Entwicklung und Kombination optischer und thermografischer zerstörungsfreier Messverfahren zur Bewertung von Bauteiloberflächen und -grenzflächen

Christiane MAIERHOFER[*], Rainer KRANKENHAGEN[*], Mathias RÖLLIG[*], Rüdiger MECKE[**], Thomas SEIDL[**], Michael SCHILLER[**], Uwe KALISCH[***], Jeannine MEINHARDT[***], Christiane HENNEN[****]
[*] BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin, christiane.maierhofer@bam.de
[**] Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg
[***] Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V. IDK, Halle
[****] Bauforschung – Denkmalpflege, Wittenberg

Kurzfassung. Die Kombination und direkte Datenfusion der Ergebnisse von 3D-Laserscannern zur Erfassung der Geometrie und der aktiven Thermografie zur Ortung verdeckter Hohlstellen und anderer Inhomogenitäten liefert umfassende quantitative Informationen über die Zuordnung von Merkmalen und Veränderungen eines Bauteils. In diesem Beitrag werden die erforderlichen Verfahrensspezifikationen, das Prinzip der Datenüberlagerung und ausgewählte Fallstudien aus der Denkmalpflege vorgestellt.

1 Einführung

Schäden an Bauwerksoberflächen wie Risse, Ablösungen, Feuchte, Bewuchs (Moose, Flechten, Pilze usw.) und Krustenbildung werden zurzeit hauptsächlich durch konventionelle Verfahren, wie z. B. Sichtprüfung und manuelle Vermessung, erfasst. Zur Sicherung des kulturellen Erbes werden jedoch dringend moderne und effiziente Verfahren und Strategien für eine vorbeugende Instandhaltung benötigt, die mit geringeren Kosten häufigere Inspektionen ermöglichen. Auch Wachstum und Alterung des Gebäudebestands verschärfen die Situation zunehmend [1, 2].

Ziel des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ geförderten Forschungsvorhabens war daher die Entwicklung und Bewertung einer effizienten Strategie, mit der diese oberflächennahen Schäden frühzeitig erkannt, räumlich erfasst und quantifiziert werden können. Diese Strategie basiert auf der Kombination laserbasierter Verfahren zur Aufnahme der äußeren 3D-Geometrie der Bauteiloberfläche und zur Erfassung geometrischer Veränderungen (z. B. von Rissen, Vorwölbungen, Verformungen) [3] mit der aktiven Thermografie zur Darstellung von oberflächennahen, aber nicht von außen sichtbaren Defekten und Strukturen (z. B. von Ablösungen, Hohlstellen, Struktur des Mauerwerks hinter Putz, Feuchte an der Grenzfläche Putz/Mauerwerk) [4].

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

Im Rahmen des Vorhabens wurden die Kenngrößen der einzelnen Messverfahren erfasst und mit den für die Anwendungen in der Denkmalpflege erforderlichen Spezifikationen verglichen. Entsprechend den Anforderungen für die Verfahrenskombination erfolgte eine Weiterentwicklung der jeweiligen Einzelverfahren. Für die Entwicklung und Anwendung einer Messstrategie wurden vier Messobjekte ausgewählt und teilweise wiederholende Untersuchungen in größeren Zeitintervallen und unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen durchgeführt.

Nachfolgend werden die Verfahrensspezifikationen, das Prinzip der Datenüberlagerung und ausgewählte Ergebnisse der Fallstudien vorgestellt.

2 Messverfahren

2.1 3D-Laserscanning mit dem Lichtschnittverfahren

Für die Ermittlung der 3D-Geometriedaten ist ein zweistufiger Prozess notwendig. 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 Objekthöhe mehr oder weniger gekrümmt wird. Eine Kamera beobachtet die Szene, und mit Hilfe der bekannten räumlichen Anordnung von Laser und Kamera wird aus der Form der Profillinie die Geometrie der Objektoberfläche entlang der Linie ermittelt. Als flexibles kinematisches System zur Bestimmung der Position und Orientierung des Lichtschnittsensors kommt ein Gelenkmessarm zum Einsatz. Der Sensor ist an der Tastspitze des Armes integriert, der somit innerhalb einer Halbkugel mit einem 1,20 m Radius bewegt werden kann. Die synchrone Erfassung der 3D-Konturlinien des Lichtschnittsensors und der Messarmposition ermöglichen während der Bewegung des Sensors die Digitalisierung einer Oberfläche in Form einer Punktewolke. Die Genauigkeit der 3D-Messpunkte beträgt ±0,1mm. Durch den Einsatz integrierter hardwarebasierter Bildverarbeitung können pro Sekunde bis zu 100 Konturlinien mit jeweils 1536 3D-Messpunkten auf dem Messobjekt digitalisiert werden. In Abb. 1 links ist das Messsystem im Einsatz dargestellt.

Abbildung 1. Links: Lichtschnittsensor mit Gelenkmessarm im Messeinsatz. Rechts: Aktive Thermografie mit Anregung durch Halogenlampen.

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. Erst zusätzliche Parameter ermöglichen eine weiterführende effiziente Analyse der resultierenden Punktewolke. Dazu zählen unter anderem die Positionen und Projektionsrichtungen von Kamera und Laser. Um sicher alle Bereiche der Objektoberfläche erfassen zu können, werden einzelne Teilflächen mehrfach digitalisiert. Dadurch sind für jeden einzelnen Messpunkt auf der Oberfläche redundante Informationen vorhanden. Weiterhin sind die Messdaten entlang einer Laserlinie sehr hoch aufgelöst. Die Abstände der einzelnen Laserlinien schwanken jedoch sehr stark und besitzen relativ zu den Messpunkten auf der Laserlinie eine geringere Auflösung. Es wurde daher ein Verfahren weiterentwickelt, welches die bekannten Informationen nutzt, um die Messdaten qualitativ zu bewerten. Ungültige Messdaten werden erkannt und in Abhängigkeit ihrer Qualität und Redundanzen entfernt. Außerdem können die Messdaten auf eine gewünschte Auflösung unter Berücksichtigung der Qualität reduziert werden.

Aus der vorverarbeiteten Punktewolke wird im Anschluss ein geometrisches Oberflächenmodell erstellt, in welchem die einzelnen 3D-Messpunkte über Dreiecke miteinander verbunden werden. Das Ergebnis ist ein Dreiecknetz und wird in einem Standardformat (stl, vrml, obj) gespeichert. Es ist die Basis für die visuelle Darstellung und Weiterverarbeitung der Messdaten [5].

2.2 Aktive Thermografie

Die aktive Thermografie beruht auf einer gezielten instationären Erwärmung der zu untersuchenden Struktur mit einer geeigneten Wärmequelle und der anschließenden Beobachtung des Abkühlungsverhaltens mit einer Infrarot(IR)-Kamera (s. Abb. 1 rechts). 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. Im Projekt wurden als Wärmequellen ein Heizlüfter, Blitzlampen und Halogenlampen verwendet. Als IR-Kamera wurde die Variocam High Resolution von Infratec mit einem 640 x 480 Pixel großen Mikrobolometer Focal Plane Array im Wellenlängenbereich von 8 bis 12 µm eingesetzt. Bei den Untersuchungen im Projekt wurde standardmäßig eine Ortsauflösung von 1,5 mm erreicht. Die Temperaturauflösung des Systems lag bei 0,05 K.

Für die qualitative Auswertung der Messdaten werden Thermogramme ausgewählt und mit geeigneter Skalierung (Farbe oder Grauwert) dargestellt. Dabei lassen sich flache Fehlstellen entweder schon während der Erwärmung, direkt im Anschluss oder nach kurzen Abkühlzeiten detektieren, während tiefere Fehlstellen später erscheinen [6].

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 (http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/). Dabei wird ein Schachbrettmuster als Passpunktfeld verwendet. Das Programmpaket enthält entsprechende Routinen, welche eine automatisierte Passpunktsuche in einem

vorzugebenden Bildbereich unterstützen. Zur Nutzung des Softwaretools für IR-Kameras benötigt man ein Schachbrettmuster, welches im Empfindlichkeitsbereich der Kamera einen ausreichenden Kontrast liefert. Hierfür 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. 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 unbekannten äußeren Kameraparameter bietet die Photogrammetrie leistungsfähige Verfahren an, die auf der Auswertung von Bildaufnahmen bekannter räumlicher Passpunkte basieren [7]. Beim Untersuchen von Baudenkmälern können jedoch keine künstlichen Marker als Passpunkte angebracht werden, man ist daher auf das Vorhandensein entsprechender Merkmale am Objekt selbst angewiesen. Diese Merkmale müssen sowohl geometrisch als auch thermografisch eindeutig nachweisbar sein. An den während des Projektes untersuchten Baudenkmälern konnten entsprechende Referenzpunkte gefunden werden.

2.3 Messprinzip

Die Kombination der geometrischen mit den thermografischen Daten ermöglicht einen tieferen Einblick in die an der Oberfläche von Baudenkmälern ablaufenden Prozesse. Einerseits können thermografisch nachweisbare Details kleinräumigen Strukturen eindeutig zugeordnet werden, was die Interpretation der Befunde erleichtert. Andererseits besteht die Chance, geringfügige und langfristige geometrische Veränderungen im Submillimeter-bereich thermografisch nachzuweisen, falls die zugrunde liegenden Prozesse das thermische Verhalten der Oberfläche beeinflussen sollten. Das gilt z. B. für Schalenbildung oder bei Quell- und Schwindvorgängen (z. B. infolge wechselnder Durchfeuchtung).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die o. g. und nachfolgend beschriebenen Messverfahren für das Bauwesen adaptiert sowie die erforderlichen Algorithmen zur sinnvollen Überlagerung der Messdaten (Datenfusion, Mapping) der verschiedenen Systeme entwickelt, so dass eine mehrlagige 3D-Darstellung mit sämtlichen komplementären und sich ergänzenden Informationen möglich wurde.

Die wesentliche Innovation in diesem Projekt im Vergleich zur herkömmlichen Schadenserfassung liegt in der Integration beider Messverfahren in einem System und in einer direkten Fusion der Messdaten. Dies ermöglicht eine schnellere, automatisierbare, quantitative und genauere Erfassung einer Vielzahl sich ergänzender Messparameter der Oberflächenstruktur und -topografie. Diese Untersuchungen sind auch ohne permanenten stationären Aufbau vor Ort wiederholbar und vollständig zerstörungsfrei. Periodisches Monitoring auf Basis dieser Messwerte lässt das frühzeitige Erkennen von Schäden zu.

3 Datenfusion

Für die Fusion der Daten des 3D-Laserscanners und der aktiven Thermografie wird zunächst die Messposition der IR-Kamera in Relation zum untersuchenden Objekt bestimmt. 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. Ein geeignetes Mapping-Verfahren muss die folgenden Eigenschaften besitzen:

- die Bilder müssen möglichst passgenau auf das 3D-Modell übertragen werden
- es müssen Überlagerungen verschiedener Bilder möglich sein
- das Verhältnis der Datenauflösungen (hoch für das 3D-Modell und niedrig für die 2D-Bilder) muss berücksichtigt werden
- es darf nicht zu perspektivischen Verzerrungen kommen.

Bei dem hier eingesetzten Verfahren wird ausgehend von einem Punkt des Dreiecknetzes ein Strahl in Richtung des Kamerazentrums gesendet. Schneidet der Strahl auf seinem Weg zur Kamera die Ebene mit dem Bild, so bestimmt der Durchstoßpunkt durch die Ebene den Farbwert des ursprünglichen Punktes im Dreiecknetz. 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 gesehen und daher auch nicht von dieser beeinflusst. Gibt es mehrere Bildaufnahmen des Objektes, so wird für jede Aufnahme eine eigene virtuelle Kamera erzeugt [7, 8].

Der Farbwert des aktuell betrachteten Modellpunktes wird dann durch alle existierenden Schnittpunkte mit den Bildebenen definiert. Der Einfluss der 2D-Aufnahme auf den Wert des Punktes wird dabei durch den Winkel zwischen der Oberflächennormale des 3D-Punktes und der Sichtrichtung der Kamera bestimmt. Ein flacher Winkel deutet darauf hin, dass die Kamera den Punkt direkt sieht. Der Einfluss auf den Farbwert ist dann hoch. Ein steiler Winkel hingegen beeinflusst den Farbwert nur wenig. Die Farbwerte der Geometrie werden in den jeweiligen Eckpunkten des Dreiecknetzes gespeichert. Bei der Visualisierung des Modells werden die Farbwerte dann über die zugehörigen Dreiecke interpoliert. Da das 3D-Modell so hoch aufgelöst ist, entsteht ein kontinuierliches Textur-Mapping, das die oben angegebenen Anforderungen erfüllt.

4 Fallstudien

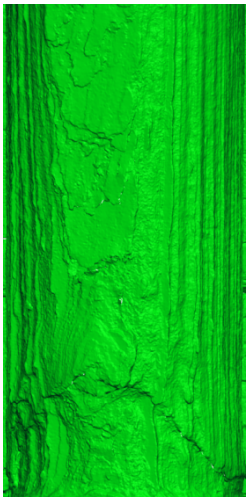
4.1 Sandsteinsäule im Magdeburger Dom

Bei dem evangelischen Dom St. Mauritius und St. Katharina 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 [9]. Diese weisen zum Teil massive Schalenablösungen sowie starkes Absanden auf. Eine der Säulen war Gegenstand der zerstörungsfreien Untersuchungen innerhalb dieses Projektes. Sowohl mit dem 3D-Laserscanner als auch mit aktiver Thermografie wurde die Säule zu unterschiedlichen Zeiten untersucht.

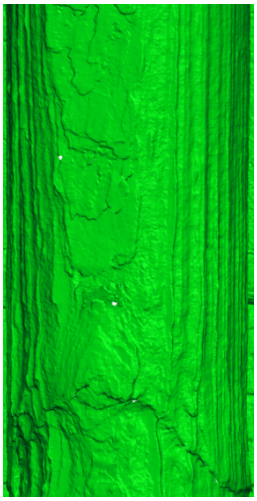
Im November 2006 wurde die Säule im Rahmen eines anderen Projektes bereits das erste Mal mit dem Laserscanner digitalisiert. Diese Daten bildeten die Grundlage für die zwei Wiederholungsmessungen im Juni 2009 und März 2010. Bei den Messeinsätzen wurde die Säulenbasis für die Referenzierung der einzelnen 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 ohne eine reduzierte Darstellung der Daten war hierbei nicht möglich. Deshalb wurde diese Funktionalität für den Messeinsatz in die Software integriert. Es wurden insgesamt 171 Mio. 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 Mio. Dreiecken in einer

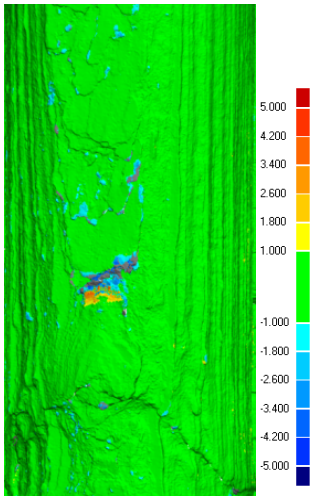
Auflösung von 0,5 mm. Es wurde in einem Messfeld von 500 x 1500 digitalisiert. Danach wurden die Datensätze miteinander verglichen. Abb. 2 (a) und (b) zeigen die 3D-Modelle im Juni 2009 und März 2010, die entsprechende Differenz der Modelle ist in Abb. 2 (c) dargestellt. Bei den blau eingefärbten Bereichen wurde einen 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.



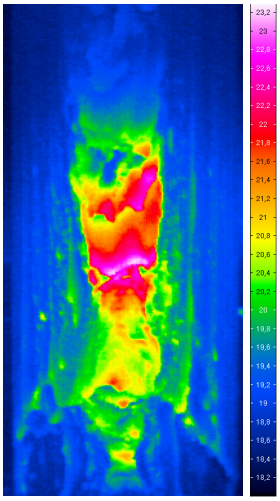
a) 3D-Modell Juni 2009



b) 3D-Modell März 2010

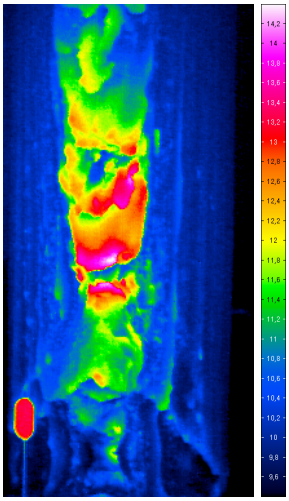


c) Differenzdarstellung der beiden 3D-Modelle



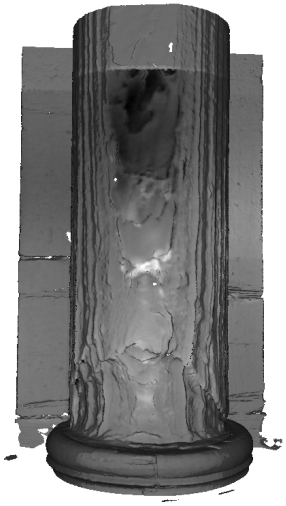
18,0 bis 23,3 °C

d) Thermogramm Juni 2009



9,4 bis 14,4 °C

e) Thermogramm März 2010



f) Differenzmapping auf dem Säulenmodell

Abbildung 2. 3D-Modell der Säule, sowie Thermogramme zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Differenzmapping

Aufgrund der nur begrenzt gleichmäßig räumlichen Ausleuchtung wurden der untere, mittlere und obere Teil der Säule mit aktiver Thermografie mit Halogen-lampenanregung getrennt untersucht. Dabei wurden unterschiedliche zeitliche Anregungsarten variiert:

- Impulsanregung (1 min) und Beobachtung des Abkühlungsverhaltens
- Periodische Anregung (Lock-In) bei unterschiedlichen Frequenzen: 0,5 Hz; 0,25 Hz; 0,05 Hz (hier nicht 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 am 10.6.2009, 17.11.2009 und 31.3.2010 jeweils mit vergleichbaren Messparametern. In Tabelle 1 sind die Umgebungsbedingungen an den drei Messtagen zusammengestellt. Die Oberflächentemperatur war im Juni 2009 am höchsten und im März 2010 am niedrigsten. Die rel. Luftfeuchte war vergleichbar. Die maximalen Temperaturdifferenzen an der Oberfläche des unteren Säulenbereiches konnten mit der Halogenanregung annähernd reproduziert werden und waren daher näherungsweise unabhängig von der Ausgangstemperatur.

Tabelle 1. Umgebungsbedingungen und maximale Temperaturanstiege bei gleicher Erwärmung der Säule an drei unterschiedlichen Messtagen

	10.6.2009	**17.11.2009**	**31.3.2009**
Rel. Luftfeuchte	60 %	62 %	72 %
Lufttemperatur	19,0 °C	13,5 °C	10,0 °C
Objekttemperatur (gemessen mit Kontaktthermometer	17,3 °C	11,0 °C	8,5 °C
Maximaler Temperaturanstieg nach 1 min Halogenanregung	5,9 K	7,0 K	5,9 K

In Abb. 2 (d) und (e) sind die Thermogramme direkt nach der Impulsanregung der Messungen im Juni 2009 und März 2010 dargestellt. Die Ausleuchtung des Messbereiches mit den Halogenlampen ist relative inhomogen, wodurch die Erwärmung der Fläche an allen drei Messtagen nicht vollständig reproduziert werden konnte. Es ist aber 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-Modell.

Abb. 2 (f) zeigt die Datenfusion des 3D-Modells vom Juni 2009 mit der Differenz der beiden Thermogramme. Hier sind Materialverluste als Temperaturabnahmen (hell) zu erkennen.

4.2 Madonna im Halberstädter Dom

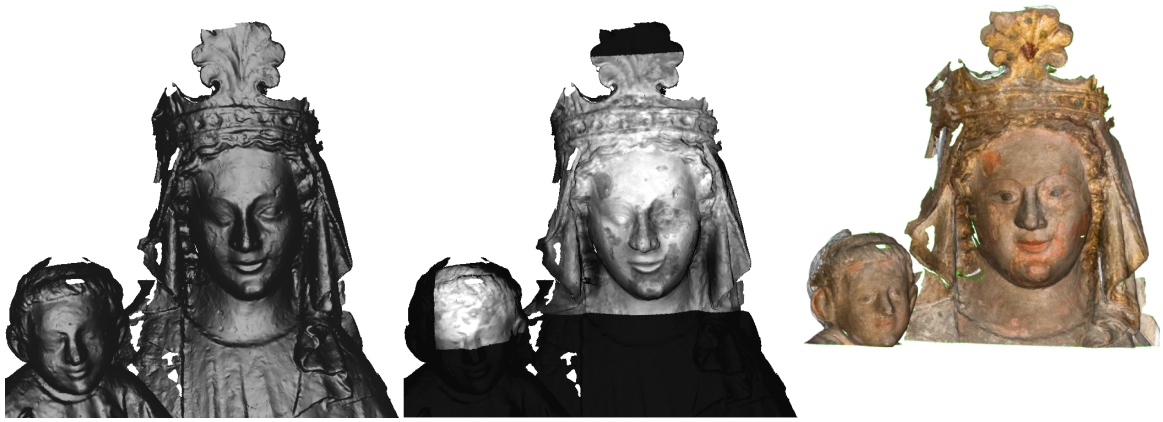
Die Madonna mit Kind in der Marienkapelle im Halberstädter Dom wurde 1270/1280 geschaffen. Sie besteht aus Halberstädter Muschelkalk, auf der Oberfläche befindet sich eine polychrome Fassung. Ursprünglich gaben verschiedene Schadensbilder wie zahlreiche Salzausblühungen, Entfestigung des Kalksteins, Abmehlen, z. T. Abbrüche bzw. Fehlstellen, eine stark geschädigte Fassung, blasige Aufwerfungen und Verschmutzungen Anlass für die Restaurierung bzw. konservierende Maßnahmen. Die letzte Restaurierung wurde 2004 unter der Maßgabe eines kleinstmöglichen Eingriffs durchgeführt. Ziel der Untersuchungen im Projekt im Juni 2009 waren die Ortung und Quantifizierung von Schalenbildungen und möglichen neuen Versalzungen.

Durch den Standort der Figur war eine vollständige Erfassung der Oberflächenstruktur nicht möglich. Für den Laserscanner wurde ein Bereich festgelegt, der ohne eine Standortänderung digitalisiert werden konnte. In diesem Bereich befindet sich auch ein Großteil der restaurierten Flächen. Die Fläche wurde in fünf Teilbereiche aufgetrennt, die nacheinander digitalisiert wurden. Es wurden insgesamt 242 Mio. Messpunkte aufgenommen. Die Zeit für die Digitalisierung betrug insgesamt 6 h.

Anschließend wurden die Punktdaten von Störungen und Redundanzen bereinigt und vernetzt. Das entstandene Dreiecknetz besteht aus 14 Mio. Dreiecken in einer Auflösung von 0,5 mm. Es wurde die vordere Seite der Figur mit einer Dimension von 1700 mm x 600 mm digitalisiert. Abb. 3 (a) zeigt den Kopfbereich von Madonna und Kind im 3D-Modell.

In der vorliegenden Fallstudie waren Ablösungen geringer Schichtdicken im Submillimeter- bis Millimeterbereich zu analysieren. Demzufolge musste die thermische Anregung bei der aktiven Thermografie schnell erfolgen und wurde mit zwei Blitzlampen realisiert (Gesamtenergie 6 kJ). Die Anregungsdauer (Abbrennzeit der Blitzlampe) betrug ca. 25 ms. Für eine möglichst hohe Ortsauflösung mit gleichmäßiger homogener thermischer Anregung wurden Bildausschnitte mit einer Größe von 37,5 cm x 28,5 cm gewählt. Während der Messungen betrug die Lufttemperatur konstant 18 °C, die Luftfeuchte 63 % und die Temperatur der Objektoberfläche 17 °C.

Abb. 3 (b) zeigt die Fusion des 3D-Modell mit einem Thermogramm während der Blitzlichtanregung. Hier muss berücksichtig werden, dass sich die vom Objekt emittierte Strahlung noch mit der vom Blitzlicht ausgehenden und am Objekt reflektierten Strahlung überlagert, so dass die im Thermogramm dargestellten scheinbaren Temperaturen deutlich höher sind als die tatsächlichen Temperaturen auf der Oberfläche. In den Thermogrammen während der Anregung lassen sich daher sehr gut Inhomogenitäten auf der Oberfläche aufgrund unterschiedlicher Reflexionsfaktoren für das Blitzlicht im Spektralbereich der IR-Kamera darstellen. Unterschiede in der äußeren Farbfassung können im Thermogramm als dunkle Bereiche detektiert werden. Diese sind im Foto (Abb. 3 (c)) nicht eindeutig erkennbar.



a) b) c)

Abbildung 3. Ausgewählter Messbereich der Madonna mit Kind; a) 3D-Modell; b) Datenfusion mit Thermogramm während der Blitzlichtanregung; c) Texturierung mit fotografischen Aufnahmen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden verschiedene Verfahrensmodifikationen erprobt, die zukünftig für die Bestandserfassung, die Prüfung, die Qualitätssicherung und das Monitoring von Baudenkmalen, Bestandsbauten und Neubauten genutzt werden können. Dies erhöht die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Bauten, kann zu Schadensprognosen und Lebensdauerabschätzungen beitragen und lässt die Bewertung von Umwelteinflüssen zu. Größere Instandsetzungsmaßnahmen können langfristig vermieden werden, was Kosten spart und zum Erhalt der „originalen“ Bausubstanz beiträgt. Durch die Verfahrenskombination werden die Messergebnisse objektivierbar. Die 3D-Darstellung erlaubt das bessere Erkennen von Schadenszusammenhängen. Im System ist prinzipiell auch die Maßnahmedokumentation umsetzbar.

Der Abschlussbericht zum Vorhaben ist demnächst öffentlich zugänglich [10]. Weiterhin ist die Veröffentlichung eines Merkblattes geplant. Im Merkblatt werden die maximalen geometrischen und thermischen Auflösungsvermögen der Messverfahren sowie die Probleme und Verfahrensgrenzen beschrieben. Die praktische Anwendung der Verfahren für eine effektive Schadensfrüherkennung und zum Monitoring wird dargestellt und Hilfestellung bei der Bewertung der Messergebnisse gegeben. Zur Zielgruppe des Merkblattes gehören neben Denkmalpflegern, Restauratoren, Bauingenieuren, Architekten, Gutachtern auch die Nutzer von Vermessungs- und Thermografiesystemen mit Anwendungen in der Bauaufnahme. Häufig sind in Prüf- und Gutachterbüros und Prüfinstituten 3D-Laserscanner oder andere Lasermesssysteme zur Bauaufnahme, für die Photogrammetrie geeignete Analog- und Digitalkameras sowie IR-Kameras im Rahmen der Energieberatung und Optimierung der Wärmedämmung vorhanden. Mit Hilfe des Merkblattes und entsprechender Ergänzungen können diese zu einem Gesamtsystem kombiniert werden, so dass die Geräte effizienter genutzt werden.

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 Frau Dipl.-Ing. Babett Schriewer, Herrn Asmus Schriewer sowie den Herren Dr. Matthias Hemmleb und Dipl.-Ing. Ralf Lindemann. Weiterhin danken wir Frau Dipl.-Rest. Corinna Grimm für Informationen, Aufgabenstellungen und Diskussionen zu den Untersuchungen an der Madonna im Halberstädter Dom sowie Herr Groll für seine Hilfestellungen bei der Durchführung der Messungen im Magdeburger Dom.

Referenzen

[1] Schrepfer, Th., Gscheidle, H.: Schäden beim Bauen im Bestand. Schadenfreies Bauen, Band 41. 2007, 287 Seiten, Fraunhofer IRB Verlag
[2] Verstrynge, E., Schueremans, L. und Gemert, D. van: Quantitative acquisition of the damage evolution in historic masonry, in WTA-Almanach 2008. Bauinstandsetzen und Bauphysik, München: WTA-Publikationen, 2008
[3] Cheng, X. J. und Jin, W.: Study on Reverse Engineering of Historical Architecture based on 3D Laser Scanner, Journal of Physics: Conference Series 48, pp. 843-849, 2006
[4] Maierhofer, Ch. und Röllig, M.: Active thermography for the characterisation of surfaces and interfaces of historic masonry structures, Proc. of 7th Int. Symp. on Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE), Nantes, 2009
[5] Mecke, R., Berndt, D., Schoor, W. und Trostmann, E.: Generation of texturised 3D models with high resolution using optical 3D metrology, in A. Grün, H. Kahmen, editors, Optical Measurement Techniques VII, Volume II; Applications in GIS, mapping, manufacturing, quality control, robotics, navigation, mobile mapping, medical imaging, animation, VR generation; ISBN: 3-9501492-2-8, pp. 3- 12, 2005
[6] Maldague, X.P.: Theory and Practice of Infrared Technology for NDT, 1. edn, Wiley & S., 2001
[7] Luhmann, Th.: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Wichmann-Verlag, Deutschland, 2003
[8] Mecke, R., Berndt, D., Schoor, W. und Trostmann, E.: Generation of Texturised 3D Models with High Resolution Using Optical 3D Metrology, Conference: Optical 3D Measurement Techniques, 2003
[9] Dehio, G.: Der Bischofsgang des Magdeburger Domes, in Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler. Sachsen-Anhalt I, Deutscher Kunstverlag, 2002
[10] http://www.forschungsinitiative.de (Link *ZukunftBau*)