

Christiane Maierhofer, Rainer Krankenhagen
 Mathias Röllig, Rüdiger Mecke
 Michael Schiller, Thomas Seidl
 Uwe Kalisch, Christiane Hennen
 Jeannine Meinhardt

Bewertung von Schäden an historischen Bauteilen mit aktiver Thermografie und 3D-Laserscanner

Sowohl in der Denkmalpflege als auch in anderen Anwendungsbereichen der zerstörungsfreien Prüfung können größere kostenintensive Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen durch das frühzeitige Erkennen und Einschätzen von Schäden vermieden werden. Eine derartige vorbeugende Instandsetzung ist jedoch nur möglich, wenn häufigere Inspektionen kostengünstig und schnell durchgeführt werden können. Systematische Methoden zur Beobachtung und Erfassung von Prozessen über einen längeren Zeitraum sowie deren Überwachung werden unter dem Begriff „Monitoring“ zusammengefasst.

Für die Entwicklung einer dafür sinnvollen Verfahrenskombination und Messstrategie wurde das Projekt „Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren“ vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau gefördert [1]. Ziel dieses Projektes war die Kombination und Datenfusion der Ergebnisse der aktiven Thermografie zur Ortung verdeckter Hohlstellen und anderer Inhomogenitäten mit denen von 3D-Laserscannern zur Erfassung der Geometrie. Nachfolgend werden die Einzelverfahren sowie die Kombination und Datenfusion der Ergebnisse beider Verfahren zum Monitoring eines denkmalgeschützten Bauteils vorgestellt.

Aktive Thermografie

Die aktive Thermografie beruht auf einer gezielten instationären Erwärmung der zu untersuchenden Struktur mit einer geeigneten Wärmequelle und der Beobachtung des Erwärmungs- und Abkühlungsverhaltens mit einer Infrarot(IR)-Kamera. Falls innerhalb der Struktur Inhomogenitäten vorhanden sind, deren thermische Materialeigenschaften sich von denen der Umgebung unterscheiden, ändert sich der Wärmefluss in diesen lokalen Bereichen. Demzufolge können oberflächennahe Inhomogenitäten mit der IR-Kamera in den Fällen geortet werden, in denen sie einen messbaren Temperaturunterschied auf der Oberfläche verursachen [2], [3]. Für die Durchführung der Messungen müssen die geeigneten Erwärmungseinheiten und Messparameter an die Aufgabenstellung angepasst werden. Im Projekt wurden als Wärmequellen Heizlüfter, Blitzlampen und Halogenlampen verwendet. Als IR-Kamera wurde die Variocam High Resolution von Infratec mit einem 640×480 Pixel großen Mikrobolometer Focal Plane Array eingesetzt, welches im Wellenlängenbereich von 8 bis 12 μm sensitiv ist. Diese IR-Kamera benötigt nur eine Temperaturstabilisierung und keine aufwändige

Detektorkühlung, so dass sie robust und für den Außeneinsatz sehr gut geeignet ist. Für diese Kamera standen drei Objektive sowie eine zusätzliche Vorsatzlinse zur Verfügung. Bei den Untersuchungen im Projekt wurde standardmäßig eine Ortsauflösung von 1,5 mm erreicht. Die Temperaturauflösung des Systems lag bei 0,05 K.

Die thermische Anregung der Objekte erfolgte sowohl mit Wärmeimpulsen für eine Dauer bis zu 1 min als auch periodisch bei unterschiedlichen Frequenzen. Bei der Impulsanregung wurden für die qualitative Auswertung der Messdaten Thermogramme direkt nach der Erwärmung sowie während der Abkühlung ausgewählt und mit geeigneter Skalierung in einer Farb- oder Grauwertskala dargestellt. Dabei lassen sich flache Fehlstellen direkt im Anschluss der Erwärmung oder nach kurzen Abkühlzeiten detektieren, während tiefere Fehlstellen später erscheinen. Bei der periodischen Erwärmung (Lock-In-Thermografie) wird die Leistung der Wärmequelle mit einer Sinus- oder Rechteckfunktion moduliert. Im Modell entsteht dadurch eine thermische Welle, die im Inneren der zu untersuchenden Struktur an Grenzflächen, an denen sich die thermischen Eigenschaften ändern, teilweise reflektiert wird [4]. Diese Reflexionen überlagern sich mit der einfallenden Welle und bestimmen die Temperaturverteilung auf der Oberfläche. Der zeitliche Verlauf dieser Temperaturverteilung kann mit einer IR-Kamera als eine Sequenz von Thermogrammen erfasst werden. Die Sequenz ist zeitlich mit der Wärmequelle korreliert. Die Fouriertransformation (FFT) der zeitlichen Temperaturänderung eines jeden Pixels ermöglicht die Bestimmung von Amplitude und Phase bei der Anregungsfrequenz. Amplitude und Phase sind orts- und zeitabhängig und werden durch die Tiefe und die Materialeigenschaften an der Grenzfläche (Fehlstelle) bestimmt. Die Amplitude ist dabei die Summe aus einfallender und reflektierter Welle, die Phase gibt die Phasenverschiebung zwischen Anregung und Reflexion wieder. Die Anpassung der Anregungsfrequenz an die Tiefe der Grenzfläche (Fehlstelle) führt zu einer optimalen Abbildung mit maximalem Amplituden- und Phasenkontrast.

In Bild 1 sind dazu als Beispiel Ergebnisse einer Impuls- und einer Lock-In-Anregung dargestellt. Bild 1a zeigt den Kämpfer einer Sandsteinsäule im Kreuzgang des Klosters Unser Lieben Frauen in Magdeburg. Die Restaurierung erfolgte 1996-1998. Die restauratorischen Maßnahmen beinhalteten u. a. die Festigung mit Kieselsäureester und Acrylharzvolltränkung. Bild 1b zeigt ein Thermogramm direkt nach einer Erwärmung mit Halogenlampen von 1 min. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz zum sogenannten Nullbild, d. h. dem Thermogramm, dass

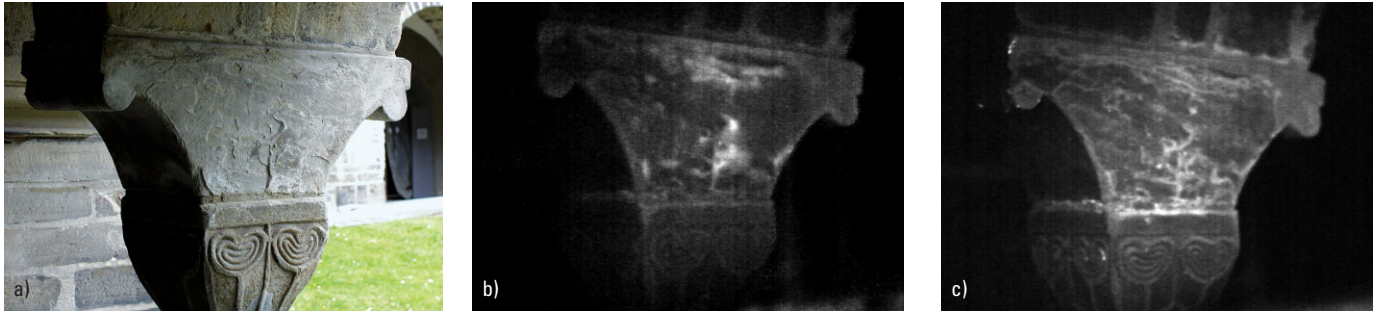


Bild 1. a) Kämpfer einer Säule im Kloster Unser Lieben Frauen in Magdeburg. b) Differenzthermogramm nach einer Impulsanregung von 1 min (dunkel bis Hell: 0 bis 1,2 K). c) Amplitudenbild bei periodischer Anregung mit 0,25 Hz, Messzeit 1,5 min

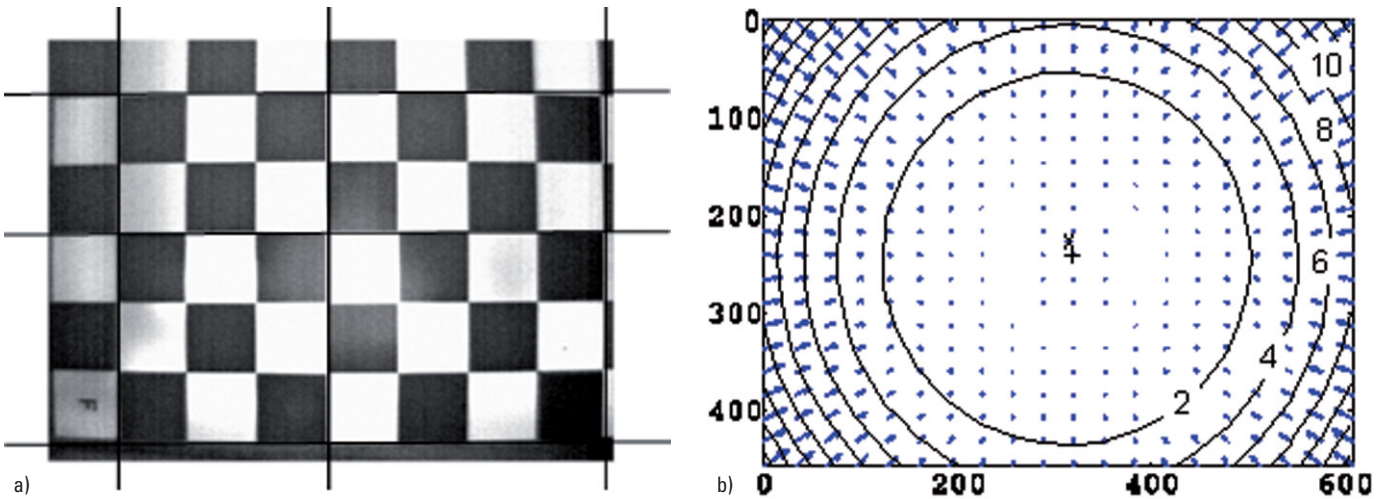


Bild 2. Interne Kamerakalibration. a) Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes in 50 cm Abstand mit dem Normalobjektiv. Verzeichnungen sind vor allem in den Ecken deutlich erkennbar. b) Grafische Veranschaulichung der Verzeichnung durch die Kameraoptik der IR-Kamera mit Normalobjektiv, die Zahlen geben den Versatz in Pixelgrößen an. +: Mittelpunkt des Detektorarrays der Kamera; X: Aufpunkt der optischen Achse des Objektivs auf dem Detektor

vor der Erwärmung aufgenommen wurde. Es sind deutlich eng abgegrenzte Bereiche erhöhter Temperatur zu erkennen. Im Amplitudenbild bei 0,25 Hz in Bild 1c bilden sich die einzelnen Schichtgrenzen des Natursteins ab. Hierdurch wird ersichtlich, dass Bereiche erhöhter Temperaturen an lateralen Schichtgrenzen liegen. Es könnte sich dabei also um kleine Ablösungen oder Materialergänzungen mit anderen thermischen Eigenschaften als das umgebende Material an den Rändern der Materialschichten handeln.

Für eine spätere Überlagerung der Thermogramme mit 3D-Geometrien muss bekannt sein, wie sich das reale 3D-Objekt in der 2D-Bildebene der IR-Kamera abbildet. Sowohl die räumliche Anordnung von Objekt und Kamera zueinander (äußere Kalibrierung) als auch kamerainterne Abbildungsparameter (innere Kalibrierung) beeinflussen die Abbildungsverhältnisse. Im Rahmen eines Kameramodells können diese Einflüsse beschrieben werden.

Zur Ermittlung der inneren Kameraparameter der IR-Kamera wurde das Softwaretool „Camera calibration toolbox for Matlab“ von Jean-Yves Bouguet genutzt, welches im Internet frei verfügbar ist [5]. Dabei wird ein Schachbrettmuster als Passpunktfeld verwendet. Für den Infrarotbereich hat sich eine mit Zinn beschichtete Leiterplatte als geeignet erwiesen. Um einen großen Fokusbereich abzudecken, wurden Platten mit verschiedenen

Größen und unterschiedlich großen Quadraten hergestellt. Bild 2a zeigt die visuell wahrnehmbaren Verzerrungen des Passpunktfeldes, Bild 2b die grafische Veranschaulichung der mathematischen Beschreibung durch das ermittelte Kalibrationsmodell. Die so bestimmten Kameraparameter zur Beschreibung der Abbildungseigenschaften gestatten eine nachträgliche Korrektur der Abbildung, welche den mittleren Fehler auf unter 0,2 Pixelbreiten reduziert. Da die Parameter der inneren Kalibrierung die Summation verschiedener geometrischer und optischer Fehler in der Kamera beschreiben, sollten diese Parameter nach einmalig erfolgter Kalibrierung wieder verwendbar sein, da sich an der inneren Anordnung der optischen Elemente zueinander nichts ändert. Allerdings verfügt die verwendete IR-Kamera sowohl über verschiedene Objektive als auch über eine veränderbare Fokuseinstellung. Um reproduzierbare Kalibrationsdaten zu erhalten, muss bei einem Objektivwechsel eine bestimmte Vorgehensweise bei der Fixierung des neuen Objektivs berücksichtigt werden. Die über die Kamerasteuerung eingegebenen Fokuseinstellungen haben sich als reproduzierbar erwiesen.

Zur Bestimmung der unbekanntenen äußeren Modellparameter bietet die Photogrammetrie leistungsfähige Verfahren an, die auf der Auswertung von Bildaufnahmen bekannter räumlicher Passpunkte basieren [6]. Solange die

Geräte zum Überwachen von Rissen und Oberflächen-Veränderungen



www.rissobservator.de

Fordern Sie jetzt unseren aktuellen Prospekt für Bau-Prüf-Geräte an !



PPW-POLYPLAN-WERKZEUGE GMBH



Riekbornweg 20
D-22457 Hamburg
Tel. 040 / 55 97 26 - 0
Fax 040 / 55 97 26 65
<http://www.polyplan.com>
E-Mail: ppw@polyplan.com

Einstellungen für Fokus und Brennweite nicht verändert werden, erleichtert eine vorherige Bestimmung der inneren Kameraparameter die anschließende Ermittlung der äußeren Parameter relativ zum Messobjekt erheblich. Für jede Aufnahmeposition müssen theoretisch mindestens vier, in der Praxis zehn oder mehr 3D-Koordinaten auf oder nahe dem Messobjekt und deren zugehörige Bildkoordinaten bekannt sein. Die Ermittlung erfolgt in diesem Fall manuell im Bild und im Dreiecknetz. Aus diesen Daten und den bekannten inneren Parametern lassen sich die äußeren Parameter zur Bestimmung der Blickrichtung und des Projektionszentrums der Kamera berechnen. Für die Berechnungen werden Funktionen aus der OpenCV Bibliothek verwendet [7], es kann aber ebenso die Camera calibration toolbox for Matlab genutzt werden [5].

3D Laserscanner

Für die Aufnahme der 3D-Geometriedaten ist ein zweistufiger Prozess erforderlich. Im ersten Schritt werden die Daten mit einem Messsystem erfasst. Dies erfolgt berührungslos und wird mit einem Lichtschnittsensor realisiert, der aus einer Kamera sowie einem Linienlaser besteht. Das Lichtschnittverfahren nutzt das Prinzip der Triangulation. Hierbei wird eine Laserlinie auf das zu vermessende Objekt projiziert. Diese Lichtebene schneidet das Objekt entlang einer Profillinie, deren Verlauf in Abhängigkeit von der Oberflächengeometrie mehr oder weniger stark gekrümmt wird. Eine Kamera beobachtet die Szene, und mit Hilfe der bekannten räumlichen Geometrie dieser Anordnung wird aus der Form der Profillinie die Höheninformation über das Objekt errechnet, siehe Bild 3a. Durch den Einsatz integrierter hardwarebasierter Bildver-

arbeitung können pro Sekunde bis zu 100 Konturlinien mit jeweils 1536 3D-Messpunkten auf dem Messobjekt digitalisiert werden. Als flexibles kinematisches System zur Bestimmung der Position und Orientierung des optischen Sensors kommt ein Gelenkmessarm zum Einsatz. Der Sensor ist an der Tasts Spitze des Armes integriert. Die synchrone Erfassung der 3D-Konturlinien des Lichtschnittsensors und die der Messarmposition ermöglicht während der Bewegung des Sensors die Digitalisierung der Oberfläche in Form einer Punktwolke. Die Genauigkeit der 3D-Messpunkte beträgt $\pm 0,1$ mm. Bild 3b zeigt das Messsystem im Einsatz an der Säule im Koster Unser Lieben Frauen in Magdeburg.

Im zweiten Schritt müssen die Daten für die weitere Verarbeitung aufbereitet werden. Da die Messdaten nur aus den Lageinformationen jedes einzelnen Messpunktes bestehen, ist eine räumliche Darstellung noch nicht möglich. Zusätzliche Parameter ermöglichen jedoch eine weiterführende effiziente Analyse der resultierenden Punktwolke. Dazu zählen u. a. die Positionen und Projektionsrichtungen von Kamera und Laser. Es wurde ein Verfahren weiterentwickelt, das die bekannten Informationen zur qualitativen Bewertung der Messdaten nutzt. Ungültige Messdaten werden erkannt und in Abhängigkeit von ihrer Qualität und von Redundanzen entfernt. Außerdem können die Messdaten auf eine gewünschte Auflösung unter Berücksichtigung der Qualität reduziert werden. Aus der vorverarbeiteten Punktwolke wird im Anschluss ein geometrisches Oberflächenmodell erstellt, in welchem die einzelnen 3D-Messpunkte über Dreiecke miteinander verbunden werden. Das Ergebnis ist ein Dreiecknetz und ist die Basis für die visuelle Darstellung und Weiterverarbeitung der Messdaten.

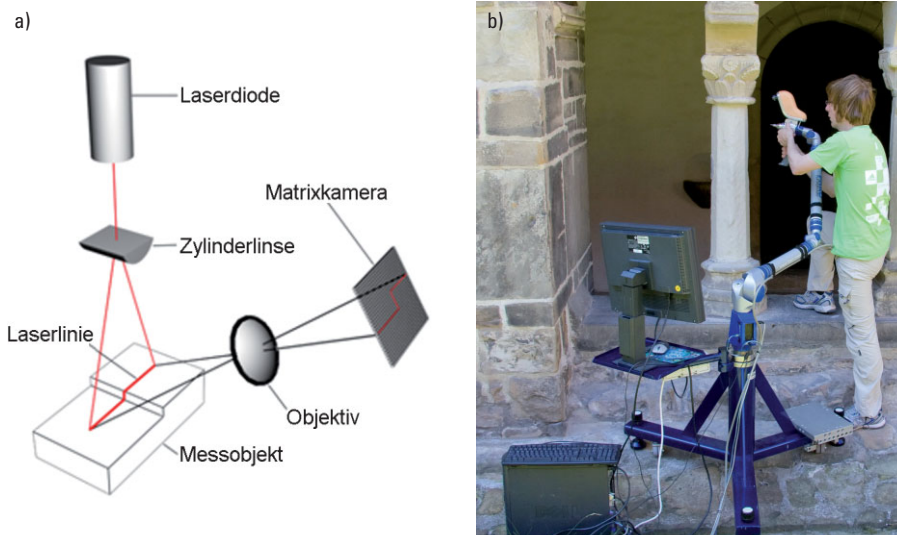


Bild 3. 3D-Laserscanner zur Erfassung der geometrischen Daten. a) Lichtschnittsensor. b) Gelenkmessarm mit Sensor im Messeinsatz

Datenfusion am Fallbeispiel einer Sandsteinsäule im Magdeburger Dom

Bei dem evangelische Dom St. Mauritius und St. Katharina in Magdeburg handelt es sich um einen vom frühen 13. bis frühen 16. Jahrhundert erbauten gotischen Monumentalbau mit außerordentlich reicher Ausstattung. Im nach 1232 entstandenen sog. Bischofsgang befinden sich in den Ecken der massiven Pfeiler Säulen mit Schaftringen, die als Profilband mittig die Achteckpfeiler umlaufen [8]. Diese weisen zum Teil massive Schalenablösungen sowie starkes Absanden auf. Eine der Säulen war Gegenstand der zerstörungsfreien Untersuchungen innerhalb dieses Projektes (Bild 4a). Sowohl mit dem 3D-Laserscanner als auch mit aktiver Thermografie wurde die Säule zu unterschiedlichen Zeiten untersucht. Im Folgenden werden Ergebnisse vom Juni 2009 und März 2010 miteinander verglichen.

Für die Fusion der Daten des 3D-Laserscanners und der aktiven Thermografie muss zunächst die Messposition der IR-Kamera in Relation zum untersuchenden Objekt bestimmt werden. Anschließend wird für jeden 3D-Messpunkt der Sichtstrahl ermittelt, der diesen Punkt auf das Detektorarray der IR-Kamera projiziert. Dadurch können Korrespondenzen zwischen allen Punkten hergestellt werden, welche sowohl im 2D-Bild als auch im 3D-Modell sichtbar sind. Die Methode, mit der ein 2D-Bild auf ein 3D-Modell übertragen wird, wird als Textur-Mapping bezeichnet. Dabei müssen die Bilder möglichst passgenau auf das 3D-Modell übertragen werden, es muss die Überlagerung verschiedener Bilder möglich sein und das Verhältnis der Datenaufösungen (hoch für das 3D-Modell und niedrig für die 2D-Bilder) muss berücksichtigt werden. Weiterhin darf es nicht zu perspektivischen Verzerrungen kommen. Bei dem hier eingesetzten Verfahren wird, ausgehend von einem Punkt des Dreiecknetzes, ein

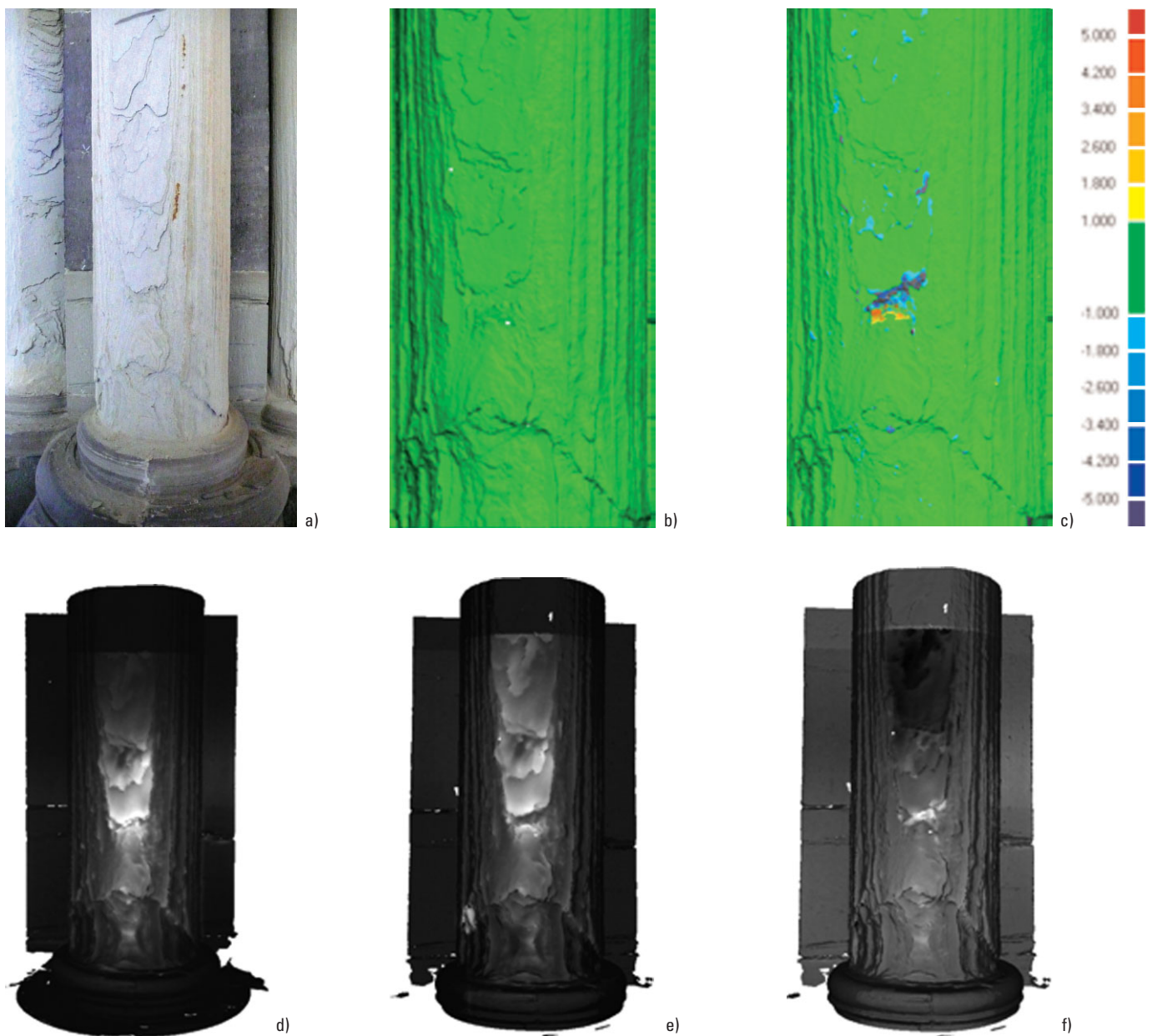


Bild 4. Ergebnisse der Untersuchungen an der Sandsteinsäule im Magdeburger Dom. a) Foto der Säule mit Schalenablösungen. b) 3D-Modell vom März 2010. c) Differenzdarstellung der 3D-Modelle vom Juni 2009 und März 2010. d) Thermogramm fusioniert mit 3D-Modell, Juni 2009. e) Thermogramm fusioniert mit 3D-Modell, März 2010. f) Differenzmapping der Thermogramme auf dem 3D-Modell (Bilder: BAM, IFF, IDK)

Strahl in Richtung des Kamerazentrums gesendet. Schneidet der Strahl auf seinem Weg zur Kamera die Ebene mit dem Bild, so wird dem Durchstoßungspunkt durch die Bildebene der Temperaturwert des ursprünglichen Punktes zugeordnet. Dieser Vorgang wird für sämtliche Punkte des Dreiecknetzes wiederholt. Trifft ein Strahl auf seinem Weg zur Kamera zuerst eine andere Geometrie, so wird dieser Punkt nicht von der Kamera registriert. Gibt es mehrere Bildaufnahmen des Objektes, wird für jede Aufnahme eine eigene virtuelle Kamera erzeugt. Die Temperaturwerte der Geometrie werden in den jeweiligen Eckpunkten des Dreiecknetzes gespeichert. Bei der Visualisierung des Modells werden die Temperaturwerte dann über die zugehörigen Dreiecke interpoliert. Da das 3D-Modell hoch aufgelöst ist, entsteht ein kontinuierliches Textur-Mapping, das die oben angegebenen Anforderungen erfüllt [9].

Bei den Messeinsätzen zur Erfassung der 3D-Geometrie wurde die Säulenbasis für die Referenzierung der einzelnen Datensätze ausgewählt. Die Fläche wurde in sieben Teilbereiche aufgetrennt, die nacheinander digitalisiert wurden. Die Suche nach noch nicht digitalisierten Flächen innerhalb der Bereiche war hierbei besonders wichtig. Eine vollständige Überprüfung war dazu ohne eine reduzierte Darstellung der Daten nicht möglich. Deshalb wurde diese Funktionalität für den Messeinsatz in die Software integriert. Es wurden insgesamt 171 Millionen Messpunkte aufgenommen. Die Zeit für die Digitalisierung betrug 5 h. Anschließend wurden die Punktwolken bearbeitet, in Übereinstimmung gebracht und dann vernetzt. Das entstandene Dreiecknetz besteht aus 15 Millionen Dreiecken in einer Auflösung von 0,5 mm. Es wurde in einem Messfeld von 500×1500 digitalisiert. Danach wurden die Datensätze miteinander verglichen. Bild 4b zeigt ein 3D-Modell im März 2010, die Differenz der Modelle vom Juni 2009 und März 2010 ist in Bild 4c dargestellt. Bei den blau eingefärbten Bereichen wurde ein Materialabtrag von bis zu 5 mm gemessen. Die rot eingefärbten Bereiche stellen einen Materialzuwachs von bis zu 5 mm dar, wobei hier ein Aufstellen der oberflächennahen Schalen zu beobachten war.

Aufgrund der nur begrenzt gleichmäßig räumlichen Ausleuchtung mit Halogenlampen war die thermografische Untersuchung der gesamten Säule nicht in einem Durchlauf möglich. Daher mussten der untere, mittlere und obere Teil getrennt untersucht werden. Dabei wurden unterschiedliche zeitliche Anregungsarten variiert: Impulsanregung (1 min) und Beobachtung des Abkühlungsverhaltens sowie periodische Anregung (Lock-In) bei unterschiedlichen Frequenzen von 0,5 Hz, 0,25 Hz und 0,05 Hz. Im Folgenden wird nur die Impulsanregung weiter betrachtet. Für die Messungen wurde die oben beschriebene IR-Kamera eingesetzt. Hier erfolgte die thermische Anregung und Beobachtung von vorne, d. h. senkrecht zur Schichtung des Materials. Messungen von der Seite aus wurden ebenfalls durchgeführt, ergaben aber keine zusätzlichen Informationen über die Struktur der Säule. Die Messungen mit aktiver Thermografie erfolgten u. a. im Juni 2009 und März 2010 jeweils mit vergleichbaren Messparametern. Die maximalen Temperaturdifferenzen an der Oberfläche des unteren Säulenbereiches konnten mit der Halogenanregung an beiden Messtagen annä-

hernd reproduziert werden und waren daher näherungsweise unabhängig von der Ausgangstemperatur. In Bild 4d und 4e sind die Thermogramme direkt nach der Impulsanregung der Messungen im Juni 2009 und März 2010 dargestellt, dabei wurden die Thermogramme mit den 3D-Modellen fusioniert. Die Ausleuchtung des Messbereichs mit den Halogenlampen ist relativ inhomogen, wodurch die Erwärmung der Fläche an beiden Messtagen nicht vollständig reproduziert werden konnte. Es ist trotzdem klar zu erkennen, dass die im Juni 2009 detektierten Bereiche mit hoher Temperatur im März 2010 einen deutlichen Materialverlust aufweisen, entsprechend der Beobachtung im 3D-Differenzmodell in Bild 4c. Bild 4f zeigt die Datenfusion des 3D-Modells vom Juni 2009 mit der Differenz der beiden Thermogramme. Die Stellen, an denen Materialverluste auftraten, zeichnen sich deutlich im Differenzbild ab. Dies ist verständlich, da sich losgelöste Stellen im Juni deutlich erwärmten, während bei der späteren Aufnahme an diesen Stellen festes und daher kühles Säulenmaterial von der IR-Kamera erfasst wurde.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination und Datenfusion der Ergebnisse der aktiven Thermografie zur Ortung verdeckter Hohlstellen und anderer Inhomogenitäten und von 3D-Laserscannern zur Erfassung der Geometrie liefert umfassende quantitative Informationen über die Zuordnung von Merkmalen und Veränderungen eines Bauteils. Mit Hilfe dieser Informationen können oberflächennahe Schäden frühzeitig erkannt, räumlich erfasst und quantifiziert werden.

Wiederholende Messungen in festen Zeitintervallen ermöglichen ein Monitoring bestehender und neuer Schäden. Dabei haben Untersuchungen an der Sandsteinsäule gezeigt, dass es sehr aufwändig ist, die Erwärmung bei der aktiven Thermografie sowie die Messposition bei jedem Messeinsatz vollständig zu reproduzieren. Daher sind ein automatisierbarer direkter Vergleich, eine qualitative Bewertung von Schädigungen (hier z. B. des Materialverlustes) und eine Prognose der Schadensentwicklung insbesondere bei komplexen Geometrien nur möglich, wenn die Thermogramme mit der 3D-Geometrie fusioniert werden. Erst dann können Differenzdarstellungen der ursprünglichen 2D-Abbildungen erzeugt werden.

Mit Hilfe der aktiven Thermografie konnten in der vorgestellten Fallstudie die Ablösungen an der Sandsteinsäule eindeutig als Bereiche mit erhöhten Temperaturen nach der Erwärmung geortet werden. Teile dieser Bereiche fehlten bei späteren Messungen. Die Temperaturerhöhungen sind daher ein Hinweis auf zukünftig zu erwartende Materialverluste. Die Materialverluste selbst lassen sich lokal aufgelöst aus der Differenzdarstellung der geometrischen 3D-Modelle zuverlässig berechnen.

Zukünftig wird es möglich sein, aus dem geometrischen 3D-Modell sowie der bekannten Position der IR-Kamera den Betrachtungswinkel jedes Oberflächenelements zu bestimmen. Aus diesen Informationen können winkelabhängige Emissivitäten und damit die Temperaturwerte korrigiert werden. Dies erhöht die Nachweisempfindlichkeit insbesondere bei komplexen geometrischen Strukturen wie Säulen, Skulpturen und Reliefs.

Danksagung

Das Projekt mit dem Titel „Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren“ wurde im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gefördert (Aktenzeichen: BBR AZ II2-F20-08-024). Für die Begleitung und Unterstützung der Projektarbeiten danken wir insbesondere Babett Schriewer, Asmus Schriewer, Matthias Hemmleb und Ralf Lindemann. Weiterhin danken wir Thomas Groll für seine Hilfestellungen bei der Durchführung der Messungen im Magdeburger Dom.

Literatur

- [1] Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren, Forschungsprojekt Zukunft Bau, www.forschungsinitiative.de/projekte.jsp?p=20088034486&proj=antrag&stat=
- [2] Maierhofer, C.; Arndt, R.; Röllig, M.; Rieck, C.; Walther, A.; Scheel, H.; Hillemeier, B.: Application of impulse thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 393–401.
- [3] Maldague, X.P.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, 1. ed., Hoboken, NJ 2001.
- [4] Wu, D.; Busse, G.: Lock-in thermography for non-destructive evaluation of materials. *Revue Generale de Thermique*, 1998, 37, pp. 693–703.
- [5] Bouguet, J.-Y.: Camera calibration toolbox for Matlab, www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [6] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin 2003.
- [7] Intel Corporation. *Open Source Computer Vision Library Reference Manual*, U.S.A. 2001, online frei zugänglich.
- [8] Dehio, G.: *Der Bischofsgang des Magdeburger Domes*. In: *Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler. Sachsen-Anhalt*, Berlin, München 2002.
- [9] Mecke, R.; Berndt, D.; Schoor, W.; Trostmann, E.: *Generation of Texturized 3D Models with High Resolution Using Optical 3D Metrology*. Conference: *Optical 3D Measurement Techniques 2003*.

Weitere Informationen:

Dr. Christiane Maierhofer,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung,
Fachgruppe VIII.4 Akustische und elektromagnetische
Verfahren, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin,
Tel. (0 30) 81 04-14 41, Fax (0 30) 81 04-18 47,
Christiane.Maierhofer@bam.de

Dr.-Ing. Rüdiger Mecke,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), Kompetenzfeld Virtual Prototyping (VP),
Sandtorstraße 22, 39106 Magdeburg,
Tel. (03 91) 40 90-1 46, Fax (03 91) 40 90-1 15,
ruediger.mecke@iff.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch,
Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen
in Sachsen und Sachsen Anhalt e.V.,
Domplatz 3, 06108 Halle (Saale),
Tel. (03 45) 47 22 57 21, Fax (03 45) 47 22 57 29,
kalisch@idk-info.de

Autoren: Christiane Maierhofer¹, Rainer Krankenhagen¹,
Mathias Röllig¹, Rüdiger Mecke², Michael Schiller²,
Thomas Seidl², Uwe Kalisch³, Christiane Hennen³, Jeannine
Meinhardt³

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FG VIII.4

² Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)

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