

# Kombination der aktiven Thermografie mit laserbasierten Verfahren zur Erfassung von 3D-Geometrien in der Denkmalpflege

Christiane MAIERHOFER, Rainer KRANKENHAGEN, Mathias RÖLLIG,  
 BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin;  
 Rüdiger MECKE, Michael SCHILLER,  
 IFF Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburg;  
 Uwe KALISCH, Jeannine MEINHARDT, Christiane HENNEN,  
 IDK Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und  
 Sachsen-Anhalt e. V., Halle

**Kurzfassung.** Die Kombination von Ergebnisbildern der aktiven Thermografie mit 3D-Geometriedaten laserbasierter Verfahren, wie z. B. dem Lichtschnittverfahren, liefert umfassende quantitative Informationen über die Zuordnung von Merkmalen im Thermogramm zur geometrischen Struktur des Messobjektes und lässt sich auch wiederholt im Rahmen des Monitoring von Bauwerksoberflächen einsetzen. In diesem Beitrag wird die Datenfusion an einer Figur im Halberstädter Dom demonstriert.

## 1 Einführung

Schäden an Bauwerksoberflächen und Skulpturen wie Risse, Ablösungen, Feuchte, Bewuchs (Moose, Flechten, Pilze usw.) und Krustenbildung werden gegenwärtig hauptsächlich durch konventionelle Verfahren wie z. B. Sichtprüfung und manuelle Vermessung erfasst. Dies wird häufig durch punktuell gesetzte Rissmarken ergänzt, die Informationen über die zeitliche Veränderung von Rissen liefern. Diese Verfahren zur Schadenserfassung sind zeitaufwändig, zum Teil sehr subjektiv und liefern bestenfalls nur eine qualitative und unvollständige 2D-Darstellung, die zudem nur Aussagen zu einem bestimmten Zeitpunkt zulassen. Zur Sicherung des kulturellen Erbes werden dringend moderne und effiziente Verfahren und Strategien für eine vorbeugende Instandhaltung benötigt, die mit geringeren Kosten häufigere Inspektionen ermöglichen [1]. Auch die Zunahme und Alterung des Gebäudebestands verschärft die Situation zunehmend.

Da eine detaillierte 3D-Darstellung und wiederholte Beobachtung, insbesondere von Rissen und Ablösungen, sowohl für die sicherheitsrelevante Einschätzung der Standsicherheit eines Gebäudes als auch für die Erhaltung wertvoller Originalsubstanz eine sehr große Rolle spielen, wurden in den letzten Jahren laserbasierte Messverfahren weiterentwickelt und eingesetzt. Diese ermöglichen eine schnelle und automatisierte Erfassung der Oberflächengeometrie und können zudem innerhalb vorgegebener Zeitintervalle wiederholt eingesetzt werden [2, 3].

Für die Ortung oberflächennaher, jedoch nicht direkt sichtbarer oder durch eine Oberflächenbeschichtung (Putz, Stuck, Farbschicht) verborgener Defekte hat sich die aktive Thermografie bewährt [4]. Modifikationen der Oberfläche wie Durchfeuchtung,

Bewuchs und Salzablagerung verändern die optischen und thermischen Eigenschaften einer Oberfläche und sind daher ebenfalls mit thermografischen Methoden nachweisbar [5].

Die Kombination der geometrischen mit den thermografischen Daten ermöglicht einen tieferen Einblick in die an der Oberfläche von Baudenkmalern 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 Submillimeterbereich thermografisch nachzuweisen, falls die zugrunde liegenden Prozesse das thermische Verhalten der Oberfläche beeinflussen sollten. Das dürfte z. B. bei Schalenbildung oder bei Quell- und Schwindvorgängen (z. B. infolge wechselnder Durchfeuchtung) der Fall sein. Da die thermografische Messung vom technischen Aufwand her leichter zu realisieren ist, ließe sich ein Langzeit-Monitoring von Baudenkmalern einfacher und günstiger durchführen. Dies ermöglicht u. a. die sicherheitsrelevante Einschätzung von Bauwerksschäden. In diesem Beitrag wird die Verfahrenskombination mit aktiver Thermografie und einer 3D-Digitalisierung nach dem Lichtschnittverfahren an einer Figur aus dem Halberstädter Dom vorgestellt.

## 2 Fallstudie: Madonna mit Kind im Halberstädter Dom



**Abbildung 1:** Madonna mit Kind in der Marienkapelle im Halberstädter Dom

Die Marienkapelle hat jedoch ein massives Feuchteproblem, welches den Sanierungserfolg in Frage stellt. Ziel der Untersuchungen im Projekt waren daher die Ortung und Quantifizierung von Schalenbildungen und möglichen Versalzungen.

Die Anforderungen und Randbedingungen an die Messverfahren wurden von den Denkmalpflegern vorgegeben: Mit der aktiven Thermografie sollte die Figur schonend erwärmt werden und eine Temperaturerhöhung um 5 K nicht überschritten werden. Die geometrischen Daten sollten eine Auflösung von mindestens 2 mm aufweisen. Die Geometrie sollte über die gesamte Figur erfasst und Bereiche für die Bewertung ausgewählt werden.

### 3 Aktive Thermografie

#### 3.1 Verfahrensprinzip

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 [7]. 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. Für die Durchführung der Messungen müssen die geeigneten Erwärmungseinheiten und Messparameter an die Aufgabenstellung angepasst werden. Dazu stehen Infrarotstrahler, Halogen- und Blitzlichtlampen und Heizlüfter zur Verfügung.

Neue Softwaretools zur Signal- und Bildauswertung verbessern den Kontrast der Fehlstellen in der bildgebenden Darstellung der Messergebnisse. Dabei hat sich die Auswertung nach der Puls-Phasen-Thermografie, d. h. die Auswertung der transienten Abkühlungsvorgänge im Frequenzbereich, als sehr hilfreich zur Reduzierung des Störeinflusses von Oberflächeninhomogenitäten und ungleichmäßiger Erwärmung erwiesen [8].

#### 3.2 Experimentelle Durchführung

In der vorliegenden Fallstudie waren Ablösungen geringer Schichtdicken im Submillimeter- bis Millimeterbereich zu analysieren. Demzufolge musste die thermische Anregung schnell erfolgen und wurde mit zwei Blitzlampen realisiert (Gesamtenergie 6 kJ). Die Anregungsdauer (Abbrennzeit der Blitzlampe) betrug ca. 25 ms. Die Abkühlung der Oberfläche wurde zeitlich aufgelöst mit einer Mikrobolometer-IR-Kamera der Fa. InfraTec (Variocam High Resolution) mit einer Bildwiederholrate von 50 Hz, einem Detektorarray mit 640 x 480 Pixeln und einem empfindlichen Spektralbereich von 8 bis 14  $\mu\text{m}$  aufgenommen. Für eine möglichst hohe Ortsauflösung mit gleichmäßiger homogener thermischer Anregung wurden Bildausschnitte mit einer Größe von 37,5 cm x 28,5 cm gewählt.

#### 3.3 Ergebnisse

In Abbildung 2 und 3 sind Foto (links), ein Thermogramm direkt während der Blitzlichtanregung (Mitte) sowie eines nach kurzer Abkühlung (wenige Sekunden nach Anregung) des Kopfes der Madonna sowie der Hand mit Fuß des Kindes dargestellt.

In den Thermogrammen während der Blitzlichtanregung (Mitte) muss berücksichtigt 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. Die Kontraste in diesen Thermogrammen können sowohl am Kopf als auch am Arm und Fuß des Kindes eindeutig den verschiedenen Zuständen der Farbfassung zugeordnet werden.

Wenige Sekunden nach der Anregung entsprechen die in den Thermogrammen (rechts) angezeigten Temperaturwerte im Wesentlichen denen auf der Oberfläche. Große Bereiche sind bereits abgekühlt und haben fast die Ausgangstemperatur erreicht. Einzelne kleinere noch warme Bereiche deuten entweder auf Hohlstellen, Ablösungen oder nachträglich verfestigte oder ausgebesserte Bereiche mit geringerer thermischer Diffusivität

als das Umgebungsmaterial hin. So können am Kopf kleinere Stellen erhöhter Temperatur z. B. im Stirnbereich lokalisiert werden. In Abbildung 3 treten erhöhte Temperaturen großflächig am Arm und lokal zwischen den Zehen des Kindes auf. Die Temperaturerhöhung im Armbereich der Madonna gibt eine Ergänzung wieder, die in der Vergangenheit vorgenommen wurde und die im guten Verband zur Umgebung steht. Zwischen den Zehen können entweder Ablösungen oder andere thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien die Verringerung der Abkühlungsgeschwindigkeit verursachen.



**Abbildung 2:** Kopf der Madonna. Links: Foto. Mitte: Thermogramm während der Blitzlichtanregung (Messbereich: 17,6 bis 42,05°C von schwarz bis weiß mit deutlichem Reflexionsanteil). Rechts: Thermogramm, aufgenommen 3,5 s nach der Anregung (Messbereich: 16,9 bis 20,04°C von schwarz bis weiß). Größe der Thermogramme: 37,5 cm x 28,5 cm.



**Abbildung 3:** Hand der Madonna mit Fuß des Kindes. Links: Foto. Mitte: Thermogramm während der Blitzlichtanregung (Messbereich 17,63 bis 36,83°C von schwarz bis weiß). Rechts: Thermogramm, aufgenommen 2,5 s nach der Anregung (Messbereich 16,64 bis 18,73°C von schwarz bis weiß).

#### 4 3D-Laserscanning mit dem Lichtschnittverfahren



**Abbildung 4:** Lichtschnittsensor mit Gelenkmessarm im Messeinsatz

Für die Erfassung der Oberflächengeometrie von Bauwerksoberflächen und Skulpturen ist ein Messsystem mit zwei wesentlichen Eigenschaften erforderlich. Das System sollte für einen mobilen Einsatz an den zu untersuchenden Objekten geeignet sein. Die Datenaufnahme muss berührungslos erfolgen. Für diesen Einsatzzweck wurde das Lichtschnittverfahren ausgewählt. Auf dem Markt stehen verschiedene Geräte zur Verfügung, die auf diesem Verfahren basieren und für den mobilen Einsatz geeignet sind.

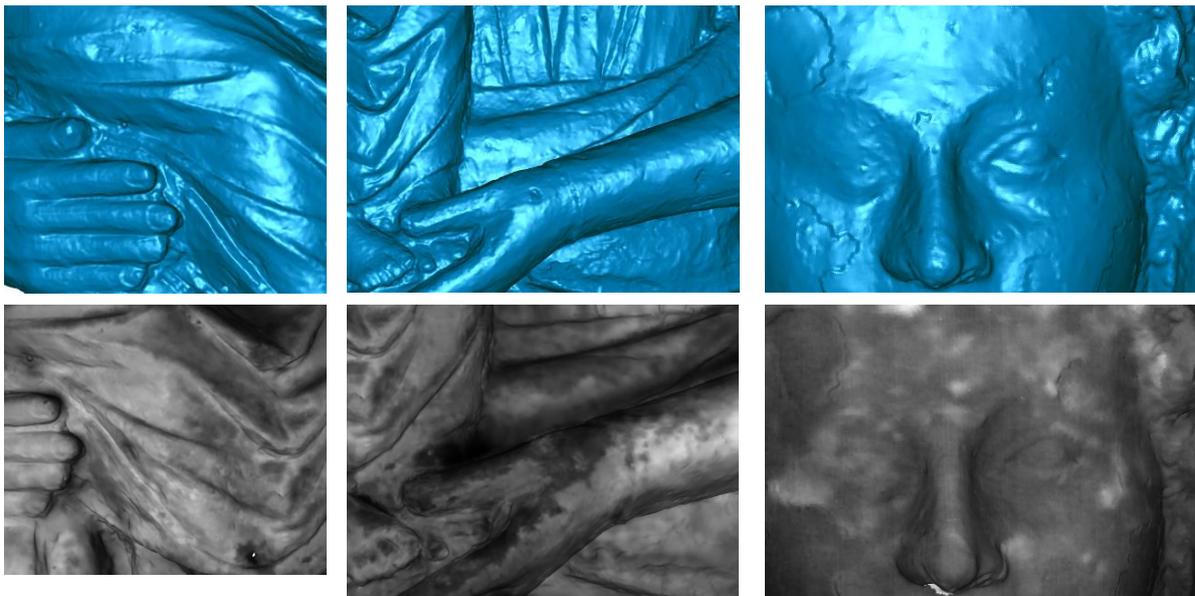
##### *Messtechnische Erfassung*

Für die berührungslose Erfassung der Geometrie des betrachteten Messobjektes wurde ein am Fraunhofer IFF entwickelter Lichtschnittsensor eingesetzt, der an einem Messarm

befestigt ist (Abbildung 4). Der Sensor besteht aus einer Kamera sowie einem Linienlaser und arbeitet nach dem Lichtschnittverfahren. Durch den Einsatz integrierter hardwarebasierter Bildverarbeitung können pro Sekunde bis zu 100 Konturlinien mit jeweils 1536 3D-Messpunkten auf dem Messobjekt erfasst werden. Daraus entsteht ein räumlich dichtes, detailreiches Abbild der Objektoberfläche in Form einer dreidimensionalen Punktwolke. Das System ist in der Lage, größere komplexe Freiformflächen mit einer hohen Anzahl von Messpunkten zu erfassen. Es ist für den flexiblen Einsatz konzipiert und kann direkt an den zu untersuchenden Messobjekten eingesetzt werden. Die Genauigkeit der 3D-Messpunkte beträgt  $\pm 0.1\text{mm}$ .

#### *Datenverarbeitung / Ergebnisse*

Aus der messtechnisch erfassten Punktwolke wird zunächst ein geometrisches Oberflächenmodell erstellt, in dem die einzelnen 3D-Messpunkte über Dreiecke miteinander verbunden sind. In diesem Schritt werden sowohl enthaltene Messfehler als auch redundante Daten gefiltert. Das Dreiecksmodell ist die Basis für die visuelle Darstellung und Weiterverarbeitung der Messdaten. Das Dreiecksnetz besteht hier aus 14 Mio. Dreiecken mit einer Auflösung von 0,5 mm. Es wurde hierbei nur die vordere Seite der Figur mit einer Dimension von 1700 x 600 mm digitalisiert. Die Anzahl der Dreiecke kann bei Bedarf und für den entsprechenden Anwendungsfall reduziert werden. Dabei reduziert sich jedoch in der Regel die Auflösung bezogen auf die Oberflächendetails.



**Abbildung 5:** Oben: Ausgewählte Bereiche des Dreiecksnetzes mit Schadensmerkmalen. Unten: Ähnliche Ausschnitte mit projizierten Thermogrammen.

In Abbildung 5 sind einige ausgesuchte Bereiche mit den zu untersuchenden Schadensmerkmalen dargestellt. In dem entstandenen Dreiecksnetz können die interessanten Bereiche in der gewünschten Auflösung begutachtet und vermessen werden.

### **5 Kombination der Messdaten**

Durch die Kombination der Ergebnisse der beiden vorgestellten Messverfahren können wertvolle zusätzliche Informationen gewonnen werden. Die in einem Thermogramm fehlende Tiefeninformation erschwert die räumliche Zuordnung der Daten auf dem Objekt. Dies wird besonders deutlich bei der Aufnahme einzelner Details einer Figur und beim

Vergleich von Aufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten und dann auch oft aus verschiedenen Perspektiven von einem Objekt aufgenommen wurden. Mit Hilfe von mehreren Referenzpunkten ist zwar unter bestimmten Voraussetzungen eine Überlagerung möglich, wie Abbildung 5 unten zeigt. Die Bestimmung von räumlichen Ausdehnungen einzelner Merkmale und Aussagen zu deren zeitlicher Entwicklung sind hier nur sehr begrenzt möglich.

Die Überführung der 2D-Thermogramme in den 3D-Raum löst diese Probleme teilweise. Hierzu wird in einem ersten Schritt die Aufnahmeposition der IR Kamera zum Messobjekt bestimmt und anschließend für jeden 3D-Messpunkt geprüft, mit welchem Sichtstrahl er ggf. auf dem Sensorchip der Kamera abgebildet wurde. Jedem erfassten 3D-Punkt kann damit eine Temperaturinformation zugeordnet werden.

### *Verfahren zur Datenfusion*

Die Abbildung des 3D-Objektraumes in die 2D-Bildebene der Kamera wird durch ein Kameramodell beschrieben. Als grundlegendes mathematisches Modell für diese Transformation wird im Allgemeinen die Zentralprojektion herangezogen. Hierbei treten zwei Arten von Parametern auf. Die äußeren Kameraparameter beschreiben die räumliche Lage und Orientierung der Kamera. Die inneren Kameraparameter dienen der Modellierung des Abbildungsvorgangs. Im Idealfall der Zentralprojektion würde dazu die Brennweite des Objektivs ausreichen. In der Realität kommen jedoch unerwünschte Veränderungen im Messbild, zum Beispiel in Form von optischen Verzeichnungen des abbildenden Objektivs, hinzu. Deshalb beschreiben weitere innere Parameter u. a. diese Abweichungen in einer Reihe von funktionalen Modellen.

Zur Bestimmung der unbekanntenen Modellparameter bietet die Photogrammetrie leistungsfähige Verfahren an, die auf der Auswertung von Bildaufnahmen räumlich bekannter Passpunkte basieren. In einem ersten Schritt werden hiermit die inneren Parameter der Kamera berechnet. Solange die Einstellungen für Focus und Brennweite nicht verändert werden, erleichtert diese Vorgehensweise die im zweiten Schritt notwendige Bestimmung der äußeren Parameter relativ zum Messobjekt erheblich.

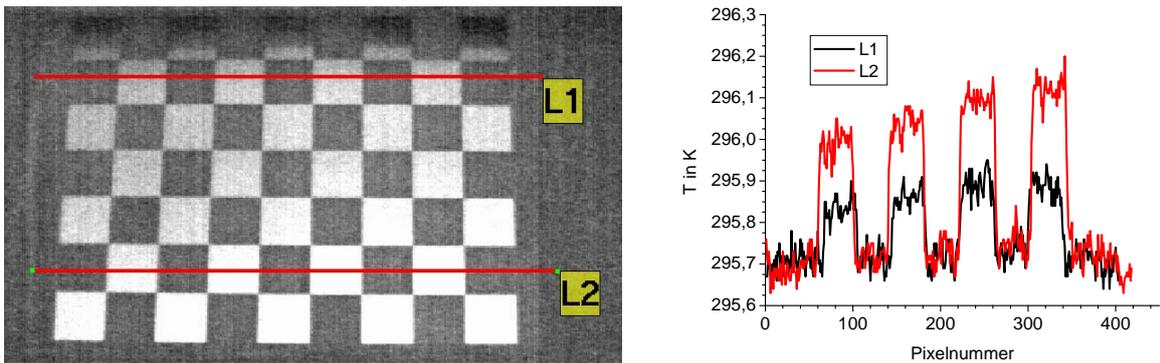
Für jede Aufnahmeposition müssen im zweiten Schritt theoretisch mindestens vier, in der Praxis zehn oder mehr 3D-Koordinaten auf oder nahe dem Messobjekt und deren zugehörigen Bildkoordinaten bekannt sein. Die Ermittlung erfolgt in diesem Fall manuell im Bild und im Dreiecksnetz. Aus diesen Daten und 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.

Sind im aufgenommenen Thermogramm nicht genügend Merkmale für die Zuordnung zu den 3D-Koordinaten vorhanden, so ist eine zusätzliche Kamera zur Bestimmung der Aufnahmeposition erforderlich. Diese arbeitet typischerweise im Bereich des sichtbaren Lichts, ist ebenfalls kalibriert und besitzt eine bekannte, mechanisch stabile Verbindung zur IR Kamera. Mit der Zusatzkamera wird zu jeder Aufnahmeposition ein weiteres Bild aufgenommen und damit deren Position und Orientierung errechnet. Indirekt lässt sich daraus auf die äußeren Kameraparameter der IR Kamera schließen.

Bei der Konstruktion eines gemeinsamen Aufnahmerahmens für IR Kamera und Fotokamera sind folgende Anforderungen zu erfüllen, die sich teilweise widersprechen:

- Formstabiler Aufnahmerahmen
- Reproduzierbare Positionierung beider Kameras
- Einfache Montage und Demontage der Kameras
- Bedienbarkeit beider Kameras

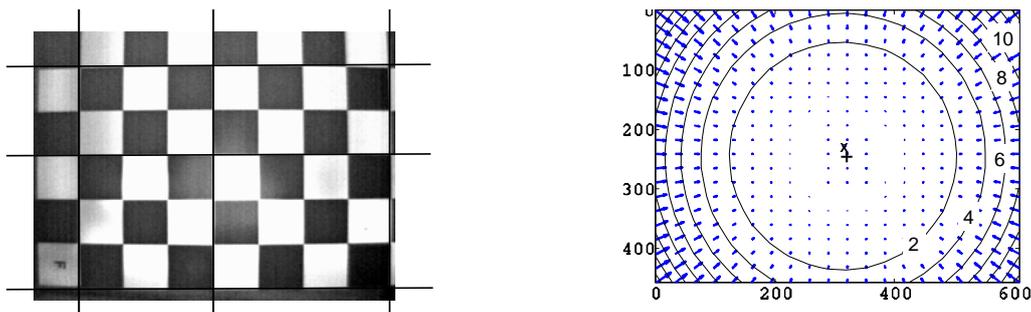
Zur Ermittlung der inneren Kameraparameter der IR Kamera wurde das Softwaretool „Camera calibration toolbox for Matlab“ von Jean-Yves Bouguet genutzt, welches im Internet frei verfügbar ist ([http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)). Dabei 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 im DIN A4 Format als geeignet erwiesen. Abbildung 6 links zeigt ein Thermogramm, welches unter Laborbedingungen aufgenommen worden ist. Der Kontrast resultiert aus der unterschiedlich starken Reflexion des diffusen Deckenlichts. Abbildung 6 rechts zeigt die Temperaturverteilung entlang der beiden Linien im Thermogramm.



**Abbildung 6:** Links: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes in 90 cm Abstand (50 Mittelungen). Rechts: Temperaturprofil entlang der links eingetragenen Linien.

Der scheinbare thermische Kontrast liegt im Bereich von 0,1 – 0,3 K und ist ausreichend für die Identifizierung der Kreuzungspunkte des Schachbrettmusters.

Die in Abbildung 7 dargestellte Verzeichnung der Kameraoptik zeigt, dass der größte zu korrigierende Abbildungsfehler eine radialsymmetrische Abweichung von der theoretischen Idealform der Linse ist, die eine so genannte tonnenförmige Verzerrung des Originalbildes zur Folge hat.



**Abbildung 7:** Links: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes in 50 cm Abstand mit dem Normalobjektiv. Verzeichnungen sind vor allem in den Ecken deutlich erkennbar. Rechts: 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.

Die so ermittelten Kameraparameter zur Beschreibung der Abbildungseigenschaften gestatten eine nachträgliche Korrektur der Abbildung, welche den mittleren Fehler auf unter 0,2 Pixelbreiten reduziert. Bei Wiederholungsmessungen nach Objektivwechsel zeigte sich, dass der mechanische Sitz der Wechselobjektive bei der verwendeten IR Kamera nicht zwangsläufig reproduzierbar ist. Dies führte zu markanten Änderungen der dann ermittelten Kalibrationsparameter. Der Anwender muss daher die Objektive mit

besonderer Sorgfalt fixieren, um die Gültigkeit der vorher ermittelten Kalibrationsparameter für die Vor-Ort-Messung am Baudenkmal zu gewährleisten.

### *Ergebnisse*

Mit Hilfe der vorgestellten Vorgehensweise und der entwickelten Software können zukünftig die Thermogramme beliebig komplizierter Geometrien dreidimensional dargestellt und betrachtet werden. Somit können äußere geometrische Effekte von Materialinhomogenitäten und inneren Störstellen unterschieden werden. Zeitliche Veränderungen können dann mit der geforderten hohen örtlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit beobachtet und relevante Schäden rechtzeitig erkannt werden.

### **Danksagung**

Das Projekt mit dem Titel „Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und –grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren“ wird 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 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.

### **Referenzen**

- [1] Maierhofer, Ch., Köpp, Ch., Binda, L., Zanzi, L., Santiago, J. R., Knupfer, B., Johansson, B., Modena, C., da Porto, F., Marchisio, M., Gravina, F., Falci, M., Galvez Ruiz, J. C., Tomazevic, M., Bosiljkov, V., Hennen, Ch.: Project Report EUR 21696 EN - Onsiteformasonry project - On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, European Commission, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, Brussels , 141 pages, 2006
- [2] Cheng, X. J., Jin, W.: Study on Reverse Engineering of Historical Architecture based on 3D Laser Scanner. Journal of Physics: Conference Series 48 (2006), pp. 843-849
- [3] Mecke, R., Berndt, D., Schoor, W., Trostmann, E.: Generation of texturized 3-D models with high resolution using optical 3-D 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
- [4] Maierhofer, Ch., and Röllig, M.: Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures. Proc. of 7th International Symp. on Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE), 2009, Nantes
- [5] Hemmleb, M., Weritz, F., Schiemenz, A. Grote, A. and Maierhofer, Ch.: Multi-spectral data acquisition and processing techniques for damage detection on building surfaces. In: Proc. ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, 2006, Dresden
- [6] Grimm, C.: Dom zu Halberstadt, Marienkapelle, Madonna mit Kind, Restaurierung. 2004
- [7] Maldague, Xavier P.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, 1. edn (Wiley & Sons, 2001)
- [8] Weritz, F., Arndt, R., Röllig, M., Maierhofer, Ch., and Wiggenhauser, H.: Investigation of concrete structures with pulse phase thermography, Materials and Structures, 38 (2005), 731-737