

F 2980

Christiane Maierhofer, Mathias Röllig
Henrik Steinfurth, Sven Augustin, Rüdiger Mecke
Michael Schiller, Alexa Kernchen, Uwe Kalisch
Jeannine Meinhardt, Christiane Hennen

**Erfassung und Bewertung
von sicherheitsrelevanten
Ablösungsprozessen bei Putzen und
Fassadenelementen mit zerstörungs-
freien Mess- und Prüfverfahren
ERBE**

F 2980

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9678-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Abschlussbericht

ERBE

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren

Projektleiterin:

Christiane Maierhofer¹

Bearbeiter(innen):

Mathias Röllig¹, Henrik Steinfurth¹, Sven Augustin¹
Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Alexa Kernchen²
Uwe Kalisch³, Jeannine Meinhardt³, Christiane Hennen⁴,
Ernst Thomas Groll⁵, Torsten Arnold⁶

¹Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), FB 8.7, Berlin

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

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

⁴Christiane Hennen, Bauforschung - Denkmalpflege, Wittenberg

⁵Ernst Thomas Groll, Restaurator, Magdeburg

⁶Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle

Das Forschungsprojekt wird im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: **II 3-F20-12-1-108 / SWD -10.08.18.7-13.42**)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren		Forschungsinitiative Zukunft Bau SF- SWD – 10.08.18.7- 13.42BAM Vh 8463	
Dokument:	Abschlussbericht		
Autor:	Ch. Maierhofer, BAM 8.7	Status:	final
Datum:	11.11.2015	Version:	4

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung zum Abschlussbericht.....	5
2 Ziele und Inhalt.....	6
3 Überblick, Stand der Technik.....	9
4 Ergebnisse der Geräteweiterentwicklungen	11
4.1 Photogrammetrische 3D-Erfassung	11
4.1.1 Optimierung der Sensorhalterung	11
4.1.2 Software für die Stereoberechnung.....	11
4.1.3 Genauigkeitsuntersuchungen.....	12
4.2 Das Ristrackingverfahren.....	13
4.2.1 Genauigkeitsuntersuchungen des Messwerkzeuges (Reproduzierbarkeit).....	14
4.2.2 Verbesserungen des Messstabs	14
4.2.3 Verbesserung des Systemaufbaus.....	15
4.2.4 Weiterentwicklung der Softwaretools	16
4.3 Die aktive Thermografie	18
4.3.1 Herstellung der Probekörper	18
4.3.2 Messungen an den Probekörpern	19
4.3.3 Darstellung der Messergebnisse und Diskussion	19
4.3.5 Geometrische Kalibrierung der Kamerasysteme	24
5 Datenfusion und -visualisierung.....	24
5.1 Fusion von 3D-Punktwolken mit 2D-Thermogrammen.....	24
5.2 Überlagerung von 3D-Rissdaten auf 2D-Bildern.....	25
5.3 Fusion von 2D-Bildern.....	26
6 Merkblätter zu den Verfahren.....	26
7 Beschreibungen und Ergebnisse der Fallstudien	26
7.1 Putzritzungen am Magdeburger Dom.....	26
7.1.1 Beschreibung der Fallstudie	26
7.1.2 Ergebnisse der Messungen mit Stereosensor und Laserscanner.....	31
7.1.3 Ergebnisse der Messungen mit aktiver Thermografie.....	34
7.1.4 Datenfusion.....	38
7.2 Wandbild in Cobbelsdorf.....	40
7.2.1 Beschreibung der Fallstudie	40
7.2.2 Aktive Thermografie	41
7.2.3 Risskartierung	46
7.2.4 Datenfusion.....	49
7.3 Fliesenbild in Halle-Neustadt	50

7.3.1 Beschreibung der Fallstudie	50
7.3.2 Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung	53
7.4 PV-Module als Fassadenelemente beim EffizienzhausPlus in Berlin.....	56
7.4.1 Beschreibung der Fallstudie	56
7.4.2 Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung	56
7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudien.....	58
8 Zusammenfassung: Innovationen und deren Umsetzung in die Praxis	60
8.1 Wesentliche Innovationen im Projekt.....	60
8.2 Umsetzung der Projektergebnisse in die Praxis.....	61
8.3 Information der Fachwelt über die Forschungsergebnisse	62
9 Ausblick.....	63
Dank.....	64

Anhang 1:

Merkblatt 1 - Trackingbasiertes Verfahren zur 3D-Erfassung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen

Anhang 2:

Merkblatt 2 - Stereophotogrammetrie - ein Verfahren zur 3D Kartierung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen

Anhang 3:

Merkblatt 3 – Geometrische Kalibrierung einer Infrarot-Kamera durch Ermittlung der inneren Kameraparameter

Anhang 4:

Merkblatt 4 - Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung zur Ortung und Charakterisierung von Fassadenablösungen

Anhang 5:

Merkblatt 5 - Fusion von 2D-Bilddaten zur Unterstützung der Bewertung von oberflächennahen Schäden an Bauwerken und Bauteilen

1 Einleitung zum Abschlussbericht

Das vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderte Forschungsprojekt *Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren - ERBE* beinhaltet die Entwicklung von Verfahren und Strategien zur Lokalisierung, Erfassung und Bewertung von Putzablösungen und Ablösungen von Fassadenelementen wie z.B. von Stuck, Fliesen, Spaltklinkern und Natursteinplatten im Bereich der Bauwerks- und Denkmalpflege. Der Fokus wurde dabei insbesondere auf solche Schadensmerkmale und -verläufe gelegt, von denen eine Gefährdung (z.B. durch vollständige Ablösung) ausgehen kann.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes beziehen sich zunächst schwerpunktmäßig auf Anwendungen in der Denkmalpflege, da hier ein besonderer Bedarf für eine umfassende Zustandserfassung besteht. Die Verfahren können aber auch problemlos auf alle Bestands- und Neubauten im Hochbau übertragen werden, wie z.B. bei Putzablösungen an Betondecken oder Abplatzungen von Klinkerriemchen auf Beton.

Das Projekt wurde an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin, Fachbereich 8.7 Thermografische Verfahren, in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) und dem Institut für Diagnostik und Konservierung in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V. (IDK) bearbeitet. Über Unteraufträge wurden ein Restaurator (Thomas Groll, Magdeburg) und eine Kunsthistorikerin (Christiane Hennen, Wittenberg) in das Projekt eingebunden. Das Projektteam wurde von einer Arbeitsgruppe beraten, die sich aus den folgenden Personen zusammensetzte: Ralf Lindemann von der Stiftung Dome und Schlösser in Sachsen-Anhalt, Matthias Hemmleb von m2c Microscopy Measurement and Calibration GbR, Armin Weiss von ART Advanced Realtime Tracking und Torsten Arnold vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt.

Projektstart war der 21.11.2013, Projektende der 21.11.2015, die Laufzeit des Projektes betrug daher zwei Jahre. Es fanden insgesamt sechs reguläre Projekttreffen, ein Besichtigungstermin zur Auswahl der Fallstudien und mehrere Messeinsätze zur Bearbeitung der Fallstudien statt.

Im Projekt wurden die Strukturmerkmale, die die Fassadenablösungen begleiten und die von den Messsystemen erfasst werden sollen, klassifiziert. Dies sind im Wesentlichen Risse, Ausbeulungen, Ablösungen und Hohlstellen unterhalb der Fassadenelemente. Anschließend wurden die Verfahren und deren Weiterentwicklungen spezifiziert, die sich für die Erfassung und teilweise Quantifizierung dieser Strukturmerkmale eignen: die Stereophotogrammetrie, die taktile 3D-Risskartierung und die aktive Thermografie. Für die Weiterentwicklung der aktiven Thermografie wurden Probekörper mit verschiedenen Fassadenelementen geplant und hergestellt. Messungen wurden mit künstlicher Erwärmung und mit Erwärmung durch die Sonne verglichen. Die Systeme zur Photogrammetrie und zur 3D-Erfassung der Risse wurden bzgl. der zu erfassenden Messflächen und der Messgenauigkeiten weiterentwickelt. Zu diesen Verfahren und deren Einsatz zur Untersuchung von Fassaden wurden Merkblätter erstellt. Parallel und im Anschluss an die Verfahrensweiterentwicklungen wurden vier Fallstudien für die Erprobung der Messtechniken an unterschiedlichen Fassadengestaltungen ausgewählt und mit verschiedenen, an diese jeweilige Aufgabenstellung angepassten Verfahrenskombinationen untersucht:

- Putzritzen am Magdeburger Dom
- Wandmalerei auf Putz in Cobbelesdorf
- Fliesenbilder in Halle Neustadt
- PV-Module an senkrechter Fassade des EffizienzhausPlus in der Fasanenstraße in Berlin.

2 Ziele und Inhalt

Der Erhalt historischer Putze und Fassadenelemente ist sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus materialtechnischen und nicht zuletzt aus denkmalpflegerischen Gründen sinnvoll. Häufig sind Putze über ihre das Mauerwerk schützende Funktion hinaus auch als Träger von Malereien und weiteren Bildinformationen ausgestaltet. Bei Decken und höheren Wänden muss zusätzlich der Sicherheitsaspekt berücksichtigt werden, d.h. das Herabfallen von Bauteilen muss vermieden werden. Nur die sorgfältige und systematische Erfassung von Schäden wie Rissen, Materialverlust, Ablösungen usw. sowie das Beobachten von Veränderungen ermöglichen einen rechtzeitigen Einsatz von Instandsetzungsmaßnahmen und somit eine effiziente Sicherung der Bausubstanz.

Ziel des Projektes war daher die Entwicklung von Verfahren und Strategien zur Lokalisierung, Erfassung und Bewertung von Putzablösungen und Ablösungen von Fassadenelementen, die zum Monitoring auch wiederholend eingesetzt werden können. Diese wiederholenden Messungen lassen eine Abschätzung hinsichtlich der Weiterentwicklung der Schädigung und damit eine Bewertung zu, u.a. auch der damit verbundenen sicherheitsrelevanten Faktoren. Dazu wurden Messverfahren ausgewählt, die basierend auf optischen und thermografischen Methoden sowohl eine größtenteils berührungslose und vollständig zerstörungsfreie Vermessung der Oberflächengeometrie als auch der Fehlstellen unterhalb der Oberfläche ermöglichen. Abgelöste Fassadenbereiche zeigen dabei sowohl geometrische als auch thermische Auffälligkeiten. Konkret waren dies die folgenden Verfahren und Weiterentwicklungen:

i) **Stereophotogrammetrie-Verfahren** zur berührungslosen Vermessung der Oberflächenstruktur hinsichtlich klaffender Risse, Materialverlust und Abwitterungen, Krustenbildung, Ablösung vom Untergrund durch Aufwölbungen mit Aufweitung der Putzstruktur und von beabsichtigten Oberflächentopologien, wie z.B. Putzritzen. Die Arbeiten beinhalteten die Entwicklung und Anpassung entsprechender Messmethoden sowie deren vor-Ort Einsatz, Untersuchungen zur Messgenauigkeit bei unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften und Zusammenfügungen mehrerer Messbereiche. Dazu wurden die Messdaten u.a. mit denen eines Laserscanners verglichen. Weiterhin wurden Softwarebausteine zur optimalen Datenaufnahme und Datenverarbeitung entwickelt.

ii) **Trackingbasierte Verfahren zur taktilen 3D-Erfassung** von Oberflächenmerkmalen, wie z.B. von Rissen jeglicher Art, Ablösungen vom Untergrund durch aufbrechende Aufwölbungen mit Rissbildung sowie flächenhaften Schädigungen ohne relevante geometrische Veränderungen, wie Feuchteschäden, die mit berührungslosen Messverfahren nicht erfasst werden können und über eine manuelle antastende Messung zu digitalisieren sind. Die Arbeiten beinhalteten

- die Entwicklung neuer Messwerkzeuge
- die Weiterentwicklung des Verfahrens zur Erfassung flächenhafter Merkmale und für die referenzpunkt-basierte 3D-Vermessung sowie Genauigkeitsuntersuchungen
- die Entwicklung von Softwaremodulen gemäß den Anforderungen der Anwender (Interaktion, Visualisierung) sowie Schnittstellen für den Datenimport und -export

iii) **Aktive Thermografie** zur Ortung von Ablösungen und Aufwölbungen bis zu Überdeckungen von mehreren Zentimetern und von Feuchte- und Salzbelastungen im oberflächennahen Bereich. Die Arbeiten beinhalteten

- Vergleich der Erwärmung durch Infrarotstrahlung mit der durch die Sonne, an den Probekörpern mit bekannten Fehlstellen, Untersuchungen zum Einfluss von Fehlstellenart, -tiefe und -geometrie.
- Vorgehensweise und Möglichkeiten der Nutzung der Sonneneinstrahlung als Wärmequelle, Vergleich unterschiedlicher Wetterbedingungen
- Aufnahme von Thermografiesequenzen im high-resolution Modus der Infrarot (IR)-Kamera
- Entwicklung von Auswertungsprogrammen zur Reduzierung des Einflusses zeitlich und räumlich inhomogener Erwärmungseffekte auf das Messergebnis

- Durchführung analytischer Berechnungen zum Verständnis der Einflüsse unterschiedlicher thermischer Materialparameter und Erwärmungszeiten

Tabelle 2.1 zeigt den Zeitplan der Arbeitspakete des Projekts, der im Wesentlichen eingehalten wurde. Im Folgenden werden die Inhalte der Arbeitspakete kurz zusammengefasst und die gegenüber der Planung erforderlichen inhaltlichen Abweichungen erläutert.

Tabelle 2.1. Zeitplan des Projektes

	PM		1. Jahr												2. Jahr											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP1	2,5	Standards für Datenerfassung																								
AP2	2	Probekörper																								
AP3	1	Auswahl u. Doku. der Fallstudien																								
AP4	2	Weiterentwicklung der Stereophotogrammetrie																								
AP5	2	Weiterentwicklung Ristrackingverfahren																								
AP6	6	Weiterentwicklung der aktiven Thermografie																								
AP7	5	Vor-Ort Einsatz der Messsysteme an den Fallstudien																								
AP8	4	Datenvisualisierung																								
AP9	3,5	Gerätekonfiguration und Merkblatt																								
AP10	3	Dokumentation und Verbreitung																								

Zu AP1: Erarbeitung eines gemeinsamen Standards für die Datenerfassung

Die zu berücksichtigenden Daten für die drei Messverfahren (aktive Thermografie, Ristracking, Stereophotogrammetrie) sind 2D-Bilder und 3D-Koordinaten. Die 3D-Koordinaten liegen als Punktwolke, vernetztes Oberflächenmodell bzw. Polygon vor. Für die Datenfusion wurden gemeinsame (bei den verschiedenen Messungen zu erfassende) kreisförmige Referenzpunkte verwendet. Aufgrund der eingeschränkten Ortsauflösung bei der Thermografie haben sich Dreiecke als nicht geeignet erwiesen. Die Thermografiedaten wurden als *.png und ASCII Daten zur Verfügung gestellt. AP1 wurde wie geplant fertig gestellt.

Zu AP2: Entwurf und Fertigung der Probekörper

Nach ersten Skizzen der BAM erfolgte die Herstellung von sieben Probekörpern bestehend aus Be-tonplatten (50 x 50 cm²) mit Putz, der verschiedene Hohlstellen enthält. Zusätzlich wurden vier Platten mit Riemchenklinkern bzw. mit Fliesen belegt. Die Arbeiten wurden von Herrn Arnold in Kooperation mit dem IDK im Labor des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie in Halle ausgeführt. Die Fehlstellen unterschiedlicher Größe wurden mit Papier, Cyclododecan (flüchtiges Bindemittel) oder mit Sand simuliert. Die Herstellung wurde ausführlich dokumentiert. AP2 wurde wie geplant abgeschlossen.

Zu AP3: Auswahl und Dokumentation der Fallstudien

Zur Auswahl der Fallstudien wurde am 27.3.2014 eine vom IDK organisierte Objektbegehung durchgeführt, an der sich alle Projektpartner beteiligt haben. Es wurden dann die folgenden Fallstudien ausgewählt:

- Putzritzen im Magdeburger Dom (Photogrammetrie, aktive Thermografie)
- Wandmalerei (Silikattechnik) von 1971 in Cobbelsdorf zur technisierten und industrialisierten Landwirtschaft von E. Enge, dünner, zementhaltiger Putz auf Ziegeldraht auf Mauerwerk (da-

runter Pfeilerkonstruktion mit einer Ausmauerung aus Hohlblocksteine) mit Schädigungen (Risse und Hohllagen). Hier erfolgte bereits 2006 eine dokumentierte Restaurierung (Thermografie mit Sonnenerwärmung, aktive Thermografie, Risstracking)

- Zwei Fliesenwandbilder mit glasurbemalten Fliesen von Josè Renau (Entwurf) bzw. Lothar Scholz (Ausführung) *Grenzenloser Fortschrittsglauben* und *Einheit der Arbeiterklasse*, 1974 in Halle-Neustadt, Am Stadion 5. Pro Wandbild sind ca. 11.000 Fliesen im Dünnbettklebverfahren auf Betonfertigteile aufgebracht worden. Das nördliche Fliesenbild wurde noch nicht saniert und ist mit einem textilen Netz gesichert, über zusammenhängend hohl liegende Bereiche ist zusätzlich zur Sicherung Gaze geklebt (nur Thermografie mit Sonnenerwärmung).
- PV-Module an senkrechter Fassade am EffizienzhausPlus in der Fasanenstraße in Berlin (nur Thermografie mit Sonnenerwärmung)

Nach Ergänzung der schon zum Teil vorliegenden Dokumentationen wurde AP3 wie geplant fertig gestellt.

Zu AP4: Stereophotogrammetrie zur Erfassung von Oberflächengeometrien

Für die Aufnahmen an den Putzritzen wurde der schon verwendete Stereosensor mit höherer Auflösung verwendet. Für die Aufnahmen wurde eine neue Sensorhalterung konstruiert, die eine schnellere und genauere Positionierung ermöglicht. Mit dem Sensor wurden an entsprechenden Messstellen der Putzritzen des Magdeburger Doms Daten aufgenommen. Es sollten dadurch die schon vorhandenen Messbereiche ergänzt werden. Zusätzlich wurden auch Messdaten an schon vermessenen Bereichen erzeugt. Dadurch konnten die neuen Daten mit den schon vorhandenen in ein Koordinatensystem überführt und verglichen werden. Es erfolgte dann eine Erfassung der gesamten Putzritzen mit einem Laserscanner. Diese Daten wurden wiederum mit denen der Photogrammetrie verglichen. Weiterhin wurden die Algorithmen zur automatisierten Auswertung der aufgenommenen Bilddaten für die Sensoren für verschiedene Auflösungen verbessert. AP4 wurde um die Messungen mit dem Laserscanner im Vergleich zur Planung ergänzt.

Zu AP5: Trackingbasierte Verfahren zur taktilen 3D-Erfassung von Oberflächenmerkmalen

Bei der Weiterentwicklung des Verfahrens für die Risskartierungen wurden zunächst Verbesserungen und Vereinfachungen an dem Tool zur Erfassung der Risse vorgenommen. Zur Nutzung des Verfahrens für die Fallstudie der Wandmalerei auf Putz in Cobbeisdorf wurde ein passender Aufbau für das Infrarottrackingsystem erarbeitet und im Labor erprobt. Fehlende Befestigungsmöglichkeiten der Infrarotkameras in der Messumgebung und der geplante Erfassungsbereich bis zu einer Höhe von 2 bis 3 Metern erforderten einen neuen Gestellaufbau mit flexiblem Neigungswinkel zur Messfläche. In Genauigkeitsuntersuchungen zum Risstrackingverfahren zeigten sich vor allem Probleme in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Daher wurden Untersuchungen zum Messwerkzeug und möglichen neuen Designs (Material, Aufbau) vorgenommen.

Zu AP6: Weiterentwicklung der aktiven Thermografie zur Ortung von Hohlstellen

Im Rahmen der Weiterentwicklung der aktiven Thermografie wurden zunächst verschiedene Auswertungsmethoden der Messungen an den Probekörpern verglichen (Thermogramme, Phasenbilder). Weiterhin wurde die Erwärmung mit dem Infrarotstrahler mit der durch die Sonne verglichen. Im Einzelnen wurde jeweils der Temperaturverlauf über den verschiedenen Fehlstellen bewertet. Diese Daten wurden auch mit den Fallstudien verglichen. Weiterhin erfolgten die geometrischen Kalibrierungen für die IR-Kameras. Das Arbeitspaket konnte wie geplant beendet werden.

Zu AP7: Einsatz der Messsysteme an den Fallstudien und Ableiten einer Untersuchungsstrategie

An den vier ausgewählten Fallstudien wurden Messungen mit z.T. unterschiedlichen Verfahrenskombinationen durchgeführt. Jeweils wurden die Grenzen und Auflösungen der einzelnen Verfahren bewertet. Eine genaue Beschreibung der Fallstudien enthält dieser Bericht. Das Arbeitspaket konnte wie geplant abgeschlossen werden.

Zu AP8: Datenfusion und -visualisierung

Es wurden Verfahren entwickelt sowie vorhandene Tools eingesetzt, die eine Fusion der Daten aus den unterschiedlichen Domänen (2D-Fotos und Thermogramme, 3D-Rissdaten und hochauf-

gelöste 3D-Punktwolken) ermöglichen. Die Fusion erfolgte jeweils mit den in den Fallstudien erfassten relevanten Daten. Die Ergebnisse werden anhand der Fallstudien detailliert beschrieben (s. Abschnitt 7). Der Fokus lag bei der Umsetzung der folgenden Datenfusionen:

- Fusion von 3D-Punktwolken mit 2D-Thermogrammen
- Fusion von 3D-Rissdaten mit 2D-Bildern (Fotos und Thermogramme)
- Fusion von 2D-Bildern aus unterschiedlichen Perspektiven (z.B. Thermogramme und Fotos)

Bei der Fusion der Punktwolken mit den Thermogrammen werden die 3D-Punktclouds mit den Ergebnissen von mehreren Einzelaufnahmen der aktiven Thermografie eingefärbt. Die Einzelergebnisse können damit in ihrer exakten Lage im Raum zueinander dargestellt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur performanten Visualisierung der verschiedenen Daten (z.B. sehr hochauflösende 3D-Punktwolken, hohe Anzahl von zum Teil hochauflösenden 2D-Bildern) sowie entsprechender Interaktionsmethoden.

Zu AP9: Erstellung von Gerätekonfigurationen für spätere Anwendung der Verfahren durch zukünftige Nutzer, Merkblatt

Im Projekt wurden die folgenden fünf Merkblätter erstellt:

1. Merkblatt 1 - Trackingbasiertes Verfahren zur 3D-Erfassung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen
2. Merkblatt 2 - Stereophotogrammetrie - ein Verfahren zur 3D-Kartierung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen
3. Merkblatt 3 - Geometrische Kalibrierung einer Infrarot-Kamera durch Ermittlung der inneren Kameraparameter
4. Merkblatt 4 - Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung zur Ortung und Charakterisierung von Fassadenablösungen
5. Merkblatt 5 - Fusion von 2D-Bilddaten zur Unterstützung der Bewertung von oberflächennahen Schäden an Bauwerken und Bauteilen

Zu AP10: Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse

Der Zwischenbericht und der Abschlussbericht wurden wie geplant erstellt. Außerdem wurden Teile der Projektergebnisse in Vorträgen und Zeitschriftenartikeln veröffentlicht. Eine Zusammenstellung dieser Veröffentlichungen befindet sich am Ende dieses Abschlussberichtes.

3 Überblick, Stand der Technik

Im Bereich des Bauens im Bestand ist die Erhaltung von Putzen bislang eher die auf wertvolle Baudenkmale beschränkte Ausnahme. Entsprechend sind zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen zur Erfassung großer Putzflächen im Sinne eines Monitorings, anders als im Bereich des Natursteins, eher unterrepräsentiert. Es gibt einschlägige Publikationen zur Sanierungspraxis von Putzen, in denen auch diagnostische Aspekte Berücksichtigung finden. Diese konzentrieren sich allerdings zumeist auf punktförmige Schadenserfassungen hinsichtlich der Salz- und Feuchtebelastung oder von kleinräumigen Ablösungen, die vornehmlich durch Perkussionstest detektiert werden [1, 2, 3]. Auch für die Erfassung von Rissen und deren Dynamik stehen bereits etablierte Messmethoden zur Verfügung (z.B. Rissmonitore, faseroptische Systeme, 3D-Laserscan, Laserextensometer oder auch potentiometrische Systeme) [4].

Putzablösungen sind durch Ausbeulungen, Abplatzungen und/oder Risse als geometrische Veränderungen an der Oberfläche erkennbar und gehen im Untergrund häufig mit einer Materialzermürbung einher. Die Ablösungen von keramischen Fassadenelementen hingegen bleiben nach außen häufig nicht erkennbar und sind daher mit besonderen Risiken hinsichtlich der Verkehrssicherheit verbunden.

Zerstörungsfreie Untersuchungen von Putzflächen wurden beispielsweise zur Evaluierung von Kalkmörteloberflächen an zahlreichen Denkmalobjekten in Sachsen-Anhalt durchgeführt, wobei es vor allem um eine optisch-haptische Einschätzung von Mörteloberflächen, aber auch um die Prüfung der Haftung zum Untergrund ging. Diese wurde im Wesentlichen durch Perkussionstests ermittelt. In einem Förderprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt erfolgte zerstörungsfrei die Detektion von Hohlstellen im Bereich großformatiger romanischer Wandmalereien. In diesem Zusammenhang wurden auch zahlreiche Labortests zur Hohlstellendetektion mittels aktiver IR-Thermografie durchgeführt [5].

Geometrische Veränderungen können durch Verformungsmessungen basierend auf dem Vergleich von zwei oder mehr 3D-Datensätzen eines Objektes, welche zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden, oder auf dem Vergleich von 3D-Messpunkten mit definierten Referenztopologien nachgewiesen werden. Die Datensätze sind das Resultat von 3D-Oberflächenmessungen. Die Erfassung der 3D-Daten kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Im Folgenden werden Verfahren erläutert, welche sich für die Erfassung von Schadensbildern an Putzen und Fassadenelementen eignen. Es wird dabei zwischen antastenden und berührungslosen Verfahren unterschieden.

Bei den antastenden Verfahren wird ein Werkzeug über die Objektoberfläche geführt. Die Position (Pose) des Werkzeugs wird dabei kontinuierlich mit Hilfe eines Trackingsystems verfolgt und dient zur Ermittlung des Verlaufs der Objektoberfläche. Bei mechanischen Trackingsystemen wird das zu verfolgende Objekt über einen mehrgliedrigen, mechanischen Arm mit einem festen Referenzpunkt verbunden. Die einzelnen Glieder des Armes sind über Gelenke miteinander gekoppelt. In den Gelenken sind Sensoren verbaut, die eine Lagebestimmung ermöglichen. Der Vorteil mechanischer Systeme ist die geringe Störanfälligkeit, die geringe Latenz und die hohe Messgenauigkeit. Der wesentliche Nachteil dieser Systeme ist der eingeschränkte Arbeitsbereich. Bei optischen Systemen werden Kamerabilder ausgewertet, um die Pose eines Objektes zu ermitteln. Marker auf dem Messwerkzeug erleichtern die Ortung des Objektes im Kamerabild. Je nach verwendeter Kamertechnik sind Genauigkeiten in der Positionsbestimmung im Submillimeterbereich erreichbar. Lasertrackingsysteme sind eine spezielle Form der optischen Trackingsysteme, die eine sehr hohe Genauigkeit bei großem Messvolumen erreichen. Diese Systeme werden bereits im industriellen Bereich zur Qualitätssicherung von Bauteilen eingesetzt [6, 7].

Bei den berührungslosen Verfahren werden Systeme für die 3D-Vermessung verwendet, die keinen direkten Kontakt zur Objektoberfläche benötigen. Für Verformungsmessungen an Putzen sind die Lichtschnittverfahren bzw. flächenbasierte Alternativen, Verfahren der Photogrammetrie und Laserscanverfahren zu nennen. Bei der Photogrammetrie bzw. Stereophotogrammetrie werden mehrere Bilder eines Objektes aus unterschiedlichen Ansichten verwendet, um dessen dreidimensionale Oberfläche zu rekonstruieren. Hierfür wird ein Verbund spezieller Messkameras verwendet, deren Lagebeziehung zueinander bekannt ist. Anhand von Korrespondenzen in den Bildern der einzelnen Kameras sowie der bekannten Lagebeziehung kann die 3D-Oberfläche rekonstruiert werden. Je nach verwendeter Sensorik und Abstand zum Objekt sind Genauigkeiten im Submillimeterbereich erreichbar. Die Photogrammetrie hat ihren Ursprung in der Geodäsie, d.h. in der fotografischen Vermessung der Erdoberfläche und findet heute in vielen Bereichen zur Zustandsdokumentation von Objekten im Baubereich Verwendung. Die Stereophotogrammetrie ist ein Teilbereich der Photogrammetrie, bei der genau zwei Kameras verwendet werden.

Verdeckte Hohlstellen und Ablösungen können, auch großflächig, mit aktiven Thermografieverfahren detektiert und charakterisiert werden. Das Verfahren beruht auf einer aktiven Erwärmung der zu untersuchenden Struktur mit einer geeigneten Wärmequelle (auch mit Sonnenstrahlung) und der Beobachtung der Erwärmung und/oder der Abkühlung der Oberfläche mit einer IR-Kamera. Durch die, von instationären Wärmetransportprozessen, induzierte Temperaturverteilung auf der Bauteiloberfläche können Inhomogenitäten und Feuchte mit von der Umgebung abweichenden thermischen Materialeigenschaften bis zu einer Überdeckung (Tiefe) von 10 cm detektiert werden [8, 9]. Häufig können sich bei der Thermografie jedoch verschiedene Effekte (aktuelle Temperatur der Oberfläche mit zusätzlichen Reflexionen, Verdunstung, Konvektion an der Oberfläche) und Materialeigenschaften (Emissivität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) überlagern [10, 11]. Daher sind Messstrategien erforderlich, die diese Effekte voneinander unterschei-

den können, z.B. durch Kombination von passiver und aktiver Thermografie und/oder durch den Einsatz unterschiedlicher Wärmequellen und die Variation der zeitlichen Anregung.

Als homogene und effiziente Wärmequelle zur großflächigen Untersuchung von Fassaden ist prinzipiell auch die Sonne sehr gut geeignet [12]. Da durch Sonnenaufgang bzw. -untergang eher langsame Änderungen der Bestrahlungsintensitäten zu erwarten sind, eignet sich diese Art der Anregung besonders zur Ortung tieferliegender Strukturen [13]. Neben der direkten Sonneneinstrahlung führt auch der Tagesgang der Lufttemperatur zu instationären Wärmeleitungsvorgängen in Außenwänden und ermöglicht daher ebenfalls eine Ortung von Inhomogenitäten. Dieser Effekt wird auch die anderen Messungen immer überlagern. Werden von Außenfassaden nur einzelne Thermogramme und keine Sequenzen erfasst, dann muss immer berücksichtigt werden, dass die momentane Verteilung der Oberflächentemperatur die Wirkung der vorher stattgefundenen Änderungen der Lufttemperatur und Sonneneinstrahlungen ist. Daher können zu unterschiedlichen Zeiten immer verschiedene Strukturen optimal erkannt werden.

Eine Kombination der Verfahren der antastenden und berührungslosen Verformungsmessungen mit der aktiven Thermografie erscheint daher zur Erfassung und Bewertung von Schäden und Ablösungen an Putzen und Fassadenelementen optimal geeignet.

4 Ergebnisse der Geräteweiterentwicklungen

4.1 Photogrammetrische 3D-Erfassung

Der schon im Vorläuferprojekt verwendete Stereosensor [14] sollte in diesem Projekt für weitere Aufnahmen genutzt werden. Der Sensor erzeugt bei einer Einzelaufnahme 3D-Daten mit einem Messfeld von $170 \times 170 \text{ mm}^2$. Um eine größere Fläche digitalisieren zu können, sind Einzelaufnahmen in einem Raster mit einer Überlappung von 30 bis 40 % erforderlich. Die aufgenommenen Messdaten werden manuell mit einem geeigneten Registrierungsverfahren in ein Koordinatensystem überführt. Schwerpunkt in diesem Projekt war die Optimierung der Datenaufnahme, die Weiterentwicklung der einzelnen Berechnungsschritte und die Genauigkeitsuntersuchungen. Alternative Messsysteme können für die Digitalisierung der ausgewählten Messobjekte auch eingesetzt werden. Wir haben uns für den schon verwendeten Sensor entschieden, da wir den Sensoraufbau an die Anforderungen gezielt anpassen konnten. Außerdem standen wir aus dem Vorläuferprojekt schon Daten zur Verfügung, die durch erneute Aufnahmen ergänzt werden konnten.

4.1.1 Optimierung der Sensorhalterung

Die bisherigen Aufnahmen wurden mit einem Stativ durchgeführt (s. Bild 4.1). Durch den unebenen Untergrund war eine ständige Kontrolle und Korrektur von Höhe und Arbeitsabstand des Sensors zum Messobjekt erforderlich. Weiterhin variierte der Winkel des Sensors zum Messobjekt, wodurch der Überlappungsbereich variierte. Deshalb wurde für die weiteren Messungen eine Sensorhalterung mit einem festen Schlitten verwendet (s. Bild 4.2). Dadurch entstanden in der gleichen Zeit fast doppelt so viele Einzelaufnahmen. Die verwendete Schiene mit Markierungen für Messpositionen sorgte für einen konstanten Überlappungsbereich.

4.1.2 Software für die Stereoberechnung

Die Auswertung der Einzelbildaufnahmen war bisher in einer Software mit grafischer Benutzeroberfläche integriert. Um eine Auswertung durchzuführen, werden hier die Einzelbilder über ein Menü geladen. Dann können die Parameter für die Auswertung gesetzt und die Berechnung gestartet werden. Nach der Berechnung wird das Ergebnis gespeichert. Die Berechnungsdauer hängt von den verwendeten Parametern ab und beträgt 10 bis 40 Minuten. Diese Funktionalität wurde so herausgelöst, dass automatisiert mehrere Berechnungsabläufe mit verschiedenen Parametern durchgeführt werden können. Dadurch konnten für die schon existierenden 193 Aufnahmen Berechnungsergebnisse mit verschiedenen Parametersätzen gegenübergestellt werden. Diese Funktion war Voraussetzung für die Untersuchung der Einflüsse der einzelnen Berechnungsparameter auf das Ergebnis der Einzelmessungen.



Bild 4.1. Bisherige Aufnahmen mit Stativ.



Bild 4.2. Neue Sensorhalterung mit festem Schlitten.

4.1.3 Genauigkeitsuntersuchungen

Die Untersuchungen beziehen sich auf die erreichte geometrische Genauigkeit nach der Registrierung der Einzelaufnahmen. Diese ist abhängig von der Genauigkeit der einzelnen Registrierungen zueinander und kann sich fortpflanzen. Geplant war die Aufnahme von Referenzkoordinaten mit mindestens zwei alternativen Messsystemen.

Der erste Test sollte mit einem Stereosensor mit einem größeren Messbereich erfolgen (s. Bild 4.3). Hierzu stand bereits ein Sensor mit drei Kameras konfiguriert, zusammengebaut und eingemessen zur Verfügung. Ziel war es, im ersten Schritt herauszufinden, ob mit diesem Sensor und dem entsprechenden Messobjekt Messergebnisse mit der erwarteten Qualität erzeugt werden können. Hierzu wurden Testaufnahmen am Messobjekt durchgeführt und ausgewertet. Die Auflösung des Sensors ist bezogen auf die Fläche deutlich geringer. Die aufgenommenen Daten enthielten dadurch leider nicht die benötigten Merkmale zur Registrierung beider Datensätze. Der Vergleich beider Messergebnisse war deshalb nicht möglich.



Bild 4.3. Stereosensor mit größerem Messbereich.



Bild 4.4. Laserscanner Z+F IMAGER 5010

Ein zweiter Test war mit einem Referenzmesssystem geplant, welches den gesamten Messbereich ohne Registrierung mit einer geringeren Auflösung digitalisieren kann. Hier wurde ein Laserscanner von Zoller + Fröhlich eingesetzt (s. Bild 4.4). Die aufgenommenen Messdaten wurden manuell mit einem Registrierungsverfahren in ein Koordinatensystem überführt. Das Ergebnis ist in Bild 4.5 zu sehen. Wenn man die Konturen der Putzritzungen auf einer X-Y-Ebene betrachtet, sind die Abweichungen der Konturen zueinander verhältnismäßig gering. In der Tiefe (Z-Richtung) ist eine Abweichung von 20 mm erkennbar. Im Bild 4.6 ist diese systematische Abweichung deutlich erkennbar. Dieser Fehler ist durch die Registrierung der Messdaten zu erklären, da durch das nach-

trägliche Zusammensetzen der einzelnen Messfelder insbesondere Abweichungen in Z-Richtung auftreten, die sich im Verlauf zudem aufsummieren. Die aufgenommenen Referenzdaten können zur Verbesserung des Registrierungsverfahrens verwendet werden.

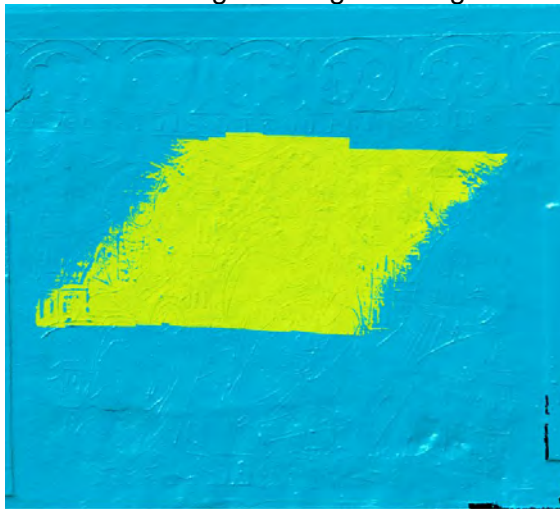


Bild 4.5. Beide Messergebnisse fusioniert.

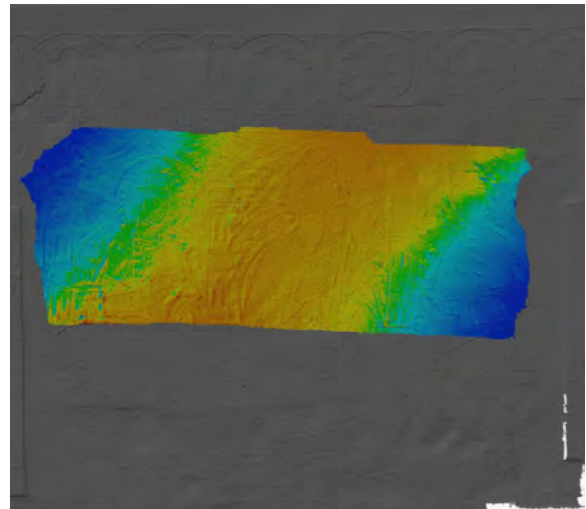
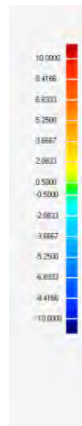


Bild 4.6. Abstand abhängig von der Tiefe eingefärbt.

4.2 Das Risstrackingverfahren

Groll und Böttcher [15] wiesen darauf hin, dass das gängigste Mittel zur Schadensdokumentation immer noch die manuelle 2D-Kartierung ist. Dabei werden Schäden mit Papier und Stift auf einem Foto des Objektes oder mit einer Bildbearbeitungssoftware manuell markiert. Es liegt in der Verantwortung des Restaurators, die relevanten Merkmale des Ist-Zustandes in die Kartierung aufzunehmen. Die Schwierigkeit hierbei liegt unter anderem darin, die dreidimensionale Ausprägung eines Merkmals vom Objekt zu abstrahieren und manuell in die zweidimensionale Ansicht auf das Foto zu übertragen. Der tatsächliche 3D-Verlauf eines Merkmals geht dabei verloren. Eine zuverlässige und objektive Quantifizierung von Merkmalseigenschaften ist auf Basis einer 2D-Kartierung kaum möglich.

Für die Erfassung von Oberflächenschäden, wie Risse oder Ablösungen mit teilweise sehr feiner Ausprägung, liefern optische Verfahren wie die Stereophotogrammetrie meist keine ausreichende Auflösung. Während die Stereophotogrammetrie sich vor allem bei einer eher flächigen Erfassung eignet, würden bei kleinen bzw. selektiven Bereichen zudem unnötig viele Daten erfasst und verarbeitet werden. Es wurde daher ein Verfahren zur manuellen 3D-Erfassung und -Kartierung oberflächennaher Schäden sowie weiterer Merkmale direkt am untersuchten Objekt favorisiert. Im Rahmen des Projektes wurde dieses Verfahren weiterentwickelt und um eine nutzerorientierte Software für die Durchführung der Messungen und zur Auswertung der Daten erweitert. Mit dem 3D-Risstrackingverfahren kann die räumliche Ausprägung von Schadensmerkmalen manuell durch ein Tastwerkzeug erfasst werden. Somit werden sowohl der 3D-Verlauf von z.B. Rissen kartiert, als auch im Idealfall deren Tiefe und Breite. Bei der Aufnahme eines Risses werden für diesen 3D-Punkte mit einstellbarem Punktabstand gespeichert. Diese können für die Auswertung im dreidimensionalen Raum betrachtet oder auf ein 2D-Bild des Messobjekts für eine bessere Lokalisierung projiziert werden (s. Kapitel 5). Die Funktionsweise und Nutzung des 3D-Risstrackingsystems kann im Merkblatt 1 nachgelesen werden (s. Anhang 1). Für die Erfassung der Rissdaten mittels Trackingsystem könnten auch alternative kommerziell verfügbare Messsysteme genutzt werden, sofern diese über Schnittstellen für einen externen Programmzugriff verfügen. Dadurch würden allerdings Anpassungen an der entwickelten Software erforderlich, da die Datenerfassung, Visualisierung und Auswertung in einem Software-Tool zusammengefasst wurden und daher in direkter Abhängigkeit zum Messsystem stehen. Insbesondere die Möglichkeit, während der Aufnahme der 3D-Messpunkte eine Klassifikation (z.B. Zuordnung der Messpunkte zu verschiedenen Merkmals- bzw. Schadensklassen) interaktiv vornehmen zu können, ist softwaremäßig eng mit dem verwendeten Trackingsystem verbunden. Das genutzte Trackingsystem ermöglicht einen freien und flexiblen Aufbau, um sich an die örtlichen Begebenheiten anzupassen. Durch den Einsatz des Messsys-

tems in vorherigen Projekten konnten die Eignung bereits überprüft werden und vorliegende Messdaten weiterhin genutzt werden.

4.2.1 Genauigkeitsuntersuchungen des Messwerkzeuges (Reproduzierbarkeit)

Es wurden Arbeiten durchgeführt, um Auswirkungen von geometrischen Parametern des Messwerkzeugs (Tastspitze/Messstab mit angebrachten retroreflektierenden Markern) auf die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit näher zu spezifizieren. Für die Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Messdaten des Trackingsystems wurde zunächst an einem starren Objekt eine Linie mit einer kontinuierlichen Messdatenerfassung aufgenommen. Die Aufnahme wurde mehrfach wiederholt, wobei die Lage des Tastwerkzeugs im Raum (Orientierung) variiert wurde. In den Messdaten konnte festgestellt werden, dass die Messreihen im Raum leicht versetzt zueinander verlaufen. Der Abstand zwischen zwei Messreihen ist dabei annähernd konstant. Die maximal aufgetretene Abweichung betrug dabei 2 bis 5 mm. Für die Bestimmung des Fehlers, der möglicherweise durch Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung des Tastwerkzeuges entsteht, wurden weiterhin mehrere Aufnahmen durchgeführt, bei denen das Tastwerkzeug an einem festen Punkt um die Spitze rotiert wurde. Dieser Vorgang entspricht dem Verfahren der Kalibrierung des Tastwerkzeugs. Betrachtet man die entstehende Punktwolke, dann ergibt sich eine kreisförmige Anordnung der Messpunkte. Die Punkte haben dabei ebenfalls einen maximalen Abstand von 2 bis 5 mm zueinander. Die Hauptursache für diese Abweichungen besteht darin, dass die drei reflektierenden Marker am Tastwerkzeug nicht exakt linear am Messstab angeordnet sind und somit nicht mehr der getroffenen Annahme für die Positionsbestimmung der Messstab-Spitze entsprechen. In den weiteren Arbeiten wurde sich daher mit alternativen Materialien und Bauformen für den Messstab beschäftigt, um eine bessere Genauigkeit der Messung und eine höhere Stabilität des Stabes zu erreichen.

4.2.2 Verbesserungen des Messstabs

Positionierungsabweichungen der reflektierenden Marker des Messstabs (Annahme: alle Marker liegen auf einer Geraden) führen beim Tracking zu Ungenauigkeiten bezüglich der Positionsbestimmung der Stabspitze. Bei der Durchführung der Messung können je nach Orientierung des Messstabs so abweichende Werte bei demselben Messpunkt entstehen. Es wurden daher verschiedene Konzepte für ein neues Design des Messstabs erarbeitet. Der Stab besteht bisher aus einem 6 mm dicken Metallstab mit Gewinde. Dieser ist auf einer Länge von ca. 30 cm etwas flexibel und biegsam, sodass Abweichungen auf der Stabachse um mehrere Millimeter auftreten können. Es wurden daher zunächst verschiedene Materialien mit einer höheren Steifigkeit betrachtet. Alternativen sind hier CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff) oder Acrylglas. Weiterhin ist die bisherige Spitze des Stabs austauschbar. Kleine abweichende Winkel am Verbindungsstück sind ebenfalls eine Fehlerquelle. Es ist daher empfehlenswert, die Spitze direkt auf dem Stab zu befestigen.

Betrachtet man Originalaufnahmen der Tracking-Kameras, so fällt auf, dass die Marker durch den Stab, auf dem sie geschraubt wurden, keine vollständigen Kugel mehr bilden. Auch hier entstehen je nach Position des Stabes zu den Kameras abweichende Positionen für die Marker und damit Abweichungen in der berechneten Position der Stabspitze. Es wurde untersucht, ob ein aus Acrylglas bestehendes Rohr, in dem die Marker eingeführt werden, zukünftig als ein mögliches Design für den Stab verwendet werden kann. Für die Untersuchungen wurde ein Acrylglas-Rohr (98% Lichtdurchlässigkeit) mit einem 2 cm Durchmesser und 2 mm Wanddicke verwendet (s. Bild 4.7). In diesem wurden entsprechende Kugel-Marker eingeführt. Durch Fixieren dieser Marker mit transparentem Silikon sind keine Bohrungen mehr notwendig und die Kugelform bleibt für das Tracking erhalten.

Untersuchungen an den Aufnahmen des 3D-Trackings zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede im Kamerabild zwischen einem Marker innerhalb bzw. außerhalb des Rohrs gibt. Mögliche Lichtbrechungen bzw. Reflexionen des Infrarotlichts haben keine relevanten Auswirkungen auf das Tracking (s. Bild 4.8). Somit ist das Rohr-Design perspektivisch eine mögliche Alternative zum bisherigen Stab-Design.

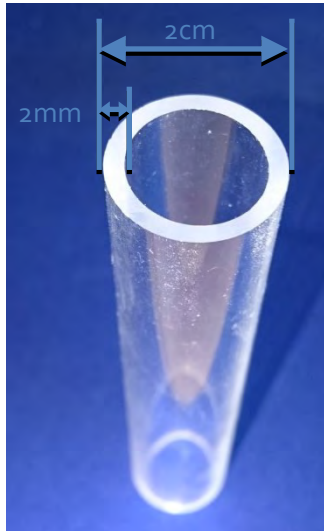


Bild 4.7. Acrylglas-Rohr, in dem die Infrarot-Marker eingelassen werden.

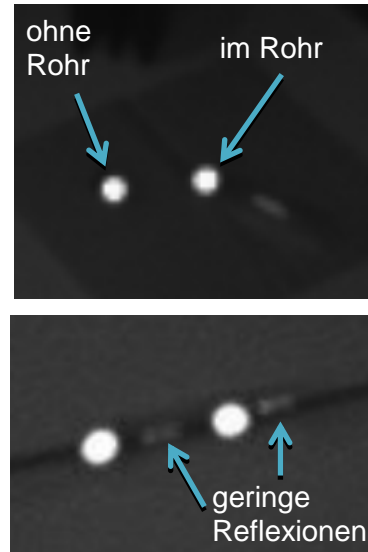


Bild 4.8. Kameraaufnahmen des 3D-Trackingsystems zur Untersuchung von Einflüssen der Lichtbrechung (oben) und Reflexionen (unten).

4.2.3 Verbesserung des Systemaufbaus

Bei den bisherigen Aufbauten des Trackingsystems wurden Messbereiche von 1 bis 2 m² erfasst und zumeist auch umgebende Strukturen (z.B. Gerüst) zum Befestigen der Trackingkameras genutzt. Für flexiblere Einsatzmöglichkeiten wurden alternative Aufbauten und Kameraanordnungen betrachtet. Es wurde ein aus Aluminium-Profilen bestehendes Gestell entworfen, welches freistehend ist und flexible Befestigungsmöglichkeiten für die Trackingkameras vorsieht (s. Bild 4.9). Die Kameras können an dem Gestell mit einem maximalen Abstand von 1,5 m zueinander befestigt werden. Somit kann ein größerer Erfassungsbereich für das Tracking erreicht werden. Für höhere Bereiche größer 2 m Höhe kann das Gestell frei einstellbar geneigt werden.



Bild 4.9. Gestell mit flexiblen Befestigungsmöglichkeiten für die Trackingkameras und einstellbarer Neigung.

Die Anzahl der Kameras, deren Anordnung und Ausrichtung ist abhängig vom gewünschten Erfassungsbereich und der Entfernung zum Messobjekt. Für das Tracking des Messstabs ist es erforderlich, dass mindestens drei Kameras diesen gleichzeitig erfassen. Ein entsprechend großer Überlappungsbereich der Kamerasichtbereiche ist daher erforderlich. Für einen Erfassungsbereich von

2 × 3 m² und eine Entfernung von 1 bis 2 m empfiehlt sich die Aufteilung der Kameras in zwei Hauptbereiche (oben und unten) mit je 3 Kameras, deren Sichtfelder sich sowohl untereinander, als auch in Bezug zu dem jeweils anderem Bereich hinreichend überlappen.

4.2.4 Weiterentwicklung der Softwaretools

Es erfolgten Optimierungen und Weiterentwicklungen der Softwaretools mit dem Ziel, die praktische Nutzung des Verfahrens für den Anwender zu verbessern. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben.

Für eine Überlagerung der 3D-Rissdaten auf einem 2D-Foto mussten bisher die 2D-Koordinaten der Referenzpunkte in einem externen Programm aus dem 2D-Foto bestimmt werden und manuell im Softwaretool eingetragen werden. Es wurde ein weiterer Dialog eingefügt, bei dem das zu überlagernde 2D-Foto angezeigt wird (Bild 4.10). In diesem Dialog kann durch einfaches Klicken die gewünschte Position im Bild (Referenzpunkt) ausgewählt werden. Durch Zoomen und Verschieben kann auch in hochauflösten Bildern eine genaue Navigation und Auswahl stattfinden.



Bild 4.10. Dialog zur Auswahl des 2D-Punktes durch Klicken auf die gewünschte Stelle im Bild (Kreismarkierung).

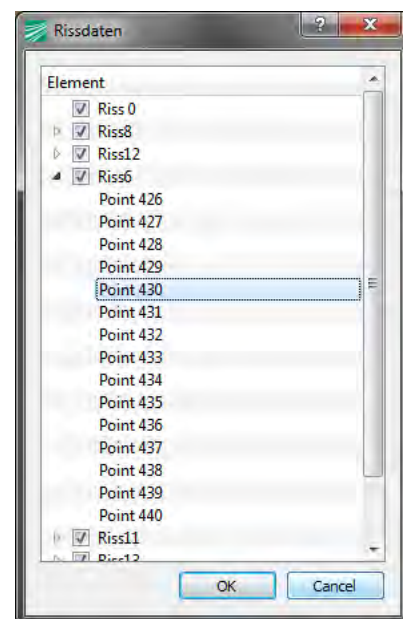


Bild 4.11. Dialog mit der Auflistung der aufgenommenen Rissdaten, aus denen der gewünschte 3D-Punkt für die Korrespondenz ausgewählt werden kann.

Bei der Auswahl der 3D-Referenzpunkte musste bisher in das OptiTrack-Modul gewechselt und der jeweils gewünschte Punkt ausgewählt werden. Dieser konnte anschließend in das Korrespondenz-Modul übertragen werden. Ein ständiges Wechseln zwischen den Fenstern war somit nötig. Es wurde daher die Möglichkeit geschaffen, direkt die Liste der 3D-Punkte anzuzeigen und den gewünschten Punkt auszuwählen (Bild 4.11). Dessen Koordinaten werden dann direkt in den Korrespondenzdialog übernommen.

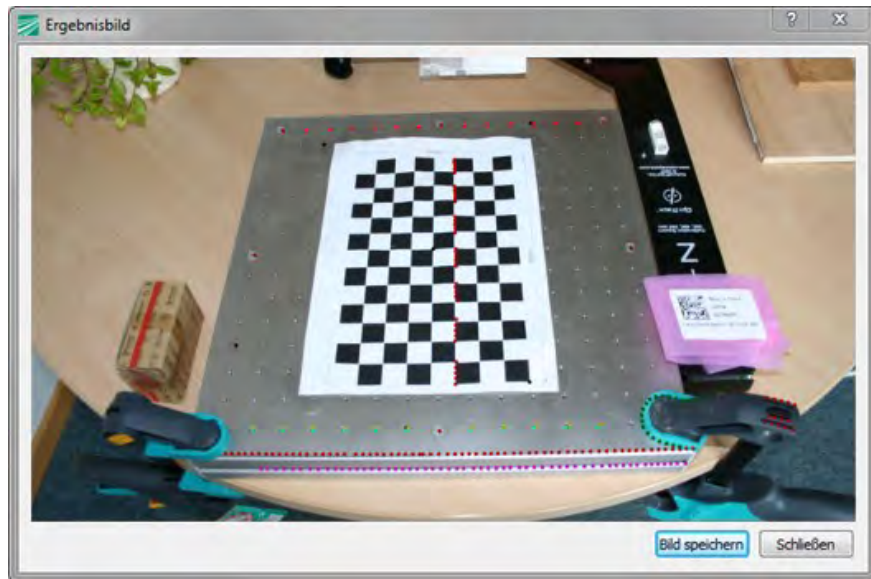


Bild 4.12. Test-Überlagerung der ausgewählten 3D-Messpunkte (rote Linie) auf das 2D-Foto. Die Überlagerung kann in einer Datei gespeichert werden.

Um die Punkt-Korrespondenzen schnell testen bzw. um auch schnell Bilder mit den Überlagerungen erstellen zu können, wurde ein Testmodus eingefügt. Dieser projiziert mit Hilfe der angegebenen Korrespondenzen und einer zugehörigen Kamera-Kalibrierung die aktuell ausgewählten 3D-Punkte in das Kamerabild und zeigt diesen an (Bild 4.12). Das Bild kann anschließend in einer Datei gespeichert werden.

Zusätzlich zu den Verbesserungen bei der Korrespondenzbestimmung wurden Fehler in der Software beseitigt, die teilweise zu Problemen beim Abspeichern der Messdaten in Dateien geführt hatten. Die Software wird nun über ein Installationsprogramm zur Verfügung gestellt. Alle nötigen Mediendateien und Abhängigkeiten werden so komfortabel mitgeliefert.

Veränderungen bezüglich des Nutzerinterfaces oder zu ergänzenden Features der Software werden im Folgenden einzeln beschrieben:

- Jedem Punkt eines Risses kann ein Typ zugewiesen werden. Dieser Typ erlaubt eine Differenzierung/Klassifizierung in der Visualisierung durch Zuordnung von spezifischen Farbwerten. In dieser Weise werden manuelle Kartierungen gestaltet, wie sie z.B. durch Restauratoren erstellt werden. Bisher war es lediglich möglich, einen Typen hinzuzufügen bzw. diesen zu ändern (Umbenennen und Farbwert ändern). Typen können nun über einen Button gelöscht werden. Bevor ein Typ gelöscht werden kann, wird geprüft, ob es aktuelle Riss-Punkte gibt, die diesen Typen verwenden. Ist dies der Fall, wird eine Warnung gegeben und der Typ nicht gelöscht.
- Weithin wurde bei der Aufnahme von Rissdaten diese automatisch in eine temporäre Datei im Programmordner zwischengespeichert. Vor allem bei kontinuierlicher Aufnahme von Rissen (schnelles Aufzeichnen von Messpunkten) traten teilweise Probleme auf. Es wurden Daten schneller erfasst als diese in einer Datei gespeichert werden konnten. Durch eine zusätzliche Checkbox kann diese „Autosave“-Funktion nun deaktiviert werden.
- Vor allem bei Bildschirmen mit einer geringen Höhe konnte die Nutzeroberfläche teilweise nicht vollständig angezeigt werden. Es wurden daher Funktionalitäten und Einstellungen für das Tracking in einen separaten Tab (neben Rissdaten-Tab) ausgelagert.
- Bei Datensätzen mit vielen Rissen wurden diese beim Abspeichern bislang scheinbar zufällig sortiert. Diese zufällige Sortierung wurde nun durch eine alphabetische ersetzt. Diese Sortierung wird nur beim Speichern und Laden einer Datei vorgenommen, nicht aber bei der Erfassung von Rissmessdaten. Die dortige Sortierung entspricht weiterhin der Reihenfolge der Aufnahme.

4.3 Die aktive Thermografie

Das wesentliche Ziel der Weiterentwicklung der aktiven Thermografie war insbesondere die Nutzung der Sonnenerwärmung zur Untersuchung von großflächigen Strukturen. Daher wurden an Probekörpern mit bekannten Fehlstellen unterhalb verschiedener Fassadensysteme vergleichende Untersuchungen mit künstlicher Erwärmung durch Verwendung eines Infrarotstrahlers im Labor und mit natürlicher Erwärmung durch die Sonne im Außenbereich durchgeführt. Es wurden verschiedene Auswertungsverfahren zur Darstellung und zum Vergleich der Messergebnisse entwickelt und genutzt. Anschließend wurden diese Ergebnisse bei den Fallstudien angewendet, die in Kapitel 5 beschrieben werden.

Weiterhin erfolgten Optimierungen und Ergänzungen zur geometrischen Kalibrierung der im Projekt eingesetzten IR-Kameras sowie zur Bestimmung der Tiefenschärfe der eingesetzten Kamerasysteme. Diese Ergebnisse sind im Merkblatt 3 (s. Anhang 3) zusammengefasst.

4.3.1 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper zur Simulation von Fehlstellen wurden durch den Restaurator des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie (LDA) in Sachsen-Anhalt, Torsten Arnold, in Kooperation mit dem IDK im LDA in Halle hergestellt. Dabei handelt es sich um sieben Probekörper mit Putz, Riemchenklinkern und Fliesen, die auf Betonplatten aufgebaut worden sind. Es wurden verschiedene künstliche Fehlstellen eingearbeitet. Eine Übersicht über den Aufbau der Probekörper zeigt die nachfolgende Tabelle 4.1.

Die sieben Probekörper wurden jeweils auf einer Betonplatte (50 × 50 cm²) als Grundplatte aufgebaut. An den Stellen, an denen die Fehlstellen mit Sand simuliert worden sind, wurde zuvor ein Loch in diesen Bereich der Platte gebohrt und mit einem Stopfen verschlossen. Durch diese Öffnung konnte der Sand nach dem Abbinden des Mörtels entfernt werden. So ergibt sich eine größere Fehlstelle als es durch Papier oder Cyclododecan erreicht werden kann. Die Platten wurden in einen Rahmen gesetzt, vorgehäst und mit den oben beschriebenen Materialien und Fehlstellen versehen. Entsprechend den Vorgaben sollten die Fehlstellen unterschiedlicher Größe aus Papier (Pergamentpapier) oder Sand bestehen. Zusätzlich ist noch Cyclododecan, ein flüchtiges Bindemittel, eingesetzt worden. Nach dem Auftrag des Mörtels auf die mit Cyclododecan belegte Fläche ist die Anbindung gestört. Im Laufe des Abbindeprozesses des Mörtels verflüchtigt sich das Bindemittel und es verbleibt eine sehr dünne Fehlstelle. Bild 4.13 zeigt Fotos während der Herstellung der Probekörper.

Tabelle 4.1. Beschreibung der Probekörper mit verschiedenen Fassadensystemen und Fehlstellen

Nr.	Fassadensystem	Fehlstellen
1	1 cm dicker einlagiger Kalkputz	ohne
2	1 cm dicker einlagiger Kalkputz	jeweils 10 × 10 cm ² , 5 × 5 cm ² und 2 × 2 cm ² große Fehlstellen aus Sand (mit rückwärtigem Loch), Pergamentpapier mit Löchern und punktwise aufgebrachtem Cyclododecan (s. Bild 4.13.a)
3	2 cm dicker einlagiger Kalkputz	s. Nr. 2
4	Fliesen der Maße 15 × 15 × 0,5 cm ³ in Dünnbettmörtel	jeweils 10 × 10 cm ² , 5 × 5 cm ² und 2 × 2 cm ² große Fehlstellen aus Pergamentpapier mit Löchern und flächig aufgebrachtem Cyclododecan
5	Fliesen der Maße 15 × 15 × 0,5 cm ³ in Dünnbettmörtel	jeweils zwei 10 × 10 cm ² , 5 × 5 cm ² und 2 × 2 cm ² große Fehlstellen aus Pergamentpapier mit Löchern, sechs 3 × 9 cm ² große Aussparungen des Dünnbettmörtels (s. Bild 4.13.b)
6	Klinkerriemchen der Maße 24 × 7,1 × 1,4 cm ³ in Dünnbettmörtel	s. Nr. 4
7	Klinkerriemchen der Maße 24 × 7,1 × 1,4 cm ³ in Dünnbettmörtel	s. Nr. 5

4.3.2 Messungen an den Probekörpern

Messungen mit aktiver Thermografie wurden sowohl im Labor (Erwärmung mit einem IR-Strahler) als auch im Außenbereich (Erwärmung mit Sonneneinstrahlung) durchgeführt. In beiden Fällen wurde eine Infrarotkamera mit Mikrobolometer-Detektorarray mit 640×480 Pixeln, einer Temporauf Auflösung von 50 mK und einer maximalen Bildwiederholrate von 50 Hz verwendet, wobei die Messdaten aber nur mit 2 Hz erfasst wurden. Die Oberflächentemperatur wurde während der gesamten Erwärmung und über einen Zeitraum von bis zu 15 min während der Abkühlung aufgenommen. Im Labor wurden die Proben jeweils 5 min lang mit einem IR-Strahler mit einer Eingangsleistung von 2,4 kW im Abstand von ca. 5 cm erwärmt. Dies entspricht einer Leistungsdichte von 9600 W/m^2 und einer Energiedichte von $0,8 \text{ kWh/m}^2$ bzw. einer Energie von 0,2 kWh. Im Außenbereich wurden die Proben ca. 15 min lang der Sonnenbestrahlung ausgesetzt, anschließend wurden die Probekörper mit einer Stellwand abgeschattet. Die Strahlungsleistungsdichte der Sonne wurde für jede Messung mit einem Wärmeflussensor erfasst und lag zwischen 700 und 870 W/m^2 . Die Energiedichte betrug damit 0,18 bis $0,22 \text{ kWh/m}^2$ und die Energie 0,045 bis 0,055 kWh und war damit ca. um den Faktor 4 geringer als bei den Messungen im Labor.



Bild 4.13. Verschiedene Arten der künstlichen Fehlstellen. a) Sand, Pergamentpapier mit Löchern und Cyclododecan (Nr. 2 und 3). b) Pergamentpapier mit Löchern und Aussparungen des Dünnbettmörtels (Nr. 5 und 7). c) Fertigstellung der Probekörper.

Von den erfassten Thermogrammsequenzen wurde zunächst das Nullbild (Thermogramm vor Beginn der Erwärmung) abgezogen, so dass nur die Temperaturänderungen durch die Erwärmung angezeigt werden. Anschließend wurde jeweils eines dieser Differenzthermogramme mit möglichst gutem Fehlstellenkontrast direkt nach der Erwärmung und/oder zu einem späteren Zeitpunkt ausgewählt. Darüber hinaus wurden die Abkühlungssequenzen der Labormessungen mittels Puls-Phasen-Thermografie ausgewertet, d.h. von jedem Pixel wurde die Fast Fourier Transformation (FFT) berechnet. Anschließend wurde ein Phasenbild mit besonders gutem Kontrast der Fehlstellen ausgewählt und dargestellt [6]. Für die jeweils drei unterschiedlich großen Sandfehlstellen der Probekörper Nr. 2 und Nr. 3 wurden die Abkühlkurven der Labor- und der Außenmessungen über 10×10 Pixel gemittelt und Abkühlkurven ungestörter Bereiche von diesen subtrahiert. Diese Differenzkurven weisen dann einen maximalen Temperaturkontrast der Fehlstelle zu einem bestimmten Zeitpunkt auf, der von der Fehlstellengröße und -tiefe sowie der Intensität und Dauer der thermischen Anregung beeinflusst wird. Diese Differenzkurven werden für die beiden Probekörper verglichen.

4.3.3 Darstellung der Messergebnisse und Diskussion


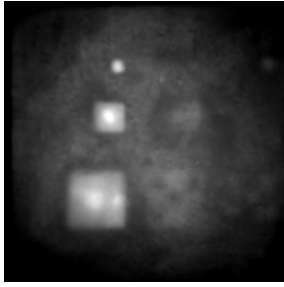

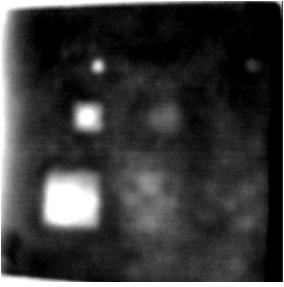

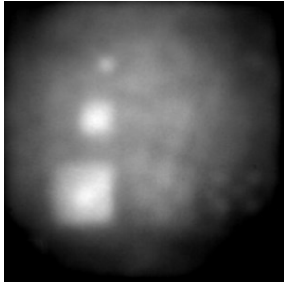
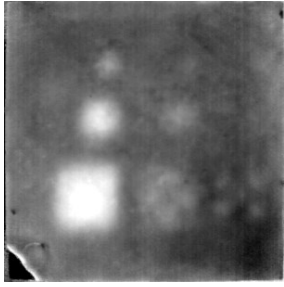
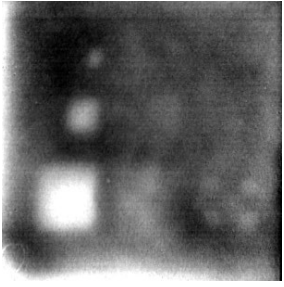

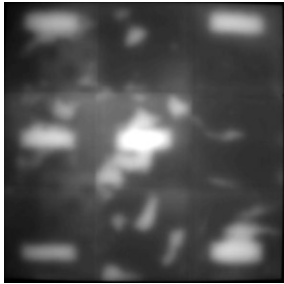
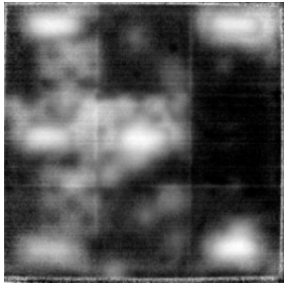
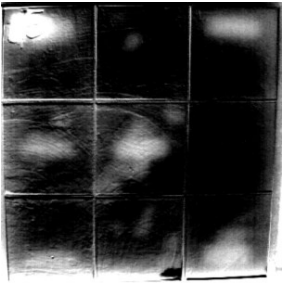
Die Thermogramme und Phasenbilder der Probekörper Nr. 2, 3, 5 und 7 sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Für die Probekörper Nr. 4 und 6 konnten die Fehlstellen nicht detektiert werden, daher werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet. Die Phasenbilder der Abkühlung nach der Sonnen Erwärmung brachten keine Kontrastverbesserungen der Fehlstellen. Daher sind diese ebenfalls nicht dargestellt.


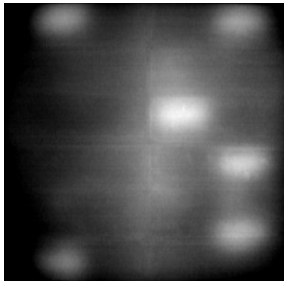
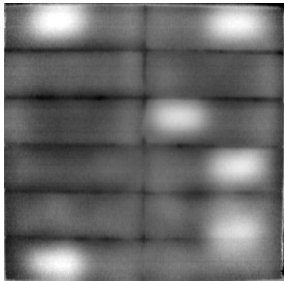
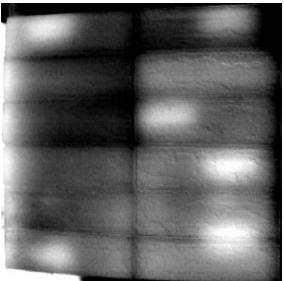
Aus den Thermogrammen und Phasenbildern der Labormessungen mit Erwärmung durch einen Infrarot-Strahler lassen sich folgenden Beobachtungen zusammenfassen:

- In den Phasenbildern sind mehr Fehlstellen zu erkennen als in den Thermogrammen.

- Die Hohlräume aufgrund des Sandes und des ausgesparten Dünnbettmörtels sind wesentlich besser zu erkennen als die Papierfehlstellen und die Bereiche mit Cyclododecan. Bei Probekörper Nr. 7 mit Klinkerriemchen können die Papierfehlstellen nicht detektiert werden. Im Probekörper Nr. 5 sind zusätzliche unbeabsichtigte Fehlstellen zu sehen.
- Die größeren Fehlstellen sind besser zu erkennen als die kleineren Fehlstellen.
- Die unregelmäßige Temperaturverteilung, insbesondere oberhalb der großen Sandfehlstelle in Probekörper Nr. 2, lässt vermuten, dass der Sand durch das rückwärtige Loch nicht vollständig entfernt werden konnte.
- Die Fehlstellen unterhalb der 1 cm dicken Putzschicht sind erwartungsgemäß besser zu erkennen als die unter der 2 cm dicken Putzschicht.

Tabelle 4.2. Ergebnisse der thermografischen Untersuchungen mit Infrarot-Strahler und Sonnenerwärmung an den Probekörpern mit verschiedenen Fassadenelementen und künstlichen Fehlstellen. In den Thermogrammen ist schwarz die niedrige und weiß die hohe angegebene Temperatur.

Nr.	Foto des Probekörpers	Thermogramm nach Erwärmung mit einem Infrarot-Strahler	Phasenbild nach Erwärmung mit einem Infrarot-Strahler	Thermogramm nach Erwärmung durch die Sonne
2	 Kalkputz (1 cm) mit drei Arten von Fehlstellen	 $t = 0 \text{ s}$; 5 bis 25 K	 Bild 15 der PPT	 $t = 0 \text{ s}$; 2,8 bis 5,4 K
3	 Kalkputz (2 cm) mit drei Arten von Fehlstellen	 $t = 120 \text{ s}$; 11 bis 19 K	 Bild 4 der PPT	 $t = 65 \text{ s}$; 3,8 bis 5,5 K
5	 Weiße Fliesen mit drei Arten von Fehlstellen	 $t = 0 \text{ s}$; 5 bis 30 K	 Bild 7 der PPT	 $t = 0 \text{ s}$; 1,1 bis 3,1 K

Nr.	Foto des Probekörpers	Thermogramm nach Erwärmung mit einem Infrarot-Strahler	Phasenbild nach Erwärmung mit einem Infrarot-Strahler	Thermogramm nach Erwärmung durch die Sonne
7	 <p>Braune Riemchenklinker mit drei Arten von Fehlstellen in unterschiedlichen Größen</p>	 <p>$t = 430 \text{ s}$; 4 bis 8,5 K</p>	 <p>Bild 4 der PPT</p>	 <p>$t = 0 \text{ s}$; 6,3 bis 8,8 K</p>

Obwohl der thermische Kontrast der Fehlstellen bei den Außenmessungen entsprechend der geringeren eingebrachten Energie durch die Sonne deutlich kleiner ist, sind hier fast genauso viele Fehlstellen zu erkennen wie bei den Labormessungen. Nur die Papierfehlstellen mit Löchern im Probekörper Nr. 5 mit Fliesen werden bei den Außenmessungen nicht detektiert.

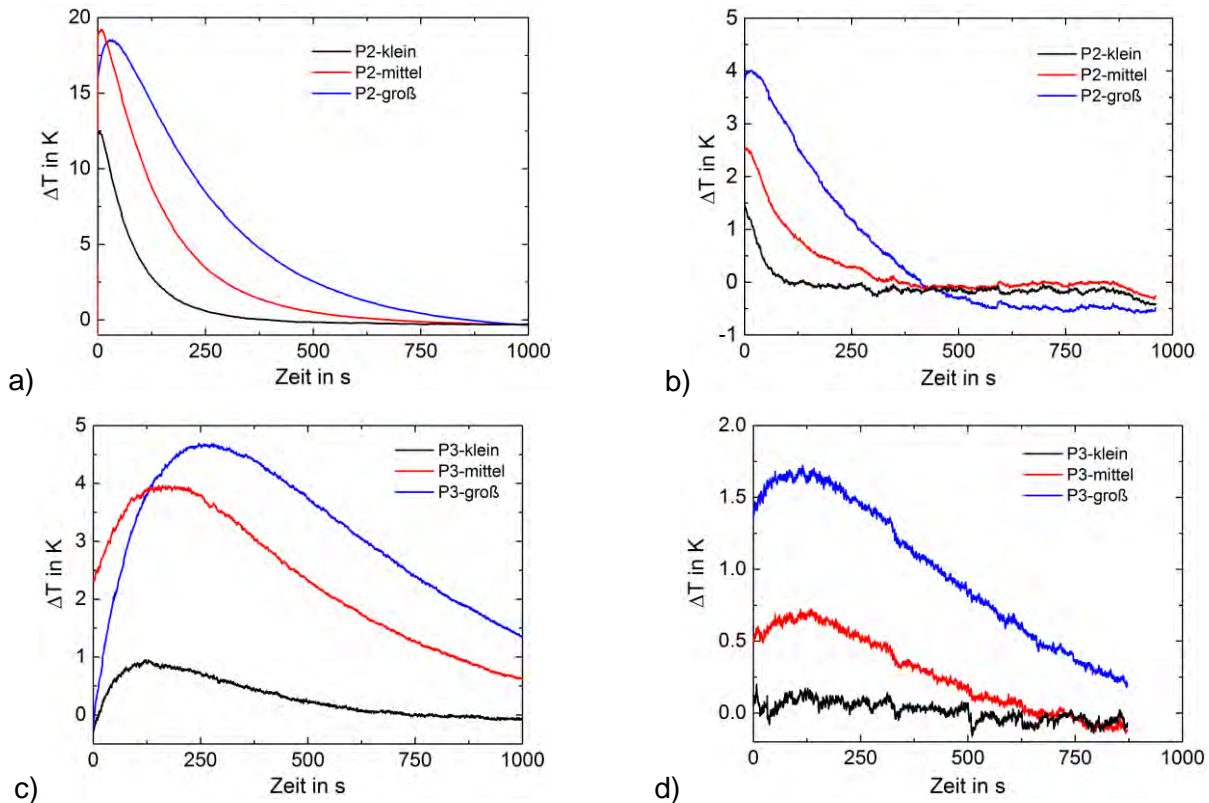


Bild 4.14. Differenzkurven der unterschiedlich großen Sandfehlstellen. Der Nullpunkt der Zeitskala bezieht sich auf das Ende der Erwärmung. a) Kurven des Probekörpers Nr. 2 mit 1 cm dicker Putzschicht nach 5 min Erwärmung im Labor. b) Kurven des Probekörpers Nr. 2 nach 15 min Erwärmung durch die Sonne. c) Kurven des Probekörpers Nr. 3 mit 2 cm dicker Putzschicht nach 5 min Erwärmung im Labor. d) Kurven des Probekörpers Nr. 3 nach 15 min Erwärmung durch die Sonne.

Die Differenzkurven der Abkühlung der Sandfehlstellen der Probekörper Nr. 2 und Nr. 3 sind in Bild 4.14 dargestellt. Es lassen sich die folgenden Beobachtungen zusammenfassen:

- Zum Einfluss der Fehlstellengröße: In den Diagrammen b, c und d erzeugt die größte Fehlstelle auch den größten Temperaturkontrast. In allen Diagrammen erscheint bei dieser Fehlstelle verglichen mit den kleineren Fehlstellen das Temperaturmaximum zu einem späteren Zeitpunkt. Außerdem kühlt die große Fehlstelle langsamer ab.
- Zum Einfluss der Putzdicke: Eine Verdopplung der Putzdicke bewirkt, dass der Temperaturkontrast sich deutlich verringert, dass der maximale Kontrast zu einem späteren Zeitpunkt erscheint und dass die Abkühlung der Fehlstellen langsamer erfolgt.
- Zum Einfluss der Erwärmung: Da mit der Sonnenerwärmung deutlich weniger Energie in das Bauteil eingebracht wird, ist auch der Temperaturkontrast der Fehlstellen deutlich geringer. Bezogen auf den Zeitpunkt der Beendigung der Erwärmung (Nullpunkt der Zeitskala) erscheinen die maximalen Temperaturkontraste bei der Sonnenerwärmung etwas früher. Dies hängt mit der längeren Erwärmung durch die Sonne (15 min statt 5 min) zusammen.

4.3.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen an den verschiedenen Probekörpern haben gezeigt, dass die aktive Thermografie sehr gut dazu geeignet ist, auch kleinere Fehlstellen mit Abmessung von $2 \times 2 \text{ cm}^2$ unterhalb verschiedener Fassadensysteme wie Putz, Fliesen und Klinkerriemchen zu detektieren. Sehr dünne Fehlstellen wie Cyclododecan unterhalb des Dünnbettmörtels konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Neben der Verwendung von künstlichen Wärmequellen (hier: IR-Strahler) kann auch die Sonneneinstrahlung zur Erwärmung genutzt werden. Der Temperaturkontrast der Fehlstellen wird sehr stark von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. So sind zwar ohne weiteres quantitative Aussagen zur Größe einer Fehlstelle möglich, die Tiefenlage einer Fehlstelle kann aber nur mit Hilfe von bekannten Vergleichskörpern ermittelt werden.

Nachfolgend werden die Untersuchungen mit Sonnenerwärmung an unterschiedlichen Fassaden beschrieben. Im Merkblatt 4 (s. Anhang 4) sind die wesentlichen Bedingungen und Grenzen der aktiven Thermografie mit Sonnenerwärmung zusammengefasst.

4.3.5 Geometrische Kalibrierung der Kamerasysteme

Die Durchführung der geometrischen Kalibrierung von Infrarot-Kamerasystemen wird im Merkblatt 3 (s. Anhang 3) beschrieben.

5 Datenfusion und -visualisierung

Wesentlicher Schwerpunkt im Projekt war es, aufgenommene Messdaten aus unterschiedlichen Domänen (insbesondere 2D-Fotos und Thermogramme, 3D-Rissdaten und hochaufgelöste 3D-Punktwolken) zusammenzuführen, um auf dieser Basis oberflächennahe Schadensmerkmale besser beurteilen zu können. Es wurden hierfür verschiedene Verfahren entwickelt sowie vorhandene Tools eingesetzt, die eine Fusion der Daten aus den unterschiedlichen Domänen ermöglichen. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die Fusion erfolgte jeweils mit den in den Fallstudien erfassten relevanten Daten. Die Ergebnisse werden anhand der Fallstudien detailliert beschrieben (s. Abschnitt 7). Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur performanten Visualisierung der verschiedenen Daten sowie entsprechender Interaktionsmethoden.



Bild 5.1. 3D-Punktwolke mit Referenzpunkten



Bild 5.2. Bild mit Referenzpunkten

5.1 Fusion von 3D-Punktwolken mit 2D-Thermogrammen

Bei dieser Datenfusion wird eine hochaufgelöste 3D-Punktwolke oder ein 3D-Dreiecksnetz mit den Bildinformationen eines oder mehrerer 2D-Thermogramme eingefärbt. Dadurch kann der exakte Lagebezug der Bildinformationen zur Oberfläche des Messobjektes hergestellt werden. Dieses Verfahren wird dann erforderlich, wenn das Objekt eine komplexe Topologie aufweist.

Dann sind häufig mehrere Thermografieaufnahmen aus verschiedenen Messpositionen nötig, um alle Flächen auf der Oberfläche zu erfassen. Für die Datenfusion sind mehrere Punkte notwendig, die sowohl im Bild als auch in den 3D-Daten einander zugeordnet werden können. Mit Hilfe dieser Punktpaare und den intrinsischen Parametern der Kamera ist es möglich, die Kameraposition bezogen auf die 3D-Daten zu bestimmen. Die Position entspricht der Lage der Kamera bezüglich des aufgenommenen Objektes im Moment der Bildaufnahme. Bild 5.1 und 5.2 zeigen ein Beispiel für die Auswahl von korrespondierenden Punkten für eine Datenfusion. Bei den Thermografieaufnahmen wird vorzugsweise ein Bild noch während der Erwärmung verwendet. Hier sind u. a. aufgrund der Reflexionen von der Strahlungsquelle die Oberflächeninformationen enthalten, die für die Zuordnung notwendig sind. In den Fallstudien wurden u.a. Fusionen von Thermogrammen mit dem 3D-Datensatz vorgenommen (s. Bild 7.16. und Bild 7.17).

5.2 Überlagerung von 3D-Rissdaten auf 2D-Bildern

Mit dem Trackingsystem erfasste 3D-Rissdaten können in dem MonitoringTool in einer 3D-Umgebung betrachtet und bearbeitet werden. Für einen besseren lokalen Bezug zum realen Objekt ist eine Überlagerung dieser 3D-Daten auf eine 2D-Ansicht des Messobjekts (z.B. Foto, Thermogramm) von Vorteil. Das Ergebnis der Überlagerung entspricht dem der manuellen Kartierung auf Fotos.

Zum Erstellen dieser Überlagerungen muss der Bezug zwischen einer Anzahl (mindestens 6) von 3D- und 2D-Punkten hergestellt werden. Dies kann durch Festlegen von Korrespondenzen in beiden Datenquellen geschehen. Je nach Beschaffenheit des Objektes und der Aufnahmen können diese Korrespondenzen gegebenenfalls auf der Basis vorhandener Objektmerkmale erstellt werden. In vielen Fällen sind diese Merkmale jedoch nicht eindeutig in beiden Datensätzen festzulegen. Vor allem bei Thermografie-Aufnahmen sind oft keine scharfen Kanten oder Strukturen erkennbar, wodurch eine Zuordnung zur korrespondierenden 3D-Risstopologie nicht erfolgen kann. Für diese Fälle sind künstliche Referenzmarker am Messobjekt anzubringen. Bei der Fallstudie in Cobbelsdorf (s. Kapitel 7) wurden kreisförmige Plättchen aus Folienmaterial ausgeschnitten. Diese Plättchen sind sowohl in Thermogrammen und Fotos sichtbar als auch durch die 3D-Erfassung (Antastung der Kreismittelpunkte am Messobjekt) als 3D-Daten (Koordinaten der Mittelpunkte) vorhanden. Die erforderlichen Korrespondenzen können somit zuverlässig hergestellt werden. Die sich aus den Korrespondenzen ergebende Transformation der 3D-Rissdaten wird nun verwendet, um diese in das 2D-Bild zu projizieren. Die ausgewählten 3D-Rissdaten werden dabei lagerichtig in das 2D-Bild übertragen (s. Bild 5.3). Durch Einstellmöglichkeiten bezüglich Farbe und Punktdicke können die Rissdaten entsprechend hervorgehoben werden.



Bild 5.3. Überlagerung von 3D-Rissdaten (rote Kurven) auf ein 2D-Bild des Messobjekts (rechts); Referenzmarker auf dem Messobjekt dienen als Basis für die Datenfusion; Rissdaten sowie Referenzpunkte in der 3D-Ansicht (links).

5.3 Fusion von 2D-Bildern

Es wurde ein Software-Modul zur Fusion und Überlagerung von beliebigen 2D-Bilddaten entwickelt, das vielfältig einsetzbar ist. So kann es beispielsweise genutzt werden, um Bilddaten der Thermografie sowohl aus einer Messreihe, als auch aus verschiedenen Messungen miteinander in Bezug zu setzen. Weiterhin hilft die Fusion von Thermografieaufnahmen (oftmals geringe örtliche Auflösung und geringer Dynamikbereich) mit hochauflösenden und detailreichen Fotos dabei, einen besseren örtlichen Bezug zum realen Objekt herzustellen (s. Bild 5.4). Bei der Fusion von 2D-Bildern sind, ähnlich der Überlagerung von 3D-Rissdaten und 2D-Bildern, Korrespondenzen zum Herstellen des Bezugs zwischen den Bilddaten erforderlich. Im Falle der Überlagerung von 2D-Daten sind die Korrespondenzen jeweils nur im zweidimensionalen Raum zu bestimmen (direkt in den Bildern). Je nach vorliegenden Bilddaten sind gegebenenfalls zusätzliche Marker am realen Objekt vor den Aufnahmen anzubringen. Vor allem bei der Thermografie sind ohne Marker meist nur eingeschränkt markante Punkte im Bild identifizierbar. Es sollten hierbei Marker aus einem solchen Material eingesetzt werden (z.B. Metallfolie), welches sich im Thermogramm deutlich hervorhebt und eine definierte Form besitzt (z.B. Kreis, Ring) und die somit in allen Aufnahmen identifizierbar sind.

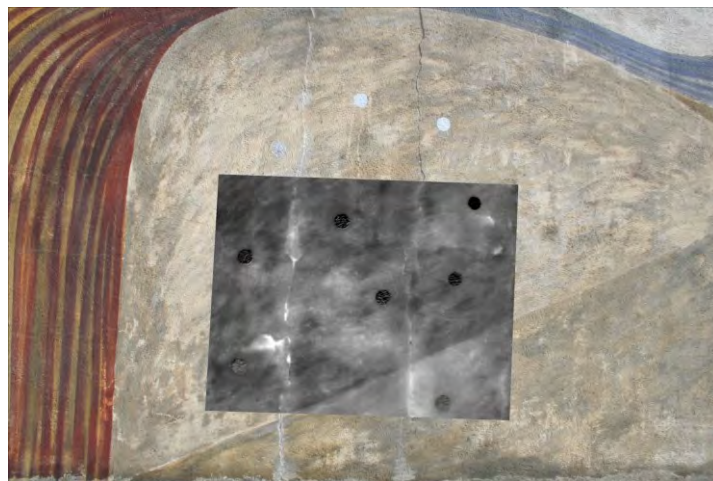


Bild 5.4. Überlagerung eines Thermogramms (grau, Bildmitte) auf ein Foto am Beispiel eines Fassadenbereiches mit Referenzmarkern.

Die Überlagerung aktueller 2D-Aufnahmen mit bestehenden 2D-Kartierungen (z.B. Kartierungen auf historischen Papierfotos) ist ebenfalls prinzipiell möglich. Voraussetzung ist hierfür eine hinreichende Anzahl von Merkmalen zur Herstellung der Korrespondenzen.

6 Merkblätter zu den Verfahren

Die Merkblätter zu den Verfahren sind in den Anhängen 1 bis 5 aufgeführt.

7 Beschreibungen und Ergebnisse der Fallstudien

7.1 Putzritzungen am Magdeburger Dom

7.1.1 Beschreibung der Fallstudie

Eines der bedeutendsten Kunstwerke des Magdeburger Doms sind die Putzritzungen am Ostflügel des Kreuzgangs aus dem 13. Jahrhundert. Im Zentralbild werden Kaiser Otto I. und seine beiden Gemahlinnen Editha und Adelheid dargestellt. Von der Putzoberfläche mit den Ritzungen sind nur

noch fragmentarische Restflächen erhalten geblieben. Der größte Teil der einzelnen Putzoberflächen sind Ausbesserungen oder Neuverputzungen aus verschiedenen Restaurierungs- oder Reparaturphasen, der deutlich kleinere Teil sind die originalen Putzflächen, die nur noch als Inseln zwischen den verschiedenen aneinandergesetzten Ausflückungen existieren und durch Risse und Ablösungen gefährdet sind.

Bild 7.1 zeigt eine Kartierung der bisher durchgeführten Verfestigungen an den Putzritzungen, Bild 7.2 eine Kartierung der belassenen Putze.



Bild 7.1. Bisher durchgeführte Verfestigungen an den Putzritzungen.



0,320 m² rötliche Aufputze, 0,04 m² gelbe Aufputze, 1,36 m² graue Aufputze, 0,98 m² ocker Aufputze, 0,71 m² Aufputze, 0,07 m² Zementschleier

Bild 7.2. Kartierung der verschiedenen belassenen Aufputze.

Bereits 2012 erfolgten erste Untersuchungen mit aktiver Thermografie, Photogrammetrie und dem 3D-Risstrackingverfahren. Seit diesem Zeitpunkt wurden umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt, die nachfolgend beschrieben werden.

Ab Mai 2013 wurden Konservierungsarbeiten an den Rissen und Fehlstellen innerhalb der Originalputzfelder und an den zum Erhalt bestimmten historischen Ergänzungsputzen ausgeführt. Der Verschluss der Risse mit dem Verschlussmörtel sowie die Retusche der Rissverschlüsse und Binnenflächen konnten bis zum 4.7.2013 nahezu abgeschlossen werden. Außerdem erfolgten Retuschen im Bereich farblich stark abweichender Stellen (durch frühere Restaurierungsmaßnahmen etc.).

Die im Jahr 2012 hinter dem Epitaph von Beringerodt freigelegte Originalputzfläche wurde entsprechend des an dem übrigen Bereich der Putzritzungen erarbeiteten Programms konserviert. Hier sind die Maßnahmen noch nicht vollständig abgeschlossen, insbesondere die Übergänge zum neuzeitlichen Verputz des südlichen Wandabschnittes müssen noch hergestellt werden.

Im Detail wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Der Rissverschluss wurde nach Probeansätzen mit einem fließfähigen pigmentierten Sumpfkalkmörtel (Füllstoffe: feiner Quarzsand, Faserzusatz) ausgeführt. Die Verarbeitung erfolgte mit Spritzen und Spachteln. Es konnte auch ohne intensives Vorbenetzen eine sehr gute Fließfähigkeit festgestellt werden. Nach den bisherigen Beobachtungen kam es nicht zu Flankenabrissen.
- Bei der Kittung von Fehlstellen wurde auf die bewährte Technologie und den entsprechenden Sumpfkalkmörtel, mit dem die bisherigen Fehlstellenverschlüsse hergestellt worden sind, zurückgegriffen. Eine Anpassung an die Größe der Fehlstelle gab es durch die Verwendung fei-

nerer Quarzsandzuschläge, so dass eine feinere Sieblinie zu einer besseren Verarbeitung beim Verschluss von Fehlstellen unterhalb von ca. 10 cm² führte.

- Die Retusche bezieht sich ausschließlich auf die Risse und Binnenfehlstellen im Originalputz bzw. den verbliebenen späteren Putzen der Restaurierungsmaßnahmen. Die Retuschen wurden mit Pigment und als Bindemittel Syton X30 (1:4 verdünnt) ausgeführt. Dabei wurde kein didaktischer Ansatz der herausgestellten Erkennbarkeit der Retusche verfolgt. Dadurch kommt es zu einer doch weitgehenden Beruhigung der Gesamtflächen. In Ausnahmefällen wurden Retuschen auch in originalen Putzbereichen ausgeführt, wenn diese durch die Applikation von Restaurierungsmaterialien stark farbig verändert waren.
- Der Befund hinter dem abgenommenen Epitaph von Beringerodt wurde entsprechend den Technologien und Mitteln, die an den anderen Flächen angewendet wurden, gesichert (Anböschern, Hinterstopfen mit Kalkmörtel). Zudem wurden Probeflächen angelegt. Dabei wurde festgelegt, dass ein Schließen der Binnenfehlstellen in diesem Fall leicht unterhalb des originalen Putzniveaus erfolgen soll. Jegliche rekonstruktive Andienung an fehlende Ritzungen und das originale Oberflächenniveau sollten unterbleiben. Der Anschluss des vorgestellten größeren Mörtels an den unteren Bereich des Originalputzes wurde als sehr gut empfunden, jedoch sollte eine farbige Angleichung an den Ergänzungsputz der Bildbereiche erfolgen.

Eine Übersicht der Bereiche, in denen für das Projekt relevante Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, zeigt das Bild 7.3.



Bild 7.3. Markierung der für das Projekt relevanten Bereiche der Putzritzungen, die in 2013 restauriert wurden.

Am nördlichen Bild wurden die aufwändigsten Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt. Bild 7.4 zeigt den Zustand des Bereiches nach Rissverfüllung (a) und nach der Retusche (b).



a)



b)

Bild 7.4. a) Zustand des nördlichen Bereichs nach Rissverfüllung und Kittung der Binnenfehlstellen. In diesem Bereich traten auch Hohlstellen und Deformierungen auf, die durch Hinterstopfen verfüllt wurden. b) Nördlicher Bereich nach der Retusche, die deformierte Hohlstelle in Bildmitte wurde noch nicht bearbeitet.

Bild 7.5 zeigt das Zentralbild vor und nach der Restaurierung.



Bild 7.5. Zentralbild vor (a) und nach der Restaurierung (b, August 2013, obere linke Ecke noch nicht mit dem Laser gereinigt).

7.1.2 Ergebnisse der Messungen mit Stereosensor und Laserscanner

Messungen mit dem Stereomesssystem (Messfeld $170 \times 170 \text{ mm}^2$)

Die Aufnahmen mit dem Stereomesssystem wurden am 12.09.2014 durchgeführt. Hier wurden die Bereiche am Zentralbild ausgewählt, für die noch keine Messdaten existieren. Zusätzlich wurden geeignete Bereiche für die spätere Registrierung zu den schon vorhandenen Messdaten vom 24.07.2012 ausgewählt. Die Messergebnisse vom 12.09.2014 sollen dann mit den existierenden 3D-Daten kombiniert einen Bereich von $2300 \times 2100 \text{ mm}^2$ darstellen. Im Gegensatz zu den Aufnahmen vom 24.07.2012 war eine zusätzliche Beleuchtung notwendig. Der Sensor wurde in einem Raster vor dem Messobjekt auf einem horizontalen Schlitten bewegt (s. Bild 7.6). Auf dem Schlitten wurden Markierungen angebracht, um den Sensor schnell an den definierten Aufnahmepunkten positionieren zu können. Dadurch konnten innerhalb von sechs Stunden 355 Einzelaufnahmen durchgeführt werden. Der erfasste Messbereich umfasst ca. $2300 \times 1200 \text{ mm}^2$. Bei den Aufnahmen am 24.07.2012 konnte im gleichen Zeitraum, mit 193 Aufnahmen, ein Bereich von $2300 \times 850 \text{ mm}^2$ erfasst werden.



Bild 7.6. Aufbau des Messsystems mit zusätzlicher Beleuchtung.

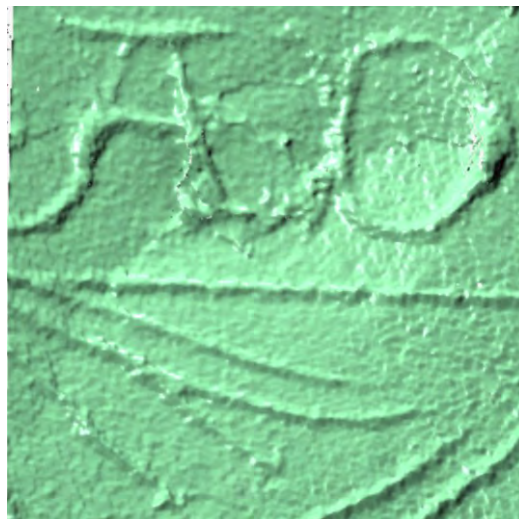


Bild 7.7. Ergebnis einer Einzelaufnahme.

Für jede Einzelaufnahme (Bildpaar) wurde im nächsten Schritt ein 3D-Datensatz erzeugt. Bild 7.7 zeigt den 3D-Datensatz für eine Einzelaufnahme. Dann wurden alle 3D-Datensätze in ein Koordinatensystem überführt. Bild 7.8 zeigt die Ergebnisse von den Messungen am 12.09.2014 und 24.07.2012 in einem Koordinatensystem. Die Messdaten vom 12.09.2014 sind hierbei gelb eingefärbt.



Bild 7.8. Messergebnisse vom 12.09.2014 und 24.07.2012 als 3D-Punktwolke.

Messungen mit dem Laserscanner

Am 26.09.2014 wurden mit einem Laserscanner der Firma Zoller+Fröhlich an den Putzritzen Aufnahmen durchgeführt (s. Bild 7.9). Der Scanner vom Typ Imager 5010 stand nur für diesen Tag auf Leihbasis für das Projekt zur Verfügung. Das Messgerät wurde zunächst an den beiden Messstellen *Zentralbild* und *Nordbereich* positioniert. An einer Messstelle wurde ein Bereich von ca. 9000 x 3000 mm² innerhalb von 20 Minuten aufgenommen. Zusätzlich wurden weitere vier Messungen an den Putzritzen durchgeführt. Durch die zusätzlichen Aufnahmen können die Putzritzen nach einer Registrierung in einem Koordinatensystem dargestellt werden. Diese Aufnahmen sollten zur Datenfusion und Bewertung der Datenqualität verwendet werden.



Bild 7.9. Aufnahmen mit dem Laserscanner an den Putzritzen.

Die Einzelaufnahmen wurden im schon bekannten manuellen Verfahren zueinander registriert. Vom Hersteller wird auch eine automatische Lösung angeboten. Allerdings müssen bei den Messaufnahmen zusätzlich spezielle Marker im Messraum platziert werden. Für die automatische Registrierung der Messdaten ist dann noch ein Softwarepaket notwendig. Dieses Softwarepaket stand bei der Leihgabe nicht zur Verfügung. Bild 7.10 zeigt das Messergebnis für das Zentralbild der Putzritzen. Dieser Datensatz wurde für die Genauigkeitsuntersuchungen verwendet.



Bild 7.10. Messergebnis des Laserscanners für das Zentralbild der Putzritzen.

Bild 7.11 zeigt das Messergebnis aller Messpositionen in einem Koordinatensystem.



Bild 7.11. Messergebnis aller zueinander registrierten Messpositionen.

In den Ergebnisbildern der 3D-Punktdaten vom Laserscanner und dem Stereosystem sind keine deutlichen Unterschiede erkennbar. Allerdings sind die Auflösungen der Messdaten unterschiedlich. Der Laserscanner liefert 3D-Daten in einer Auflösung im Millimeterbereich. Das Stereosystem erzeugt dahingegen 3D-Daten im Submillimeterbereich. In den Abbildungen 7.12 und 7.13 ist dies anhand eines ausgewählten Bereiches des Zentralbildes für beide Messsysteme gegenübergestellt.

Es ist deutlich erkennbar, dass die Putzritzen bei den 3D-Daten vom Laserscanner nicht vollständig aufgelöst werden können. Daher ist dieses Messverfahren für das Monitoring der Putzritzen nicht geeignet. Allerdings können die Daten für den Lagebezug der höher aufgelösten 3D-Punkte vom Stereosystem genutzt werden. Ein Vergleich einer erneuten Erfassung des Zentralbildes mit dem Stereosystem ist nur mit exaktem Lagebezug möglich.

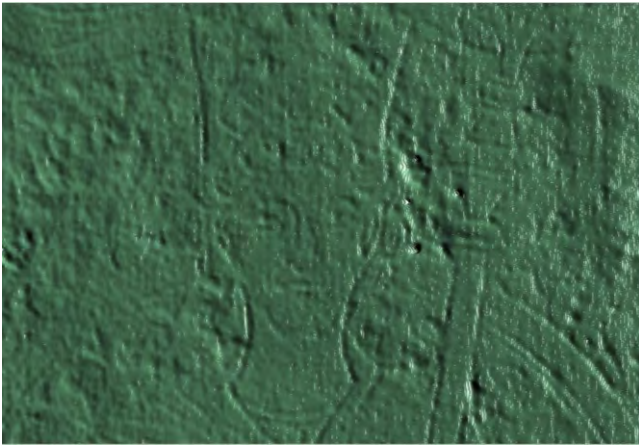


Bild 7.12. Ergebnis für einen Bildausschnitt vom Laserscanner.

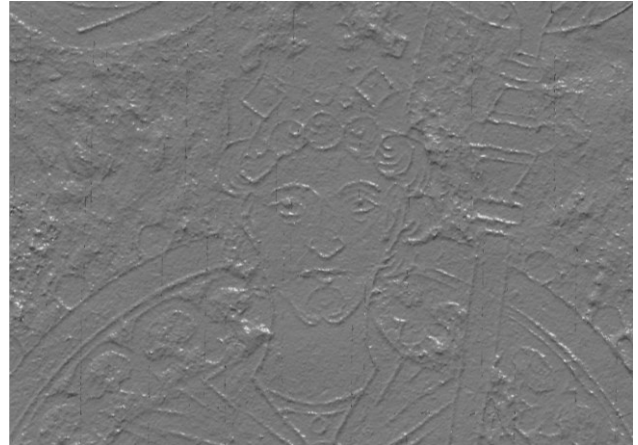


Bild 7.13. Ergebnis für einen Bildausschnitt vom Stereosystem.

7.1.3 Ergebnisse der Messungen mit aktiver Thermografie

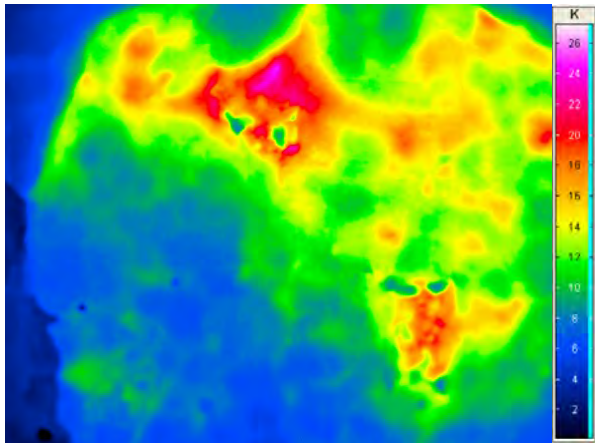
Die wiederholenden Messungen an den Putzritzungen am Magdeburger Dom erfolgten am 16.06.2014 an der Messstelle des *nördlichen Bereichs* und am 21.10.2014 am *Zentralbild*. Als Marker wurden unregelmäßige Dreiecke aus retroreflektierender Folie verwendet, deren Geometrie sich jedoch nicht als besonders geeignet herausgestellt hat. Aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung der IR-Kamera sollen künftig runde Marker verwendet werden. Die Messstelle am nördlichen Bereich hatte eine Größe von 1,25 m × 1,0 m und wurde für 5 min mit einem IR-Strahler erwärmt. Die Erwärmung und die anschließende Abkühlung wurden mit einer Bildwiederholrate von 5 Hz insgesamt 15 min lang beobachtet. Bild 7.14 zeigt links oben die Messung vom 20.04.2012 und rechts oben die vom 16.06.2014. Die Thermogramme wurden jeweils direkt nach der Erwärmung aufgenommen und sind nach Abzug des Nullbildes dargestellt. Die Temperaturskalen wurden gleich gewählt. Zu beiden Terminen erfolgte die Erwärmung mit vergleichbaren Parametern. Die Umgebungsbedingungen, die in Tabelle 7.1 zusammenfasst sind, waren jedoch unterschiedlich: Am 20.4.2012 war die Tageshöchsttemperatur und auch die anfängliche Wandtemperatur vor der Erwärmung etwas niedriger als am 16.6.2014. Weiterhin überstiegen der Temperaturen an den Tagen vor dem 16.6.2014 mehrere Tage deutlich die 30°C, während die Bedingungen vor dem 20.4.2012 an vielen Tagen ähnlich wie am Messtag waren. Einen weiteren Einfluss hat die Anzahl der Sonnenstunden am Tag vor der Messung haben, die das Mauerwerk erwärmen.

In den Thermogrammen sind die folgenden Unterschiede zu erkennen:

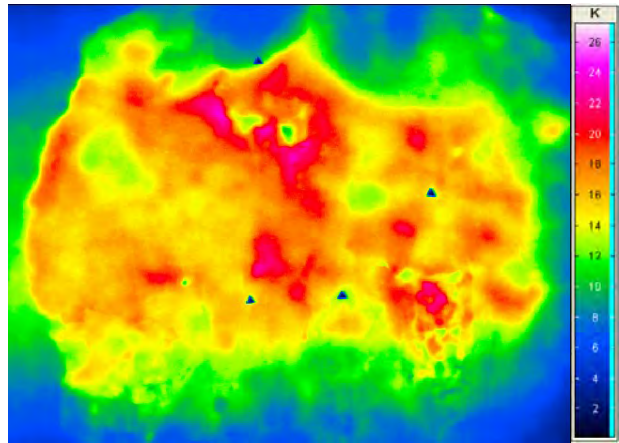
- Im Bereich der Fehlstelle im oberen linken Viertel des Bildes hat sich das Temperaturmaximum von oberhalb der Fehlstelle nach unterhalb verlagert. Die kühleren Bereiche oberhalb der Fehlstelle sind jetzt auf die Verkittung der hohl liegenden Bereiche zurückzuführen. Weitere (neue?) hohl liegende Bereiche lassen sich jetzt im unteren Bereich der Fehlstelle vermuten.
- Das untere linke Viertel erschien bei der ersten Untersuchung im Vergleich zum Gesamtbild eher kühl, in der neuen Messung ist der Temperaturverlauf vergleichbar zum Restbild und zeigt kaum auffällige Inhomogenitäten. Die insgesamt höhere Untergrundtemperatur lässt sich mit der höheren Wandtemperatur vor der Erwärmung und auch mit den hohen Tagestemperaturen vor dem Messtag erklären, die insgesamt zu einer Aufheizung des Baukörpers geführt haben.

Tabelle 7.1. Thermische Umgebungsbedingungen an den Messtagen an den Putzritzungen.

Datum	Wandtemp. vor Beginn der Erwärmung	Tageshöchsttemperatur	Mittlere Tageshöchsttemperatur an sieben Tagen vor der Messung	Sonnenstunden am Vortag
20.04.2012	15,3°C	16°C	16°C	12 h
16.06.2014	18,7°C	19°C	30°C	12 h
21.10.2014	16,6°C	16°C	17°C	1,5 h



a) Messung am 20.04.2012



b) Messung am 16.06.2014



c) Foto am 20.04.2012



d) Foto am 16.06.2014 mit dreieckigen Markern



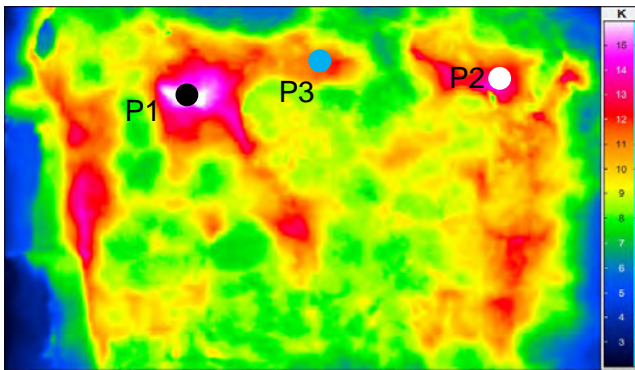
e) Foto 2013 vor der Retusche

Bild 7.14. Vergleich der Thermogramme des nördlichen Messbereichs ($1,25 \times 1,0 \text{ m}^2$) nach 5 min Erwärmung mit einem Heizstrahler im April 2012 (a) und im Juni 2014 (b). Die Fotos zeigen den Messbereich zu den angegebenen Daten.

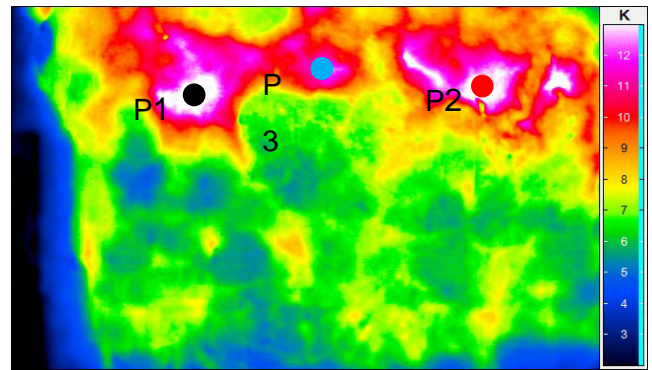
Vom Zentralbild wird im Folgenden der linke obere Bereich verglichen. Auch dieser wurde jeweils für eine Dauer von 5 min mit einem IR-Strahler erwärmt und die Abkühlung für einen Zeitraum von 15 min mit einer Bildwiederholrate von 5 Hz beobachtet. Bild 7.15 zeigt oben die Thermogramme nach Abzug des Nullbildes, die an den beiden Messtagen jeweils direkt nach der Erwärmung aufgenommen wurden. Hierbei wurde die Skalierung auf die Thermogramme angepasst, d.h. sie ist für die beiden Thermogramme unterschiedlich. Die zugehörigen Fotos sind darunter abgebildet und zeigen, dass am 21.10.2014 der Messbereich bis auf einen kleineren Teil bereits mit einem Laser gereinigt wurde. Unter den Fotos sind zwei Diagramme dargestellt, die die Temperaturdifferenz der in den Thermogrammen markierten Messbereiche P1, P2 und P3 in Abhängigkeit von der Zeit zu einer ungestörten Referenzstelle wiedergeben. Diese Referenzmessstelle wurde im unteren Bereich des Thermogramms gewählt.

Obwohl in diesem Bereich bis auf die Reinigung der Oberfläche und einer Auffüllung am linken Randbereich keine weiteren restauratorischen Maßnahmen erfolgten, können die folgenden Unterschiede beobachtet werden:

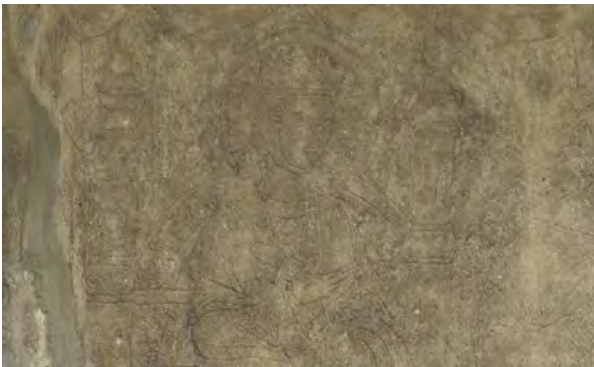
- Das Thermogramm im April 2012 zeigt im Mittel eine etwas stärkere Erwärmung als das Thermogramm im Oktober 2014. Dies könnte mit der noch vorhandenen obersten Schicht der Verunreinigungen zusammenhängen, die insgesamt zu einer stärkeren Absorption der Infrarotstrahlung führt. Dem widerspricht jedoch, dass der noch verbliebene, nicht gereinigte Bereich in (b) nicht zu einem Temperaturkontrast führt. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass sich im April 2012 das Innere des Mauerwerks am Vortrag stärker erwärmt hat als im Oktober 2014, da hier die Anzahl der Sonnenstunden deutlich höher war (s. Tabelle 7.1).
- Die wärmeren Bereiche um die Messbereiche P2 und P3 herum in der oberen Hälfte der Thermogramme scheinen sich zum Oktober 2014 hin vergrößert zu haben. Im gleichen Zeitraum haben sich die wärmeren Bereiche in der unteren Hälfte reduziert.
- Aus dem zeitlichen Verlauf der Temperaturdifferenzen der Messstellen P1, P2 und P3 ist zu erkennen, dass sich der Temperaturverlauf der Messstelle P1 und auch der maximale Temperaturkontrast mit 6.5 K nicht verändert haben. Im Gegensatz dazu ist der Temperaturkontrast an den Bereich P2 und P3 deutlich angestiegen. Vergleicht man dies mit den Differenztemperaturen an den Probekörpern mit simulierter Putzablösung, dann deutet eine Erhöhung des Temperaturkontrastes auf eine Vergrößerung (lateral und bezogen auf die Dicke der Luftschicht) von vorhandenen Ablösungen hin.



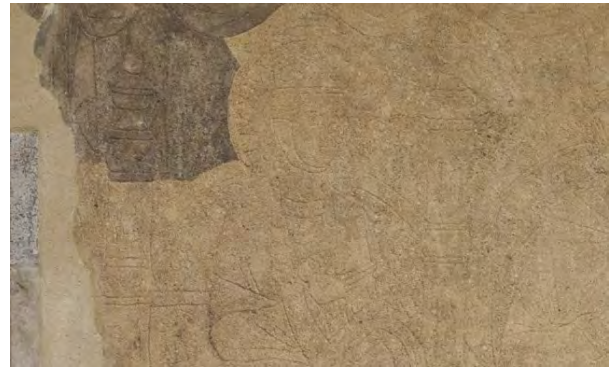
a) Messung am 20.4.2012



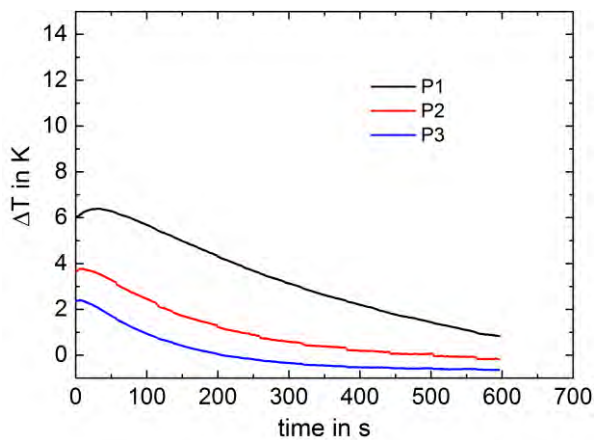
b) Messung am 21.10.2014



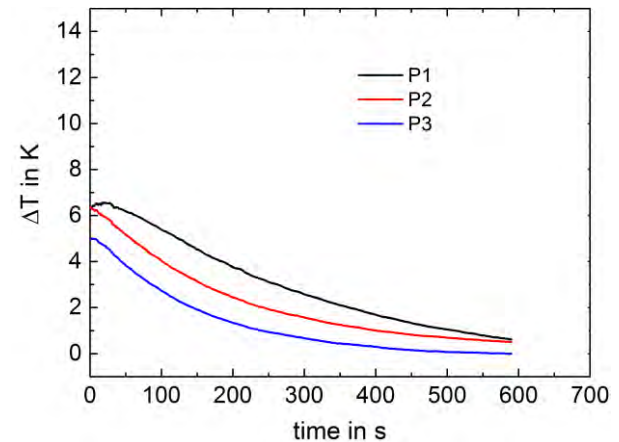
c) Foto am 20.4.2012



d) Foto am 21.10.2014



e) Differenztemperaturverlauf nach der Erwärmung am 20.4.2012



f) Differenztemperaturverlauf nach der Erwärmung am 21.10.2014

Bild 7.15. Vergleich der Thermogramme des oberen linken Bereiches des Zentralbildes nach 5 min Erwärmung mit einem Heizstrahler im April 2012 (a) und im Oktober 2014 (b). Die Fotos (c) und (d) zeigen den Messbereich zu den angegebenen Daten. Die Diagramme (e) und (f) zeigen den Temperaturkontrast der markierten Messstellen im Vergleich zu einer Referenzmessstelle im homogenen Bereich.

7.1.4 Datenfusion

Für die vier Einzelmessstellen mit aktiver Thermografie am Zentralbild vom 21.10.2014 wurde eine Fusion mit dem 3D-Datensatz vom Laserscanner und einem 2D-Bild vorgenommen. Ziel war es dabei, einen korrekten Lagebezug der Einzelmessungen zueinander herzustellen. Weiterhin sollten die Messergebnisse der Thermografie in Bezug auf die Objektoberfläche visualisiert werden. Wie im Abschnitt 5 schon beschrieben, werden zunächst die Nullbilder für die Datenfusion genutzt. Bei der Fusion mit dem 2D-Bild wurden die Thermografiedaten nicht mit den bekannten intrinsischen Parametern korrigiert. Dadurch können in diesem Beispiel die Unterschiede in der Lagegenauigkeit gegenübergestellt werden. Bild 7.16 zeigt das Ergebnis der Fusion von einem Thermogramm mit einem 2D-Bild und den 3D-Daten.

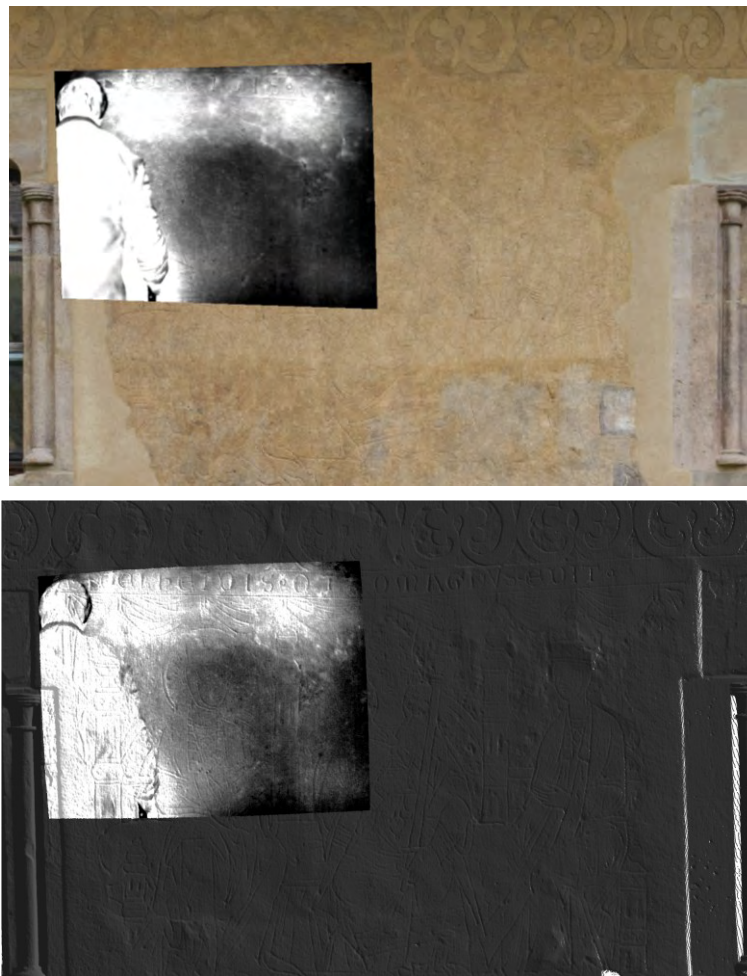


Bild 7.16. Im oberen Bild ist die Fusion eines Thermogramms mit einem 2D-Bild abgebildet. Das untere Bild zeigt die Fusion des Thermogramms mit dem 3D-Datensatz.

Bei beiden Verfahren wurden jeweils sechs korrespondierende Punktpaare ausgewählt. Beim Thermogramm sind die dabei die gleichen Pixelkoordinaten verwendet wurden. Die Fusion wurde für die drei weiteren Messstellen (Thermogramme) wiederholt. Bei der Visualisierung in Bild 7.17 sind die vier Einzelmessstellen nach jeweils 5 min Erwärmung mit einem Heizstrahler zu sehen.

In diesen Darstellungen des gesamten Zentralbildes ist insbesondere die Struktur des Mauerwerks unterhalb des Putzes gut zu erkennen. Hellere und damit wärmere Bereiche deuten auf Ablösungen hin, die sich z.T. zwischen den Steinen des Mauerwerks ausgebildet haben. Scharf umrissene dunklere Strukturen im oberen rechten Bereich des Bildes deuten eventuell auf frühere Mörtelergänzungen hin.

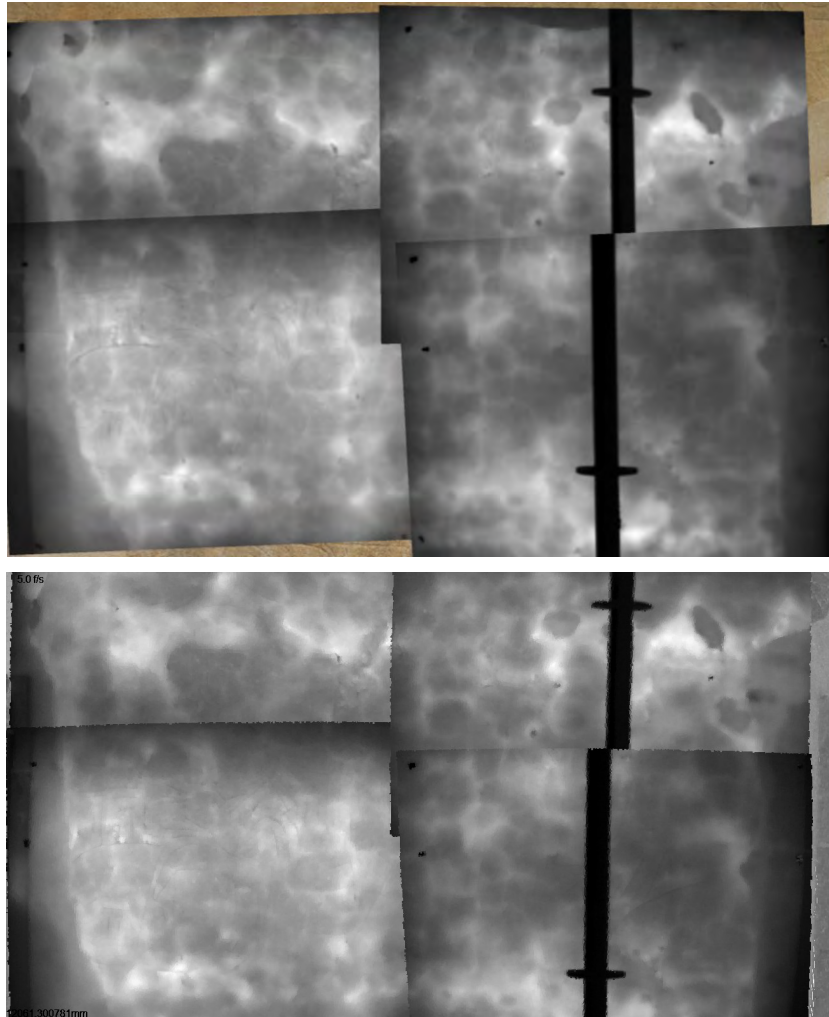


Bild 7.17. Thermogramme der vier Messbereiche im Zentralbild direkt nach der Erwärmung mit einem IR-Strahler. Oben: Fusion mit einem 2D-Bild. Unten: Fusion mit 3D-Datensatz.

7.2 Wandbild in Cobbelsdorf

7.2.1 Beschreibung der Fallstudie

Das Wandbild *Industrialisierte Landwirtschaft* von Erich Enge 1970/71, s. Bild 7.18 a, befindet sich am ehemaligen Kulturhaus der früheren *LPG Lenin* in Cobbelsdorf. Die Maße betragen H x B: 11 x 18 m². Der Eigentümer ist die Flämingland Touristik und Freizeit GmbH Cobbelsdorf. Das Kulturhaus, eine ehemalige Düngerhalle, ist eine Pfeilerkonstruktion, auf der das Dach aufliegt. Die Zwischenräume zwischen den Pfeilern sind mit Hohlblocksteinen aus DDR-Produktion vermauert. Bild 7.17 b zeigt die Innenansicht der außen bemalten Wand. Das Gebäude steht direkt an der Durchgangsstraße, die auch von schweren LKW und Landmaschinen befahren wird. Gegenüber mündet eine Nebenstraße in die Hauptstraße, so dass in geringem Abstand zur bemalten Fassade regelmäßig Fahrzeuge bremsen und anfahren, was mit Erschütterungen verbunden ist und Rissbildungen etc. begünstigt.

Auf den Untergrund wurde ein dünner, in der Stärke variierender zementhaltiger Putz auf einen Putzträger aus sog. Ziegeldraht aufgezogen. Bei der Malerei handelt es sich um Silikatmalerei auf Basis von „Silikat 68“ (industrieller Wandanstrich aus DDR-Produktion). Die Voraussetzungen für die Malerei waren nach Aussage von Erich Enge nicht optimal. So wurde der Putz beispielsweise nicht wie vereinbart drei Wochen vor der Bemalung aufgebracht. Augenscheinlich gab es auch technologische Probleme durch zu dünne Schichtstärken und zu geringe Festigkeit wegen eines zu geringen Bindemittelanteils. Dennoch wurde die Ausführung verlangt. Durch einen Schlagregen unmittelbar nach Fertigstellung waren zumindest Teile der Malerei abgespült worden, so dass umfangreiche Ergänzungen und Überarbeitungen notwendig wurden. Trotz unzureichender Voraussetzungen hat sich das Bild bis zur ersten Restaurierung 35 Jahre gehalten, was für die Ausführungsqualität von Erich Enge spricht. Die Konservierung und Restaurierung erfolgte im Oktober/November 2006 durch Dipl.-Rest. Peter Jung aus Weimar. Anlass für die Bearbeitung des Wandbildes war die Sanierung des Daches an der Kulturhauswand. Dabei wurde der Fokus auf die Sicherung und Konservierung des Putzes und der Wandmalerei gelegt.

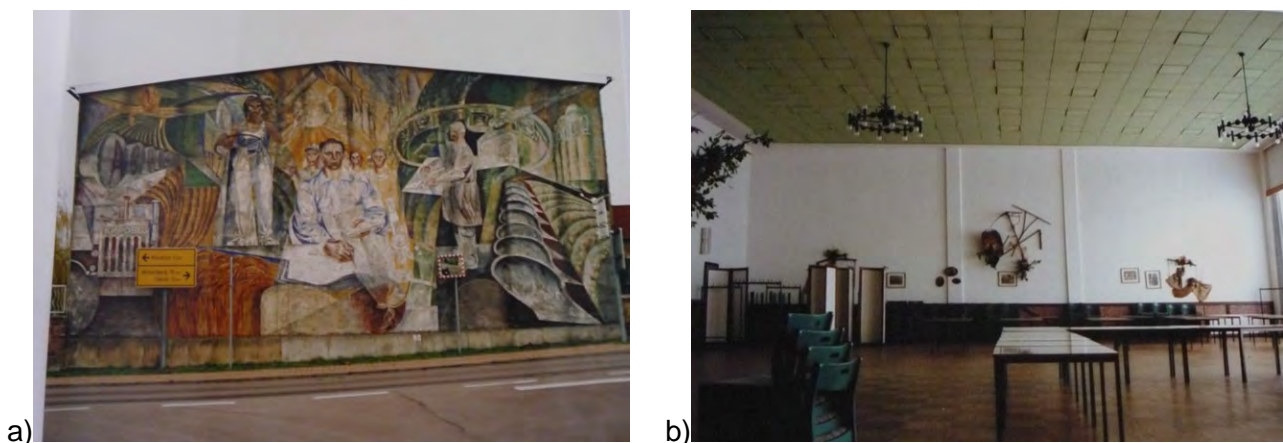


Bild 7.18. a) Wandmalerei *Industrialisierte Landwirtschaft* von Erich Enge 1970/71. b) Rückwand des Wandbildes mit den senkrechten Pfeilern.

Im Mauerwerk gab es vier vom Dach bis zum Sockel durchgehende, teilweise bis zu 4 cm breite und bis zu 12 cm tiefe Risse entlang der Fugen zwischen Pfeilern und Mauerwerk bzw. in deren Umfeld. In diesen Bereichen kam es zu irreversiblen Versprüngen in Wand und Putz. Dort waren mehrere Putzschollen lose im Gefüge. Der Restaurator beschrieb damals, dass die Konstruktion bis zu diesem Zeitpunkt augenscheinlich noch nicht zur Ruhe gekommen war. Teile des Ziegeldrahtes ragten durch die Putzoberfläche. Sie waren korrodiert und haben in ihrem Umfeld zu Mikrorissen im Putz geführt. Durch die Korrosion eines Zugankers war eine große Putzscholle am linken Bildrand abgesprengt worden. Teile des Putzes lagen hohl. Aufgrund der verschiedenen Bewegungen zwischen Baukonstruktion (Pfeiler/Mauerwerk) und Putz (mit Putzträger) entstanden im Umfeld des mittleren Risses großflächige hohlliegende Putzschollen. Besonders entlang der Fu-

gen des Mauerwerkes gab es kleine Risse, die wiederum Malschichtverluste zur Folge hatten. Teile der Putzoberflächen waren abgewittert, was mit weiteren Malschichtverlusten verbunden war. Die Malerei ist dort verloren. Durch den Bewuchs mit wildem Wein am rechten Bildrand wurde die Putzschicht angegriffen. Es konnten sich Moose und Flechten ausbilden, was wiederum furchenartige Putz- und Malschichtverluste nach sich zog. Die Malschicht war insbesondere durch die Laufspuren des bis zur Instandsetzung undichten Daches durch Auflagerungen, Inkrustationen und Korrosionsprodukte von Dachteilen verschmutzt.

Die aufwendige Sicherung des umfangreich hohlliegenden Putzes war eine wesentliche Maßnahme. Die Hinterfüllung der Hohlstellen erfolgte mit acrylatdispersionsgebundenem Mörtel (Rezeptur Romstedt Technologien für Restauratoren GmbH, Kirchheim; auf Basis von Funcosil Bindemittel AC von Remmers, Lönningen). Dafür wurden in den Putz ca. 30 Löcher à 5 mm bis zu den Hohlstellen gebohrt. Dorthinein wurde der Mörtel injiziert. Die Putzschollen wurden so wieder mit dem Mauerwerk verbunden. Der Restaurator beschreibt, dass dennoch perspektivisch durch unterschiedliche Bewegungen (z.B. durch LKW-Verkehr auf der Straße) neue Risse im Putz nicht ausgeschlossen werden können. Die flächigen Putzergänzungen erfolgten mit einem kalkgebundenen Putz. Der Rissverschluss erfolgte mit einem mineralischen und acrylatdispersionsgebundenen Mörtel. Der Schmutz wurde abgenommen. Die vom Dach stammenden Korrosionsprodukte konnten nicht entfernt werden. Die bräunlichen, zapfenförmigen Verfärbungen wurden retuschiert. Die farblichen Ergänzungen auf Putzergänzungen und verschlossenen Fugen wurden mit Silikatfarben retuschiert. Zur Schaffung einer vertretbaren Gesamtästhetik und Ablesbarkeit des Themas des gealterten und patinierten Bildes wurden störende Fehlstellen (Abwitterungen) in der Malschicht entsprechend der erkennbaren Farbflächen optisch geschlossen und Konturen ergänzt. Darüber hinaus wurden die sich im Bild abzeichnenden Risse entlang der Mauerwerksfugen farblich integriert. Unter dem, im Rahmen der Maßnahmen, abgenommenen Bewuchs war die Malerei so stark geschädigt, dass sie nur als Fragment sichtbar war. Dort sind erkennbare Formen ergänzt worden.

7.2.2 Aktive Thermografie

Messungen mit aktiver Thermografie mit Sonnenerwärmung am Wandbild in Cobbelsdorf erfolgten am 09.09.2014 und am 15.04.2015. Da die Wand wie in Bild 7.19 dargestellt nach Süd-Westen ausgerichtet ist, wurde an beiden Tagen die Wand ab ca. 11:00 Uhr von der Sonne bestrahlt. Die Bestrahlung endete mit dem Sonnenuntergang um 18:00 Uhr. Während sich jedoch am 09.09.2014 Sonne und Wolken häufig abwechselten, war es am 15.04.2015 durchgehend sonnig. Um diese Umgebungsbedingungen zu veranschaulichen, wurde die Leistungsdichte der Sonneneinstrahlung mit einem Strahlungssensor erfasst (Huxeflux PU11). Der zeitliche Verlauf ist für beide Messtage in Bild 7.20 dargestellt, gleichzeitig wurde auch die mittlere Wandtemperatur, die sich aus den erfassten Thermogrammen ergibt, aufgetragen. Die Oberflächentemperatur ist eindeutig mit der Strahlungsleistungsdichte korreliert.

Am 09.09.2014 verändert sich die Strahlungsleistungsdichte aufgrund der Wolken immer wieder sehr deutlich, der höchste Wert mit 800 W/m^2 wurde um 13:40 Uhr erreicht. Auf der Wandoberfläche wurde eine maximale, über das Thermogramm gemittelte Temperatur von 28°C erreicht.

Am 15.04.2015 waren keine Wolken vorhanden, so dass die Erwärmung durch die Sonne kontinuierlich erfolgt. Zu Beginn der Messungen betrug die Strahlungsleistungsdichte 600 W/m^2 , nahm dann zu und sättigte bei 1000 W/m^2 . Die Wandtemperatur nahm linear von $16,2$ bis $33,5^\circ\text{C}$ zu.

Die weiteren thermischen Umgebungsbedingungen sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

An beiden Messtagen wurden über einen längeren Zeitbereich zwischen 11:00 und 16:00 Uhr Temperaturmessungen des gesamten Wandbildes mit der in Tabelle 7.3 beschriebenen Mikrobolometer-IR-Kamera durchgeführt. Die IR-Kamera wurde dazu in einem Abstand von 31 m aufgebaut, s. Bild 7.21 a. Am ersten Messtag erfolgten zusätzlich Messungen an einem unteren Teilbereich des Messfeldes mit einer MCT Quantendetektor IR-Kamera, die ebenfalls in Tabelle 7.3 beschrieben wird. Diesen Aufbau zeigt Bild 7.21 b.

Tabelle 7.2. Thermische Bedingungen an den beiden Messtagen

Datum	Tageshöchsttemperatur	Mittlere Tageshöchsttemperatur der vorherigen 7 Tage	Mittlere Wandtemperatur um 11:30 Uhr	Mittlere Wandtemperatur gegen 16:00 Uhr	Sonneneinstrahlung
09.09.2014	19,0°C	23,4°C	23,2°C	25,0°C	wechselhaft
15.04.2015	23,0°C	15,6°C	16,2°C	33,5°C	sonnig

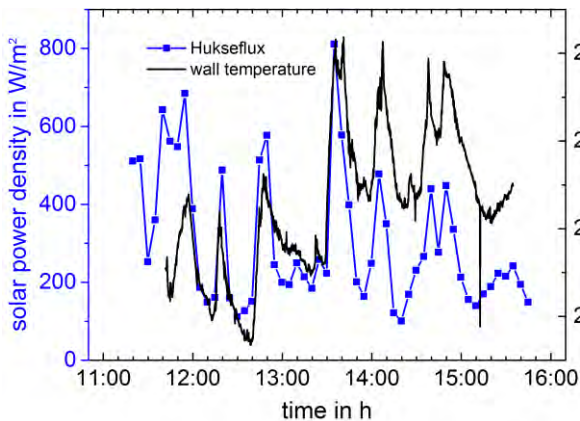


11:00 Uhr

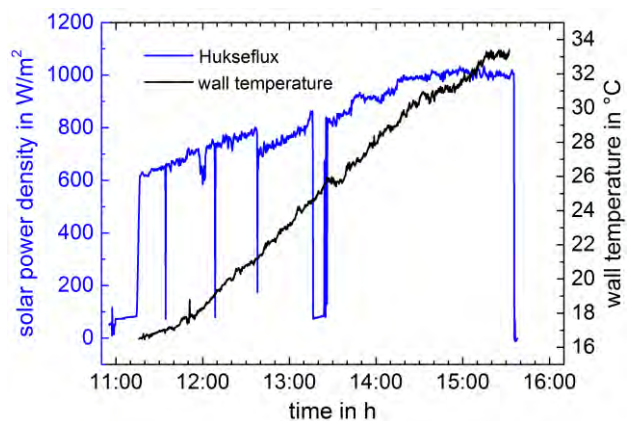


16:00 Uhr

Bild 7.19. Sonnenstand in Bezug zur Messfläche am 09.09.2014 zu zwei verschiedenen Zeiten, der mit Hilfe von suncalc.net bestimmt wurde.



9.9.2014



15.4.2015

Bild 7.20. Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Strahlungsleistungsdichte der Sonne im Vergleich zur mittleren Wandtemperatur an den beiden Messtagen. Die Schwankungen am 09.09.2014 sind auf den Wechsel von Sonne und Wolken zurückzuführen. Die Einbrüche am 15.04.2015 wurden durch Fußgänger, die die Sonneneinstrahlung vor dem Sensor abgeschattet hatten, verursacht.

Tabelle 7.3. Beschreibung der beiden Messbereiche und der verwendeten IR-Kameras

	gesamtes Wandbild	kleiner Teilbereich mit Rissen
Größe der Messfläche	11 × 18 m ²	1,5 × 2 m ²
IR-Kamera	Mikrobolometer, LWL	MCT, LWL
Detektorgröße	640 × 480	640 × 512
NETD	0,05 K	0,03 K
Bildwiederholrate	10 Hz	10 Hz
Zeitintervall	11:18 bis 15:45 Uhr	14:08 bis 14:45 Uhr



a)



b)

Bild 7.21. Positionen der IR-Kameras zur Erfassung des gesamten Wandbildes (a) und zur Erfassung eines Teilbereiches mit Rissen am Pfeiler (b).

Von den Thermografie-Sequenzen der Gesamtfläche beider Messtage wurde zunächst die Temperaturverteilung zu Beginn der Messung (Nullbild) abgezogen. Anschließend wurde jeweils ein Thermogramm zum Zeitpunkt 13:56 Uhr ausgewählt und in Bild 7.22 a und b dargestellt. Daher zeigen diese Thermogramme nur Temperaturänderungen, die seit dem Beginn der Messungen stattgefunden hatten. Die folgenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede können in diesen beiden Thermogrammen beobachtet werden:

- Der Temperaturanstieg im Thermogramm des Messtages am 15.04.2015 ist aufgrund der höheren und kontinuierlichen Einstrahlung der Sonne wesentlich höher.
- Im Thermogramm vom 15.04.2015 sind thermische Signaturen aufgrund der verschiedenen Farben der Wandmalerei und daher aufgrund der unterschiedlichen Emissivitäten an der Oberfläche wesentlich kontrastreicher als im Thermogramm vom 09.09.2014. Da das Thermogramm am 09.09.2014 in einem Strahlungsminimum (Wolken) aufgenommen wurde, ist hier der Einfluss direkter Reflexionen aufgrund von Emissivitätskontrasten deutlich geringer.
- In beiden Thermogrammen können unterhalb des Daches Strukturen beobachtet werden, die Rissen zugeordnet werden können. Diese erschienen kühler als die Umgebung, was damit erklärt werden kann, dass das Innere der Risse abgebildet wird, das sich noch nicht so stark wie die Oberfläche erwärmt hat.

- Im mittleren Bereich des Thermogramms vom 09.09.2014 können zwei vertikale Balken detektiert werden, die der Position der Stahlträger entsprechen. Auch diese Strukturen erscheinen kühler als die Umgebung. Dies lässt sich mit der höheren thermischen Diffusivität der Strahlträger erklären, die die Wärme besser ableiten als die Umgebung. Im Thermogramm vom 15.04.2015 ist nur ein Träger erkennbar, der andere wird durch die Emissivitätskontraste verdeckt.
- Zusätzlich zu den oben beschriebenen Strukturen können auch noch Merkmale erkannt werden, die der Ziegel- und Fugenstruktur unterhalb des Putzes entsprechen.

Des Weiteren wurde jeweils von einer Sequenz eine Puls-Phasen-Transformation durchgeführt, d.h. von jedem Pixel wurde von der Temperatur-Zeit-Funktion eine Fourier Transformation (FFT) durchgeführt. Von jeder Sequenz wurde dann ein niederfrequentes Bild (Bild 2 der FFT Sequenz) und ein hochfrequentes Bild (Bild 10 der FFT Sequenz) ausgewählt und ebenfalls in Bild 7.22 dargestellt. In den niederfrequenten Bildern in Bild 7.22 c und d sind jetzt für beide Sequenzen die Stahlträger sehr gut zu erkennen, die Emissivitätskontraste werden in dieser Darstellung fast vollständig unterdrückt. In den hochfrequenten Bildern in Bild 7.22 e und f erscheinen jetzt die Rissstrukturen deutlich. Risse sind sowohl unterhalb des Dachanschlusses als auch jeweils rechts und links neben den Stahlträgern zu erkennen. In den Ergebnissen der Messungen vom 15.04.2015 treten diese Rissstrukturen etwas deutlicher auf.

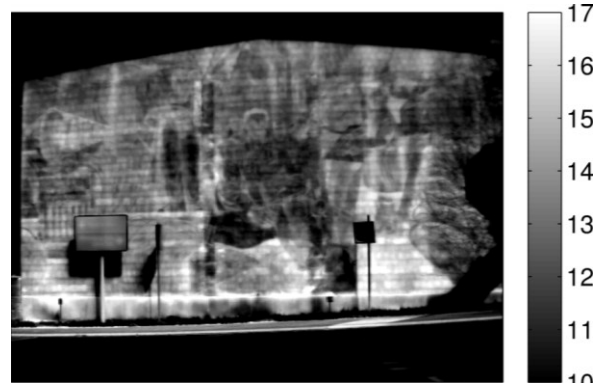
Thermogramme aus dem unteren Bereich des linken Pfeilers, die zeitgleich zu den Messungen am Gesamtbild mit der zweiten IR-Kamera erfasst wurden, sind in Bild 7.23 b und c dargestellt. Die beiden Thermogramme unterscheiden sich nur durch den Zeitpunkt, zu dem sie jeweils erfasst wurden. In beiden Thermogrammen sind die runden Marker aus selbstklebender Aluminiumfolie deutlich zu erkennen. Die beiden vertikalen Risse links und rechts neben dem Pfeiler erscheinen hier als wärmere Bereiche, was mit einer stärkeren Erwärmung der Rissflanken erklärt werden kann. Die Risse sind daher nicht so weit offen, dass die Kamera die Wärmestrahlung aus dem Inneren der Risse detektieren kann. In Bild 7.23. a ist zusätzlich ein Foto dieses Messbereiches zusammen mit dem überlagerten Riss dargestellt, der mit dem Risstrackingverfahren erfasst wurde. In Kapitel 7.2.3 finden sich dazu weitere Ausführungen.

09.09.2014



a) Thermogramm um 13:56 Uhr, Einheiten in K

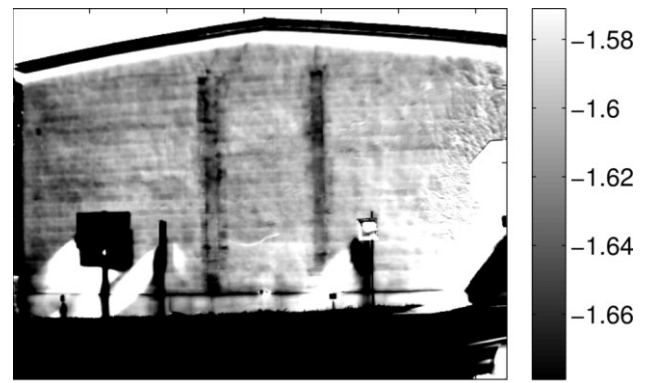
15.04.2015



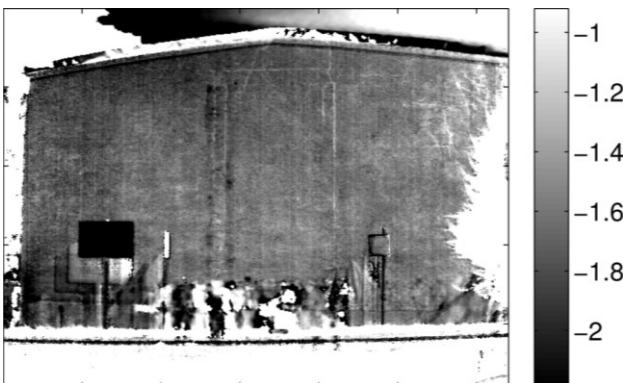
b) Thermogramm um 13:56 Uhr, Einheiten in K



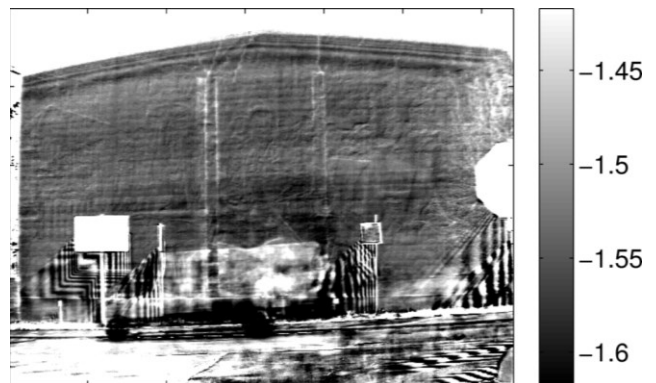
c) Phasenbild 2 der Sequenz



d) Phasenbild 2 der Sequenz



e) Phasenbild 10 der Sequenz

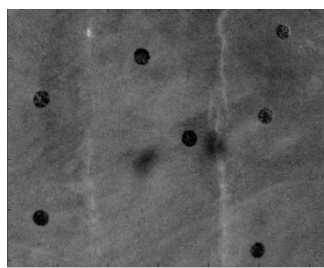


f) Phasenbild 10 der Sequenz

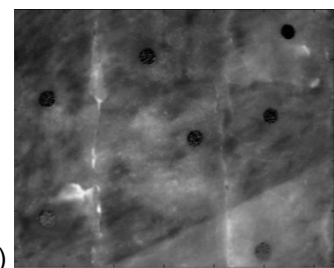
Bild 7.22. Darstellung der Ergebnisse an der Gesamtfassade an den beiden Messtagen. Die Thermogramme in a und b wurden hier nach Abzug des Anfangsbildes der Sequenz dargestellt. Die Phasenbilder sind das Ergebnis der Puls-Phasen-Transformation der jeweils gesamten Sequenzen.



a)



b)



c)

Bild 7.23. a) Foto des unteren Bereiches des linken Trägers mit überlagertem Rissverlauf, der durch das Ristrackingverfahren ermittelt wurde. b) und c) Zwei ausgewählte Thermogramme aus der Sequenz des Bereiches, die mit der zweiten IR-Kamera erfasst wurde.

7.2.3 Risskartierung

Am Fallbeispiel des Wandbildes in Cobbelsdorf wurden am 09.09.2014 Messungen mit dem Risstrackingverfahren durchgeführt. Es wurde der Bereich am linken Hauptträger ausgewählt, welcher eine Größe von ca. 2 x 3 m² hat. Dieser Bereich ist vom Boden mit einer Leiter zu erreichen.

Für den Aufbau des Trackingsystems wurde eine variable Befestigungsmöglichkeit der Kameras an einem Aluminiumrahmen gewählt. Mit Hilfe von Klemmen können die Kameras flexibel an dem Gestell befestigt werden, um eine optimale Abdeckung des Erfassungsbereiches zu erhalten. Das Gestell selbst ist vertikal angewinkelt und ermöglicht somit auch eine Erfassung in der Höhe (Bild 7.24, links). Für den Aufbau wurden sechs Kameras eingesetzt (Bild 7.24, rechts). Diese wurden mit unterschiedlichen Abständen zueinander am Rahmen des Gestells befestigt und auf den Messbereich an der Fassade ausgerichtet. Dabei wurden jeweils drei Kameras auf den oberen und drei Kameras auf den unteren Bereich fokussiert (Bild 7.25, rote und blaue Bereiche), wobei die Überlappung in der Mitte für eine durchgehende Erfassung erforderlich ist.



Bild 7.24. Aufbau des Risstrackingsystems bei der vor-Ort Messung in Cobbelsdorf. Es wurden sechs Infrarotkameras an einem geneigten Gestell angebracht.

Um die aufgenommenen Daten für die Datenfusion nutzbar zu machen, sind mehrere Referenzpunkte nötig, welche sowohl vom Trackingsystem, als auch z.B. in 2D-Fotos bestimmbar sein müssen. Die Referenzpunkte ermöglichen die Registrierung der Messdaten verschiedener Messsysteme zueinander und somit auch eine Überlagerung der 3D-Rissdaten auf einem 2D-Foto. Für die Messung in Cobbelsdorf wurde eine selbstklebende Folie zur Anbringung von Referenzpunkten auf der Fassade verwendet. Die Folie wurde kreisrund ausgeschnitten und mit einem Loch in der Mitte versehen (Bild 7.26). Insgesamt wurden zehn Marker gleichmäßig auf der Fläche des Objektes befestigt. Die Marker sind in den Aufnahmen der Thermografie sowie in den 2D-Fotos sichtbar (Bild 7.25).



Bild 7.25. Schematische Darstellung der Erfassungsbereiche der sechs IR-Kameras. Der Winkel bildet den Koordinatenursprung für den Messraum des Trackingsystems.



Bild 7.26. Ausgeschnittener Marker aus einer selbstklebenden reflektierenden Folie als Referenzpunkte.

Das Risstrackingsystem wird zu Beginn mit der vom Hersteller des Kamerasystems vorgeschriebenen Methode kalibriert. Für eine erfolgreiche Kalibrierung mit einer hinreichenden Qualität ist es wichtig, dass die Erfassungsbereiche der einzelnen Kameras möglichst miteinander übereinstimmen. Aufgrund der Höhe des gewünschten Erfassungsbereiches konnte dies lediglich in der Mitte des Objektes gewährleistet werden. Diese führte vor Ort anfänglich zu Problemen bei der Kalibrierung und erforderte eine mehrfache Anpassung der Kamerapositionen und Kameraausrichtungen für einen erfolgreichen Kalibrierungsvorgang.

Als Tastwerkzeug wurden der Messstab mit drei reflektierenden Kugel-Markern und einer geraden Spitze gewählt. Dieser wurde bereits vor dem Messeinsatz kalibriert und getestet.

Aufgrund der Lage des Wandbildes liegt je nach Tageszeit eine direkte Einstrahlung der Sonne vor. Sonnenstrahlung enthält einen hohen Infrarot-Anteil, was Störungen beim Trackingsystem verursachte. Überstrahlung oder auftretende weitere Lichtpunkte führten dazu, dass das Tastwerkzeug teilweise nicht mehr erfasst werden konnte und somit bei direkter Sonneneinstrahlung eine Datenerfassung nicht mehr möglich war. Eine Abschattung über dem Objekt war daher unter diesen Gegebenheiten erforderlich.

Es wurden an der Wandmalerei zunächst die beiden vertikalen Hauptrisse erfasst. Dabei wurde eine kontinuierliche Datenaufnahme genutzt, die automatisch Datenpunkte mit einem Abstand von jeweils 2 mm zueinander erfasst. Einige Positionen wurden mit einem zeitlichen Abstand und einer veränderten Orientierung des Tastwerkzeuges mehrfach aufgenommen. In der Auswertung sollte hierüber die Reproduzierbarkeit der Messung untersucht werden.

Zusätzlich zu den Hauptrissen wurden Querrisse und die größten Löcher vermessen. Bei den Löchern wurden sowohl die Oberflächenkontur, als auch Punkte in der Tiefe aufgenommen, sofern diese mit der Tastspitze erreicht werden konnten. Für die Untersuchung der Eignung des Risstrackings für die Erfassung von Versätzen entlang der Fassadenoberfläche (z.B. aufgrund von Putzablösungen) wurden im oberen Bereich horizontale Linienzüge senkrecht zum Rissverlauf erfasst. Es wurden hierfür Bereiche mit besonders ausgeprägten Versätzen (ca. 2 mm) ausgewählt. Auch hier wurden kontinuierliche Aufnahmen genutzt und das Tastwerkzeug möglichst exakt über die Oberfläche geführt.

Abschließend wurden die Referenzpunkte für die Datenfusion aufgenommen. Es wurden hier zunächst visuell markante Punkte auf der Fassade genutzt und anschließend die Punkte der zehn an-gebrachten Referenzpunkte (Kreismarker) erfasst.

Zum Testen der Datenfusion der Rissdaten mit 2D-Fotos wurden Fotos vom Messbereich auf der Fassade aus mehreren Sichtwinkeln aufgenommen. Es war hierbei darauf zu achten, dass mindestens sechs Marker gut verteilt im Bild sichtbar sind. Andernfalls ist eine korrekte Registrierung und Überlagerung nicht möglich.

Ein zu betrachtender Aspekt bei den Untersuchungen am Fallbeispiel der Wandmalerei in Cobbelsdorf war die Eignung des Tracking auch für die Erfassung weiterer oberflächennaher Merkmale. Neben der Kartierung der Risse in Form einer 3D-Punktwolke und deren Fusion mit 2D-Fotos wurde die Erfassung von Löchern/Aushöhlungen in der Fassade und deren Ausprägung untersucht. Zunächst wurde die äußere Kontur des Loches an der Wandoberfläche aufgenommen. Anschließend wurden Punkte in der Tiefe erfasst, um sowohl die innere Struktur, als auch die mögliche Lochtiefe zu messen. In Bild 7.27 (rechts) wurde die Kontur eines Loches im unteren Bereich des rechten Hauptrisses auf ein 2D-Foto projiziert. Durch die Auswahlmöglichkeit der Risspunkte bei der Projektion können die gewünschten Strukturen einzeln visualisiert und über Farbgebung klassifiziert werden. Zusätzlich zu der 2D-Darstellung kann aus den Daten für dieses Loch auch die Tiefe gemessen werden. Wurden zwei 3D-Punkte ausgewählt, kann der Abstand dieser beiden Punkte im 3D-Raum gemessen werden (Bild 7.27, links).

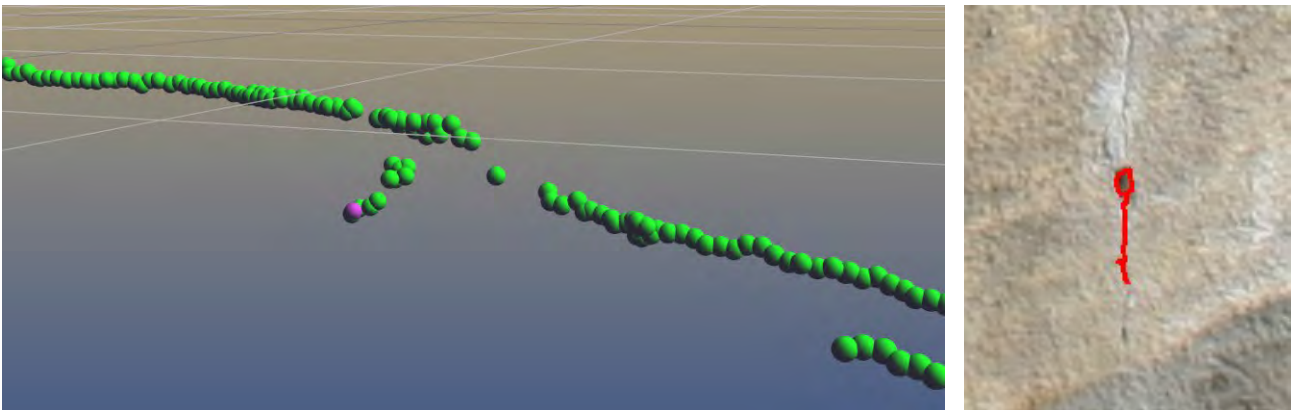


Bild 7.27. Punktwolke (links) und 2D-Projektion (rechts) eines Loches (gemessene Tiefe von 2,4 cm) im Bereich des rechten Hauptrisses.

Ein weiteres Beispiel für Oberflächenschäden am Wandbild in Cobbelsdorf ist in Bild 7.28 dargestellt. Es liegen hier zwei Löcher im mittleren Bereich des linken Hauptrisses vor. Auch hierfür wurde eine Fusion mit dem 2D-Foto vorgenommen sowie anhand der 3D-Messdaten für das obere Loch eine Tiefe von 1,23 cm ermittelt.

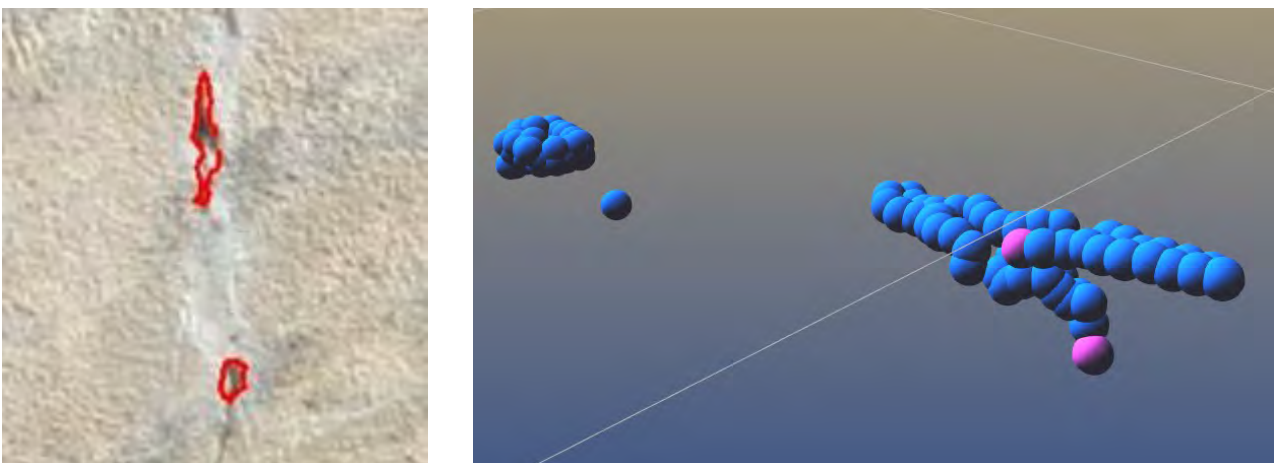


Bild 7.28. 3D-Visualisierung (rechts) und 2D-Projektion (links) erfasster Lochstrukturen im Bereich des linken Hauptrisses. Für das obere Loch wurde eine Tiefe von 1,23 cm ermittelt.

7.2.4 Datenfusion

Für die Auswertung der erfassten Messdaten des 3D-Risstrackings wurde eine Datenfusion mit den aufgenommenen 2D-Fotos und die verbesserte Funktion für die Korrespondenzfindung genutzt. Es kann somit die Registrierung zwischen einem Foto und den 3D-Rissdaten bzw. Punktwolken schnell hergestellt werden. Für weitere Fotos sind lediglich die 2D-Position der Referenzpunkte in dem neuen Bild anzupassen. Im Fall des Wandbildes erwiesen sich die 2D-Aufnahmen des Objektes als teilweise schwierig für die Referenzpunktfindung. Wie in Bild 7.29 zu sehen, ist das ausgestanzte Loch, welches als Referenzpunkt dient, nicht eindeutig erkennbar. Es kann daher bei der Registrierung und damit bei der Überlagerung zu Abweichungen kommen.



Bild 7.29. Ausschnitt eines Markers (Referenzpunkt) aus einem 2D-Foto des Wandbildes.



Bild 7.30. Überlagerung der Hauptrisse und der Querrisse (3D-Daten) auf ein 2D-Foto der Wandmalerei.

Das Ergebnis der Datenfusion der 3D-Rissdaten (ermittelt aus den Messreihen) und einem 2D-Foto ist in Bild 7.30 zu sehen. Vor allem bei den Querrissen können feine Risse, welche in den Fotos nicht ersichtlich sind, durch die Datenfusion im Bild sichtbar gemacht werden. Für die Überlagerung können die 3D-Punkte sowohl als einzelne Punkte auf das Bild gezeichnet werden, als auch als zusammenhängende Linienzüge. Diese Visualisierungsart eignet sich vor allem bei Rissen oder Konturen von Flächen.

Eine Fusion der Thermografieaufnahmen, der 3D-Rissdaten und einem Foto (für die bessere Lokalisierung) ist in Bild 7.31 zu sehen. Es wurden hier Aufnahmen im Nahbereich am linken Hauptträger vorgenommen. Die an der Fassade angebrachten Marker wurden als Korrespondenzen genutzt. Der 3D-Riss wurde zuvor in einem separaten Bild mit transparentem Hintergrund überlagert und gespeichert.

In Bild 7.32 wurde ein Foto mit zwei Phasenbildern der Thermografie von unterschiedlichen Messungen überlagert, wobei für die Visualisierung die Phasenbilder diagonal beschnitten wurden, um beide Aufnahmen gleichzeitig zu visualisieren. In dem Fusionsmodul würde man für die Auswertung den Transparenzwert der Phasenbilder anpassen, um das dahinterliegende Bild sichtbarer zu machen. In dem Phasenbild werden vor allem die beiden Hauptträger sichtbar und die im oberen Bereich der Träger vorhandenen Risse.

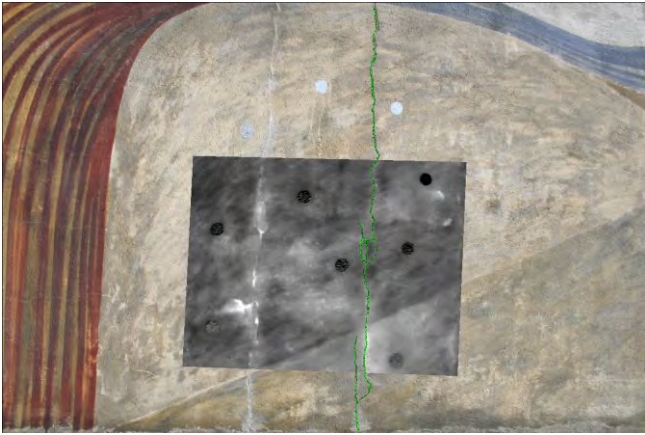


Bild 7.31. Überlagerung eines Fotos mit einem Thermogramm (grau in Bildmitte) mit den 3D-Rissdaten (grüne Kurven).



Bild 7.32. Überlagerung zweier Phasenbilder der Thermografie von verschiedenen Messungen und Standorten (links: 09.09.2014, rechts: 15.04.2015) auf ein Foto.

7.3 Fliesenbild in Halle-Neustadt

7.3.1 Beschreibung der Fallstudie

Die Fliesenwandbilder von Josè Renau aus glasurbemalten Fliesen sind an den Treppenhausrisalitlen des ehemaligen Internatgebäudes (Treppenhäuser), Am Stadion 5 in Halle-Neustadt, angebracht. Die Bilder sind jeweils 37 m lang und 7 m breit, s. Bild 7.33. Die einzelne Fliese misst $15 \times 15 \times 0,9 \text{ cm}^3$. Insgesamt gibt es pro Bild 232 Reihen à 47 Fliesen.



Bild 7.33. Wandbilder von Josè Renau aus glasurbemalten Fliesen in Halle-Neustadt.

Den Träger der Wandbilder bilden Betonfertigteile. Die Fliesen sind im Dünnbett-Klebeverfahren aufgebracht. Die Dehnungsfugen wurden ursprünglich in DDR-üblichem MORINOL-Kitt (asbesthaltig) wasserdicht verschlossen.

1968 erhielt Lothar Scholz den Auftrag, die Entwürfe von J. Renau auf Fliesen in Glasurmalerei zu übertragen.

Es liegen die Dokumentation der Voruntersuchungen und ein Restaurierungskonzept aus dem Jahr 2005 von der Firma Wandwerk Berlin und Lothar Scholz vor. Ob tatsächlich Restaurierungsarbeiten zumindest am südlichen Bild (in Bild 7.33 links) ausgeführt wurden, konnte bislang nicht

eindeutig ermittelt werden. Das nördliche Bild (in Bild 7.33 rechts) ist auf jeden Fall noch nicht restauriert worden. Hier sind großflächige Sicherungen zu erkennen. Bild 7.34 zeigt Einzelaufnahmen der beiden Wandbilder, Bild 7.35 die Bildsicherung durch Netze am nördlichen Bild und die Signaturen des Entwurfs und der Ausführung.



Bild 7.34. Südliches (a, Aufgang 1) und nördliches (b, Aufgang 2) Wandbild.

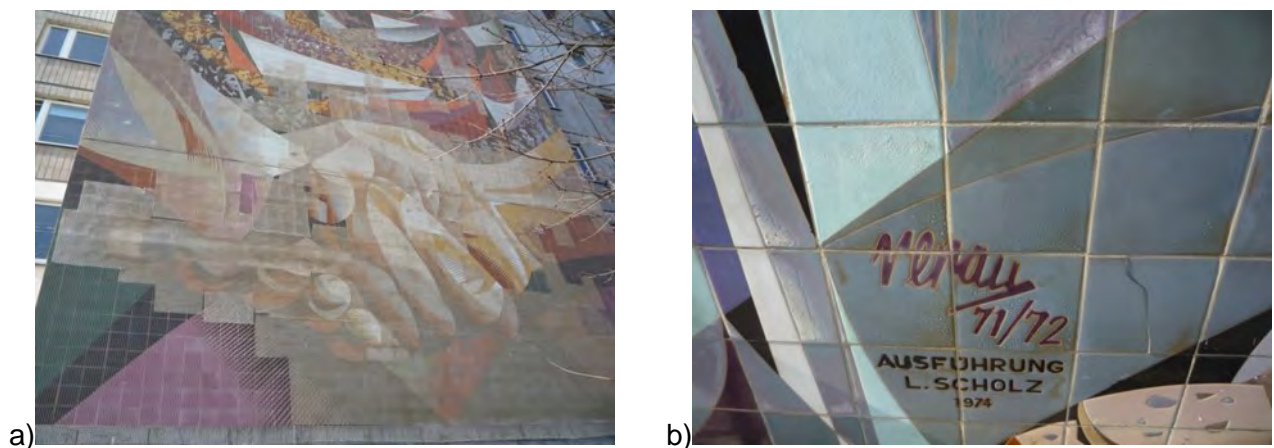


Bild 7.35. a) Bildsicherung durch Netz am nördlichen Wandbild. b) Signatur.

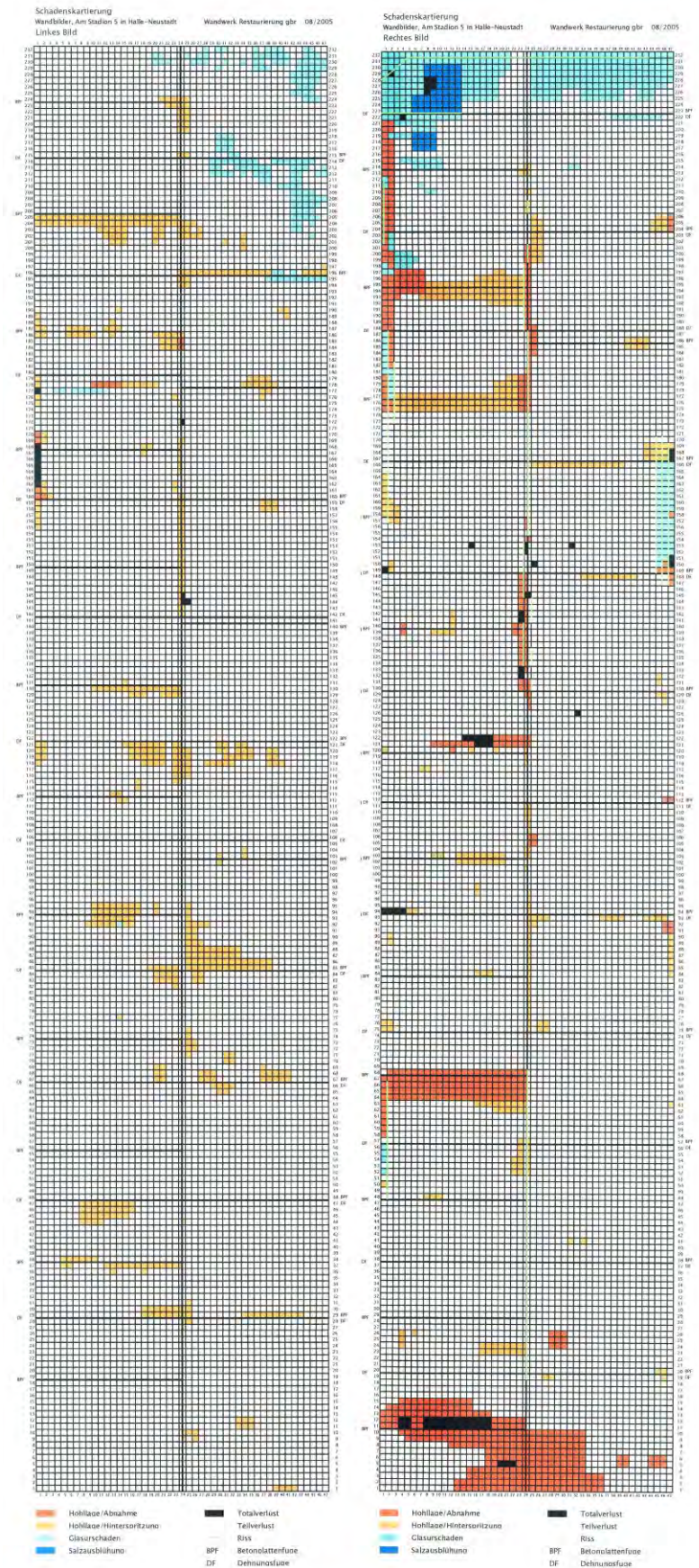


Bild 7.36. Schadensplan der beiden Wandbilder. Die roten und gelben Farbtöne markieren Hohlräume unterschiedlicher Stärke, die blauen Farbtöne Glasurschäden und Salzausblühungen. (Quelle: Firma Wandwerk, Berlin)

Ein defekter Dachanschluss hatte einen erhöhten Wassereintrag in die Wandbilder zur Folge. Durch defekte Randbereiche und offene Fugen konnte Wasser eindringen und zu Frostschäden und zur Lösung von Salzen aus dem Trägermaterial führen. Aufgrund der mangelhaften Statik des Bildträgers sind Hohllagen und Fehlstellen entstanden. Diese gegossenen und versinterten Fertigbauteile hatten vor dem Fliesenauftrag keinen Haftspritzbewurf erhalten, was der hauptsächliche Grund für den mangelnden Haftverbund und folglich die herausgelösten Fliesen ist (siehe Schadensplan in Bild 7.36). Es gibt Risse in der Glasur, Craqueles und offene Glasurschäden. Es wurde bei der Schadensaufnahme beobachtet, dass die Dehnungsfugen nicht mit Betonteilfugen übereinstimmen. Die Folge sind Stauchungen, die von der Bildfläche nicht übernommen werden können. Das wiederum hat Absprengungen und Aufwölbungen der Fliesen zur Folge. Die Fliese löst sich dann zumeist mit dem Setzmörtel vom Träger. Weiterhin ragen korrodierte Bewehrungsstäbe aus den Betonteilen. In der Mitte der Wandbilder verläuft eine senkrechte Dehnungsfuge. Dafür wurden ursprünglich bemalte Fliesen zerbrochen. Ungefähr 50 % der Dehnungsfugen sind schadhaft. Die übrigen Fugen, die in einem relativ weichen Mörtel ausgeführt wurden, sind in einem guten Zustand. Manche Fliesen weisen eine Salzbelastung auf.

An den hohlliegenden Fliesen sollen Hinterspritzungen (Injektion) von Ledan D1 oder Aida Injektionsleim von Remmers erfolgen. Alternativ wurde die Abnahme und der neue Versatz der Fliesen beschrieben. Hierfür ist ein elastischer, kunststoffvergüteter, mineralischer Verlegemörtel (PCI Nanoflott Flex) empfohlen worden. Die neuen Dehnungsfugen sollen mit Polyurethan-Dichtstoff ausgeführt werden. Die übrigen schadhaften Fugen sind mit elastischem Fugenmörtel (PCI Elritan 100) zu verschließen. Die Oberflächenreinigung soll mit einer Seifenlösung und Kompressen erfolgen. Es wurde vorgesehen, den gesamten Fugenbereich nach der Reinigung mit KSE Funcosil 100 OH zu festigen. Salzbelastete Fliesen sollen abgenommen und im Wasserbad entsalzt werden. Anschließend wird ggf. eine Acrylharzvolltränkung empfohlen. Der offene obere Bildabschluss und die seitlichen Bereiche der Wandbilder sind mit einer kunstharzvergüteten, mineralischen Spachtelmasse (und Grobmörtel) zu verschließen. Die freiliegende Bewehrung soll nach dem Entrosten und dem Auftrag eines Korrosionsschutzes wieder mineralisch eingebettet werden. Bei Totalverlust von Fliesen wird eine Neuanfertigung angestrebt.

7.3.2 Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung

Messungen mit aktiver Thermografie mit Sonnenerwärmung erfolgten am 06.05.2015 und am 06.08.2015. Die Mikrobolometerkamera wurde in einem Abstand von 50 bis 61 m aufgebaut. Die jeweiligen Umgebungsbedingungen sowie die Messzeiträume sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst. In Bild 7.37 sind die Sonnenstände an den beiden Messtagen jeweils zu Beginn der Aufnahme einer Messsequenz dargestellt. Da die Fassade nach Osten ausgerichtet ist, wird diese bereits während des Sonnenaufgangs bestrahlt und liegt am frühen Nachmittag im Schatten.

Da die Thermogramme aufgrund der hohen Reflektivität der Fliesen, die auch noch von der Farbe beeinflusst wird, sehr stark von Emissivitätskontrasten beeinflusst werden, sind im Folgenden nur Differenzthermogramme mit einem Zeitabstand von bis zu 600 s zwischen den Differenzbildern dargestellt. Da wesentliche Schäden nur am 2. Aufgang zu erkennen waren, wird auch nur dieser im Folgenden dargestellt und diskutiert.

Tabelle 7.4. Umgebungsbedingungen an den beiden Messtagen

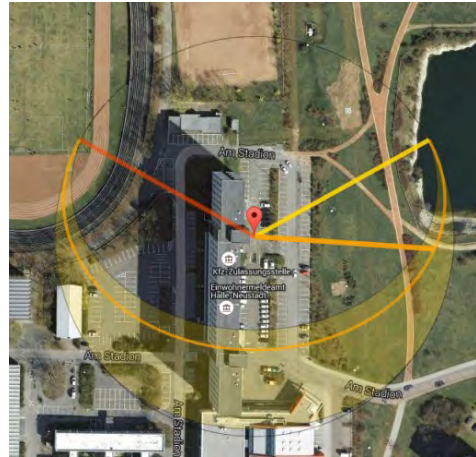
Datum	Tageshöchsttemperatur	Mittlere Tageshöchsttemperatur der vorherigen 7 Tage	Strahlungsleistungsdichte	Zeitraum
06.05.2015	21,0°C	17,5°C	120 bis 1210 W/m ² Teilweise geschlossene Wolkendecke	10:00 bis 13:30 Uhr
06.08.2015	35,0°C	25,1°C	280 bis 820 W/m ² Ohne Bewölkung	08:40 bis 12:30 Uhr

06.05.2015



a) 10:30 Uhr am Aufgang 1

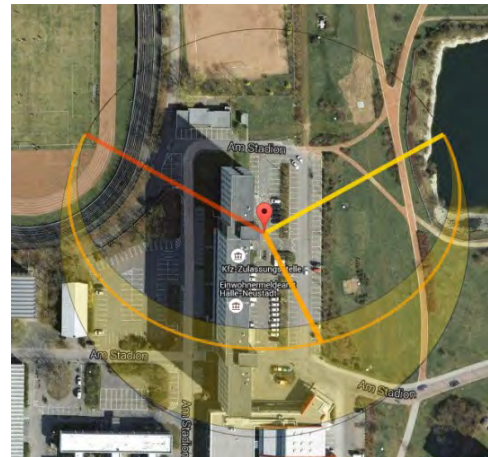
06.08.2015



c) 8:40 Uhr am Aufgang 2



b) 11:30 Uhr am Aufgang 2



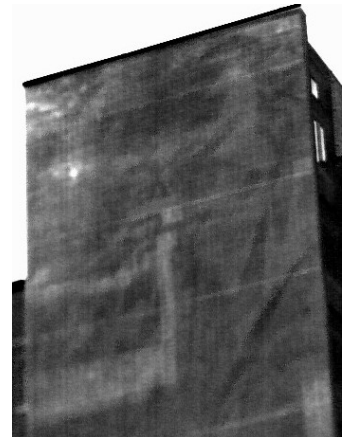
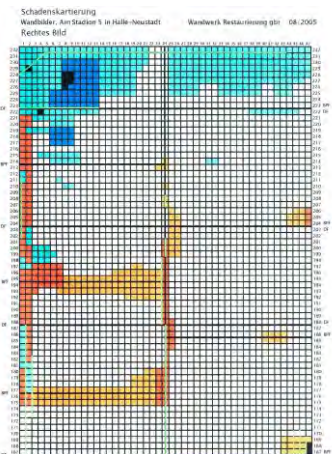
d) 12:00 Uhr am Aufgang 2

Bild 7.37. Sonnenstand an der Fassade des Gebäudes in Halle-Neustadt an den beiden Messtagen jeweils zu Beginn der erfassten Sequenzen.

Bild 7.38 zeigt eine Zusammenstellung der Fotos, Schadenkartierung und aussagekräftigen Differenzthermogramme dreier übereinanderliegender Ausschnitte aus dem Fliesenbild des 2. Aufgangs (rechter Aufgang). Aus dem Vergleich können die folgenden Beobachtungen zusammengefasst werden:

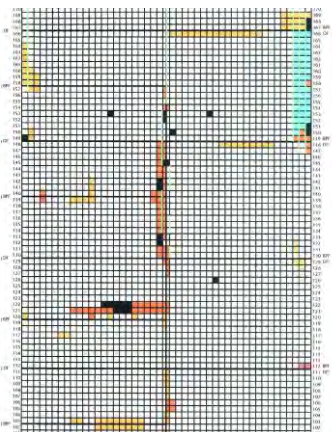
- In den Fotos sind die aufgeklebten Netze zur Bildsicherung klar zu erkennen. Diese zeichnen sich auch in den Differenzthermogrammen als wärmere Bereiche ab.
- Im oberen Bereich sind im Differenzthermogramm insbesondere Fliesen mit Salzausblühungen und mit Glasurschäden in der oberen linken Ecke deutlich als wärmere Bereiche zu erkennen. Sehr warme Einzelfelder könnten auch auf einen Totalverlust hindeuten, der in der Schadenkartierung nicht dargestellt wird.
- Im mittleren Bereich sind die in der Schadenkartierung als Totalverlust markierten Bereiche im Differenzthermogramm deutlich als sehr warme Bereiche zu sehen.
- Im unteren Bereich erscheint insbesondere der Bereich mit dem großen Sicherheitsnetz sehr warm, was auf die Hohllagen der dahinter liegenden Fliesen hindeuten könnte, oder aber auch durch die teilweise Ablösung des Netzes verursacht sein könnte.

Aufgang 2, oben



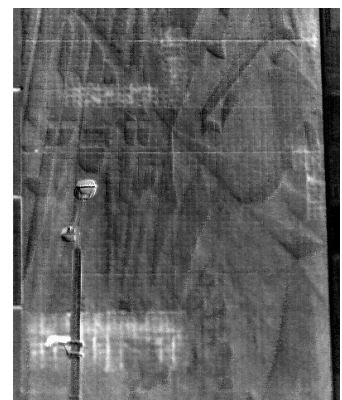
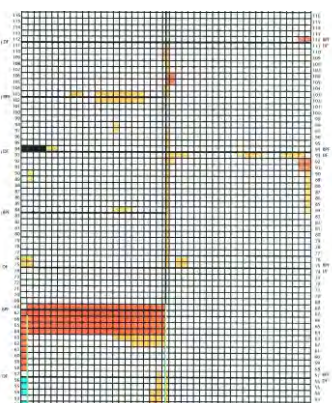
Messung vom 06.05.2015

Aufgang 2, Mitte



Messung vom 06.08.2015

Aufgang 2, unten



Messung vom 06.08.2015



Bild 7.38. Ausschnitte dreier übereinanderliegender Teilbereiche der Fliesenfassade des 2. Aufgangs. In der linken Spalte sind jeweils das Foto des Messbereiches, in der mittleren Spalte das Ergebnis der Schadenkartierung von 2005 und in der rechten Spalte die Differenzthermogramme dargestellt.

7.4 PV-Module als Fassadenelemente beim EffizienzhausPlus in Berlin

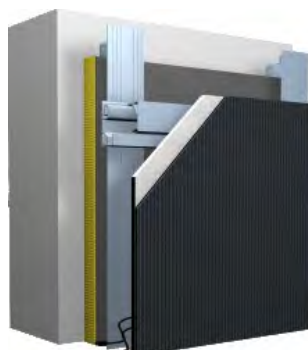
7.4.1 Beschreibung der Fallstudie

Das EffizienzhausPlus mit Elektromobilität in der Fasanenstraße 87 a, 10623 Berlin, wurde 2011 geplant und errichtet und von der Forschungsinitiative Zukunft Bau des BMUB gefördert, s. Bild 7.39 a. Das Projekt ist ein Entwurf der Arbeitsgemeinschaft der Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek mit dem Institut für Gebäudeenergetik, dem Lehrstuhl für Bauphysik, dem Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Werner Sobek Stuttgart und Werner Sobek Green Technologies. EffizienzhausPlus bedeutet, dass das Haus mit Wärmepumpe und Fotovoltaik-Anlage auf Dach und Fassadenflächen mehr Energie produziert als seine Bewohner verbrauchen. Die Energie, die das Haus erzeugt, wird in Hochleistungsbatterien gespeichert und unter anderem dazu genutzt, die Elektrofahrzeuge an der hauseigenen Ladestation zu betanken. Während auf dem Dach kristalline Solarzellen eingesetzt wurden, wurden an der Süd-West-Fassade PV-Fassadenelemente mit Dünnschichtzellen eingesetzt. Dabei handelt es sich um PV-Fassadenelemente des Typs GeneCIS-WSG0036E080 mit einer jeweiligen Abmessung von $605 \times 1205 \times 35 \text{ mm}^3$. Insgesamt wurden an dieser Fassadenfläche 2×50 Stück PV-Fassadenelemente mit einer Gesamtleistung von ca. 8 kWp eingebaut. Diese wurden als hinterlüftete Fassade mit dem System StoVentec ARTline Invisible installiert, s. Bild 7.39 b und c. Hier befindet sich die Dünnschichtsolarzelle zwischen einem Deckglas und einem Substratglas, das wiederum auf eine Trägerplatte aufgeklebt wird, die über Trägerprofile an die Wärmedämmfassade und Außenwand montiert wird.

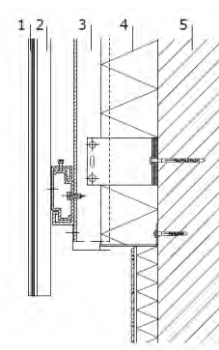
Die Fragestellung im Projekt bezieht sich auf die Überprüfung der Verklebung zwischen der Substratglasplatte und der Trägerplatte. Mögliche Ablösungen könnten hier zum Abfallen der PV-Module führen, die Überprüfung wäre demnach eine sicherheitsrelevante Fragestellung.



a)



b)



c)

Bild 7.39. a) EffizienzhausPlus mit Süd-West-Fassade und PV-Modulen. Quelle: http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Haus/effizienzhaus-plus-haus_node.html

b) Schematische Darstellung der Aufhängung, Quelle: http://www.sto.de/de/produkte/fassadendaemmsysteme/stoventec_artline_invisible.html

c) Querschnitt der Aufhängung mit 1: Deckglas, PV-Dünnschichtzelle, Substratglas; 2: Trägerplatte; 3: T-Profil; 4: Dämmung; 5: Außenwand; Quelle: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/EHP/veranstaltung_03_download_05.pdf?__blob=publicationFile

7.4.2 Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung

Untersuchungen am EffizienzhausPlus erfolgten am 09.10.2014 im Zeitraum von 15:10 bis 16:00 Uhr bei größtenteils bewölktem Himmel und am 20.10.2014 von 17:45 bis 19:05 Uhr während des Sonnenuntergangs bei locker bewölktem und klarem Himmel. Zur Erfassung der Temperatur auf der Glasoberfläche der PV-Module wurde eine Mikrobolometerkamera mit 640×480 Pixeln verwendet, die im Spektralbereich 8 bis $14 \mu\text{m}$ empfindlich ist. In diesem Spektralbereich erscheint Glas opak, so dass tatsächlich die Oberflächentemperatur gemessen werden kann. Voraussetzung ist jedoch auch eine geringe Reflexion der Oberfläche, da störende Reflexionen zu einer scheinbaren Änderung der tatsächlichen Temperatur führen. Da Glas jedoch spiegelnd reflektiert, sollte ein

Betrachtungswinkel von 90° zur Oberfläche vermieden und eher auf 30 bis 65° ausgewichen werden. Der Abstand der Kamera zur Hauswand betrug $5,7$ m. Die Lufttemperatur betrug am 09.10.2014 23°C und am 20.10.2014 $15,5^\circ\text{C}$, die entsprechenden Oberflächentemperaturen, die mit einem Kontaktthermometer gemessen wurden, lagen zu Beginn der Messung bei 25°C und 17°C . Der Stand der Sonne zum Messzeitpunkt am 09.10.2014 ist in Bild 7.40 a, die Position der IR-Kamera während der Messung in Bild 7.40 b dargestellt.

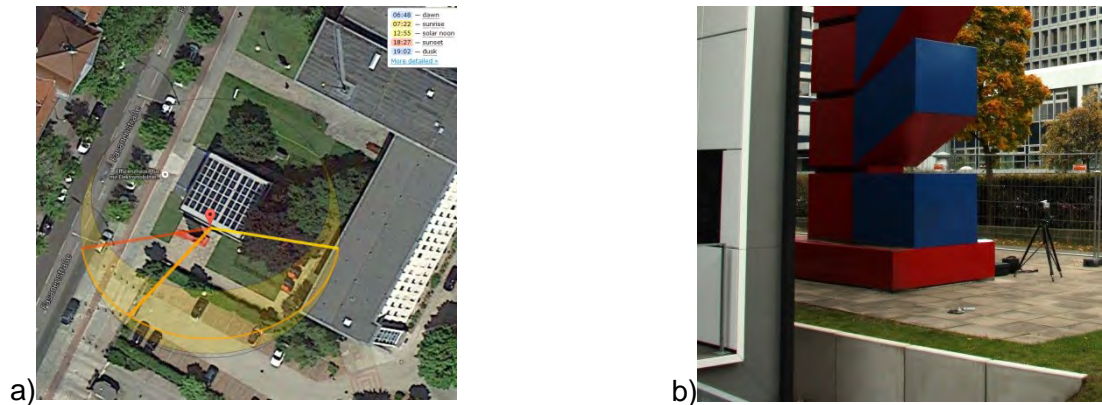


Bild 7.40. a) Stand der Sonne an der Südwestfassade des EffizienzPlus-Hauses am 09.10.2014 um 15:30 Uhr (nach: www.suncalc.de), wenn der Himmel nicht bewölkt gewesen wäre. b) Positionierung der IR-Kamera vor der Südwest-Fassade.

Bild 7.41 a zeigt nochmals die starken Reflexionen der Oberfläche im optischen Bereich am ersten Messtag (09.10.2014). In Bild 7.41 b ist ein Thermogramm bei 90° Orientierung der IR-Kamera dargestellt. Auch hier sind noch deutliche Reflexionen zu erkennen, aber auch die elektrischen Anschlüsse der PV-Module, die etwas kälter erscheinen als die Module selbst. In Bild 7.41 c ist ein Thermogramm dargestellt, das unter einem Winkel $< 90^\circ$ aufgenommen wurde. Hier sind kaum noch Reflexionen zu erkennen. Die mit der IR-Kamera gemessene Oberflächentemperatur zwischen 26 und $26,5^\circ\text{C}$ entspricht im Rahmen der Messungenauigkeit der der Messung mit dem Kontaktthermometer von 25°C . Es sind im Thermogramm zwei kleinere kühle Stellen jeweils am oberen Rand von zwei PV-Modulen zu erkennen, deren Ursache sich später als Reflexion von Wolkenlücken herausgestellt hat.

Die Messungen am zweiten Tag (20.10.2014) über einen längeren Zeitraum während des Sonnenuntergangs ergaben keine weiteren neuen Erkenntnisse und sind daher nicht dargestellt. In allen Untersuchungen sind keine Strukturen zu erkennen, die auf Unregelmäßigkeit und damit auf mögliche Ablösungen hindeuten. Da hier aber auch Untersuchungen an Bauteilen mit bekannten Defekten fehlen, konnte nicht eindeutig geklärt werden, ob sich die beschriebene Vorgehensweise prinzipiell für die Ortung der Ablösungen eignet.

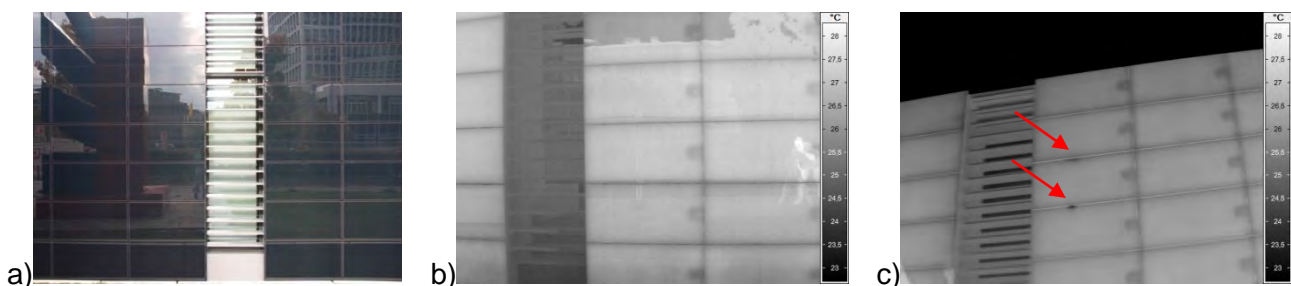


Bild 7.41. Erste Ergebnisse der Untersuchungen an der Südwest-Fassade des EffizienzPlus-Hauses. a) Foto der optisch stark reflektierenden Fassade. b) Auch im Thermogramm sind bei 90° Aufstellung der IR-Kamera noch Reflexionen zu erkennen, aber auch die elektrischen Anschlüsse der PV-Module. c) Bei einem Aufnahmewinkel $< 90^\circ$ sind kaum noch Reflexionen erkennbar, dafür jedoch zwei kleine Auffälligkeiten mit geringerer Temperatur (rote Pfeile), jeweils an den oberen Kanten zweier Module. Diese haben sich später als Reflexionen des Himmels (Wolkenlücken) herausgestellt.

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudien

In der Tabelle 7.5 sind die Ergebnisse der Fallstudien zusammengefasst. Hierbei wird sowohl auf die Ergebnisse jedes Einzelverfahrens eingegangen, als auch auf die zusätzlichen Ergebnisse, die man durch die Verfahrenskombination und Datenfusion erhält.

Fallstudie	Aufgabenstellung	Ergebnisse der Einzelverfahren	Zusätzliches Ergebnis der Kombination
Putzritzen am Magdeburger Dom	Ortung von Hohlstellen unterhalb des Putzes und von Putzablösungen und Untersuchung von deren Veränderung durch die Restaurierung. Visualisierung und Monitoring der Putzritzen.	<u>Aktive Thermografie mit Erwärmung durch einen IR-Strahler:</u> Im Vergleich zu Messungen in 2012 konnte eher eine Zunahme der lateralen Größe der Hohlstellen/Ablösungen nachgewiesen werden. Dies wurde im Vergleich mit Messungen an Probekörpern mit bekannten Ablösungen bestätigt. Die Rücksprache mit den Restauratoren ergab, dass die Ablösungen und Putzergänzungen nur an den Randbereichen fixiert und nicht verfüllt wurden.	<u>Kombination aktive Thermografie /Foto/Laserscanner:</u> Ein korrekter Lagenbezug mehrerer Einzelmessungen ist jetzt möglich, ebenso eine Visualisierung der Thermografie in Bezug zur Objektoberfläche. <u>Kombination Laserscanner/Stereo-photogrammetrie:</u> Ein Vergleich einer erneuten Erfassung des Zentralbildes mit dem Stereosystem ist nun mit exaktem Lagebezug möglich.
		<u>Laserscanner:</u> Mit den 3D-Daten vom Laserscanner können die Putzritzen nicht vollständig geometrisch aufgelöst werden. Daher ist dieses Messverfahren für das Monitoring der Putzritzen nicht geeignet. Allerdings können die Daten für den Lagebezug der höher aufgelösten 3D-Punkte vom Stereosystem und der Thermogramme genutzt werden.	
		<u>Stereophotogrammetrie:</u> Die bereits in 2012 erfassten 3D-Daten des Zentralbildes wurden erweitert, so dass jetzt ein 3D-Datensatz von einer Messfläche mit insgesamt 2300 x 2100 mm ² zur Verfügung steht. Ein neues Scannersystem ermöglichte die Aufnahme von wesentlich mehr Einzelbildern pro Zeiteinheit als in 2012.	
Wandbild in Cobbelsdorf	Ortung von Rissen und Hohlstellen im und unterhalb des Putzes, der ein denkmalgeschütztes Wandbild trägt	<u>Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung an einem Tag mit durchziehenden Wolken:</u> Bereits in Einzelthermogrammen der Sequenz sind die hinter dem Putz liegenden Träger klar zu erkennen. Da diese eher kühler als die Umgebung	Eine Überlagerung von Thermogrammen und Phasenbildern von verschiedenen Messtagen mit dem Fusionstool erleichtert den Vergleich der Daten wesentlich. Im vorliegenden Fall konnten zwar keine Veränderungen nachgewiesen werden,

Fallstudie	Aufgabenstellung	Ergebnisse der Einzelverfahren	Zusätzliches Ergebnis der Kombination
		erscheinen, kann auf eine gute Anbindung des Putzes an die Träger geschlossen werden. In den Phasenbildern der PPT sind Risse klar zu sehen.	dies ist aber prinzipiell im Rahmen eines Monitorings über längere Zeiträume möglich.
		<u>Aktive Thermografie mit Sonneneinstrahlung an einem Tag mit hoher Sonneneinstrahlung:</u> Hier konnten die Träger nicht so eindeutig in den Einzelthermogrammen erkannt werden. Aber auch hier zeigen die Phasenbilder deutlich die Trägerpositionen und die Risse.	Mittels des 2D-Fusionstools wurden Fotos und Thermogramme überlagert, wodurch die Lokalisation und Beurteilung von Schadensmerkmalen objektiviert werden kann.
		<u>Risstracking:</u> In direkt zugänglichen lokalen Bereichen konnten Rissverläufe dreidimensional erfasst werden. Erforderlich hierfür ist die Erreichbarkeit der Fassade mit dem Tastwerkzeug.	Über die Verwendung von Referenzpunkten ist die Fusion von 3D-Rissdaten mit Fotos und Thermogrammen möglich (Überlagerung der Rissdaten auf 2D-Bilder).
Fliesenbilder in Halle-Neustadt	Ortung von hohlliegenden Fliesen, Ergänzung/ Aktualisierung der vorliegenden Schadenkartierung	<u>Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung an einem Tag mit fast geschlossener Wolkendecke:</u> Im Aufgang 1 sind keine Fehlstellen erkennbar, im Aufgang 2 zeichnen sich Unregelmäßigkeiten mit sehr schwachem Kontrast in Temperaturdifferenzbildern ab.	-
		<u>Aktive Thermografie mit Sonneneinstrahlung an einem Tag mit hoher Sonneneinstrahlung:</u> Aufgrund der etwas höheren Sonneneinstrahlung konnten im Fliesenbild des Aufgangs 2 die Bereiche mit der Netzsicherung, Bereiche mit Salzausblühungen und Glasurschäden sowie sehr deutlich fehlende Fliesen geortet werden. Eine Aussage zu Hohllagen war nicht eindeutig möglich. Grund könnte die hohe Reflektivität der Fliesen mit nicht geschädigter Glasur sein.	
Effizienzhaus-Plus in Berlin	Ortung möglicher Ablösungen der an der senkrechten Fassade angebrachten Dünnschichtsolarmodule	<u>Aktive Thermografie mit Sonneneinstrahlung tagsüber und während des Sonnenuntergangs:</u> Aus der Temperaturverteilung auf der äußeren Glasoberfläche (diese ist für den Wellenlängenbereich der	-

Fallstudie	Aufgabenstellung	Ergebnisse der Einzelverfahren	Zusätzliches Ergebnis der Kombination
		IR-Kamera opak) der PV-Module ist der elektrische Anschluss als kühlerer Bereich erkennbar. Weitere Inhomogenitäten konnten nicht geortet werden, wurden jedoch auch nicht erwartet. Als störend hat sich die hohe Reflektivität der Glasoberfläche erwiesen.	

8 Zusammenfassung: Innovationen und deren Umsetzung in die Praxis

8.1 Wesentliche Innovationen im Projekt

Innovationen ergaben sich im Projekt zunächst bei der Weiterentwicklung der Einzelverfahren:

- Für die aktive Thermografie wurden erstmals Probekörper mit definierten Fehlstellen für unterschiedliche Fassadensysteme hergestellt. Die Herstellung der Probekörper erfolgte durch Herrn Arnold vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt und Frau Dr. Meinhardt vom Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., so dass hier umfangreich die Erfahrungen der Restauratoren und Denkmalpfleger mit eingeflossen sind. Anhand dieser Probekörper konnte die Anwendung der aktiven Thermografie mit künstlicher Erwärmung und mit Erwärmung durch die Sonne für die Ortung von Ablösungen und Hohlstellen in Fassadensystemen wie Putz, Fliesen und Riemchenklinker validiert werden. Bisherige Anwendungen der aktiven Thermografie mit Sonnenerwärmung beziehen sich nur auf wenige Fallstudien, systematische Untersuchungen fehlten vollständig.
- Erhöhung der Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit beim Risstrackingverfahren durch die Weiterentwicklung des Messstabes. Dieser wird zukünftig als Acrylglas-Rohr, in dem die Infrarot-Marker eingelassen werden, mit einer festen Messspitze ausgeführt.
- Weiterentwicklung eines Softwaretools zur schnellen Visualisierung großer 3D-Punktwolken. Es können nun Punktwolken mit Farb- und Richtungsinformationen und variabler Beleuchtungssituation betrachtet werden.

Wesentliche Innovationen ergaben sich bei der Kombination der Messverfahren:

- Die absolute Genauigkeit der zusammengesetzten Messdaten der Stereophotogrammetrie kann durch Kombination mit dem großflächigen Scan eines Laserscanners wesentlich verbessert werden. Bei der Zusammensetzung der Einzelmessfelder der Stereophotogrammetrie können Verkippungen der Einzelmessfelder zueinander nicht genau genug korrigiert werden. Diese Verkippungen können nur durch die Überlagerung mit dem Gesamtmessfeld des Laserscanners eingestellt werden.
- Es wurde ein Software-Modul zur Fusion und Überlagerung von beliebigen 2D-Bilddaten entwickelt, das vielfältig einsetzbar ist. So kann es beispielsweise genutzt werden, um Bilddaten der Thermografie sowohl aus einer Messreihe, als auch aus verschiedenen Messungen miteinander in Bezug zu setzen. Weiterhin kann die Fusion für die Überlagerung von Thermogrammen und Fotos eingesetzt werden. Dieses Software-Modul steht nach der Beendigung des Projektes potentiellen Anwendern zur Verfügung. Die Anleitung zur Nutzung des Tools kann dem Merkblatt 5 (s. Anhang 5 zu diesem Bericht) entnommen werden.

Aus der Anwendung der Messverfahren an den Fallstudien ergaben sich die folgenden Innovationen:

- Bei der Auswertung von Thermografiesequenzen, die während der Erwärmung von Bauteilfassaden durch die Sonneneinstrahlung aufgenommen wurden, haben sich die Puls-Phasen-Thermografie sowie die Berechnung von Differenzthermogrammen innerhalb kürzerer Zeitintervalle unterschiedlicher Länge bewährt. In beiden Fällen werden Reflexionen durch Emissivitätskontraste unterdrückt, so dass Strukturinhomogenitäten unterhalb der Oberfläche wesentlich deutlicher visualisiert werden können.
- Bei der thermografischen Untersuchung von Oberflächen mit hoher Reflektivität (Fliesenbilder, Dünnschicht-PV-Module) hat es sich bewährt, die IR-Kamera unter einem Winkel von 30 bis 65° zur Oberflächennormalen auszurichten. Außerdem sollte die Kameraposition so gewählt werden, dass möglichst wenige Reflexionen aus der Umgebung erkennbar sind. Wenn diese Einstellungen berücksichtigt werden, dann können auch hier bei direkter Sonneneinstrahlung Informationen über die Struktur nahe der Oberfläche gewonnen werden.
- Mit Hilfe der 3D-Daten des Laserscanners und der Stereophotogrammetrie sind jetzt eine vollständige Darstellung der Putzritzen mit einer mittleren Auflösung und eine vollständige Darstellung des Zentralbildes mit sehr hoher örtlicher Auflösung möglich. Aus der Zusammenarbeit der Partner im Projekt, den Diskussionen mit den Unterauftragnehmern und dem projektbegleitenden Ausschuss wurden die folgenden Merkblätter für die zukünftigen Anwender dieser Innovationen entwickelt:
- **Merkblatt 1 - Trackingbasiertes Verfahren zur 3D-Erfassung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen**
In diesem Merkblatt werden die Technik des Verfahrens und die Datenaufnahme und –verarbeitung beschrieben.
- **Merkblatt 2 - Stereophotogrammetrie - ein Verfahren zur 3D-Kartierung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen**
Dieses Merkblatt wurde aus dem vorherigen BBR-Projekt 3D-Kartierung ohne Änderungen übernommen und der Vollständigkeit halber für eine gute Information der möglichen Nutzer hier mit integriert.
- **Merkblatt 3 - Geometrische Kalibrierung einer Infrarot-Kamera durch Ermittlung der inneren Kameraparameter**
In diesem Merkblatt wird die Vorgehensweise zur geometrischen Kalibrierung von zwei verschiedenen IR-Kameras beschrieben.
- **Merkblatt 4 - Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung zur Ortung und Charakterisierung von Fassadenablösungen**
Dieses Merkblatt beschreibt die Voraussetzungen, Durchführung und Auswertung von Messungen mit der aktiven Thermografie unter Ausnutzung der Sonnenerwärmung.
- **Merkblatt 5 - Fusion von 2D-Bilddaten zur Unterstützung der Bewertung von oberflächennahen Schäden an Bauwerken und Bauteilen**
Dieses Merkblatt ist die Anleitung für das Software-Modul.

Die Verfahren und Messstrategien können genauso wie in den hier vorgestellten Anwendungsfällen aus der Denkmalpflege auch an Bestands- und Neubauten aus dem Hochbau eingesetzt werden.

8.2 Umsetzung der Projektergebnisse in die Praxis

Für die Baupraxis (und vielleicht besonders die Denkmalpflege) stellen die im Projekt weiterentwickelten und eingesetzten Verfahren allein und besonders in Kombination gute Möglichkeiten des langfristigen Monitorings wie auch der Qualitätskontrolle bei Instandsetzungs- und Konservierungsmaßnahmen dar.

Die aktive Thermografie wird seit längerem in der historischen Bauforschung eingesetzt, um Bauschäden und Materialwechsel, die unter Putz verborgen sind, sichtbar zu machen und damit auch Eingriffe in wertvolle Bausubstanz zu minimieren, die zwangsläufig mit Sondagen verbunden sind.

Die Anwendung zur Ortung von Hohlstellen und Ablösungen wie auch verborgenen Materialwechseln beschränkt sich jedoch keineswegs auf Baudenkmale, sondern kann auch im Umgang mit anderen Bestandsbauten sinnvoll sein. Damit können Schadenspotentiale und –verläufe erkannt werden, was aus Gründen der Wirtschaftlichkeit (Vermeidung unnötiger Eingriffe, Energiespargebot) und der Sicherheit (herabstürzende Bauteile) angezeigt ist.

Die eingeschränkte geometrische Auflösung der Thermografie (eine IR-Kamera hat wesentlich weniger Einzeldetektoren [Pixel] als eine Digitalkamera) wird durch die Kombination mit der Stereophotogrammetrie und dem 3D-Risstrackingverfahren weitgehend aufgehoben. Dadurch, dass nicht nur 2D-Bilder der Fläche aufgenommen, sondern auch Informationen zu Risstiefen und der Tiefenlage von Ablösungen gewonnen werden, werden die Thermogramme verständlicher, die ihrerseits recht zuverlässige Aussagen zu Ablösungen von Putzen oder anderen Oberflächenelementen sowie zumindest teilweise zur Position von Rissen liefern. An zugänglichen Stellen können z.B. manuell Referenzmessungen zur Risstiefe vorgenommen werden, um beispielsweise daraus auch Aussagen zur Putzstärke und Fehlstellentiefe in unzugänglichen Bereichen abzuleiten.

Wenn es gelingt, die Ergebnisse der Fusion der Daten der Thermografie, der Stereophotogrammetrie und des Risstracking mit älteren Kartierungen, die z.B. im Zuge früherer Schadensdokumentationen oder Restaurierungen aufgenommen wurden und als 2D-Bilder existieren, zu überlagern, dann könnte das neue Verfahren zum „nahtlosen“ Übergang von herkömmlichen Dokumentations- zu neuen Monitoring-Verfahren beitragen. Diese ermöglichen eine frühzeitige Schadenserkennung und helfen damit, größere, verfrühte oder verspätete Eingriffe zu vermeiden.

Interessant ist besonders die Objektivität der Messergebnisse des Risstracking und der Stereophotogrammetrie. Kleinste Veränderungen im Submillimeterbereich, die sich zwischen zwei Zuständen eingestellt haben, werden messbar. In dieser Hinsicht sind diese Verfahren den traditionellen „Klopf-Versuchen“ jedenfalls überlegen.

Allerdings haben sich im Projekt auch die Grenzen und die äußeren Einflussgrößen immer wieder gezeigt: nicht immer scheint die Sonne im für die Thermografie gewünschten Maß, es treten störende Reflexionen und Einstrahlungen auf und die Kalibrierung der technischen Geräte erweist sich als zeitaufwändig. In der Praxis wird es sehr darauf ankommen, vor Beginn der Untersuchungen eine möglichst konkrete Fragestellung zu formulieren, geeignete Untersuchungsbereiche zu definieren und die Umgebungsbedingungen für die Untersuchungen im Blick zu behalten. Die Interpretation der gewonnenen Daten und Bilder erfordert viel Erfahrung, insbesondere bei der Einschätzung der Tiefe von Hohlstellen, während es leichter ist, Aussagen zu Rissen treffen.

8.3 Information der Fachwelt über die Forschungsergebnisse

Zunächst stehen der Fachwelt dieser Forschungsbericht sowie die fünf Merkblätter als Anhang dieses Forschungsberichtes zu Verfügung, die online über die Baufachinformation bezogen werden können.

Teile der Forschungsergebnisse wurden bereits während der Laufzeit des Projektes auf verschiedenen Fachkonferenzen, in Tagungsbänden und Fachzeitschriften veröffentlicht. Eine Liste dieser Veröffentlichungen befindet sich am Ende dieses Berichtes. Weitere Veröffentlichungen sind im nächsten Jahr auf der QIRT 2016 (<http://www.qirt2016.gda.pl/index.php#home>), auf der WCNDT (<http://www.wcndt2016.com/>) und auf der Festveranstaltung zum 20 jährigen Bestehen des IDK in Halle in 2016 geplant.

Darüber hinaus werden die Projektergebnisse über Personalzertifizierungskurse der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Vorlesungen an der TU Berlin zur Bauteilsicherheit und an der Universität Magdeburg zur Bildverarbeitung, Anwendertreffen von Herstellern von Infrarotkameras und Treffen mit dem Verband der angewandten Thermografien (VaTh) verbreitet.

9 Ausblick

In den vorgestellten Ergebnissen des Projektes wird klar gezeigt, dass die untersuchten Verfahren sich auch auf großflächige Gebäudeteile anwenden lassen. Bei der aktiven Thermografie ermöglicht die Sonnenerwärmung eine großflächige und homogene Erwärmung, so dass der Aufwand der Erwärmung kleinerer Einzelmessbereiche wegfällt. Es gibt jedoch auch Fassaden, die durch die Sonnenstrahlung nicht erreicht werden. Hier ist es u.U. möglich, den Tagestemperaturgang zu nutzen, insbesondere z.B. in den Sommermonaten mit hohen Mittagstemperaturen und klaren Nächten, d.h. stärkerer Abkühlung in der Nacht. Bisher erfolgten die Untersuchungen an den Probekörpern nur für den Fall einer definierten Erwärmung durch die Sonneneinstrahlung für eine festgelegte Zeit, um dann anschließend die Abkühlung zu erfassen und auszuwerten. Weitere Untersuchungen mit Messungen während der Erwärmung sowie Messungen im Schatten bei unterschiedlichen Tagestemperaturen sollten zukünftig durchgeführt werden. Zusätzlich wären Untersuchungen an einer Gebäudereferenzwand mit definierten Fehlstellen wichtig, um auch die Temperaturverteilungen innerhalb der Gebäudewand bei verschiedenen Umgebungsbedingungen und deren Auswirkung auf die Detektierbarkeit der Fehlstellen zu prüfen. Parallel dazu sollten numerische Simulationen des instationären Wärmetransportes durchgeführt werden, die bisher aufgrund unbekannter Materialparameter noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten. Es sind daher zunächst auch Messungen zur systematischen Charakterisierung der thermischen Materialparameter der verwendeten realen Baustoffe erforderlich.

In den beiden Fallstudien mit stark variierender Einfärbung der Oberfläche (Wandbild in Cobblendorf und Fliesenbild in Halle-Neustadt) sind insbesondere in den Thermogrammen, die direkt während der Sonneneinstrahlung erfasst wurden, starke Reflexionsunterschiede aufgrund von Emissivitätskontrasten zu erkennen. Daher ist die Entwicklung von Algorithmen erforderlich, die es ermöglichen, aus einem Vergleich von Thermogrammen mit und ohne Sonneneinstrahlung eine Emissivitätskorrektur in den Thermogrammen durchzuführen.

Nachteilig ist zurzeit noch die geringe Ortsauflösung von IR-Kameras. Kommerzielle Systeme erhält man zurzeit nur bis Detektorgrößen von 1280×1024 Pixeln. Hier könnte zukünftig die Nutzung von automatisierten Schwenk-Neige-Köpfen die schnelle Erfassung von Einzelbildern ermöglichen, die dann wiederum, wie bei der Stereophotogrammetrie, mit vergleichbaren Software-Modulen zu einem hochau aufgelösten Gesamtbild zusammengesetzt werden.

Auch mit der Stereophotogrammetrie lassen sich mit Hilfe eines Schienenscanners größere Messbereiche in 3D mit sehr hoher Ortsauflösung erfassen. Für sehr große Gebäudeteile und –fassaden eignet sich jedoch eher der Laserscanner, wobei dann jedoch die geringere Ortsauflösung akzeptiert werden muss.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass nicht alle zu erfassenden Gebäudeteile eine optische Zugänglichkeit vom Boden oder von einem anderen Gebäudeteil aus haben, was für die Thermografie und für Laser- und Photogrammetrie-Systeme jedoch Voraussetzung ist. Um auch verdeckte Lagen z.B. in nicht zugänglichen Dachbereichen zu untersuchen, bieten sich beispielsweise luftgestützte Verfahren mit unbemannten Fluggeräten an. Zukünftig wäre zu untersuchen, inwieweit z.B. Drohnen für die Thermografie und für die gleichzeitige Erfassung von 3D-Daten und damit für die genauere Vermessung von sichtbaren Schäden an der Oberfläche eingesetzt werden können.

Die Untersuchungen im Projekt erfolgten bei allen Objekten entweder parallel zu Restaurierungsmaßnahmen oder danach. Dies bedeutete, dass häufig bereits lange vorhandene Schäden wie Risse und Hohlstellen verfüllt und verfestigt wurden, wobei unterschiedliche Materialsysteme eingesetzt wurden. Es konnte bisher noch nicht systematisch untersucht werden, welchen Einfluss diese Materialien z.B. auf die Detektierbarkeit der Risse mit der aktiven Thermografie haben und welcher thermische Kontrast sich daraus ergibt. Auch hierzu müssen zukünftig Untersuchungen erfolgen.

Dank

Das Forschungsprojekt wird mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-108 / SWD - 10.08.18.7-13.42). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Wir danken Herrn Asmus Schriewer, Herrn Fabian Brodbeck und Herrn Michael Brüggemann für die Betreuung der Projektarbeit sowie den Mitgliedern des begleitenden Ausschusses Herrn Torsten Arnold, Herrn Matthias Hemmleb, Herrn Armin Weiss (bzw. seinem Vertreter Herrn Konrad Zürl) und Herrn Ralf Lindemann für viele hilfreiche Hinweise und Diskussionen. Herrn Torsten Arnold sei darüber hinaus sehr für seinen Anteil (Ideen und Ausführung) bei der Herstellung der Probekörper gedankt.

Referenzen

- Ref 1 Kollmann 2010 Sanierungspraxis Putz. Von der Diagnose bis zur Ausführung
- Ref 2 Dettmering & Kollmann 2012 Putze in Bausanierung und Denkmalpflege
- Ref 3 Patzner 2012 Ursachen von Putzschäden
- Ref 4 C. Maierhofer, R. Krankenhagen, P. Myrach, M. Röllig, R. Mecke, M. Schiller, T. Seidl, U. Kalisch, C. Hennen, J. Meinhardt, H. Kersten, E. Thomas Groll. Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen. Abschlussbericht 2014, 193 S., Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-9145-4
<https://www.baufachinformation.de/forschungsbericht/240758>
- Ref 5 Franzen, C., Löther, T., Meinhardt-Degen, J., and Weise, S.: Berührungslose Hohlstellen-detektion an Wandmalereien. In Natursteinsanierung Stuttgart 2008. Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- Ref 6 Quality Control Mastered with Laser Tracking Technology, Quality Magazine, Januar 2006, www.qualitymag.com/articles/84676-quality-control-mastered-with-laser-tracking-technology
- Ref 7 Wind energy: laser tracker - invaluable tools in the quality assurance of heavy wind power components; direct industry; Oktober 2012; news.directindustry.com/press/api-automated-precision-europe-gmbh/wind-energy-laser-tracker-invaluable-tools-in-the-quality-assurance-of-heavy-wind-power-components-15655-378807.html
- Ref 8 Maierhofer, Ch., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., and Hillemeier, B.: Application of impulse thermography for non-destructive assessment of concrete structures. Cement & Concrete Composites, 2010, Vol. 28, pp. 393-401
- Ref 9 Franzen, C., Löther, T., Meinhardt-Degen, J., and Weise, S.: Berührungslose Hohlstellen-detektion an Wandmalereien. In Natursteinsanierung Stuttgart 2008. Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- Ref 10 Maierhofer, Ch., Arndt, R., and Röllig, M.: Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography, Infrared Physics & Technology Vol. 49, Issue 3, 2007, pp. 213-217
- Ref 11 Walther, H. G.: Surface roughness influence on photothermal radiometry. Applied Surface Science 193, no. 1-4, June 5, 2002, pp. 156-166
- Ref 12 Krankenhagen, R., and Maierhofer, Ch.: Pulse phase thermography for characterising large historical building facades after solar heating and shadow cast - a case study. Quantitative Infra-Red Thermography Journal 11(1), 2014, pp. 10-28
- Ref 13 A. Criniere, J. Dumoulin, L. Perez and F. Bourquin: Civil engineering structure daily monitored through IR Thermography and environmental measurement. Proc. of 12th Int. Conference on

Quantitative Infrared Thermography,

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2014/QIRT%202014%20Papers/QIRT-2014-186.pdf>

Ref 14 Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Myrach, P., Röllig, M., Mecke, R., Schiller, M., Seidl, T., Kalisch, U., Hennen, C., Meinhardt, J., Kersten, H., Groll, E. T., Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen. Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2873, Fraunhofer IRB Verlag, 2014, 193 S., <https://www.baufachinformation.de/literatur/13129012476>

Ref 15 E.T. Groll, C. Böttcher: Vergleich und Bewertung bisheriger Kartierungs-verfahren; Arbeitsbericht für das Projekt: „Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen“; 2011

Bisherige Veröffentlichungen der Projektergebnisse

2013

Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Myrach, P., Meinhardt, J., Kalisch, U., Hennen, C., Mecke, R., Seidl, T., Schiller, M.: Monitoring of cracks in historic concrete structures using optical, thermal and acoustical methods. Conference Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management, Milan, Italy, 2013-11-20, **Vortrag**

Krankenhagen, R., Maierhofer, C.: Active Thermography - a nondestructive testing method for damage assessment in concrete structures. International Workshop Concrete Conservation and Preservation, Gothenburg, Sweden, 2013-12-07, **Vortrag**

2014

Maierhofer, C., Hennen, C., Kalisch, U., Krankenhagen, R., Mecke, R., Meinhardt, J., Myrach, P., Schiller, M., Seidl, T.: 3D Kartierung von Rissen in historischem Beton mit thermografischen, optischen und Ultraschall-Verfahren. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam, **Vortrag und Beitrag zum Tagungsband**

Maierhofer, C.: Aktive Thermografie im Bauwesen. VATh-Bauthermografie Seminar 2014-10-11, Berlin, **Vortrag**

Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Myrach, P., Mecke, R., Seidl, T., Schiller, M., Kalisch, U.: 3D Kartierung von Schäden in historischen Bauwerken mit thermografischen, optischen und Ultraschall-Verfahren. Sitzung des Arbeitskreises Stuttgart der DGZfP, 2014-11-20, **Vortrag**

2015

Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Myrach, P., Röllig, M., Mecke, R., Schiller, M., Seidl, T., Kalisch, U., Hennen, C., Meinhardt, J., Kersten, H., Groll, E.T.: 3D-Kartierung von oberflächennahen Schäden an Bauwerken und Bauteilen. *Messtechnik im Bauwesen*, 2015, Ernst und Sohn, S. 35-39, **Zeitschriftenartikel**

Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Myrach, P., Meinhardt, J., Kalisch, U., Hennen, C., Mecke, R., Seidl, T., Schiller, M.: Monitoring of cracks in historic concrete structures using optical, thermal and acoustical methods. Built Heritage: Monitoring conservation management, Part II. Eds. Guidi, G., Boriani, M., Toniolo, L., 2015, Springer Verlag, S. 93-102, **Buchbeitrag**

Myrach, P., Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Worzewski, T., Doroshtnasir, M., Röllig, M., Studemund, T.: Thermography on the Large Scale: Non-Destructive Testing of Historic Buildings and Wind Turbines. One Day Workshop on Infrared Thermography: Basics, Applications and Recent Advances, Chennai, India, 2015-07-11, **Vortrag**

Myrach, P., Maierhofer, C., Krankenhagen, R.: Application of Active Thermography for the Characterization of Building Structures in Cultural Heritage. QIRT Asia 2015, Chennai, India, **Vortrag**

Maierhofer, C., Röllig, M., Steinfurth, H., Mecke, R., Schiller, M., Kernchen, A., Kalisch, U., Meinhardt, J., Hennen, C.; Arnold, T., Groll, T.: Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren. DGZfP DACH-Jahrestagung 2015, Salzburg, Österreich, **Vortrag und Tagungsbeitrag**

Maierhofer, C.: Aktive Thermografie im Bauwesen. Thermografische Untersuchungen im Denkmalschutz, Veranstaltung der Deutsche Stiftung Denkmalschutz, Berlin, 2015, **Vortrag**

Maierhofer, C., Röllig, M., Steinfurth, H., Meinhardt, J., Arnold, T.: Untersuchung sicherheitsrelevanter Ablösungen von Fassadenelementen mit aktiver Thermografie. Bautechnik 92 (2015), Heft 10, **Zeitschriftenartikel**

Maierhofer, C., Röllig, M., Steinfurth, H., Krankenhagen, R., Mecke, R., Schiller, M., Kernchen, A., Kalisch, U., Meinhardt, J., Hennen, C., Arnold, T., Groll, T.: Detection and Characterisation of Safety Relevant Detachments of Façade Elements Using a Combination of Active Thermography and Optical Scanning Methods. International Symp. Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2015, 15.-17.9.2015, Berlin, **Vortrag und Tagungsbeitrag**

Maierhofer, C.: 3D-Kartierung von Schäden in historischen Bauwerken mit thermographischen, optischen und Ultraschall-Verfahren. Sitzung des DGZfP Arbeitskreises Zwickau-Chemnitz, 2015-10-06, **Vortrag**

Anhang 1: Merkblatt 1

Trackingbasiertes Verfahren zur 3D-Erfassung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen

Mathias Röllig¹, Henrik Steinfurth¹, Sven Augustin¹
Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Alexa Kernchen²
Uwe Kalisch³, Jeannine Meinhardt³, Christiane Hennen⁴,
Ernst Thomas Groll⁵, Torsten Arnold⁶

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FB 8.7, Berlin

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

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

⁴Christiane Hennen, Bauforschung – Denkmalpflege, Wittenberg

⁵Ernst Thomas Groll, Restaurator, Magdeburg

⁶Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: **II 3-F20-12-1-108 / SWD -10.08.18.7-13.42**)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren		Forschungsinitiative Zukunft Bau SF- SWD – 10.08.18.7-13.42 BAM Vh 8463	
Dokument:	Merkblatt		
Autor:	Alexa Kernchen IFF	Status:	final
Datum:	11.11.2015	Version:	2

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	71
2. Verfahrensbeschreibung und Technik	71
2.1. Trackingsystem	71
2.2. Tastwerkzeug	72
3. Aufbau, Kalibrierung und Randbedingungen vor Ort	73
3.1. Aufbau und Kalibrierung des Trackingsystems	73
3.2. Kalibrierung des Tastwerkzeugs	74
4. Datenaufnahme	74
5. Datenverarbeitung und Auswertung	75
5.1. 2D-Bilddatenfusion	78
6. Literatur	79

1 Einleitung

Dieses Merkblatt richtet sich an potentielle Nutzer und Anwender des nachfolgend beschriebenen Verfahrens zur 3D-Erfassung und -Kartierung von oberflächennahen Rissen und Schäden an verschiedenen Objekten. Dazu gehören u.a. Denkmalpfleger, Restauratoren, Bauingenieure, Architekten und Gutachter. Die mit dem Verfahren gewonnenen Daten können als Ergänzung zu traditionellen Verfahren wie der digitalen Fotografie einen Mehrwert bei der Dokumentation bieten und besitzen eine höhere Genauigkeit und eine größere Objektivität als per Hand angefertigte Kartierungen.

Das Merkblatt beschreibt die Grundlagen, Anwendungsbereiche, Randbedingungen, Messgenauigkeiten und Grenzen des Systems. Die Vorgehensweise bei der praktischen Anwendung des Verfahrens wird anhand eines Beispiels erläutert.

Das Merkblatt wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projektes „Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren“ erstellt. Für detailliertere Informationen zum Projekt, den entwickelten Verfahren und deren Kombination wird auf den Abschlussbericht und die Publikationen von Maierhofer et al. [1] sowie Seidl et al. verwiesen [2, 3].

2 Verfahrensbeschreibung und Technik

Das im Folgenden beschriebene Verfahren wurde für die manuelle 3D-Kartierung von Rissen direkt am untersuchten Objekt entwickelt, eine Anwendung für andere oberflächennahe Merkmale ist ebenso möglich. Bei der Vermessung führt der Nutzer die Spitze eines Tastwerkzeugs manuell an der Riss- bzw. Merkmalsoberfläche entlang. Die Position des Werkzeugs wird dabei kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten dienen als Grundlage für eine Kartierung der Merkmale. Eine gute Erreichbarkeit ist für die Anwendung dieses Verfahrens unbedingt erforderlich (ebenerdig oder stabiles, großzügiges Gerüst).

2.1 Trackingsystem

Für die Bewegungserfassung des Tastwerkzeugs wird ein Infrarot(IR)-Trackingsystem der Firma Natural Point verwendet, welches aus sechs IR-Kameras des Typs V100R2 besteht (Abb. 1). Die IR-Trackingsysteme werden den optischen Systemen zugeordnet, da die Positionsbestimmung auf der Auswertung von Kamerabildern basiert. Dabei werden mehrere IR-Kameras verwendet, deren Lagebeziehung zueinander durch eine Kalibrierung des Systems bekannt ist. Um die Bewegung eines Gegenstandes (z.B. Tastwerkzeug) zu erfassen, wird dieser mit sog. Markern bestückt. Marker sind Objekte, die entweder aktiv Licht im IR-Bereich ausstrahlen (z.B. LEDs) oder von außen eingestrahlt IR-Licht besonders gut reflektieren. Die Kameras erfassen das von den Markern ausgehende IR-Licht. Anhand der Bilddaten der verschiedenen Kameras kann die Position der Marker im Raum ermittelt werden. Befinden sich mehrere Marker in einer bekannten Anordnung an einem Gegenstand, so kann neben der Position auch dessen Orientierung bestimmt werden. Mit dem hier empfohlenen Trackingsystem konnte bei Labortests eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm bei der Positionsbestimmung eines einzelnen Markers erreicht werden. IR-Trackingsysteme haben gegenüber anderen Trackingsystemen u.a. folgende Vorteile:

- IR-Licht wird vom Nutzer nicht wahrgenommen und stört daher nicht bei der eigentlichen Kartierungsarbeit
- IR-Licht ist im Allgemeinen unschädlich für die im Projekt untersuchten Objekte (Fassadenbereiche).
- IR-Trackingsysteme sind vergleichsweise kostengünstig bei hoher Genauigkeit.

- Der Aufbau des Systems kann gut an die Umgebung angepasst werden, wodurch es vielseitig einsetzbar ist.



Abb. 1. Trackingsystem mit an einem Aluminiumrahmen befestigten IR-Kameras, die auf den zu erfassenden Fassadenbereich ausgerichtet sind.

Vergleichbare Messsysteme nutzen oft zwei oder drei IR-Kameras in einem festen Verbund zueinander. Ein flexibler Aufbau für einen beliebigen Erfassungsbereich kann bei solchen Systemen nur eingeschränkt oder mit zusätzlichen Kameras bzw. mehreren Positionierungen des Systems erreicht werden, was u.a. zu erhöhten Kosten führt.

2.2 Tastwerkzeug

Für die manuelle Risserfassung wird ein stiftähnliches Tastwerkzeug verwendet. Es besteht aus einem ca. 30 cm langen, geraden Stab, auf dem asymmetrisch drei Marker (A, B und C) befestigt sind (Abb. 2). Am vorderen Ende befindet sich eine austauschbare Messspitze (S). Aussehen und Form des Tastwerkzeugs sind variabel und können angepasst werden. Dabei ist folgendes zu beachten:

- die Länge des Messstabes ist variabel
- die Marker A, B, C und die Spitze S müssen auf einer Linie liegen
- die Marker müssen asymmetrisch angeordnet sein, d.h. Marker B darf sich nicht genau in der Mitte zwischen Marker A und C befinden, da sonst die Ausrichtung des Werkzeugs nicht bestimmt werden kann
- der Abstand zwischen Marker A und B muss geringer sein, als der Abstand zwischen Marker B und C
- der Abstand zwischen zwei Markern sollte mindestens 3 cm betragen, so dass die einzelnen Marker vom Trackingsystem gut unterscheidbar sind
- die Spitze muss sich auf der von A und B abgewandten Seite des Markers C befinden

Nachdem das Werkzeug für die jeweilige Messsituation angepasst wurde, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Bei der Kalibrierung wird die Lagebeziehung zwischen den Markern A, B und C sowie der Spitze S bestimmt.



Abb. 2. Prototypische Umsetzung des Tastwerkzeugs mit zwei austauschbaren Tastspitzen.

3 Aufbau, Kalibrierung und Randbedingungen vor Ort

Bevor das Objekt vor Ort vermessen werden kann, müssen prinzipiell zwei Arbeitsschritte durchgeführt werden. Im ersten Schritt muss das Trackingsystem an die Umgebungsbedingungen angepasst, aufgebaut und kalibriert werden. Im zweiten Schritt muss dann das Tastwerkzeug kalibriert werden.

3.1 Aufbau und Kalibrierung des Trackingsystems

Idealerweise wird das Trackingsystem an einem Aluminiumrahmen angebracht und vor Ort aufgestellt, wie in Abb. 3 (links) dargestellt. In vielen Fällen ist jedoch eine Anpassung des Aufbaus an Bedingungen vor Ort notwendig. Für die Befestigung der Kameras eignen sich verschiedene Methoden. Die Kameras können z.B. auf Stativen aufgestellt oder an Strukturen vor Ort (z.B. Gerüste) angebracht werden. Beim Aufbau des Systems sind folgende Punkte zu beachten:

- die Kameras sollten einen Mindestabstand von ca. 1,0 m zueinander besitzen
- die Kameras sollten sich nicht alle auf einer Geraden befinden
- zum Messobjekt muss ein Mindestabstand von 1,5 m eingehalten werden
- die Kameras sollten alle auf einen zentralen Punkt ausgerichtet werden
- die Kameras sollten in einem steilen Winkel auf den zu vermessenden Bereich ausgerichtet werden
- der untersuchte Bereich sollte von allen Kameras gleichzeitig erfasst werden
- das Messwerkzeug muss jederzeit von mindestens zwei Kameras erfasst werden; eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm wird nur erreicht, wenn vier oder mehr Kameras das Werkzeug erfassen
- das System muss so angebracht werden, dass eine Zugänglichkeit für den Nutzer gewährleistet ist, ohne dass dieser das Messwerkzeug verdeckt

Nach dem Aufbau des Trackingsystems muss eine Kalibrierung durchgeführt werden, um die Lagebeziehung der Kameras zueinander zu bestimmen. Hierbei ist nach den Herstellerangaben zu verfahren. Nach der Kalibrierung dürfen die Kameras nicht mehr bewegt werden, da sonst die Lagebeziehung verändert wird.

Obwohl das System vielfältig einsetzbar ist, sind folgende Punkte zu beachten, um die Genauigkeit zu maximieren und Messfehler zu vermeiden:

- direkte Sonneneinstrahlung im Messbereich ist zu vermeiden, da der IR-Anteil der Sonneneinstrahlung Messfehler verursachen kann
- Lichtquellen und Wärmequellen, die IR-Licht aussenden (z.B. Kerzen, Heizstrahler) sind aus dem Untersuchungsbereich zu entfernen
- reflektierende Materialien (z.B. Uhrenläser, Ringe, Spiegel, andere Kameraobjektive) sind im Messbereich zu vermeiden

- die Kameras dürfen sich weder relativ zueinander noch relativ zum untersuchten Objekt bewegen

3.2 Kalibrierung des Tastwerkzeugs

Die Kalibrierung des Tastwerkzeugs kann vom Nutzer direkt vor Ort durchgeführt werden. Hierzu wird das mit drei Markern bestückte Werkzeug auf eine feste Unterlage gelegt. Anschließend werden die initialen Abstände der Marker vom Trackingsystem bestimmt. Um die Ausrichtung des Werkzeugs bzw. die Position der Spitze zu bestimmen, wird die Spitze auf einer festen Stelle im zentralen Trackingbereich platziert. Anschließend wird das Werkzeug um die Spitze rotiert. Dabei werden mehrere Messpunkte aufgenommen. Eine Software berechnet die Position der Spitze und gibt einen Genauigkeitswert für die Berechnung an. Wird eine vom Nutzer festgelegte Genauigkeit erreicht, ist der Kalibriervorgang abgeschlossen. Sofern keine Veränderungen am Tastwerkzeug durchgeführt werden, kann die Kalibrierung bereits vor dem eigentlichen Messeinsatz vorgenommen werden. Die notwendigen Daten werden dann in die Software eingeladen. Dieses Vorgehen ist vor allem dann hilfreich, wenn es keinen festen Punkt gibt, auf den die Messspitze aufgesetzt werden kann, z.B. wenn die Oberfläche des zu vermessenden Objektes sehr empfindlich ist.

4 Datenaufnahme

Für die trackingbasierte Erfassung von Rissdaten bietet sich folgender Arbeitsablauf an:

1. Trackingsystem
 - a. Aufbau und Kalibrierung des Trackingsystems vor Ort.
 - b. Überprüfen der Kalibrierung durch das Bewegen von Markern im Trackingbereich.
 - c. Dokumentieren des Aufbaus und der Kalibrierdaten
 - i. Fotografieren des Aufbaus aus unterschiedlichen Blickwinkeln
 - ii. Vermessen des Abstandes zwischen Trackingsystem und untersuchtem Objekt
 - iii. Vermessen der Kamerapositionen zueinander
 - iv. Protokollieren der erreichten Genauigkeit bei der Kalibrierung
2. Tastwerkzeug
 - a. Anpassen des Tastwerkzeugs an die Messaufgabe
 - b. Kalibrieren des Tastwerkzeugs
 - c. Überprüfen der Kalibrierung des Tastwerkzeugs durch exemplarisches Erfassen von Oberflächenmerkmalen
 - d. Protokollieren der Parameter des Tastwerkzeugs
 - i. Abstände der Marker
 - ii. Länge des Werkzeugs
 - iii. Genauigkeit bei der Kalibrierung
3. Vorbereitung der Messungen
 - a. Auswählen der zu erfassenden Oberflächenmerkmale.
 - b. Anlegen des Katalogs mit den benötigten Klassifikationsmerkmalen in der Software. Für jeden Merkmalstyp wird eine andere Farbe bei der Visualisierung verwendet.
4. Aufnahme der Riss-/Merkmalsdaten (Abb. 3)
 - a. Für jeden Riss bzw. jedes Merkmal wird ein neuer Datensatz angelegt
 - b. Detaillierte Oberflächenmerkmale werden durch Aufnahme einzelner Messpunkte erfasst

- c. Großflächige Objektmerkmale werden durch eine kontinuierliche Datenaufzeichnung erfasst
- d. Versehentliche Fehlmessungen direkt aus dem Datensatz entfernen oder genau dokumentieren
- e. Regelmäßiges Speichern der aufgezeichneten Daten in mehreren Datensätzen



Abb. 3. Manuelle Datenaufnahme direkt an der Messobjektoberfläche durch den Nutzer.

- 5. Referenzpunkte für die Datenfusion (optional)
 - a. Anbringen von künstlichen Referenzmarken, die sich im gesamten Trackingbereich gleichmäßig verteilen.
 - b. Auswahl von Objektmerkmalen, welche als Referenzpunkte geeignet sind.
 - c. Anlegen eines Klassifikationsmerkmals für die Referenzpunkte in der Software.
 - d. Aufnahme der Referenzpunkte.
- 6. Fotos vom Objekt für die Datenfusion (optional)
 - a. Geeignete Blickwinkel für die Aufnahme bestimmen
 - b. Autofokus deaktivieren
 - c. Manuelle Fokuseinstellung für den vorliegenden Abstand zum Objekt vornehmen
 - d. Protokollieren der exakten Fokus- und Objektiveneinstellungen für die nachfolgenden Fotos
 - e. Aufnahme der Fotos

5 Datenverarbeitung und Auswertung

In einer Nachbearbeitung der Daten müssen Messfehler manuell aus dem Datensatz entfernt werden. Hierfür wird ein 3D Viewer verwendet, der zeitgleich zur Exploration und Analyse der Daten dient. Auf Basis der bereinigten Daten kann eine detaillierte Auswertung der Oberflächenmerkmale erfolgen, die auf quantifizierbaren geometrischen Informationen, wie der Länge eines Risses oder dem Abstand zweier Messpunkte beruht.

Die Messdaten liegen in Form einer 3D-Punktwolke vor. Für den Anwender kann es schwierig sein, die Daten ohne detailliertes Hintergrundwissen und Zuordnung zum Objekt zu interpretieren. Neben der Untersuchung der 3D-Punktwolke wird daher eine Kombination der 3D-Daten mit herkömmlichem Bildmaterial empfohlen. Hierzu werden die aufgezeichneten Referenzpunkte und Fo-

tos herangezogen, die in den Schritten 5 und 6 bei der Datenaufnahme angefertigt wurden. Für eine kombinierte Darstellung müssen die Datensätze zueinander registriert und anschließend fusioniert werden. Bei der Fusion werden die 3D-Daten lagerichtig in das 2D-Bild übertragen. Nach Bradski und Kaehler [4] sind für diesen Prozess vier Schritte notwendig, welche im Folgenden kurz erläutert werden:

Schritt 1 - Ermitteln der intrinsischen Kameraparameter

Bei der Aufnahme von Bildern mit einer Kamera kommt es durch die Kameraoptik (Verbund von Linsensystem und Bildsensor) zu einer Verzerrung des Bildes. Ein Beispiel hierfür ist der „Kisseneffekt“, der gerade Linien eines Objektes am Bildrand gekrümmt erscheinen lässt. Die Verzerrung kann mit Hilfe der intrinsischen Kameraparameter in einem mathematischen Modell beschrieben werden. Diese Parameter enthalten Informationen über Brennweite, Bildhauptpunktlage sowie Verzerrungsparameter und sind für jede Kamera und Kameraeinstellung spezifisch zu ermitteln. Für nähere Informationen zur Bestimmung dieser Parameter sei auf die Arbeiten von Bouget [5] und Zhang [6] verwiesen. Die intrinsischen Parameter werden für Schritt 3 und 4 benötigt.

Schritt 2 - Bestimmung von Korrespondenzen zwischen 2D-Bild und 3D-Datensatz

Als Korrespondenz werden markante Punkte bezeichnet, die sowohl im 3D-Datensatz als auch im 2D-Bild vorhanden sind und die eindeutig einander zugeordnet werden können (s. Abb. 4). Die 3D- und 2D-Koordinaten bilden dabei ein gemeinsames Korrespondenzpaar. Bezogen auf die Risskartierung können das Anfang- und Endpunkte eines Risses sein, Stellen an denen zwei Rissverläufe aufeinander treffen, markante Richtungsänderungen im Rissverlauf oder explizit aufgezeichnete Referenzpunkte. Explizite Referenzpunkte empfehlen sich vor allem bei der Fusion mit Bilddaten, welche die Oberflächenstruktur nur gering aufgelöst enthalten, wie beispielsweise Thermografie-Aufnahmen. In diesem Fall sollten Marker am Messobjekt befestigt werden, welche vom Tastwerkzeug angetastet werden können und in den Bilddaten eine eindeutige und möglichst genaue Positionsbestimmung ermöglichen (z.B. kreisförmige selbstklebende Folie mit definiertem Mittelpunkt). Die Bestimmung von Korrespondenzpaaren ist die Voraussetzung für den folgenden Schritt 3.

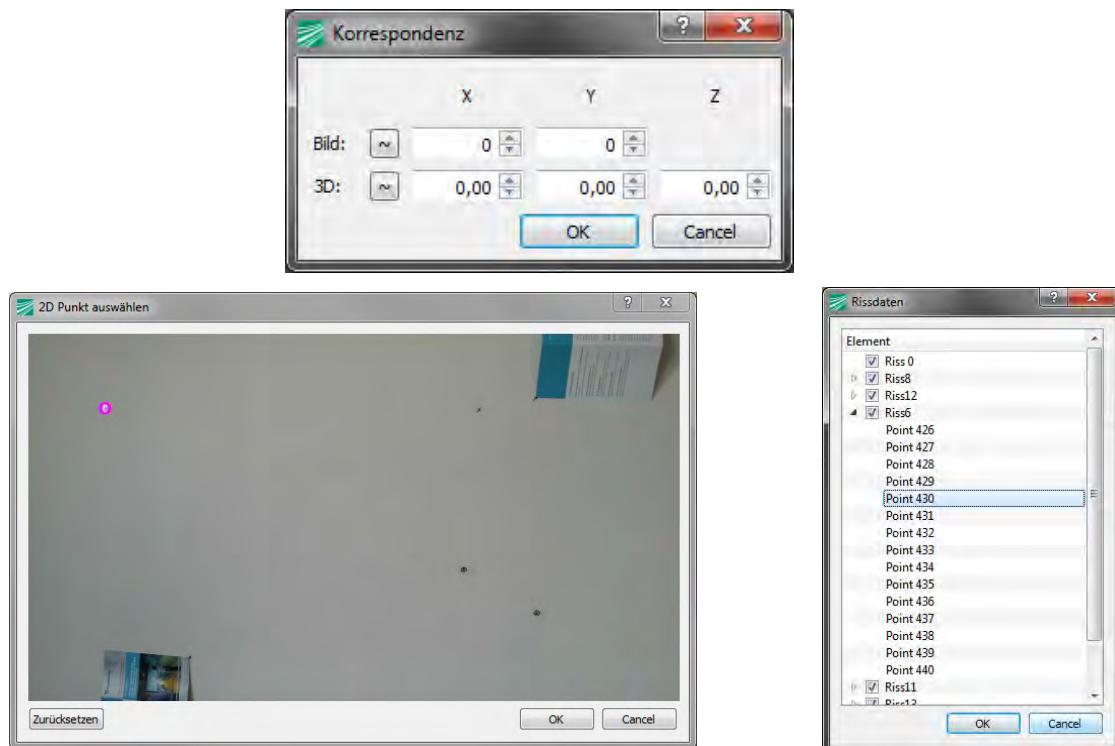


Abb. 4. Programmdialog zur Angabe der Korrespondenzen (oben) zwischen den 2D-Punkten im Bild (unten links) und den 3D-Punkte der Rissfassung (unten rechts).

Schritt 3 - Ermitteln der extrinsischen Kameraparameter

Die extrinsischen Kameraparameter beschreiben die Lagebeziehung zwischen Kamera und Messobjekt im Moment der Bildaufnahme. Diese Beziehung wird durch die Pose der Kamera im Objektkoordinatensystem, d.h. im Koordinatensystem, das der Objektvermessung zugrunde liegt, beschrieben. Für die eindeutige Bestimmung der extrinsischen Kameraparameter sind vier Korrespondenzpaare hinreichend. Aufgrund realer Störeinflüsse ist es jedoch empfehlenswert, acht oder mehr Korrespondenzen für die Bestimmung der Kamerapose zu verwenden, die möglichst gleichmäßig über das Kamerabild verteilt sind. Für die eigentliche Berechnung wird eine Kombination aus iterativer Optimierung nach der Levenberg-Marquardt-Methode [7] sowie dem Algorithmus nach Moreno-Noguer et al. [8] verwendet. Für weitere Information wird hier außerdem auf die Arbeiten von Fischler und Bolles [9] sowie Gao et al. [10] verwiesen.

Schritt 4 - Lagerichtige Projektion der 3D-Daten in das 2D-Bild

Anhand der bestimmten intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter ist es möglich, die 3D-Daten lagerichtig in das 2D-Bild zu projizieren. Grundlage hierfür ist ein virtuelles Kameramodell, das die 3D-Punkte perspektivisch auf eine Bildebene projiziert und dabei die Verzeichnung der realen Kamera berücksichtigt. Sofern die intrinsischen Kameraparameter bekannt und geeignete Korrespondenzpaare vorhanden sind, können die aufgenommenen 3D-Messdaten mit beliebigen 2D-Aufnahmen fusioniert werden.

Abb. 5 zeigt die Datenfusion am Beispiel einer Risskartierung. Links im Bild ist eine Makroaufnahme eines verputzten Fassadenbereiches mit oberflächennahen Schäden (Risse und Vorwölbungen) zu sehen. In der Mitte ist ein Screenshot aus einer 3D-Darstellung der mittels des beschriebenen 3D-Kartierungsverfahrens erfassten Rissverläufe dargestellt. Rechts ist das Ergebnis der Fusion der 3D-Rissdaten mit einem Foto abgebildet. Der Vorteil gegenüber traditioneller 2D-Kartierungen ist die exakte Quantifizierbarkeit der Oberflächenmerkmale auf Basis der 3D-Daten. Weiterhin können innerhalb weniger Minuten Bildüberlagerungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln erzeugt werden. Die 3D-Daten können jedoch auch ohne das Foto im Hintergrund in dessen Lagebezug exportiert werden. Dies ist für die in 0 beschriebene Fusion von 2D-Bilddaten hilfreich.

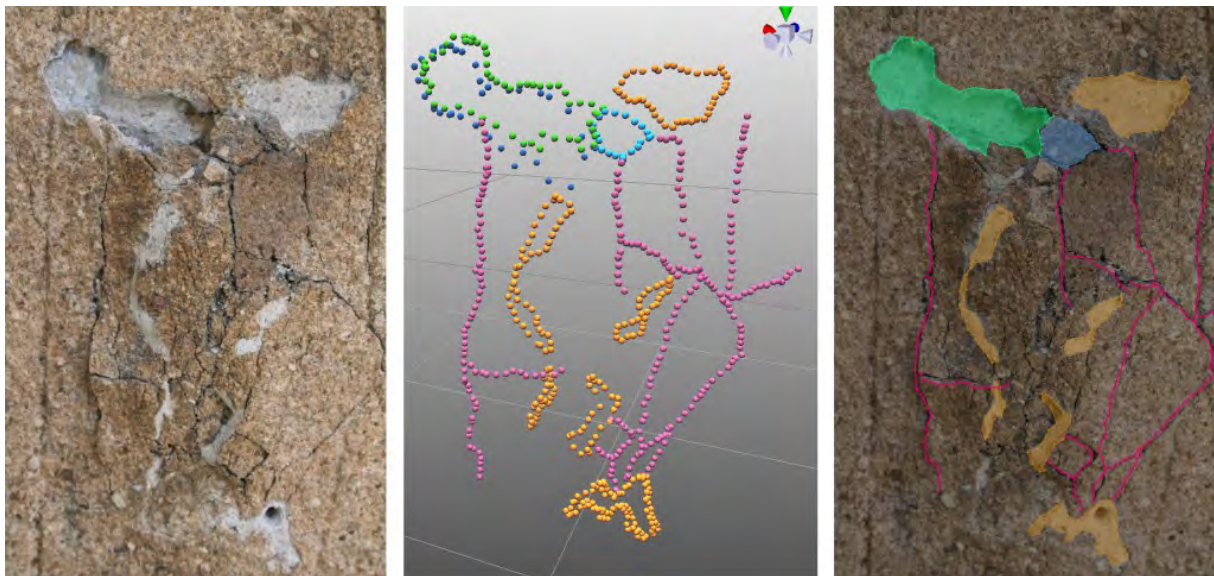


Abb. 5. Makroaufnahme eines verputzten Fassadenbereiches mit oberflächennahen Schäden (Risse und Vorwölbungen) (links), 3D-Punktwolke des aufgenommenen Rissverlaufs (Mitte), Datenfusion der 3D-Messdaten mit einem 2D-Foto als Kartierungsgrundlage (rechts).

Da der zeitliche Aufwand bei der Datenerfassung stark von den Gegebenheiten und der Größe des zu erfassenden Bereiches sowie der Anzahl zu erfassender Merkmale abhängt, ist eine Abschätzung nur eingeschränkt möglich. Für den Aufbau und die Kalibrierung der Kameras und des Messstabes ist mit ca. einer Stunde zu rechnen. Für die Risserfassungen eines 2000 mm x 3000 mm großen Bereichs mit groben und kleinen Rissstrukturen wurde eine Zeit von zwei Stunden benötigt. Es wurde dabei vor allem das kontinuierliche (automatische) Aufnehmen der Risspunkte genutzt, um somit schnell durchgehende Verläufe erfassen zu können. Für viele kleinere oder komplexere Strukturen ist ein höherer Aufwand zu erwarten.

5.1 2D-Bilddatenfusion

Neben der Überlagerung von erfassten 3D-Punktdaten auf 2D-Bilddaten können auch mehrere 2D-Bilddaten miteinander fusioniert werden. Dies eignet sich vor allem bei Bilddaten von verschiedenen Sensoren, wie einer Digitalkamera oder einer Thermografiekamera. Die Hierfür nötigen

Schritte entsprechen denen der 3D-zu-2D-Fusion. Die Korrespondenzerstellung wird hierbei lediglich im 2D-Raum vorgenommen.

Sofern nur geringe Anforderungen bzgl. der Überlagerungsgenauigkeit bestehen, kann ggf. auf eine Kalibrierung der Kameras verzichtet werden und mit nicht kalibrierten Bildern gearbeitet werden. Es ist dann aber mit Ungenauigkeiten bei der Überlagerung vor allem an den Bildrändern zu rechnen. Die Anwendung des Verfahrens zur 2D-Bilddatenfusion ist in einem separaten Merkblatt beschrieben

6 Literatur

- [1] C. Maierhofer, R. Krankenhagen, R. Mecke, M. Röllig, M. Schiller, T. Seidl, U. Kalisch, C. Hennen, J. Meinhardt: Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren; Technischer Bericht; Berlin; 2010
- [2] T. Seidl, M. Schiller, R. Mecke: Datenfusion und -visualisierung zum Monitoring von Bauteiloberflächen in der Denkmalpflege; Artikel: 9./10. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF 2010; Fraunhofer IFF; ISSN 2191-8783; Magdeburg; 2011
- [3] T. Seidl, R. Mecke, M. Schiller, C. Maierhofer, J. Meinhardt: Trackingbasierte 3-D-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
- [4] G. Bradski, A. Kaehler: Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library; First Edition; O'Reilly; ISBN 978-0-596-51613-0; 2008
- [5] J.Y.Bouguet: Camera Calibration Toolbox for MATLAB; 2010; www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [6] Z. Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence; 22(11):1330-1334; 2000
- [7] D. Marquardt: An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters; SIAM Journal of Applied Mathematics, 11(2):431-441; 1963
- [8] F. Moreno-Noguer, V. Lepetit, P.Fua: Accurate Non-Iterative $O(n)$ Solution to the PnP Problem; IEEE International Conference on Computer Vision; Rio de Janeiro; 2007
- [9] M. A. Fischler, R. C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography; Communication of the ACM; 24:381-395; 1981
- [10] X. Gao, X. Hou, J. Tang; H. Cheng: Complete solution classification for the perspective-three-point problem; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence; 25(8):930-943; 2003

Anhang 2: Merkblatt 2

Stereophotogrammetrie - ein Verfahren zur 3D Kartierung oberflächennaher Schäden und Verformungen an Bauwerken und Bauteilen

Mathias Röllig¹, Henrik Steinfurth¹, Sven Augustin¹
Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Alexa Kernchen²
Uwe Kalisch³, Jeannine Meinhardt³, Christiane Hennen⁴,
Ernst Thomas Groll⁵, Torsten Arnold⁶

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FB 8.7, Berlin

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

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

⁴Christiane Hennen, Bauforschung - Denkmalpflege, Wittenberg

⁵Ernst Thomas Groll, Restaurator, Magdeburg

⁶Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: **II 3-F20-12-1-108 / SWD -10.08.18.7-13.42**)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren		Forschungsinitiative Zukunft Bau SF- SWD – 10.08.18.7-13.42 BAM Vh 8463	
Dokument:	Merkblatt 2		
Autor:	Michael Schiller, IFF	Status:	final
Datum:	11.11.2015	Version:	1

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	85
2 Verfahrensbeschreibung und Technik	85
3 Datenaufnahme	86
4 Datenverarbeitung und Auswertung	87

1 Einleitung

Die Stereophotogrammetrie ist ein etabliertes Verfahren zur Gewinnung dreidimensionaler Informationen. In diesem Dokument wird ein Anwendungsfall für dieses Verfahren mit einem konkreten Messsystem vorgestellt. Es werden Rahmenbedingungen und der konkrete Anwendungsfall an einem Beispiel beschrieben. Ziel ist es, einen Eindruck für mögliche weitere Anwendungsfälle mit ähnlichen Messsystemen zu erhalten. Die Beschreibung richtet sich an Anwender dieser oder ähnlicher Messsysteme für die Digitalisierung von Objektoberflächen zur Dokumentation von Schäden und deren zeitlichen Verlauf.

Das Merkblatt wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projektes „Entwicklung eines Verfahrens zur zeitaufgelösten 3D-Kartierung von Verformungen und Schäden an Bauwerken und Bauteilen“ erstellt.

2 Verfahrensbeschreibung und Technik

Die Stereophotogrammetrie ist ein Verfahren, bei dem Form und Lage von Objekten aus 2 Messbildern rekonstruiert werden. Ein 3D-Punkt im Raum wird dabei von 2 Kameras erfasst. Um die Lage des 3D-Punktes im Raum rekonstruieren zu können, müssen die exakte Lage der Kameras zueinander und ihre optischen Eigenschaften bekannt sein. Über einen Vorwärtsschnitt kann ausgehend von den beiden in den Messbildern abgebildeten Punkten eines Objektpunktes seine 3D-Koordinate ermittelt werden. In Abb. 1 sind mögliche Anordnungen und der Vorwärtsschnitt zu einem Objektpunkt dargestellt.

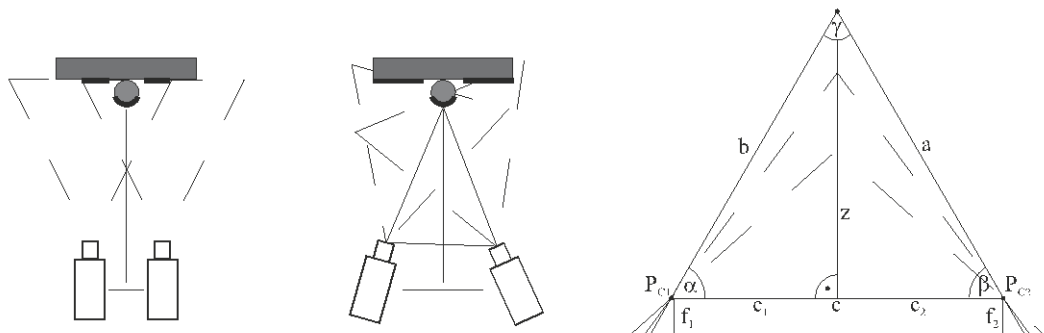


Abb. 1. Mögliche Anordnungen von 2 Kameras (links und Mitte) und Prinzip des Vorwärtsschnitts (rechts)

Für jeden Anwendungsfall sollte im ersten Schritt das passende Messsystem gewählt werden. Ein Messsystem besteht dabei in den meisten Fällen aus zwei Kameras und einer Lichtquelle. Die Anordnung und Auflösung der Kameras bestimmen dabei die Größe des Messfelds, die Dichte der resultierenden 3D-Daten und die Messunsicherheit.

Die Lichtquelle macht das System unabhängiger gegenüber von Umgebungslicht, kann aber auch verwendet werden, um eine stochastische Textur auf das Messobjekt zu projizieren. Diese Textur erleichtert die eindeutige Zuordnung eines Punktpaares aus beiden Kameras zu einem Objektpunkt. Bei komplexeren Verfahren werden spezielle Muster oder Mustersequenzen projiziert. Dabei beeinflusst das gewählte Muster und die Art der Auswertung selbst die Dichte der resultierenden 3D-Daten. Es ist anzumerken, dass für die Auswertung solcher speziellen Projektionsmuster die Lage der Projektionsmuster bzw. des Projektors zu den Kameras bekannt sein muss, was den Aufwand der Systemkalibrierung erhöht.

In unserem Beispiel wurde kein zusätzliches Muster projiziert. Dies war nicht erforderlich, da das Messobjekt bereits eine geeignete stochastische Textur aufwies. Bei der automatischen Auswertung der Bildaufnahmen wurde ein Korrelationsverfahren zur Suche des korrespondierenden Punktes eines jeden Punktpaares eingesetzt. Hierbei wird in einem Bild von einem Punkt ausgegangen und ein Bildausschnitt (Korrelationsfenster) um diesen Punkt definiert. Ein Bildausschnitt

besteht dabei aus einer festen Pixelgröße (z.B. 17 x 17 Pixel). In einem bestimmten Erwartungsbereich werden im zweiten Bild Bildausschnitte gleicher Größe mit Hilfe einer Korrelationsfunktion mit dem Bildausschnitt aus dem ersten Bild verglichen (s. Abb. 2). Der Erwartungsbereich wird durch die Epipolarlinien, die von der Lage der Kameras zueinander und ihren optischen Eigenschaften abhängen, bestimmt. Die in diesem Beispiel verwendete Korrelationsfunktion erreicht an der Position im zweiten Bild ihr Minimum, an der die größte Korrelation (Ähnlichkeit) zwischen beiden Bildausschnitten herrscht.

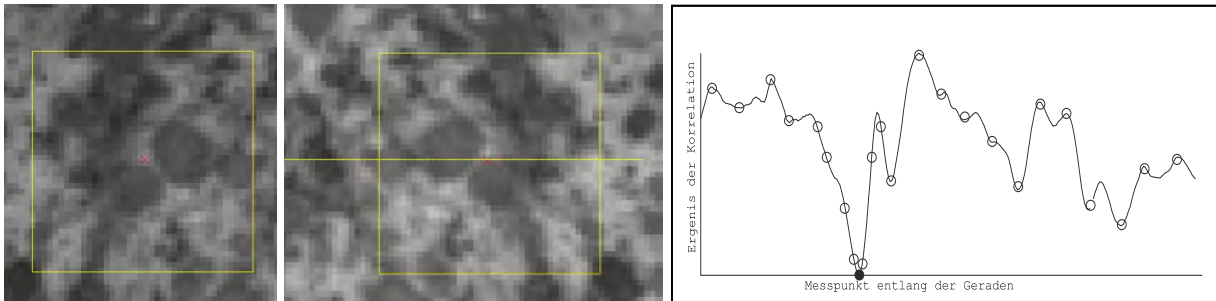


Abb. 2. Fenster im ersten Bild (links) und Suchbereich im zweiten Bild (Mitte); Ergebnisse der Korrelation im Suchbereich (rechts).

3 Datenaufnahme

Für das Messsystem müssen vor einem Messeinsatz die Kalibrierparameter bekannt sein. Die Kalibrierparameter enthalten Informationen über die exakte Anordnung der Kameras sowie systembedingte Parameter für die verwendeten Objektive. Über einen definierten Zeitraum und entsprechenden Umgebungstemperaturen sind diese Kalibrierparameter konstant. Dieser Zeitraum hängt vorrangig von den mechanischen Eigenschaften des Messsystems ab. Für die Ermittlung der Parameter ist in den meisten Fällen der Hersteller des Messsystems verantwortlich. Diese werden dann unter definierten Bedingungen im Labor ermittelt. Im unserem Beispiel wurden die Parameter im Labor des Fraunhofer-IFF ermittelt.

Die Untersuchungsobjekte sollten entweder eine ebenerdige Zugänglichkeit oder die Verfügbarkeit eines sehr stabilen und großzügigen Gerüsts aufweisen. Vor der Datenaufnahme sollte überprüft werden, ob das Messsystem in den vorgesehenen Messpositionen Daten erfassen kann. Hierbei kann die Software einen entscheidenden Beitrag leisten. Dabei sollten der Arbeitsabstand des Messsystems und der gewählte Bildausschnitt überprüft werden. Für die Kameraaufnahme ist noch die Belichtungszeit den Umgebungsbedingungen anzupassen. Bei einer Aufnahme für eine Messposition werden dann zeitgleich Bilder von beiden Kameras eingezogen und gespeichert.

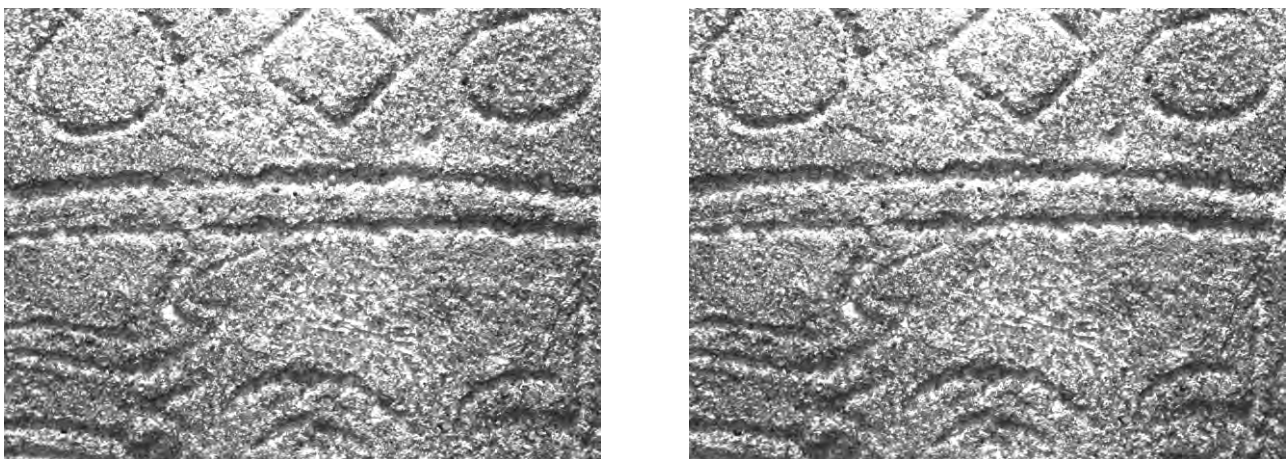


Abb. 3. Bildaufnahme an einer Messposition für die linke Kamera (links) und die rechte Kamera (rechts)

4 Datenverarbeitung und Auswertung

Die Auswertung der Bilddaten kann nach einem Messeinsatz erfolgen. Sie ist Bestandteil der Software für das eingesetzte Messsystem. Die Software enthält Berechnungsfunktionen für die Ermittlung des 3D-Punktes aus einem Punktpaar mit den ermittelten Kalibrierparametern.

Für das hier eingesetzte Messsystem wurde eine eigene Software mit einer automatisierten Auswertung weiterentwickelt und eingesetzt. Dabei müssen Parameter für den Ablauf gewählt werden. Für die Suche der zusammengehörigen Punktpaare wird ein Raster mit einem definierten Punkt-Abstand gewählt. Im Beispiel wurde ein Pixelabstand von 4 eingestellt, da er einen guten Kompromiss zwischen der Dichte der 3D-Daten und der Geschwindigkeit der Auswertung darstellt. Für die Auswertung an jedem Rasterpunkt muss dann noch das Korrelationsverfahren und die Größe des Korrelationsfensters festgelegt werden. Die Größe des Fensters ist von der Abbildung des Musters im Bild abhängig. Die Fenstergröße und das Korrelationsverfahren kann über Stichproben im Programm gewählt und getestet werden. Es sollte so gewählt werden, dass eine eindeutige Zuordnung der Texturinformationen im Bild möglich ist. In Abb. 4 ist das Messergebnis für die oben gezeigte Aufnahme zu sehen.

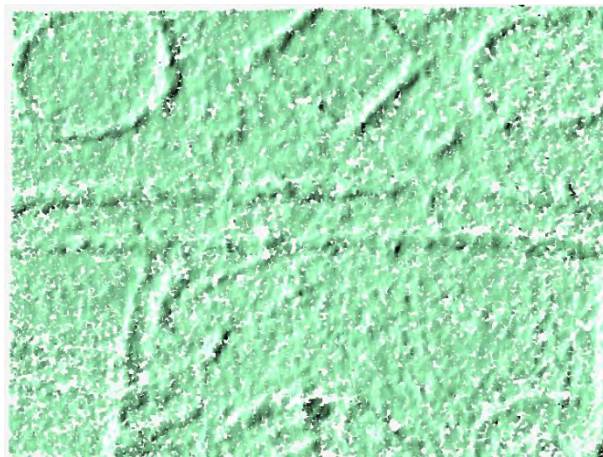


Abb. 4. Schattierte Ansicht der 3D-Punkte aus der Sicht des Messsystems.

Vergleichbare Messsysteme erzeugen ebenfalls über geeignete Parameter 3D-Punktdaten. Diese beziehen sich auf das Sensorkoordinatensystem, also auf die Messposition des Sensors. Je nach Auflösung und Anordnung der Kameras entstehen Messdaten für den resultierenden Messbereich. Sollen Daten, wie beim untersuchten Messobjekt, über den Messbereich hinaus ermittelt werden, sind mehrere Aufnahmen notwendig. Die Aufnahmen beim verwendeten Messsystem wurden manuell in ein Koordinatensystem überführt. Dabei wurden die Sensorpositionen über eine Korrespondenzsuche in den Messdaten ermittelt. Die Messposition des Sensors kann alternativ auch mit einem zusätzlichen Messsystem oder automatisch detektierbaren Referenzkoordinaten erfasst werden. Dies ermöglicht eine automatische Überführung der Sensordaten in ein Koordinatensystem.

Der zeitliche Aufwand für einen Messeinsatz ist sehr stark von der zu erfassenden Fläche und des eingesetzten Messsystems abhängig. Beim Messeinsatz an den Putzritzungen wurden für eine Fläche von 2300 mm x 1200 mm 355 Aufnahmen generiert. Die Aufnahmen wurden innerhalb von 6 Arbeitsstunden generiert. Für den Auf- und Abbau des Messsystems war eine weitere Stunde notwendig.

Anhang 3: Merkblatt 3

Geometrische Kalibrierung einer Infrarot-Kamera durch Ermittlung der inneren Kameraparameter

Mathias Röllig¹, Henrik Steinfurth¹, Sven Augustin¹
Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Alexa Kernchen²
Uwe Kalisch³, Jeannine Meinhardt³, Christiane Hennen⁴,
Ernst Thomas Groll⁵, Torsten Arnold⁶

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FB 8.7, Berlin

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

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

⁴Christiane Hennen, Bauforschung - Denkmalpflege, Wittenberg

⁵Ernst Thomas Groll, Restaurator, Magdeburg

⁶Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: **II 3-F20-12-1-108 / SWD -10.08.18.7-13.42**)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren		Forschungsinitiative Zukunft Bau SF- SWD – 10.08.18.7-13.42 BAM Vh 8463	
Dokument:	Merkblatt		
Autor:	Mathias Röllig, BAM	Status:	final
Datum:	09.11.2015	Version:	2

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	93
2 Innere Kamerakalibration	93
2.1 Auswahl und Überprüfung geeigneter Kalibrierobjekte (Targets)	94
2.2 Anforderungen an den Messaufbau zur Kalibrierung	96
2.3 Durchführung der Messung	97
2.3 Auswertungen und Ergebnisse der Messung	99
3 Bestimmung der Tiefenschärfe	101
3.1 Anforderungen an das Messsystem	101
3.2 Durchführung der Messung	101
3.3 Auswertungen der Messungen	102
4 Literatur	104
Anhang 1: Anleitung zur Durchführung einer Kamerakalibrierung, verwendete Targets, Geräte und Ergebnisse	105
A1.1 Arbeitsschritte zur Durchführung einer Kalibrierung:	105
A1.2 Auswertungen der Kalibriermessung und Ergebnisse	106
A1.3 Verwendete Targets und Geräte	111
Anhang 2: Ergebnisse zur Bestimmung der Tiefenschärfe	113

1 Einleitung

Dieses Merkblatt richtet sich an potentielle Nutzer und Anwender der passiven aktiven Thermografie, die eine geometrische Kalibrierung für die erfassten Thermogramme benötigen. Das Merkblatt wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projektes „Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren“ erstellt.

Mit einer Infrarot (IR)-Kamera erfasste Thermogramme zeigen Abbildungsfehler, wie sie bei allen abbildenden optischen Systemen vorkommen. Häufig im Thermogramm erkennbar sind tonnen- oder kissenförmige Verzeichnungen. Diese Abbildungsfehler entstehen durch die beteiligten Elemente des gesamten abbildenden Systems im optischen Strahlengang innerhalb der Kamera. Die kamerainternen Abbildungsparameter können durch eine innere Kalibrierung ermittelt werden. Zu diesen geometrischen Abbildungsparametern gehören die effektive Brennweite und diverse Verzeichnungsparameter. Eine geometrische Kalibration von Thermogrammen sollte immer dann durchgeführt werden, wenn diese mit anderen 2D oder 3D-Daten überlagert werden sollen oder wenn die Abbildungen zur geometrischen Vermessung (z. B. der georteten Fehlstellen) genutzt werden sollen.

Da die optischen Gesetzmäßigkeiten in den genutzten Wellenlängenbereichen unverändert gelten, kann man bekannte Prozeduren für die innere und äußere Kalibration für optische Kameras nutzen. Die innere Kalibrierung sollte zweckmäßigerweise vor der äußeren Kalibrierung durchgeführt werden.

Bei der inneren Kalibration wird ein Parametersatz bestimmt, der eine Entzerrung und damit eine Korrektur der Abbildungen ermöglicht. Erst nach dieser Korrektur kann eine zuverlässige Zuordnung der thermografischen Daten zu Oberflächenmerkmalen des betrachteten Objektes erfolgen (Datenfusion).

Für eine spätere Überlagerung der Thermogramme mit 3D-Datensätzen der Untersuchungsobjekte muss zusätzlich bekannt sein, wie sich das reale 3D-Objekt in der 2D-Bildebene der IR-Kamera abbildet. Dazu ist die räumliche Anordnung von Objekt und Kamera zueinander, bzw. die Kameraposition in Relation zur abzubildenden Oberfläche (äußere Parameter) zu bestimmen (äußere Kalibrierung).

2 Innere Kamerakalibration

Die Ermittlung der inneren Kameraparameter wird im vorliegenden Fall nach der von Zhang [1] vorgestellten Methode durchgeführt. Dieser beschreibt eine Kalibrierung über eine Ebene mit gleichmäßig verteilten Mustern mit Passpunktfeldern durch einige wenige unterschiedliche Orientierungen. Es sind keine weiteren Tiefeninformationen notwendig, wie z. B. bei der Prozedur von Tsai [2]. Ein Vergleich der Methoden nach Zhang und Tsai ist in [3] ausführlich beschrieben.

Die Projektion von Objekten vom Welt- ins Bildkoordinatensystem wird möglich, falls alle Parameter der Kamera bestimmt werden. Grundlage dieser geometrischen Kalibration ist das Lochkameramodell. Bei diesem werden die Punkte der realen Welt durch ein ideales sehr kleines Loch in die Kamera auf der Bildebene wiedergegeben. Die Bildebene liegt vor der Kamera. Somit steht das Bild nicht auf dem Kopf und die Eigenschaften der Abbildung werden nicht verändert.

In Abbildung 1 ist das mit den folgenden Parametern verwendete Lochkameramodell zu sehen. Mit M wird ein Punkt in der realen Welt mit den dazugehörigen beschreibenden Koordinaten X , Y und Z benannt. Abgebildet wird er in der Bildebene m mit den beschreibenden Koordinaten u_0 und v_0 , bezogen auf die linke, obere Ecke der Bildebene. Das Kamerakoordinatensystem wird mit dem Punkt C beschrieben. Hier ist auch die optische Achse zu finden. Die drei Punkte M , m und C sind kollinear, d. h. liegen auf einer Linie. Zusätzlich werden mit α und β Skalierungsfaktoren der Achsen für die Bildebene m zur Verfügung gestellt und Θ definiert den aufgespannten Winkel zwischen den Achsen. Mit den Buchstaben R und t werden extrinsische Faktoren zur Transformation der Weltkoordinaten in Kamerakoordinaten bezeichnet. Dies sind die Rotationsmatrix R und der Translationsvektor t .

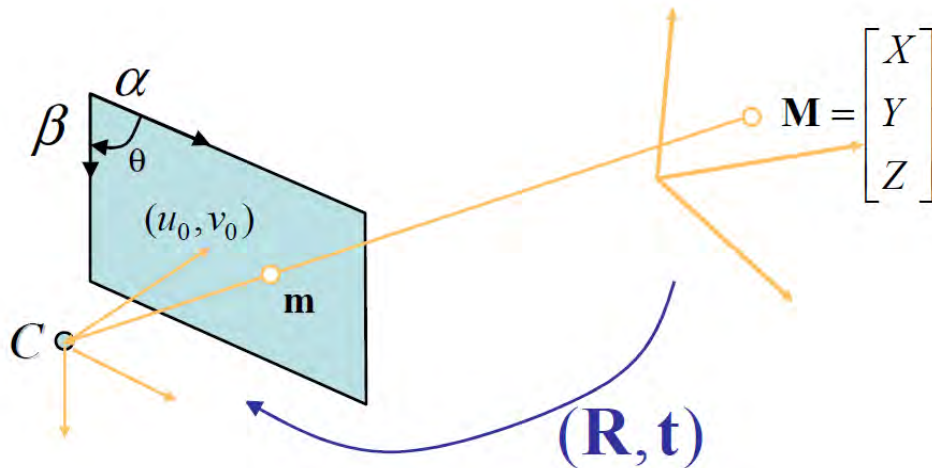


Abb. 1. Lochkameramodell (aus [3], Seite 8) mit dem Weltkoordinatenpunkt M , der Bildebene m und dem Kamerakordinatenpunkt C .

2.1 Auswahl und Überprüfung geeigneter Kalibrierobjekte (Targets)

Als Kalibrierobjekte können sowohl passive als auch aktive Passpunktfelder genutzt werden. Um jedoch Unschärfen durch Wärmediffusionsprozesse zu vermeiden, werden, wie im Folgenden gezeigt, passive Systeme vorgezogen. Dazu eignen sich z. B. Schachbrettmuster mit einer gleichmäßigen Verteilung von Passpunkten [1]. Diese können in ihrer Größe angepasst werden, s. Abbildung 2.

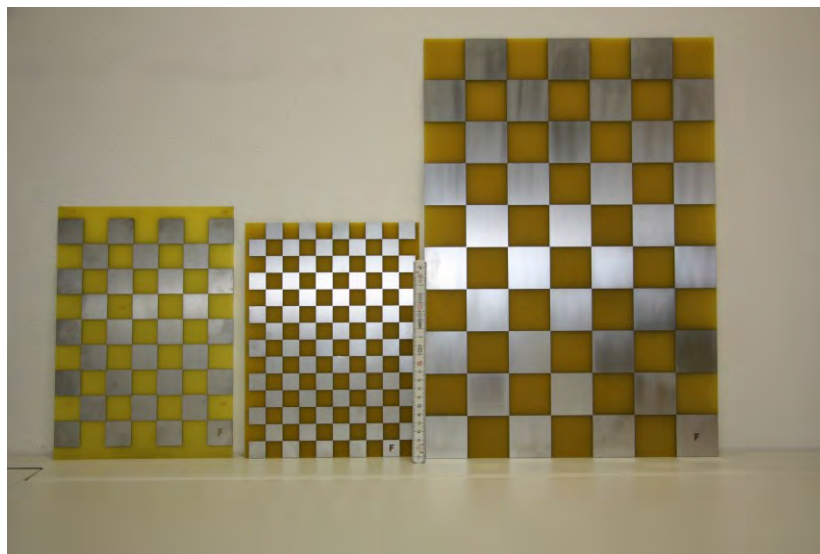


Abb. 2. Passpunktfelder K0, K1 und K2 von links nach rechts.

Diese relativ einfach zu realisierenden Schachbrettmuster, welche im Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera einen ausreichenden Kontrast für die detektierte Infrarotstrahlung liefern (s. u.), werden aus mit Zinn beschichteten Leiterplatten hergestellt. Die Emissivitäten der beiden Oberflächen unterscheiden sich stark. Da die Passpunktfelder möglichst vollflächig abgebildet werden müssen, sind unterschiedliche Größen der Passpunktfelder für unterschiedliche Entfernungen und verschiedene Objektive der Kamera erforderlich. Eine Daumenregel besagt, dass die Anzahl an notwendigen Korrespondenzen die Anzahl der zu bestimmenden Parameter um den Faktor fünf übersteigen sollte. Werden zum Beispiel sieben geometrische Parameter bestimmt, dann sollte das Kalibriermuster mindestens 35 Markierungen aufweisen. Die Beschreibung der Targets mit ihren Parametern ist im Anhang 1 des Merkblatts aufgeführt.

Abbildung 3 links zeigt ein Thermogramm des Passpunktfeldes K0 (Größe eines Quadrates: 30 x 30 mm²), welches unter Laborbedingungen aufgenommen worden ist. Der Kontrast resultiert aus der unterschiedlich starken Reflexion des infraroten Anteils des diffusen Deckenlichts. Abbildung 3 rechts zeigt die Temperaturverteilung entlang der beiden Linien im Thermogramm, die mit L1 und L2 bezeichnet sind. Der scheinbare thermische Kontrast liegt im Bereich von 0,1 bis 0,4 K, ist damit größer als das NETD der Kamera mit 0,05 K und ist ausreichend für die Identifizierung der Kreuzungspunkte des Schachbrettmusters.

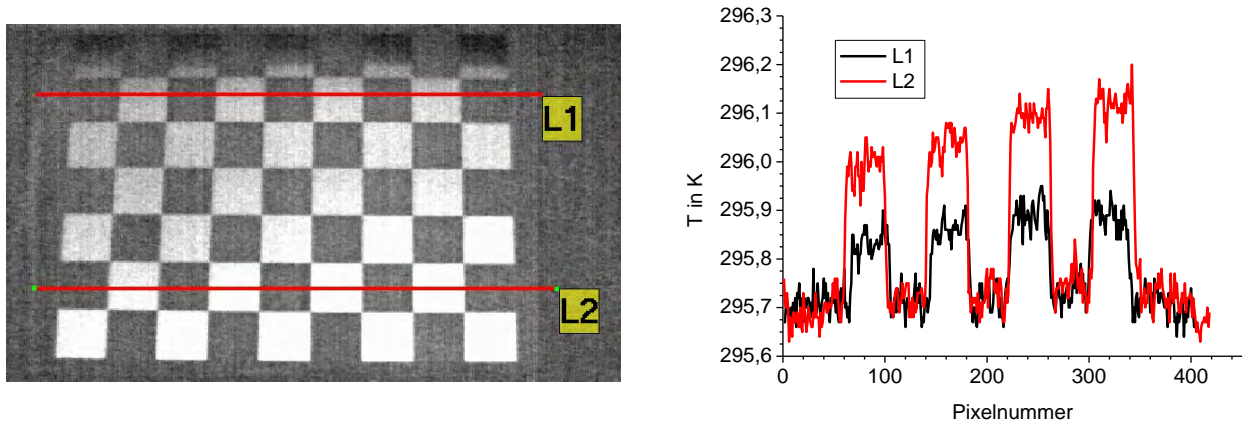


Abb. 3. Links: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes K0 in 90 cm Abstand (50 Mittelungen von Einzelthermogrammen). Rechts: Temperaturprofil entlang der links eingetragenen Linien.

Ein größerer Kontrast kann erzeugt werden, wenn das Passpunktfeld in Reflexionsanordnung mit einer starken Wärmequelle bestrahlt wird oder etwa eine Minute lang mit einer Wärmequelle, wie einer Halogenlampe oder einem Heißlüfter, direkt erwärmt wird. Die unbedeckten Leiterplattenbereiche zeigen eine andere Temperaturverteilung auf ihrer Oberfläche als die metallbeschichteten Bereiche. Nach einigen Minuten verschwindet der Kontrast allmählich nach der direkten Erwärmung und kann durch erneute Erwärmung wieder „aufgefrischt“ werden.

Der Vergleich der in Abbildung 4 dargestellten Thermogramme zeigt für die Erwärmung einen größeren gemessenen Temperaturhub zwischen den beschichteten und nicht beschichteten Quadraten. Ein Nachteil bei Erwärmung des Temperaturpassfeldes ist die laterale Wärmeleitung. Diese führt zu einer im Laufe der Beobachtungszeit zu einer Verbreiterung der Anstiegsflanke zwischen den Quadraten und somit zu einer größeren Varianz des Passpunktes.

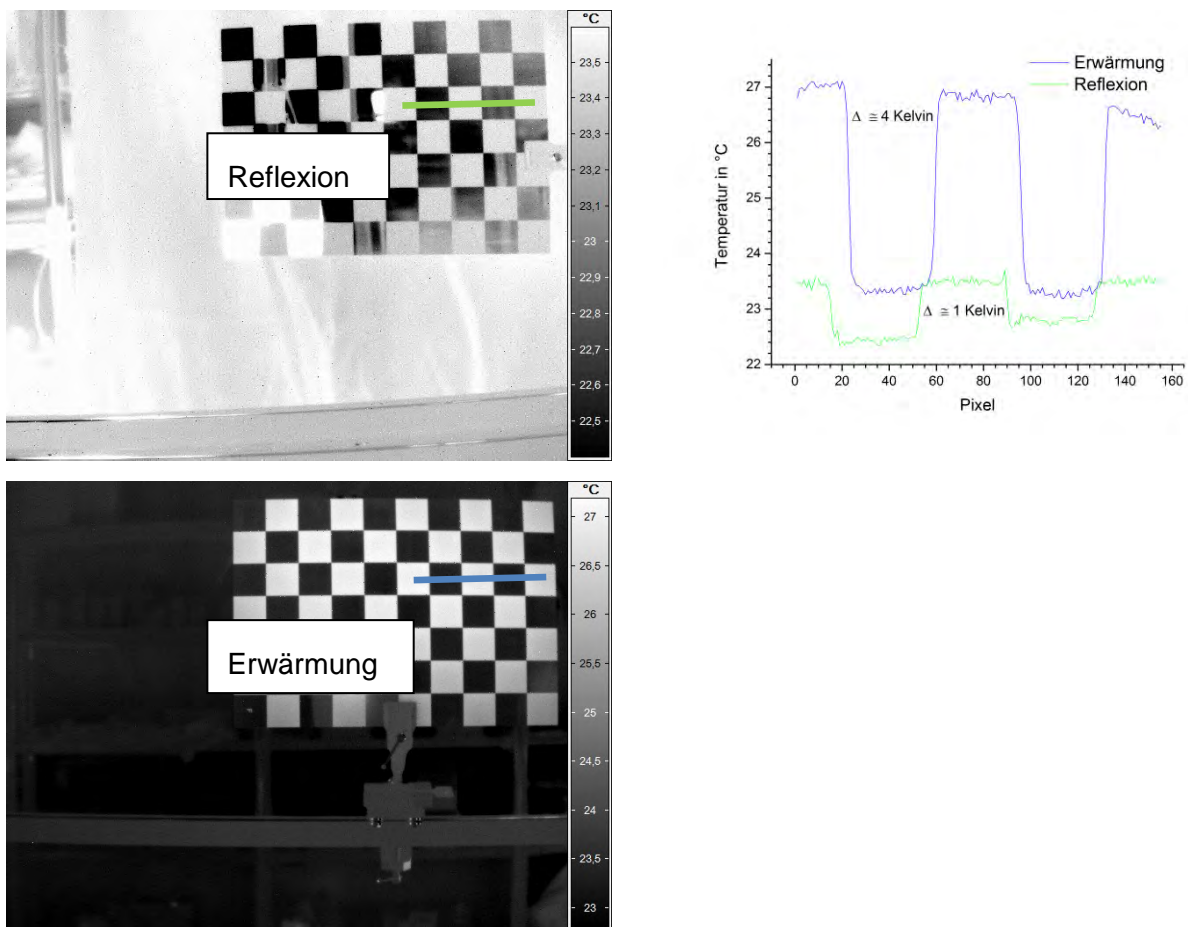


Abb. 4: Links oben: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes K2 in 215 cm Abstand (50 Mittelungen von Einzelthermogrammen) in Reflexion. Links unten: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes K2 in 215 cm Entfernung direkt nach der Erwärmung. Rechts oben: Temperaturprofile entlang der links in den Thermogrammen eingetragenen Linien.

2.2 Anforderungen an den Messaufbau zur Kalibrierung

Die Anforderungen an das Messsystem sind die Möglichkeit einer reproduzierbaren Abstandsmessung und eine in alle drei Raumrichtungen frei bewegliche Einrichtung zur Realisierung der notwendigen Orientierungen für das Passpunktfeld. Im vorliegenden Fall wird die Kamera bewegt. Der Aufbau besteht aus einem Aluprofilschienensystem mit mindestens drei Freiheitsgraden für die Kameraposition, siehe Abbildung 5. Die durchgeführte Kalibrierung gilt nur für Objektive mit fester Brennweite. Weiterhin muss der Fokus des Kamerasystems reproduzierbar einstellbar sein.

Für die Messdatenerfassung und –auswertung müssen geeignete Soft- und Hardwaresysteme zur Verfügung stehen. Eine Beschreibung der verwendeten Geräte und Hilfsmittel ist im Anhang 1 aufgeführt.

2.3 Durchführung der Messung

Der Aufbau zur Kalibrierung der inneren Kameraparameter ist in Abbildung 5 dargestellt. Links ist eine Prinzipskizze gezeigt, rechts sieht man den verwirklichten Aufbau. Bei dieser Anordnung wird nicht das Passpunktfeld, sondern die Kamera mit konstantem Abstand um das Passpunktfeld herum bewegt, um verschiedene Aufnahmewinkel zu realisieren.

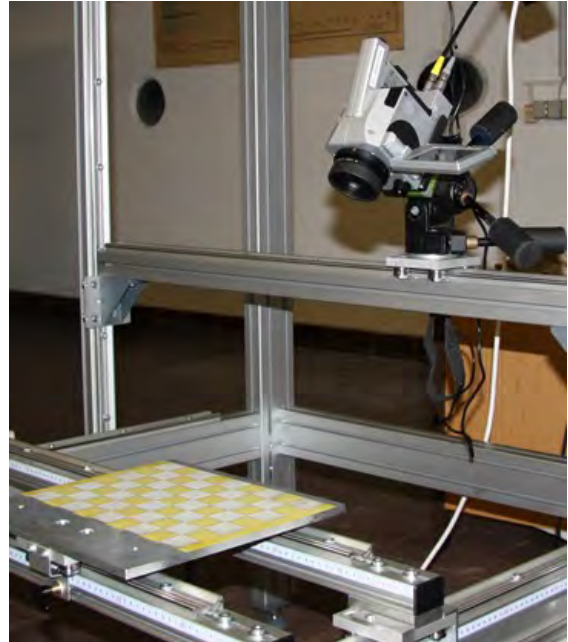
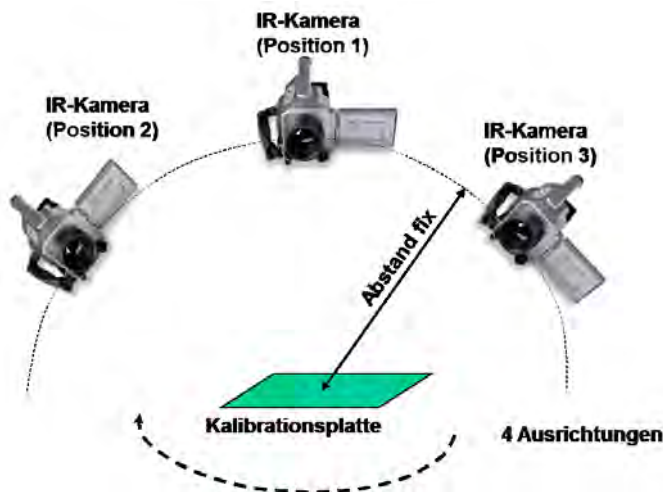


Abb. 5: Messordnung mit bewegter Kamera. Links die Prinzipskizze, rechts eine der verwendeten Messanordnungen.

Zunächst wird der Abstand zwischen der zu kalibrierenden IR-Kamera und dem Passpunktfeld festgelegt. Diese Festlegung muss idealerweise zwei Bedingungen erfüllen. Zum einen sollte die vollflächige Abbildung des Passpunktfeldes in allen Orientierungen gegeben sein, zum anderen sollte der Abstand dem der Messung vor Ort entsprechen. Diese beiden Bedingungen sind nicht immer zu gewährleisten, da man nicht mit wirtschaftlich zu vertretendem Aufwand die für manche Anwendungen erforderlichen, entsprechend großen Passpunktfelder erstellen kann. Zur Erfassung von Thermogrammen unter verschiedenen Aufnahmewinkeln kann entweder das Passpunktfeld oder die Kamera bewegt werden. Wichtig dabei ist zum einen die Einhaltung des mittleren Abstands zueinander, zum anderen eine nicht zu starke Verkipfung des Passpunktfeldes. Dieses ist notwendig, um das Passpunktfeld im Tiefenschärfebereich des verwendeten Objektivs zu halten. Um eine Reproduzierbarkeit von Kalibrationen zu gewährleisten, ist bei der Montage des Objektivs auf eine festgelegte Durchführung und eine reproduzierbare Positionierung zu achten. Im Mittel sind 12 bis 16 Aufnahmen bei einer vollflächigen Abbildung erforderlich, um die notwendige Anzahl an Orientierungen zu erfassen.

Da für die Ermittlung der internen Kameraparameter keine absoluten Temperaturen nötig sind, wird die Emissivität auf 1 bzw. 100% gesetzt.

Für die hier verwendeten Geräte und Software sind die nachfolgend beschriebenen Einstellungen nötig. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf die jeweiligen Handbücher verwiesen.

In Abbildung 6 sind als Beispiel für eine gelungene Messung vier gemessene Thermogramme des Passpunktfeldes K0 gezeigt. Diese wurden mit einer Mikrobolometerkamera und einem Normalobjektiv 30 mm in unterschiedlichen Ausrichtungen bei festem Abstand und festem Aufnahmewinkel aufgenommen. Erkennbar sind z. T. deutliche tonnenförmige Verzeichnungen. Die Aufnahmen sind gut auszuwerten, da sie vollflächig und subjektiv scharf das Passpunktfeld über die gesamte Fläche darstellen. Eine Arbeitsablauffliste mit den benötigten Arbeitsschritten zur Kalibrierung ist im Anhang 1 zu finden.

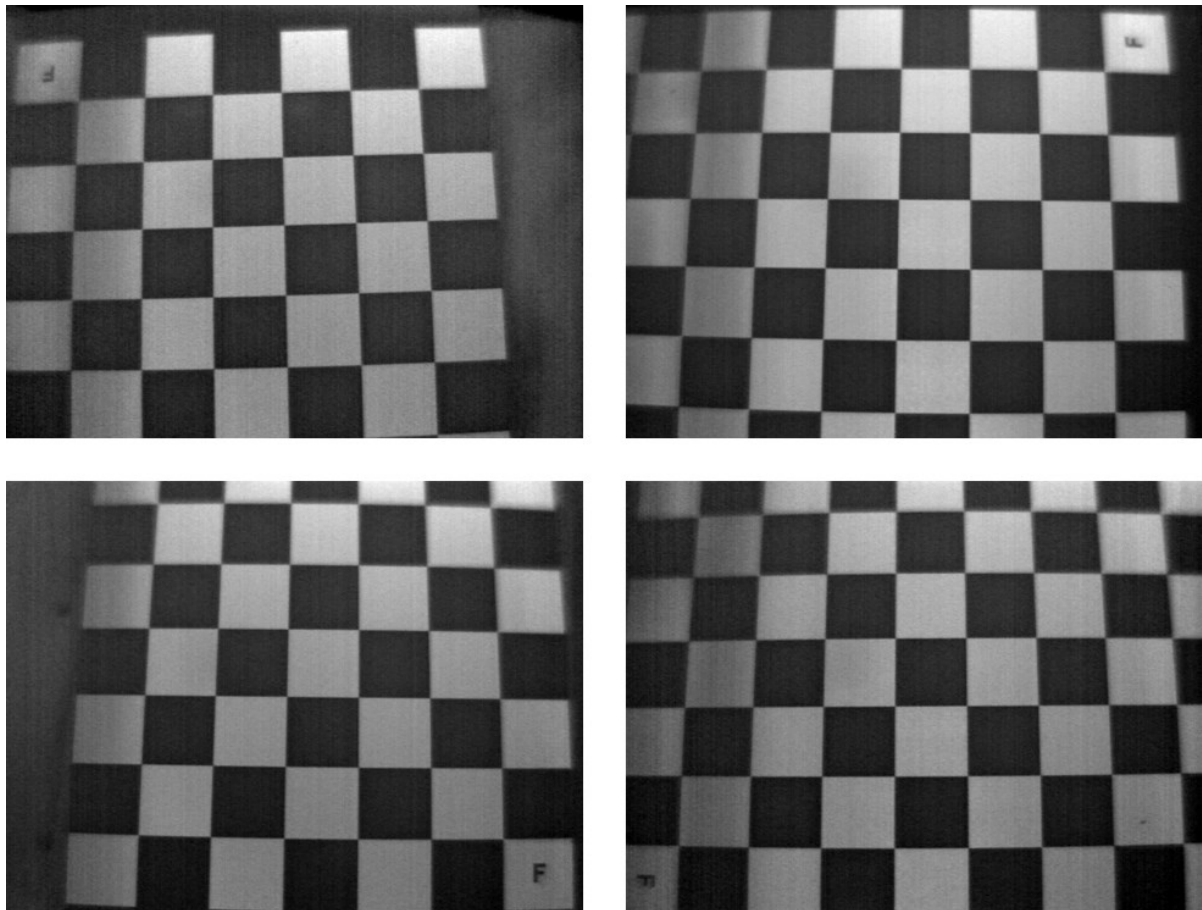


Abb. 6: Vier Thermogramme des Passpunktfeldes K0 aufgenommen mit einer Mikrobolometerkamera, einem Normalobjektiv 30 mm, einem mittlerem Abstand von 45 cm, einem Aufnahmewinkel von 75° und vier verschiedenen Ausrichtungen.

2.3 Auswertungen und Ergebnisse der Messung

Die Beschreibung des verwendeten Softwaretools „Camera calibration toolbox for Matlab“ zur Ermittlung der inneren Kameraparameter der IR-Kamera von Jean-Yves Bouquet, welches im Internet frei verfügbar ist (http://www.vision.caltech.edu/bouquet/calib_doc/) und die nötigen Arbeitsschritte zur Auswertung der Kalibrierung sind im Anhang 1 aufgeführt.

Im Folgenden werden an ausgewählten Beispielen Ergebnisse der Kamerakalibrierung gezeigt. Zur Kamerakalibrierung wird hier das Lochkameramodell verwendet, siehe Abbildung 1. Dort ist auch eine Beschreibung der inneren und äußeren Kameraparameter zu finden. Abbildung 7 zeigt die visuell wahrnehmbaren Verzerrungen des Passpunktfeldes K0 in 50 cm Abstand sowie eine grafische Veranschaulichung des Einflusses der radialen und tangentialen Verzeichnung auf jeden Pixel des Bildes. Jeder Pfeil zeigt die effektive Verlagerung von diesem Pixel durch die Linsenverzeichnungen des Objektivs. Am Rand des Bildes ist diese Verlagerung beitragsmäßig am größten. Des Weiteren wird mit dem in der Mitte erkennbare Kreuz der Mittelpunkt des Detektorarrays und mit dem X der errechnete Aufpunkt der optischen Achse angezeigt. Die ermittelten Kameraparameter zur Beschreibung der Abbildungseigenschaften gestatten eine nachträgliche Korrektur der Abbildung, welche den mittleren Fehler auf unter 0,2 Pixelbreiten reduziert (Beispiel s. Abbildung 8).

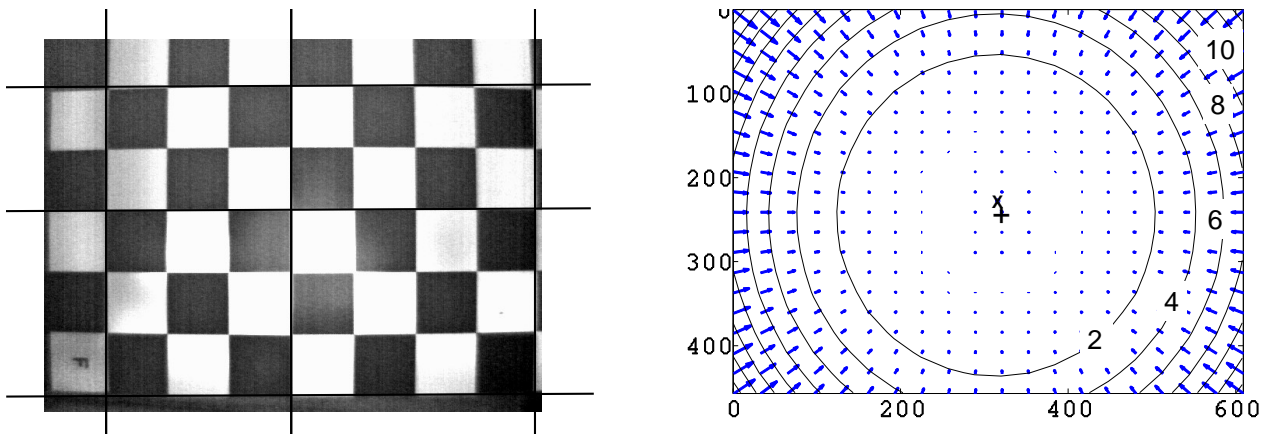


Abb. 7: Links: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes K0 in 50 cm Abstand mit dem Normalobjektiv von 30 mm der Bola. Verzeichnungen sind vor allem in den Ecken deutlich erkennbar. Rechts: Grafische Veranschaulichung der Verzeichnung durch die Kameraoptik der IR-Kamera mit Normalobjektiv, die Zahlen geben den Versatz in Pixelgrößen an. +: Mittelpunkt des Detektorarrays der Kamera; X: Aufpunkt der optischen Achse des Objektivs auf dem Detektor.

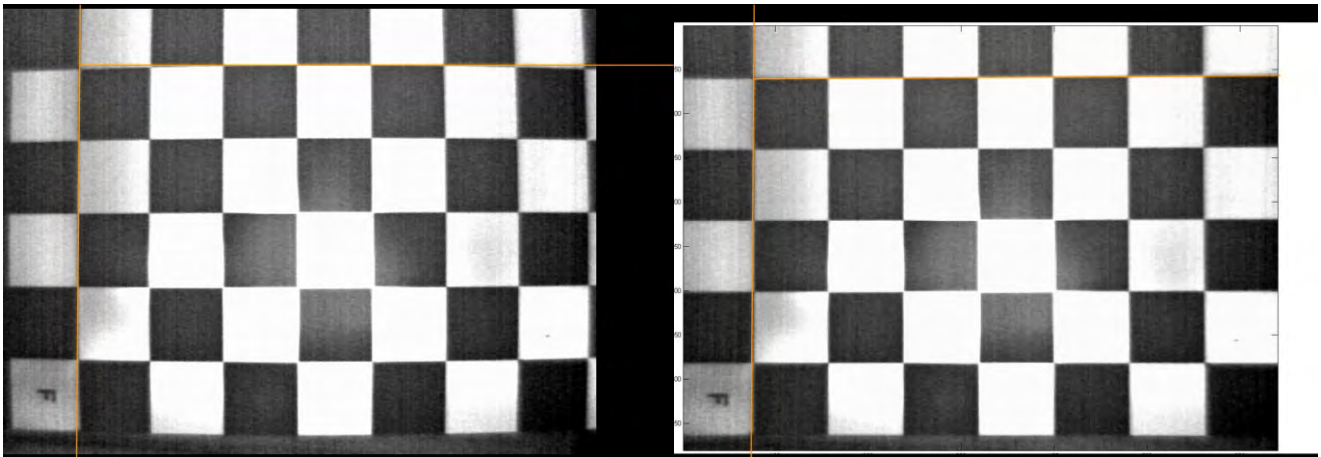


Abb. 8: Wirkung der geometrischen Korrektur (linkes Bild: vorher, rechtes Bild: nachher) bei einer thermografischen Aufnahme des Passpunktfeldes K0. Am Rand des Thermogramms ist die Verzerrung betragsmäßig am größten (linkes Bild).

3 Bestimmung der Tiefenschärfe

Bei der Bestimmung des so genannten Tiefenschärfebereichs werden für verschiedene Abstände die jeweils geeigneten Passpunktfelder verwendet. Ideal ist eine vollflächige Abbildung des Passpunktfeldes. Dabei wird der Umstand ausgenutzt, dass der Übergang zwischen beschichteten und nicht beschichteten Bereichen im Thermogramm mit einer scharfen Kante abgebildet wird, die sich bei der Aufnahme eines Reflexionskontrastes (Messung der an der Probenoberfläche reflektierten Strahlung einer externen IR-Strahlungsquelle) ergibt. Als IR-Strahlungsquelle wird bei geringen Abständen die Eigenstrahlung der Kamera verwendet, die bei anderen Messungen eher störend wirkt, bei größeren Abständen werden externe IR-Strahlungsquellen wie Halogenstrahler, Wärmestrahler und Blitzlampe verwendet. Diese externen IR-Strahlungsquellen werden in einem größeren Abstand positioniert, um die Erwärmung der Oberfläche durch die Quellen zu minimieren.

3.1 Anforderungen an das Messsystem

Die Anforderung an das System ist eine stabile, reproduzierbare Bewegungsmöglichkeit auf der optischen Achse zwischen Messobjekt und IR-Kamera. Im vorliegenden Fall ist dies durch ein Aluminiumprofilschiensystem realisiert worden und einem montiertem Maßband entlang der optischen Achse.

3.2 Durchführung der Messung

In Abbildung 9 sieht man die Prinzipskizze und einen ausgeführten Aufbau zur Messung der Tiefenschärfe.

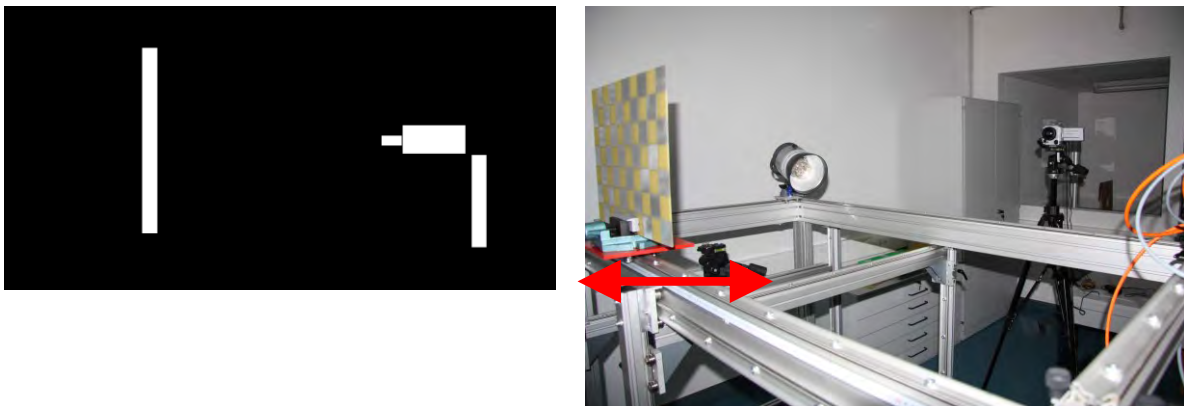


Abb. 9: Messordnung zur Bestimmung der Tiefenschärfe. Links die Prinzipskizze, rechts eine der verwendeten Messanordnungen. Der Abstand zur IR-Kamera wird durch Verschieben des Passpunktfeldes in cm-Schritten variiert (roter Pfeil).

Zunächst wird das Messobjekt, wenn möglich, vollflächig abgebildet. Dazu ist es senkrecht auf der optischen Achse montiert.

Danach wird die Entfernung zwischen dem Messobjekt und der IR-Kamera nach der Einstellung einer subjektiv scharfen Abbildung gemessen. Dieser Wert ist zur Orientierung wichtig, der Bereich der optimalen Schärfe wird aus den Messungen ermittelt.

Im Folgenden wird in einem groben Raster der Abstandsreich des Passpunktfeldes durch Verschiebung auf der optischen Achse bestimmt. Diese beiden Grenzen sind erreicht, wenn die Passpunktfelder in den Thermogrammen deutlich unscharf werden.

Dieser ermittelte Abstandsreich wird durch ein feineres Raster vermessen. Dieses sollte mindestens aus 16 äquidistanten Messpunkten bestehen.

An diesen Messpunkten werden jeweils in einer Sequenz 50 Thermogramme zur Rauschminimierung aufgenommen. Daraus wird der Mittelwert gebildet und gespeichert. Dieses Thermogramm pro Messpunkt wird bei der Auswertung weiterverarbeitet.

3.3 Auswertungen der Messungen

Abbildung 10 links zeigt ein Thermogramm des Passpunktfeldes K2. Der Kontrast resultiert aus der unterschiedlich starken Reflexion des infraroten Anteils der IR-Strahlungsquelle. Abbildung 10 rechts zeigt den Temperaturverlauf entlang der gelb dargestellten Linie im Thermogramm, die mit „Temperaturverlauf“ bezeichnet ist. Der scheinbare thermische Kontrast liegt im Bereich von 3 K und ist ausreichend für die Identifizierung des Überganges von beschichteten und nicht beschichteten Quadraten des Schachbrettmusters.

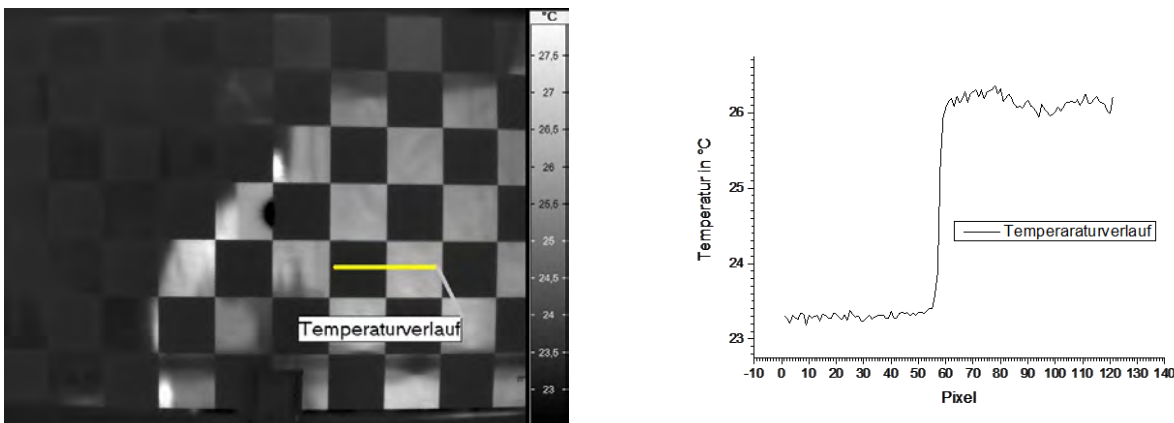


Abb. 10: Links: Thermografische Aufnahme des Passpunktfeldes K2 in 100 cm Abstand (50 Mittelungen). Rechts: Temperaturverlauf entlang der links eingetragenen Linie.

Die folgende Abbildung 11 zeigt beispielhaft den gemessenen Effekt des „Aufweichens“ der Kante bei Defokussierung bei dem Passpunktfeld K1. Der in schwarz dargestellte Temperaturverlauf wird bei einem Abstand von 48 cm gemessen. Der rot und grün dargestellte Temperaturverlauf wird in einem Abstand außerhalb des ermittelten Tiefenschärfebereichs aufgenommen. Deutlich ist die Verbreiterung der Flanke zu sehen. In dem schwarz dargestellten Verlauf sind vier Pixel für den Übergang nötig, bei den beiden anderen sind es mindestens acht Pixel.

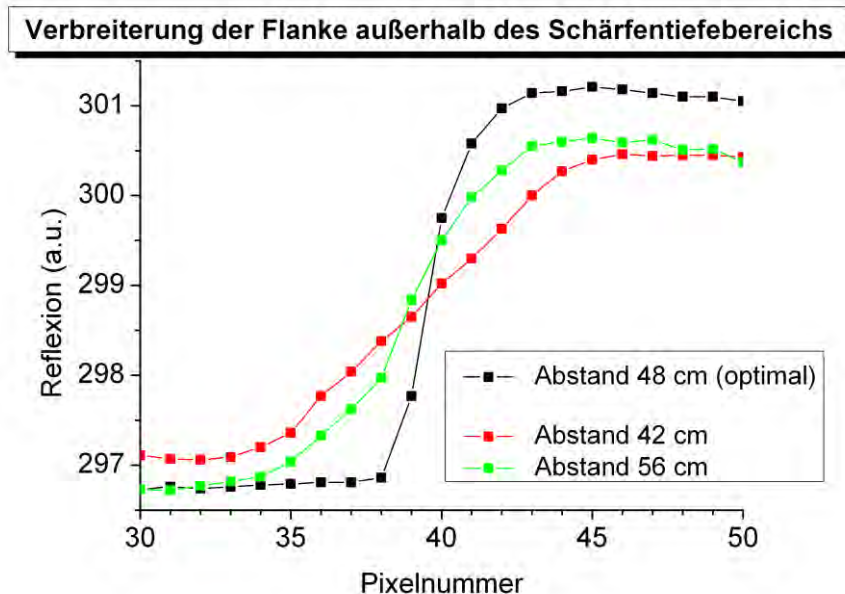


Abb. 11: Intensitätsprofile bei Reflexionsmessung bei verschiedenen Abständen (30 mm Objektiv, Fokuseinstellung 53 cm).

Zur quantitativen Beschreibung der Flankenbreite wird die Stufenfunktion durch eine Boltzmannverteilung angepasst, die Breite der Boltzmannfunktion ist dann ein Maß für die Verbreiterung der Flanke, s. Abbildung 12 a.

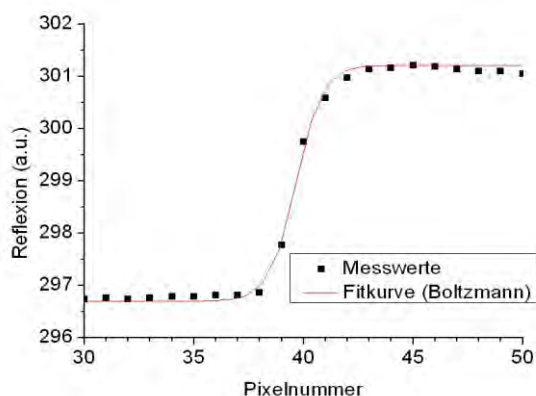


Abb. 12 a. Anpassung des Kurvenverlaufs an der Kante eines Quadrats durch eine Boltzmannfunktion.

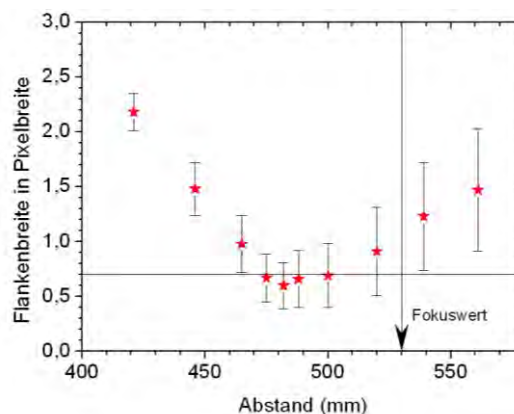


Abb. 12 b. Darstellung des ermittelten Parameters Flankenbreite für verschiedene Abstände (30 mm Normalobjektiv, 53 cm Fokuseinstellung)

Abbildung 12 b kann man entnehmen, dass für die Fokuseinstellung 53 cm die optimale Entfernung 48 cm beträgt. Um dieses Minimum der Flankenbreite bildet sich eine unsymmetrische Verteilung der Flankenbreite heraus. Bezugspunkt für die Abstandsmessung ist jeweils die Außenkante des Objektivs, auf die der Laserentfernungsmesser direkt aufgesetzt werden kann.

Entsprechende Messreihen sind für alle Abstandswerte aufgenommen worden. Der ausgewiesene Tiefenschärfebereich wird zunächst als der Bereich bestimmt, innerhalb dessen subjektiv keine Verschlechterung der Bildschärfe auftrat.

Ergebnisse der Messungen sind im Anhang 2 zu finden.

4 Literatur

- [1] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, December 1998. Available together with the software at <http://research.microsoft.com/~zhang/Calib/>
- [2] R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4):323-344, August 1987.
- [3] Z. Zhang, "Camera Calibration", in G. Medioni and S.B. Kang, eds., *Emerging Topics in Computer Vision*, Chapter 2, pages 4-43, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004.

Anhang 1: Anleitung zur Durchführung einer Kamerakalibrierung, verwendete Targets, Geräte und Ergebnisse

A1.1 Arbeitsschritte zur Durchführung einer Kalibrierung:

- Bereitstellen der Gebrauchsanweisungen für die IR-Kamera und die benötigte Software
- Betriebsbereitschaft herstellen
 - o Verbindungen zwischen IR-Kamera und Rechner anschließen
 - o IR-Kamera, Rechner und Software starten
 - o 30 Minuten vor Messung in Betrieb setzen
- Reproduzierbarkeit der Objektivbefestigung
 - o z.B. leicht nach rechts anziehen
- Einrichten der IR-Kamera zu dem ausgewählten Passpunktfeld
 - o wenn möglich vollflächige Abbildung
 - o senkrechte Ausrichtung zur IR-Kamera
 - o Fokussierung mit Probe für alle Orientierungen
- Messung
 - o Lufttemperatur und Luftfeuchte erfassen
 - o mittlere Entfernung zwischen Objektiv und Passpunktfeld erfassen
- Kontrasteinstellung
 - o Bei reiner Reflexionsmessung Kontrasterhöhung durch Abbildung von Wärmequellen auf dem Passpunktfeld. Ideal ist ein diffuser Flächenstrahler wie eine erwärmte Stoffbahn.
 - o Bei Erwärmungsmessung für jede Orientierung erwärmen mit Wärmequelle für 30 Sekunden
- Aufnahme der Thermogramme
 - o 50 Thermogramme in einer Sequenz mit hoher Abtastrate
 - o Mittelwertthermogramm aus der Sequenz bilden zur Rauschminimierung
 - o dieses Thermogramm weiterverarbeiten bei der Auswertung
- Anzahl der Orientierungen
 - o Insgesamt mindestens 12 Orientierungen bei vollflächiger Abbildung
 - o eine gute Zahl ist 20
 - o Bei nicht vollflächiger Abbildung mindestens 25 Orientierungen

Für die Bola sind einige Besonderheiten zum Messablauf zu beachten. Die Reproduzierbarkeit des Objektivsitzes wird durch zwei Routinen gewährleistet. Zum einen wird das Objektiv leicht nach rechts angezogen, zum anderen wird der Feststellring auch leicht nach rechts festgezogen, betrachtet von der Objektivseite.

Ein weiteres Merkmal der Bola ist die Scharfeinstellung über die Software durch eine Steuerung des internen Schrittmotors. Nach der subjektiven Scharfeinstellung wird die Entfernung als Datensatz über „?focsteps“ in der Software ausgelesen. Dieser Wert ist für die Wiederholbarkeit zu notieren.

Da für die Ermittlung der internen Kameraparameter keine absoluten Temperaturen nötig sind, wird die Emissivität auf 1 bzw. 100% gesetzt.

Für die hier verwendeten Geräte und Software sind die nachfolgend beschriebenen Einstellungen nötig. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf die jeweiligen Handbücher verwiesen.

Zunächst wird die Betriebsbereitschaft hergestellt und die Steuerungssoftware IRBIS 3 (professional) gestartet. Nach dem Starten der Steuerungssoftware IRBIS 3 (professional) wird die jeweilige IR-Kamera durch Kamera / Verbinden ausgewählt. Danach wird die IR-Kamera zu dem ausgewählten Passpunktfeld ausgerichtet. Nachdem die IR-Kamera ausgewählt ist, wird durch Kamera / Aufnahme Parameter und dem dort rechts unten zu sehenden kleinem Piktogramm die Auswahl „Erfassung“ geöffnet. Dort wird die Aufnahmerate / Frequenz mit 50 Hz und der Umfang / Anzahl 50 (Thermogramme) angegeben. Unter Datei ist „Festplatte“ zu wählen. Der Speicherort kann frei gewählt werden, der Name sollte kurz und prägnant sein. Nach der Bestätigung der Eingaben durch den grünen Haken ist die Aufnahme startbereit. Die Messung beginnt mit Betätigung des Knopfes Kamera / Aufnahme Parameter / Aufnahme und zeigt den Verlauf durch ein sich öffnendes Fenster, das die Aufnahme dokumentiert.

Die weiteren Orientierungen werden unter einem neuen Namen aufgenommen und gespeichert.

A1.2 Auswertungen der Kalibriermessung und Ergebnisse

Zur Ermittlung der inneren Kameraparameter der IR-Kamera wird 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/). Das Programmpaket enthält entsprechende Routinen, welche eine automatisierte Passpunktsuche in einem vorzugebenden Bildbereich unterstützen.

Die beiliegende umfangreiche Dokumentation beschreibt die mathematischen Grundlagen der vorgestellten Algorithmen, enthält Beispieldateien und eine detaillierte Darstellung des Vorgangs der Kamerakalibrierung.

Zur Kamerakalibrierung wird hier das Lochkameramodell verwendet, siehe Abbildung 1. Dort ist auch eine Beschreibung der inneren und äußeren Kameraparameter zu finden. Die Matlab-Routinen geben in englischer Terminologie als Ergebnis folgende errechnete Werte zur Beschreibung der Bildverzeichnung an. Die deutsche Entsprechung ist in Klammern gesetzt. Zunächst einmal die „Focal Length“ (Fokuslänge oder Brennweite) in x-Richtung und y-Richtung, der „Principal Point“ (Aufpunkt der optischen Achse) in x-Richtung und y-Richtung und die „Distortion“ (Abweichung), die radiale und tangential Anteile besitzt. Der „Skew“ (Verzerrung allgemein) gibt einen Winkelfehler an.

Die Matlab-Routinen erwarten zur Weiterverarbeitung gebräuchliche Bildformate. Hier wird das Bildformat „Tagged Image File Format“, mit der Endung *.tif benutzt. Die nach der Durchführung der Messungen berechneten Mittelwertthermogramme werden im Auswertungsprogramm IRBIS 3 (Professional) in diesem Bildformat abgespeichert. Dazu ist über Datei / Export, in Bild speichern / Exportieren mit der Auswahl „Thermogramm“ der Knopf „exportieren“ zu betätigen. In dem sich öffnenden Reiter ist der Dateiname und das Format auszuwählen, also *.tiff. Die Dateinamen sollten kurz, prägnant und fortlaufend nummeriert sein.

Die so erstellten Bilddateien werden entsprechend der detaillierten Anweisungen in (http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/) bearbeitet. Dort sind alle hier kurz beschriebenen Abläufe ausführlich erläutert. Im Folgenden wird durch einen stichwortartigen Ablaufplan die Durchführung einer Auswertung beschrieben:

- Programm Matlab starten
 - o Ordner Toolbox_calib zufügen
 - o Starten der Hauptroutine calib_gui oder calib
- GUI Camera Calibration Toolbox
 - o Standard wählen bei viel Speicherplatz, schnell
 - o Memory efficient bei wenig Speicherplatz, langsamer

Alle weiteren Schritte werden mit dem GUI Camera Calibration Toolbox Standard oder memory efficient durchgeführt:

- Einlesen der Bilder
 - o „Image names“ Knopf betätigen
 - o Eingabe des Dateinamens ohne fortlaufende Nummerierung
- Ermittlung der Gitterschnittpunkte (Passpunkte)
 - o „Extract grid corners“ Knopf betätigen
 - o Auswahl der Anzahl der verwendeten Bilder
 - 1. ([] alle), [3 6] bedeutet Bild 3 und 6
 - o Einstellung der automatischen Gitterpunktsuche
 - 2. ([]) Standardeinstellung
 - o Auswahl der automatischen oder manuellen Gitterpunktsuche
 - 3. ([]) automatisch, andere Zahl manuell
- Bei Auswahl manuell: Eintragen der Anzahl der sichtbaren Gitterschnittpunkte in x und y-Richtung !Achtung! Bei Matlab sind x und y- Richtung vertauscht
 - o Bestimmen der vier äußeren Gitterpunkte im Bild durch Anklicken. !Wichtig! Der erste angewählte Gitterpunkt ist in allen weiteren Bildern auch der erste Gitterpunkt (Referenz)
 - o Größe der Quadrate bzw, Abstand der Gitterpunkte in x und y-Richtung in mm. !Achtung! Bei Matlab sind x und y- Richtung vertauscht
 - o Darstellung der Routine vorgeschlagener Gitterpunkte ohne Verzerrung
 - 4. Annahme des Vorschlags ([]) bei Übereinstimmung, Zahl initiiert einen Vorschlag zur Verzerrung
 - o Wiederholung der Schritte für alle weiteren Bilder
 - o Ermittlung größerer Verzerrungen
 - 5. Verweis auf weiterführende Schritte in der ausführlichen Dokumentation (http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- Durchführung der Kalibration
 - o „Calibration“ Knopf betätigen
- Speichern des Kalibrationsergebnis
 - o „Save“ Knopf betätigen

Im Prinzip ist damit die Kalibrierung abgeschlossen. Im Normalfall wird das Ergebnis noch optimiert, z.B. durch Wegnahme von ungeeigneten Bildern. Die GUI Camera Calibration Toolbox bietet weitere Möglichkeiten wie

- Projektion der gefundenen Gitterpunkte auf den Bildern
 - o „Reproject on images“ Knopf betätigen
 - 6. ([] alle), [3 6] bedeutet Bild 3 und 6
- Darstellung der äußeren Parameter
 - o „Show extrinsic“ Knopf betätigen
- Darstellung der Fehlerverteilung der einzelnen Bilder
 - o „Analyse error“ Knopf betätigen

- Ermittlung der Gitterpunkte einzelnen Bilder zur Verbesserung des Ergebnisses
 - o „Recomp.corners“ Knopf betätigen
- Entfernen oder Hinzufügen von Bildern
 - o „Add / Suppress images“ Knopf betätigen
- Laden von Kalibrationsergebnissen
 - o „Load“ Knopf betätigen

Die folgenden Bestandteile der GUI Camera Calibration Toolbox bieten die Möglichkeit, mit den erstellten Kalibrationen die Bilder zu bearbeiten:

- Darstellung der externen Parameter im Bild
 - o „Comp.Extrinsic“ Knopf betätigen
- Verzeichnungsfreie Bilder erzeugen
 - o „Undistort image“ Knopf betätigen

Die Ergebnisse der Auswertung der Messungen sind in tabellarischer Form in der Tabelle A1 für die IR-Kamera Bola und in der Tabelle 4 für IR-Kamera Mirko aufgeführt. Die Fokusslänge ist in Millimeter angegeben, bei allen anderen Ergebnissen sind die Werte in Pixel angegeben.

Tabelle A1. Überblick über die ermittelten inneren Kalibrationsparameter der IR-Kamera Bola mit dem Normalobjektiv 30 mm bei verschiedenen Objektiven, Passpunktfeldern und Fokuseinstellungen

Objektiv	Pass-punktfeld	Abstand in cm	Fokusslänge in mm	Aufpunkt der optischen Achse, X-Koord.	Aufpunkt der optischen Achse, Y-Koord.	Radiale Abweichung R ² Term	Radiale Abweichung R ⁴ Term	Tangentiale Abweichung Term 1	Tangentiale Abweichung Term 2
30 mm	K0	53	1239 ± 73	323 ±6,7	246 ±22,4	-0,50 ±0,07	+0,17 ±0,47	-3*10 ⁻⁵ ±0,008	+2*10 ⁻⁵ ±0,001
		74	1261 ±16	321,4 ±10	250,5 ±12,5	-0,437 ±0,08	-0,5 ±1,8	+0,0012 ±0,004	+8*10 ⁻⁴ ±0,002
		174	1289 ±102	334,5 ±25	243 ±50	-0,448 ±0,09	-0,74 ±0,8	+8,5*10 ⁻³ ±0,02	-1,3*10 ⁻⁴ ±0,005
		205	1224 ±75	301 ±26	293 ±38	-0,39 ±0,08	-1,1 ±1,1	-0,007 ±0,013	+0,0025 ±0,006
	K1	53	1238 ±6	325 ±8	236 ±6	-0,52 ±0,04	+0,6 ±0,4	8*10 ⁻⁴ ±0,001	-0,0024 ±0,001
		100	1262 ±34	333 ±24	243 ±10	-0,47 ±0,03	-0,11 ±0,3	+0,0013 ±0,002	-0,002 ±0,008
	K2	100	1239 ±7	335 ±6	245 ±4	-0,45 ±0,036	-0,53 ±0,5	-0,0011 ±9*10 ⁻⁴	-0,0016 ±9*10 ⁻⁴
		201	1299 ±38	298 ±17	255 ±14	-0,43 ±0,04	-0,4 ±0,4	-0,002 ±0,003	+0,004 ±0,003
		250	1236 ±119	312 ±31	257 ±23	-0,409 ±0,084	-0,19 ±0,25	0,0033 ±0,0078	-0,0072 ±0,0096
50 mm	K1	100	2067 ±9	313 ±10	242 ±8	-0,21 ±0,05	+0,6 ±1,7	-9*10 ⁻⁴ ±8*10 ⁻⁴	+0,003 ±0,001
75 mm	K1	143	3193 ±878	317 ±38	267 ±28	-0,45 ±0,26	+0,0 ±0,0	0,0 0,0	0,0 0,0

Die Parameter der inneren Kalibration sind in Pixelbreiten (25,0 µm) angegeben. Der Detektor hat 640 x 480 Pixel.

Die Fehlerwerte in jeweils 2. Zeile entsprechen 3 Standardabweichungen.

(Rot=geringste Fehler Blau=größte Fehler)

Tabelle 4: Überblick über die ermittelten inneren Kalibrationsparameter der IR-Kamera Mirko mit dem Objektiv 25 mm, dem Passpunktfeld K1 und einem Abstand von 215 cm.

Objektiv	Pass- punktfeld	Abstand in cm	Fokusslänge	Aufpunkt der optischen Achse, X- Koord.	Aufpunkt der opti- schen Achse, Y- Koord.	Radiale Abweichung R ² Term	Radiale Abweichung R ⁴ Term	Tangentiale Abweichung Term 1	Tangentiale Abweichung Term 2
25 mm	K2	215	1245 ±23	328 ±29	255 ±21	-0.7093 ±0.07312	0.06763 ±0,91521	0.00366 ±0,00704	-0.00521 ±0,00924

Die Parameter der inneren Kalibration sind in Pixelbreiten (25,0 µm) angegeben. Der Detektor hat 640 x 480 Pixel.
Die Fehlerwerte in jeweils 2. Zeile entsprechen 3 Standardabweichungen.

A1.3 Verwendete Targets und Geräte

Tabelle A2 führt die hergestellten Targets mit ihren Parametern auf. Der in der Tabelle genannte Wert der mittleren Entfernung in m gilt als Näherungswert für die hier verwendeten IR-Kameras mit einer geometrischen Auflösung von mindestens 640 x 480 Pixeln und Brennweiten von 25 bis 75 mm. Eine Daumenregel besagt, dass die Anzahl an notwendigen Korrespondenzen die Anzahl der zu bestimmenden Parameter um den Faktor 5 übersteigen sollte. Werden wie weiter unten beschrieben bis zu 7 geometrische Parameter bestimmt, dann sollte das Kalibriermuster mindestens 35 Markierungen aufweisen.

Tabelle A2. Überblick über die verwendeten Passpunktfelder

Passpunktfeld	Größe des Feldes in cm	Größe der Quadrate in mm	Anzahl der Quadrate	Anzahl der nutzbaren Markierungen	Mittlere Entfernung in m
K0-Muster	21 x 28	30 x 30	7 x 9	48	< 0,8
K1-Muster	21 x 28	20 x 20	10 x 14	117	< 1
K2-Muster	35 x 50	50 x 50	7 x 10	63	> 1

Weiterhin wurden die folgenden IR-Kameras mit den aufgeführten Objektiven kalibriert:

- **VarioCam hr (Bola)**
 - Detektortyp: ungekühltes Mikrobolometer FPA
 - Detektorformat: 640 x 480 (mit Microscan Resolution Enhancement: 1280 x 960)
 - Pixelgröße 25.0 µm quadratisch
 - Bolometerarray-Abmessungen 1,607 cm x 1,221 cm
 - Spektralbereich: 7,5 bis 14 µm
 - Bildfrequenz: 50/60 Hz
 - Temperaturmessbereich: -40 bis 1200 °C
 - NETD bei 30°C: < 0,05 K im Premiummodus, ansonsten < 0,08 K
 - A/D Wandlung: 16 Bit
 - Analoge Schnittstelle: PAL/NTSC-FBAS und S-Video, Headset
 - Digitale Schnittstelle: RS232, FireWire, SD-Card
 - Gewicht: 1,5 kg
 - Seriennummer: 249611
- **Objektive**
 - Normalobjektiv 30 mm (VarioCAM II standard optics)
 - Öffnungswinkel: (30° x 23°), hieraus ergeben sich folgende Abmessungen für den erfassten Bildbereich im Abstand a: Breite=0,5*a Höhe=0,3907*a
 - IFOV: 0,8 mrad
 - Fokussierbereich: 0,22 m bis unendlich
 - Teleobjektiv 50 mm
 - Öffnungswinkel: (18*14)°

- IFOV: 0,5 mrad
 - Fokussierbereich: 0,5 m bis unendlich
 - Teleobjektiv 75 mm
 - Öffnungswinkel: (10°/7,5)
 - IFOV: 0,3 mrad
 - Fokussierbereich: 2 m bis unendlich
 - **ImageIR (Mirko)**
 - Detektortyp: gekühltes Quecksilber-Kadmium-Tellurid (MCT)-Focal-Plane-Array
 - Detektorformat: 640 x 512 Pixel (Pitch 16µm)
 - Spektralbereich: LWIR, 8-9,4µm
 - Ausleseverfahren: Snapshot
 - Temperaturauflösung: NETD @ 30°C < 60mK (bei 140 µs) 80 mK (bei 70 µs)
 - Integrationszeit: 1 ... 200 µs in 1µs Steps
 - A/D Wandlung: 14 Bit
 - Lagertemperatur/-luftfeuchte: -40°C ... 70°C / 10 ... 95% rel.(nicht kondensierend)
 - Betriebstemperatur: -20°C ... 40°C
 - Stromversorgung: Netzadapter 230V / 50Hz
 - Gehäuse: staub- und spritzwassergeschützt(IP 54) / Stativanschluss 1/4"-Fotogewinde
 - Schock-/Vibrationsbelastung: 2G, IEC 68-2-29/26
 - Gewicht: 4 kg
 - Abmessungen: 244mm x 130mm x 160mm (L x B x H)
 - Bildfrequenz/Windowing
 - 100Hz / FullFrame
 - 350Hz / HalfFrame
 - 1200Hz / QuarterFrame
 - 8 kHz / LineScan(8 x 1.024(h x w))
 - **Objektive**
 - MWIR Objektiv 25 mm, f/1,4
 - Hersteller: Janos Technology Inc. Typ STRIX 25 mm
 - Brennweite: f = 25 mm
 - Apertur: f/1,4
 - Blickwinkel : 23,1° x 18,6°
 - IFOV: 6,3 mrad
 - Optimiert für den Spektralbereich: LWIR
 - Variabler Fokus: 20 cm - ∞
- Für die Messwerterfassung und Messdatenextraktion wurde die folgende Software eingesetzt:
- System zur Steuerung der IR-Kamera und zur Datenaufnahme
 - IRBIS 3 Professional
 - System zur Datenverarbeitung
 - Origin
 - Matlab

Als weitere Geräte werden ein Entfernungsmesser und ein Kontaktthermometer verwendet.

Anhang 2: Ergebnisse zur Bestimmung der Tiefenschärfe

Die Ergebnisse der Auswertung der Messungen sind in den Tabellen A3 und A4 aufgeführt.

Tabelle A3. Optimale Objektentfernungen für alle kalibrierten Fokuseinstellungen bei der Bola

Objektiv	Fokuseinstellung (in cm)	Optimale Entfernung (in cm)	Tiefenschärfebereich (in cm)
Normalobjektiv (30 mm Brennweite)	53	48	47 - 50
	100	93 – 95	91 - 97
	201	180 – 200	180 - 220
Teleobjektiv (50 mm Brennweite)	100	92	89 - 93

Tabelle A4. Optimale Objektentfernungen für alle kalibrierten Fokuseinstellungen bei der Mirko

Objektiv	Fokuseinstellung (in cm)	Optimale Entfernung (in cm)	Tiefenschärfebereich (in cm)
Normalobjektiv (25 mm Brennweite)	50	59	55 - 66
	100	108	96 - 133
	215	200 – 220	195 - 235

Anhang 4: Merkblatt 4

Aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung zur Ortung und Charakterisierung von Fassadenablösungen

Mathias Röllig¹, Henrik Steinfurth¹, Sven Augustin¹
Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Alexa Kernchen²
Uwe Kalisch³, Jeannine Meinhardt³, Christiane Hennen⁴,
Ernst Thomas Groll⁵, Torsten Arnold⁶

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FB 8.7, Berlin

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

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

⁴Christiane Hennen, Bauforschung - Denkmalpflege, Wittenberg

⁵Ernst Thomas Groll, Restaurator, Magdeburg

⁶Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: **II 3-F20-12-1-108 / SWD -10.08.18.7-13.42**)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren		Forschungsinitiative Zukunft Bau SF- SWD – 10.08.18.7-13.42 BAM Vh 8463	
Dokument:	Merkblatt		
Autor:	M. Röllig, C. Maierhofer, BAM	Status:	final
Datum:	09.11.2015	Version:	2

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	119
2 Messaufbau und Umgebungsbedingungen	120
2.1 Voraussetzungen zur Untersuchung von Außenfassaden mit Sonnenerwärmung	120
2.2 Messstrategien	121
2.3 Einfluss der Umgebungsbedingungen	122
2.4 Gerätetechnik	122
2.5 Durchführung der Messung	123
3 Datenauswertung	125
3.1 Auswertung von Einzelthermogrammen und Differenzthermogrammen	125
3.2 Auswertung mit der Puls-Phasen-Thermografie	125
3.3 Auswertung von Temperatur-Zeit-Kurven einzelner Pixel und ROIs	126
4 Bewertung von Schäden	127
5 Abschätzung des Aufwandes	127
6 Ausblick	129
7 Literatur	129
Anhang 1: Verwendete Geräte	130

1 Einleitung

Dieses Merkblatt richtet sich an potentielle Nutzer und Anwender der aktiven Thermografie, die zerstörungsfreie Prüfungen an Fassaden unter Ausnutzung der Sonnenerwärmung durchführen oder beauftragen möchten. Dazu gehören u.a. Denkmalpfleger, Restauratoren, Bauingenieure, Architekten und Gutachter. Das Merkblatt wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projektes „Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren“ erstellt.

Die aktive Thermografie mit Sonnenerwärmung ist ein Verfahren zur Ortung und Charakterisierung von Schäden an Bauwerksoberflächen, die von ihrer Lage und Orientierung zumindest einen Teil des Tages in einer bestimmten Jahreszeit von der Sonne beschienen werden und die optisch mit einer Infrarot-Kamera zugänglich sind. In der Regel können mit dem Verfahren Fehlstellen und Inhomogenitäten im oberflächennahen Bereich, d.h. bis zu einigen cm Überdeckung, detektiert werden. Dabei sollte die laterale Abmessung der Fehlstelle mindestens so groß sein wie ihre Überdeckung. Das Verfahren ist berührungslos, zerstörungsfrei und lässt sich zur Prüfung einer Vielzahl von Fassadensystemen einsetzen. Daher eignet sich das Verfahren z.B. zur Ortung von Ablösungen und Hohlstellen unterhalb von Putzen, Fliesen, Klinkerriemchen oder Natursteinplatten. Bei entsprechenden Kontrasten in den thermischen Materialparametern kann auch Feuchte im oberflächennahen Bereich nachgewiesen werden. Nicht geeignet ist das Verfahren zur Ortung von Ablösungen hinter Wärmeschutzverbundsystemen.

Im Gegensatz zur passiven Bauthermografie werden bei der aktiven Bauthermografie instationäre Wärmetransportprozesse betrachtet. Die passive Thermografie zur Ortung von Wärmelecks basiert in der Regel auf stationären Wärmetransportbedingungen, d.h. es wird von einem annähernd konstanten Temperaturgradienten von innen nach außen von mindestens 7 K ausgegangen. Häufig werden daher Untersuchungen mit passiver Thermografie in der kühleren Jahreszeit durchgeführt, d.h. die Außentemperatur ist deutlich niedriger als die Innentemperatur. Stationäre Wärmeleitungsprozesse werden nur von der Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Mit Hilfe der passiven Thermografie können daher Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit gemittelt über den Querschnitt einer Außenwand nachgewiesen werden.

Instationäre Wärmetransportprozesse bei der aktiven Bauthermografie werden z.B. durch die Sonneneinstrahlung, durch den Tagestemperaturgang der Umgebung oder durch künstliche Wärmequellen, wie z.B. Infrarotstrahler, Heizlüfter oder Halogenlampen, erzeugt. Bei der Nutzung künstlicher Wärmequellen können Untersuchungen auch an Innenwänden und an der Innenseite einer Außenwand durchgeführt werden.

Instationäre Wärmeleitungsprozesse werden von der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte der Materialien der Wand bestimmt. Daher können an Außenfassaden Ablösungen einzelner Schichten, Hohlstellen, Strukturen unterhalb einer Fassadenabdeckung (z.B. Putz) und Risse nachgewiesen werden. Wird die Sonneneinstrahlung zur Untersuchung der Außenwand eingesetzt, dann sind bestimmte Einschränkungen wie die Wettersituation, die Jahreszeit und die geografische Ausrichtung der Wand zu berücksichtigen. Des Weiteren können reflektierende Elemente an der Außenfassade sowie Feuchtigkeit die Messungen beeinflussen. Da durch Sonnenaufgang bzw. Untergang eher langsame Änderungen der Bestrahlungsintensitäten zu erwarten sind, eignet sich diese Art der Anregung besonders zur Ortung tieferliegender Strukturen.

Die Ergebnisse der aktiven Thermografie sind direkt bildgebend. Die 2D-Informationen können mit anderen 3D-, 2D- und 1D-Daten (z.B. CAD-Darstellung, Fotografie, Ultraschalldaten) überlagert werden und so ein Monitoring oder eine erweiterte Schadenskartierung ermöglichen.

Im Folgenden werden die erforderlichen Bedingungen für die Durchführung von Messungen an Außenfassaden mit Sonnenerwärmung, mögliche Einflussgrößen und die für die Messungen notwendige Gerätetechnik beschrieben.

2 Messaufbau und Umgebungsbedingungen

2.1 Voraussetzungen zur Untersuchung von Außenfassaden mit Sonnenerwärmung

Die Oberfläche der Fassade sollte trocken sein, d.h. Feuchtigkeit durch Niederschläge sollte mindestens 24 h lang abgetrocknet sein. Starker Wind sollte vermieden werden (Windstärke $< 40 \text{ km/h}$), da dieser sonst zu einer Abkühlung der Oberfläche führen kann, die als Schlieren im Thermogramm erscheinen und die mögliche Temperaturkontraste von Schädigungen überlagern könnten. Die Oberfläche der Fassade sollte eine möglichst hohe Emissivität von $> 90 \%$ sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Wellenlängenbereich aufweisen. Damit wird der Einfluss direkt reflektierter Sonneneinstrahlung minimiert und die Nachweisempfindlichkeit für Temperaturkontraste optimiert. Die Außentemperatur sollte zum einen oberhalb von 0°C liegen, da Eisbildung an der Fassade zu Schwierigkeiten bei der Interpretation der Messergebnisse führen kann. Weiterhin sollte das vom Hersteller der Infrarot-Kamera geforderte Umgebungstemperaturintervall für den Betrieb der Kamera eingehalten werden. In der Regel sollten Messungen also nur zwischen 0°C und 40°C Außentemperatur durchgeführt werden. Die verfügbaren Objektive sollten sorgfältig ausgewählt werden. Es muss eine Abwägung zwischen Bildausschnitt und geometrischer Auflösung stattfinden.

Neben der direkten Sonneneinstrahlung führt auch der Tagesgang der Lufttemperatur zu nichtstationären Wärmeleitungsvorgängen in Außenwänden und ermöglicht daher ebenfalls eine Ortung von Inhomogenitäten. Dieser Effekt wird auch die Messungen durch die Sonnenerwärmung immer überlagern. Werden von Außenfassaden nur einzelne Thermogramme und keine Sequenzen erfasst, dann muss immer berücksichtigt werden, dass die momentane Verteilung der Oberflächentemperatur die Wirkung der vorher stattgefundenen Änderungen der Lufttemperatur und Sonneneinstrahlungen ist. Daher können zu unterschiedlichen Zeiten immer verschiedene Strukturen optimal erkannt werden.

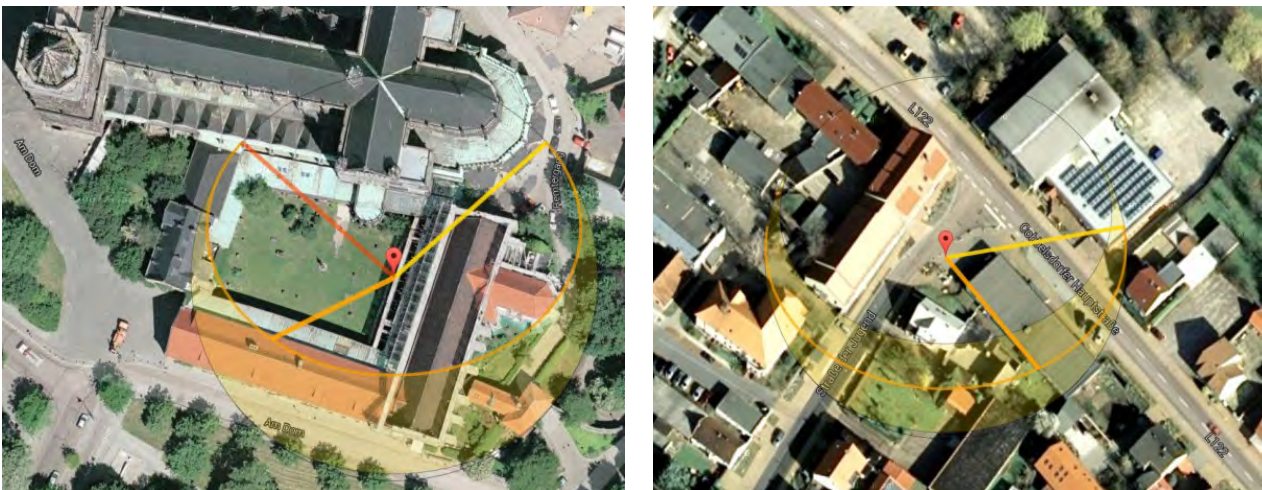


Abb. 1. Links: Satellitenbild der Westfassade des Magdeburger Doms mit Sonnenstandsmarkierungen aus dem Programm suncalc. Rechts: Satellitenbild des Wandbildes in Cobbeisdorf mit Sonnenstandsmarkierungen aus dem Programm suncalc.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Untersuchung einer Gebäudefassade mit Hilfe der Sonnenerwärmung ist es, dass die Fassade zumindest zu einer bestimmten Jahreszeit für eine bestimmte Zeit von der Sonne bestrahlt wird. Wichtig ist daher zunächst die geografische Ausrichtung der Fassade. Des Weiteren können umliegende Gebäude oder Bäume die Fassade abschatten. Eine im Vorfeld genaue geografische Begutachtung der Situation, die durch Landkarten und Kompass durchgeführt werden kann, ist sinnvoll. Ein Hilfsmittel ist z.B. das Programm suncalc, das ursprünglich für die Fotografie entwickelt wurde (suncalc.net). In Abbildung 1 sind zwei Beispiele zu

sehen. Links ist die Messsituation im Juli 2011 am Magdeburger Dom gezeigt, rechts erkennt man die Sonneneinstrahlung im September 2014 auf das Wandgemälde in Cobbelesdorf. In diesen beiden Satellitenbildern sind farbige Sonnenstandsmarkierungen zu erkennen. Diese zeigen die Zeitpunkte von Sonnenaufgang (gelbe Linie) und Sonnenuntergang (rote Linie) sowie die Einstrahlrichtung der Sonne zu einem bestimmten Zeitpunkt (orangene Linie) und zu einem bestimmten Datum an einer vorgegebenen geografischen Position. Neben der Einstrahlrichtung wird auch die Höhe der Sonne über dem Horizont angegeben. Aus der geografischen Lage kann auch erkannt werden, ob sich störende Gebäudeteile und Bäume in der Nähe befinden, deren Höhe jedoch nicht durch das Programm angegeben wird. Mit Hilfe von suncalc lässt sich auch bestimmen, ab welcher Uhrzeit an diesem Tag die Fassade bestrahlt wird.

2.2 Messstrategien

Zur Untersuchung von Außenfassaden mit Hilfe der Sonneneinwirkung zur Erwärmung der Oberfläche haben sich mehrere Strategien als sinnvoll erwiesen. Diese können sich vor Ort ändern, da selbst bei sorgfältiger Planung der Messung sich das Wetter am Ort anders entwickeln kann als vorhergesagt. Die gewählte Strategie ist von den Fragestellungen abhängig, aber auch von den Möglichkeiten vor Ort. Bei einer Nordwestfassade wird eher eine späte Messung zu nutzbaren Daten führen. Messungen im Winterhalbjahr erfordern andere Überlegungen als welche im Sommerhalbjahr.

Allgemein müssen vor dem Messeinsatz Informationen zur Art, Ausdehnung und Tiefenlage der zu ortenden Inhomogenität in der Außenfassade ermittelt werden. Diese können z.B. der Auftraggeber, der Restaurator, ein früherer Zustandsbericht oder die Dokumentation von bereits erfolgten Restaurierungs- oder Instandsetzungsarbeiten des Untersuchungsobjektes liefern.

Im Folgenden werden verschiedene Messstrategien vorgestellt.

2.2.1 Nutzung eines Teils oder des gesamten Tagesganges der Sonne

Diese Strategie wird zum Auffinden von tiefliegenden Inhomogenitäten angewendet. Voraussetzung dieser Strategie ist eine mindestens mehrstündige Sonneneinstrahlung auf die Fassade mit einem vergleichsweise hohen Temperaturhub von mehreren K. Das Material über einer Ablösung oder Hohlstelle erwärmt sich mit der Sonneneinstrahlung stärker als das Material mit einer guten Anbindung an den Untergrund. Umgekehrt kühlt sich das Material über einer Ablösung nach Sonnenuntergang schneller ab. In der Regel wird bei dieser Messstrategie das Thermogramm mit dem höchsten Temperaturkontrast ausgewertet.

2.2.2 Nutzung des Sonnenaufgangs

Der Beginn der Messung sollte mindestens eine Stunde vor dem Sonnenaufgang erfolgen. Genutzt wird die mit der Zeit ansteigende Strahlungsleistungsdichte der Sonne, die zu einem instationären Wärmetransport führt. Eine Thermografiesequenz sollte über einen möglichst langen Zeitraum erfasst werden. Anschließend können dann unterschiedlich lange Sequenzen mit der Puls-Phasen-Thermografie ausgewertet werden. Aus den Phasenbildern bei unterschiedlichen Frequenzen können dann Informationen zur Tiefe einer Fehlstelle gewonnen werden. Voraussetzung ist eine homogene Verteilung der Strahlungsdichte über der zu untersuchenden Fläche. Wird diese z.B. durch zeitlich sich verändernde Abschattungen gestört, dann können u.U. Umsortierungen in den Zeilen- oder Spalten der Thermografiesequenzen trotzdem zu einer Darstellung sinnvoller Phasenbilder führen [1].

2.2.3 Nutzung des Sonnenuntergangs

Auch hier sollte der Beginn der Messungen mindestens eine Stunde vor dem Sonnenuntergang erfolgen. Statt der Erwärmung durch die Sonne wird nun die Abkühlung im Schatten ausgewertet. Dies kann ähnlich erfolgen wie unter 2.2.2. beschrieben.

2.2.4 Wechsel zwischen Wolken und Sonne

Der Beginn der Messungen ist unabhängig von der Tageszeit bzw. richtet sich wieder nur nach der geografischen Orientierung der Fassade und dem Datum. Wichtig für diese Messstrategie ist ein Wechsel zwischen einzelnen, dichten Wolken und einer starken Sonneneinstrahlung. Weniger geeignet sind Schleierwolken bei geringer Sonneneinstrahlung. Diese Messungen können typischerweise im späten Frühling, im Frühsommer und frühen Herbst durchgeführt werden. Bei einer kurzen Zeitspanne zwischen Wolken und Sonneneinstrahlung lassen sich oberflächennahe Fehlstellen auffinden (z.B. auch zur Oberfläche hin offene Risse), bei einem langen Zeitintervall sind auch tiefer liegende Fehlstellen erkennbar. In den Thermogrammen, die während der Wolkenphasen erfasst werden, sind weniger Störungen durch Emissivitätskontraste erkennbar. Auch diese Sequenzen lassen sich sehr gut mit der Puls-Phasen-Thermografie auswerten. Häufig sind wesentliche Informationen aber auch in Differenzthermogrammen (Differenz von Thermogrammen mit und ohne Wolken) erkennbar.

2.3 Einfluss der Umgebungsbedingungen

Die Abschattungen durch andere Gebäude, Bäume, Fahrzeuge ist zu vermeiden. Wenn dies nicht möglich ist, sollte der Einfluss durch Skizzen und Fotos dokumentiert werden. Die ungewollte Verschattung z.B. des Strahlungssensors ist auch zu vermeiden.

Reflektierende Oberflächen, wie Fensterglas oder auch größere Wasserflächen in der Nähe, können Sonnenlicht auf die zu untersuchende Bauteiloberfläche reflektieren und zu Fehlinterpretationen führen.

Feuchtigkeit auf der Oberfläche der Fassade ist zu vermeiden, da diese zu Emissivitätskontrasten und zu Temperaturkontrasten durch Verdunstungsprozesse führen kann. Ein Feuchteeintrag kann durch Regen, aber auch durch Taubildung am frühen Morgen erfolgen.

Ein besonderer Fall sind reflektierende Fassadenoberflächen, wie z.B. glasierte Fliesen, die aus geringer Entfernung untersucht werden. Hier können Reflexionen des Messpersonals zu Fehlinterpretationen führen. Weiterhin können andere Gebäudeteile oder durchziehende Wolken auch bei Messungen aus größeren Entfernungen von der Bauteiloberfläche reflektiert und im Thermogramm angezeigt werden.

Wind mit wechselnder Stärke führt zu einem weiteren instationären Wärmleitungsprozess, der die Auswertung der Ergebnisse erschwert.

2.4 Gerätetechnik

Die technischen Eigenschaften der Geräte sind detailliert im Anhang beschrieben. Im Folgenden werden die Wirkungsweisen, das Messprinzip oder die Auswahlkriterien genannt.

2.4.1 Infrarot-Kamera

Zur Erfassung von Thermogrammen während der Sonneneinstrahlung empfiehlt sich die Verwendung einer IR-Kamera im langwelligen Bereich (8 bis 14 μm), da dadurch mögliche reflektierte Sonnenstrahlen im sichtbaren spektralen Bereich herausgefiltert werden. Entsprechend der erforderlichen Ortsauflösung, des zu erfassenden Objektausschnitts oder des realisierbaren Abstandes der IR-Kamera zur Messoberfläche sollte das Objektiv ausgewählt werden. Hierzu werden die Angaben zur Brennweite oder zum FOV und iFOV bei vorgegebener Detektorgröße genutzt.

Für die Aufnahme von Thermografiesequenzen sollte eine Bildwiederholrate von mindestens 10 Hz möglich sein. Die Datenerfassung muss in Echtzeit z.B. über ein angeschlossenes Notebook erfolgen.

Die IR-Kamera sollte ein NETD (noise equivalent temperature difference) von kleiner oder gleich 0,05 K haben, um auch kleine Temperaturkontraste nachweisen zu können.

Eine geometrische Kalibrierung der IR-Kamera ist erforderlich, wenn Überlagerungen der Thermogramme mit anderen 2D- und 3D-Messdaten durchgeführt werden sollen (s. Merkblatt 3).

Eine Temperaturkalibrierung ist nur dann erforderlich, wenn auch Informationen über Temperaturkontraste und maximale Temperaturwerte gewünscht werden, z.B. um Messergebnisse mit Simulationsrechnungen zu vergleichen oder um maximale thermische Materialbelastungen zu ermitteln. Eine Temperaturkalibrierung muss in der Regel vom Hersteller der IR-Kamera durchgeführt werden.

In der Regel werden diese Anforderungen von IR-Kameras mit Mikrobolometerarrays erfüllt. Diese IR-Kameras sind für den Einsatz auf der Baustelle gut geeignet.

Für reproduzierbare Messungen sollte der Abstand der IR-Kamera zur Bauteiloberfläche mit einer Messgenauigkeit von ± 2 cm oder von mindestens ± 2 % des Abstands erfasst werden. Ein stabiles Stativ zur Fixierung der IR-Kamera ist nützlich. Dieses sollte über einen Stativkopf (Tripod) in alle drei Raumrichtungen unabhängig einzustellen sein. Für jede Raumrichtung sollte eine Justiermöglichkeit, eine sogenannte Libelle, zur Verfügung stehen.

2.3.2 Strahlungssensor

Ein Strahlungssensor sollte verwendet werden, um die lokale Sonneneinstrahlung an der Position der Außenfassade zu erfassen. Dies sollte während der gesamten Zeitdauer der Messung mit der erforderlichen Zeitauflösung erfolgen.

Ein Pyranometer misst die Bestrahlungsstärke in W/m^2 der diffusen Himmelsstrahlung und der direkten Sonneneinstrahlung aus dem Halbraum über dem Sensor.

2.4.3 Fotoapparat

Ein Fotoapparat ist zur Dokumentation der Umgebungsbedingungen und der gesamten Messsituation sinnvoll. Ein Vorteil bei Digitalkameras ist die einfache Weiterverarbeitung der Bilddaten.

2.4.4 Distanzmesser

Zur Messung der Distanz kann im einfachen Fall ein Gliedermaßstab oder für größere Entfernungen ein Rollmaßstab für Vermesser verwendet werden. Einfacher ist die Nutzung eines berührungslosen Entfernungsmessers. Es lassen sich so auch nicht direkt zugängliche Distanzen messen.

2.4.5 Erfassung weiterer Umgebungsparameter

Zur Dokumentation der meteorologischen Daten wie die Lufttemperatur, Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit ist eine datenaufnehmende Wetterstation optimal.

2.4.6 Stromversorgung

Ideal ist eine zentrale Stromversorgung am Stromnetz. Diese ist jedoch bei Vor-Ort-Messungen nicht immer vorhanden. Da bei der Nutzung der Sonneneinstrahlung keine weiteren Energiequellen zur Erwärmung der Oberfläche der Außenfassade notwendig sind, sind lediglich die aufnehmenden und messenden Systeme mit Strom zu versorgen. Dies kann über die mitgelieferte, aufladbare Stromversorgung geschehen und/oder mit zentralen Akkumulatoren, die über einen Netzanschluss verfügen und somit universeller einsetzbar sind.

2.5 Durchführung der Messung

Abbildung 2 links zeigt den Messaufbau auf der Westseite des Kreuzgangs mit Blick auf die Westfassade des Ostflügels des Kreuzgangs des Magdeburger Doms, die Abbildung 2 rechts zeigt den Messaufbau in Cobbelsdorf aus der Richtung der Wandmalerei. In beiden Fällen besteht der Messaufbau aus der IR-Kamera und einem anzuschließendem Rechner.



Abb. 2. Links: Messaufbau zur Erfassung der Oberflächentemperatur einer Westfassade während der Sonneneinstrahlung. Rechts: Messaufbau Cobbeltsdorf

Der hier aufgeführte Messablauf beschreibt exemplarisch die Bewältigung einer Messsituation nach Auswahl eines geeigneten Standorts, der die richtige Entfernung zum Messobjekt hat. Dieser sollte idealerweise über eine Stromversorgung verfügen und trocken und windgeschützt sein. Er sollte so gewählt sein, dass bei mehreren zu untersuchenden Messflächen der Transportaufwand der Gerätschaften so gering wie möglich ist.

Im Vorfeld einer Außenmessung ist immer darauf zu achten, dass bei allen Verbrauchern, die über eine aufladbare Stromversorgung verfügen, diese auch aufgeladen ist (Fotoapparat und ähnliches). Dies gilt allgemein bei den mitgebrachten Akkumulatoren. Vorteilhaft ist auch die Mitnahme von passenden Batterien für den Notfall.

Es sind dann die folgenden Arbeitsschritte auszuführen:

- Aufstellen der IR-Kamera und des Strahlungsmessgerätes. Bei dem Strahlungsmessgerät ist auf eine Abschattung zu vermeiden. Anbringen von mindestens fünf kreisförmigen Referenzmesspunkten im Messfeld der Objektoberfläche, wenn möglich. Ansonsten sollten markante Punkte an der Fassade erkennbar sein, die für eine mögliche Überlagerung sowohl in Fotos als auch in den Thermogrammen erkennbar sind. Einmessen der Punkte zueinander und Dokumentation.
- Bereitstellen der Gebrauchsanweisungen für die IR-Kamera und alle beteiligten Messgeräte und der benötigten Software
- Betriebsbereitschaft herstellen
 - Verbindungen zwischen Rechner, Strahlungsmesser und IR-Kamera anschließen
 - Rechner, Strahlungsmesser, IR-Kamera und jeweilige Software starten
 - 30 Minuten vor der Messung in Betrieb setzen, um Temperaturdrifts der IR-Kamera zu stabilisieren
- Reproduzierbarkeit der Objektivbefestigung, z.B. leicht nach rechts anziehen
- Einrichten der IR-Kamera zu der ausgewählten Fläche.
 - Wenn möglich vollflächige Abbildung
 - Bei der Aufnahme von Teilflächen für Überlappungen der Referenzmesspunkte sorgen
 - Wenn möglich, senkrechte Ausrichtung der optischen Achse der IR-Kamera zur Messoberfläche, Fokussierung der IR-Kamera auf die Messoberfläche
 - Messung der Entfernung der IR-Kamera zur Objektoberfläche

- Abschätzen des Winkels zwischen Kamera und Fläche bei nicht waagerechter Ausrichtung
- Dokumentation
 - Fotos in ausreichender Anzahl, Auflösung und Entfernungen von folgenden Szenarien anfertigen:
 - Der Umgebung zur Dokumentation des Wetters, von möglichen Wärmequellen, die das Messobjekt beeinflussen könnten und von möglichen Objekten, die die Messoberfläche abschatten könnten
 - Des Messaufbaus
 - Des Messobjektes mit ausreichender Auflösung. Es sollten sowohl die Gesamtfläche als auch Teilbereiche der Messoberfläche erfasst werden. Auch hier ist auf die Überlappung der Referenzmesspunkte zu achten.
 - Optional können auch die Messflächen mit einer kalibrierten Kamera aufgenommen werden
 - Messung weiterer Umgebungsbedingungen
 - Lufttemperatur und Luftfeuchte in regelmäßigen Abständen
 - Laufende, zeitsynchrone Messung der Bestrahlungsstärke
- Aufnahme der Thermogramme
 - Ausgewählte Anzahl von Thermogramme in einer Sequenz mit notwendiger Abtastrate

Die Ergebnisse von drei Fallstudien werden in dem Abschlussbericht BBR Erbe im Kapitel 7 beschrieben.

3 Datenauswertung

Unbearbeitete Thermogramme aus den Sequenzen sind oftmals schon ausreichend für einen Fachmann, um eine erste Bewertung der Situation der Fassade vorzunehmen. Zusätzlich können die erfassten Thermografiesequenzen wie nachfolgend beschrieben auf unterschiedliche Art und Weise ausgewertet und begutachtet werden.

3.1 Auswertung von Einzelthermogrammen und Differenzthermogrammen

Eine einfache Methode ist die Bildsubtraktion. Es kann ein einzelnes Thermogramm zu einem bestimmten Zeitpunkt von einem Ausgangsbild abgezogen werden. Damit ist es möglich, Einflüsse aus der Umgebung aus dem beobachteten Thermogramm zu reduzieren. Innerhalb der Thermogrammsequenz lassen sich auch Änderungen über die Zeit und in Bezug zu einem definiertem Anfangszustand darstellen.

Die nachträgliche Mittelung mehrerer Thermogramme verbessert das Signal-zu-Rauschen (SNR) Verhältnis. Hier ist zu beachten, dass diese für Bereiche geringerer Dynamik geeignet ist, da sich durch die Mittelung die zeitliche Auflösung verringert.

All diese Bearbeitungen sind auf die gesamten Thermografiesequenzen anwendbar, aber auch auf Teilsequenzen.

3.2 Auswertung mit der Puls-Phasen-Thermografie

Eine Möglichkeit zur Auswertung der Temperaturverteilungskurven beim Wechsel zwischen Sonne und Wolken ist die Anwendung der Puls-Phasen-Thermografie. Dabei werden die aufgenommenen Thermogramme aus dem Zeitbereich in Amplitudenbilder und Phasenbilder im Frequenzraum über eine diskrete Fouriertransformation umgerechnet [2]. Eine schematische Darstellung der Umwandlung von Thermografiesequenzen in Amplitudenbildern und Phasenbildern ist in Abbildung 3 zu sehen.

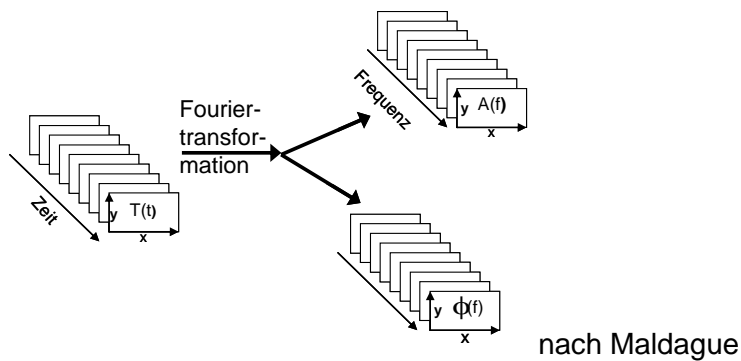


Abb. 3. Schematische Darstellung der Fouriertransformation an Thermografiesequenzen.

Die Thermogramme liegen als ausgewählte Zeitreihe mit einer definierten Abtastrate, der Bildwiederholrate der IR-Kamera, vor. Bei einer Kamerafrequenz f_{Kamera} von 2 Hz und einer Bildanzahl N_{Anzahl} von 200 wird über Gleichung (1)

$$f_{\text{FT}} = \frac{f_{\text{Kamera}}}{N_{\text{Anzahl}}} \quad (1)$$

die resultierende Frequenz $f_{\text{FT}} = 0,01$ Hz als minimale Frequenzauflösung der berechneten Amplituden- und Phasenbilder ermittelt.

3.3 Auswertung von Temperatur-Zeit-Kurven einzelner Pixel und ROIs

Die Programme zur Aufnahme und Auswertung von Thermografiesequenzen bieten in den meisten Fällen Werkzeuge zur Erstellung von Temperatur-Zeit-Kurven einzelner Pixel und von sogenannten Region of Interest (ROI). Diese ROI können im einfachen Fall quadratisch sein oder andere geometrische Figuren repräsentieren. Hierbei werden an einer oder mehreren ausgewählten Stellen Bereiche definiert, über die das Temperaturverhalten räumlich gemittelt und über einen bestimmten Zeitraum aufgezeichnet und als Temperatur-Zeit-Kurve in einem austauschbaren Datenformat zur Verfügung gestellt wird. Diese können dann mit Datenverarbeitungsprogrammen weiterverarbeitet und ausgewertet werden.

Im Vergleich mit den zeitsynchronen Werten des Strahlungsmessers sind Aussagen möglich zum zeitlichen Verhalten der Temperaturentwicklung auf der Oberfläche der Außenfassade. In Abbildung 4 sind solche aufgezeichneten Vergleiche zwischen den zeitsynchronen Werten des Strahlungsmessers und der daraus resultierenden Temperaturentwicklung auf der Wandmalerei in Cobelsdorf (räumliche Mittelung über das gesamte Wandbild) an zwei verschiedenen Messtagen dargestellt. In den Grafiken zeigt die blaue Linie den zeitlichen Verlauf der Strahlungsleistung in W/m^2 , die schwarze Linie die in diesem Zeitraum gemessene Oberflächentemperatur der Fassade. Links ist ein typischer Verlauf bei einem Wechsel zwischen Sonne und Wolken zu sehen. Dabei ist eine relativ sprunghafte Änderung der gemessenen Werte zu beobachten. Rechts ist eine Entwicklung der Strahlungsleistung und der daraus resultierenden Temperaturentwicklung auf der Fassade zu erkennen, die für einen sonnigen Tag ohne Wolkenbildung typisch ist.

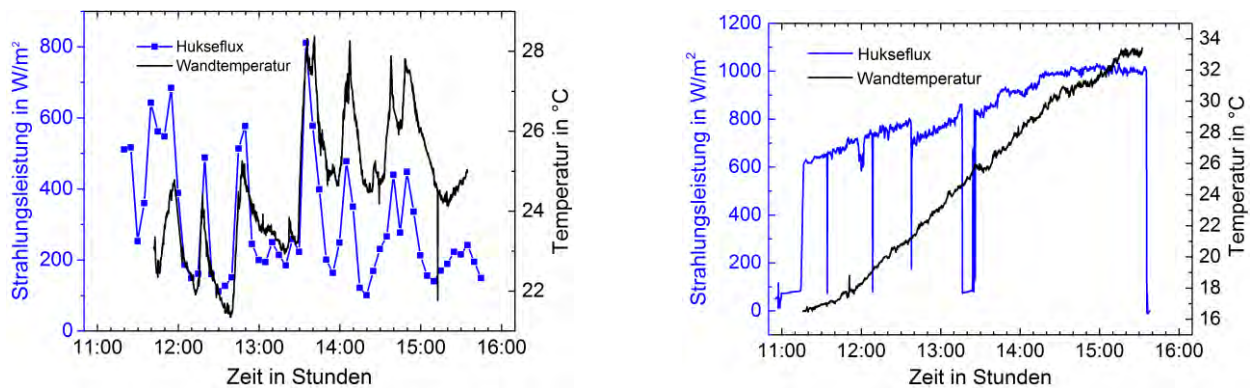


Abb. 4. Vergleich der aufgenommenen Strahlungsleistung zu der gemessenen Temperatur auf der Fassade. Links: Sonne-Wolken-Wechsel. Rechts: Sonniger Tag bei geringer Bewölkung.

4 Bewertung von Schäden

Die Bewertung der detektierten Temperatur- und Phasenkontraste sollte zusammen mit dem Auftraggeber und/oder dem Restaurator erfolgen.

5 Abschätzung des Aufwandes

Wie bereits oben beschrieben, muss für die Durchführung der Messungen ein Messtag mit geeigneter Witterung und Sonnenstandsverlauf ausgewählt werden. Hierzu müssen u.U. mehrere Tage zur Auswahl stehen, bis tatsächlich die geeigneten Bedingungen gegeben sind.

Der zeitliche Aufwand für die Durchführung und Auswertung der oben beschriebenen Untersuchungen richtet sich natürlich zunächst nach der Fragestellung und hierbei insbesondere nach der erforderlichen Ortsauflösungen.

Reicht die Auflösung des eingesetzten Kamerasystems aus, um eine Fassade mit einer geometrischen Einstellung zu erfassen, dann sind für die Durchführung der Messungen bei geeignetem Sonnenstandsverlauf in der Regel nur wenige Stunden erforderlich. Jeweils eine Stunde sollten für den Auf- und Abbau des Systems mit eingeplant werden. Für die weitere Auswertung der Messdaten und Fotos sind mindestens weitere 4 bis 8 Stunden einzuplanen, für aufwändigere Auswertungen, Dokumentationen und Berichte bis zu 3 Tage. Insgesamt müssen daher für einen Messeinsatz mit Auswertung bis zu einer Arbeitswoche angesetzt werden.

Die Investitionskosten für die für die Messeinsätze erforderlichen Geräte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. Investitionskosten und alternative Mietkosten für die erforderlichen Messgeräte

Gerät	Investitionskosten in €	Ansatz für Mietkosten pro Tag in €	Bemerkung
IR-Kamera (Mikrobolometer bis 640 x 512) mit Wechselobjektiven und der Möglichkeit, Thermogrammsequenzen zu erfassen (Notebook)	20.000 bis 60.000	250 bis 400	Nicht immer stehen geeignete Leihgeräte zu Verfügung
Temperaturkalibrierung der IR-Kamera (nicht für alle Anwendungen erforderlich)	3.000 bis 10.000 (Abhängig von der Anzahl der Objektive und Temperaturmessbereiche)		
Software für Datenerfassung	3.000 bis 5.000		
Software für Datenauswertung	3.000 bis 5.000		Nicht alle Hersteller von IR-Kameras stellen Auswertungssoftware mit den erforderlichen Spezifikationen zur Verfügung. Häufig kommen hier auch Eigenentwicklungen zum Zuge.
Entfernungsmessgerät	Ca. 100		
Messgerät für Oberflächentemperatur	Ca. 350		
Messgerät für Luftfeuchte und -temperatur	Ca. 100		
Fotokamera	Ca. 1000		
Gesamtkosten	Ca.30.000 bis 80.000		

Eine Abschätzung der Kosten für zwei Messeinsätze im Umfang von zwei Tagen und einer Woche sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Hierbei wird bei dem Einsatz einer IR-Kamera ein Mietgerät angesetzt, für die anderen erforderlichen Messgeräte werden keine Kosten erhoben.

Tabelle 2. Kosten für Messeinsätze mit aktiver Thermografie an Gebäudefassaden

Position	Messeinsatz 2 Tage, Kosten in €	Messeinsatz 1 Woche, Kosten in €	Bemerkung
Anfahrt, Transportkosten	300	500	abhängig vom Objekt
Personalkosten für zwei Mitarbeiter (100 €/h) einschließlich Vor- und Nachbereitung (+ 8 h)	4000	8800	
Leihgebühr für eine Thermografiekamera (+ 1 Tag)	750 bis 1200	1500 bis 2400	abhängig von der Kamera
Evtl. Übernachtungskosten (60 €/Tag)	120	360	
Gesamtkosten in €	5.000 bis 5.600	11.000 bis 12.000	

6 Ausblick

Bestehende IR-Kameratechnologie und hier insbesondere die Mikrobolometersysteme werden zukünftig kostengünstiger werden. Schon heute benötigen die neuesten Mikrobolometersysteme keine Temperaturstabilisierung mehr, so dass dieameratechnik leichter und nutzfrequnder wird.

Weiterentwicklungen in der IR-Kameratechnologie beinhalten Detektorarrays mit höherer Ortsauflösung (bis 2048 x 1920), höherer Temperaturauflösung (< 20 mK) und höheren Bildwiederholraten (> 100 Hz für Vollbilder). Weiterhin werden Kamerasysteme mit Zoomobjektiven entwickelt, die für die Erfassung von Fassaden sehr flexibel eingesetzt werden können.

Bisher stehen für die Datenauswertung oft nur teure Softwarepakete der Hersteller von IR-Kameras zur Verfügung. Hier könnte die Standardisierung eines einheitlichen Datenformats auch die Nutzung freier Softwaremodule ermöglichen.

Der Einsatz automatisierter Schwenk-Neige-Stativköpfe wird zukünftig eine effiziente und reproduzierbare Erfassung größerer Fassade mit hoher Ortsauflösung ermöglichen. Mit entsprechenden Softwaremodulen wird auch die Auswertung der Messdaten zumindest teilautomatisch erfolgen können.

7 Literatur

- [1] Krankenhagen, R., Maierhofer, C.: Pulse phase thermography for characterizing large historical building facades after solar heating and shadow cast - a case study. Journal of Quantitative infrared thermography, 11(1), 2014, pp. 10-28
- [2] Maldague, X., Marinetti, S.: Pulse phase infrared thermography. Journal of Applied Physics 79 (5), 1996, pp. 2694-2698.

Anhang 1: Verwendete Geräte

IR-Kamera

- **VarioCam hr (Bola)**
 - Detektortyp: ungekühltes Mikrobolometer FPA
 - Detektorformat: 640 x 480 (mit Microscan Resolution Enhancement: 1280 x 960)
 - Pixelgröße 25,0 µm quadratisch
 - Bolometerarray-Abmessungen 1,607 cm x 1,221 cm
 - Spektralbereich: 7,5 bis 14 µm
 - Bildfrequenz: 50/60 Hz
 - Temperaturmessbereich: -40 bis 1200 °C
 - NETD bei 30°C: < 0,05 K im Premiummodus, ansonsten < 0,08 K
 - A/D Wandlung: 16 Bit
 - Analoge Schnittstelle: PAL/NTSC-FBAS und S-Video, Headset
 - Digitale Schnittstelle: RS232, FireWire, SD-Card
 - Gewicht: 1,5 kg
 - Seriennummer: 249611
- **Objektive**
 - Normalobjektiv 30 mm (VarioCAM II standard optics)
 - Öffnungswinkel: (30x23)°, hieraus ergeben sich folgende Abmessungen für den erfassten Bildbereich im Abstand a: Breite=0,5*a Höhe=0,3907*a
 - IFOV: 0,8 mrad
 - Fokussierbereich: 0,22 m bis unendlich
 - Teleobjektiv 50 mm
 - Öffnungswinkel: (18x14)°
 - IFOV: 0,5 mrad
 - Fokussierbereich: 0,5 m bis unendlich
 - Teleobjektiv 75 mm
 - Öffnungswinkel: (10x7,5)°
 - IFOV: 0,3 mrad
 - Fokussierbereich: 2 m bis unendlich

Strahlungssensor

- **Pyranometer SR03-05 mit Handgerät LI19 von Hukseflux**
 - Pyranometer type SR03
 - Measurand : hemispherical solar radiation
 - ISO classification : second class pyranometer
 - Calibration uncertainty < 1.8 % (k = 2)
 - Response time (95 %) : 1 s
 - Spectral range : 300 bis 2800 nm (50 % transmission points)

- Sensitivity (nominal) : $15 \times 10^{-6} \text{ V/(W/m}^2\text{)}$
- Rated operating temperature : -40 to +80 °C range
- Temperature response : $< \pm 3 \% (-10 \text{ to } +40 \text{ }^\circ\text{C})$
- cable length : 5 m
- Hand-held read-out unit type: LI19
- Compatibility with pyranometers, heatflux sensors, Gardon Schmidt Boelter gauges
- Programming functions : sensor settings, logger settings
- A/D resolution : 1 or 10 μV
- A/D sample rate : 1/second
- Memory capacity 3500 samples min / max/ average over set interval

Fotoapparat

- **Canon EOS 450 D**
 - Objektive
 - 35 mm Normal
 - 60 mm Macro
 - 17-85 mm Zoom

Distanzmesser

- **Laser-Entfernungsmesser DLE 40 Professional**
 - Messbereich: 0,05 bis 40 m
 - Messgenauigkeit: $\pm 1,5 \text{ mm}$ (bei ungünstigen Bedingungen bis zu $\pm 10 \text{ mm}$)
 - Betriebstemperatur: $-10^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$
 - Lasertyp: 635 nm, <1 mW (Klasse2)
 - Strahldurchmesser: 6 mm (10 m) – 24 mm (40 m)
 - Batterie: 4 x 1,5 V LR03 (AAA) | Akku: 4 x 1,2 V KR03 (AAA)
 - Batterielebensdauer: 30000 Einzelmessungen oder 5 h Dauermessung
 - Gewicht: 180 g
 - Maße: 58 x 100 x 32 mm
 - Staub- und Spritzwassergeschützt (IP 54)

Luftfeuchte, Lufttemperatur

- **WeatherHawk**
 - WM-300 WindMate
 - Luftfeuchte
 - Lufttemperatur
 - Windgeschwindigkeit

- Windrichtung
- Kompass

Stromversorgung

- **IVT Power Station PS-300**

- Sinus-Wechselrichter
- Power Station mit integriertem Akku
 - 300 W/ 230 V/AC,
 - 12 V/DC - 230 V/AC,
 - 12 V/DC
- Dauerstrom: 1,4 A/AC, 10 A/DC
- 50 Hz
- Kühlung : Konvektion
- Ausgänge: 1x Schutzkontakt-Steckdose, Zigarettenanzünder-Steckdose
- Eingangsstrom (max.): 5 A
- Leistungsaufnahme (StandBy): 3,6 W
- Signal-Ausgangsform: Sinus
- Höhe: 215 mm
- Breite: 145 mm
- Gewicht: 10,4 kg
- Länge: 240 mm

Anhang 5: Merkblatt 5

Fusion von 2D-Bilddaten zur Unterstützung der Bewertung von oberflächennahen Schäden an Bauwerken und Bauteilen

Mathias Röllig¹, Henrik Steinfurth¹, Sven Augustin¹

Rüdiger Mecke², Michael Schiller², Alexa Kernchen²

Uwe Kalisch³, Jeannine Meinhardt³, Christiane Hennen⁴,

Ernst Thomas Groll⁵, Torsten Arnold⁶

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, FB 8.7, Berlin

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

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

⁴Christiane Hennen, Bauforschung - Denkmalpflege, Wittenberg

⁵Ernst Thomas Groll, Restaurator, Magdeburg

⁶Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: **II 3-F20-12-1-108 / SWD -10.08.18.7-13.42**)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren		Forschungsinitiative Zukunft Bau SF- SWD – 10.08.18.7-13.42 BAM Vh 8463	
Dokument:	Merkblatt		
Autor:	Alexa Kernchen IFF	Status:	final
Datum:	11.11.2015	Version:	1

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	137
2. Verfahrensbeschreibung und Technik.....	137
2.1. Projektion von 2D-Bilddaten.....	137
3. Bedienung des Softwaretools zur Datenfusion.....	138
3.1. Durchführen der Messung	139
3.2. Kalibrierung	139
3.3. Hauptbild einladen	139
3.4. Weitere Bild hinzufügen (bei Bedarf wiederholen).....	140
3.5. Referenzmerkmale für Korrespondenzen (Merkmalspaare) angeben	140
3.6. Bilder ändern	141
3.7. Weitere Funktionalitäten und Hinweise	141
4. Literatur	142

1 Einleitung

Dieses Merkblatt richtet sich an potentielle Nutzer und Anwender des nachfolgend beschriebenen Fusionsmoduls zur lagerichtigen Überlagerung mehrerer 2D-Bilddaten von Schäden an Bauwerken und Bauteilen. Dazu gehören u.a. Denkmalpfleger, Restauratoren, Bauingenieure, Architekten und Gutachter. Die mittels verschiedener Verfahren gewonnenen zweidimensionalen Bilddaten können als Ergänzung zu traditionellen Verfahren wie der digitalen Fotografie einen Mehrwert bei der Dokumentation und Auswertung bieten. Durch die lagerichtige Überlagerung von Bilddaten aus verschiedenen Domänen (z.B. Fotos und Thermogramme) kann die Lokalisierung von Auffälligkeiten in den verschiedenen Datensätzen sowie die Objektivität bei der Auswertung verbessert werden.

Das Merkblatt beschreibt die Grundlagen, Anwendungsbereiche, Randbedingungen und Grenzen der Methode. Anhand eines Beispiels wird die Vorgehensweise bei der praktischen Anwendung des Softwaretools erläutert.

Das Softwaretool kann auf Anfrage potentiellen Anwendern zur Verfügung gestellt werden (Anfragen an ruediger.mecke@iff.fraunhofer.de).

Das Merkblatt wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projektes „Erfassung und Bewertung von sicherheitsrelevanten Ablösungsprozessen bei Putzen und Fassadenelementen mit zerstörungsfreien Mess- und Prüfverfahren“ erstellt. Für detailliertere Informationen zum Projekt, den entwickelten Verfahren und deren Kombination wird auf den Abschlussbericht und die Publikationen von Maierhofer et al. [1] sowie Seidl et al. verwiesen [2, 3].

2 Verfahrensbeschreibung und Technik

2.1 Projektion von 2D-Bilddaten

Das für die Überlagerung zweier oder mehrerer 2D-Bilddaten verwendete Verfahren ist vergleichbar mit dem Zusammenfügen (Stitching) von Panoramaaufnahmen zu einem gemeinsamen Bild.

Für eine lagerichtige Überlagerung muss eine projektive Transformation im zweidimensionalen Raum auf das Bild angewandt werden (**Abb. 6**, unten links), auch als Homografie bezeichnet. Die Transformation wird durch eine homogene 3x3 Matrix (H) dargestellt und auf das Ausgangsbild x (**Abb. 6**, oben links) entsprechend angewandt:

$$x' = H(x)$$

Für die Berechnung der Homografie werden mindestens vier Punktkorrespondenzen zwischen 2D-Bildern benötigt (**Abb. 6**, oben), welche für ein stabiles Ergebnis möglichst über das gesamte Bild verteilt sein sollten. Die Berechnung erfolgt mittels der Open-Source Bibliothek OpenCV und deren Funktion „findHomography“ⁱ. Es werden alle gegebenen Punktpaare für die Berechnung verwendet, sodass diese keine Ausreißer enthalten sollten.

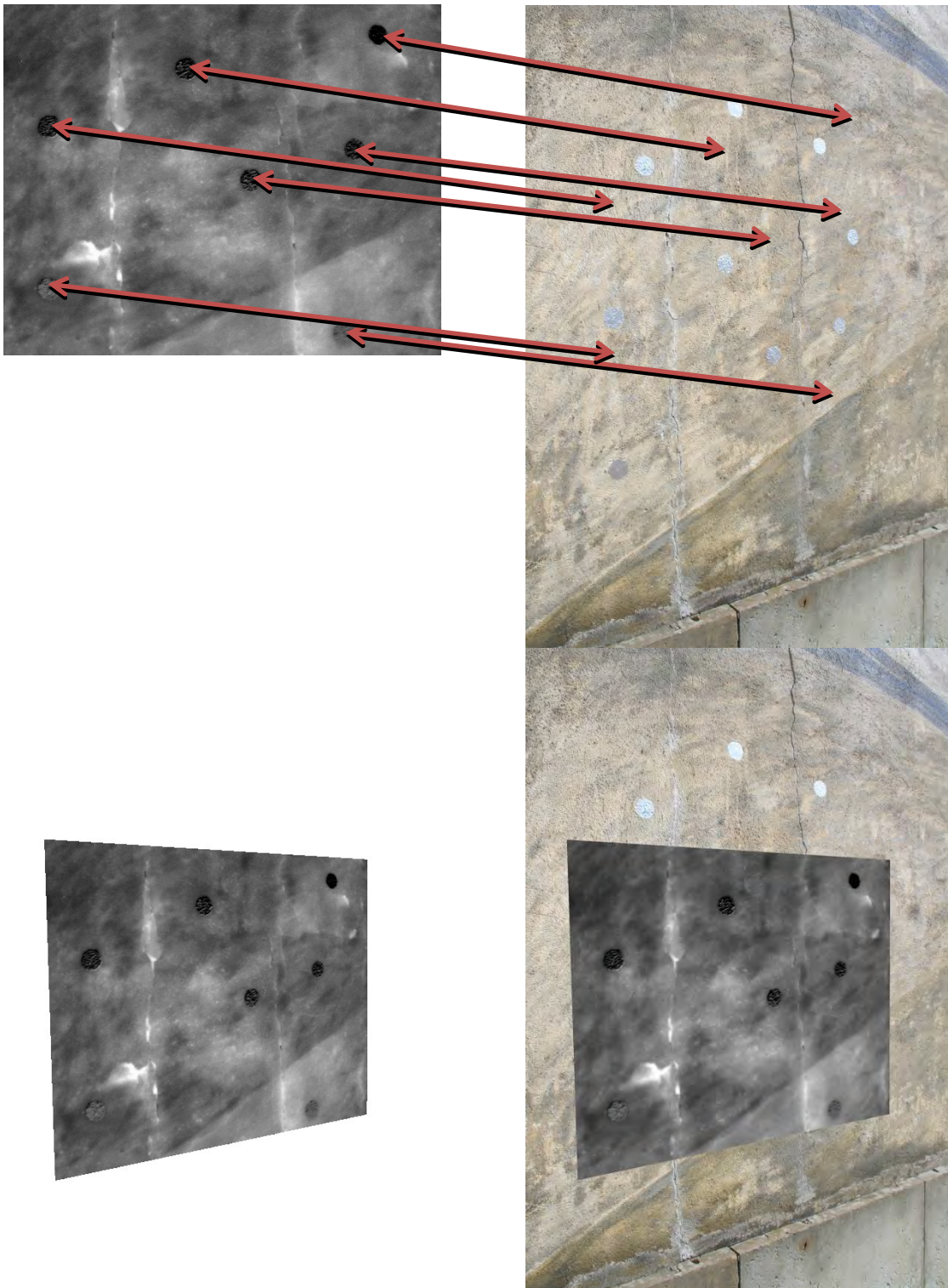


Abb. 6. Thermogramm (oben links), das lagerichtig transformiert (unten links) und auf ein Foto (unten rechts) überlagert wird. Die Pfeile (oben rechts) stellen die Korrespondenzen zwischen den beiden 2D-Bildern dar.

3 Bedienung des Softwaretools zur Datenfusion

Im Folgenden wird die Durchführung einer Fusion von Fotos und Thermogrammen beschrieben. Hierzu werden Beispielaufnahmen an einer Wandmalerei in Cobbelsdorf genutzt. Die Aufnahmen sind am 09.09.2014 entstanden.

3.1 Durchführen der Messung

Die Erfassung der Bilddaten ist mit den jeweiligen Messsystemen (z.B. Thermografiekamera, Digitalkamera) durchzuführen. Mit der aktiven Thermografie können auch die unter der Oberfläche liegenden Strukturen erfasst werden. Das führt dazu, dass in den Aufnahmen der beiden verschiedenen Messsysteme z.T. sehr unterschiedliche Bildinhalte vorliegen. Die für die Überlagerung benötigten korrespondierenden Punktepaaire sind hierdurch oft nicht in den Bildern herzustellen. Daher ist das Anbringen von Referenzmarkern (z.B. kreisförmige Marker aus Aluminiumfolie, die in beiden Bildmodalitäten sichtbar sind) auf dem Messobjekt empfehlenswert. Die Marker sollten gleichmäßig auf dem Messbereich verteilt werden.

Für eine Kalibrierung der genutzten Kameras ist die Brennweite des Objektivs nach der Messung fest einzustellen bzw. die Einstellung zu speichern.

3.2 Kalibrierung

Für eine genaue Überlagerung ist eine Korrektur der Bilddaten mit einer Kalibrierung notwendig. Da die Kalibrierungswerte bei unterschiedlicher Brennweite abweichend sind, ist es empfehlenswert, die Kalibrierung nach einem Messeinsatz mit der bei der Messung genutzten Brennweite durchzuführen (siehe **Merkblatt 3**). Alternativ können auch bereits kalibrierte Bilder genutzt werden; die Kalibrierparameter sind dann nicht mehr explizit im Softwaretool anzugeben. Werden weder eine Kalibrierung auf Basis der eingegebenen Parameter noch kalibrierte Bilder genutzt, ist mit Ungenauigkeiten vor allem in den Randbereichen der fusionierten Bilder zu rechnen.

3.3 Hauptbild einladen

Das Hauptbild (**Abb. 7**) bildet die Basis für die Fusion. Es wird nicht transformiert und ist immer sichtbar. Das geladene Bild kann Transparenzwerte enthalten, die bei der Fusion erhalten bleiben. Auf diese Weise können z.B. Rissdaten als Polygone in ein transparentes (Hintergrund-)Bild gezeichnet und zur Überlagerung genutzt werden. Voraussetzung ist hierbei die Nutzung des Bildformats PNG, welches im Gegensatz zu Bitmaps Transparenzwerte unterstützt.

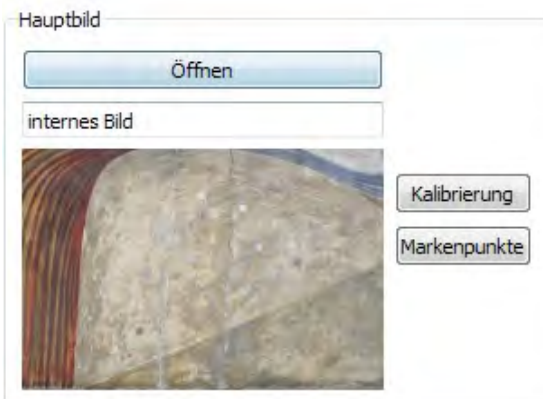


Abb. 7. Bedienelemente zum Anlegen des Hauptbildes. Das geladene Bild wird als Miniatur dargestellt.

Sowohl für das Hauptbild, als auch für alle weiteren Bilder können Kalibrierungswerte (s. **Abb. 8**) angegeben bzw. aus einer Datei geladen werden (s. Abschnitt 0). Die Kalibrierung sollte vor dem Festlegen der Korrespondenzen angegeben werden, da andernfalls diese erneut angepasst werden muss.

Abb. 8. Dialog zur Eingabe der Kalibrierungswerte. Die Werte können manuell eingetragen oder aus einer Datei geladen werden.

Anschließend sind die Referenzmerkmale für die Korrespondenzen anzugeben. Dieser Schritt ist in Abschnitt 0 beschrieben und kann gemeinsam für alle zu überlagernden Bildern geschehen.

3.4 Weitere Bild hinzufügen (bei Bedarf wiederholen)

Nachdem das Hauptbild angegeben wurde, können nun weitere Bilder/Ebenen für die Überlagerung hinzugefügt werden (**Abb. 9**). Auch hier werden Transparenzwerte in den Bildern unterstützt.



Abb. 9. Menü und Bedienelemente zum Hinzufügen eines Bildes mit einer Miniaturansicht. Es kann die Reihenfolge (Pfeile) sowie die Transparenz (Deckkraft) bei der Überlagerung angepasst werden.

Äquivalent zu dem Hauptbild kann für jedes Bild dessen Kalibrierung angegeben werden. Beim Festlegen der Referenzmerkmale (Markerpunkte) für die Korrespondenzfindung werden gleichzeitig die korrespondierenden Punkte im Hauptbild angezeigt, welche hierbei angepasst werden können.

3.5 Referenzmerkmale für Korrespondenzen (Merkmalspaare) angeben

Korrespondenzen werden immer zwischen dem Hauptbild und dem aktuellen überlagerndem Bild erstellt. Für einen besseren Bezug empfiehlt es sich, auch die Korrespondenzen im Hauptbild mit dem überlagernden Bild gemeinsam anzugeben. Zunächst ist ein neuer Punkt hinzuzufügen bzw. auszuwählen. Neue Punkte werden automatisch aktiviert. Ein aktiver Punkt ist in der Bildansicht mit einem grünen Kreis markiert, inaktive Punkte werden als rote Kreise dargestellt.

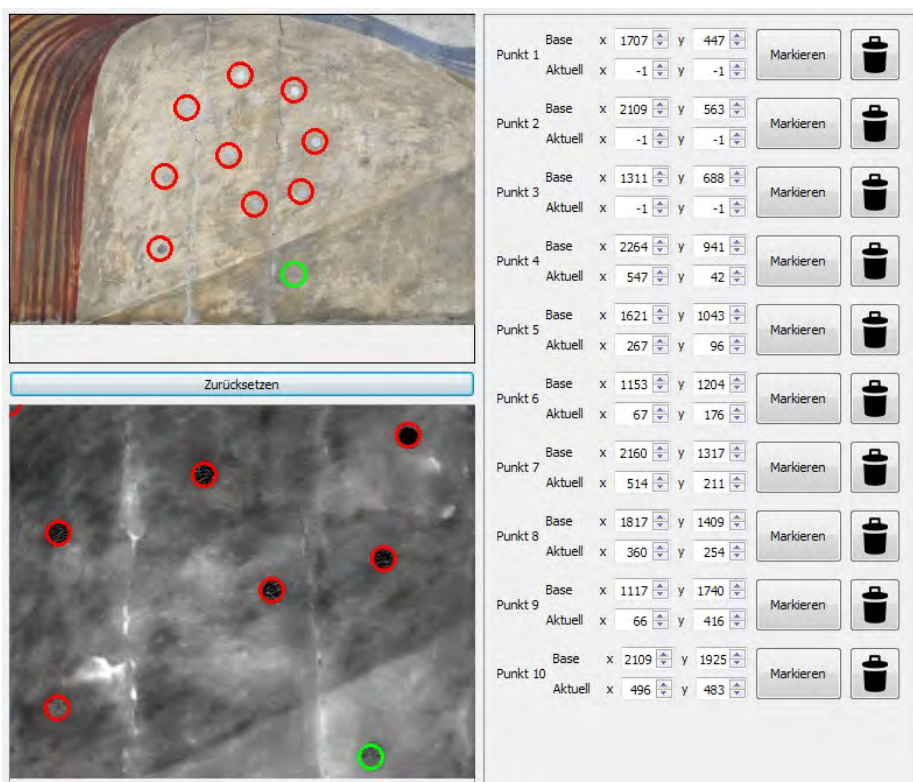


Abb. 10. Dialog zum Festlegen der Korrespondenzen; hier für das Hauptbild und das zu überlagernde Bild. Links sind die Bilder mit den Merkmalspunkten (rot und grün), rechts sind die Merkmalspunkte mit Koordinaten (x, y) dargestellt.

Der aktive Punkt kann nun platziert werden. Dies kann in der Bildansicht durch Klicken der linken Maustaste und Bewegen der Maus geschehen. Der Mittelpunkt des Kreises entspricht der ausgewählten Position (x, y). Für eine präzisere Platzierung kann das Bild in der Ansicht vergrößert sowie verkleinert (Strg + Scrollrad) und verschoben (rechte Maustaste + Bewegen) werden. Alternativ können die gewünschten Koordinaten des Punktes in den entsprechenden Eingabefeldern manuell eingegeben werden.

Nicht alle Punkte des Hauptbildes sind immer in den überlagernden Bildern vorhanden. Diese Punkte sind mit den Koordinaten (-1;-1) zu belegen und werden damit in der Berechnung nicht verwendet.

Das Löschen von Punkten wirkt sich auf alle anderen Bilder und deren Korrespondenzen aus und ist daher mit einem Bestätigungsdialog versehen.

3.6 Bilder ändern

Sowohl das Hauptbild als auch die überlagernden Bilder können ausgetauscht werden. Die bis dahin festgelegten Korrespondenzen bleiben erhalten und können je nach Abweichung zum vorhergehenden Bild außerhalb des neuen Bildes liegen.

Bei Aufnahmen der Thermografie aus einer Messung (Messreihe) ändert sich der örtliche Bezug nicht. Daher kann das Austauschen der Bilder genutzt werden, um auch Bilder verschiedener Zeitpunkte der Messung darzustellen, mit dem Ziel, Korrespondenzen zum Hauptbild besser zu erkennen.

3.7 Weitere Funktionalitäten und Hinweise

Weitere Funktionen der 2D-Fusion sind:

- Löschen von Bildern/Ebenen

- Ändern der Reihenfolge der Bilder/Ebenen
- Laden und Speichern von Projekten (**Abb. 11**): Die Bilder werden in der Projektdatei hinterlegt, sodass keine Bindung zur Originaldatei (Bild) existiert. Alle Einstellungen und Kalibrierungen werden ebenfalls gespeichert.
- Das Ergebnisbild kann in einer Datei gespeichert werden (**Abb. 11**, rechts, F11-Taste). Die Transparenz bleibt dabei erhalten.

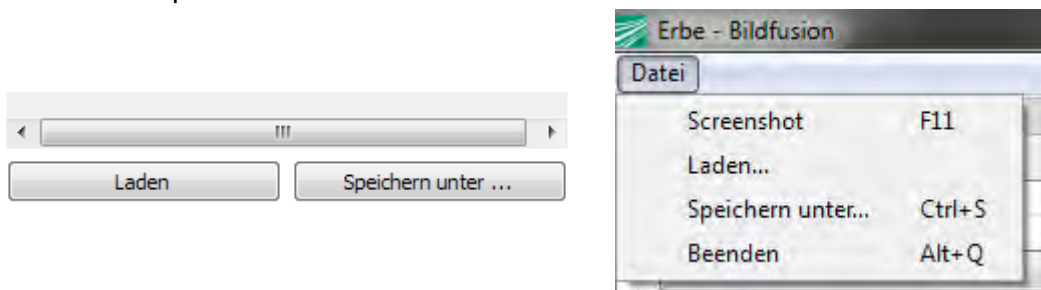


Abb. 11. Schaltflächen (links) und Menü (rechts) zum Laden und Speichern des Projekts sowie zum Speichern des Ergebnisbildes in einer Datei.

Das Ergebnisbild (s. **Abb. 12**) wird nach dem Schließen der Dialoge für Kalibrierung und Korrespondenzen sowie beim Ändern der überlagernden Bilder (Reihenfolge und Transparenz) automatisch aktualisiert.

Je nach Größe der Bilder können die Berechnung der Transformationen und die Erstellung des Ergebnisbildes wenige Sekunden in Anspruch nehmen. Daher kann es nach Schließen der Dialoge oder Anpassen der Ebenen bei der Aktualisierung der Fusion zu kleinen Verzögerungen in der Anwendung kommen.

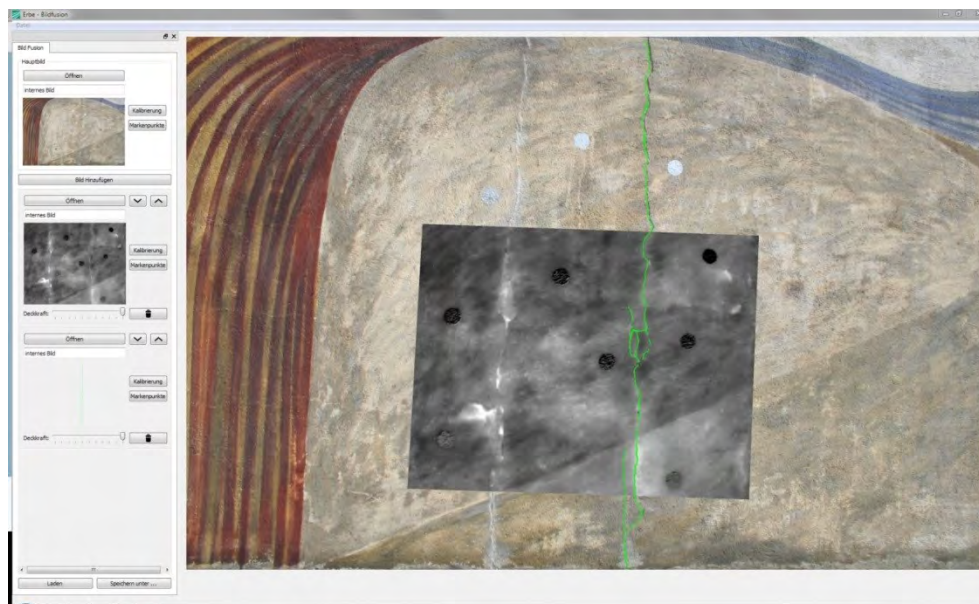


Abb. 12. Ergebnis der Überlagerung eines Thermogramms (grau, Bildmitte) und eines Rissverlaufs (grüne Kurven) auf ein Foto eines Fassadenbereiches; Screenshot aus dem Softwaretool zur Datenfusion.

4 Literatur

[1] C. Maierhofer, R. Krankenhagen, R. Mecke, M. Röllig, M. Schiller, T. Seidl, U. Kalisch, C. Hennen, J. Meinhardt: Zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren; Technischer Bericht; Berlin; 2010

[2] T. Seidl, M. Schiller, R. Mecke: Datenfusion und -visualisierung zum Monitoring von Bauteiloberflächen in der Denkmalpflege; Artikel: 9./10. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF 2010; Fraunhofer IFF; ISSN 2191-8783; Magdeburg; 2011

[3] T. Seidl, R. Mecke, M. Schiller, C. Maierhofer, J. Meinhardt: Trackingbasierte 3-D-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

ⁱ http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html