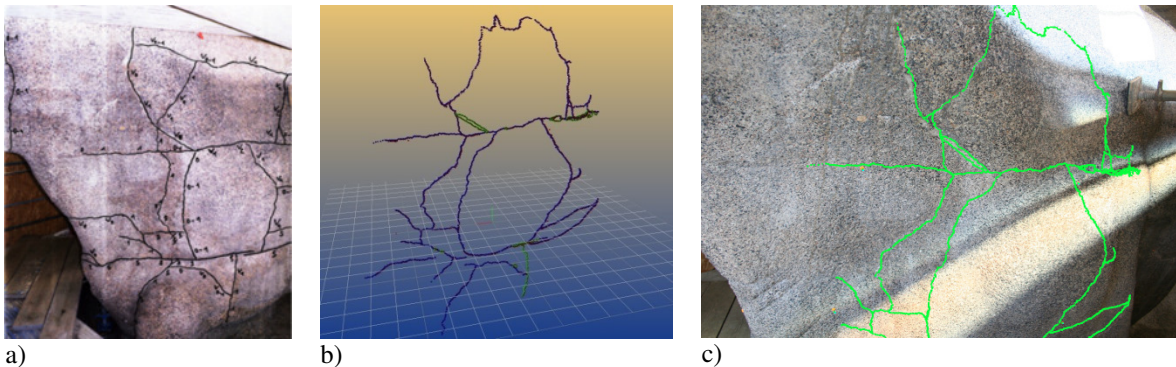


Abb. 6. a) Ausschnitt der manuellen Risskartierung, b) 3D Darstellung der mit dem Trackingsystem erfassten Risskoordinaten und c) Überlagerung der 3D Daten mit einem Foto unter Verwendung von 6 Passpunkten.

3.3 Bestimmung der Risstiefe mit Ultraschall

Entlang des in Abb. 2 b markierten Risspolygons im Brustbereich der Kuh wurden mit dem Ultraschallverfahren Risstiefen von 0 bis 9 cm gemessen. Am Rückenbereich der Kuh wurden Risstiefen bis 22 cm festgestellt. Die gemessenen Tiefen am Brustbereich sind in Abb. 2 b dargestellt.

3.4 Erfassung der Rissgeometrie mit aktiver Thermografie

Die für die aktive Thermografie erforderliche Wärme wurde mit einem IR-Strahler mit einer Leistung von 2,4 kW erzeugt, der 10 min lang in einem Abstand von 5 bis 15 cm entlang der Oberfläche bewegt wurde. Anschließend wurde die Abkühlung für eine Dauer von 5 min mit einer Mikrobolometerkamera mit einer Detektorgröße von 512x640 und einer Bildwiederholrate von 5 Hz erfasst. Aufgrund der stark gekrümmten Oberfläche war eine gleichmäßige Erwärmung der Oberfläche schwierig. Daher wurde die Abkühlungssequenz mit der Puls-Phasen-Thermografie ausgewertet, d. h. von Temperatur-Zeit-Kurven eines jeden Pixels der Sequenz während der Abkühlung wurde die Fouriertransformation (FFT) berechnet. Die Phasenbilder als Ergebnisse dieser Transformation in den Frequenzbereich sind wesentlich unempfindlicher gegenüber inhomogener Erwärmung [6].

Den mit der aktiven Thermografie untersuchten Bereich sowie die manuelle Kartierung zeigt Abb. 7 a. Das Thermogramm aus der Abkühlungssequenz, das 2 min nach dem Abschalten der Wärmequelle aufgenommen wurde, ist in Abb. 7 b zu sehen. Die kleinen Pfeile markieren kleinere Risse, die den oben beschriebenen Nachleuchteffekt zeigen. Die langen Pfeile deuten auf Risse mit einem Stufenkontrast hin, der ähnlich

verläuft wie bei den Proben mit den schrägen Rissen der Laboruntersuchungen. Das Phasenbild der niedrigsten Frequenz der fünfminütigen Abkühlsequenz in Abb. 7 c zeigt den Rissverlauf wesentlich deutlicher als das Thermogramm. Hohe Kontraste im Phasenbild treten an Stellen auf, bei denen auch mit Ultraschall größere Risstiefen von mindestens 4 cm gemessen wurden. Eine geometrische Kalibrierung der IR-Kamera und die Verwendung natürlicher oder zusätzlicher Passpunkte ermöglicht eine Überlagerung 2D Abbildungen mit 3D Daten. Vorteile der aktiven Thermografie sind eine gute Automatisierbarkeit und eine objektive Erfassung der Risspositionen. Die Genauigkeit bei der Erfassung von Rissdetails ist aber bei dem Trackingverfahren höher.

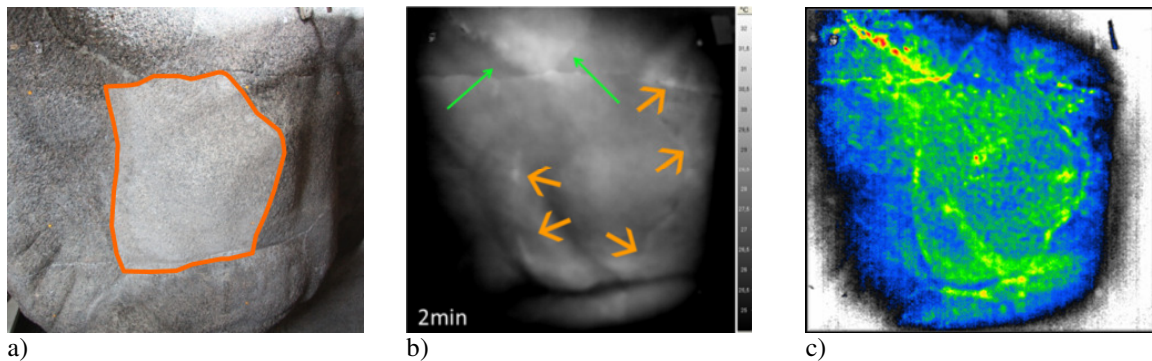


Abb. 7. a) Ausschnitt aus der manuellen Kartierung mit Messbereich für die aktive Thermografie. b) Thermogramm nach 2 min Abkühlung. Die kleinen orangen Pfeile markieren Risse mit Nachleuchteffekt, die großen grünen Pfeile schräge Risse mit Temperaturkontrast. c) Phasenbild der Abkühlungssequenz.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erfassung und zum Monitoring von Rissen wurden u. a. die folgenden Verfahren entwickelt und optimiert:

- 3D Kartierung von Rissen und Rissstrukturen basierend auf dem 3D Tracking eines Tastwerkzeugs. Es wurden umfassende Untersuchungen zur Messgenauigkeit und Anwendbarkeit des Messverfahrens durchgeführt. Verschiedene Tastwerkzeuge und Steuerungskomponenten wurden erprobt.
- 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.

Zusammen mit dem Ultraschallverfahren zur Risstiefenbestimmung wurden diese Verfahren vor Ort zur Charakterisierung der Rissstruktur an einer Skulptur aus historischem Beton an der Giebichensteinbrücke in Halle eingesetzt. Mit dem 3D Trackingverfahren konnten die Risse mit höherer geometrischer Auflösung und Genauigkeit erfasst werden als mit dem herkömmlichen manuellen 2D Verfahren. Die aktive Thermografie ermöglichte eine sehr schnelle und effiziente Ortung der Risse und es konnten auch solche Risse nachgewiesen werden, die mit dem Auge nicht direkt erkennbar waren. Die geometrische Auflösung der Thermogramme und Phasenbilder wird von der Detektorgröße der IR-Kamera (diese ist deutlich kleiner als bei Kameras im sichtbaren Spektralbereich), vom Öffnungswinkel des Objektivs und vom Kameraabstand bestimmt. Daher ist die geometrische Auflösung bei der aktiven Thermografie kleiner als beim 3D Trackingverfahren und liefert zudem auch nur zweidimensionale Daten. Hierbei ist aber von Vorteil, dass die geometrische Abmessungen des thermischen Kontrastes insbesondere von schräg einlaufenden Rissen größer sein kann als der Riss selbst. Nur mit dem Ultraschallverfahren konnten die Risstiefen bestimmt werden. Obwohl der experimentelle Aufwand insbesondere bei der gleichzeitigen Verwendung aller drei Verfahren recht hoch

ist, können damit doch wesentlich mehr Informationen über die Rissstrukturen und deren Ursache gewonnen werden als mit den herkömmlichen Verfahren. Zusätzlich zu einer objektiven Erfassung des Istzustandes können auch wiederholende Untersuchungen und damit ein Monitoring der Rissveränderungen durchgeführt werden.

Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde über die Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung unter den Kennziffer SF - 10.08.18.7-10.33 / II 3 - F20-10-087 gefördert. Wir danken Herrn Asmus Schriewer für die konstruktive Begleitung des Projektes im Auftrag des BBR und den Mitgliedern der unterstützenden Arbeitsgruppe Herrn Matthias Hemmleb und Herrn Ralf Lindemann für viele interessante Diskussionen und wertvolle Hinweise.

Referenzen

- [1] Maierhofer, C. et al: Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen. Abschlussbericht, Stuttgart (Deutschland, Bundesrepublik), Fraunhofer IRB Verlag, 2014, 193 S., ISBN: 978-3-8167-9145-4
<http://www.baufachinformation.de/literatur/13129012476>
- [2] Seidl T., Mecke, R., Schiller, M., Maierhofer, C., Meinhardt, J., 2012, *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
- [3] Ziegler, M., Myrach, P., Schlichting, J., Maierhofer, C., Kreuzbruck, M.: Laser-Thermografie für die schnelle Prüfung auf mikroskopische Risse in reflektierenden metallischen Oberflächen. DGZfP-Jahrestagung 2013, Di.2.A.4 <http://www.ndt.net/search/link.php?id=15286&file=article/dgzfp2013/papers/di2a4.pdf>
- [4] Merkblatt B4 „Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile“ der DGzFP (1999) überarbeitete Auflage, 18. S.
- [5] Müller-Gerberding, Ralf, 1994, Instandsetzung der Giebichensteinbrücke in Halle. In: TU Dresden (Hg.): 4. Dresdner Brückenbausymposium - Tagungsband, Dresden 1994, S. 57-60
- [6] Maldague, X., Marinetti, S. Pulse phase infrared thermography, J. Appl. Phys. 79 (1996) 2694–2698