



Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht DD 34 / 2007

**Detektierung und Konservierung infolge von Umwelteinflüssen
hohlstehender Wandmalereien am Beispiel der national wertvollen
mittelalterlichen Kirchen in Kühren und Bad Schmiedeberg**

- Abschlussbericht -

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt AZ 21045006



Berichterstattung:

Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Dr. rer. nat. Christoph Franzen

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther

Dr. rer. nat. Jeannine Meinhardt-Degen

Dipl.-Ing. Stefan Weise

Dresden, den 27.11.2007

Seitenzahl einschl. Titelblatt: 137

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung.....	1
2	Einführung	2
3	Stand des Wissens / Literaturlauswertung	3
3.1	Abriss der Grundlagen	3
3.1.1	Allgemeines	3
3.1.2	Einflussfaktoren der IR-Messungen.....	3
3.2	IR-Thermographie In der Denkmalpflege.....	7
3.2.1	Passive Thermographie	8
3.2.2	Techniken der Aktiven Thermographie	9
3.3	Arbeitsgruppen / Projekte IR-Thermographie in der Denkmalpflege	15
3.3.1	CNR, ITEF - Arbeitsgruppe um E. Grinzato.....	15
3.3.2	Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig.....	24
3.3.3	Politecnico, Mailand.....	27
3.3.4	Universität Neapel: Vergleich PT,MT und PPT.....	29
3.3.5	Passive Thermographie Deckengemälde Paris.....	30
3.3.6	Fallbeispiel abgenommener Wandmalereien.....	31
3.3.7	IR-Untersuchungen von Fassadenputzzuständen.....	33
3.3.8	NTU Athen	34
3.3.9	Weitere Projekte zur IR-Thermographie in der Denkmalpflege	35
4	Laboruntersuchungen.....	37
4.1	Einleitung	37
4.2	Positionierung der Aufnahmen.....	38
4.3	Vergleich unterschiedlicher Aktivierungsmethoden	39
4.3.1	Abkühlung der Oberfläche	39
4.3.2	Aufheizung durch Warmluft.....	39
4.3.3	Aktivierung durch Strahlung.....	40
4.3.4	Untersuchungen zur Strahlerleistung, Strahlkegel und Versuchsanordnung	43
4.4	Herstellung der Probekörper	61
4.5	Probekörper 1, Pigmente	62
4.5.1	Aufbau Probekörper 1, verwendete Pigmente	62
4.5.2	Versuchsdurchführung am Probekörper 1	64
4.5.3	Auswertung Ergebnisse Probekörper 1	69
4.6	Probekörper 2, Mörtel	77

4.6.1	Aufbau Probekörper 2, verwendete Mörtel	77
4.6.2	Versuchsdurchführung Probekörper 2	79
4.6.3	Auswertung Ergebnisse Probekörper 2	83
4.7	Probekörper 3, Hohlstellen.....	88
4.7.1	Aufbau Probekörper 3.....	88
4.7.2	Versuchsdurchführung Probekörper 3	89
4.7.3	Auswertung Ergebnisse Probekörper 3	90
4.8	Versuchswand Freiburger Fürstengruft.....	93
4.8.1	Voruntersuchungen.....	93
4.8.2	Versuchsdurchführung in der Fürstengruft	94
4.8.3	Ergebnis.....	96
5	Objektuntersuchungen	100
5.1	Battaune.....	100
5.1.1	Objektidentifikation.....	100
5.1.2	Untersuchungen.....	101
5.2	Kühren.....	103
5.2.1	Objektidentifikation.....	104
5.2.2	Schadensaufnahme	105
5.2.3	Untersuchungsparameter	106
5.2.4	Oberes Untersuchungsfeld	108
5.2.5	Mittleres Untersuchungsfeld	111
5.2.6	Unteres Untersuchungsfeld	113
5.2.7	Hinterfüllung und Nachuntersuchung.....	115
5.3	Bad Schmiedeberg.....	117
5.3.1	Objektidentifikation.....	118
5.3.2	Untersuchungen.....	118
5.3.3	Restauratorische Maßnahmen.....	126
5.3.4	Ergebnis.....	128
6	Literatur	129

1 Kurzfassung

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt „Detektierung und Konservierung infolge von Umwelteinflüssen hohlstehender Wandmalereien am Beispiel der national wertvollen mittelalterlichen Kirchen in Kühren und Bad Schmiedeberg“ (AZ 21045006) wurden vom Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) mit Hilfe aktiver Infrarotthermographie zerstörungsfreie Untersuchungen an immobilen sensiblen Kunstgut durchgeführt. Aufbauend auf umfangreichen Laborstudien wurde ein Versuchsaufbau etabliert, der sich angepasst an die Fragestellung an mittelalterlichen Wandmalereien ohne Gefährdung für das hochrangige Kulturgut einsetzen lässt. Die Laborstudien umfassten die Untersuchung verschiedenster Aktivierungsmethoden, die Abgrenzung der Leistungsflächen der Aktivierungsstrahler, die Abschätzung von deren Temperatureintrag auf eine farblich gefasste Oberfläche, Infrarot-Untersuchungen an verschiedenen Pigmenten, Untersuchungen zu unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten und Untersuchungen an exakt definierten Hohlstellen.

Als günstigste Aktivierungsvariante wurde die Strahlungsaktivierung ermittelt. Die strombetriebenen Strahler müssen genau positioniert werden, um eine gleichmäßige Aktivierung der Untersuchungsfläche zu gewährleisten. In wenigen Metern Entfernung zur Wandmalerei rufen die eingesetzten 3000 W Strahler wenige K Temperaturveränderung hervor, die ausreicht, um hoch auflösend Informationen über Anomalien im Wandaufbau nachzuweisen. Die Temperaturdifferenzen um bis zu 6 K an den Wandoberflächen sind unschädlich für die Oberflächenfassungen. Es wurde die Abhängigkeit der Wärmeaufnahme einer Oberfläche vom eingesetzten Pigment nachvollzogen. An einem Probekörper im eingearbeiteten fest definierten Hohlstellen konnte gezeigt werden, dass die Erkennung der Hohlstellenlagen cm-genau erfolgen kann. Auch wenn der Randdefinition Grenzen gesetzt sind, ist die moderne Technik der konventionellen Klopfmethode (Perkussion) darin überlegen und zusätzlich absolut berührungsfrei.

An den zwei Fallbeispielen wurden exemplarisch das Ausmaß der Hohlstellen vor der Restaurierung bestimmt, mit Kartierungen der herkömmlichen Perkussionsuntersuchungen verglichen und nach der Restaurierung wieder mit aktiver IR untersucht. In der evangelisch-lutherischen Pfarrkirche in Kühren (Sachsen) wurde an der größten zusammenhängenden Wandmalerei in Sachsen gearbeitet. An der Nordwand des Langhauses wurde dabei eine überlebensgroße Darstellung des Hl. Christophorus in mehreren Teilabschnitten erfolgreich untersucht. Im Land Sachsen-Anhalt wurde an Wandmalereien in der südlichen Vorhalle der evangelische Kirche St. Nikolai in Bad Schmiedeberg ebenfalls Untersuchungen durchgeführt.

Einsatz der zerstörungsfreien Infrarotaufnahme-Technik in dem sehr sensiblen Bereich der Kunstgutuntersuchung ist sehr viel versprechend. Noch ist die Anwendung als aufwendig einzustufen. Die berührungslose Prüftechnik ist ausschließlich durch erfahrene Fachleute durchführbar. Der Einsatz an sensiblen und einzigartigen Kulturgut wird, wie auch die Erfahrung aus anderen Bereichen zeigt, immer Einzelfalllösungen erfordern, da nur so den denkmalspezifischen Gesichtspunkten Rechnung getragen werden kann.

2 Einführung

Viele historisch bedeutende Wandmalereien sind vom Zerfall bedroht. In einem der schwerwiegendsten Zerstörungsprozesse kommt es zunächst für den Betrachter unsichtbar zur Ausbildung von Hohlstellen, an denen sich Teile des Malereiträgers in situ von der Wand ablösen. Nach Überschreiten eines kritischen Momentes fallen ganze Schollen komplett herab und gehen unwiederbringlich verloren. Insbesondere großflächige Ablösungen stellen dabei eine große Gefahr dar. Die frühzeitige Erkennung dieser Stellen kann helfen diese großen Verluste zu vermeiden.

Wandmalereien sind bildliche Darstellungen, die direkt mit dem Bauteil, das sie trägt, verbunden sind. Für die untersuchten mittelalterlichen Wandmalereien gilt ein genereller Aufbau, der sich in etwa wie folgt darstellt: Mauerwerk, Putz, Malschicht. Mittelalterliches Mauerwerk ist zumeist unregelmäßiges Bruchsteinmauerwerk mit entsprechend unregelmäßigem Fugenverlauf und unebener Oberfläche. Der Putz gleicht die Unebenheiten der Oberfläche zu Teil aus, ist daher unterschiedlich dick über die Fläche angetragen. Die Putzschicht besteht zumeist aus mehreren Lagen. Die oberste Lage ist dabei der Malgrund. Auf oder in diesem sind die Pigmente der Malerei an der Wand fixiert. Als Hohlstellen gelten demgemäß Bereiche, in denen die kontinuierliche Abfolge vom Mauerwerk bis zur Malschicht an einer Stelle durch eine Trennschicht gestört ist. Diese Trennlage ist mit Luft gefüllt. Die Lage der Trennschicht kann an irgendeiner Stelle in der Abfolge sein. Anders ausgedrückt bedeutet das, dass die Dicke des sich lösenden Schichtpaketes unterschiedlich sein kann. Ebenso bewegen sich die Schichtdicken der Trennlage zwischen wenigen Millimetern bis mehreren Zentimetern. Die Prozesse, die zur Ausbildung einer Trennlage und schließlich zum Verlust ganzer Flächen führen, sind häufig nicht im Detail nachzuvollziehen. Hier müssen Spannungsaufbauten aufgrund hygri-scher, thermischer oder/und salz – induzierter Prozesse in Betracht gezogen werden. Dabei ist weniger ein einzelnes mehr oder weniger intensives Ereignis schadverursachend, als viel mehr zyklische Wechsel, die über viele Monate und Jahre auftreten und wirken. Daher ist die Entwicklung von verborgenen Hohlstellen ein schleichender Prozess, der sich im Verlauf von Jahren und Jahrzehnten entwickelt. Für den Betrachter sind diese Entwicklungen unsichtbar bis sich der spontane Verlust offen zeigt. Vorher kommt es nur selten zur Ausbildung einer deutlichen Aufwölbung auf der Oberfläche. Aber auch diese muss wegen der unebenen Oberfläche nicht unbedingt als Hohlstelle erkennbar sein. Für den Restaurator sind die hohlen Stellen ausschließlich nachweisbar im Rahmen einer haptischen Untersuchung des Objektes durch eine Perkussions-Prob e. Mit den Fingern oder einem geeigneten Werkzeug wird vorsichtig gegen die Malerei geklopft. Der resultierende Ton erlaubt über den akustischen Eindruck eine grobe Abschätzung über die Anbindung der Malerei am Mauerwerk an dieser Stelle. Größere hohle Stellen lassen sich von kleineren unterscheiden. Das Ergebnis wird zeichnerisch in eine Dokumentation übertragen. Die Fläche muss dabei mehrfach angeklopft werden, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erreichen. Eine berührungslose Technik stellt daher eine höchst interessante Alternative zur Perkussionsuntersuchung dar. Ist eine hohl liegende Stelle an einer Wand entdeckt worden, besteht in der Regel die Aufgabe, sie zu verfüllen und diese Konservierungsmaßnahme anschließend auf ihren Erfolg hin zu überprüfen. Auch hierfür ist keine zerstörungsfreie Methode bekannt. Mit Hilfe von aktiver Infrarotthermographie soll berührungslos die Lage und Größe von Hohlstellen an mittelalterlichen Wandmalereien ermittelt und dokumentiert werden.

3 Stand des Wissens / Literaturlauswertung

Zu Beginn des Projektes wurde eine ausführliche Quellenrecherche und Literaturstudie zur Infrarot-Thermographie in der Denkmalpflege durchgeföhrt. Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Detektion und Untersuchung von Fehlstellen, Hohlstellen und Störungen an Wandmalereien gerichtet. Zur Auswertung wurden Veröffentlichungen der letzten 10 bis 15 Jahre herangezogen. Die Literaturrecherche wurde bezüglich dieser speziellen Thematik ausgerichtet. Zur Auffindung einer maximalen Anzahl an Literaturstellen erfolgte auch eine relativ allgemeine Ausrichtung der Suche zum Thema Infrarot-Thermographie in der Denkmalpflege. Literaturstellen zum Thema konnten fast vollständig als Papierkopie oder auch als elektronische Ressource beschafft werden. Zugängliche Literatur zu anderen Spezialisierungsbereichen wurde dabei ebenfalls ausgewertet.

Im vorliegenden Kapitel wird nach einem Einblick in die Infrarotthermographie zunächst eine Einführung zu Infrarot-thermographischen Untersuchungsmethoden im Bereich der Denkmalpflege gegeben. Danach erfolgt die Kurzbeschreibung der einzelnen veröffentlichten Projekte bzw. Anwendungsfälle bezüglich der speziellen Thematik stichwortartig in gegliederter Form. Untersuchungen zu weiteren Bereichen der Denkmalpflege werden kurz aufgelistet.

3.1 Abriss der Grundlagen

3.1.1 Allgemeines

Die Grundlagen der Infrarot-Thermographie sind der entsprechenden Fachliteratur ausreichend behandelt. An dieser Stelle soll nur in so weit in das Thema eingestiegen werden, wie es für das Verständnis der Untersuchungsmethode im Bericht notwendig ist. Für weitergehende Fragen muss auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden.

Die Verfahren der Infrarot-Strahlungstemperaturmessung, als welche die quantitative Infrarotthermographie auch bezeichnet wird, beruht auf dem physikalischen Phänomen, dass Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von 0,0 K (-273,15°C) elektromagnetische Strahlung aussenden. Bestimmt man deren Intensität, ist man in der Lage, daraus die Temperatur des aussendenden Körpers berührungslos zu ermitteln. Die Infrarotstrahlung ist jener Teil des elektromagnetischen Spektrums, der sich an der langwelligen Seite des sichtbaren Spektrums an das rote Licht bei einer Wellenlänge von ca. 760 nm anschließt und sich bis zu etwa 1 mm Wellenlänge erstreckt. Thermographiekameras arbeiten im so genannten „Thermischen Infrarot“, also neben dem seltener benutzten Bereich 3 - 5 µm im mittleren Infrarot üblicherweise bei 8 - 14 µm im fernen Infrarot. Auch die hier verwendete VARIOSCAN 3021 ST von InfraTec arbeitet zwischen 8 - 12 µm Wellenlänge. Detektiert wird ausschließlich die Oberflächentemperatur des untersuchten Festkörpers. Diese wird von der Kamera zweidimensional hochauflösend bestimmt und von einer Software in einen Farbcode übertragen. Dabei lassen sich in den Bildern die aufgenommenen Temperaturen in Grad Celsius (°C) oder in Kelvin (K) darstellen. In diesem Bericht werden beide Temperaturskalen parallel verwendet mit unterschiedlichen Ansätzen. Bei vielen Voruntersuchungen und Untersuchungen im Zusammenhang mit der Detektion von Hohlstellen in mittelalterlichen Wandmalereien ist die absolute Temperatur zum Messzeitpunkt nicht relevant. Aussagekräftig ist die Temperaturdifferenz zu einem definierten vorherigen Zustand. In der Software IRBIS-professional zur Auswertung von Infrarotaufnahmen ist man in der Lage solche Differenzbilder zu erzeugen. Diese werden im vorliegenden Bericht in Kelvin ausgewertet.

3.1.2 Einflussfaktoren der IR-Messungen

Der mit einer IR-Kamera gemessene Strahlungswert ist abhängig vom Emissionsgrad des realen Objektes und kann auf seinem Weg zur Kamera noch verändert werden (Abb. 1).

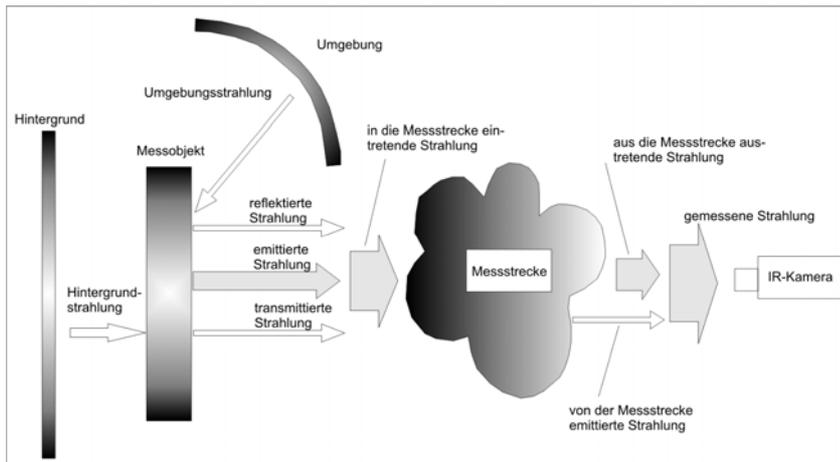


Abb. 1 Einflussfaktoren auf die gemessene Strahlung (aus InfraTec 2004¹)

Es sind zur Bestimmung der absoluten Oberflächentemperatur daher verschiedenen Parameter zu berücksichtigen. Reale Messobjekte werden mit dem strahlungsphysikalischen Modell des Schwarzen Strahlers in Bezug gesetzt. Die Stoffkennzahl Emissionsgrad ε kennzeichnet die spezifische Ausstrahlung des realen Gegenstandes im Verhältnis zu der des Schwarzen Strahlers:

$$\varepsilon(\lambda, T) = M_{\text{real}}(\Delta\lambda, T) / M_{\text{bb}}(\Delta\lambda, T)$$

mit ε - Emissionsgrad, der abhängig von λ - Wellenlänge und T - Temperatur ist, sowie einem M_{real} - realen Messobjekt relativ zu einem M_{bb} - black box - dem Schwarzen Strahler.

Der Schwarze Strahler hat einen Wert von $\varepsilon = 1$, den größtmöglichen Emissionsgrad, der zudem unabhängig von der Wellenlänge ist. Der Emissionsgrad realer Messobjekte hat eine Abhängigkeit vom Material und von der Wellenlänge, also dem Spektralbereich $\Delta\lambda$, in dem die spezifischen Abstrahlungen verglichen werden. Außerdem hängt der Wert realer Gegenstände von der Temperatur, der Oberflächenbeschaffenheit und der Abstrahlrichtung ab. Der Emissionsgrad ε ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung auszusenden. Der Absorptionsgrad α ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung aufzunehmen. Der Transmissionsgrad τ ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung durchzulassen. Der Reflexionsgrad ρ ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung zu reflektieren. Der spektrale Strahlungsfluss setzt sich aus der Summe der drei Anteile zusammen.

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Bei Körpern im thermischen Gleichgewicht ist der Absorptionsgrad gleich dem Emissionsgrad: $\alpha = \varepsilon$. Daraus ergibt sich

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Der Emissionsgrad ε drückt daher auch aus, wie hoch die Anteile sind, die für Transmission und für Reflektion berücksichtigt werden müssen. In Tab. 1 sind Emissionsgrade ausgewählter Materialien aus verschiedenen Tabellen aus der Literatur zusammengestellt.

Tab. 1 Emissionsgrade ausgewählter Materialien aus der Literatur

¹ InfraTec (2004) Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermographie, Skript zum Schulungskurs, 63 S.

Material	ϵ	Geltungsbereich		T °C
		λ_1 ... λ_2 μm		
Beton ²	0,92	8	14	20
Beton ³	0,92 ... 0,94	2	12	
Beton ⁵	0,95	8	14	
Gips ⁵	0,85 ... 0,95	8	14	
Glas ²	0,97	5	8	20
Glas ³	0,97	2	12	
Gold oxidiert ⁴	0,02 ... 0,07			
Gold poliert ⁴	0,03 ... 0,04			
Holz ²	0,96	8	14	20
Holz ³	0,8 ... 0,95	2	12	
Holz ⁵	0,8 ... 0,92	8	14	
Kalkstein ⁵	0,98	8	14	
Mattlack schwarz ²	0,98	4	9	20
Mauerwerk ⁴	0,85 ... 0,95	8	14	
Papier ²	0,97	6	20	20
Papiere (weiss, farbig) ³	0,7 ... 0,93	2	12	
Quarz ⁵	0,8	8	14	
Ruß ⁵	0,95	8	14	
Silber ⁵	0,02	8	14	
Verputz (rauh) ³	0,90 ... 0,96	2	12	
Ziegel ²	0,93	8	14	20
Zink weiß ²	0,95	4	9	20

Im Fall der Untersuchung von Wandmalereien im Innenraum können verschiedene Parameter, die die wie in Abb. 1 dargestellt die Messungen beeinflussen, unberücksichtigt bleiben. Aufgrund der geringen Distanz der Messanordnung in normaler Atmosphäre, in der die Infrarotstrahlung in großen Bereichen des infraroten Spektrums nahezu unbeeinflusst bleibt, sind Signalabschwächungen in der Messstrecke nicht zu erwarten. Aus der Umgebung in die Messstrecke eintretende Strahlung ist vernachlässigbar. Von einem normalen Wandquerschnitt ausgehend, auf dem die Wandmalereien lie-

² Schuster, N., Kolobrodov, V. (2004) Infrarotthermographie, Wiley-VCH Verlag, Berlin

³ K.-P. Möllmann, M. Vollmer, D. Karstädt, N. Lutz, F. Pinno Entwicklung und Anwendung von Methoden der Infrarotthermographie, <http://www.fh-brandenburg.de/~piweb/projekte/forschungsbericht/Forschungsbericht.htm>

⁴ <http://de.wikipedia.org/wiki/Emissionsgrad>

⁵ <http://infrapoint.com/neu/de/anwendungen/emissionsgrad.html>

gen, kann davon ausgegangen werden, keine Transmission zu messen. Nicht vernachlässigbar ist hingegen der Einfluss durch Reflektionsstrahlung, insbesondere unter Berücksichtigung des Einflusses der eingesetzten Heizstrahler. Daraus ergibt sich der in Abb. 2 dargestellte Fall. Der Einfluss der Reflektion der Heizstrahlerstrahlung auf das Messbild ist der bedeutendste Störfaktor, dessen Einflussgröße untersucht werden muss.

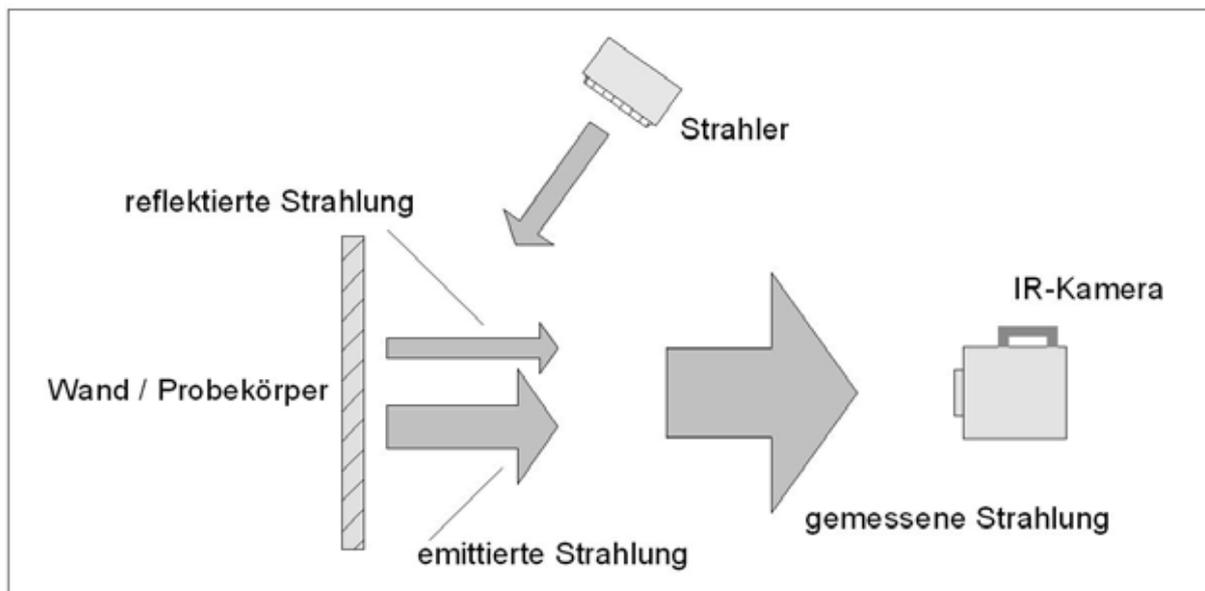


Abb. 2 Bei der aktiven Thermographie an Wandmalereien zu berücksichtigende Einflussfaktoren

Die theoretische Grundlage für die Durchführung der zerstörungsfreien Untersuchung von Hohlstellen an mittelalterlichen Wandmalereien mittels Infrarot-Thermographie bilden Überlegungen zur Wärmeleitung. Im stationären Grundfall steht ein Körper mit seiner Umgebung im Temperaturgleichgewicht. An seiner Oberfläche ist diese Temperatur gleichmäßig messbar.

Im stationären Fall steht die Oberflächentemperatur eines Körpers im Gleichgewicht mit seiner Umgebung. Der Körper selbst, seine Oberfläche und die umgebende Luft haben dieselbe Temperatur. Wird die Temperatur an einem Teil verändert, so kommt es in der Folge zum Temperatenausgleich bis wieder Gleichgewicht hergestellt ist. Dieser Ausgleichsprozess ist unter anderem abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Mediums. Unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten führen zu unterschiedlichen Oberflächentemperaturen solange kein Temperatenausgleich hergestellt ist. Wird an einer Oberfläche eines Objektes, das hohle Stellen enthält, eine Erhöhung der Temperatur indiziert, kommt es in der Folge zu unterschiedlichen Oberflächentemperaturen. Es kommt im Bereich von Hohlstellen zur stärkeren Aufheizung der Oberfläche im Vergleich zu der Umgebung. Das in der Hohlstelle vorliegende Luftkissen hat eine isolierende Wirkung. Die mit dem Untergrund fest verbundenen Stellen können die von der Oberfläche eingetragene Wärme schneller ableiten und so die Oberfläche kühl halten. In Tab. 2 sind die Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Stoffe aufgeführt. Es wird gut deutlich, wie sich die Wärmeleitfähigkeit von Luft mit $0,024 \text{ W}/(\text{mK})$ deutlich von der von Kalkzement-Putz mit $1 \text{ W}/(\text{mK})$ unterscheidet.

Tab. 2 Wärmeleitfähigkeiten unterschiedlicher Stoffe

Stoff	Wärmeleitfähigkeit [W / (m · K)]
-------	-------------------------------------

Kupfer	380
Stahl unlegiert	50
Granit	2,8
Beton	2,1
Glas	1
Kalkzement-Putz	1
Ziegelmauerwerk (Vollziegel)	0,5 - 1,4
Holz	0,13 - 0,18
Glaswolle	0,04 - 0,05
Luft	0,024

3.2 IR-Thermographie In der Denkmalpflege

Die Infrarot-Thermographie wird seit über 30 Jahren zur qualitativen und quantitativen Gebäudediagnostik eingesetzt.⁶ Insbesondere zur Untersuchung von Objekten aus dem Bereich der Denkmalpflege hat sie sich als auf Abstand arbeitende, hocheffiziente und vor allen zerstörungsfreie Untersuchungsmethode bewährt.

Infrarot-Thermographie wird mit den gleichen Prozeduren für moderne und hist. Bauwerke angewendet. Für historische Gebäude sind allerdings einige Unterschiede zu beachten. Zum einen liegen fast immer unbekannte Materialien und Kennwerte vor. Die thermischen und optischen Eigenschaften weisen Unregelmäßigkeiten wie z.B. die Dichte, Struktur, Anzahl der Schichten an den Wänden und heterogene Farben auf. Wegen der vorliegenden Strukturdicke sind einige Techniken thermischen zerstörungsfreien Prüfung von Industrieanwendungen hier nicht hilfreich. Als wichtigster Faktor sind aufgrund der Wertigkeit und Einmaligkeit der Objekte nur echte zerstörungsfreie bzw. wenig beeinflussende Untersuchungstechniken anzuwenden. Dies bedeutet eine strikte Limitierung der verwendeten Temperaturerhöhungen im Bereich der aktiven Thermographie. Eine Integration destruktiver Methoden ist nicht oder nur exemplarisch möglich.⁷

Das thermische Abrastern von Gebäuden ermöglicht Informationen zu Bautechnik und Elementen, deren Gestalt, Materialcharakteristik und Erhaltungszustand.⁸ Die Thermographie kann zur Kartierung von Feuchteverteilungen in der Oberfläche verwendet werden.⁹ Diese ist allerdings nur qualitativ und auf die Oberfläche begrenzt, eine einfache Korrelation zum Feuchtegehalt ist nicht möglich. In diesem Zusammenhang kann sie jedoch vorbereitend zur Verringerung der Beprobung eingesetzt werden, ohne die Glaubwürdigkeit der Tests zu beeinflussen.¹⁰

Zahlreiche physikalische Eigenschaften müssen bei infrarot-thermographischen Untersuchungen beachtet werden. Ein Verständnis der Geschichte der untersuchten Materialien und ein Basiswissen zur

⁶ Grinzato et.al. (2002), S. 21.

⁷ Grinzato (2001), S. 624.

⁸ Grinzato (2001), S. 624.

⁹ Zur infrarot-thermographischen Untersuchung bzw. Detektion von Feuchtigkeit in Baumaterialien (mit Theorie) z.B.: Ludwig et.al. (2004) und Grinzato (2001), S. 637-644.

¹⁰ Grinzato (2001), S. 546.

Gebäudestruktur ist zudem notwendig um die bestmöglichen Ergebnisse zu erhalten. Folgende Eigenschaften bzw. Charakteristiken beeinflussen die Messungen:¹¹

Thermische Eigenschaften: Leitfähigkeit, Diffusions-, Effusionsvermögen und die spezielle Wärmequelle.

Spektrale Eigenschaften: Emissionsvermögen, Absorption, Reflektion und Transmission

Andere Eigenschaften–Charakteristiken: Porosität, volumetrische Abmessungen und physiologischer Wassergehalt.

Variationen des Emissionskoeffizienten können z.B. durch unterschiedliche Oberflächenrauigkeit, Verschmutzungsgrad und ungleichmäßige Bemalung hervorgerufen werden.¹² Vorliegende Salzablagerungen verändern beispielsweise die Emission und die Reflektion. Die Emission wird hier allgemein verringert, was eine geringere Temperatur im Wärmebild verursacht, als eigentlich vorliegt. Ein unterschiedlicher Erhaltungszustand verändert stellenweise ebenfalls den Wärmefluss. Die Detektion von Feuchtigkeit mittels Infrarot-Thermographie in porösen Materialien ist von der Verdunstungsrate und den vorliegenden Salzgehalten abhängiger als von den Absorptionseigenschaften des Materials.¹³

Des Weiteren wird die Untersuchung durch Umfeld- und Aufnahmebedingungen wie dem Blickwinkel, der Temperaturspanne und -skala, der verwendeten Optik und Aufnahmezeit, sowie der Umgebungsbedingungen (Klima, Windbelastung etc.) beeinflusst, was eine Reproduktion der Ergebnisse erschwert.¹⁴ Thermische Eigenschaften, wie thermisches Diffusionsvermögen haben sich als guter Indikator für den Zerstörungsgrad von Materialien erwiesen.¹⁵

Da die Materialien und der Erhaltungszustand im Bereich der Denkmalpflege über den untersuchten Bereich meist variieren, ist z.B. bei der Detektion von Hohlstellen oft ein falscher Alarm möglich. Die digitale Verarbeitung der Rohthermogramme und eine Verwendung von Softwarefiltern, die auf optischer Analyse basieren sind effektive Hilfsmittel um solche ungewollte Informationen zu reduzieren¹⁶. Ein Vergleich zu Ergebnissen anderer Untersuchungsmethoden ist wünschenswert.

3.2.1 Passive Thermographie

Die passive Thermographie beruht auf der reinen Beobachtung der vorliegenden Oberflächentemperaturen im stationären Zustand. Sie wird auch als quasi-stationär bezeichnet und ist eher als qualitative Methode zu beurteilen. Wenn allerdings eine thermische Modellierung verfügbar, ist können einige Untersuchungen quantitative Messungen liefern, so dass gemessene Oberflächentemperaturen (Isothermen) mit spezifischen Verhalten oder Defekten unter der Oberfläche in Beziehung gebracht werden können.¹⁷

Notwendig zur Ortung von Anomalien ist ein vorliegender Temperaturgradient durch (natürliche) Umgebungsbedingungen. Die Interpretation der gewonnenen IR-Bilder ist meist schwierig, da zahlreiche, z.T. unbekannte Faktoren die Messungen beeinflussen. Der Zeitpunkt der Untersuchung muss abhängig von den Umgebungsbedingungen gewählt werden.

Einen großen Vorteil stellt die einfache Handhabung und leichte Untersuchung großer Oberflächen (größer 10 m²) dar.¹⁸ Bei großen Entfernungen beeinflusst jedoch auch die Absorption der IR-Strahlung durch die Atmosphäre die Messungen.¹⁹

¹¹ Avdelidis, Moropoulou (2004), S. 120, hier finden sich auch Formeln, die diese Einflüsse mit einbeziehen und thermo-physikalisch-optischen Eigenschaften verschiedenen Materialien.

¹² Carlomagno, Meola (2002), S. 561.

¹³ Ludwig et.al. (2004), S. 161.

¹⁴ Bison et.al. (1996/1), S. 59.

¹⁵ Grinzato et.al. (2002), S. 21.

¹⁶ Grinzato (2001), S. 624.

¹⁷ Maldague (2001), S. 1f, vgl. S.12 zur thermischen Modellierung.

¹⁸ Grinzato (2001), S. 645.

Als Anwendung im Bereich der Denkmalpflege sind vor allem das Auffinden von Wärmebrücken und Wasserschäden in der Gebäude-Thermographie, Analysieren der eigentlichen Wärme-Verteilung auf der Oberfläche beim Einsatz von Heizanlagen (z.B. auf Wandmalereien)²⁰ und die Darstellung von strukturellen Veränderungen innerhalb einer Mauer zu nennen.

3.2.2 Techniken der Aktiven Thermographie

Zur aktiven Thermographie (auch "transient thermography") ist es notwendig, Energie in das untersuchte Objekt einzubringen um bedeutende Temperaturdifferenzen zu erhalten, welche das Vorhandensein von Anomalien unter der Oberfläche zeigen. Diese Temperaturdifferenzen werden infrarot-thermographisch aufgezeichnet und ausgewertet. Eine Datenanalyse ermöglicht das Herauslösen quantitativer Informationen über das untersuchte Objekt.

Die Geschwindigkeit, in welcher die Wärmefront einer Stimulierung zerstreut wird, hängt von verschiedenen thermischen Materialeigenschaften wie Dichte, Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit, Struktur und unter der Oberfläche befindlichen Störstellen ab.

Vorteile gegenüber passiven Verfahren:

Meist ist nur eine relativ dünne Schicht auf der Untersuchungsseite des Objektes von Interesse und wird auch nur durch die eingebrachte Energie beeinträchtigt. Auf diese Weise beeinflusst die komplexe dahinterliegende (meist dicke) Struktur die Messung nur unbedeutend.

Im Gegensatz zu stationären Methoden, bei denen über die gesamte Wand ein Temperaturgradient vorliegen muss, muss für eine aktive Methode nur eine dünne oberflächennahe Schicht erwärmt werden.

Einziger Vorteil nach Grinzato (2001), S. 645, ist die reduzierte Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen. Zudem kann die aktive Untersuchung auch bei vorhandenen (nicht entfernbaren) Wärmequellen angewendet werden, weil die Untersuchung auf Temperaturveränderungen basiert. Im Gegensatz dazu arbeitet die passive Thermographie mit dem stationären Zustand.

Transiente Thermographie ist sensibler als traditionelle passive Verfahren, weil die Messungen zum optimalen Zeitpunkt durchgeführt werden.²¹

Nachteile:

Es kann hier im Gegensatz zur passiven Thermographie nur eine kleine Fläche gleichmäßig erwärmt und somit untersucht werden. Große Bereiche werden deshalb normalerweise über Mosaik getestet (meist ca. 0,5 x 1 m² je Fläche)²².

Eine effektive Strahlung benötigt eine starke Energieversorgung (über 3 kW).²³ Die Quelle muss nah in die Oberfläche gebracht werden, was z.T. teure Gerüste erfordert.

In den meisten Fällen muss der Temperaturanstieg wegen der Empfindlichkeit des Objektes sehr gering gehalten werden (wenige °C). Die Erwärmung mehrerer Schichtenlagen ist fast nie möglich. Die Richtung des Wärmestroms sollte eindimensional sein, Unregelmäßigkeiten der Oberfläche verändern die Verbreitung der Wärme innerhalb der Struktur jedoch.

Ein erhöhter Zeitaufwand ist für die Analyse der Bilderfolgen notwendig. Bei der Datenverarbeitung muss von einer Bilderfolge die Information jedes einzelnen Bildpunktes verarbeitet werden.

Im folgenden werden die einzelnen, in der thermischen zerstörungsfreien Prüfung eingesetzten Verfahren kurz vorgestellt.

3.2.2.1 Impuls-Thermographie (IT):

Pulsed Thermography (PT)

¹⁹ Maldague (2001), S. 5.

²⁰ Rosina et.al. (2004) (Einleitung)

²¹ Grinzato et.al. (1998/2), S. 348

²² Grinzato et.al. (1998/2), S. 348.

²³ Grinzato (2001), S. 645.

Die Impuls-Thermographie ist die am häufigsten angewendete thermische Stimulationsmethode in der thermischen zerstörungsfreien Prüfung. Ein Grund dafür ist die Schnelligkeit der Untersuchung. Hierfür wird ein kurzer thermischer Stimulationsimpuls verwendet, welcher bei Objekten mit geringer Wärmeleitfähigkeit wenige Sekunden andauert.

Das Grundprinzip beinhaltet ein kurzes Aufwärmen des Objektes und das anschließende Aufnehmen des Temperaturabfalls mittels Infrarot-Thermographie. Die Temperatur des Materials verändert sich nach dem anfänglichen thermischen Impulse sehr schnell über Diffusion unter der Oberfläche und aufgrund von Strahlung und konvektivem Verlust. Unter der Oberfläche vorhandene Defekte verändern die Diffusionsrate. Dadurch wird hier bei der Beobachtung der Oberflächentemperatur ein Unterschied zu umgebenden Bereichen sichtbar, sobald die thermische Front den Defekt erreicht hat. Für die Detektionstiefe sind allerdings Grenzen gesetzt.²⁴

Es kann in Transmission oder Reflektion gearbeitet werden, wobei die Transmission im Baudenkmalpflegebereich aufgrund der vorliegenden Strukturdicken und erschwelter Zugänglichkeit meist schlecht möglich ist. Das Interesse liegt meist in der Struktur oder Feuchtigkeit im oberflächennahen Bereich, sodass die Anwendung der Reflektionsmethode sinnvoll ist.

Anomalien werden sichtbar, wenn diese die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und/oder die Dichte beeinflussen.

Die aufgenommene Quellsequenz sollte immer folgende Bilder enthalten:

Vorhergehendes Bild bei Umgebungstemperatur

Bild der maximalen Temperatur, aufgenommen am Ende der Erwärmung

Bild, aufgenommen am besten Beobachtungszeitpunkt, wenn verdeckte Defekte einer Klasse am besten sichtbar sind.

Das Verfahren ist von den örtlichen Varietäten des Emissionskoeffizienten und der ungleichen Erwärmung betroffen. Die Sichtbarkeit der Defekte wird dadurch überlagert.²⁵

Aktivierung / Stimulierung

Um einen kurzen Impuls auf das Objekt zu übertragen, kann dieser entweder als Oberflächenbeladungen oder tiefer in das Material eingebracht werden. Typische Quellen zur Oberflächenerwärmung sind Blitz-, Quarz- oder Karbonlampen, Puls laser oder Warmluftgebläse.²⁶ Eine Abkühlung kann mit dem Einsatz von Kaltluftgebläse erreicht werden.²⁷ Im Bereich der Denkmalpflege ist die sonst mögliche Verwendung von Warm- oder Kaltwasserströmen auszuschließen. Andere Beladungen arbeiten spezifischer, wie Mikrowelle auf Wassermoleküle oder Ultraschall, welcher höhere Temperaturen in Bereichen mit Reibung verursacht (vgl. 3.2.2.4, S.15). Die Sonderform der selektiven Erwärmung von Wassermolekülen mit Mikrowellenstrahlung wurde schon versuchsweise zur Untersuchung von Wandmalerei eingesetzt.²⁸ Als Nachteil kann die komplexere Handhabung der Wärmequelle gesehen werden.²⁹

Der Energiemenge sind Grenzen gesetzt: diese muss hoch genug sein, um das thermische Signal deutlich vom Rauschen abzusetzen und gering genug, um sensible Bestandteile nicht zu beschädigen.³⁰ Dabei sind insbesondere stark absorbierende Flächen wie dunkle Farbigekeit zu beachten.

²⁴ Maldague (2001), S. 2f.

²⁵ Carlomagno, Meola (2002), S. 559.

²⁶ Meinschmidt, Broschke (2001), S. 136.

²⁷ Carlomagno, Meola (2002), S. 560.

²⁸ Schwarz (1990)

²⁹ Grinzato (2001), S. 646.

³⁰ Grinzato et.al. (1998/2), S. 348; Die Schätzung der Erwärmungszeit kann in Abhängigkeit von der Diffusivität und der anzunehmenden Defekttiefenlage nach der in der thermischen zerstörungsfreien Prüfung klassischen Formel, siehe Bison et.al. (1996/2), S. 1895.

Die Nutzung der Sonnenstrahlung ist möglich und attraktiv. Die Durchführung der Untersuchung muss dafür aber vollständig verändert werden. So ist z. B. eine Aufnahme im mehrminütigen Abständen über einen ganzen Tag möglich. Die Wetterverhältnisse, wie Windstärke und -richtung, Außentemperatur und Sonnenstrahlung auf die betreffende Wand müssen einige Tage zuvor und während des Tests gemessen werden. Es müssen dabei auch Aufnahmen im sichtbaren Bereich gemacht werden.³¹

Bei Verwendung einer konvektiven Wärmequelle kann man Probleme durch unterschiedliches Absorptionsverhalten bei bemalten Flächen umgehen. Gegen ungleichmäßige Erwärmung kann eine lineare Bewegung der Quelle eingesetzt werden (sog. „lateral heating“)³². Bei einer bewegten Wärmequelle ist es irrelevant, ob die Wärmequelle oder das zu prüfende Objekt bewegt wird.³³

Mit langen Erwärmungszeiten wird ein hohes Temperatursignal über dem Defekt erreicht. Der maximale Kontrast (DTT s.u.) variiert nicht stark bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten. Eine längere Erwärmung ist für tieferliegende Defekte empfohlen, um ein ausreichendes Temperatursignal in diesen Regionen sicherzustellen. Kurze Erwärmungszeiten verbessern jedoch die Effizienz der verwendeten Wärmequelle. Dieser Aspekt wird bei großflächigen Untersuchungen mit vielen Einzeluntersuchungsbereichen aufgrund der reduzierten Untersuchungszeit wichtig.³⁴

Quantitative Methoden

Algorithmen zur Charakterisierung von Diskontinuitäten liefern Abschätzungen zur Defekttiefe, Defektgröße und dessen thermischen Widerstand. Zahlreiche Algorithmen sind in der Literatur zu finden.³⁵ Die meisten dieser Algorithmen untersuchen die Entwicklung der Oberflächentemperaturverteilung, besonders im Bereich von unter der Oberfläche befindlichen Unregelmäßigkeiten.³⁶

Dazu gehört auch die vom CNR vorwiegend zur Untersuchung von Putzablösungen verwendete thermische Tomographie.

Thermische Tomographie: Dynamic Thermal Thermography (DTT)

Durch den in der thermischen Tomographie verwendeten Algorithmus sollen Defekte nach der Tiefenlage des einzelnen Defekts sortiert und eventuell die Dicke des Defekts über eine Kalibrierungsfunktion bestimmt werden. Diese Methode wurde bereits in den 80er Jahren vorgeschlagen.³⁷

Der absolute oder relative thermische Kontrast wird für jeden Punkt der Oberfläche über die Zeit verfolgt. Der absolute thermische Kontrast stellt die Differenz zwischen der an der interessierenden Position gemessenen Temperatur und der Temperatur an einer unbeschädigten, als Referenz gewählten Zone dar. Der relative thermische Kontrast entspricht dem absoluten thermischen Kontrast, der an einer Referenztemperatur normalisiert wird. Die Normalisierung erfolgt an einem Bild, welches keine Einflüsse durch Defekte aufweist. Typischerweise wird das Bild nach Ende der Erwärmungsphase verwendet.³⁸ Es kann auch die maximale Temperatur die jeder Punkt erreicht zur Normalisierung verwendet.³⁹ Dadurch können Effekte wie eine unterschiedliche Erwärmung herausgefiltert werden.⁴⁰

Das Auftreten eines Maximums des relativen Kontrastes in der zeitlichen Entwicklung zeigt das Vorhandensein eines Defektes, wobei die Position und die Amplitude des Maximums dessen Tiefenlage angibt.

³¹ Grinzato et.al. (1998/2), S. 349, Bison et.al. (1996/1), S. 60ff, Grinzato (2001), S. 629.

³² Carlomagno, Meola (2002), S. 559 Verweis auf Grinzato et.al.

³³ Bison et.al. (1996/2), S. 1898.

³⁴ Grinzato et.al. (1994/2), S. 268f.

³⁵ Grinzato et.al. (2002), S. 24.

³⁶ Vavilov et.al. (2001), S. 452.

³⁷ nach Grinzato et.al. (1994/1), S. 358

³⁸ Vavilov et.al. (2001), S. 457, beinhaltet auch eine Formel zur Auswahl des entsprechenden Bildes.

³⁹ Formelbezüge z.B. bei Grinzato, Marinetti (1994), S. 119. Bison et.al. (1998), S. 1770

⁴⁰ Grinzato et.al. (1998/2), S. 348f

Die Normalisierung des Kontrastes verringert die im praktischen Experiment immer vorliegenden Effekte einer ungleichmäßigen Erwärmung.⁴¹ Ein Defekt produziert eine Kontrastkurve mit einem Maximumwert, welcher zu einem bestimmten Zeitpunkt auftaucht. Dieser Zeitpunkt ist von der Tiefenlage des Defektes abhängig. Die thermischen Eigenschaften der Schichten sollten bekannt sein.⁴² Individuelle Inversionsfunktionen für das entsprechende Material ermöglichen es, den Maximumszeitpunkt mit der Defekttiefe in Beziehung zu bringen.⁴³

Nach der Aufnahme von thermogr. Sequenzen wird wie folgt vorgegangen:⁴⁴

Auswahl des Referenzpunktes

Normalisieren des thermischen Kontrastes über die Zeit, berechnet für jedes Pixel

Optional können die Kontrastprofile auch Tiefpass gefiltert werden

Das Maximum des thermischen Kontrastes jedes Bildpunktes und der Zeitpunkt seines Auftretens wird in zwei neuen Bildern ausgegeben: Maxigram (oder auch das Minigram⁴⁵) und Timegram, diejenigen Pixel mit höherem Kontrast als eine definierte Schranke (Bsp.: 5%-Grenzwert zur Vernachlässigung eines Großteils des Rauschens/Hintergrunds⁴⁶) werden dargestellt

Thermisches Tomogramm (zweiteilige Bilder) werden generiert, angezeigt mit Zeitfenster oder alternativ wird die Tiefe farbcodiert oder numerisch angegeben.

Die thermische Tomographie ermöglicht die Reduzierung des Einflusses unterschiedlicher Absorptionsverhalten, was das Hauptproblem der Bildanalyse darstellt. Die Normalisierung reduziert die Einflüsse ungleichmäßiger Erwärmung und von Oberflächenunregelmäßigkeiten. Es handelt sich jedoch um eine eindimensionale Korrektur, sodass kurzzeitige Wärmediffusion, die während des thermischen Prozesses auftaucht, nicht mit einbezogen wird.⁴⁷ Der Einsatz eines 3-dimensionalen Filters ist hier erfolgreicher (s.u.).

Optimierung der Untersuchungsparameter: Modellierung

Für diese Untersuchungsmethoden im Bereich der Denkmalpflege liegt noch nicht sehr viel Erfahrung vor. Aus diesem Grunde ist ein mathematisches Model der Temperaturentwicklung sehr wichtig, um die richtigen Testparameter festzulegen. Die Detektion eines bestimmten Objektes oder Fehlers in einer Struktur kann nur aufgrund der Anwendung der falschen Untersuchungsparameter fehlschlagen. Darum ist eine Modellbildung des jeweiligen thermischen Problems ratsam, um den Testverlauf zu entwickeln. Zum Beispiel ermöglicht die Software ThermoHeat 3D die Simulation des Temperaturmusters bei bestimmten Bedingungen als Funktion in Zeit und Raum.⁴⁸ Durch die Ergebnisse werden die anzunehmenden Parameter der Untersuchung dargestellt und die besten Untersuchungsbedingungen, wie z.B. die erforderliche Erwärmung können ausgewählt werden. Aufgrund der Schwierigkeit einer gleichmäßigen Erwärmung, besonders bei größeren Objektstärken wie bei der Untersuchung von Mauerwerksstrukturen, ist dies besonders relevant.⁴⁹

Untersuchungen zum Rauschen

⁴¹ Dies ist nicht in allen Fällen ausreichend, wie ein Versuch gezeigt hat. An scharfen Grenzen unterschiedlicher Farben entsteht ein Maximum auch in Bereichen ohne Ablösungen. (Bison et.al. (1998), S. 1772.

⁴² Grinzato et.al. (1998/2), S. 348f.

⁴³ Bison et.al. (1998), S. 1770.

⁴⁴ Nach Grinzato et.al. (1998/2), S. 348f

⁴⁵ Bison et.al. (1996/1), S. 60.

⁴⁶ Freskountersuchung in Colleoni's Schloß, Malpaga, Bergamo: Grinzato et.al. (1998/2), S. 357.

⁴⁷ Grinzato et.al. (2000/1)

⁴⁸ Grinzato et.al. (2002), S. 23.

⁴⁹ Ludwig, Rosina (1998), S. 367.

Zur Abschätzung der vorliegenden Genauigkeit kann z.B. ein neues Bild eingeführt werden, welches für jedes Pixel das Signal-zu-Rauschen Verhältnis definiert.⁵⁰ Weitere Hilfsmittel sind das Neumann-Pearson Kriterium⁵¹ und der Rausch-Kontrast.⁵²

Dreidimensionales Filtern

Die meisten verfügbaren Inversionsalgorithmen sind eindimensional und beziehen deshalb keine 3-dimensionale Wärmediffusion mit ein.

Die bei der thermischen Tomographie verwendete Normalisierung verwendet nur ein Bild (typisch ist die maximale Temperatur). Im Anwendungsfall ist das Wärmemuster sehr gut am Ende der Erwärmung sichtbar, es verändert sich aber durch die 3D Wärmediffusion. Dies wird bei der gängigen Normalisierung nicht mit beachtet.⁵³

Innerhalb eines 3-dimensionalen Wärmeleitmodells kann die Erwärmung mit einer Q Maske durchgeführt werden, welche das optische Phänomen ungleichmäßiger Erwärmung und Absorption simulieren kann. Eine Q-Maske repräsentiert die Wärmeenergiedichte jedes Bildpunktes. Jedes IR-Bild der experimentellen Sequenzen kann als Q-Maske dienen, jedoch sollten nur solche Bilder verwendet werden die keine Unregelmäßigkeiten (Defekte) anzeigen, z.B. eines der ersten Sequenzbilder.⁵⁴

Das 3-dimensionale Wärmediffusionsphänomen kann durch eine Verarbeitung der Bildsequenz mit einem 3-dimensionalen Filter reduziert werden. Dieses Filtern beinhaltet die Normalisierung jedes aufeinanderfolgenden, experimentell gewonnenen Bildes durch das dazugehörige künstliche Bild, welches für denselben Zeitpunkt berechnet wurde. Der 3-D-Filter repräsentiert eine reziproke Bildsequenz, die für einen unbeschädigten Probekörper berechnet wurde. Dabei erfolgte die Annahme, dass die Erwärmung mit der vom Experiment abgenommenen Q-Maske durchgeführt wurde.⁵⁵

Dieser 3-dimensionale Filter wurde bereits erfolgreich an Dummies von Wandmalereien zur sicheren Detektion von Hohlstellen angewendet.⁵⁶

3.2.2.2 Lock-In Thermographie (LT)⁵⁷

(auch modulated thermography (MT)⁵⁸)

Bei der Lock-In-Thermographie erfolgt die Erwärmung der Oberfläche des Prüfobjektes periodisch mit thermische Wellen anstatt von Impulsen wie bei der Impuls-Thermographie, z.B. über eine mit sinusförmiger Licht-Anregung. Die resultierende schwingende Temperatur wird dabei über eine IR-Kamera aufgenommen. Es ist dafür notwendig, die genaue Zeitabhängigkeit der Output-Signale und der Referenz-Input-Signale, also der periodischen Erwärmung festzuhalten. Das wird über einen z.B. über einen Computer realisiert, sodass Phasen- und Größen-Bilder verfügbar werden.⁵⁹

Die Untersuchungstiefe hängt von der Phasendauer der Welle (je langsamer die Welle, desto tiefer die Penetration) und von den Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte ab. Die Amplitude ist unempfindlich gegenüber Umfeldreflektionen, die Phase ist zudem unempfindlich gegenüber lokalen Energiedichten oder Emissionskoeffizienten. Deshalb ist hier die Beachtung der Phasenbilder sinnvoll⁶⁰, welche eine direkte Anzeige der Größe, Tiefe und des thermi-

⁵⁰ Z.B. Grinzato et.al. (1995/1), S. 171, Grinzato et.al. (2000/1); Standardformel für Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei Vavilov et.al. (2001) S. 458.

⁵¹ Formel (6) bei Grinzato et.al. (1995/1), S. 171.

⁵² Grinzato et.al. (1994/2).

⁵³ Grinzato et.al. (2000/1)

⁵⁴ Vavilov et.al. (2001), S. 456.

⁵⁵ Vavilov et.al. (2001), S. 457.

⁵⁶ Vavilov et.al. (2001), Grinzato et.al. (2000/1).

⁵⁷ Die Angaben stammen aus Carlomagno, Meola (2002) (soweit keine anderen Angaben gemacht sind), hier finden sich auch Literaturangaben zum grundlegenden Konzept der LT.

⁵⁸ Nach Carlomagno, Meola (2002), S. 559.

⁵⁹ Nach Maldague (2001), S. 3.

⁶⁰ Carlomagno, Meola (2002), S. 563, mit zugehöriger Formel (3).

schen Widerstand der vorliegenden Diskontinuitäten ergeben - ohne vorhergehende aufwendige Verarbeitungsprozesse, wie sie in der Impuls-Thermographie notwendig sind.

Aufgrund der Unempfindlichkeit gegenüber ungleichmäßiger Erwärmung und lokalen Unregelmäßigkeiten des Emissionskoeffizienten ist die Lock-In-Thermographie attraktiv zur Untersuchung von historischen Kunstgegenständen. Es ist ohne gefährdende Temperaturerhöhungen möglich, neben allgemeinen Defekten, wie Ablösungen und Risse feine Unterschiede zwischen Malschichten, Putz und/oder Ergänzungen (z.B. auch die unterschiedliche Zusammensetzung von Mosaiksteinchen) zu registrieren. Die Haupteinschränkung dieser Technik liegt in den verfügbaren Frequenzen für die Wärmeflussmodulation, welche nicht klein genug für die Detektion tieferliegender Defekte sind.

Erwähnungen bezüglich der Anwendung im Bereich der Denkmalpflege sind nur bei nur bei Carlomagno, Meola (2002) und Grinzato (2004)⁶¹ zu finden.

3.2.2.3 Impuls-Phasen-Thermographie (PPT)

Die neuere Technik der Impuls-Phasen-Thermographie kombiniert die Vorteile von Impuls-Thermographie und Lock-In-Thermographie ohne deren Nachteile zu haben.

Der Probekörper wird wie in der Impuls-Thermographie mit einem Impuls erwärmt. Bei der Impuls-Phasen-Thermographie wird eine Einzelfrequenz an einem bestimmten Zeitpunkt im stationären Bereich getestet (im Gegensatz zur Impuls-Thermographie, bei der viele Frequenzen gleichzeitig beim Abkühlungsvorgang getestet werden). Es werden Bildsequenzen aufgenommen und für jeden Bildpunkt wird der Temperaturverfall von den Bildsequenzen entnommen. Eine Fourier Transformation wird ausgeführt und die Phase wird für jede Frequenz berechnet.⁶² Phasen- oder Größenbild können wie in der Lock-In-Thermographie dargestellt werden. Auf diese Art können tiefer liegende Defekte mit geringerem Einfluss von oberflächigen infraroten und optischen Eigenschaften untersucht werden können.⁶³ Beispielsweise ist das Emissionsvermögen von Malerei und im speziellen von Vergoldung hier weniger ein Problem als bei Anwendung der thermischen Tomographie, was auch auf die Lock-In-Thermographie zutrifft.⁶⁴ Die Einschränkung dieser Untersuchungsmethode liegt hauptsächlich im notwendigen Temperaturanstieg, der nicht so gering gehalten werden kann wie in der Lock-In-Thermographie. Ein gewisser Temperaturunterschied muss zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz vorliegen. Für die Untersuchung in größeren Tiefenlagen ist zudem eine starke Erwärmung der Oberfläche notwendig. Die Technik ist somit sehr gut an gegenüber Temperaturanstiegen unempfindlichen Objekten anwendbar. Zur Untersuchung von wertvollen Kunstgegenständen, die bei stärkeren Temperaturerhöhungen beschädigt werden könnten, ist die Impuls-Phasen-Thermographie deshalb nicht allgemein zu empfehlen.⁶⁵

Die Impuls-Phasen-Thermographie findet in der vorliegenden Literatur für die Fragestellung der Ablösung von Putzen im Bereich der Denkmalpflege an Dummies bei Carlomagno, Meola (2002) Verwendung. Eine Erwähnung der Technik erfolgt bei Grinzato (2004) auf S. 4f. Dort wird gezeigt, dass die Verwendung eines Algorithmus der Impuls-Phasen-Thermographie zur Verarbeitung der transienten Bilderfolge bei der Untersuchung von Putzablösungen weniger anfällig auf unregelmäßige Erwärmung der Oberfläche ist als jene der thermischen Tomographie.

⁶¹ Grinzato (2004), S. 4: Verwendung eines Algorithmus von LT zur Verarbeitung der transienten Bilderfolge bei Untersuchung von Putzablösungen (kein Beispiel).

⁶² Carlomagno, Meola (2002), S. 564, mit Formel zur Berechnung.

⁶³ Carlomagno, Meola (2002), S. 559, mit Literaturverweis zur detaillierten Beschreibung des Prinzips.

⁶⁴ Grinzato (2004), S. 7, am Beispiel einer Ikonenmalerei

⁶⁵ Carlomagno, Meola (2002), S. 564f.

3.2.2.4 Vibrothermographie und Induktionsthermographie

Durch Induktion wird im Bereich der Bauthermographie eine selektive Erwärmung von Bewehrungsseisen erreicht. Anwendungen der so genannten Induktionsthermographie sind im Bereich der Denkmalpflege noch nicht bekannt.

Entsprechend bewirkt bei der Vibrothermographie mechanische Vibration eine Erwärmung durch Reibung besonders in Bereichen wo Defekte, wie Risse und Ablösungen lokalisiert sind. Auch zu dieser Methode sind bislang keine Anwendungen im Denkmalpflegebereich bekannt.

3.3 Arbeitsgruppen / Projekte IR-Thermographie in der Denkmalpflege

Veröffentlichungen zur Infrarot-Thermographie in der Denkmalpflege liegen fast ausschließlich von Seite der Forschung im Bereich der thermischen zerstörungsfreien Prüfung vor. Hier haben sich einige Arbeitsgruppen intensiv mit diesem speziellen Anwendungsgebiet befasst. Dabei kam es auch zu länder- und fachübergreifender Zusammenarbeit unterschiedlicher Experten.

Die Hauptzahl der Veröffentlichungen zur Hohlstellenuntersuchung stammen von einer Arbeitsgruppe, die fast ausschließlich aus Mitarbeitern des Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italien besteht. Diese hat sich seit 1994⁶⁶ intensiv mit der thermischen Tomographie, der gezielten Bildverarbeitung zur Detektion von Hohlstellen in Wandmalereien beschäftigt (vgl. 3.3.1, S. 15ff).

Weitere Veröffentlichungen liegen vermehrt aus dem italienischen Raum vor. Aus Deutschland konnten nur Berichte zu einzelnen Projekten bezüglich des Themas Hohlstellendetektion mit IR-Thermographie gefunden werden. Diese stammen vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung in Braunschweig (vgl. 3.3.2, S. 24ff) oder, vermutlich aus der Praxis heraus, von verschiedenen Institutionen der Diagnostik meist in Zusammenarbeit bzw. auf Initiative von Restauratoren. Veröffentlichungen zur IR-thermographischen zerstörungsfreien Prüfung an Gebäuden sind auch aus Deutschland zahlreich vorhanden, vorwiegend von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin. Diese wurden aufgrund der fehlenden Anwendung im Bereich der Denkmalpflege nicht in die Recherche aufgenommen. Jedoch sind die dort gewonnenen Erkenntnisse sicherlich auch für Untersuchungen am historischen Gebäude hilfreich. Dies gilt insbesondere für vermehrt in den Denkmalschutzbereich aufgenommene Bauwerke des 20. Jh.

Eine weitere Arbeitsgruppe aus Griechenland hat sich mit verschiedenen Fragestellungen zur Anwendung der IR-Thermographie in der Baudenkmalpflege beschäftigt. In diesem Zusammenhang erfolgt nur eine kurze Erwähnung zur Hohlstellendetektion.

Im Folgenden sind die verwendeten und in Kopie vorliegenden Literaturstellen nach Arbeitsgruppen bzw. dem jeweiligen Projekt zusammengestellt. Für die Untersuchung von Hohlstellen erfolgte eine detaillierte Auflistung der einzelnen Projektparameter, wie die verwendete Technik, einzelne Untersuchungen und Ergebnisse. Weitere Fragestellungen aus dem Bereich der Denkmalpflege sind nur kurz mit dem jeweiligen Literaturverweis aufgezählt.

3.3.1 CNR, ITEF - Arbeitsgruppe um E. Grinzato

Arbeitsgruppen

CNR, Italien: „Dynamic Thermal Tomography“ und „Crawling Spot Technik“ - Arbeitsgruppe um E. Grinzato

In der folgenden Tabelle sind die Namen der jeweiligen Autoren der Veröffentlichungen bezüglich der Detektion von Hohlstellen mit Anzahl der Autoren- bzw. Mitautorenschaft angegeben.

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
----------	---------	-------------	---------

⁶⁶ Vavilov et.al. (2001), S. 452.

E. Grinzato	17	CNR-ITEF	ermanno@itef.pd.cnr.it
P.G. Bison	12	Corso Stati Uniti, 4	Tel: +39 49 8295722
S. Marinetti	9	35127 Padova, Italien	Fax: +39 49 8295728
C. Bressan	5		Paolo.bison@itef.pd.cnr.it
S. Dal Toè	1		Fax: +39 49 8295 728
V. Vavilov	7	Tomsk Polytechnic University Savinykh, 3 634028 Tomsk, Russland	
A. Mazzoldi	4	CNR-ISDGM San Polo 35127 30125 Venezia, Italien	
A. Braggiotti	3	CNR-LADSEB Corso Stati Uniti, 4 35127 Padova, Italien	
T. Kauppinen	1	VTT Building Technology P.O. Box 18021 90571 Oulu, Finnland	
D. Burleigh	1	Consultant 2845 Arcola, San Diego, CA 92117	
C. Bonacina	1	Dip. Fisica, Università di Padova Via Venezia 1-35131 Padua, Italien	
G. Schirripa Spagnolo	1	Dipartimento di Ingegneria Elettronica	
G. Guattari	1	Università di Roma Tre, Italien	
D. Paoletti	1	Dipartimento di Energetica	
D. Ambrosini	1	Università dell'Aquila, Italien	

Projekte

3.3.1.1 Qualitative thermische zerstörungsfreie Prüfung

Ziele

Entwicklung einer praktikablen Detektierungsmethode von Putzhohlstellen in einer Tiefe von bis zu 30mm und eines Verarbeitungsalgorithmus, welcher die Einflüsse von Malerei auf der Oberfläche auf die Temperaturentwicklung reduziert und die Zuverlässigkeit der Detektion erhöht.

Untersuchung der Anwendbarkeit von Sonnenstrahlung als Erwärmungsquelle.⁶⁷

⁶⁷ Bison et.al. (1996/1)

Zerstörungsfreie Untersuchung des Feuchtigkeitsgehalt in Kunstgegenständen wie Fresken oder Wände von denkmalgeschützten Gebäuden.⁶⁸

Systematiken

Zeitweise Erwärmung der Oberfläche und Beobachtung der Temperaturentwicklung während Erwärmungs- und Abkühlungsprozess mittels IR-Kamera. Weitere Datenverarbeitung:
Untersuchung eines IR Bildes zum besten Beobachtungszeitpunkt.

Analyse zum Rauschen

Signal-zu-Rauschen Verhältnis⁶⁹, Neumann-Pearson Kriterium⁷⁰, Rausch-Kontrast⁷¹

Numerische Simulation / thermisches Modell⁷²

Numerische Simulation des Temperaturprofils und dessen zeitliche Entwicklung während des Erwärmungs- und Abkühlungsprozesses zur Vorplanung der Tests und zur Simulation der Effekte unterschiedlicher Grenzsituationen.

Bei bewegter linearer Energiequelle: Zur Wahl der Quellengeschwindigkeit, Voraussagen der zeitlichen Verzögerung in der Untersuchung und zur Kontrolle des maximalen Temperaturanstieges der empfindlichen Oberfläche.⁷³

Temperaturmuster für eine Ablösung vorausgesagt über ein Finite Elemente 2D numerisches Model, Ausführung des Modells in Matlab™-Umgebung.⁷⁴

Quantitative Verarbeitung

Auswertung des thermischen Kontrastes über die Zeit: thermische Tomographie (DTT)

Phasenkarte mit Auswertung aus der Impuls-Phasen-Thermographie⁷⁵

Dreidimensionales Filtern:⁷⁶

Zur Reduktion thermischer und optischer Phänomene, welche sich auf die Untersuchung von Fresken beziehen. Bezieht ungleichmäßige Erwärmung und kurzzeitige dreidimensionale Wärmediffusion mit ein, so werden die Effekte oberflächige Störfaktoren verringert.

Datenverarbeitung und Bildrekonstruktion bei bewegtem Probekörper⁷⁷

System

Meßsystem:

AGEMA-900 LW IR-Kamera (8-14 µm, 15 12-bit Bilder pro sec., 272x136 Pixel)⁷⁸

Agema 782 LW thermographische Ausrüstung (verbunden mit Framegrabber, Bildsequenzen im Format 336x270 Pixel gespeichert)⁷⁹

Inframetrics 760 Breitband-System (mit dazugehörigem Framegrabber, Bildsequenzen im Format 256x256 Pixel gespeichert).⁸⁰

Wärmeimpuls / -quelle:

⁶⁸ Grinzato, Marinetti (1994), reine Beschreibungen der Datenverarbeitung.

⁶⁹ Grinzato et.al. (1994/2), Grinzato et.al. (1995/1), Grinzato et.al. (2000/1).

⁷⁰ Formel (6) bei Grinzato et.al. (1995/1), S. 171.

⁷¹ Grinzato et.al. (1994/2).

⁷² Grinzato et.al. (1994/1), Grinzato et.al. (1994/2), Bison et.al. (1996/1), Grinzato et.al. (1998/1), Grinzato et.al. (1998/2), Schirripa Spagnolo et.al. (2000)

⁷³ Grinzato et.al. (1998/1), S. 65.

⁷⁴ Grinzato et.al. (1998/1), S. 65.

⁷⁵ Kurz: Grinzato (2004), S. 4f.

⁷⁶ Vavilov et.al. (2001), Grinzato et.al. (2000/1)

⁷⁷ Bison et.al. (1998), S. 1774.

⁷⁸ Grinzato et.al. (1994/1), S. 360, Grinzato et.al. (1994/2), S. 259, Grinzato et.al. (1996/1), S. 61, Grinzato et.al. (1998/1), S. 65, Bison et.al. (1998), S. 1774.

⁷⁹ Grinzato et.al. (1996/1), S. 61.

⁸⁰ Grinzato et.al. (1996/1), S. 62.

- 4 Lampen (Halogenlampen) à 1,5 kW, Empfehlung: 30 - 300s mit Energiedichte 1200 bis 450 W/m³ (auf Probewand für 120s bzw. 180 s); die Objekttemperatur übersteigt, die der Umgebung dann um weniger als 10 K für ein paar Sekunden.
- Typische Erwärmung zur Untersuchung von Putzablösungen: IR-Lampen, 2000 W/m², für 60-300s.⁸¹
- Bsp. Fogolino Fresko: 4 Quartzlampen, 150 sec., 5K Erwärmung, Bildaufnahme alle 10 sec. für 900 sec.⁸²
- Sonnenstrahlung: Messung alle 5 bzw. 10 Minuten (von morgens bis abends)⁸³ oder Monitoring nach Ende der Bestrahlung (Sonnenuntergang)⁸⁴
- Lineare Lampe (3000 W, 700 mm Länge) mit 30 mm Abstand, 400V-Versorgung wurde auf 220V reduziert, um Strahlung in Richtung IR zu verschieben und dadurch Unterschiede in der Absorption zu verringern. Auf motorisierten Schienen mit Inverter kontrolliert.⁸⁵
- Reihe von 16 IR-Röhren⁸⁶
- Lineare kurzzeitige Warmluft erwärmung (LATH: Linear air lateral heating⁸⁷):
Konvektive Wärme wird in linearer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit über die Wand geführt (soll gleichmäßige Erwärmung erreichen, ohne Beeinflussungen wie bei Einzelbereichsmessungen (Mosaik).
2 axiale Ventilatoren und ein elektrischer Widerstand mit einer Maximalleistung von 2 kW (Luftgeschwindigkeit und Wärmefluss sind regelbar).
- Allgemeine Empfehlung für Aufnahme rate: Aufnahme eines Thermogramms alle 10-15 s über 10-15 bzw. 10-20 min. Aufnahme sollte vor der Erwärmung beginnen und über den gesamten thermischen Prozess verlaufen.⁸⁸

Datenverarbeitung:

Übermitteln der Daten auf eine Sun Sparc Station zur weiteren Datenverarbeitung

AGEMA-900 Zubehör, weiterführende Datenverarbeitungsschritte entwickelt am CNR-ITEF, mathematische Analysen mit der Software „Mathematica“⁸⁹ bzw. mit kommerzieller Software „OptiLab“ (Graphtek, Frankreich)⁹⁰

Modellbildung von Temperatur-Zeit-Kurven mit dem Programm ThermoCalc-2D der Tomsk Polytechnischen Universität Russland (Finiten-Differenzen-Methode zur Lösung von 2-dimensionalen Wärmeleitungsproblemen für einen scheibenförmigen, dreilagigen Probekörper mit scheibenförmiger Unregelmäßigkeit aus)⁹¹

Simulation der 3-dimensionalen Temperaturentwicklung mit dem Programm ThermoCalc-3D der Tomsk Polytechnischen Universität Russland⁹².

Voruntersuchungen an Probekörpern

Probekörper:

Von Restauratorenarbeitsgruppen angefertigte verputzte Hohlziegel und Ziegelmauer aus alten Ziegeln mit und ohne Bemalung in freskaler Technik ((Streifen aus Gelbem Ocker, Grüner Erde, Bleiweiß

⁸¹ Grinzato (2004), S. 4.

⁸² Vavilov et.al. (2001), S. 453.

⁸³ Grinzato et.al. (1996/1), Grinzato et.al. (1998/2), S. 351ff.

⁸⁴ Grinzato et.al. (1998/2), S. 361ff.

⁸⁵ Grinzato et.al. (1998/1), S. 65f.

⁸⁶ Schirripa Spagnolo et.al. (2000)

⁸⁷ Bison et.al. (1998), S. 1772ff.

⁸⁸ Grinzato (2001), S. 627ff, Grinzato et.al. (2002), S. 24.

⁸⁹ Grinzato et.al. (1995/1), S. 171.

⁹⁰ Grinzato et.al. (1994/2), S. 260.

⁹¹ Vavilov et.al. (2001), S. 454.

⁹² Vavilov et.al. (2001), S. 456.

(?), Rote Erde und ohne Farbauftrag),⁹³ sowie figürliche Bemalung.⁹⁴ Putzstärken variieren von 15 bis 30 mm.

Angaben zur Herstellung künstlicher Hohlstellen:

Zwischen Putz und Ziegel eingeputzte Holzstreifen, die im weiteren Herstellungsablauf wieder entfernt wurden,⁹⁵ eingebaute Schaumstoffstreifen⁹⁶ oder Schwämme⁹⁷

Die Probekörper wurden gealtert (z.B. einjährige Lagerung⁹⁸).

Untersuchung mit künstlicher stationärer oder bewegter linearer Lichtquelle⁹⁹, Sonnenstrahlung¹⁰⁰ und konvektiver Wärme¹⁰¹.

Untersuchungen an Objekten

Fassade des „Palazzo della Ragione“ in Mailand:¹⁰²

„Broletto“ (Stadtpalast) 1228 erbaut, Erweiterungen 1771, Restaurierung 1982.

Oberer Gebäudebereich, Südfassade, Verputzes auf Ziegelmauer (Vollziegel), z.T. mit Farbresten, 3 verschiedene Mörteltypen. Ablösungen, Bindemittelverluste und Verluste des Verputzes; Putznagelung im Rahmen von Konservierungsarbeiten.

Durch die Thermogramme erster Untersuchungen der Universität Mailand (1993-1995, bei zusätzlicher Messung der aktuellen Wettersituation) ließen sich aufgrund von einschränkenden Faktoren keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Temperaturveränderungen und den mit Perkussion detektierten Ablösungen feststellen. Es hat sich gezeigt, dass es ohne ein konkretes Modell und eine Zeitanalyse nicht möglich ist Temperaturunterschiede Defekten, Gebäudestruktur oder optischen Faktoren zuzuordnen. Im Oktober 1995 erfolgte eine weitere Testserie mit zusätzlichen Laborexperimenten an einer Stellwand mit bekannten Hohlstellen in unterschiedlichen Tiefenlagen.

Die ersten thermographische Messungen erfolgten zu vers. Jahres- und Tageszeiten. Eingemessene Referenzmarken (thermisch reflektierend)¹⁰³ ermöglichten die Entzerrung und Zusammenfügung zum Mosaik der einzelnen Thermogramme (Software: Archis, Galileo).

Messung im Oktober 1995 für DTT erfolgte alle 5 Minuten von 10:00-17:00.

Durchgeführte Analysen:

DTT (Dynamisch thermische Tomographie), noch keine Bestimmung der tatsächlichen Tiefenlage der Defekte.

Probleme:

unbekannte physikalische Eigenschaften der Oberfläche, trotz einheitlichen Materials (Dichte, Porosität, optische Eigenschaften) aufgrund des unterschiedlichen Schädigungsgrades, des Zerfalls und

⁹³ Grinzato et.al. (1994/1), S. 360.

⁹⁴ Grinzato et.al. (1994/1), 360f, Grinzato et.al. (1994/2), S. 272ff.

⁹⁵ Grinzato et.al. (1994/1), S. 360, Grinzato et.al. (1995/1), S. 171, Bison et.al. (1998), S. 1771.

⁹⁶ Grinzato et.al. (19982), S. 351.

⁹⁷ Grinzato et.al. (2000/1)

⁹⁸ Bison et.al. (1998), S. 1771, Grinzato et.aal. (1994/2), S. 258.

⁹⁹ Grinzato et.al. (1998/1)

¹⁰⁰ Sonnenstrahlung bei Bison et.al. (1996/1)

¹⁰¹ Bison et.al. (1998)

¹⁰² Bison et.al. (1996/1), kurzer Bericht auch Grinzato (2001), S. 628-629.

¹⁰³ zu den Marken werden keine genaueren Angaben gemacht: Bison et.al. (1996/1), S. 57.

wegen Eingriffen zur Instandhaltung in bestimmten Zonen. Materialien vor allem unter der Oberfläche sind kaum bekannt.

Dennoch konnten einige der abgelösten und gut erhaltenen Bereiche detektiert werden. Numerische Simulation sind sehr hilfreich zur Voraussage des besten Beobachtungszeitpunktes und (noch wichtiger) des Minimalen Zeitintervalls um einen bestimmten Defekt zuverlässig zu detektieren.

„Palazzo della Ragione“ in Padua.¹⁰⁴

Halle, Fresken der Renaissance, über 1000 m² bis zu einer Höhe von 10 m.

Untersuchung mit bewegter linearer Lichtquelle und Anwendung eines modifizierten DTT-Algorithmus¹⁰⁵.

In dem untersuchten Bereich (4 m²) wurden beide vorliegende Risse und eine große Ablösung gefunden. Probleme durch Auftreten von vertikalen Streifen-Artefakten bei der Bildverarbeitung.

„Colleoni's Castle of Malpaga“, Bergamo.¹⁰⁶

Fogolino's Raum, 1. OG, grauer Rahmen des Freskos, sowie restauriertes Fresko von Romanino. Weitere Untersuchungsfläche: Außenwandfresko, 1. OG.

Untersuchungen März 1997

Innenraum:

Monitoring des Haftungsgrades und vorhergehender Restaurierungsmaßnahmen

Gesamtuntersuchungsfläche von 4 m² des Freskos wurde in 9 Arbeitsbereiche (0,9m x 0,5m) unterteilt.

Verminderung des Einflusses der unterschiedlich starken Absorption durch statistische Verarbeitung des Tomogramms¹⁰⁷, sodass eine Übereinstimmung mit Perkussionsuntersuchungen erreicht wurden.

Einsatz des dreidimensionalen Filters: Verringerung der durch dreidimensionalen Wärmefluss an Farbflächengrenzen entstehenden Artefakte.¹⁰⁸

Außenraum:

Vereinfachung der Untersuchungsmethode zur Verringerung der Testzeit. Aufwärmung durch Sonnenstrahlung. Die Fläche wurde nach Sonnenuntergang aufgenommen und die Abkühlungsraten bestimmt. Der Koeffizient der Abkühlungsrate jedes Punktes wird in einem verarbeiteten thermischen Bild wiedergegeben. Es kommt bei dieser Art der Untersuchung durch die langanhaltende Erwärmungsphase zu Überlagerungen mit Signalen verdeckter Strukturen (hier zugemauertes Fenster, unregelmäßige Baumaterialien).

Giotto Fresken der Scrovegni Kapelle, Padua, Italien:¹⁰⁹

¹⁰⁴ Grinzato et.al. (1998/1), S. 66.

¹⁰⁵ Grinzato et.al. (1998/1), S. 66: zu dieser Modifikation werden hier keine genaueren Angaben gemacht, Verweis auf weitere Literatur.

¹⁰⁶ Grinzato et.al. (1998/2), S. 354ff, Vavilov et.al. (2001), Kurzbeispiel bei Grinzato (2001), S. 635f, Grinzato (2004), S. 4f.

¹⁰⁷ Grinzato et.al. (1998/2), S. 357, keine genauere Angaben zu diesem Verfahren.

¹⁰⁸ Vavilov et.al. (2001), S. 458ff.

¹⁰⁹ Grinzato et.al (2002/2), S. 167, kurze Erwähnung.

Untersuchung von Putzablösungen des Freskos mittels Testmethode und Auswertung der quantitativen Analyse. Des weiteren wurden Simulationen zu den Luftströmungen und Untersuchungen zum Mikroklima durchgeführt.

Vergleichende Untersuchungen

an Probekörpern mittels Ultraschall und Endoskopie durchgeführt ergaben gute Übereinstimmung.¹¹⁰ Synchrone Kontaktmessungen der Oberflächentemperatur des Objektes mit einem Thermopaar oder Platin-Widerstandssensor ist möglich.¹¹¹

Vergleiche zu Voruntersuchungen mit Perkussion.

Holographische Interferometrische Techniken¹¹² führt zu gleich guten Ergebnissen.

Ergebnisse

Hohlstellen mit einer Dicke 1-10mm und Ausmaß von mind. 50mm konnten bis zu einer Tiefe von ca. 30mm detektiert werden. An unbemalten Probekörpern: Unterschiede zwischen theoretischen und gemessenen Werten geringer als 15%, mit DDT ermitteltes Defektvolumen 14,9 cm³ gegenüber nach der Zerstörung vorgefundener 17 cm³: Gesamtgenauigkeit von ca. 12%, was für die Praxis als vernünftig angesehen werden kann. Es scheint sich hierbei um einen systematischen Fehler handeln, der vermutlich durch eine Unterschätzung der Energieabsorption entsteht.¹¹³

durch DTT erhaltene Tomogramme zeigen gut Ablösungen von 1-10 mm Dicke zwischen Putzschichten, wenn die Oberfläche des Freskos weitestgehend einheitlich ist.¹¹⁴

3-dimensionale numerische Modellbildung zeigte, dass Defekte wie Ablösungen unter der Oberfläche von Fresken bis zu Tiefenlagen von 10 bis 15 mm detektierbar sind.¹¹⁵

3-dimensionale Wärmediffusionsphänomene (kronenförmige Bereiche um tatsächliche Defekte) können mit der vorgestellten 3-D-Filtertechnik reduziert werden.¹¹⁶ Signal-zu-Rauschen-Verhältnis wurde dabei um mehr als das doppelte verbessert.¹¹⁷ Hauptnachteil des 3D Filters sind die ziemlich langen Rechenzeiten, was durch die wachsende Leistungsfähigkeit der Computer überwunden werden könnte.¹¹⁸

Klare Unterschiede zwischen abgelöstem Bereich und verlorenem Verputz.¹¹⁹

Möglichkeit durch thermische Untersuchung Harzhinterfüllungen der letzten Restaurierung zu detektieren (höheren Wärmekapazität der Hinterfüllungen).¹²⁰

Gängiger Nachteil der TNDT Techniken: unfähig überlagerte Defekte (vers. Tiefenlagen) vollständig zu trennen.¹²¹

Einflüsse:

Hauptquellen für Rauschen sind ungleichmäßige Erwärmung und scharfe Veränderungen der optischen Eigenschaften des Objektes. Deren Einfluss auf die Temperatur ist anders als normalerweise angenommen. Als Informationsparameter muss deshalb die Analyse der zeitlichen Entwicklung des Signal-zu-Rauschen Verhältnisses durchgeführt werden.¹²²

Malerei verändert die absorbierte Energie gewaltig. Während der Aufwärmphase zeigt sich ein klares Bild der Malerei, dass aufgrund von 3-dimensionaler Wärmediffusion nach der Erwärmung un-

¹¹⁰ Grinzato et.al. (1994/1), S. 361.

¹¹¹ Grinzato et.al. (1994/1), S. 360, Grinzato et.al. (1995/1), S. 171.

¹¹² Grinzato et.al. (2000/1), Schirripa Spagnolo et.al. (2000)

¹¹³ Grinzato et.al. (1994/1), S. 361, Grinzato et.al. (1994/2), S. 270f.

¹¹⁴ Grinzato et.al. (2000/1).

¹¹⁵ Vavilov et.al. (2001), S. 459.

¹¹⁶ Vavilov et.al. (2001), S. 460.

¹¹⁷ Grinzato et.al. (2000/1)

¹¹⁸ Grinzato et.al. (2000/1)

¹¹⁹ Bison et.al. (1996/1), S. 63.

¹²⁰ Grinzato et.al. (1998/2), S. 357: "resin injected in the voids during the previous restoration". Vermutlich sind Festigungsmaßnahmen mit Kunstharz gemeint.

¹²¹ Grinzato (2000)

¹²² Grinzato et.al. (1995/1), S. 173.

scharf wird. Dieser Effekt wird durch eine fast konstante Emission der Malerei im Spektralbereich von 8-14µm gesteigert. Rauschen von absoluter Temperatur und Kontrast werden beide verstärkt.¹²³

Hauptproblem des unterschiedlichen Absorptionsverhalten verschiedener Farben kann durch DDT reduziert werden.¹²⁴ Die Normalisierung des Kontrastes bekämpft dieses Problem effektiv, wenn Referenzpunkt und analysierter Bereich zu annähernd homogenen Bereichen (nicht unbedingt der selben Farbe) gehören. An scharfen Grenzbereichen zwischen unterschiedlichen Farben kommt es zu Fehlalarm in den Maxigramms durch den Wärmefluß parallel zur Oberfläche.¹²⁵

Systematische Störung durch die Erwärmung des vorhergehend getesteten Bereich. Stark sichtbar in den unbearbeiteten und verarbeiteten Bildern.¹²⁶ Überlappungsbereiche

Verbesserung bei konvektiver Erwärmung (bewegte Wärmequelle, kontinuierliche Datenaufnahme ohne Mosaik).¹²⁷

Bei Untersuchung im Sonnenlicht:

gemessene IR-Strahlung ergibt sich aus emittierter und reflektierter Strahlung. Beide werden durch die Umgebung beeinflusst (andere Gebäude etc.). Zudem wird abhängig von Beschattungen nicht unbedingt in allen Bereichen die gleiche Sonnenstrahlung absorbiert. Die Windbelastung kann auch variieren.¹²⁸

3.3.1.2 Crawling Spot Technik

Ziele

Detektion vertikaler Risse und Hohlstellen¹²⁹ in porösen Baustoffen. Entwicklung eines hochsensiblen, preiswerten Systems für Insitu-Untersuchung basierend auf einem IR-Pyrometer und Glühbirnen- oder Laser-Erwärmung bzw. System aus IR-Kamera und bewegter Wärmequelle

Systematik

Punktuelle Erwärmung und Aufnahmen der zeitlichen Wärmeentwicklung des jew. Punktes über IR-Kamera

System

Meßsystem:

IR-Kamera: AGEMA M4 Thermovision-782 System (oder 900); Beobachtung des gesamten Systems über S/W TV Kamera; PC; Details zu IR-Kamera, Datenübertragung, PC, mit dazugehörigen Karten und SW-Kamera bei Bison et.al. (1996/2), S. 1898.

Computergestützte Kontrolle des Flecks (Position, Geschwindigkeit, Weg, Timing der An/Ausschaltung) und der Datenverwaltung (Bildspeicherrate, Nummerierung). Software zur Verarbeitung und Darstellung der IR-Bilder in zwei Koordinatensystemen (eines bezogen auf das Objekt und eines auf das Aufnahmesystem); Details zu den Software-Komponenten bei Bison et.al. (1996/2), S. 1898.

Wärmeimpuls / -quelle:

Mini-spot heater (Infrared Research, Inc. Heater, Model 4141 enthält die luftgekoppelte Nah-IR Lampe mit elyptischem 6x9mm Spot bei einer Entfernung von 38 mm (Fokusleistung 1.4 W/mm²) Spotdurchmesser auf 2mm verkleinert) und motorisiertes XY-Tablett¹³⁰

Voruntersuchungen an Probekörpern

Verputzte Hohlziegel mit Ablösung und Riss, der durch den Putz auch im abgelösten Bereich verlief.

¹²³ Grinzato et.al. (1994/2), S. 272f.

¹²⁴ Grinzato et.al. (1994/1), S. 361.

¹²⁵ Grinzato et.al. (1998/2), S. 354, Schirripa Spagnolo et.al. (2000)

¹²⁶ Grinzato et.al. (1998/2), S. 357.

¹²⁷ Bison et.al. (1998)

¹²⁸ Bison et.al. (1996/1), S. 59.

¹²⁹ Bison et.al. (1995), bei Bison et.al. (1996/2) werden nur Risse untersucht

¹³⁰ Bison et.al. (1996/2), Bison et.al. (1995)

künstlich hergestellter Riss: enge Verbindung zweier gut polierter Marmorplatten

kompakte Steinprobe mit einem 1mm breiten Riss von der Oberfläche bis 13mm unter der gegenüberliegenden Oberfläche. Hier wurde zunächst nur eine Linie abgefahren und diese Linie aus jedem Thermogramm extrahiert (wegen Datenmenge).

Untersuchungen an Objekten

keine

Vergleichende Untersuchungen

Ergebnisse der Untersuchung von Putzablösungen wurden mit "Dynamic Thermography" (1D Erwärmung) verglichen. Die jeweiligen thermischen Kontrastprofile zeigten eine gute Übereinstimmung.

Ergebnisse

Detektion von Ablösungen sowie oberflächigen und unter der Oberfläche befindlichen Rissen ist bis zu einer Tiefe von ca. 3mm möglich. Der experimentelle Aufbau wurde hinsichtlich einer Unterdrückung von Rauschen und Entwicklung eines In-situ-Systems verbessert. Schritt in Richtung einer zerstörungsfreien Untersuchung von dreidimensionalen Objekten.¹³¹

Einflüsse:

Synchronisierung zwischen IR-Kamera-Frequenz, Bildspeicherung und Digitalisierungszeit sowie Objektgeschwindigkeit verursachte als schweres und nicht vollständig gelöstes Problem zusätzliches Rauschen.

3.3.1.3 weitere Untersuchungen

Eine Reihe von Veröffentlichungen behandeln noch andere mit Infrarot-Thermographie untersuchte Fragestellungen im Bereich der Denkmalpflege bzw. von Kunst- und Kulturgut:

Eigenschaften von Oberflächenbeschichtungen wie z.B. Absorptionseigenschaften und Porosität¹³² (Objektbeispiel: Farbveränderungen der Fassade von San Omobono, Cremona, Italien).

Auffinden metallischer Verankerungen/Armierungen, z.B. Metallverankerungen einer Marmorverkleidung, Santa Maria in Cantuello, Ricengo, Italien und einer Terracotta-Rahmung einer 19. Jh. Fassade.¹³³

Aktive Thermographie zum Auffinden und Untersuchen (Tiefenverlauf) von Rissen¹³⁴, Bsp.: Untersuchung des Gewölbes der Kirche Santa Maria in Cantuello, Ricengo, Italien, des Triumphbogens der Kirche Santa Magherita, Cremona, Italien und eines Freskos in der Halle des Palazzo della Ragione, Padua, Italien (vgl. S.20).

Passive und aktive Thermographie zur Untersuchung verdeckter Strukturen (Unregelmäßigkeiten im Mauerwerk, verschlossene Öffnungen, Mauerwerksverbindung, horizontale Strukturen); zahlreiche Beispiele¹³⁵.

Untersuchung von Feuchtigkeitsverteilung und Feuchtegehalt; zahlreiche Beispiele¹³⁶

Oberflächentemperaturmessung mit IR-Thermographie (halb-automatische Generierung der kompletten Temperaturverteilung einer Wandoberflächen), Bsp.: historisches Arsenal, Venedig, Italien.¹³⁷

Messen der thermischen Eigenschaften von Baumaterialien, Bsp.: Ziegelprobe des historischen Arsensals, Venedig, Italien.¹³⁸

¹³¹ Bison et.al. (1995); Bison et.al. (1996/2).

¹³² Grinzato (2001), S. 625f.

¹³³ Grinzato (2001), S. 629f.

¹³⁴ Grinzato (2001), S. 630f.

¹³⁵ Grinzato (2001), S. 631-637, Grinzato et.al. (2002), S. 22f, Grinzato (2004), S. 3f.

¹³⁶ Grinzato (2001), S. 637-644, Grinzato et.al. (2002), S. 25-27, jeweils mit theoretischer Einführung, Grinzato (2004), S. 2f.

¹³⁷ Grinzato et.al. (2002), S. 21f.

¹³⁸ Grinzato et.al. (2002), S. 27-29.

Untersuchung der physikalischen und elastischen Eigenschaften von Baumaterialien, insb. Mauersteine mit US-Geschwindigkeitsmessungen und aktive IR-Thermographie, z.B.: Kirche Santa Chiara, Cagliari, Italien.¹³⁹

IR-Thermographie für die Simulation von Luftbewegungen, Bsp.: Camera degli Sposi, Mantua, Italien¹⁴⁰ und Scrovegni Kapelle, Padua¹⁴¹

Untersuchung beweglichen Kunst- und Kulturguts, z.B.: Ikonenmalerei, griechische Keramik, Bronze-
statuen.¹⁴²

3.3.2 Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
P. Meinschmidt	2	Fraunhofer-Institut für Holzforschung	Tel.: 0531-2155-449
L. Mehlkorn	1	Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) Bienroder Weg 54E 38108 Braunschweig	Fax: 0531-351587 Email: mei@wki.fhg.de
A. Schwarz Beratung/Mitarbeit: Herr. Oberring L. Mehlkorn Herr Schulze (BMFT)	1	Fraunhofer-Institut für Holzforschung Braunschweig	
K. Broschke	1	Freiberufliche Restaurator	
T. Bothe K.-D. Hinsch	1	Fachbereich Physik, AG Angewandte Optik Carl von Ossietzky Universität Olden- burg	Tel.: 0441-798-3510 Fax.: 0441-798-3201 Email: hinsch@uwa.physik.uni- oldenburg.de

Projekte

3.3.2.1 Teilprojekt des Verbundprojektes „Wandmalereischäden“¹⁴³

Ziel

Entwicklung bzw. Weiterentwicklung einer Meßmethode zur berührungslosen, zerstörungsfreien Materialfeuchteverteilungen auf malereitragenden Mauerwerksoberflächen

Spez. Fragestellung:

best. Feuchteverteilungen innerhalb Malschichten bzw. Malereiträger und deren Korrelation zu spez. Schadensphänomenen; Beurteilung der Schadensaktivität über Bestimmung der aktuellen Feuchteverteilung

Systematik

¹³⁹ Grinzato et.al. (2004), Grinzato (2004), S. 5f.

¹⁴⁰ Grinzato (2004), S. 6.

¹⁴¹ Grinzato et.al (2002/2)

¹⁴² Grinzato (2004), S. 7.

¹⁴³ Schwarz (1990)

Bestrahlung über kurzzeitigen Wärmeimpuls bzw. Mikrowelle; "instationäre" Temperaturverteilung der Fläche wird thermographisch aufgenommen (Dichte- und Feuchteverteilung oberflächennaher Schichten wird qualitativ sichtbar)

System

Meßsystem:

Zeiss Ikothem, hochauflösendes Wärmebildsystem mit radiometrischer Messung der Absoluttemperatur; Detektor: HgCdTe; Wellenlängenbereich 7-12 µm, Temperaturauflösung ≤ 0,3 K bei 30 °C, Temperaturgenauigkeit 0,3 K bei 25-40 °C; angeschlossener Pc und weiterer RGB-Monitor zur Darstellung aufbereiteter Bilder

Wärmeimpuls / -quelle:

IR-Strahler: ca. 1 kW; ca. 20 sec., ca. 40 cm Abstand (Erwärmung bis zu 5K, max. Tiefe in Messung 5mm)

Hochfrequenzstrahler: Frequenzbereich 2450 ± 50 Hz, Anschlußleistung ca. 650 W, ca. 8 Minuten

Voruntersuchungen an Probekörpern

unbemalte Mörtelschicht auf Ziegelmauerwerk (rel. intakte Verbindung): Mauerwerksgrenzen bzw. Fugen als Grauwertdifferenzen in Thermographien erkennbar: Mörtelfugen nach IR-Bestrahlung kälter, nach Mikrowellenbestrahlung wärmer als Ziegelbereiche; vgl. zu nachfolgenden gravimetrischen Feuchtemessung, Bereiche mit erhöhtem Wassergehalt der Mörtelschicht (0,5 M%) bei Mikrowellenbestrahlung gut sichtbar (wärmer)

Untersuchungen an Objekten

Erste Orientierende Untersuchungen: Ev.-ref. Kirche in Krummhörn-Eilsum, Ldkr. Aurich (Ausmalung um 1240): Untersuchungsbereich mit Retuschen und transparenten Einlagerungen; Alte Kirche in Wunstorf-Idensen, Ldkr. Hannover (Ausmalung um 1130)

Vergleichende Untersuchungen

Eichung - quantitative Aussagen:

über zusätzliche gravimetrische Feuchtemessung an Wandbereichen mit vergleichbaren Randbedingungen (ohne Malerei) macht halbquantitative Feuchtemessung möglich

Ergebnisse

Retuschebereich wurde sichtbar (Temperaturerhöhung, verm. infolge veränderter Dichte bzw. Sorption gegenüber Originalsubstanz); Dichtedifferenzen des Ausbesserungsputzes (im Randbereich aufgrund Arbeitsvorgang) gut sichtbar

Einflussfaktoren:

Hohlstellen bei IR-Bestrahlung, bei Mikrowellenbestrahlung nicht erkennbar; Farbunterschiede: erhöhte Strahlungsabsorption der Farbe oder geringfügig niedrigere Feuchte (verm. bedingt durch unterschiedliche Sorption der Farbschichten)

3.3.2.2 Untersuchung der Verfallsmechanismen von Oberflächen an historischen Monumenten¹⁴⁴

Ziel

Kombination zweier auf Abstand arbeitender Untersuchungsmethoden für Verfallsmechanismen von Stein und Verputzoberflächen an historischen Monumenten (Thermographie und ESPI)

Systematik

Impuls-Thermographie

System

Meßsystem:

Amber Radiance, 256 x 256 Pixel, focal plane array (FPA), 3-5 µm, Auflösung 0,025 K

Wärmeimpuls / -quelle:

¹⁴⁴ Meinlschmidt et.al. (1998)

4 Karbonlampen, Erwärmung der Oberfläche um ca. 10 °C

Voruntersuchungen an Probekörpern

Von Restauratoren hergestellte Repliken mittelalterlicher Wände nach der Sigwartkirche in Idensen (Niedersachsen) und der Dorfkirche von Axien (Sachsen-Anhalt).

Ca. 0,3 x 0,3 x 0,3 m³ aus Sandstein und vulkanischem Kalkstein (Idensen) bzw. aus mittelalterlichen Ziegeln (Axien); Traditionelle Mörtel, Pigmente und Arbeitstechniken.

Sandsteinobjekt: 0,5 cm dicker Putz (Intonaco), einfarbig freskal bemalt mit Ockerpigment.

Kalksteinobjekt: Teilweise mit 2cm starkem Putz bedeckt (2 Tagwerke), jeweils 2x 1cm aufgetragen mit vers. Farben (Ocker, Veneda, vermillion, CuCl-Grün) in Fresko; unterer Bereich ohne Verputz, ein Teil mit 1cm dickem Verputz. Dieser nach der Alterung (s.u.) zum Teil zerstört und mit historischen bzw. modernen Materialien (Mörteln, Pigmente) gekittet und retuschiert.

Künstliche Alterung (ca. 38 Tage in bei 3% CO₂, 65% relative Luftfeuchte, 25 °C)

Fixiert in 2-seitige Klimakammer mit künstlichen Außen- und Innenklimaschwankungen.

Untersuchungen an Objekten

keine

Vergleichende Untersuchungen

Kombinierte Untersuchung mit Elektronik Speckle Pattern Interferometry (ESPI)

Ergebnisse

Erkennbar:

Mörtelfugen, Putzablösung, Arbeitsgrenzen (Tagwerke) (verm. wegen unterschiedl. Mörtelmischung und veränderte Haftung wegen versch. Feuchtigkeit des Untergrundes), unterschiedl. Restaurierungsmaterialien

3.3.2.3 Impuls-Thermographie an Wandvertäfelung des Intarsienkabinetts im Potsdamer Neuen Palais¹⁴⁵

Ziel

Anlage zur gleichmäßigen Erwärmung mobiler Objekte (Online – Messung)

Fragestellungen hier:

Rissverläufe, Hohlstellendetektion, Textur des furnierten Trägermaterial

Systematik

Impuls-Thermographie, Interpretation der Bilder in Zusammenarbeit mit Restauratoren

System

Meßsystem: Ohne detaillierte Angaben

Wärmeimpuls / -quelle:

IR-Strahler, wenige Millisekunden, Temperaturerhöhung der Oberfläche ca. 1°C

Online-Messung:

Förderband bis 40 m/min mit darrüberliegender linearer Wärmequelle und Thermographie-Kamera, Breite des Untersuchungsmaterials aktuell bis 60 cm.

Voruntersuchungen an Probekörpern

keine

Untersuchungen an Objekten

Vertäfelung des Intarsienkabinetts im Potsdamer Neuen Palais

Bsp.: Tafel R 152: 1768 reich marketierte Ausstattung mit floraler Ornamentik

Zuschreibung: Gebrüder Spindler aus Bayreuth (Heinrich ilhelm d.J. und Johann Friedrich d.Ä.)

¹⁴⁵ Meinlschmidt, Broscke (2001)

Detaillierte Angaben zu Material, Technologie und Schäden: Meinlschmidt, Broscke (2001), S. 135 (Kasten).

Probefläche 50 x 50 cm²

Aufnahme von Bilderserien, bis zu 7 Minuten nach der Erwärmung

Vergleichende Untersuchungen

keine

Ergebnisse

Schäden, Wuchs- und Konstruktionsbesonderheiten (wie Hohlstellen durch Insektenbefall, Risse, Haftungsfehler, Holztextur und Fugen) konnten erkannt werden. Nur im Oberflächennahen Bereich (bis zu 10mm Tiefe). Für tiefere Zonen wären stärkere Temperaturerhöhungen der Oberfläche notwendig, was das Objekt schädigen könnte → für die Restaurierung nur begrenzt einsetzbar.

Rat von Fachleuten bezüglich weitergehender Untersuchungen zur Abgrenzung von störenden Materialunterschieden

Einflussfaktoren:

Materialunterschiede

3.3.3 Politecnico, Mailand

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
E. Rosina	1	Politecnico di Milano DCSA Mailand, Italien	
N.P. Avdelidis	1	IRT & Materials Consultancy Volos, Griechenland	
A. Moropoulou	1	National Technical University of Athens Athen, Griechenland	
S. della Torre	1	Politecnico di Milano	
V. Pracchi	1	BEST Mailand, Italien	
G. Suardi	1	Restaurator V. delle Fontane 2 Bianzano (BG), Italien	

3.3.3.1 Monitoring von Restaurierungsmaßnahmen

Ziel

Entwicklung von Verfahren der IR Thermographie zum Monitoring von Restaurierungsmaßnahmen an historischen Gebäudeoberflächen (z.B. Anwendung von Schutzfilmen, wasserabweisenden Materialien, Restaurierungen von Putzablösungen) und zur Überwachung von Risikobereichen (z.B. Tauwasserbildung, Infiltration, Wärmebrücken, Fensterrahmen).

Ermitteln der Durchführbarkeit und Effektivität von Infrarot-thermographischen Tests in situ durch Erfahrungen an einem Beispiel.

Systematik

Passive und aktive (transiente) Thermographie

System

Meßsystem: 900 LW Flir system, Thermokamera

Wärmeimpuls / -quelle:

Erhöhen der Umgebungstemperatur um ca. 4°C, 8° bzw. 10 °C über einen konvektiven Wärmefluss (1/2 Stunde). Aufnahme der Thermogramme ca. 40 Min. nach Ende der Erwärmung (bei Temperaturerhöhung 10 °C).

Voruntersuchungen an Probekörpern

keine

Untersuchungen an Objekten

Kirche S. Maria presso S. Paolo, Cantù

Kleines Gebäude aus dem 15.Jh., ein Innenraum mit zwei freistehenden und zwei innenliegenden Wänden, mit Fresken (frühes 16. Jh. von Cristoforo de Mottis und G. Ambrogio da Vigevano) ausgestattet. Die dekorierten Verputze wurden 2002-2004 restauriert (Festigung der Farbschichten mit Acrylharzemulsion, Hinterfüllungen mit hydraulischer Mörtel. Kirche ist wenig genutzt und ungeheizt.

Mischmauerwerk aus Bruchstein und Ziegel. Verlust des Freskos im Sockelbereich bis zu einer Höhe von 1,70 m. Schäden durch den Hauptschadensfaktor Kondensation in gesamter Raumhöhe, lokale Schäden durch Wasserinfiltration im Sockelbereich.

Monitoring des Klimas und Kontrolle möglicher Veränderungen der Permeabilität der Wandmalereien durch den Einsatz von Restaurierungsprodukten im Jahr nach der Restaurierung. Untersuchungen im Oktober 1998, Januar und Februar 2001 und Januar 2004.

Zunächst passive Thermographie zur Untersuchung des natürlichen thermischen Gradienten an der Oberfläche. Kritische Bereiche konnten als kältere Zonen visualisiert werden. Weitere Untersuchung nach Erwärmung in Abkühlphase.

Vergleichende/parallele Untersuchungen

Psychrometry, Klimamonitoring, Messungen zum Wassergehalt der Oberflächen und innerhalb des Mauerwerks.

Gute Übereinstimmung der Messungen des Wassergehalts mit den lokalisierten Bereichen.

Ergebnisse

Unterscheidung von Bereichen mit infiltrierter Feuchtigkeit und Kondensationsbereichen durch den Vergleich von passiver und Thermographie möglich (Kondensationsbereiche erschienen nur im passiv aufgenommenem Thermogramm kälter als die Umgebung). Deutliche Darstellung der Bruchsteine des Mauerwerks, Ziegel können nicht eindeutig detektiert werden. Unterscheidung zwischen originalem und Reparaturmörtel (der Fünzfziger mit Kaseinzugabe) möglich. Bei Voruntersuchung festgestellte Ablösungen sind nach der Restaurierung nicht mehr vorhanden.

Das Beispiel hat gezeigt, dass passive Untersuchungen nur die Temperaturgradienten der Oberfläche aufgrund von Feuchtigkeit und hoher Unterschiede der thermischen Eigenschaften und keine Unterscheidung der verschiedenen Bestandteile ermöglicht. Für aktive Versuche sind Dauer und Art der Erwärmung ausschlaggebend, um Informationen zu erhalten.

Erscheinen verschiedener Phänomene in der Abkühlungsphase (im Beispiel):

1. Unterschiede der Mörtelbestandteile (innerhalb 10 Minuten)
2. stärkere Unterschiede der oberflächennahen Materialien (Stein und Mörtel)
3. Mauerwerksstrukturen (Zeitpunkt in Abhängigkeit von Putzstärke und dessen Eigenschaften)

Photogrammetrische oder entzerrende Unterstützung kann den Datenvergleich extrem erleichtern und die Bewertung der Ergebnisse bedeutender machen.

3.3.3.2 weitere Untersuchungen

Von E. Rosina liegen zusammen mit anderen Autoren von Mailänder Forschungsanstalten weitere Veröffentlichungen zu folgenden Aspekten vor:

Detektion von Feuchtigkeit in historischen Baumaterialien (Holz und Verputz) mittels aktiver IR-Thermographie¹⁴⁶

Untersuchung der Zusammensetzung / des Aufbaus von Mauerwerkstrukturen mit aktiver IR-Thermographie und Modellbildung, Bsp.: Fachwerkwand im Malpaga Castle, Bergamo, Italien.¹⁴⁷

3.3.4 Universität Neapel: Vergleich PT, MT und PPT

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
G. M. Carlomagno C. Meola	1	Laboratorio di Gasdinamica Dipartimento di Energetica Termofluidinamica; Applicata e Condizionamenti Ambientali Università di Napoli "Federico II" P. le Tecchio, Via Claudio 21 80-80125 Neapel, Italien	Meola: Tel.: +390-81-768-3389 Fax: +390-81-239-0364 Email: carmeola@unina.it

Ziel

Vergleich zwischen verschiedenen IR-NDT Techniken, die zur Kontrolle von Ablösungen von Verputzen in Frage kommen.

Systematiken

Impuls-Thermographie, Lateral Heating (bewegte linienförmige Wärmequelle) und Lock-In-Thermographie (bzw. Modulated Thermography MT)

System

Meßsystem:

LT: Agema 900 option lock-in 2.00

Wärmeimpuls / -quelle:

Impuls-Thermographie:

2 Quarzlampen (a 1kW, Glühfadenlänge 80 mm), Abstand ca. 50 cm zur Oberfläche. Erwärmung über 3-4 Minuten, Anstieg der Oberflächentemperatur ca. 3,7 K über Umgebungstemperatur (in Abhängigkeit von der Putzstärke).

Anschließende Abkühlungsbeschleunigung über tragbaren Kompressor (Düse wird zur schnellen Abrasterung über die Oberfläche bewegt). Diese Erwärmung/Abkühlung ist ungeeignet für wertvolle Fresken.

Lateral Heating:

Lineare Lampe (900 W, 700 mm lang) mit Bewegungssystem.¹⁴⁸

Impuls-Phasen-Thermographie:

Temperaturerhöhung von 2, 7 oder 15 °C

Voruntersuchungen an Probekörpern

Probekörper aus Putz auf Marmor, Ziegel oder Tuffstein (90 x 90 cm², Putzstärke 1 bzw. 2 cm). mit eingelagerten Störquellen (Scheiben aus Kork oder mit Luft gefüllte Plastiktüten), um Ablösungen und/oder Risse zu simulieren.

¹⁴⁶ Ludwig et.al. (2004), mit theoretischer Einführung und weiteren Literaturstellen zum Thema.

¹⁴⁷ Ludwig, Rosina (1998)

¹⁴⁸ Details hierzu Carlomagno, Meola (2002), S. 561, mit Abb. 3.

Aufteilung in 10 Arbeitszonen

Für das Lateral Heating wurden Tests ausgeführt, um die Erwärmungsparameter hinsichtlich eines guten thermischen Kontrastes zu optimieren, ohne eine zu starke Erwärmung (empfindliche Oberflächen).

Untersuchungen an Objekten

keine

Vergleichende Untersuchungen

Vergleich der Methoden Impuls-Thermographie, Lateral Heating, Lock-In-Thermographie und Impuls-Phasen-Thermographie

Ergebnisse

Impuls-Thermographie:

Therm. Kontrast wird durch den Einsatz von Kaltluftgebläse zur schnelleren Abkühlung verbessert.

Lock-In--Thermographie:

Mit vorliegendem System (min. Frequenz 3,75 Hz, entspr. 267 s) können Tiefenlagen um 2 cm nicht mehr detektiert werden.

Impuls-Phasen-Thermographie:

Defektsichtbarkeit in der Abkühlungsphase gesteigert. Kann tiefere Lagen erreichen als die MT, benötigt aber höhere Temperaturunterschiede zwischen zwei aufeinander folgenden Bilder einer Sequenz. Für höhere Tiefenlagen sind stärkere Oberflächenerwärmungen notwendig (für unsensible Objekte möglich).

Einflüsse:

Lateral Heating:

Defektsichtbarkeit hängt ab vom Abstand Lampe-Prüfobjekt, der Lampengeschwindigkeit und der Bestrahlungsdauer, die mit der Anzahl der ausgeführten Überquerungen in Zusammenhang steht.¹⁴⁹

3.3.5 Passive Thermographie Deckengemälde Paris

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
J. Frick	1	Otto-Graph-Institut, Universität Stuttgart Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen - FMFA, Stuttgart	
S. Simon	1	KDC Konservierung & Denkmalpflege Consulting Olching	
G. Gülker H. Joost	1	Fachbereich Physik, AG Angewandte Optik Carl von Ossietzky Universität Oldenburg	

Ziel

Zerstörungsfreie Charakterisierung von Schadensphänomenen wie Risse und Ablösungen in der Gewölbestruktur des Deckengemäldes in der alten Bibliothek des Lycée Charlemagne, Paris.

Systematik

¹⁴⁹ Graphik des Verhältnisses Temperaturanstieg zur Bewegungsgeschwindigkeit für vers. Anzahl der Überquerungen beim Abstand 50 mm: Carlomagno, Meola (2002), S. 563, Abb. 5.

Passive Thermographie unterstützt durch leichtes Beheizen des Raumes

System

Meßsystem:

Thermokamera Inframetrics 600 E (8-12 µm), Auflösung 0,1 K.

Voruntersuchungen an Probekörpern

keine

Untersuchungen an Objekten

Deckengemälde in der alten Bibliothek des Lycée Charlemagne, Paris

Entstehungszeit 1695-98, durch abgehängte Decke jahrzehntelang verdeckt, in den letzten Jahren vor 2001 entdeckt und freigelegt.

Gipsputz auf Holzkonstruktion, darauf Kalkmörtel als Malgrund des Fresko.

Mikro- und makroskopische Schadensphänomene wie Risse (im Gipsuntergrund und zw. Gipsuntergrund und Holzkonstruktion) und Ablösungen (zw. Farbschichten, zw. Gipsuntergrund und Kalkmörtel)

Thermographische Messungen vom 18.-20.3.1999 (Ende des Winterhalbjahres), Bibliotheksraum vorab etwas beheizt (Temperaturgradient zw. Dachraum und Bibliotheksraum, max. 3,5 K am frühen Morgen).

Temperaturgradienten aufgrund unterschiedlicher Materialien (z.B. Holz, Putz) und Schäden (z.B. Ablösungen).

Vergleichende Untersuchungen

Videoholographische Untersuchung mit akustischer Anregung und passive Thermographie im Vergleich zu klassischen restauratorischen Untersuchungsmethoden wie z.B. Perkussion.

Ergebnisse

Bei ausreichendem Temperaturgradienten konnten Ablösungen detektiert werden. Zusätzliche Informationen über den Aufbau des Balkendeckengewölbes (in Korrelation mit den Schadensphänomenen). Konservierungsmaßnahmen können neben der Videoholographie auch mittels Thermographie zerstörungsfrei kontrolliert werden.

Einflussfaktoren:

Überlagerung der Effekte führt teilweise zur Verdeckung, nicht alle hohlliegenden Bereiche, die mittels Perkussion ermittelt wurden, wurden erkannt.

3.3.6 Fallbeispiel abgenommener Wandmalereien

Thermographische Untersuchung abgenommener römischer Wandmalereien

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
R. Fischer	1	Musée National d'Histoire et d'Art Marché-aux-Poisson 2345 Luxembourg	
Durchführung der Experimente und Untersuchung, Auswertung: H. Zahn		Dipl.-Physiker	
Videoholographie:		Fachbereich Physik, AG Angewandte Optik ITAP Carl von Ossietzky Universität Olden-	

		burg	
--	--	------	--

Ziel

Zerstörungsfreie Untersuchung des Verputzes abgenommener römischer Wandmalereien aus Vichten

Systematik

Impuls-Thermographie in Reflektion

System

Meßsystem:

Kamera Inframetrics Model 760

Zusammengeknüllte Alufolie als Referenzmaterial zur Lokalisierung der Thermogramme (ausgelegt), Dokumentation der Bildausschnitte auf Kleinbildformat und Gesamtaufnahme der Objekte

Wärmeimpuls / -quelle:

Mit 500 W Lampe um einige Grad Celcius erwärmt

Voruntersuchungen an Probekörpern

Verputz auf Kalksandstein mit präparierte Hohlstellen.

Untersuchungen an Objekten

Wandmalereien aus einer Palastvillenanlage von Vichten (Westen Luxemburgs)

1995 entdeckt, „a stacco“ abgenommen (Abklebung: Nesselstoff mit Kunstharz Mowilith 35/73), auf Holzplatten oder in Fundkisten in Container zwischengelagert.

Mehrlagiger Verputz, Stärke der Wandmalerei nach Abnahme 1-7 cm, gut erhaltener Verputz.

Schadbilder: starke Risse und schollenartiges Abplatzen von Putzschichten.

Vergleichende Untersuchungen

Untersuchungen mit Videoholographie und akustischer Anregung funktionierte bei den Abnahmen nicht so gut, da die gesamte Struktur zur Schwingung angeregt wurde

Ergebnisse

Probekörper:

Keine eindeutigen Ergebnisse: Nah an der Oberfläche liegende Hohlstellen gut erkennbar, tieferliegende nur schwer zu verifizieren.

An den Wandmalereien:

Es war nicht möglich durch die Leinwand (abgeklebte Wandmalereien) hindurch Hohlstellen im Objekt sichtbar zu machen.

Vorgestellte Untersuchungsmethode wird als kalkulierbare und praxisnahe Möglichkeit der naturwissenschaftlichen Untersuchung von römischen Wandmalereien bezeichnet. Detektion derzeit nur an reapplizierten Fragmenten möglich.

Keine qualitative Aussage über Ursache der veränderten Wärmerückstrahlung möglich → weitere Tests und Untersuchungen.

Einflussfaktoren:

Schwierigkeit: Inhomogen, insbesondere der Oberfläche (unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Absorptions- und Emissionskoeffizienten.) → durch variierende Absorption unterschiedliche Temperaturverteilung bei der Erwärmung, durch variierende Emission auch bei gleicher Oberflächentemperatur unterschiedliche Wärmestrahlung (Messwert Thermogramm)

Differente Materialstärken und Materialien → veränderte Wärmeleitfähigkeit

Bei abgeklebte Wandmalereien Überlagerung durch Ablösungen der Leinwand.

Nicht vollständiges Aufliegen der Fragmente im Sandbett: veränderte Wärmeableitung an den Untergrund

3.3.7 IR-Untersuchungen von Fassadenputzzuständen

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
M. Volinia	1	Restoration Laboratory Dept. Casa-città, Turin Polytechnic Viale Mattioli 39, 10125 Turin, Italien	
Unterstützung: E. Grinzato		CNR-ITEF Corso Stati Uniti, 4 35127 Padova, Italien	ermanno@itef.pd.cnr.it Tel: +39 49 8295722 Fax: +39 49 8295728

Ziel

Bewertung der Putzzustände am Valentino Schloß, Turin zur Planung der Restaurierungsarbeiten.

Systematik

Passive und aktive Thermographie mit Anwendung des Algorithmus der thermischen Tomographie.

System

Meßsystem:

Agema IR-System 488 LW thermokamera (8-12µm)

Wärmeimpuls / -quelle:

Sonnenstrahlung : 2-3-stündiger Aufnahmezeitraum eine Stunde nach natürlicher Beschattung bzw. nach der Abnahme einer zuvor vorgeblendeten Polyesterplatte.

Voruntersuchungen an Probekörpern

Untersuchungen an Objekten

Hoffassade des Valentino Schlosses in Turin, Italien

Erste Gebäudeanlage Mitte 16. Jh., zahlreiche Veränderungen, Erweiterungen und Transformationen, aktuelle Größe aus dem 17. Jh. (Landsitz der königlichen Familie)

Im 19. Jh. Veränderungen im Innen- und Außenbereich (Stabilisierungsmaßnahmen, Restaurierungen, Teilerneuerungen der Verputzarbeiten.

1996-1998 qualitative Analyse:

Erste Untersuchungsreihe August 1996: 400 Thermogramme zw. 9:00 und 10:30 Uhr über 3 Tage. Umzeichnung der thermischen Anomalien (wärmere und kältere Bereiche) von den Thermogrammen in Kombination mit optischen Untersuchungsergebnissen über Fassadenzeichnungen.

Weitere Untersuchungsserie im Winter 1997. Ebenfalls graphische Umsetzung. Überlagerung der beiden Ergebnisse, Kartierung der Anomalien, die sowohl im Winter als auch im Sommer auftreten (weittestgehendes Ausschalten von Faktoren aufgrund von externen Verhältnissen).

Kontrolluntersuchungen in 30 exemplarischen Probereichen im Frühjahr 1997 durch thermographische Untersuchungen sowie visuelle Untersuchungen und Perkussionstests. Erstellung von Datenblättern mit den gesammelten Informationen. Diese 3. Untersuchungsreihe bestätigte die vorhergehenden thermischen Anomalien und zeigte, dass diese fast immer mit Veränderungen des Oberflächenmaterials in Zusammenhang stehen (Putzablösungen oder Putzerneuerungen).

1999 quantitative Untersuchungen:

Aufnahmen unter verschiedenen thermischen Bedingungen (Sommer und Winter 1999, gegenüberliegende Fassaden mit vers. Oberflächenfarbigkeit) mit jew. vorhandenen Perkussionstests: einfarbige Relieftafel und Quadersteinarbeit mit unregelmäßiger Oberflächenfarbigkeit (ockerfarbener Anstrich und grauer Reparaturmörtel) in der Abkühlungs- bzw. Erwärmungsphase.

Vergleichende/parallele Untersuchungen

Visuelle Untersuchung der Putzzustände

Perkussionsuntersuchungen: im allgemeinen gute Übereinstimmung mit den durch die IR-Untersuchung festgestellten thermischen Anomalien.

Monitoring der meteorologischen Verhältnisse (Lufttemperatur- und relativen Feuchtigkeits-Werte per Datenlogger im Hof des Gebäudes, Verarbeitung durch Laboratory of Analysis and Modeling of Environmental Systems).

Überprüfungen der Oberflächenfarbe

Ergebnisse

Die qualitative Analyse war für eine Identifizierung des vorliegenden Schadenstypus nicht immer ausreichend. Es gab keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem thermischen Verhalten der Wandoberfläche und der Defektart. Die Ergebnisse werden stark von der Methode, dem Zeitpunkt, den Umgebungsbedingungen, optischen Faktoren, dem vorliegenden Materialien und der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst.

Detailliertere Informationen konnten durch quantitative Methoden gewonnen werden. Die zeitaufwendige Analyse machte aber die Eingliederung beider Methoden notwendig: qualitative Methoden zur Identifizierung der Problembereiche und darauffolgende detailliertere Analyse mit quantitativen Methoden.

In der jetzigen Forschungsphase kann die Intensität der Defekte nur über den Vergleich innerhalb einer Testphase erkannt werden.

Einflussfaktoren:

qualitativen Analyse: Methode, Zeitpunkt der Untersuchung, Umgebungsbedingungen, optischen Faktoren, vorliegende Materialien und Oberflächenbeschaffenheit

3.3.8 NTU Athen

Arbeitsgruppe

Personen	Veröff.	Institution	Kontakt
N.P. Avdelidis	1	IRT & Materials Consultancy Agia Triada Ano Volos Volos, 38500, Griechenland	Email: avdel@mail.ntua.gr
A. Moropoulou	1	Section of Materials Science and Engineering, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens Zographou, 15780 Athen, Griechenland	

3.3.8.1 Untersuchung von verdeckten Mosaiken¹⁵⁰

Ziel

Untersuchung verdeckter Mosaiken mittels aktiver IR-Thermographie; Herausstellen der Effektivität infrarot-thermographischer Untersuchungsmethoden zur Diagnostik von historischen Gebäuden.

Systematik

Aktive IR-Thermographie

System

Meßsystem:

IR Detektor TVS 2000 Mk II LW (8-12 µm, 15 Bilder pro sec.)

¹⁵⁰ Avdelidis, Moropoulou (2004), S. 125f.

mit Prozessor (AVIO Thermal Video System)

Wärmeimpuls / -quelle:

IR Quarzröhren-Heizer

Voruntersuchungen an Probekörpern

-

Untersuchungen an Objekten

Verdeckte Mosaiken der Hagia Sophia, Istanbul:

Anfang des 20. Jh. wurden Mosaiken überputzt. Auf diesen Verputz erfolgte eine einfache ornamentale Gestaltung mit Leimfarben („Vakif Intervention“).

Aktiv thermographische Untersuchung eines verdeckten Mosaiks zeigt das Vorhandensein des Mosaiks und abgelöste Zonen auf.

Sowie Untersuchungen versch. Mosaiken im Labor

Vergleichende Untersuchungen

-

Ergebnisse

-

3.3.8.2 Weitere Untersuchungen:

Untersuchung von Reinigungsmaßnahmen an Gebäuden, z.B. historisches Gebäude der Bank of Greece, Athen, Griechenland.¹⁵¹

Untersuchung des Effektes verschiedener Steinfestigungen mittels IR-Thermographie, Bsp.: Mauerwerk der Mittelalterlichen Stadt von Rhodos, Griechenland.¹⁵²

Untersuchung von Mörtelreparaturen mittels IR-Thermographie, Bsp.: Festungsmauerwerk am Nationalstadion von Heraklion, Kreta.¹⁵³

Untersuchung / Monitoring von Feuchtigkeit in porösen Materialien, z.B. St. Paul's Gate, Rhodos, Griechenland.¹⁵⁴

Untersuchungen zum Emissionsvermögen von historischen Baumaterialien bei vers. Temperaturen im Mittel- und Langwellenbereich des Infrarotspektrums.¹⁵⁵

3.3.9 Weitere Projekte zur IR-Thermographie in der Denkmalpflege

Arbeitsgruppe / Projekt

- Untersuchung zur Möglichkeit des Einsatzes von Thermographie zur Detektion von Ablösungen in Tafelmalereien.¹⁵⁶ Trotz ihres Alters (1977) wird diese Veröffentlichung hier mit aufgenommen, da vermehrt darauf Bezug genommen wird.
- Diagnostik und Monitoring von Zementkorrosion an einer bedeutenden Kirche in Rumänien) mit passiver Thermographie (D. Frumuselu, Senior Research Engineer, Rumänien)¹⁵⁷
- Aktiv thermographische Detektion von Gipsergänzungen an Skulpturen des Westportals des Freiburger Münsters (G. Krüger, Dipl.-Physiker, Universität Stuttgart und E. Grether, Restaurator, Freiburg)

¹⁵¹ Avdelidis, Moropoulou (2004), S. 121f.

¹⁵² Avdelidis, Moropoulou (2004), S. 122f.

¹⁵³ Avdelidis, Moropoulou (2004), S. 123ff.

¹⁵⁴ Avdelidis et.al. (2003), Avdelidis et.al. (2004).

¹⁵⁵ Avdelidis, Moropoulou (2003).

¹⁵⁶ Miller (1977)

¹⁵⁷ Frumuselu (1999)

4 Laboruntersuchungen

4.1 Einleitung

Vor dem Einsatz der Infrarotthermographie zur Untersuchung hohl stehender, mittelalterlicher Wandmalereien waren umfangreiche Voruntersuchungen und Laborexperimente notwendig. Dabei wurden Untersuchungen zur Positionierung durchgeführt, um die Ergebnisse der Infrarotthermographieuntersuchungen auf lichtoptische Fotos oder Baupläne übertragen zu können. Für die Temperatur-Aktivierung wurden verschiedene Systeme ausprobiert. Es setzte sich der Einsatz von Infrarotstrahlern als beste und praktikabelste Lösung durch. Für die Strahler wurden die Strahlungsgeometrie, die Verteilung der Strahlung an einem angestrahlten Objekt und die Strahlungsleistung nachvollzogen. Daraus wurde eine optimierte Vorgehensweise für den Strahlerabstand und die Strahlungszeit entwickelt. Mit Hilfe von drei speziell konstruierten Probekörpern sollten mehrere Effekte, die die Untersuchung beeinflussen, auf ihre Relevanz für die Hohlstellendetektion an Wandmalereien erforscht werden. In wie weit die Absorptions- und Reflektionseigenschaften der Farbpigmente auf den Wandmalereien Einfluss auf das Untersuchungsergebnis haben können sollte festgestellt werden. Auch der Einfluss unterschiedlicher und unterschiedlich rauer Maleriträger wurde geprüft. Zudem sollten an einem Probekörper mit definiert eingebauten Hohlstellen die Grenzen der Technik konkret ausgelotet werden.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden eine hohl stehende Putzfläche auf einer Wand thermographisch untersucht und dann die Hohlstellen freigelegt und vermessen. Die Thermographieinterpretationen wurden mit den Ergebnissen verglichen. Die Putzfläche in der Fürstengruft im Freiburger Dom trägt keine Wandmalerei, zeigte aber Schadensformen, identisch zu stark gefährdeten Wandmalereien. Ausschließlich an diesem Beispiel bestand die Möglichkeit, die Ergebnisse der IR-Untersuchungen anschließend zerstörend zu überprüfen.

Die Untersuchungen der Grundlagen nehmen im Projekt einen breiten und äußerst wichtigen Raum ein. Effekte, deren Tragweite am historischen Objekt kaum nachvollziehbar gewesen wären, wurden im Labor unter definierten Bedingungen untersucht. Nur durch eine Vielzahl von Voruntersuchungen und Versuchen im Labor, von denen die meisten und wichtigsten hier im Bericht dargestellt werden, ließ sich der Aufwand und die Belastungen für die Wandmalereien in Bad Schmiedeberg und in Kühren in einem überschaubaren Maß halten. Die Konzeption der modernen Probekörper zur direkten Untersuchung von Probeflächen mittelalterlicher Techniken kann dabei durchaus als neuartig gelten.

4.2 Positionierung der Aufnahmen

Nachdem die Suche nach einem berührungslosen Orientierungssystem keinen Erfolg hatte wurde entschieden konservativ mit geklebten Orientierungsmarken im Aufnahmebereich zu arbeiten. An den untersuchten Objekten wurde diese Methode eingesetzt. Die Anbringung von Orientierungsmarken ist in Bereichen, die nur schwer oder gar nicht zugänglich sind, wie zum Beispiel sehr hoch liegende Fassaden-, Decken- oder Gewölbeoberflächen, mit der Nutzung von Hubbühnen oder Rüstungen verbunden. Das kann vor allem dann zum Problem werden, wenn solche Gerüste in der Folge die Sicht auf die zu untersuchende Fläche einschränken. Orientierungsmarken, die in historische Wandmalereien hinein gesetzt werden müssen, müssen vollständig und schadlos reversibel sein.

Für das Forschungsprojekt zur Untersuchung von Hohlstellen in mittelalterlichen Wandmalereien kamen zur Positionierung mehrere Vorgehensweisen, angepasst an die jeweilige Objektsituation zum Einsatz. So konnten bei den Voruntersuchungen zur Ausleuchtungsgeometrie und Leistung der Wärmestrahler bereits vorhandene Stahlstifte in der Wand zur Positionierung genutzt werden, nachdem ihre Position genau ausgemessen worden war. Auch bei der Untersuchung der Probekörper konnte auf eine zusätzliche Positionierung verzichtet werden, da die jeweiligen Probekörper-Testflächen auf eine optimale Ausnutzung des Kamerafensters angelegt waren. Die günstigste Vergrößerung zur bestmöglichen Ausfüllung des Thermobildes war damit gleichzeitig die Festlegung über die Lage der Musterflächen. Hinzu kam der zunächst die dieser Deutlichkeit nicht erwartete Einfluss der verschiedenen Farbflächen auf die Temperaturinformation. Daraus folgte dann insbesondere für die Untersuchungen der Wandmalereien in Bad Schmiedeberg aber auch für die untersuchte Wandfläche in Kühren, eine zusätzliche Orientierungshilfe. Die Positionierung der Thermobilder lässt sich teilweise an den Darstellungen selbst, durch die unterschiedlichen eingesetzten Farben festmachen. In Bad Schmiedeberg wurde die Positionierung erleichtert durch einen vorhandenen Holzrahmen.

Wurden Orientierungsmarken gesetzt, wie beispielsweise jeweils in den Ecken der drei untersuchten Felder in Kühren, wurde handelsübliches Klebeband verwendet. Die Orientierungsmarken saßen dabei etwas außerhalb der historischen Wandmalereifläche auf neuzeitlichem Putz. Das schwarze Isolierband zeichnete sich als besonders günstig zur Positionierung aus, da es sowohl auf den lichteptischen Aufnahmen als auch im IR-Bild gut zu erkennen ist.

4.3 Vergleich unterschiedlicher Aktivierungsmethoden

Bei der aktiven Infrarotthermographie wird Energie in das zu untersuchende Objekt eingetragen um Temperaturdifferenzen zu initiieren. Bei der Auswertung der Aufnahmen wird ein besonderes Augenmerk auf die Stellen mit einem im Vergleich zur Umgebung auffälligem Temperaturverhalten gelegt. Die Datenanalyse ermöglicht das Herauslösen quantitativer Informationen über das untersuchte Objekt.

Die Geschwindigkeit, in welcher die Wärmefront einer Stimulierung zerstreut wird, hängt von verschiedenen thermischen Materialeigenschaften wie Dichte, Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit, Struktur und unter der Oberfläche befindlichen Störstellen ab.

Es gibt sehr unterschiedliche physikalische Möglichkeiten die benötigten Temperaturänderungen aktiv zu erreichen. Im Rahmen von Voruntersuchungen und Vorstudien im Projekt wurden einige verschiedene Techniken zur Aktivierung der Oberflächen ausgetestet und viele diskutiert. Eine ausführliche Dokumentation liegt nicht von allen zu Beginn des Projektes diskutierten Möglichkeiten vor, hier sollen die wesentlichen Punkte dennoch diskutiert werden.

4.3.1 Abkühlung der Oberfläche

Um eine Temperaturdifferenz hervor zu rufen gibt es nicht nur die Möglichkeit diese zu erwärmen, sondern auch die Abzukühlen. Viele Feststoffe sind nicht hitzebeständig aber Veränderungen durch Kälte treten weit weniger auf. Die meisten chemischen Prozesse finden in niederen Temperaturen langsamer statt. Unter der Annahme des gleichen Temperaturunterschiedes ist eine Temperaturniedrigung eventuell weniger schadensriskant als eine Temperaturerhöhung. Physikalisch und auf im Hinblick auf Spannungsaufbau in unterschiedlichen Schichten spielt ausschließlich die Temperaturdifferenz (ΔT) eine Rolle, nicht aber die Richtung der Veränderung. Im Hinblick auf die Schadensrisiken ist aber auch die Geschwindigkeit der Änderung insbesondere bei hohen Temperaturdifferenzen zu berücksichtigen. Als technische Möglichkeiten stehen Kaltluftgebläse und die Arbeit mit flüssigem Stickstoff zur Verfügung. Kaltluftgebläse benötigen eine sehr hohe Stromaufnahme, die möglicherweise nicht immer am Denkmalobjekt gewährleistet werden kann. Zudem erscheint es sehr schwierig einen Kaltluftstrom gleichmäßig auf eine Fläche von etwa 3 m² zu blasen. Flüssiger Stickstoff gehört in die Gefahrgutklasse 2.2, daher sind beim Transport zahlreiche Bestimmungen zu beachten.

4.3.2 Aufheizung durch Warmluft

Warmluftgebläse sind gängige Artikel und in vielen Modifikationen erhältlich. Die Palette reicht von elektrischen Föhen bis hin zu ölbeheizten oder gasbetriebenen, geräuscharmen Lüftern.

Im Rahmen der Diplomarbeit von Rayk Grieger¹⁵⁸ in der Jakobgruft auf dem Nikolaifriedhof in Görlitz (Abb. 3) konnten Erfahrungen mit der Erwärmung durch Warmluftgebläse gesammelt werden. Die Oberflächen wurden mit zwei handelsüblichen Heizlüftern (Einzelleistung 1500W) mit Axialventilatoren abgefahren (Abb. 3). Im Ergebnis konnte nur geringer und ungleichmäßiger Wärmeeintrag in den zu untersuchenden Wandoberflächen festgestellt werden (Abb. 4). Als weiterer Nachteil der elektrisch betriebenen Warmlüfter war eine starke Luftbewegung an den Wandoberflächen festzustellen sowie eine starke Stromaufnahme, die gelegentlich zum Auslösen der Sicherung führte. Diese Aufheizmethode wurde für die Nachmessungen nicht wiederholt.

¹⁵⁸ Rayk Grieger 2005: Die Konservierung und Restaurierung der wiederentdeckten Wandmalereifragmente aus dem 17. und 18. Jahrhundert in der Grabkapelle des Bartholomäus Jacobi auf dem Nikolaifriedhof in Görlitz, Diplomarbeit FH Erfurt



Abb. 3 Görlitz, Nikolaifriedhof, Wandmalerei in der Jakobigruft mit Erwärmung durch Heizlüfter

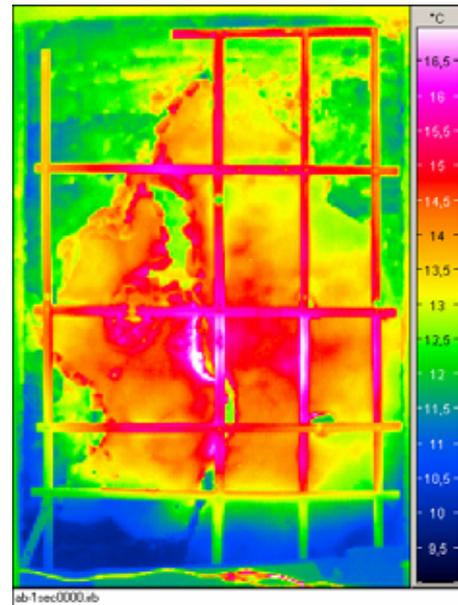


Abb. 4 Temperaturverteilung bei der Erwärmung mit Heizlüftern

4.3.3 Aktivierung durch Strahlung

Durch elektromagnetische Strahlung im Bereich der Wellenlängen von Infrarot lassen sich Oberflächen erwärmen. In der Nikolaikirche in Bad Schmiedeberg und in der Jakobigruft auf dem Nikolaifriedhof in Görlitz wurde zunächst die Heizwirkung von vier Halogenstrahlern mit je 500 Watt getestet, die von vier Ecken jeweils eine Fläche ausstrahlen (Abb. 5 und Abb. 6). Dabei wurde festgestellt, dass nur ein relativ geringer Wärmeeintrag mit einer relativ ungleichmäßigen Verteilung möglich ist. Eine gleichmäßige Aufheizung einer größeren Fläche war somit nicht gegeben.



Abb. 5 Görlitz, Nikolaifriedhof, Wandmalerei in der Jakobigruft mit Erwärmung durch Halogenstrahler

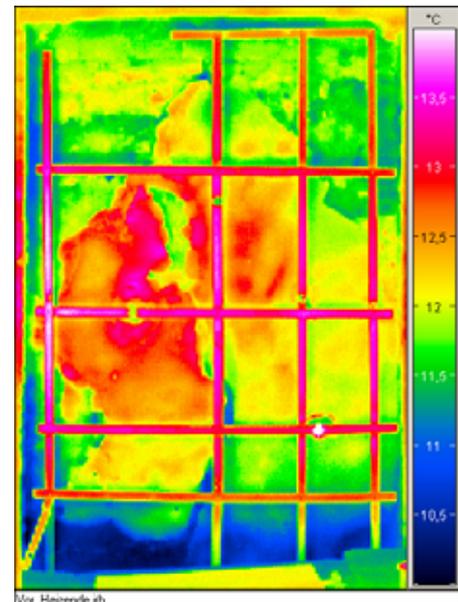


Abb. 6 Temperaturverteilung bei der Erwärmung mit vier Halogenstrahlern

Weiterhin wurde der Einsatz von Propangasstrahlern getestet. Zum Einsatz kam ein handelsüblicher Gasstrahler (Abb. 7), der einen deutlich höheren Wärmeimpuls als die bisher getesteten Geräte erzeugte. Allerdings war eine homogene Erwärmung nur in einem relativ kleinen Bereich möglich und es waren starke Temperaturgradienten vom Mittelpunkt in die Außenbereiche festzustellen (Abb. 8). Die Methode wurde nur bei den Nachuntersuchungen zu Vergleichszwecken ausgeführt.



Abb. 7 Görlitz, Nikolaifriedhof, Wandmalerei in der Jakobigruft mit Erwärmung durch Gasstrahler

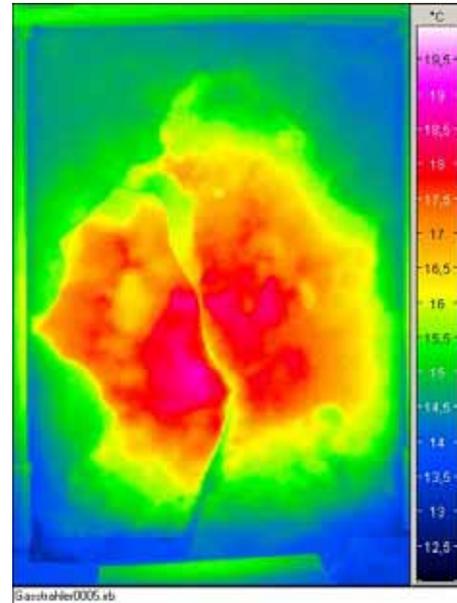


Abb. 8 Temperaturverteilung bei der Erwärmung mit einem Gasstrahler

Als Methode mit dem höchsten und gleichmäßigsten Wärmeeintrag (Abb. 11) hat sich die Anwendung eines Ölstrahlers erwiesen. Bei diesen Geräten wird durch das Verbrennen von Heizöl in einer Brennkammer Strahlungswärme erzeugt (Abb. 9 und Abb. 10). Das hier eingesetzte Gerät der Fa. Master hatte eine Nennleistung von 58 kW, was der Heizleistung einer Zentralheizung in einem Mehrfamilienhaus entspricht. Als Nachteil war hier eine im Vergleich zu den anderen Methoden mit einer Erwärmung durch Strahlung relativ hohe Luftbewegung an der Wandoberfläche festzustellen. Hinsichtlich der Dauer und Art des einzubringenden Wärmeimpulses in die Oberfläche und bezüglich der Interpretation der beobachteten Phänomene Erfahrungen auch an anderen gestalteten Putzoberflächen gesammelt. Ein wesentlicher Kenntniszuwachs konnte vor allem durch die Untersuchungen an den Putzritzen an der Außenfassade des östlichen Kreuzgangflügels im Magdeburger Dom erzielt werden. Unterstützend zu der parallel absolvierten Diplomarbeit ¹⁵⁹ von Franka Bindernagel wurde sowohl die aktive als auch die passive Infrarotthermographie eingesetzt. Ziel war es zum einen, die nur unzureichend dokumentierte Restaurierungsgeschichte der einzelnen Bildfelder aufzuklären und dementsprechend hinterfüllte Zonen aufzufinden. Zum anderen sollten auch der Versuch unternommen werden, hohl liegende Bereiche innerhalb des Putzes zu detektieren. Für die Untersuchungen am Objekt wurde ein Gerüst aufgestellt, welches einen maximalen Arbeitsabstand von 120 cm zuließ.

¹⁵⁹ Franka Bindernagel 2006: Die Putzritzen an der Außenfassade des östlichen Kreuzgangflügels im Magdeburger Dom. Erarbeitung eines Konservierungs- und Restaurierungskonzepts für eine mehrfach restaurierte Fassadengestaltung aus dem 13. Jahrhundert, Diplomarbeit HfBK Dresden



Abb. 9 Görlitz, Nikolaifriedhof, Wandmalerei in der Jakobgruft mit Erwärmung durch Ölstrahler



Abb. 10 Ölstrahler von vorn

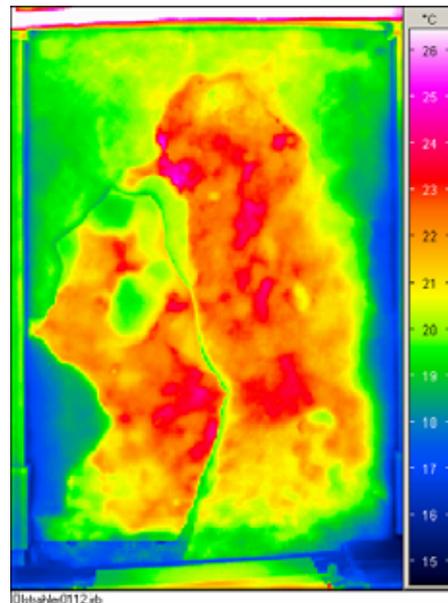


Abb. 11 Temperaturverteilung bei der Erwärmung mit einem Ölstrahler

Aus dieser Situation heraus und unter Beachtung der kühlen Außentemperaturen (0°C) und der Luftbewegungen, die die Erwärmung der Oberfläche verzögern, musste in mehreren Versuchen die angemessene Erwärmungsdauer für die Putzoberfläche erprobt werden. Es galt die wesentliche Frage zu klären, ab welchem Temperaturgradienten zur Umgebungsluft optimale Infrarot-Bilder gewonnen werden können. Des Weiteren wurde der Einfluss des Stellungswinkels der Heizeinheit zu der untersuchten Oberfläche bewertet. Die bestmögliche homogene Erwärmung wird bei exakt senkrechter Position der Infrarot-Heizstrahler erzielt. Auf der Grundlage der Beobachtungen und Kenntnis der Diplomandin, die die Infrarotthermographie begleitet hat, konnte die Interpretation von Phänomenen im IR-Bild zeitnah verifiziert werden. Durch die Infrarotthermographie-Untersuchungen konnten sowohl hinterfüllte Bereiche als auch hohl liegende Zonen detektiert werden.

4.3.4 Untersuchungen zur Strahlerleistung, Strahlkegel und Versuchsanordnung

Es wurde eine Reihe von Untersuchungen zur geometrischen Anordnung von Heizstrahlern und Infrarotkamera zu einer Wandoberfläche vorgenommen. Ziel dieser Versuche war es eine Aussage über die wirksamste geometrische Anordnung von Heizstrahlern und Infrarotkamera zu einer Wandoberfläche zu erhalten, um eine möglichst gleichmäßige Erwärmung der Oberfläche eines Messfeldes zu erreichen. Dazu erfolgten an einer Probenwand aus Ziegelmauerwerk, die mit einem Pinselputz von ca. 2 mm Stärke versehen ist, die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Versuche. Des Weiteren sollte die Größe der Wandfläche bestimmt werden, die eine möglichst gleiche Temperaturdifferenz während und nach dem Aufheizen aufweist. Auch musste die Zeitdauer der Erwärmung ermittelt werden, um auswertbare Temperaturdifferenzen an der Wandoberfläche und im Tiefenbereich der Wand zu bekommen ohne eine zu starke Erwärmung auf der Oberfläche zu erzielen.

Um die gesuchten Parameter feststellen zu können, erfolgten mehrere unterschiedliche Versuchsreihen, in denen der Abstand eines Heizstrahlers, der Winkel des Strahlers zur Wand und die Aufheizdauer variiert wurden.

In der ersten Versuchsreihe (Versuchsreihe I) wurde die Leistungsfähigkeit eines einzelnen Heizstrahlers in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wandoberfläche bestimmt. Bei der Versuchsreihe II erfolgte eine Erwärmung der Wandoberfläche jeweils von einem Punkt schräg von links, schräg von rechts und schräg von unten aus. Somit ergaben sich Aussagen über die Wärmeverteilung auf der Wandoberfläche bei einer einseitigen / schrägen Erwärmung. Bei der Versuchsreihe III erfolgte die Erwärmung der Wandoberfläche mit Hilfe von zwei Heizstrahlern in unterschiedlicher Entfernung zur Wandoberfläche.

4.3.4.1 Heizstrahler

Ein Heizstrahler der Firma Master ist in Abb. 12 dargestellt. Die Strahler besitzen eine Leistung von jeweils 2 x 1500 W. In einem Vorversuch wurden die Anlaufphase Leuchtmittel bestimmt. Es zeigt sich deutlich eine Aufheizphase der Elemente von etwa 2 min bis 95% der Maximaltemperatur und es dauert etwa 5 min bis die Maximaltemperatur konstant erreicht ist.



Abb. 12 Heizstrahler der Firma Master mit den zwei Heizlampen

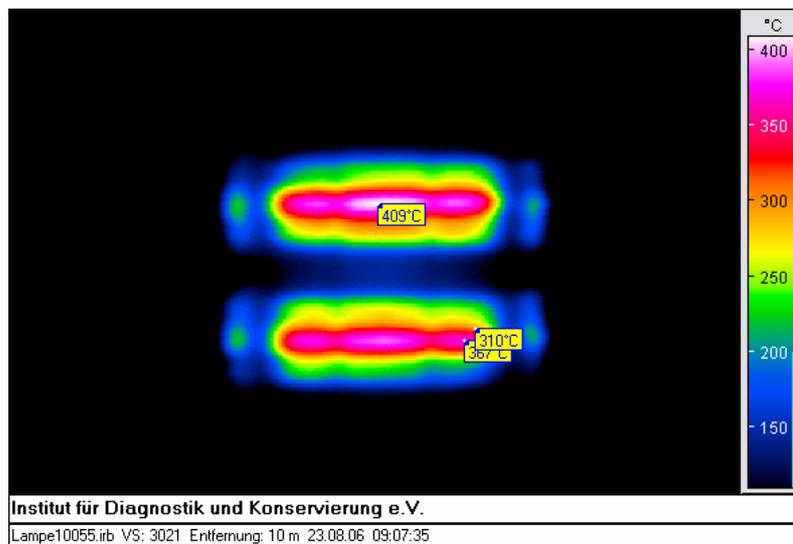


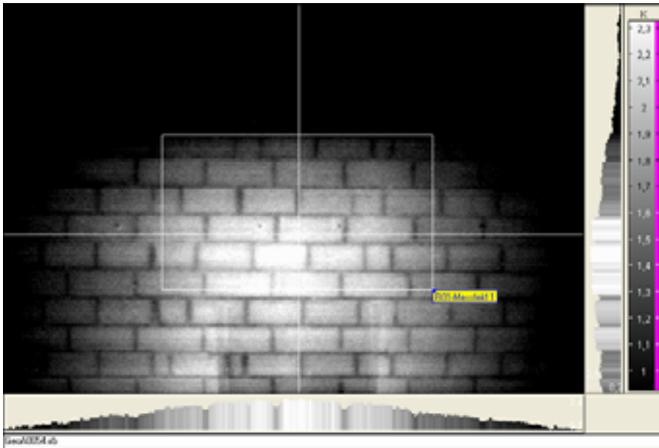
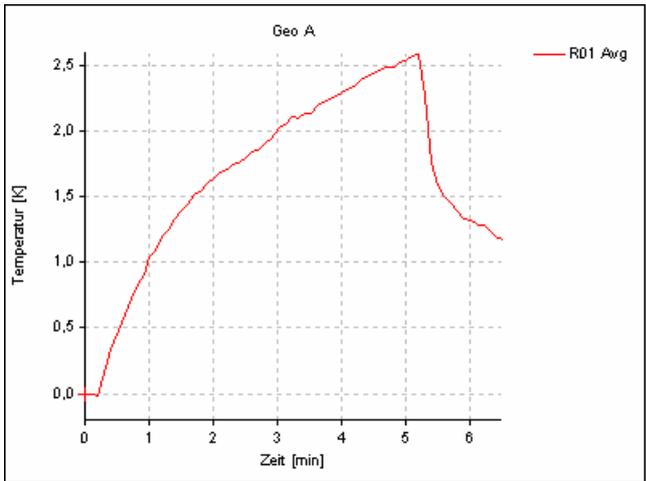
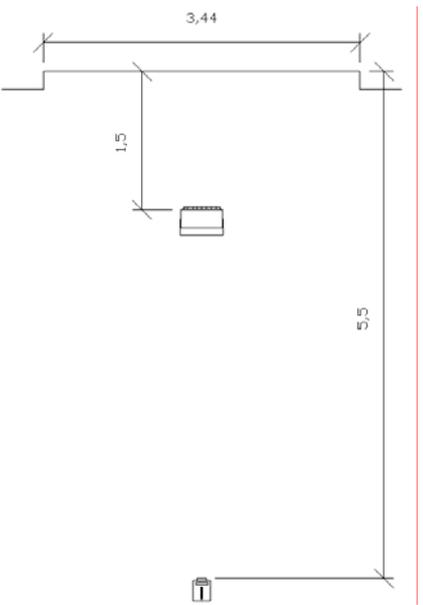
Abb. 13 Infrarotaufnahme in einen aktiven Heizstrahler

Es wurde daraus gefolgert, den Heizlampen in den Versuchen eine Vorlaufzeit von 3 Minuten zu geben. So wurden bei den Versuchen und Objektuntersuchungen die Strahler zusammen mit allem anderen aufgebaut und ausgerichtet. Zumeist wurden bei Versuchsbeginn die Strahler angeschaltet aber abgedeckt bis etwa 3 min später die volle gleichmäßige Heizleistung erreicht war. Dann wurde die Abdeckung weggenommen und je nach Versuch in regelmäßigen Abständen wieder vorgeschoben.

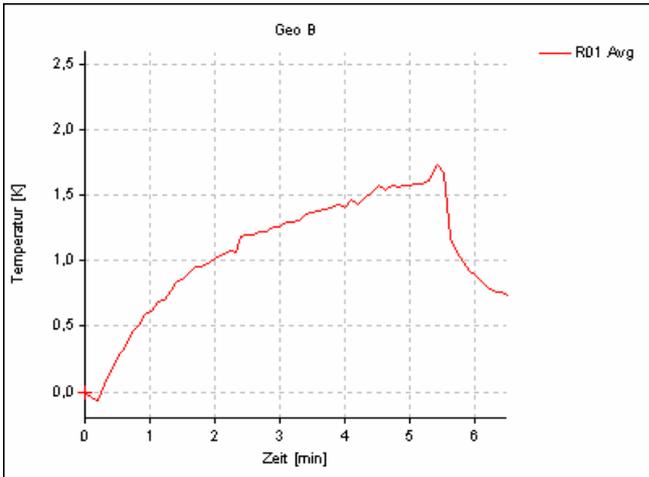
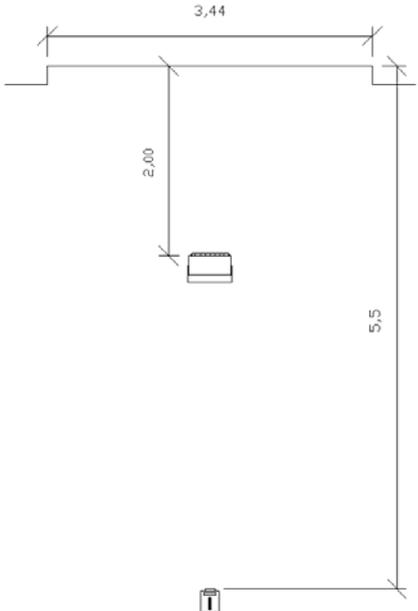
4.3.4.2 Versuchsreihe I

Der Versuchsaufbau ist in jedem Versuch mit einer Zeichnung skizziert. Die Infrarotkamera wurde fix in 5,5 m Entfernung zur Wand aufgestellt. In mehreren ausgewählten Abständen zwischen 1,50 m bis 5,00 m von der Wand, erfolgte einer Erwärmung der Oberfläche mit einem Heizstrahler, der rechtwinklig auf die Wand gerichtet war. Die Aufheizphase betrug 5 min, daran schloss sich eine zweiminütige Abkühlungsphase, zu den der ausgeschaltete Strahler weggenommen wurde. Ein Abdecken oder Pulsen erfolgte nicht. Im gesamten Versuchsablauf wurde mit Hilfe der Infrarotkamera alle 5 sec ein Bild aufgezeichnet.

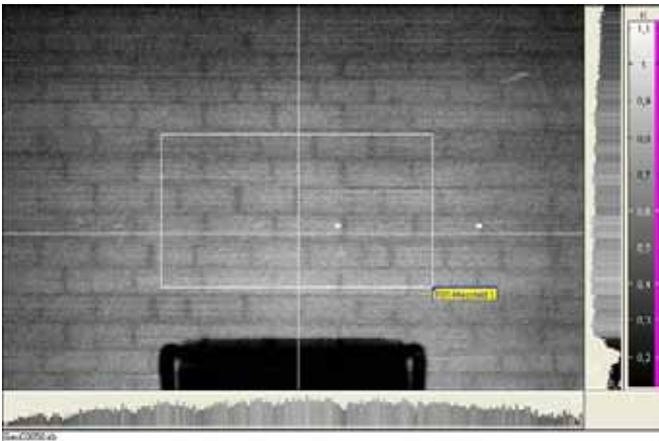
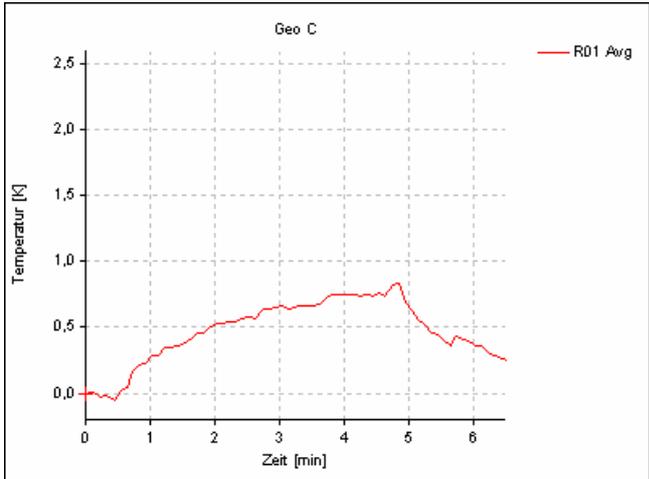
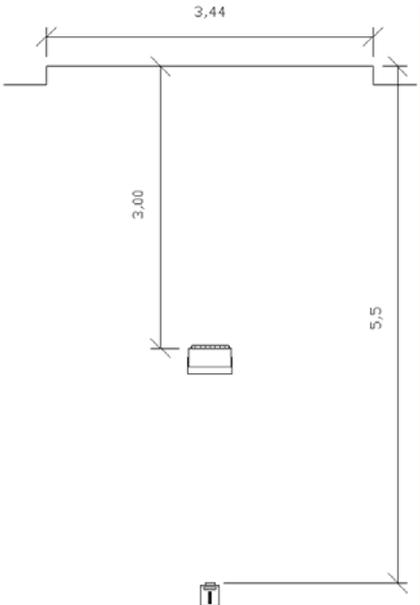
Versuchsreihe I

<p>Versuchsaufbau Geo A:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,50 m - Kamerahöhe: 1,15 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 1,50 m - rechtwinklige Anstrahlung der Wandoberfläche - 1 Heizstrahler mittig mit 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,24m, h=0,71m - Fläche Messfeld R01: 0,88 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Während der 5-minütigen Aufheizung der Wandoberfläche, kam es im Messfeld R01 zu einer durchschnittlichen Aufheizung von ca. 2,5 K (incl. Reflektion). Der Maximalwert ist nach 5 min noch nicht erreicht. Wie die in Abb. 14 rechts und unten angelegten Temperaturprofile zeigen, kommt es nicht zu einer gleichmäßigen Erwärmung des Messfeldes. Die Temperatur fällt vom Zentrum stark zu den Rändern des 0,88 m² großen Messfeldes ab.</p>
 <p>Abb. 14 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K</p>	 <p>Abb. 15 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo A</p>
 <p>Abb. 16 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo A bis zum Abschalten des Heizstrahlers</p>	 <p>Abb. 17 Versuchsaufbau Geo A</p>

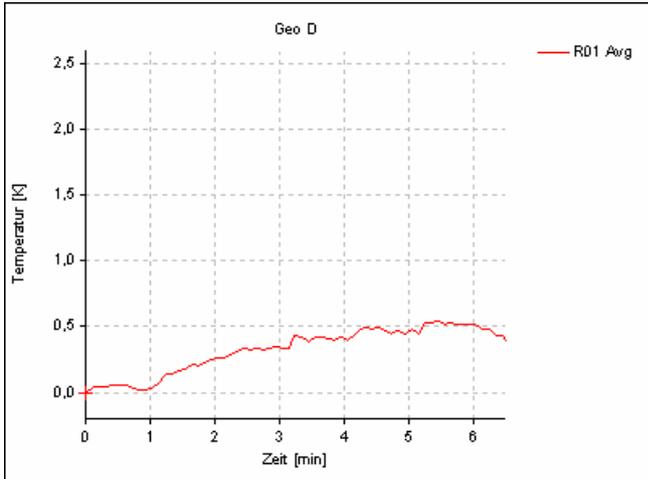
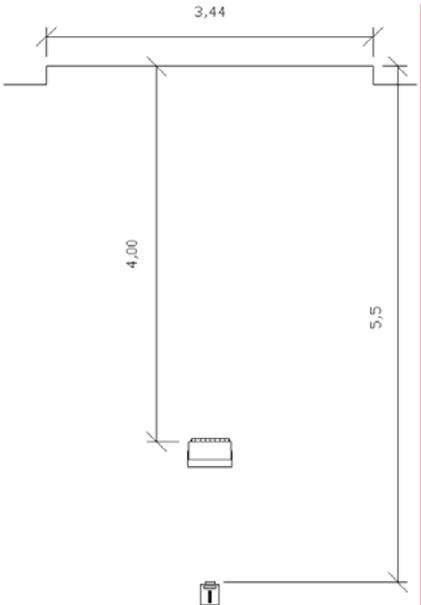
Versuchsreihe I

<p>Versuchsaufbau Geo B:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,50 m - Kamerahöhe: 1,15 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 2,00 m - rechtwinklige Anstrahlung der Wandoberfläche - 1 Heizstrahler mittig mit 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,24m, h=0,71m - Fläche Messfeld R01: 0,88 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Während der 5-minütigen Aufheizung der Wandoberfläche, kam es im Messfeld R01 zu einer durchschnittlichen Aufheizung von ca. 1,7 K. Wie in Abb. 20 zu erkennen, ist nach 5 min kein wesentlicher Temperaturanstieg zu erwarten. Auch bei diesem Versuchsaufbau, kommt es nicht zu einer gleichmäßigen Erwärmung des Messfeldes. Die Temperatur fällt wiederum vom Zentrum zu den Rändern des 0,88 m² großen Messfeldes ab.</p>
 <p>Abb. 18 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K</p>	 <p>Abb. 19 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo B</p>
 <p>Abb. 20 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo B bis zum Abschalten des Heizstrahlers</p>	 <p>Abb. 21 Versuchsaufbau Geo B</p>

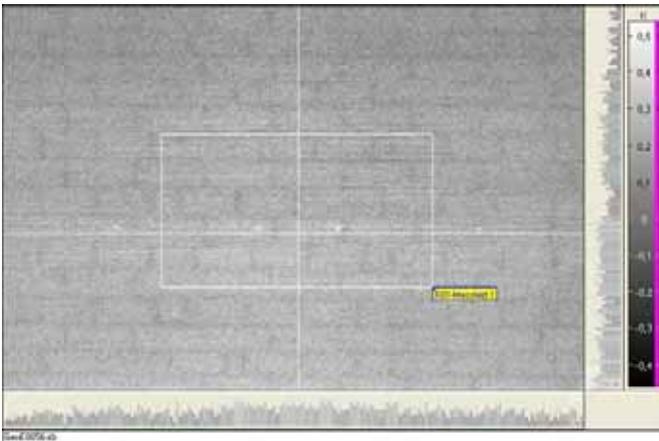
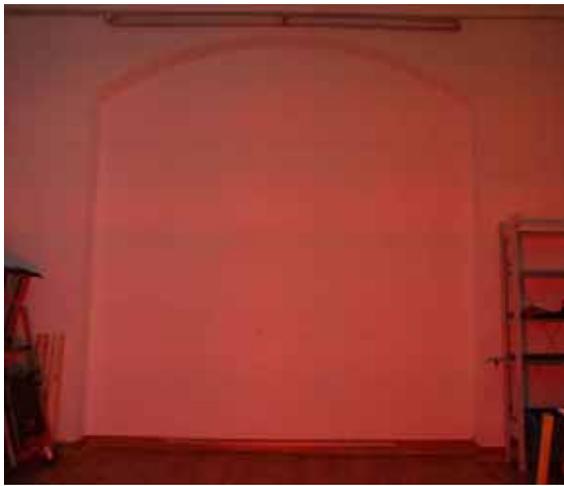
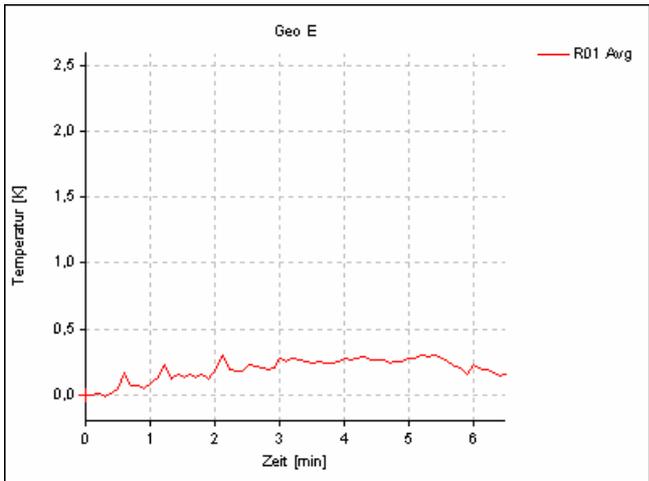
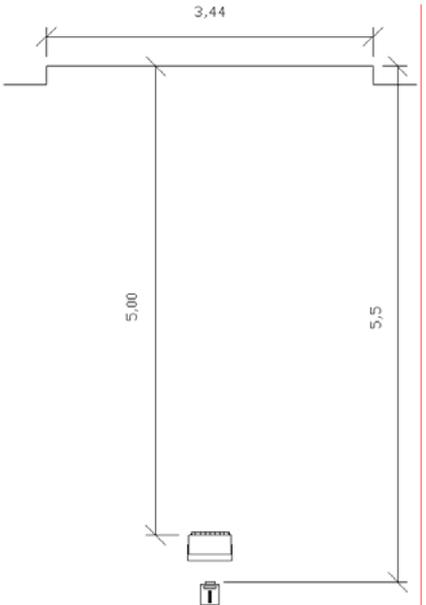
Versuchsreihe I

<p>Versuchsaufbau Geo C:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,50 m - Kamerahöhe: 1,15 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 3,00 m - rechtwinklige Anstrahlung der Wandoberfläche - 1 Heizstrahler mittig mit 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,24m, h=0,71m - Fläche Messfeld R01: 0,88 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei einer 5-minütigen Aufheizung der Wandoberfläche und einem Abstand des Heizstrahlers von 3,00 m, ist im Messfeld R01 noch eine durchschnittliche Aufheizung von ca. 0,8 K messbar. Nach etwa 4 min ist die Maximaltemperatur erreicht. Bei diesem Versuchsaufbau ist eine annähernd gleichmäßige Erwärmung des Messfeldes feststellbar gewesen, wie die angelegten Temperaturprofile in Abb. 22 gut zeigen.</p>
 <p>Abb. 22 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K</p>	 <p>Abb. 23 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo C</p>
 <p>Abb. 24 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo C bis zum Abschalten des Heizstrahlers</p>	 <p>Abb. 25 Versuchsaufbau Geo C</p>

Versuchsreihe I

<p>Versuchsaufbau Geo D:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,50 m - Kamerahöhe: 1,15 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 4,00 m - rechtwinklige Anstrahlung der Wandoberfläche - 1 Heizstrahler mittig mit 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,24m, h=0,71m - Fläche Messfeld R01: 0,88 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei einem Abstand des Heizstrahlers von 4,00 m kommt es auf der weißen Wandoberfläche zu einer gleichmäßig verteilten Erwärmung von ca. 0,5 K. Nach dem Abschalten der Heizstrahler nach 5 min., kam es nicht zu einem plötzlichen Temperaturabfall auf der Wandoberfläche, bedingt durch die geringe Aufheizung der Oberfläche. Deutlich wird im Diagramm, dass eine weitere Erhöhung der Wandoberflächentemperatur mit einem Strahler bei 4,00 m Abstand zur Wand nicht möglich ist.</p>
 <p>Abb. 26 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K</p>	 <p>Abb. 27 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo D</p>
 <p>Abb. 28 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo D bis zum Abschalten des Heizstrahlers</p>	 <p>Abb. 29 Versuchsaufbau Geo D</p>

Versuchsreihe I

<p>Versuchsaufbau Geo E:</p> <p>Kameraentfernung zur Wand: 5,50 m</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kamerahöhe: 1,15 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 5,00 m - rechtwinklige Anstrahlung der Wandoberfläche - 1 Heizstrahler mittig mit 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,24m, h=0,71m - Fläche Messfeld R01: 0,88 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei einem Abstand des Heizstrahlers von 5,00 m, kommt es auf der Wandoberfläche des Messfeldes R01 nur noch zu einer Erwärmung von ca. 0,3 bis 0,4 K. Nach 3 min stellte sich ein Gleichgewicht der Wandoberflächentemperatur ein. Ein weiterer Anstieg ist auch nach über 5 min nicht zu erwarten.</p>
 <p>Abb. 30 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K</p>	 <p>Abb. 31 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo E</p>
 <p>Abb. 32 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo E bis zum Abschalten des Heizstrahlers</p>	 <p>Abb. 33 Versuchsaufbau Geo E</p>

Zur Auswertung der fünf durchgeführten Versuche Geo A bis Geo E aus Versuchsreihe I erfolgte ein Leistungsvergleich anhand des frei gewählten 0,88 m² großen Messfeldes im Bildzentrum der IR-Kamera. Mit der Software der IR-Kamera wurde die durchschnittliche Temperaturdifferenz dieses Messfeldes in K für jedes aufgenommene Bild bestimmt. Dadurch ergeben sich die in Abb. 34 dargestellten Temperaturdifferenzen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wandoberfläche.

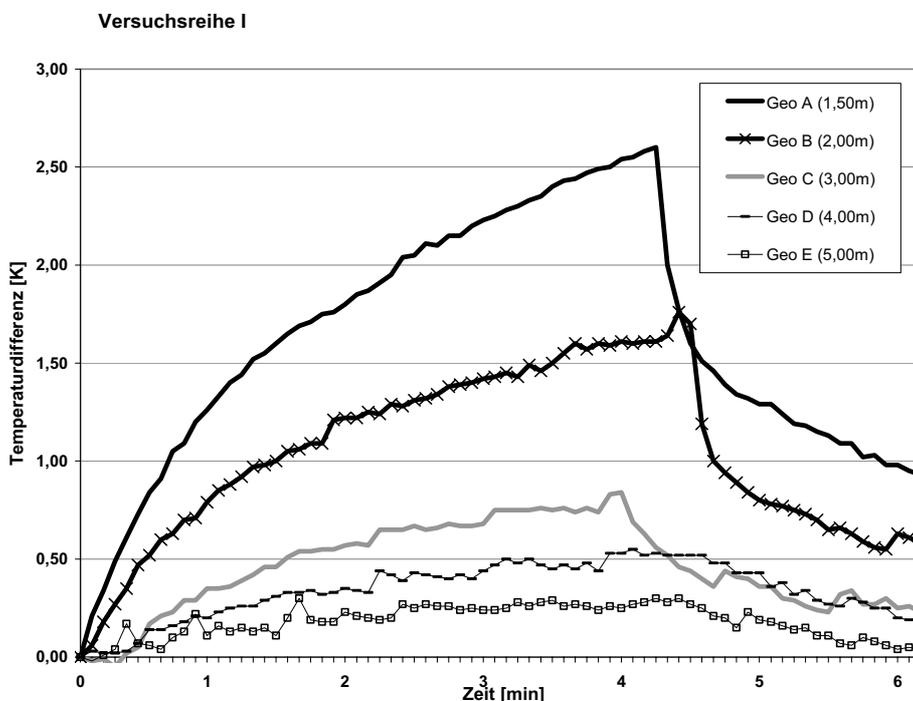


Abb. 34 Abhängigkeit zwischen Erwärmung der Wandoberfläche zur Entfernung der Wärmequelle aller fünf Versuche

Deutlich ist die Entfernungsabhängigkeit der Heizstrahler zur Wandoberfläche zu erkennen. Diese Abhängigkeit zwischen Wandoberflächentemperatur und Abstand des Heizstrahlers zur Wandoberfläche wird auch in Abb. 35 noch einmal verdeutlicht.

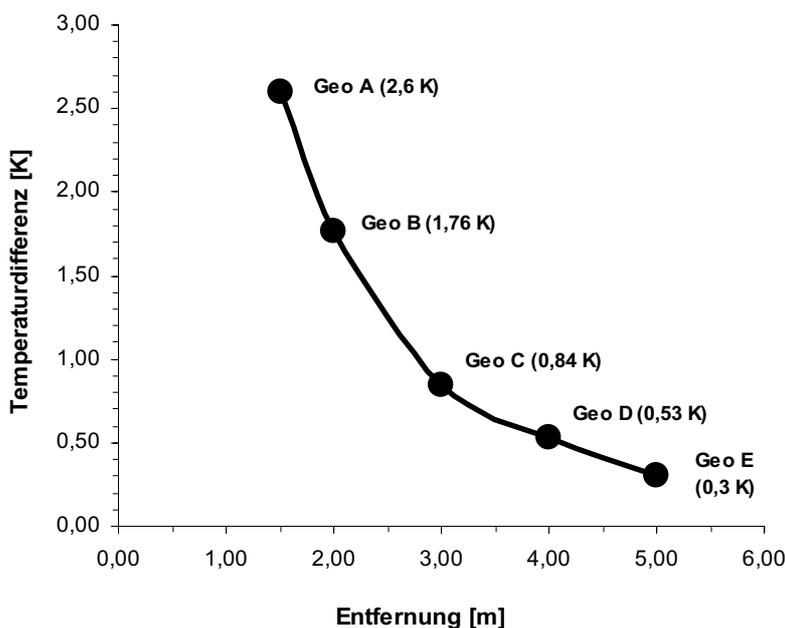


Abb. 35 Abhängigkeit zwischen Abstand der Wärmequelle und Oberflächentemperatur der Versuchswand

Bei Abständen eines Heizstrahlers von über 4 Metern, kommt es zu einer sehr geringen Erwärmung der oberflächennahen Wandbereiche, so dass tiefere Wandbereiche nicht erwärmt werden. Sichtbar wird dies am Beispiel der Versuche Geo D und Geo E, bei denen die Ziegelstruktur unter der 2 mm starken Pinselputzschicht der Wand, kaum mehr sichtbar ist.

Das beim Einsatz nur eines Heizstrahlers die Wandoberfläche sehr ungleichmäßig erwärmt wird, wird bei den Versuchen Geo A und Geo B deutlich erkennbar. Vom Zentrum des Messfeldes fällt die Oberflächentemperatur zu den Bildrändern stark ab.

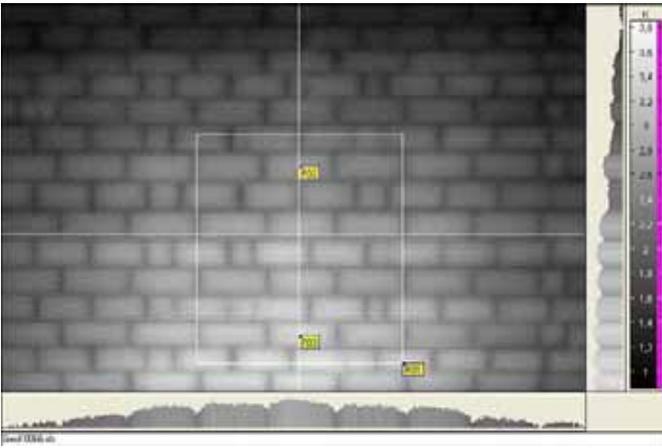
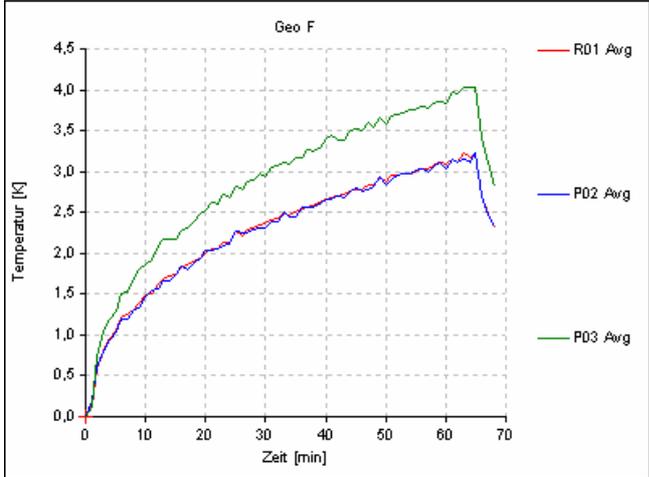
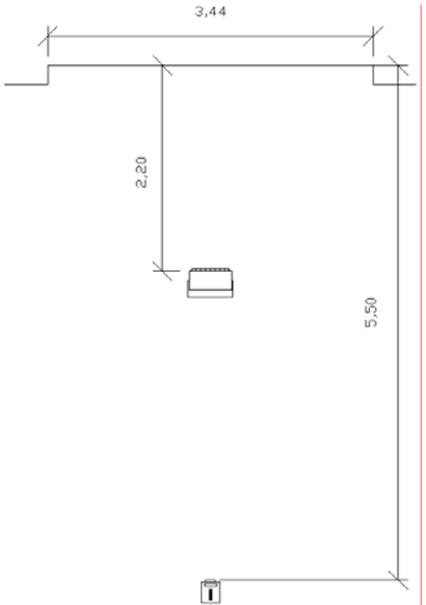
Die Versuchsreihe I zeigt, dass der Einsatz eines einzelnen Heizstrahlers mit 3000 W Leistung unterhalb von 2 m Entfernung eine Untersuchungsfläche nicht gleichmäßig aufheizt. Ein größerer Abstand gewährleistet die Gleichmäßigkeit geht aber gleichzeitig auf Kosten der Intensität, die bei Abständen ab 4 m Entfernung zu gering ist, um tief liegende Wärmeanomalien darstellen zu können.

4.3.4.3 Versuchsreihe II

In der Versuchsreihe II sollte hauptsächlich der Einfluss ermittelt werden, den eine schräge Anstrahlung einer Wandoberfläche durch einen Heizstrahler ausübt. Dazu wurden drei unterschiedliche Stellungen der Heizstrahler gewählt von unten (Geo F), von rechts (Geo I) und von links (Geo K).

Deutlich erkennbar ist, dass es bei einer schrägen und einseitig seitlichen Wärmeanstrahlung einer Wandoberfläche zu einer ungleichmäßigen Erwärmung dieser Oberfläche kommt. Die Temperatur ist an der Oberfläche nah zum Strahler höher als weiter weg davon.

Versuchsreihe II

<p>Versuchsaufbau Geo F:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,50 m - Kamerahöhe: 1,90 m - Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,90 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 60 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 2,20 m - Anstrahlung der Wandoberfläche, mittig, schräg von unten - Abmessung Messfeld R01: l=0,90m, h=1,02m - Fläche Messfeld R01: 0,92 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei einer schrägen Anstrahlung der Wandoberfläche durch eine Wärmequelle, kommt es zu einer ungleichmäßigen Aufheizung dieser Oberfläche. Im Untersuchungsmessfeld R01 wird der untere Wandbereich stärker erwärmt als der obere Wandbereich. Das ist am Temperaturprofil am rechten Bildrand von Abb. 36 deutlich erkennbar. Dort sind auch zwei Punkte gesetzt, deren unterschiedliche Temperaturentwicklung in Abb. 38 dargestellt ist.</p>
 <p>Abb. 36 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K</p>	 <p>Abb. 37 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo F</p>
 <p>Abb. 38 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo F bis zum Abschalten des Heizstrahlers</p>	 <p>Abb. 39 Versuchsaufbau Geo F</p>

Versuchsreihe II

Versuchsaufbau Geo I: <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,00 m - Kamerahöhe: 1,25 m - Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,25 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 2,00 m - Heizstrahler fokussiert auf Bildmittelpunkt - 1 Heizstrahler rechts mit 1 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,70m, h=1,01m - Fläche Messfeld R01: 1,71 m² 	Auswertung: <p>Bei einer einseitigen Anstrahlung des Messfeldes R01 kommt es zu einem stark unterschiedlichen Aufheizen der Wandoberfläche. Zwischen linkem und rechtem Bildrand konnte nach einer Aufheizdauer von 5 min eine Differenz von über 0,6 K ermittelt werden. In Abb. 40 liegen links und rechts zwei Messpunkte, deren Temperaturentwicklung in Abb. 42 neben der Durchschnittstemperatur für das gesamte Messfeld eingetragen ist.</p>
--	---

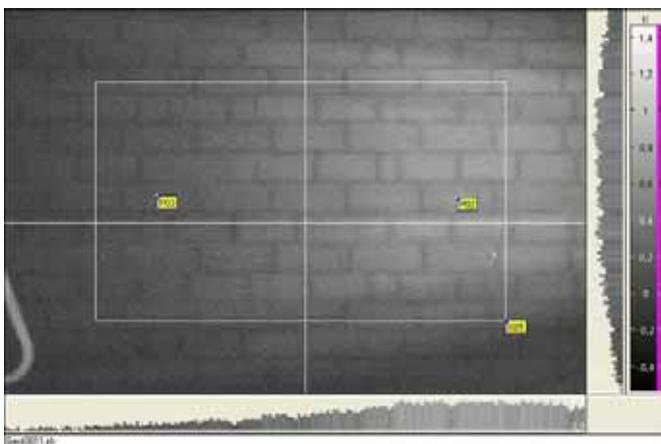


Abb. 40 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K



Abb. 41 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo I

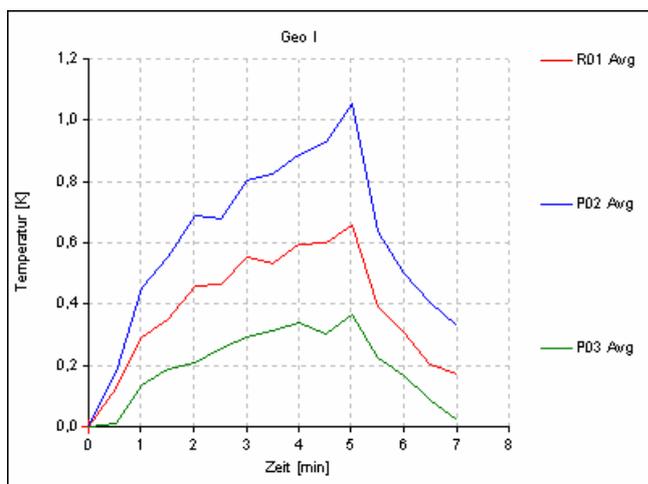


Abb. 42 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo I bis zum Abschalten des Heizstrahlers

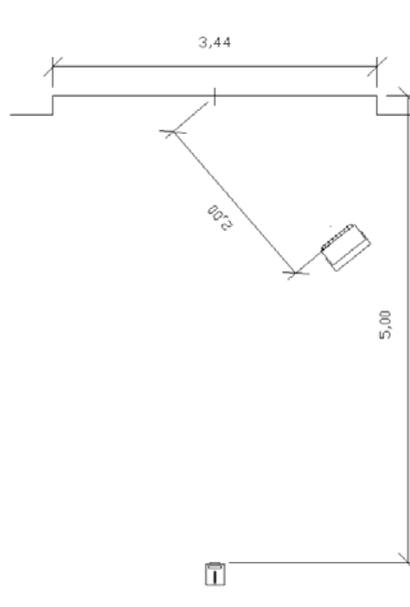


Abb. 43 Versuchsaufbau Geo I

Versuchsreihe II

Versuchsaufbau Geo K: <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,00 m - Kamerahöhe: 1,25 m - Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,25 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 5 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 2,00 m - Heizstrahler fokussiert auf Bildmittelpunkt - 1 Heizstrahler links mit 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,70m, h=1,01m - Fläche Messfeld R01: 1,71 m² 	Auswertung: <p>Im Versuch Geo – K erfolgte die Aufheizung von der linken Seite mit der doppelten Heizleistung im Vergleich zu Versuch Geo – I. Nach 5 min stellt sich diesmal eine Differenz zwischen linken und rechten Bildrand von ca. 1,45 K ein.</p>
---	--

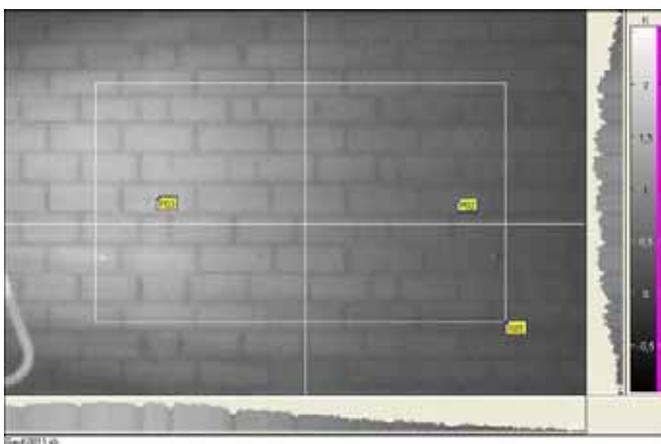


Abb. 44 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K



Abb. 45 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo K

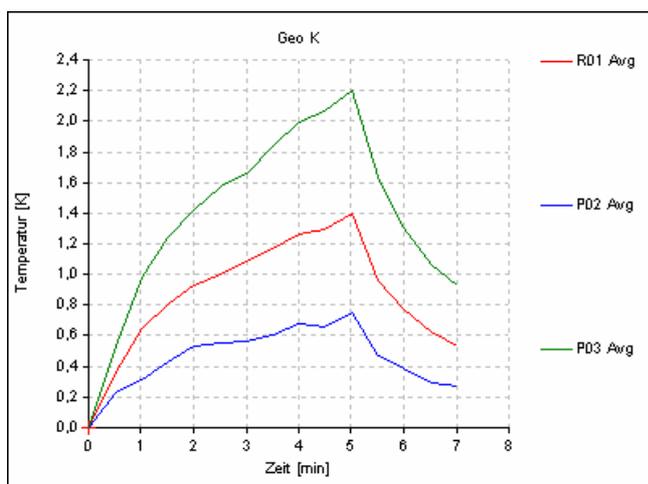


Abb. 46 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo I bis zum Abschalten des Heizstrahlers

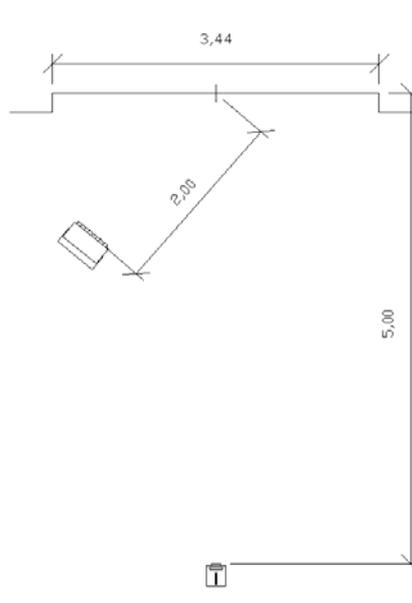


Abb. 47 Versuchsaufbau Geo K

4.3.4.4 Versuchsreihe III

<p>Versuchsaufbau Geo G:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,00 m - Kamerahöhe: 1,25 m - Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,25 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 38 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 2,00 m (Mittelpunkte) - Heizstrahler gekreuzt - 2 Heizstrahler mit je 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,70m, h=1,01m - Fläche Messfeld R01: 1,71 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei diesem Versuchsaufbau, kam es im waagerechten Bereich zu einer relativ gleichmäßigen Erwärmung, im horizontalen Bereich jedoch zu einer ungleichmäßigen Erwärmung. Die Heizstrahler stehen zu nah an der Wand. Nach 38 min konnte eine Temperaturdifferenz von ca. 6 K auf dem Messfeld R01 ermittelt werden.</p> <p>Durch Stromausfall nur eine Aufheizdauer von 38 min.</p>
---	--

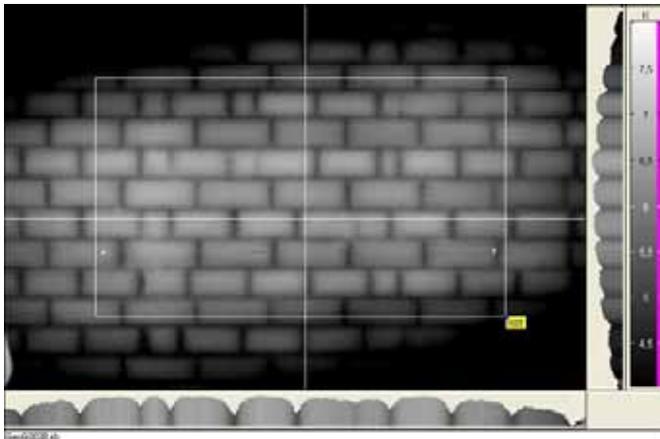


Abb. 48 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K



Abb. 49 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo G

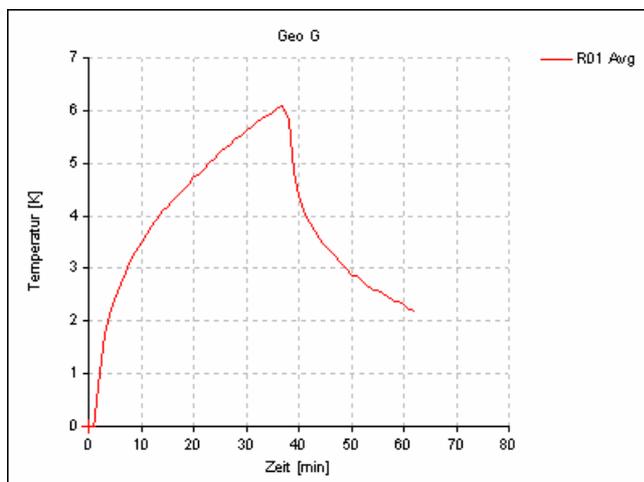


Abb. 50 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo G bis zum Abschalten des Heizstrahlers

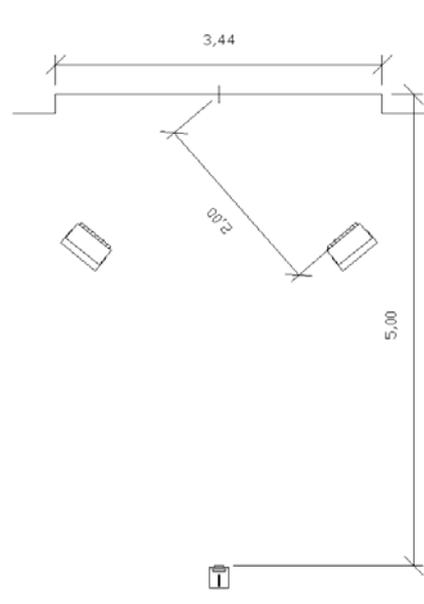


Abb. 51 Versuchsaufbau Geo G

Versuchsreihe III

<p>Versuchsaufbau Geo H:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,00 m - Kamerahöhe: 1,25 m Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,25 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 60 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 2,00 m (Mittelpunkte) - Heizstrahler fokussiert auf Bildmittelpunkt - 2 Heizstrahler mit je 1 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,70m, h=1,01m - Fläche Messfeld R01: 1,71 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Im Gegensatz zum Versuch Geo – G erfolgte die Aufheizung mit der halben Heizleistung. Es stellten sich aber die gleichen Ergebnisse wie im Versuch Geo – G ein: es kommt im waagerechten Bereich zu einer relativ gleichmäßigen Erwärmung, aber im horizontalen Bereich jedoch zu einer ungleichmäßigen Erwärmung.</p> <p>Nach 60 min hat sich das Messfeld R01 um ca. 4 K erwärmt.</p>
---	--

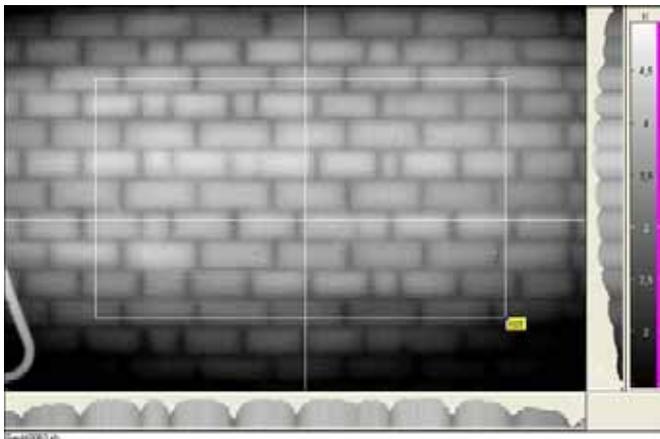


Abb. 52 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K



Abb. 53 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo H

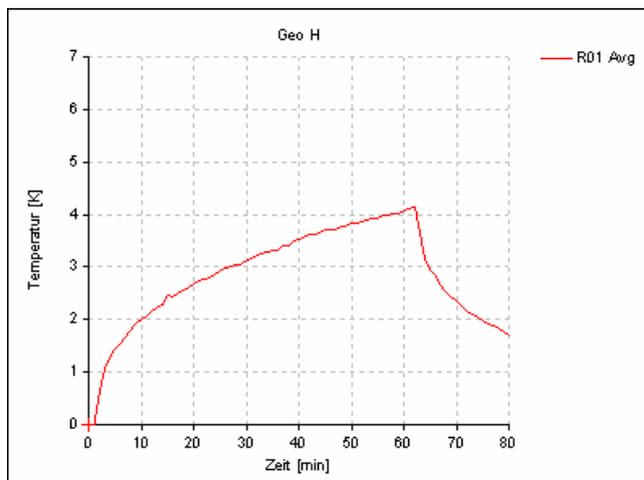


Abb. 54 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo H bis zum Abschalten des Heizstrahlers

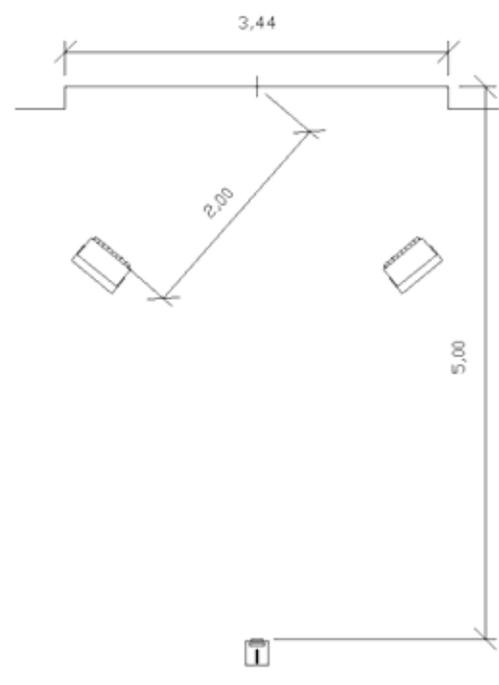


Abb. 55 Versuchsaufbau Geo H

Versuchsreihe III

<p>Versuchsaufbau Geo L:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,00 m - Kamerahöhe: 1,25 m - Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,25 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 60 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 3,48 m - Heizstrahler gerichtet auf Bildmittelpunkt - 2 Heizstrahler mit je 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,70m, h=1,01m - Fläche Messfeld R01: 1,71 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei dieser geometrischen Anordnung der Heiz- und Messgeräte, kommt es zu einer annähernd gleichen Aufheizung der Messfeldes R01. Im lotrechten Mittelteil der Messfeldes R01 überlagern sich jedoch die beiden Heizstrahler, so dass es dort zu einer geringfügig höheren Aufheizung der Wandoberfläche kommt.</p> <p>Nach 60 min Aufheizdauer stellt sich einer Temperaturdifferenz im Messfeld R01 von ca. 3.1 K ein.</p>
---	--

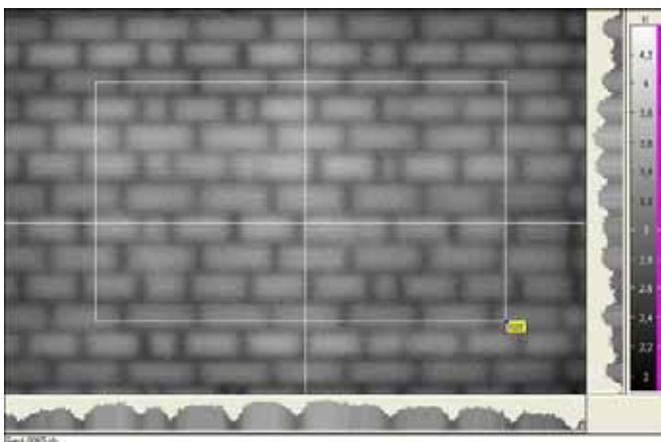


Abb. 56 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K



Abb. 57 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo L

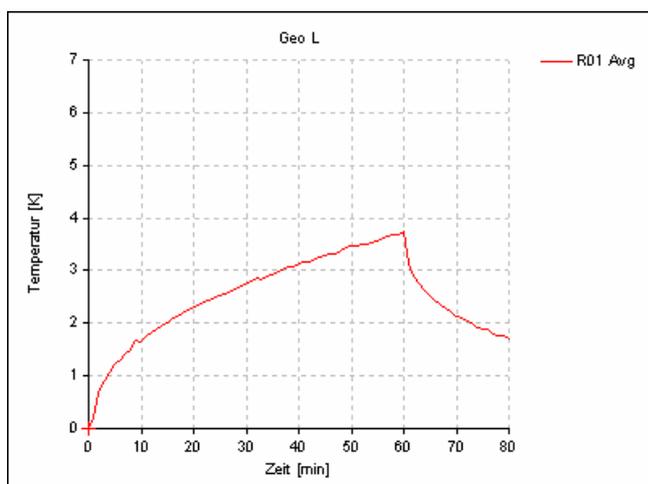


Abb. 58 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo L bis zum Abschalten des Heizstrahlers

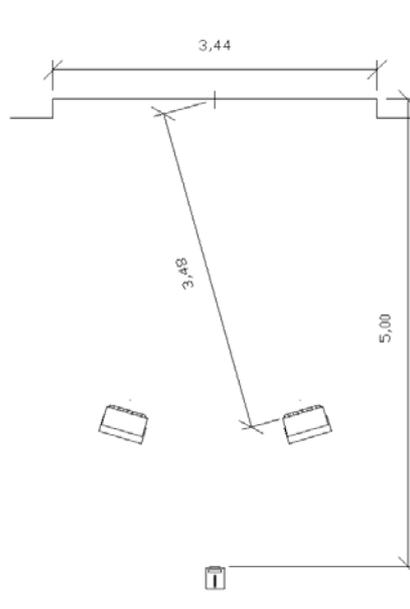


Abb. 59 Versuchsaufbau Geo L

Versuchsreihe III

<p>Versuchsaufbau Geo M:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kameraentfernung zur Wand: 5,00 m - Kamerahöhe: 1,25 m - Bildhöhe (Mittelpunkt): 1,25 m - Aufheizzeit der Wandoberfläche: 55 min - Entfernung des Heizstrahlers zur Wand: 3,85 m - Heizstrahler fokussiert auf Bildmittelpunkt - 2 Heizstrahler mit je 2 x 1500 W - Abmessung Messfeld R01: l=1,70m, h=1,01m - Fläche Messfeld R01: 1,71 m² 	<p>Auswertung:</p> <p>Bei einem Abstand der Heizstrahler von 3,85 zur Wandoberfläche, ist eine Überlagerung des Wärmeeintrages an der Wandoberfläche nicht mehr feststellbar. Es stellt sich im Messfeld R01 eine relativ gleichmäßige Temperaturverteilung ein. Die Temperaturerhöhung der Wandoberfläche lag im Messfeld R01 bei ca. 3 K.</p>
--	--

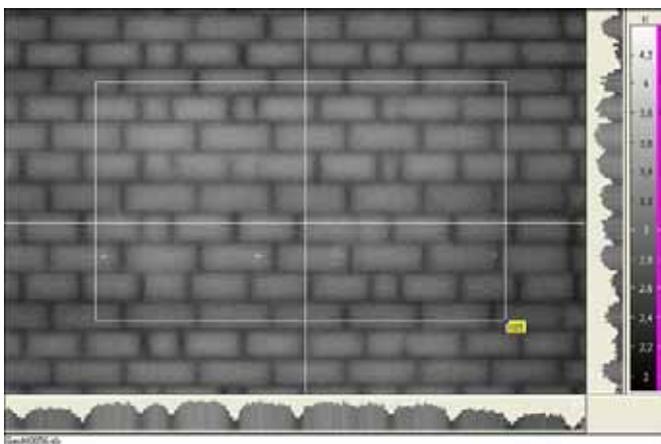


Abb. 60 Differenzbild mit Temperaturdifferenzangaben in K



Abb. 61 Lichtbild der Versuchswand beim Versuchsaufbau Geo M

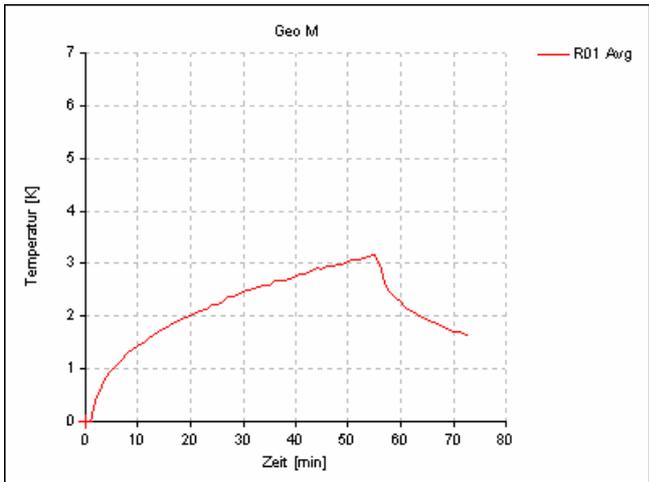


Abb. 62 Temperaturanstieg des Messfeldes R01 von Geo M bis zum Abschalten des Heizstrahlers

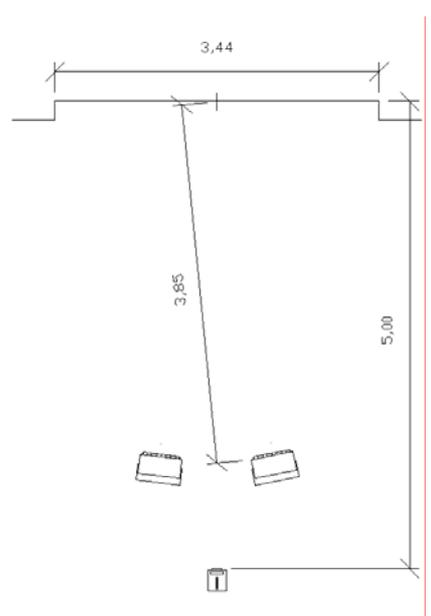


Abb. 63 Versuchsaufbau Geo M

Es konnten vier unterschiedliche Versuche durchgeführt werden, wobei die Versuche Geo G und Geo H bei der folgenden Auswertung nicht weiter berücksichtigt werden. Beim Versuch Geo G kam es nach ca. 35 min wegen Überlastung der Elektroversorgung zu einem Stromausfall, so dass die geplanten 60 min Aufheizphase nicht erreicht werden konnten. Im Versuch Geo H wurden dann der Versuch Geo G mit halber Heizleistung d.h. auch halber Leistungsaufnahme aus der Stromversorgung wiederholt. Bei beiden Versuchen konnte jedoch nicht eine gleichmäßige Erwärmung der ausgewählten Wandoberfläche erreicht werden.

In der Abb. 64 sind die maximal erreichten Temperaturdifferenzen des gewählten Messbereiches für den Versuch Geo L und Geo M dargestellt. Nach einer ca. 55-minütigen Aufheizphase kam es auf der Wandoberfläche zwischen beiden Versuchen zu einem Temperaturunterschied von 0,38 K.

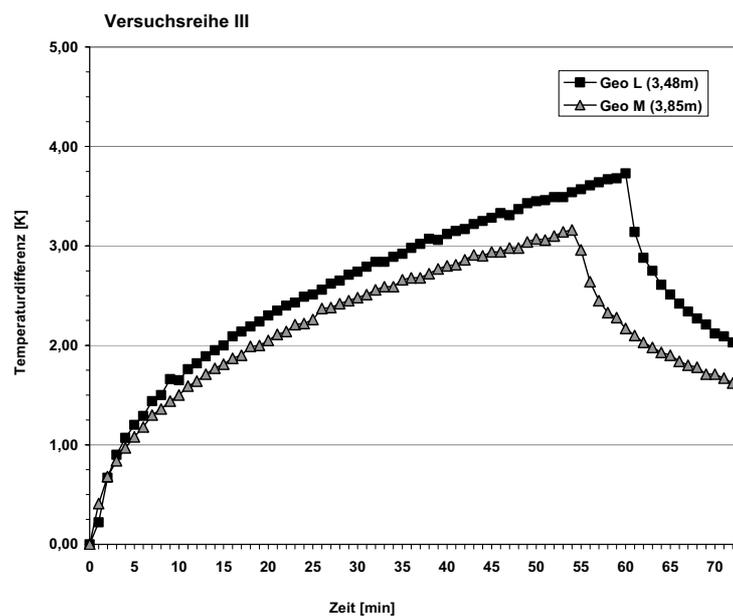


Abb. 64 Vergleich der beiden Aufheizphasen der Versuche Geo L und Geo M

Beim Auswerten der Aufnahmen ist ein wichtiger Unterschied bei der Erwärmung der Wandoberfläche in Abhängigkeit der Konstellation erkennbar. Beim Versuch Geo L erkennt man in der Bildmitte eine Überlagerung der Wärmestrahlung der Heizstrahler, es kommt zu einer stärkeren Erwärmung dieses Wandbereiches. Beim Versuch Geo M, bei denen die Heizstrahler 0,4 m hinter dem Versuch Geo L standen, ist diese Überlagerung nicht mehr zu erkennen, der Messbereich mit einer Fläche von 1,71 m² und die angrenzenden Wandbereiche sind annähernd gleichmäßig erwärmt.

4.3.4.5 Fazit

Die an der Probenwand durchgeführten Versuche haben gezeigt, wie wichtig die Anordnung der Heizstrahler und der Infrarotkamera zur untersuchenden Wandoberfläche ist. Einzelne Heizstrahler, ob schräg oder rechtwinklig zur Wandoberfläche ausgerichtet, sind für die im Projekt beschriebenen Anforderungen nicht geeignet. Erst der Einsatz von zwei Heizstrahlern aus einer Entfernung von ca. 4,00 m haben Ergebnisse erbracht, die es ermöglichen beim Aufheizen oder Abkühlen Veränderungen an der Wandoberfläche wahrzunehmen, ohne eine stark unterschiedlich erwärmte Wandoberfläche zu berücksichtigen. An der untersuchten Probenwand stellte sich eine ideale geometrische Aufstellung im Versuch Geo M ein.

Die Versuche konnten auch deutlich machen, wie in den gewählten Konstellationen Temperaturen von unter 6 K auf der weißen Wandoberfläche erreicht werden. Dieser Temperaturbereich wird zu-

nächst als unproblematisch für die Oberflächen der Wandmalereien eingeschätzt. Eine gefährdende Veränderung an den sensiblen Oberflächen der Wandmalereien ist nicht zu erwarten. Andererseits sind Erwärmungen der Oberflächen in diesem Temperaturbereich ausreichend, um Tiefeninformationen zu erhalten. Das zeigt sich bei diesen Versuchen deutlich daran, dass die Mauerwerksstruktur der Wand unter dem Putz in den Infrarotthermographieaufnahmen deutlich erkennbar ist.

Bei einer Entfernung der Infrarotkamera von 5,00 m, sollten die beiden Heizstrahler einen Abstand zur Wand von ca. 3,50 m bis 4,00 m aufweisen. Beide Heizstrahler werden auf den Bildmittelpunkt des zu untersuchenden Messfeldes gerichtet. Damit entsteht bei den verwendeten Messgeräten und Heizstrahlern ein Messfeld von der Größe 2,00 m in der Breite und 1,50 m in der Höhe.

4.4 Herstellung der Probekörper

Für die Probekörperherstellung wurde eine Rezeptur auf Basis eines Feinkornbetons mit einem Portlandzement als Bindemittel sowie einem Zuschlag aus Feinsand und einem Leichtzuschlag aus Blähglaskugeln verwendet. Dadurch sollte erreicht werden, dass der Probekörper annähernd die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit eines mittelalterlichen Putzes bei gleichzeitig ausreichend hoher Festigkeit aufweist. Mit einer Festkörperdichte von $1,85 \text{ kg/dm}^3$ wurde ein sehr gut angenäherter Wert zu einem mittelalterlichen Putzmörtel erreicht. Die verwendete Rezeptur ist in Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3 Zusammensetzung der Probekörper Prk-1 bis Prk-3

Material	Bezeichnung/Hersteller	Menge
Zement	Schwenk CEM I 32,5 R	3,00 kg
Sand:	Euroquarz 0-1 mm Grube Ottendorf-Okrilla	2,21 kg
Leichtzuschlag:	Liaver 0,25-0,50 mm	0,39 kg
Wasser		1,00 kg

Die Probekörper wurden in einer Form mit den Maßen $0,70 \times 0,40 \text{ m}$ hergestellt. Die Dicke variiert zwischen 7 cm für Prk-2 und 8 cm für die beiden anderen. Prk-1 und Prk-3 wurden abschließend nur dünn beschichtet. Auf Prk-2 wurden Mörtelmusterflächen aufgebracht, so dass sich die Endschichtdicken wieder entsprechen.

4.5 Probekörper 1, Pigmente

4.5.1 Aufbau Probekörper 1, verwendete Pigmente

Da die Absorption von Wärmestrahlung von der Farbe der Oberfläche abhängt wurde der Einfluss von Malschichten auf die Erwärmung einer Wandoberfläche untersucht. Der Probekörper (Abb. 65) wurde wie in Abb. 66 schematisch dargestellt in 15 gleich große Felder eingeteilt, die eine Abmessung von jeweils 11 x 11 cm aufweisen. Auf jedes dieser Felder wurde eine Oberflächenbeschichtung aufgebracht.



Abb. 65 Probekörper 1 mit verschiedenen pigmentbeschichteten Feldern

Dabei wurden Pigmente und Pigmentzusammensetzungen eingesetzt, die für mittelalterliche Wandmalereien typisch sind. Zudem wurde die Auswahl im 15. Musterfeld durch eine Gold- und eine Silberbeschichtung ergänzt. Bei der Auswahl und der Anbringung der Farben in original historischen Techniken stand das Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Abteilung Restaurierung hilfreich zur Seite.

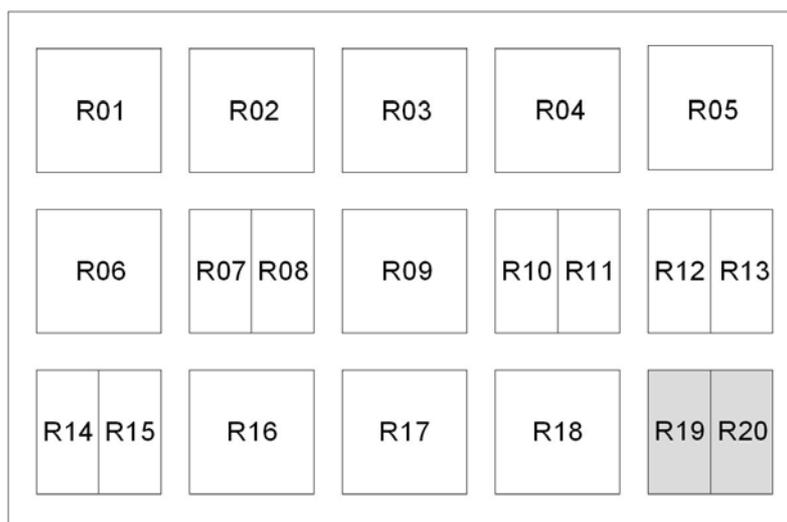


Abb. 66 Nummerierung der Musterflächen auf Probekörper 1

Arbeitsschritte der Pigmenterstellung

Zunächst wurde auf den 8 cm starken Probekörper aus Leichtbeton ein Kalkanstrich mit Sumpfkalk in etwa 10 dünnen Schichten aufgebracht. In dieser Zeit wurden die Pigmente zu folgenden Verhältnissen eingesumpft:

~10ml Wasser + 1 Löffel Pigment + einige Tropfen Ethanol

Als Bindemittel wurden entweder Leim ~10ml oder CaCO_3 ~10ml zu den Pigmenten hinzu gefügt. Der Farbauftrag erfolgte 2 bis 3 mal mit dem Pinsel. Das Herstellen der Veneda erfolgte aus einer Holzkohleausmischung mit Lichtem Ocker und etwas Kalk zum 1. Anstrich (Hellgraue Färbung) und derselben Zusammensetzung und Elfenbeinschwarz zum 2. Anstrich (Dunkelgraue Färbung). Eine 12h-Mixtion wurde in einem dünnen Auftrag für die Ölvergoldung und die Versilberung mit dem Pinsel aufgebracht.

Tab. 4 verwendete Pigmente

Nr.	Pigment, Farbe	Hersteller, Bemerkungen
R01 a	Kalk	Kremer
R01 b	Bleiweiß	
R01 c	Lithopone	
R02	Neapelgelb hell	Schminke
R03	Lichter Ocker	Schminke
R04	Goldocker gebr. in ~10ml Thylose MH 300 (10%)	Schminke
R05	Terra Pozzuoli (Eisenoxidrot)	Schminke
R06	Bleimennige	
R07	Zinnober unterlegt mit Terra Pozzuoli	
R07	Zinnober	
R09	Böhmische Grüne Erde	Schminke
R10	Malachit in Klucel E, (Klucel E in Alkohol und Methylcellulose in Wasser 1:1)	Schminke (Klucel)
R11	Chromoxidgrün	Schminke
R12	natürliches Azurit mit Veneda (Untermalung grau)	
R13	künstliches Azurit (Mischung aus I+II grob und fein)	Kremer
R14	Smalte mit Veneda	Kremer
R15	Smalte mit Veneda und künstlichem Azurit1 in Thylose MH 300	Kremer
R16	Umbra natur	Schminke
R17	Rebschwarz	schon angeteigt
R18	Elfenbeinschwarz in Thylose MH 300	Schminke
R19	Vergoldung mit Tempera unterlegt Lichter Ocker 110347	Nerchau
R20	Versilberung auf Elfenbeinschwarz 110360	Nerchau

4.5.2 Versuchsdurchführung am Probekörper 1

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 67 skizziert und in Abb. 68 dargestellt. Die beiden Infrarotheizstrahler wurden mit einem Abstand von 3,2 m auf den Probekörper Prk-1 ausgerichtet, um eine möglichst homogene Erwärmung der Oberfläche zu erreichen. Der Versuchsaufbau, mit den dargestellten Abständen und Entfernungen, folgt den Ergebnissen der Voruntersuchungen zur Geometrie und Leistung der Heizstrahler. Die Heizleistung der beiden Heizstrahler entsprach jeweils 2x 1500 Watt, also zusammen 6000 Watt.

Die Versuchsdurchführung ist darauf ausgerichtet, den Einfluss unterschiedlicher Adsorptionskoeffizienten der verschiedenen mittelalterlichen Pigmente abzuschätzen. Die metallischen Oberflächen der Gold- und Silberbeschichtung (R19, R20) haben erwartungsgemäß ein sehr stark unterschiedliches Adsorptionsverhalten im Vergleich zu den mineralischen Pigmentfarben. Infrarotstrahlung wird an metallischen Oberflächen stark reflektiert. Da die im Rahmen des Projektes untersuchten mittelalterlichen Wandmalereien keine metallischen Anteile in ihren Polychromie aufweisen und zudem größere Herausforderungen bei der Interpretation von gemessenen Oberflächentemperaturen zu erwarten waren, wurde zunächst auf eine Auswertung der Gold- und Silberbeschichtung von Probekörper I verzichtet.

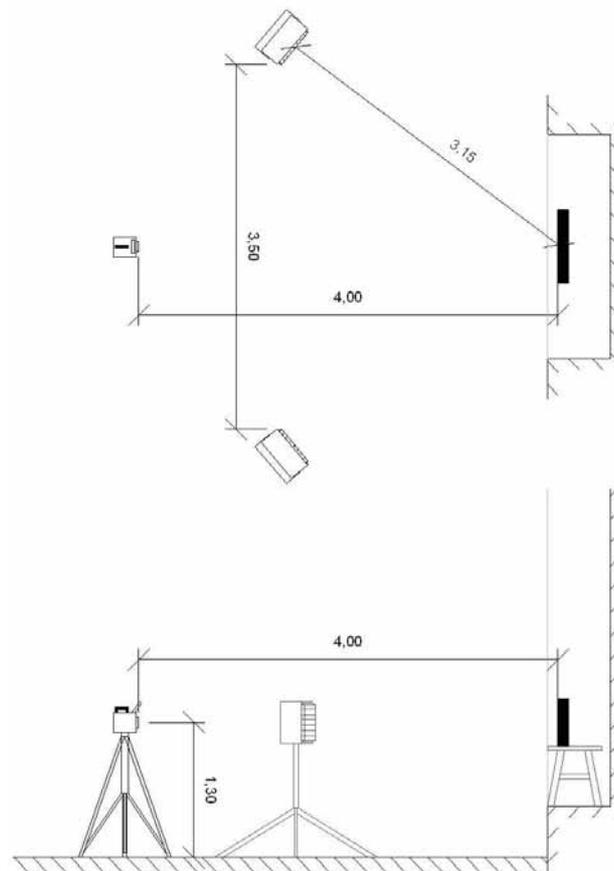


Abb. 67 Aufbau des Versuches Probekörper 1, schematisch



Abb. 68 Aufbau des Versuches mit Probekörper 1

In einem festgelegten Rhythmus wurden während des Versuches die Heizstrahler abgedeckt. Dadurch ließen sich die Reflektionsanteile der Strahlerleistung an den Oberflächen abschirmen. Insgesamt erfolgte die Erwärmung des Probekörpers über 16 min. Danach wurde noch eine Abkühlungsphase beobachtet. Alle 15 sec wurde eine IR-Aufnahme gemacht, wobei jede 4., also im Rythmus von 1 min, die Heizstrahler abgedeckt wurden. Die Erwärmungskurven in Abb. 69 zeigen ein deutliches Sägezahnmuster.

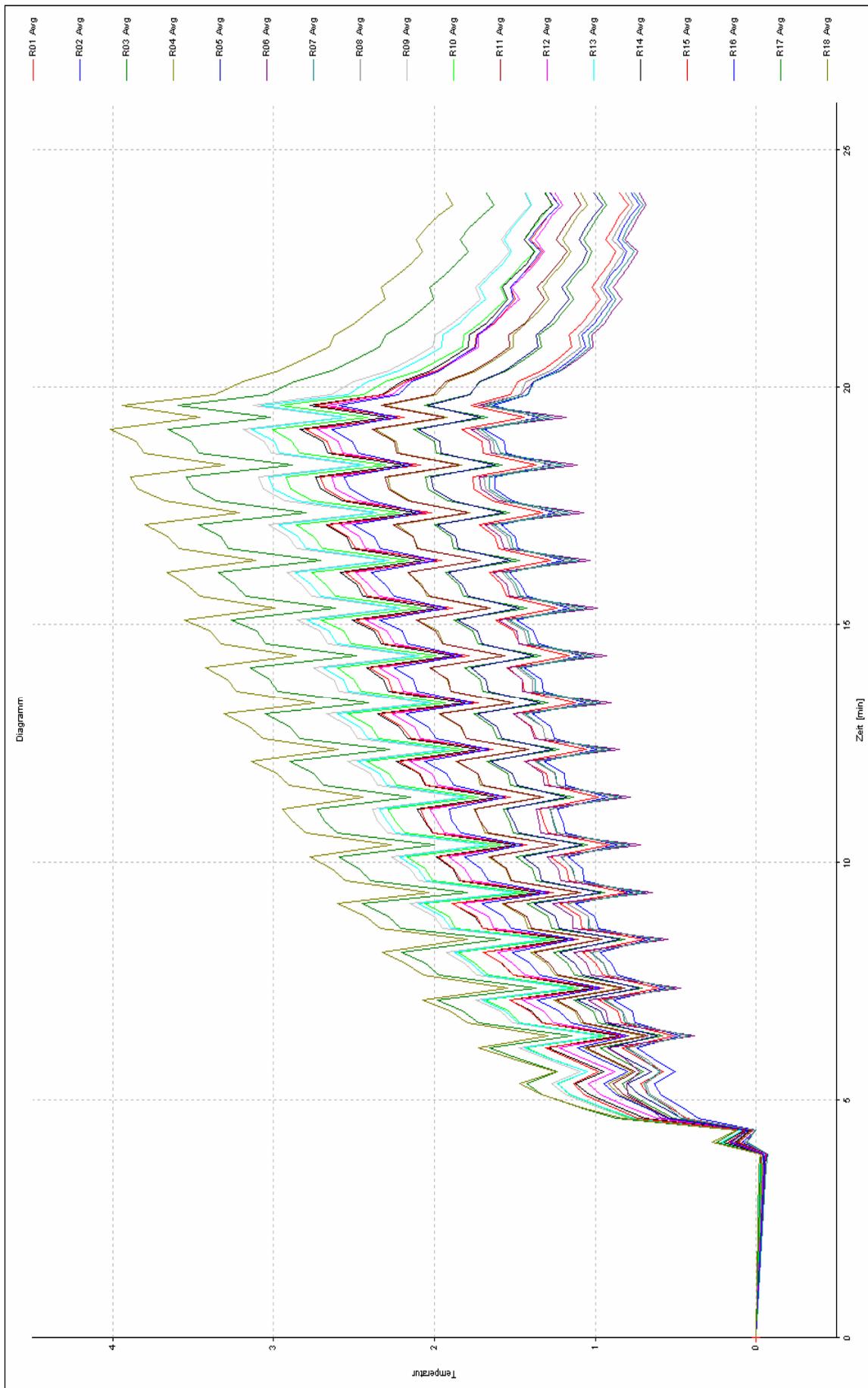


Abb. 69 Sägezahnmuster der kontinuierlichen Versuchsmessung

Bei einem Versuch ergaben sich Temperaturunterschiede zwischen aufgedecktem und abgedecktem Zustand von 0,33 K bis 0,64 K auf den Farbfeldern. Die Musterfläche 15 mit der Vergoldung und der Versilberung wurde in die Auswertung nicht mit einbezogen. Diese Technik wurde nur der Vollständigkeit halber mit in die Musterflächen aufgenommen. An den metallischen Oberflächen war ein hoher Reflektionsanteil von vorn herein zu erwarten. Beim Versuch konnten Temperaturunterschiede zwischen aufgedecktem und abgedecktem Zustand von teilweise über 10 K auf der Vergoldung bzw. Versilberung detektiert werden. Daher kann die Temperatur von metallischen Oberflächen nur unter Berücksichtigung einer aufwendigen Emmissionsgradkorrektur durchgeführt werden. Dieser Versuch sollte allerdings die Wärmeabsorptionseigenschaften von typischen Wandpigmenten einschätzen helfen. Zur Auswertung wurden ausschließlich die Ergebnisse der „abgedeckten“, also von der direkten Strahler-Emmissions-Reflektion eliminierten Aufnahmen heran gezogen.

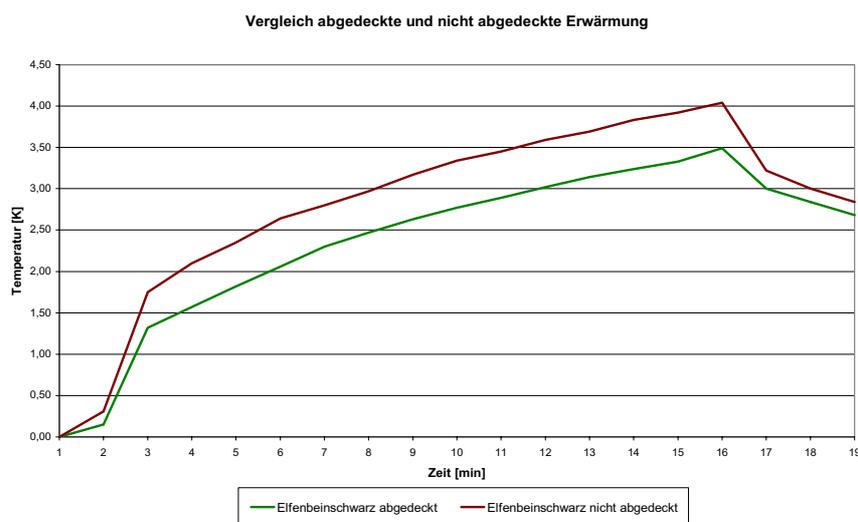


Abb. 70 Vergleich der abgedeckten und nicht abgedeckten Erwärmungskurven am Messfeld R18 Elfenbein schwarz.

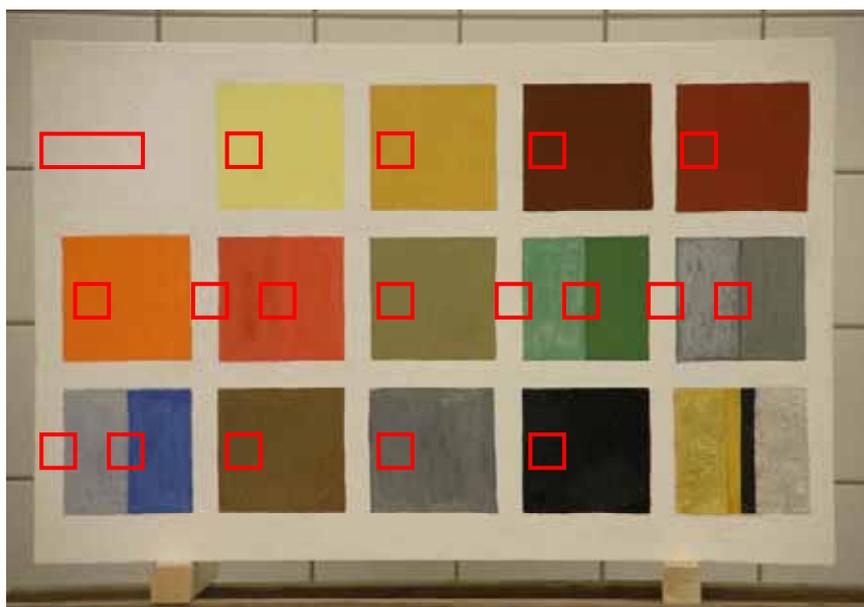


Abb. 71 Probekörper 1 (Prk1) mit einzeichneten Messfeldern

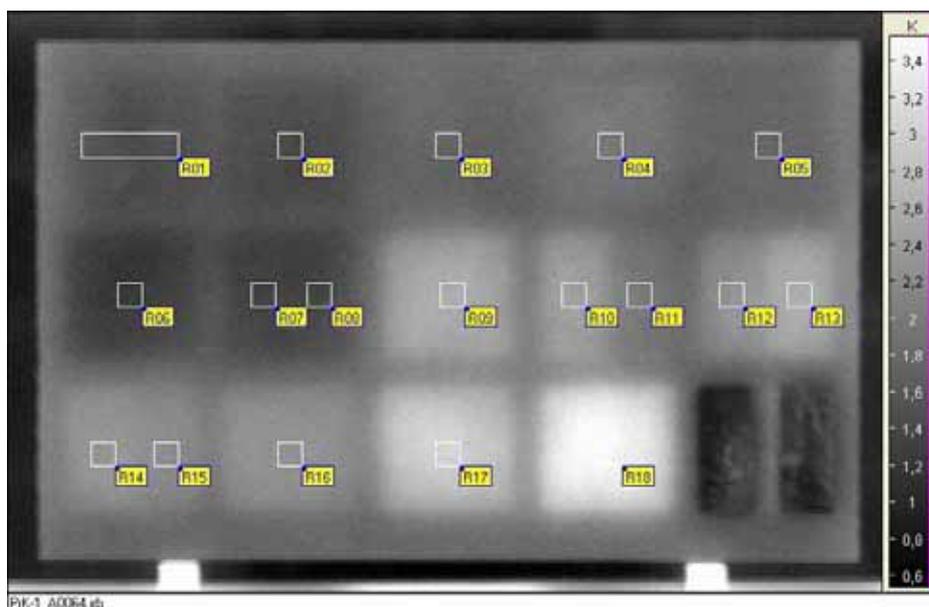


Abb. 72 IR-Aufnahme im Differenzbildmodus von Prk1 mit einzeichneten Messfeldern

Abb. 72 zeigt die IR-Thermographieaufnahme des Probekörpers 1 nach 16 min. Die Darstellung erfolgt im Differenzbild. Dabei sind von allen Punkten (Pixeln) die Grundtemperaturen, die sie zu Beginn des Versuchs hatten, abgezogen. Der Probekörper und seine Oberflächen hatten zu Beginn eine Temperatur von 23,4°C. Die Auswertung erfolgt in den erreichten Temperaturdifferenzen in Kelvin (K). Die höchste Temperaturdifferenz mit 3,5 K wird auf der schwarzen Farbe (Elfenbeinschwarz) auf dem Messpunkt R18 gemessen. Die mit geringste Temperaturdifferenzen 1,5 K und damit mit geringste Wärmeaufnahme zeigt Weiß auf Messfeld R01, integrierend über die nicht unterscheidbaren drei Weißpigmente Kalk, Bleiweiß und Lithopone. Noch darunter liegen aber Neapelgelb hell - Messfeld R02, Bleimennige - Messfeld R06, Zinnober unterlegt mit Terra Pozzuoli – Messfeld 07 und Zinnober – Messfeld 08. Die orangefarbene Bleimennige heizt sich dabei um nur 1,25 K auf.

Erwärmungskurven der Probefelder auf dem Probekörper 1

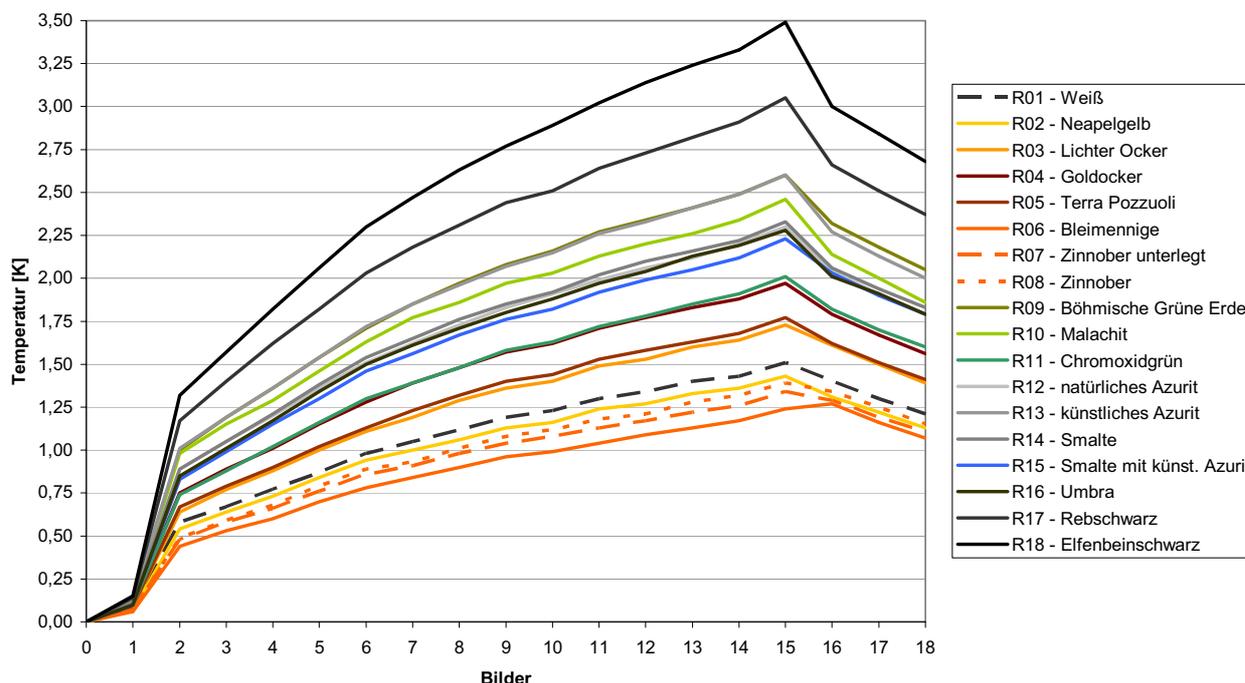


Abb. 73 Erwärmungskuren aller Pigmentflächen, ausschließlich „abgedeckte“ Ergebnisse

4.5.3 Auswertung Ergebnisse Probekörper 1

Es konnten in diesem Versuch eindeutig zwei Abhängigkeiten der Oberflächenbeschichtung aus Pigmenten mit der Wärmestrahlung festgestellt werden. Erstens ist die Strahlungsabsorption deutlich abhängig vom Pigment. Dabei kann der lichteoptisch Eindruck den das menschliche Auge hat, in der Abschätzung täuschen. Es gibt keine direkte Abhängigkeit zwischen der Helligkeit der Farbe und ihrer Wärmeabsorption. Ein rötlicher Farbton erwärmt sich nicht so stark, wie ein grünlicher, blauer oder grauer Farbton, auch wenn diese zunächst dunkler erscheinen. Zweitens ist auch der Reflektionswert der unterschiedlichen Pigmente nicht gleich. Daher kann es notwendig sein, während einer aktiven IR-Untersuchung mit Strahlern den Reflektionsanteil der Oberfläche zu eliminieren. Diese Ergebnisse müssen bei der Auswertung von IR-Aufnahmen zur Hohlstellendetektierung berücksichtigt werden. Drittens wurde auf den direkt angestrahlten Oberflächen in 20 min., gepulst, tatsächliche Temperaturveränderungen von 1,25 K bis 3,5 K hervorgerufen. Temperaturveränderungen in dieser Höhe sind ausreichend um hochauflösend Anomalien im Untergrund zu detektieren ohne sensible Oberflächen dabei zu gefährden.

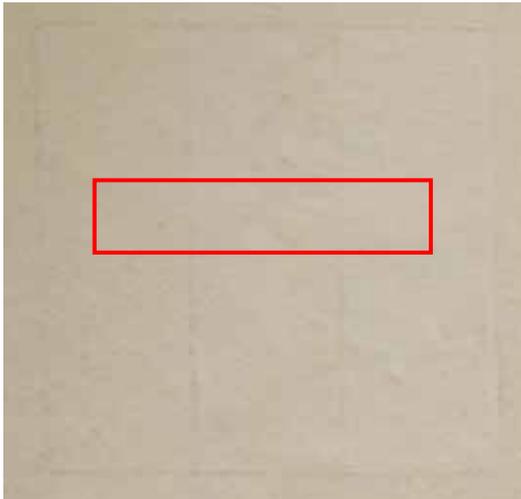


Abb. 74 R01, Kalk, Bleiweiß, Lithopone

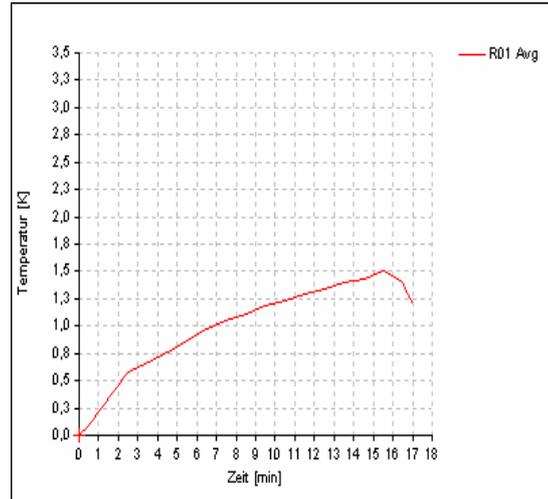


Abb. 75 Erwärmungskurve R01

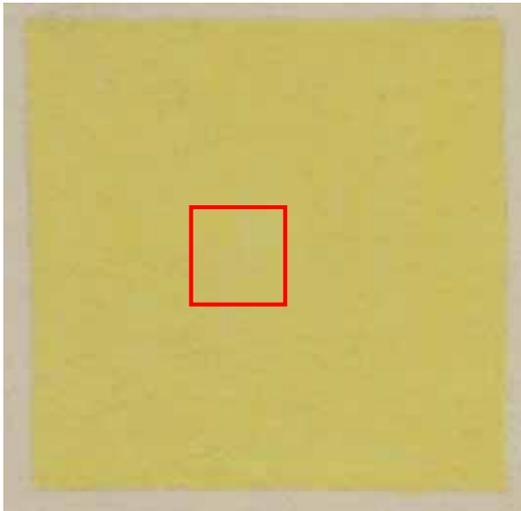


Abb. 76 R02, Neapelgelb hell

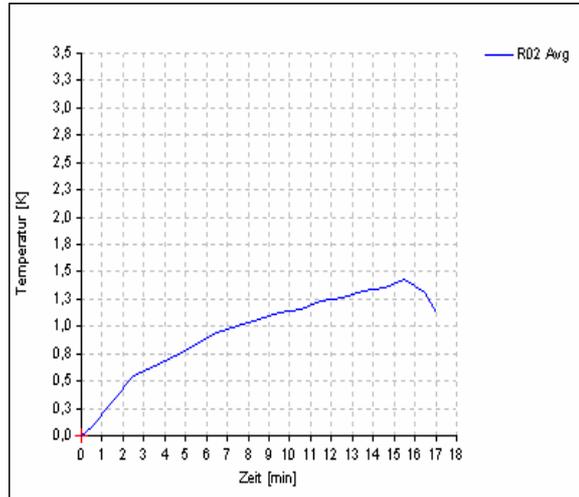


Abb. 77 Erwärmungskurve R02

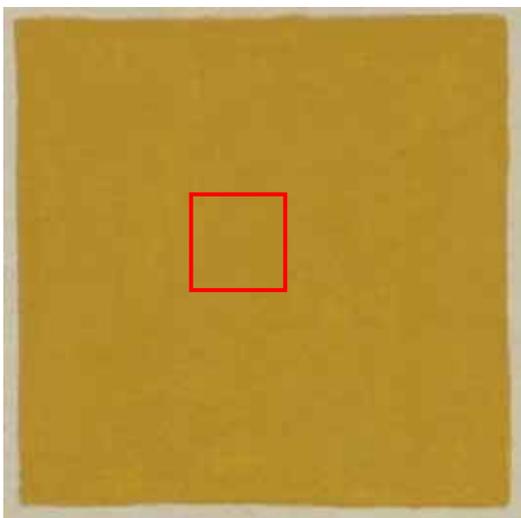


Abb. 78 R03, Lichter Ocker

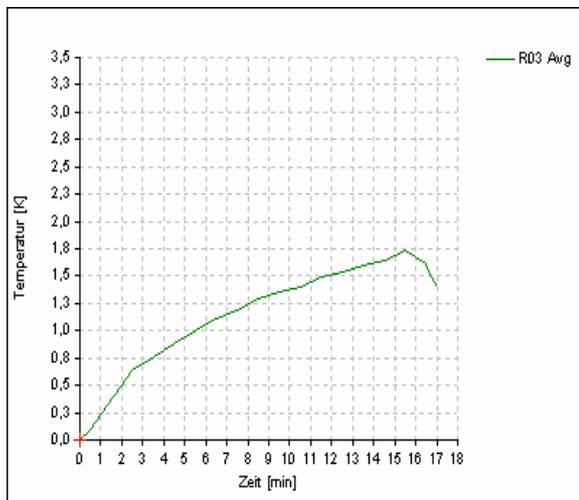


Abb. 79 Erwärmungskurve R03

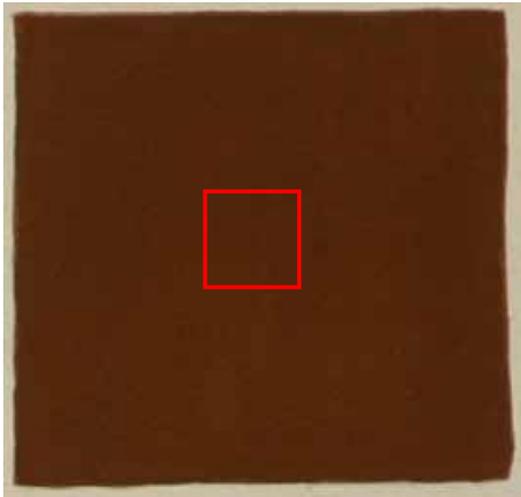


Abb. 80 R04, Goldocker gebr.

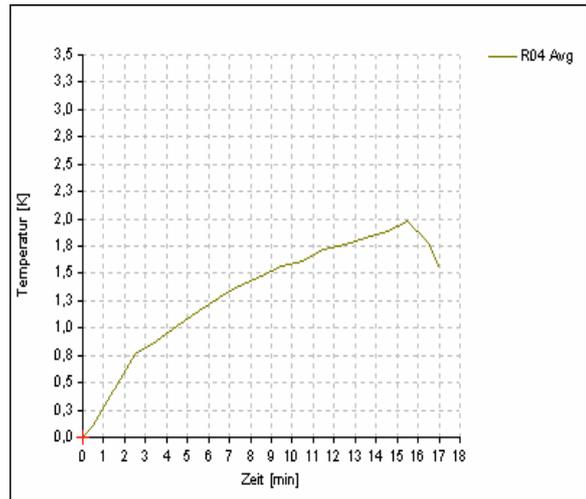


Abb. 81 Erwärmungskurve R04

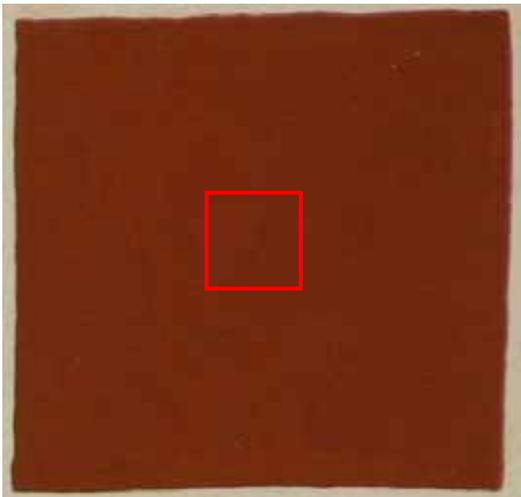


Abb. 82 R05, Terra Pozzuoli

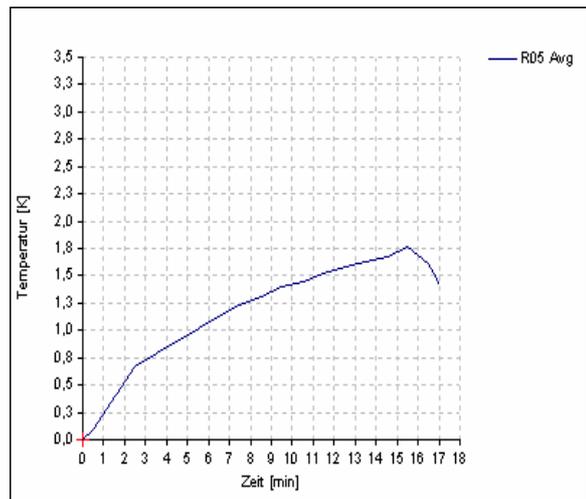


Abb. 83 Erwärmungskurve R05

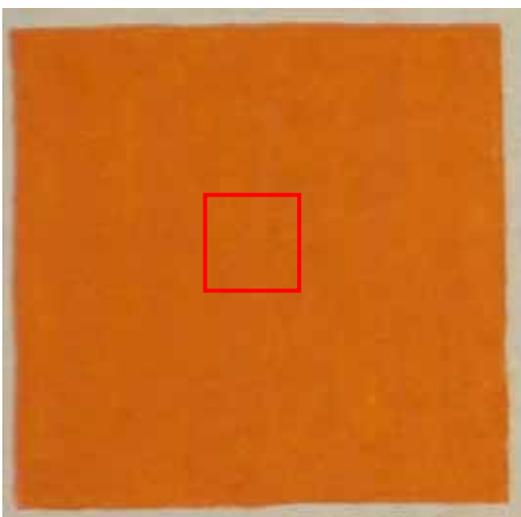


Abb. 84 R06, Bleimennige

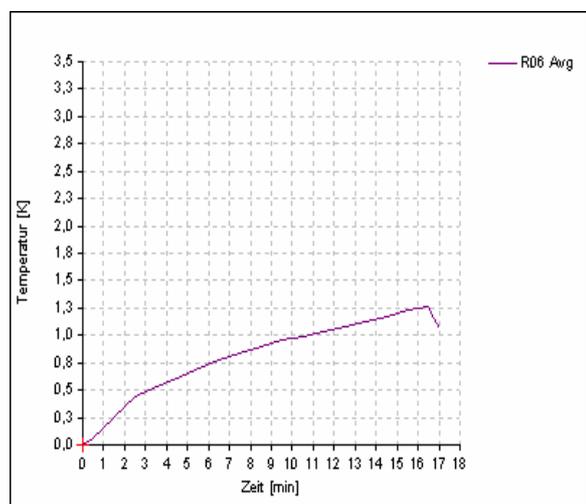


Abb. 85 Erwärmungskurve R06

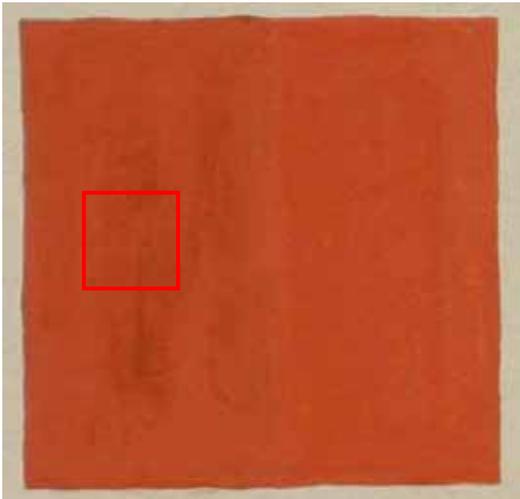


Abb. 86 R07, Zinnober unterlegt mit Terra Pozzuoli

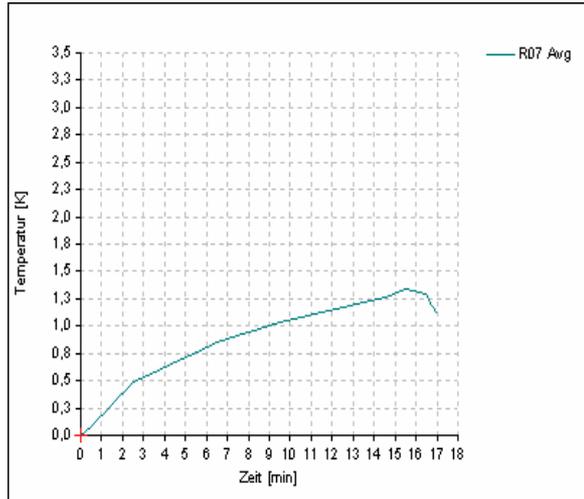


Abb. 87 Erwärmungskurve R07

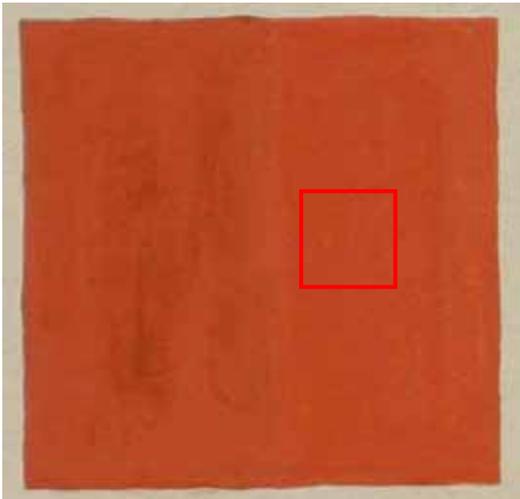


Abb. 88 R08, Zinnober

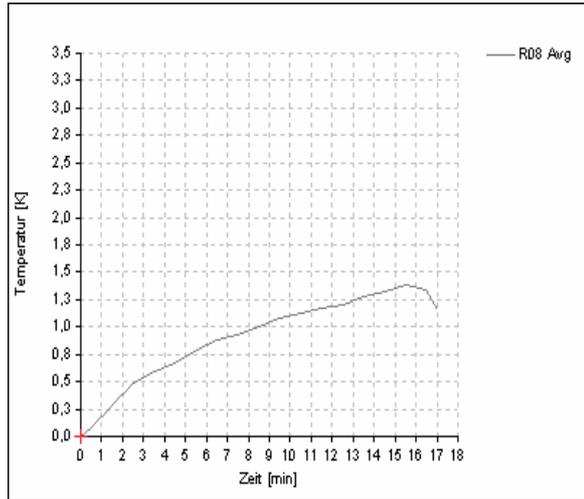


Abb. 89 Erwärmungskurve R08

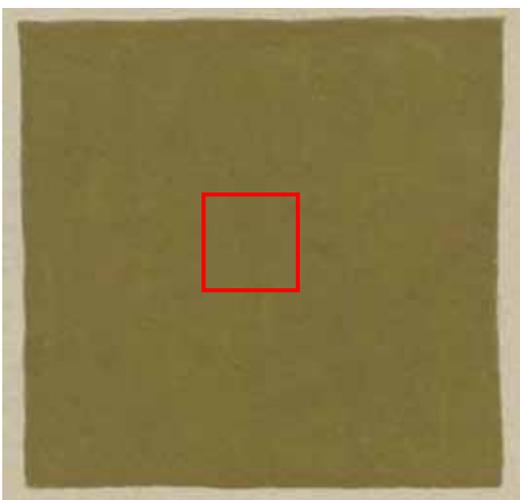


Abb. 90 R09, Böhmisches Grüne Erde

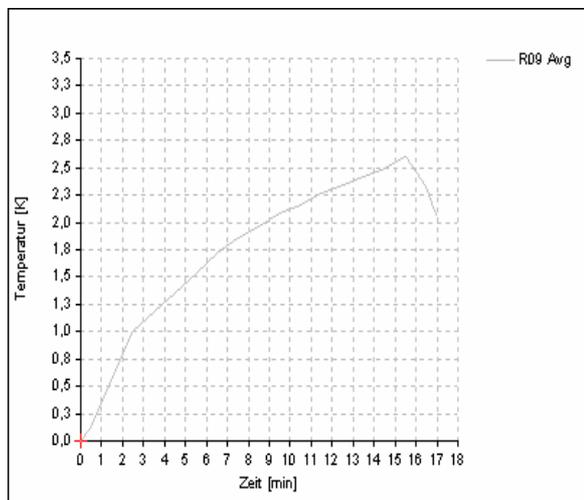


Abb. 91 Erwärmungskurve R09

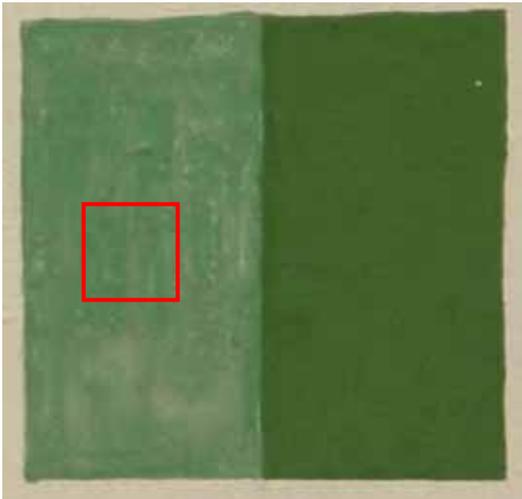


Abb. 92 R10, Malachit in Klucel E

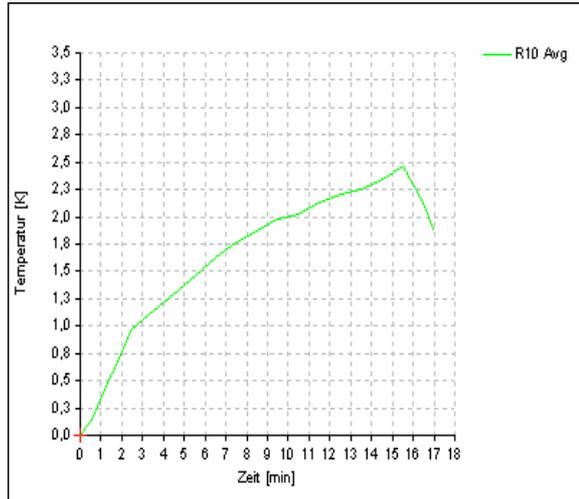


Abb. 93 Erwärmungskurve R10

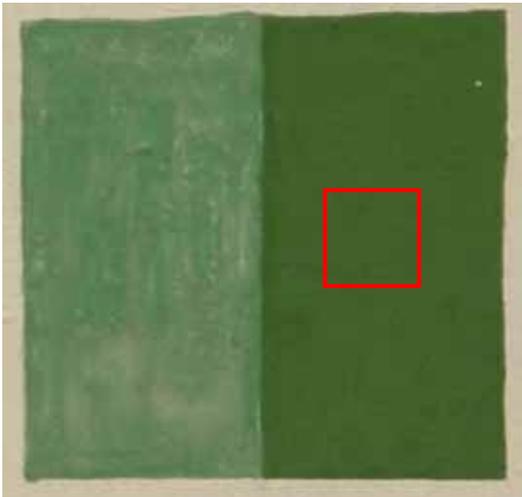


Abb. 94 R11, Chromoxidgrün

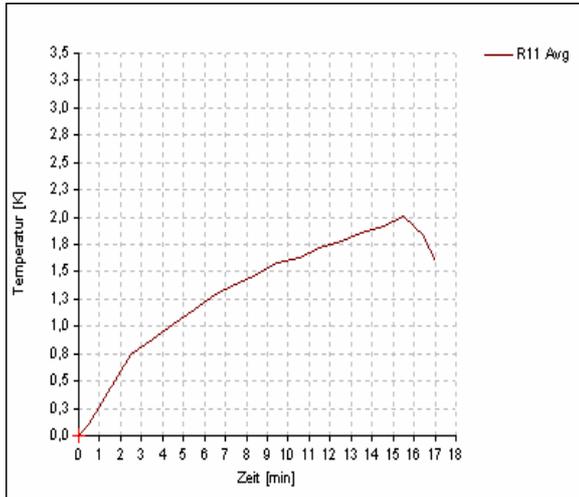


Abb. 95 Erwärmungskurve R11

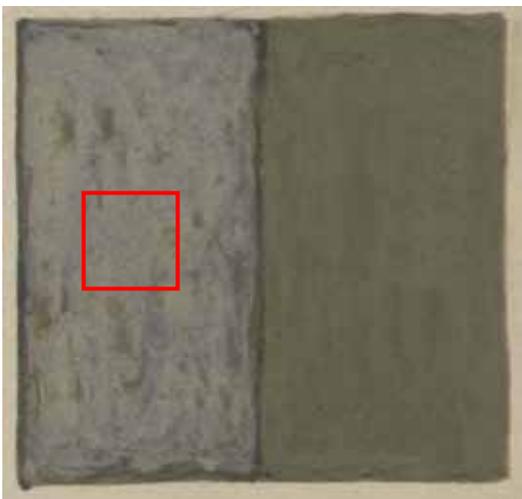


Abb. 96 R12, Natürliches Azurit mit Veneda

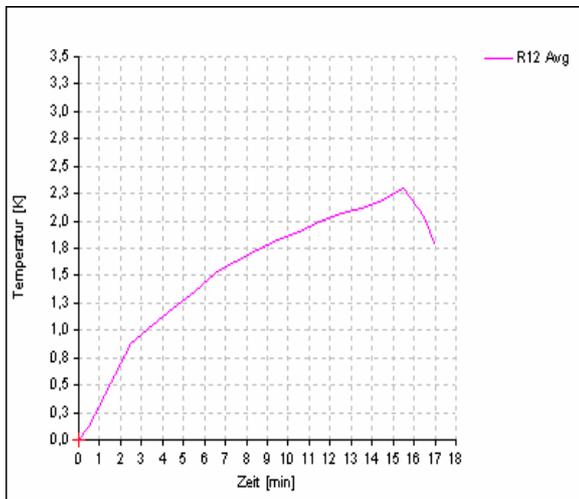


Abb. 97 Erwärmungskurve R12

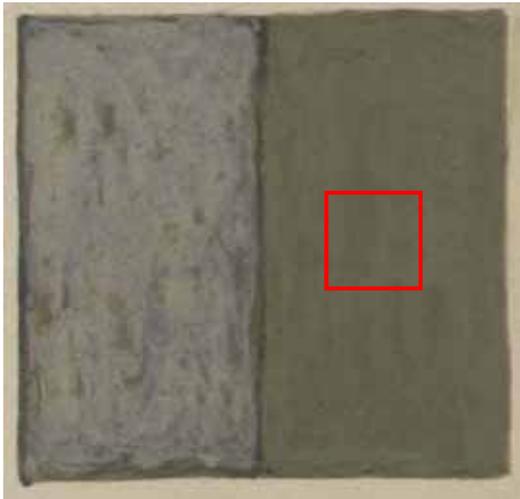


Abb. 98 R13, Künstliches Azurit mit Veneda

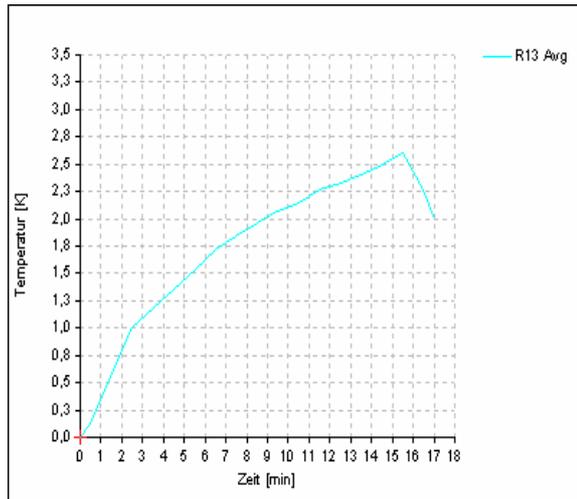


Abb. 99 Erwärmungskurve R13

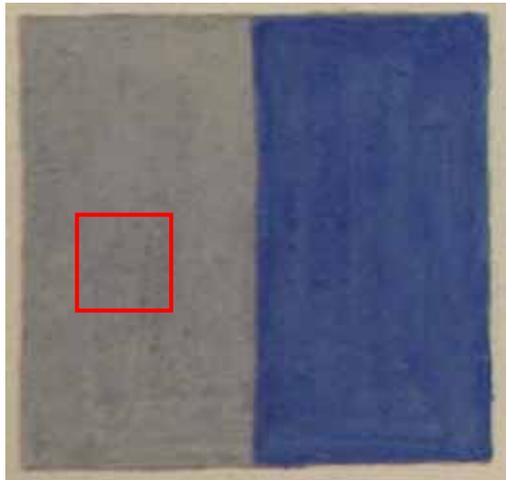


Abb. 100 R14, Smalte mit Veneda

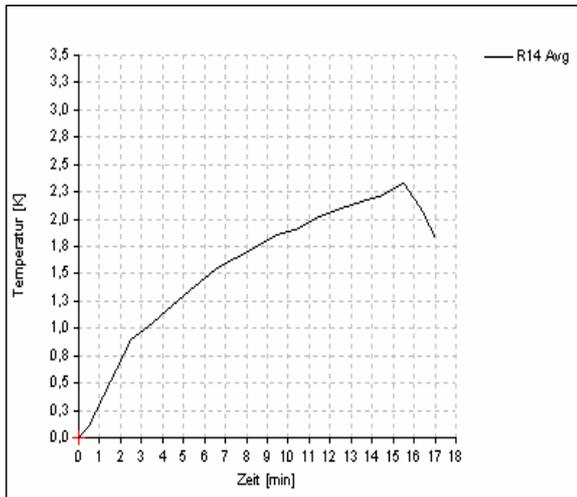


Abb. 101 Erwärmungskurve R14

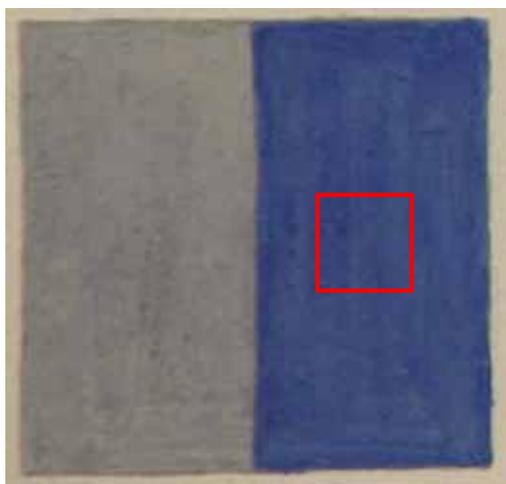


Abb. 102 R15, Smalte mit Veneda und künstl.
Azurit

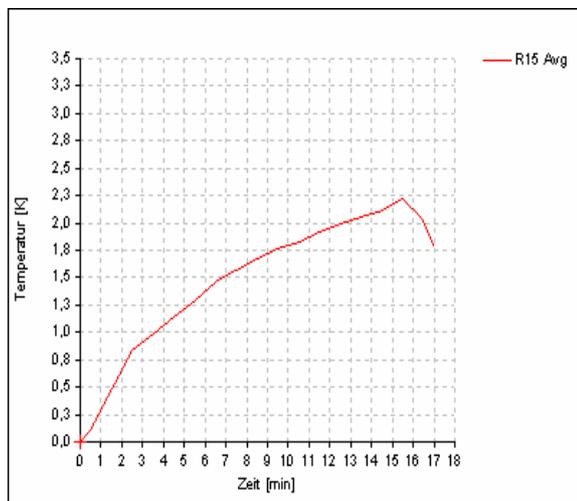


Abb. 103 Erwärmungskurve R15

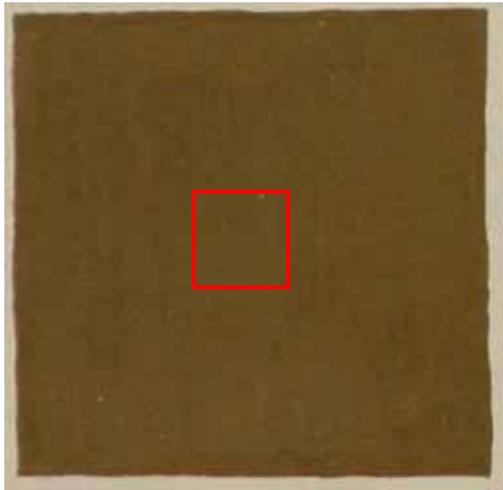


Abb. 104 R16, Umbra natur

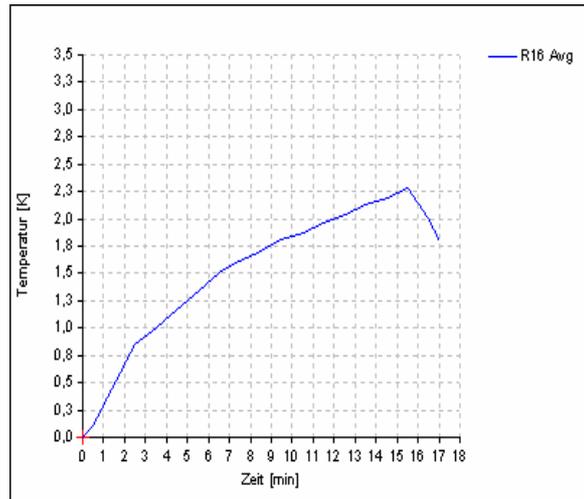


Abb. 105 Erwärmungskurve R16

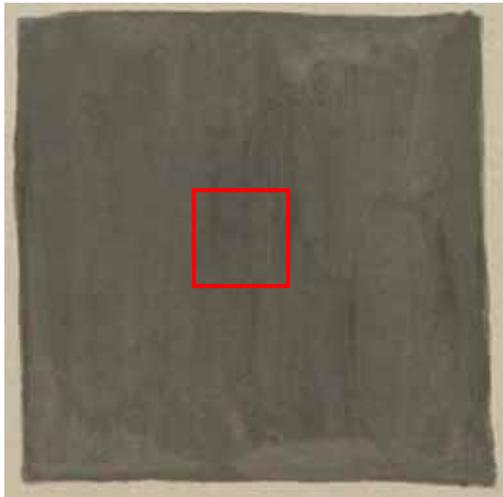


Abb. 106 R17, Rebschwarz

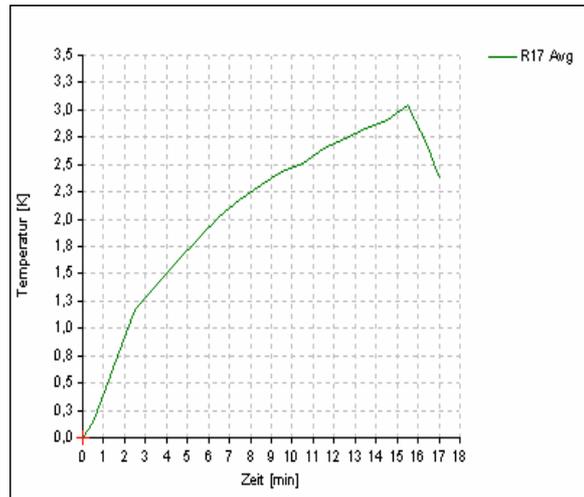


Abb. 107 Erwärmungskurve R17

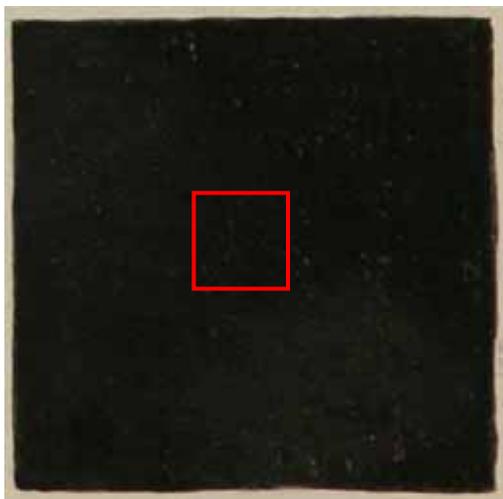


Abb. 108 R18, Elfenbeinschwarz in Thylose

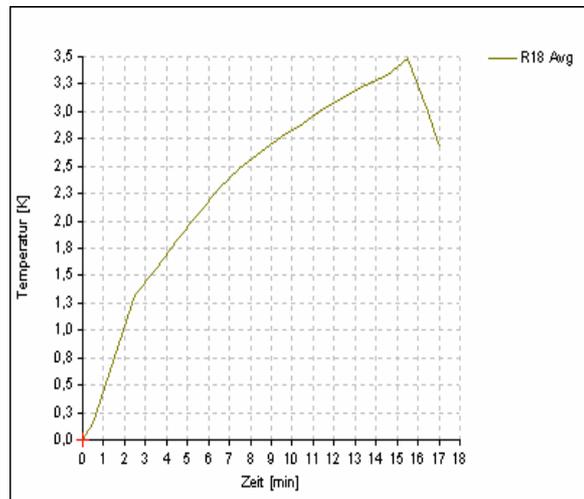


Abb. 109 Erwärmungskurve R18

4.6 Probekörper 2, Mörtel

4.6.1 Aufbau Probekörper 2, verwendete Mörtel

Da die Absorption von Wärmestrahlung von der Rauigkeit der Oberfläche und vom Oberflächenmaterial abhängen kann wurde der Einfluss dieser Parameter auf die Erwärmung an unterschiedlichen Musterflächen auf einem Probekörper (Prk-2) untersucht. Auf dem Probekörper Prk_2 (Abb. 110) wurden 15 etwa gleich große Musterflächen angelegt. Die Mörtelmusterflächen unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung: Kalk-, Zement- und Gipsmörtel, sowie in ihrer Oberflächenrauigkeit (Tab. 6).



Abb. 110 Probekörper 2 mit verschiedenen Mörteln

Arbeitsschritte zur Herstellung der Mörtelflächen

Die Platte auf der sich die Probeflächen befinden ist 7 cm stark. Es sind jeweils 5 Probeflächen mit 2 Mörteln und einem Gips angelegt worden. Die Probeflächen sind jeweils 11x 11 cm groß, 1 cm hoch und in einem Abstand von 2,5 bzw. 3 cm auf dem Träger aufgebracht worden. Oberflächen der Probefelder zeichnen sich durch ihre unterschiedlichen Rauigkeiten bzw. Abschlüsse aus.

Oberflächen: - Glatt - rau - rauer - glatt mit CalXNova- Anstrich - rau mit Gipsspachtel
CalXNova (dispergiertes Weiskalkhydrat)
Gipsspachtel Uniflott, Fa. Knauf

Die Mörtelflächen wurden mit Hilfe einer Holzschablone angefertigt.

Es wurden jeweils 5 Probeflächen aufgebracht.

Die Probeflächen bestehen aus:

- Kalkmörtel: NHL 2, Otterbeiner Kalk, Mischung 1:4, Körnung Sand 0 - 2
- handelsüblicher Putz-Mauermörtel PM30, Fa. Sakret- Trockenbaustoffe
- Haftputzgips, Rotband, Fa. Knauf

Der Zwischenraum zwischen den Probeflächen, also die Trägerplatte, wurde ebenfalls mit CalXNova gestrichen.

Von den verwendeten Materialien wurden Prismen 4 x 4 x 16 cm³ zur Prüfung von physiko-mechanische Eigenschaften hergestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 5 Materialeigenschaften der Mustermörtel

Material	Rohdichte [kg/dm ³]	Wassersätti- gungswert Ma. %	Biegezugfestig- keit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
Kalkmörtel	1,77	12,86	0,27	0,76
Putz- Mauermörtel	1,96	6,82	3,39	40,40
Haftputzgips	0,96	31,88	2,17	4,34

Tab. 6 Verwendete Mörtel, Beschreibung der Oberfläche

Nr.	Mörtel	Bemerkungen
R01	Kalkmörtel, glatt	
R02	Kalkmörtel, leicht rau	
R03	Kalkmörtel, rau	
R04	Kalkmörtel, glatt, gestrichen	
R05	Kalkmörtel, leicht rau, gespachtelt	
R06	Zementmörtel, glatt	
R07	Zementmörtel, leicht rau	
R07	Zementmörtel, rau	
R09	Zementmörtel, glatt, gestrichen	
R10	Zementmörtel, leicht rau, gespachtelt	
R11	Gips, glatt	
R12	Gips, leicht rau	
R13	Gips, rau	
R14	Gips, glatt, gestrichen	
R15	Gips, leicht rau, gespachtelt	



Abb. 111 Nummerierung der Musterflächen auf Probekörper 2

4.6.2 Versuchsdurchführung Probekörper 2

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 113 und Abb. 112 dargestellt. Die beiden Infrarotheizstrahler wurden mit einem Abstand von 3,2 m auf den Probekörper Prk-1 ausgerichtet, um eine möglichst homogene Erwärmung der Oberfläche zu erreichen. Der Versuchsaufbau, mit den dargestellten Abständen und Entfernungen, folgt den Ergebnissen der Voruntersuchungen zur Geometrie und Leistung der Heizstrahler. Die Heizleistung der beiden Heizstrahler entsprach jeweils 2 x 1500 Watt, also zusammen 6000 Watt. Die Strahler sind im Abstand von etwas über 3 m zum Probekörper aufgestellt. Die Strahlungskegel überschneiden sich. Die Kamera „schaut“ zwischen den IR-Strahlern hindurch auf den Probekörper.



Abb. 112 Aufbau des Versuchs am Probekörper 2

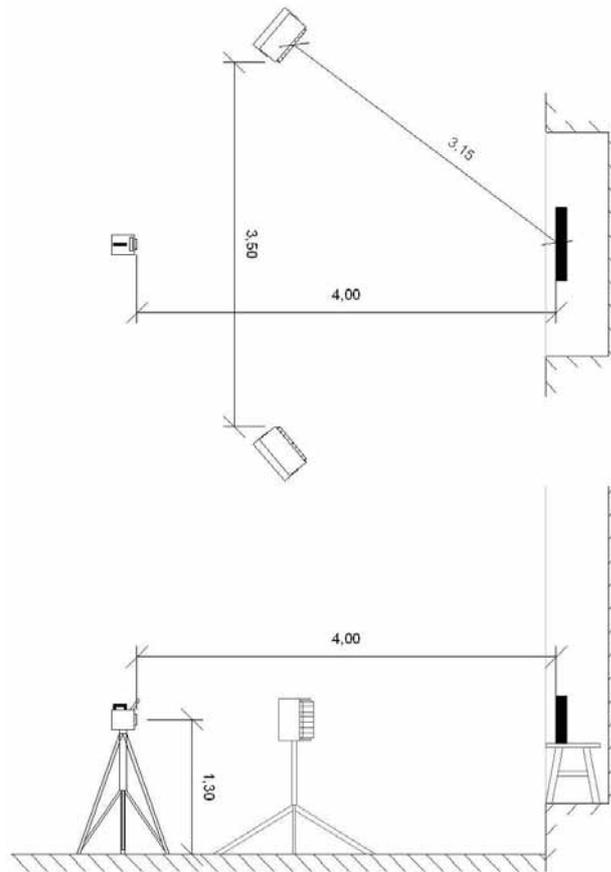


Abb. 113 Aufbau des Versuchs am Probekörper 2, schematisch

In einem festgelegten Rhythmus wurden während des Versuchs die Heizstrahler mit Styroporplatten abgedeckt. Dadurch ließen sich die Reflektionsanteile der Strahlerleistung an den Oberflächen abschirmen. Insgesamt erfolgte die Erwärmung des Probekörpers über 16 min. Danach wurde noch eine Abkühlungsphase beobachtet. Alle 15 sec wurde eine IR-Aufnahme gemacht, wobei jede vierte, also im Rhythmus von 1 min, die Heizstrahler abgedeckt wurden. Die Erwärmungskurven in Abb. 114 zeigen ein deutliches Sägezahnmuster.

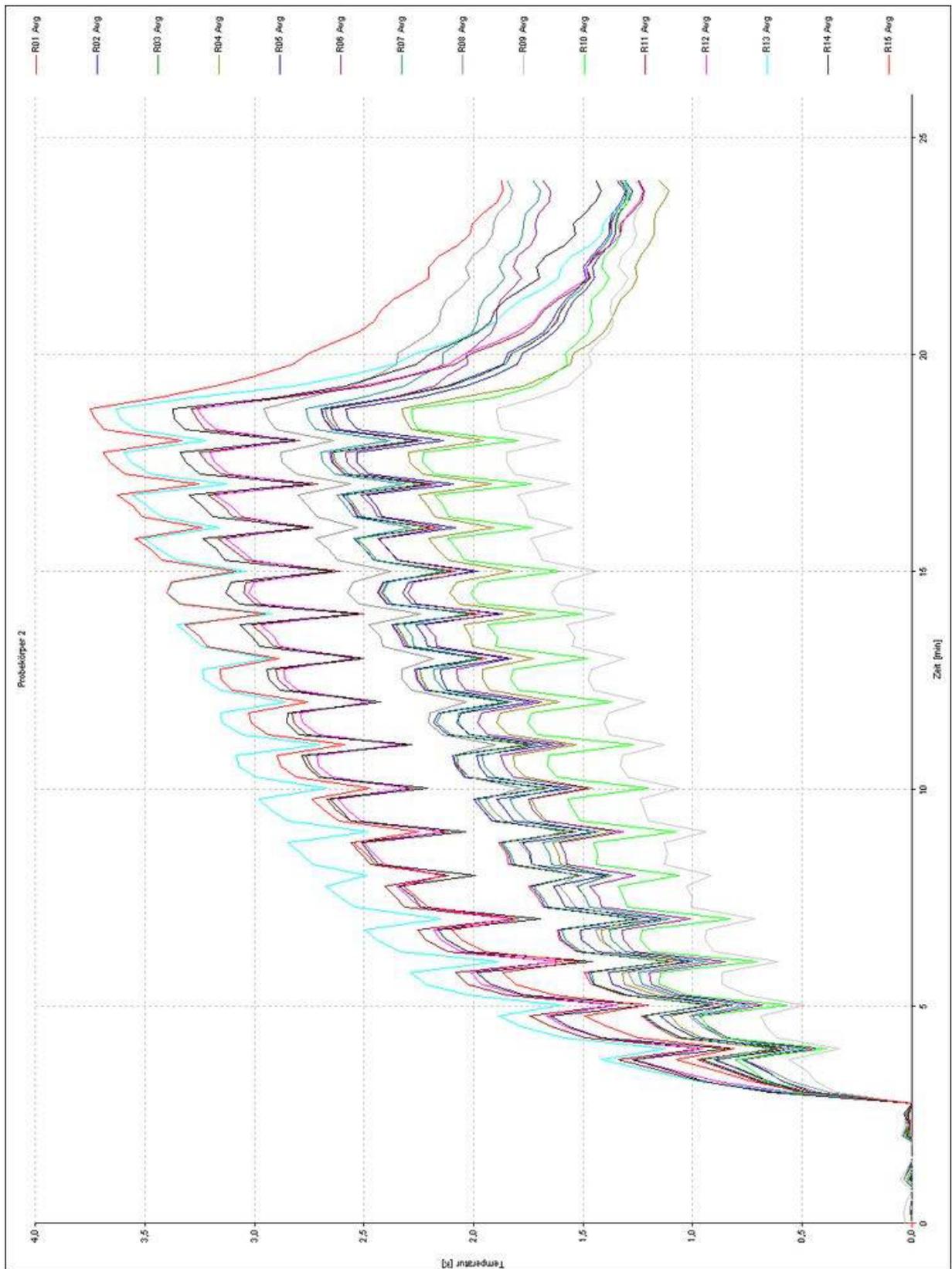


Abb. 114 Sägezahnmuster der Versuchsmessung an Probekörper 2

Bei einem Versuch ergaben sich Temperaturunterschiede zwischen aufgedecktem und abgedecktem Zustand von 0,25 K bis 0,47 K auf den Mörteln. Etwas niedriger sind ausschließlich die Werte auf Mörtelfläche R09 mit einer Differenz von nur 0,19 K, bei allerdings auch niedrigstem Gesamterwärmungsverhalten. Zur Auswertung werden die Erwärmungskurven im abgedeckten Zustand ohne Reflektionseinfluss einbezogen.

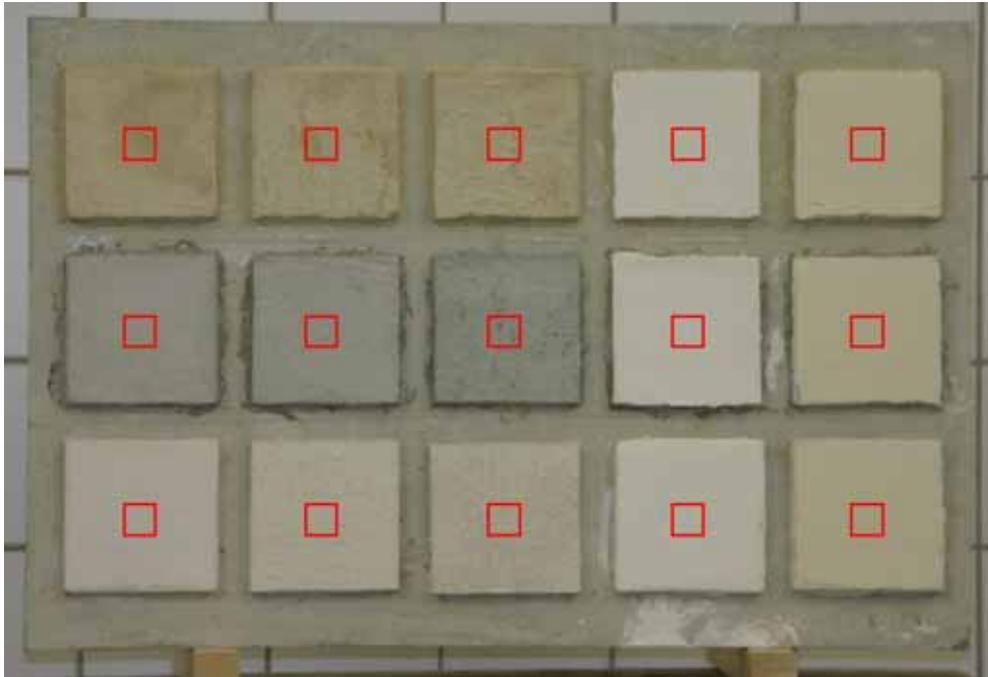


Abb. 115 Foto von Prk2 mit einzeichneten Messfeldern

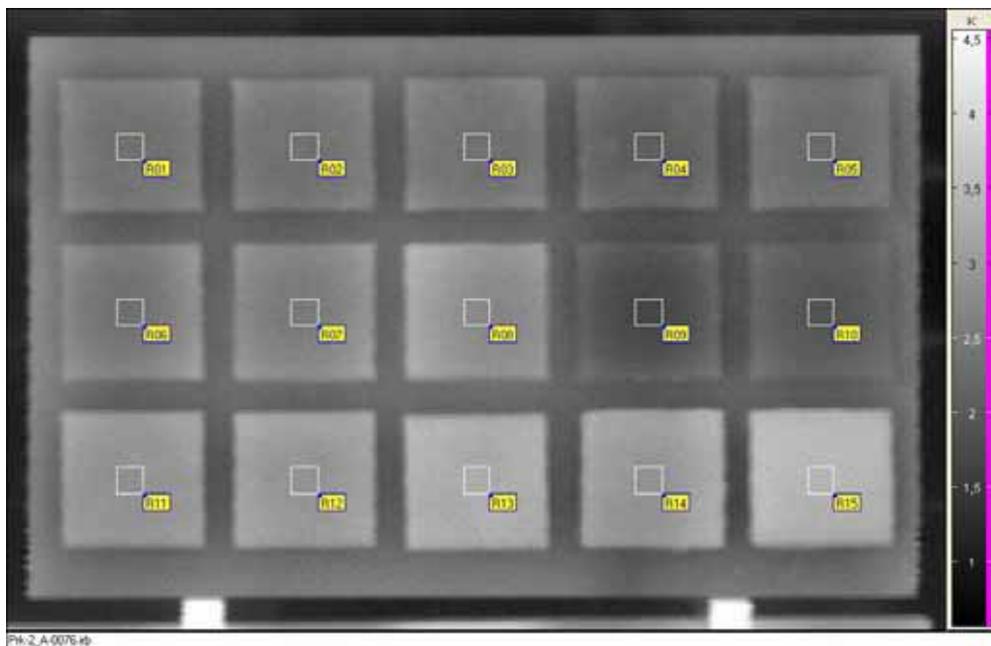


Abb. 116 IR-Aufnahme im Differenzbildmodus von Prk2 mit einzeichneten Messfeldern

Abb. 115 zeigt die 15 Mustermörtelflächen von Probekörper 2 und die Lage Messfelder. Abb. 116 stellt eine Versuchsaufnahme dar. Die Messfelder liegen jeweils in der Mitte der Musterflächen und haben eine Abmessung von 10 x 10 Pixeln. Der Mittelwert aus hundert Einzelpunkten wird so bei der Auswertung berücksichtigt.

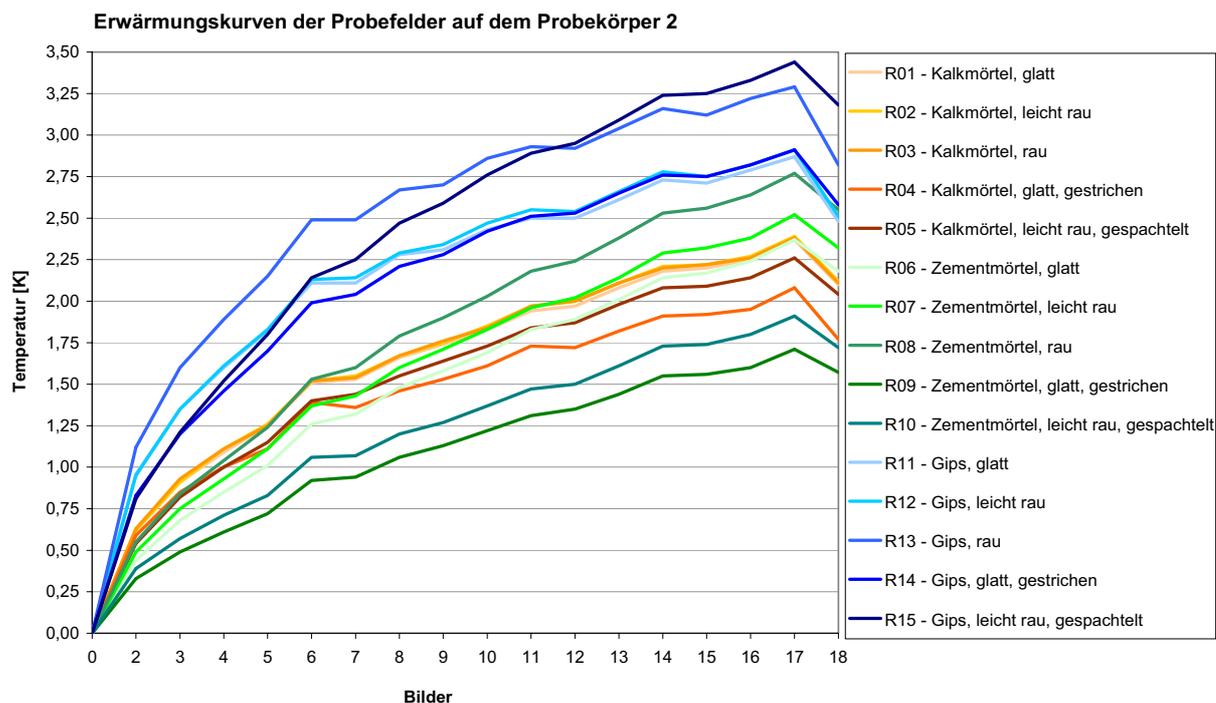


Abb. 117 Erwärmungskuren der Mörtelflächen (15 min.) , ausschließlich „abgedeckte“ Ergebnisse

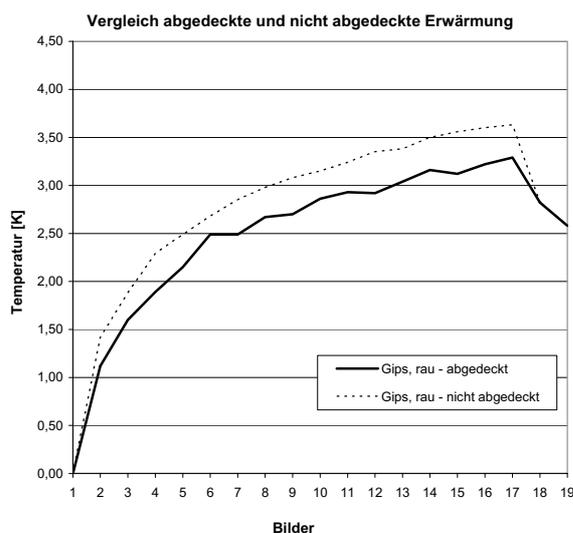


Abb. 118 Vergleich der abgedeckten und nicht abgedeckten Aufnahmen

4.6.3 Auswertung Ergebnisse Probekörper 2

Im Gesamterwärmungsverhalten lassen sich kaum Tendenzen erkennen. Die Gipsmusterflächen zeigen tendenziell etwas höhere Temperaturen. Das kann gut mit der niedrigen Dichte (s. Tab. 5) korreliert werden. Die glatt gestrichenen, weissen Oberflächen deuten die geringsten Temperaturerhöhungen an.

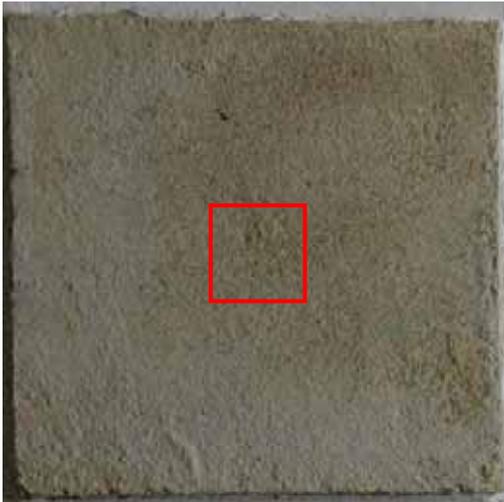


Abb. 119 R01, Kalkmörtel glatt

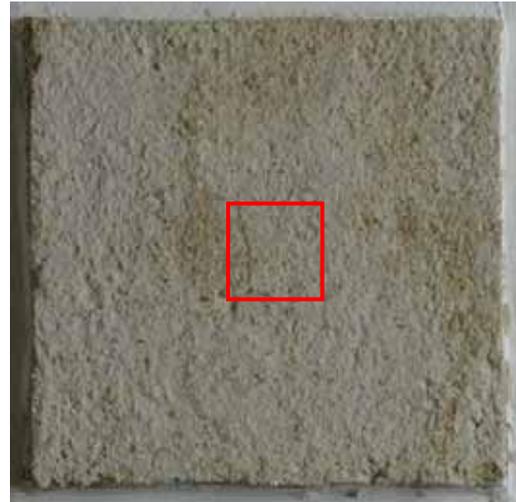


Abb. 120 R02, Kalkmörtel leicht rau

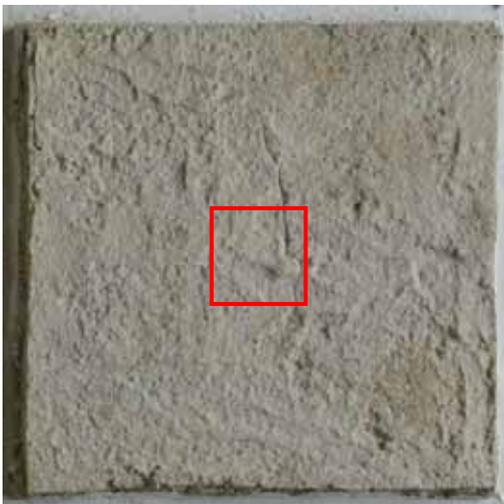


Abb. 121 R03, Kalkmörtel rau

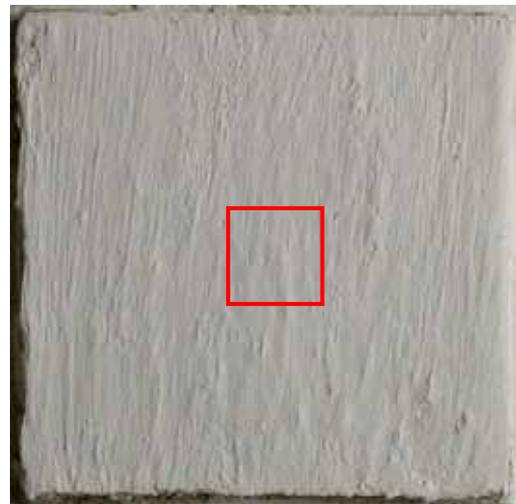


Abb. 122 R04, Kalkmörtel glatt gestrichen

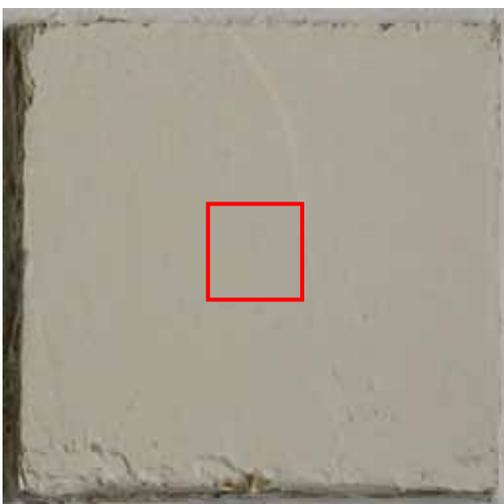


Abb. 123 R05, Kalkmörtel leicht rau gespachtelt

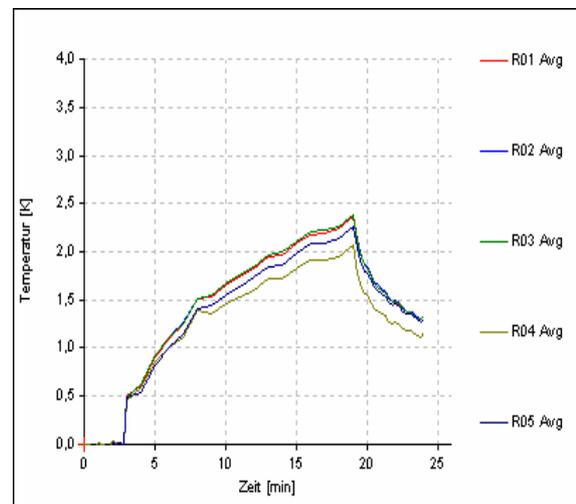


Abb. 124 Erwärmungskurven R01 - R05

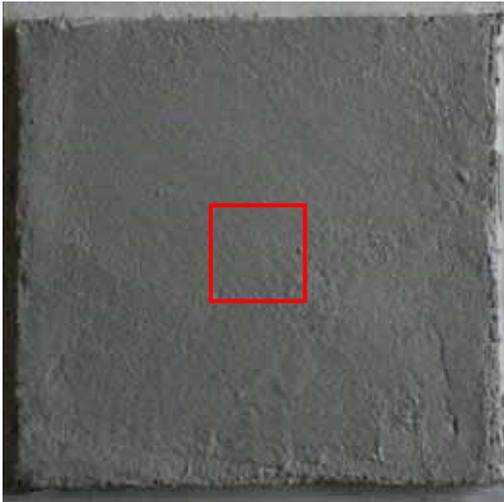


Abb. 125 R06, Zementmörtel glatt

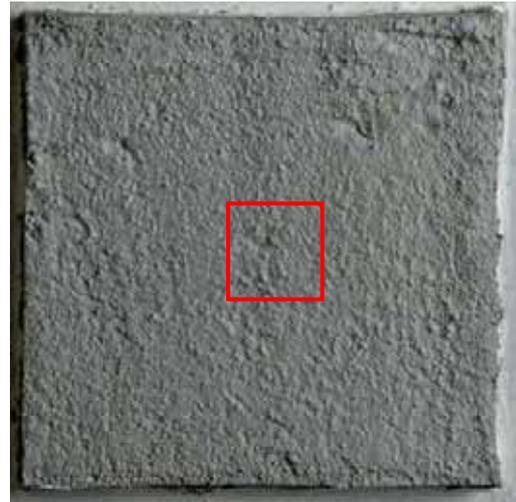


Abb. 126 R07, Zementmörtel leicht rau

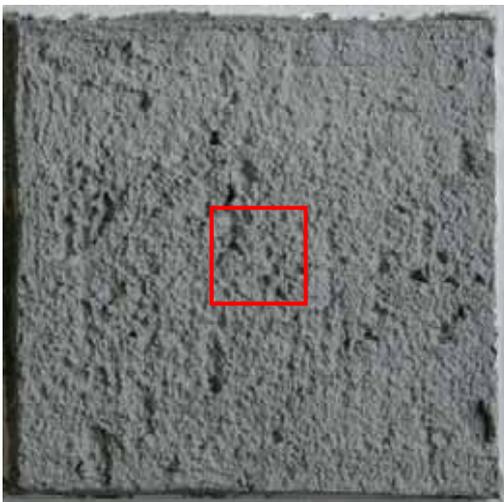


Abb. 127 R08, Zementmörtel rau

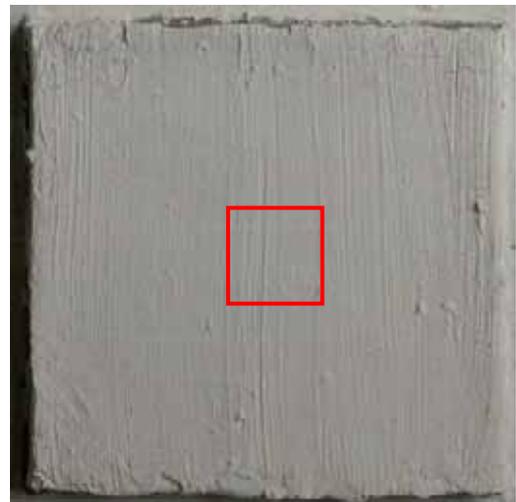


Abb. 128 R09, Zementmörtel glatt gestrichen

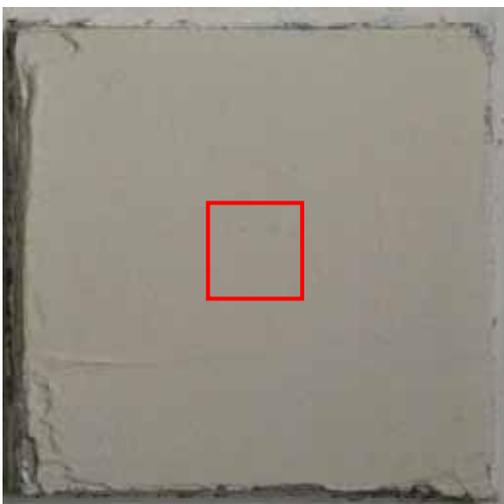


Abb. 129 R10, Zementmörtel leicht rau gespachtelt

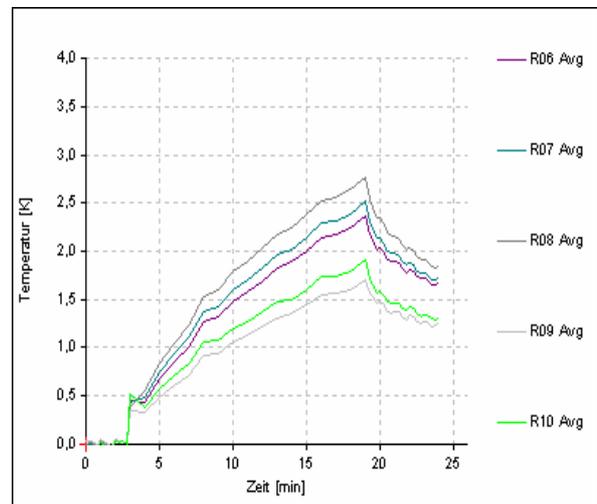


Abb. 130 Erwärmungskurven R06 - R10

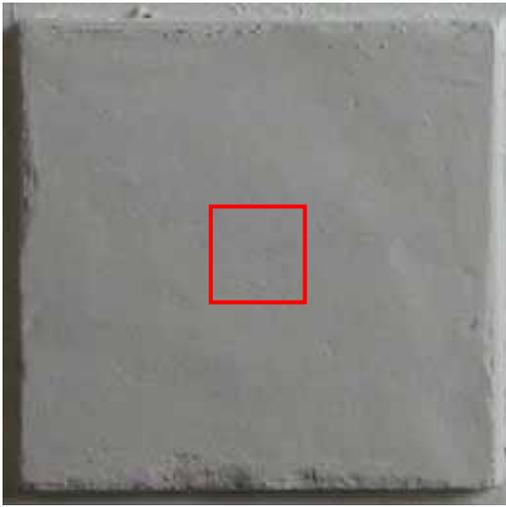


Abb. 131 R11, Gips glatt

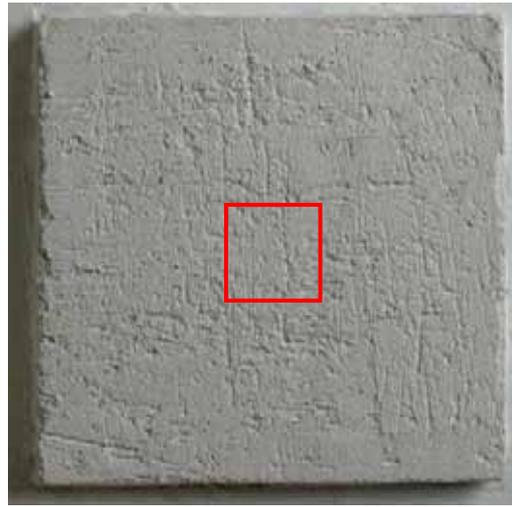


Abb. 132 R12, Gips leicht rau

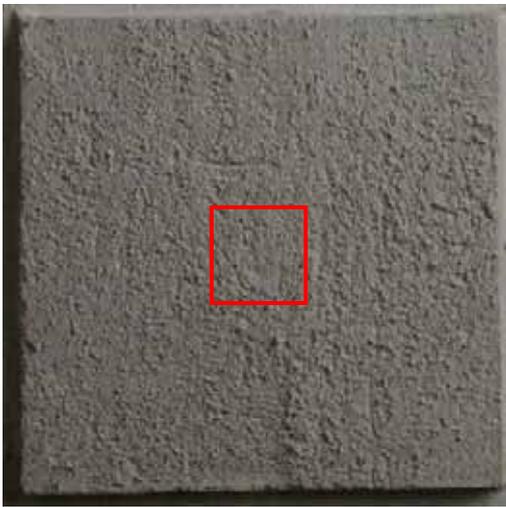


Abb. 133 R13, Gips rau

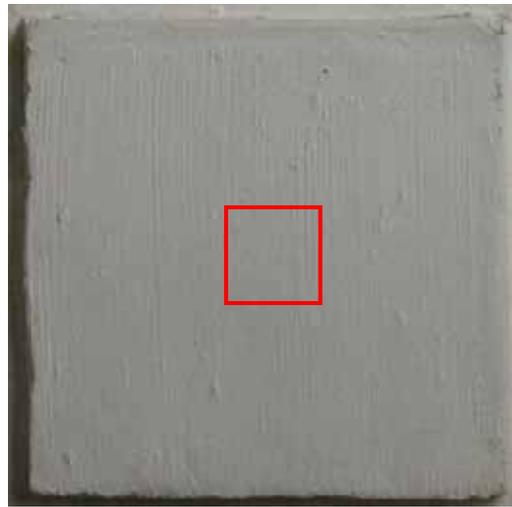


Abb. 134 R14, Gips glatt gestrichen

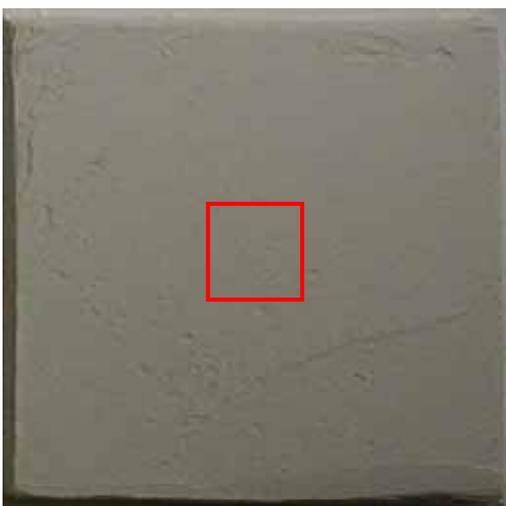


Abb. 135 R15, Gips leicht rau gespachtelt

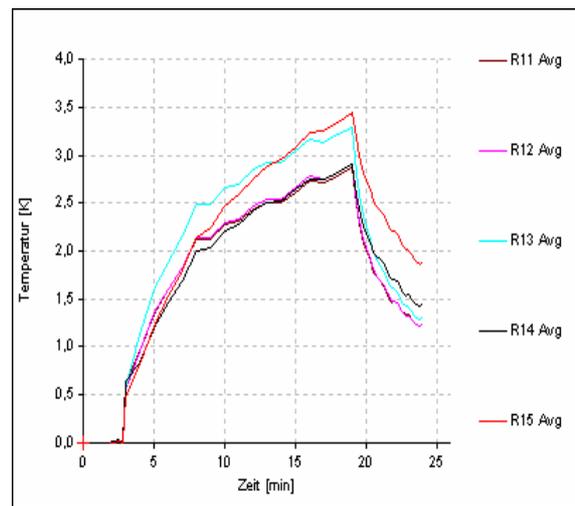


Abb. 136 Erwärmungskurven R11 - R15

4.7 Probekörper 3, Hohlstellen

4.7.1 Aufbau Probekörper 3

Am Probekörper 3 (Prk-3) sollten bekannte, definiert installierte Hohlstellen untersucht werden, um die messtechnischen Grenzen des Verfahrens experimentell fassen zu können.

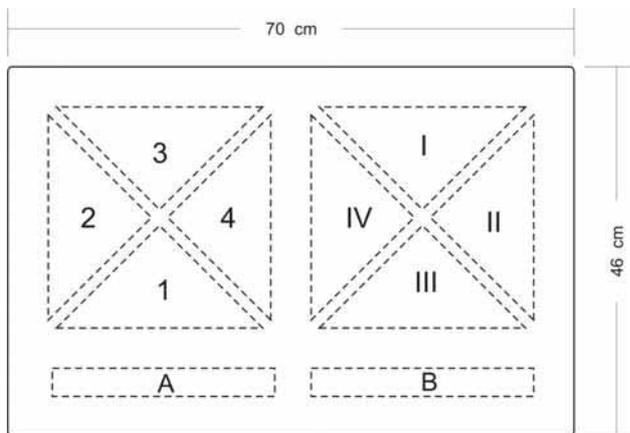


Abb. 137 Probekörper 3 mit Hohlstellen



Abb. 138 Foto Prk-3

In den 8 cm starken Probekörper aus Leichtbeton wurden 10 Hohlstellen wie in Abb. 137 dargestellt eingebracht. Außer der Hohlstelle B sind alle parallel zur Oberfläche angeordnet. Sie unterscheiden sich in ihrer Tiefenlage und Hohlraumhöhe (Tab. 7). Die Hohlstellen sind dreieckig geformt, um Aussagen zur Auflösungsschärfe machen zu können. Die Hohlstellen sind so angeordnet, dass sie sich kaum gegenseitig beeinflussen können.

Tab. 7 Beschreibung der definierten Hohlstellen in Prk-3

Bez:	Beschreibung	Bez:	Beschreibung
1:	Spalt in 0,5 cm Tiefe	I:	Hohlraum mit 5 mm Stärke in 0,5 cm Tiefe
2:	Spalt in 1,0 cm Tiefe	II:	Hohlraum mit 5 mm Stärke in 1,0 cm Tiefe
3:	Spalt in 1,5 cm Tiefe	III:	Hohlraum mit 5 mm Stärke in 2,0 cm Tiefe
4:	Spalt in 2,0 cm Tiefe	IV:	Hohlraum mit 5 mm Stärke in 3,0 cm Tiefe
A:	Luftspaltkeil schräg zur Oberfläche, linke Seite oberflächennah	B:	Luftspaltkeil parallel zur Oberfläche

Zur Herstellung der Hohlstellen wurden Dreiecke aus 5 mm starken Platten aus dem gleichen Feinkornbeton vorgefertigt, die dann bei der Fertigung des Probekörpers in der Form fixiert und eingegossen wurden. Für die Realisierung der Hohlstellen mit dem Spaltabstand wurden zwei Platten aufeinander gelegt. Infolge der Oberflächenrauigkeit ist ein Abstand von wenigen Zehntel Millimetern entstanden. Bei den größeren Hohlräumen wurde der Abstand durch Abstandshalter am Rand erzeugt. Die Keile wurden ebenfalls aus Platten vorgefertigt.

4.7.2 Versuchsdurchführung Probekörper 3

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 139 dargestellt. Die beiden Infrarotheizstrahler und die IR-Kamera wurden mittig auf den Probekörpers ausgerichtet. Der Abstand der Kamera zur Oberfläche betrug 4 m, die der über Kreuz arbeitenden Strahler 3,15 m. Die Heizleistung der beiden Heizstrahler entsprach jeweils 3000 Watt, zusammen 6000 Watt.

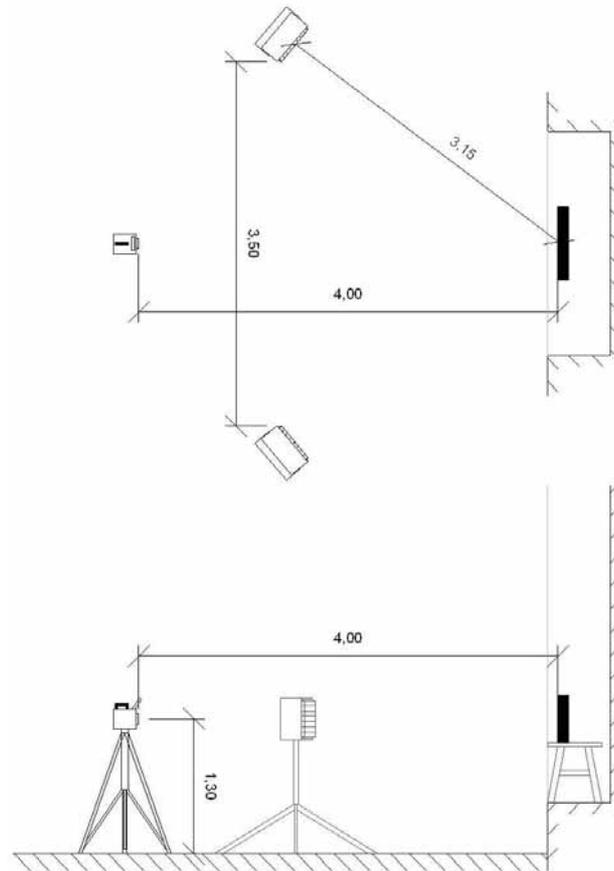


Abb. 139 Aufbau des Versuchs Probekörper 3

Auch die Untersuchungen an Probekörper Prk-3 wurden gepulst. Das heißt es wurden bei angeschalteten Strahlern laufend alle 2 sec eine IR-Aufnahme geschossen und nachdem die Strahler eine Weile aktiv waren und gleichmäßige Leistungsabgabe hatten wurde zu Beginn des Versuchs im Rhythmus von 10 sec offen und 5 sec abgedeckt gearbeitet. Nach 3 min und nach 5 min wurden die ungestörten Aufheizzeiten verlängert. Nach 10 min Aufheizung wurden die Strahler endgültig abgedeckt und ausgeschaltet und die Abkühlung noch weiter detektiert. Im Diagramm Abb. 140 ist das „choppen“ als Sägezahnmuster deutlich zu erkennen. Bei etwa 12 min zeigt sich in der Abkühlung ein Peak, der von einem abgeschalteten aber erst später abgedrehten Strahler her rührt.

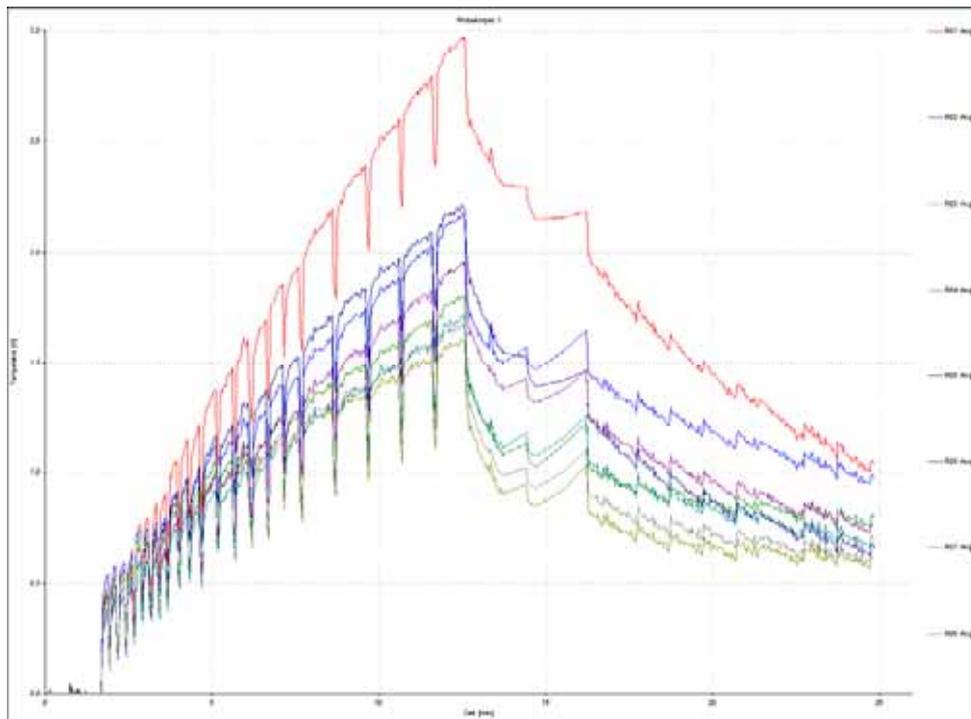


Abb. 140 Die gepulste Aufheizung an Prk-3 zeigt ein Sägezahnmuster

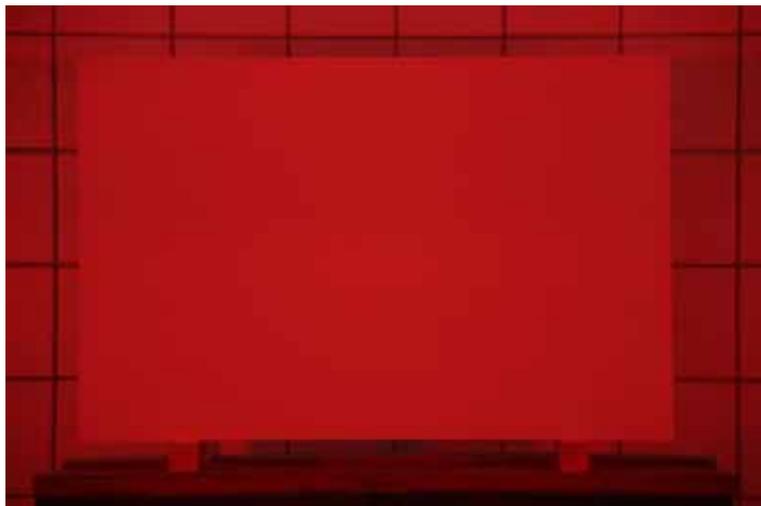


Abb. 141 Aufnahme Prk-3 während des Versuchs

4.7.3 Auswertung Ergebnisse Probekörper 3

Zur Auswertung der Untersuchungen am Probekörper 3 wurden in die dreieckigen Hohlstellen je ein Messfeld von 10 x 10 Pixeln hinein gelegt. Die Daten werden über die hundert Messpunkte integriert. Die Nummerierung der Messfelder fängt auf der linken Seite an und richtet sich nach der Nummerierung der Hohlstellen (Abb. 142 bis Abb. 145). Im unteren Teil des Probekörpers ist eine Messfläche als Referenzfläche (R09) angelegt.

Es zeigt sich deutlich, dass die Aufheizung an der Oberfläche insbesondere von Tiefenlage der Hohlstelle, also Dicke des überlagernden Putzes, und weniger von ihrer Größe abhängt. Die scharfen Ecken der Hohlstellen verschwimmen etwas im IR-Bild. Das kann mit lateralem Wärmetransport erklärt werden. Trotzdem ist die Auflösung deutlich im cm-Bereich.

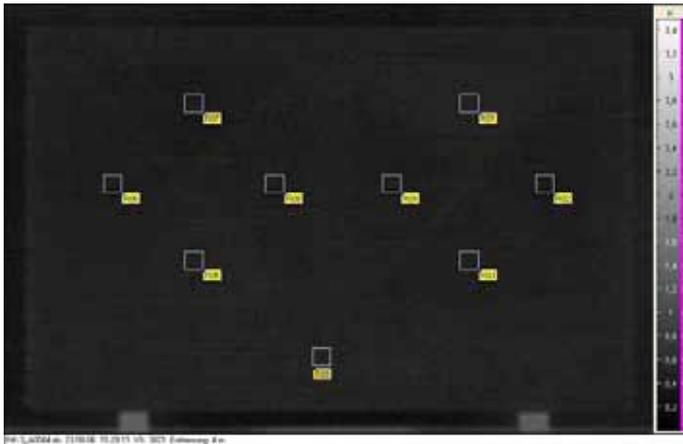


Abb. 142 Prk-3 zu Versuchsbeginn

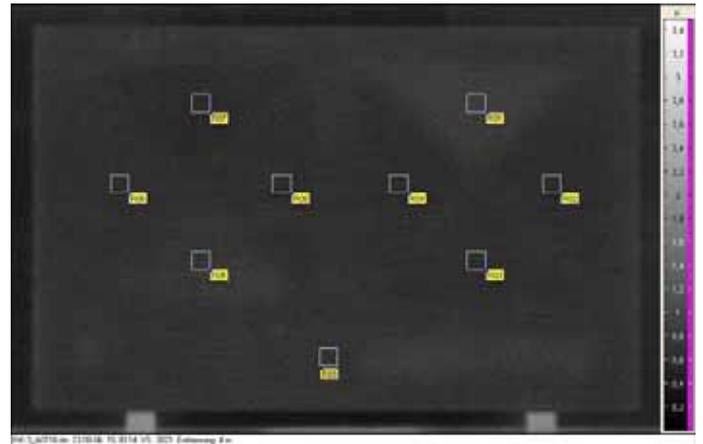


Abb. 143 Prk-3, Aufheizbeginn

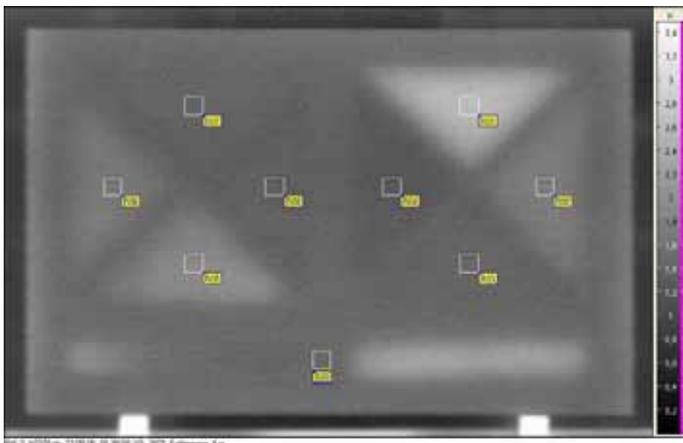


Abb. 144 Prk-3, Ende der Aufheizung

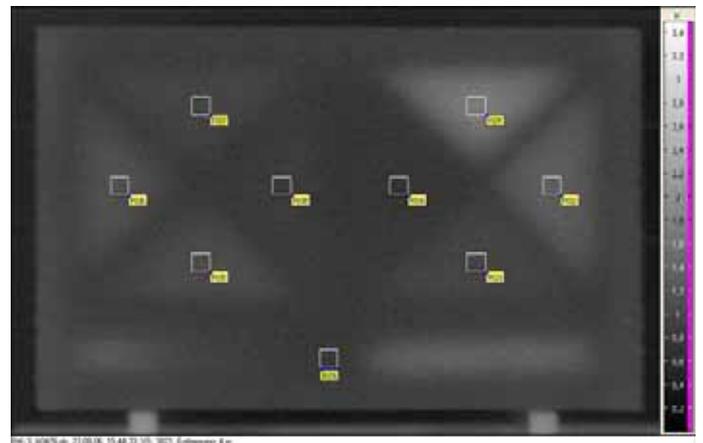


Abb. 145 Abkühlphase

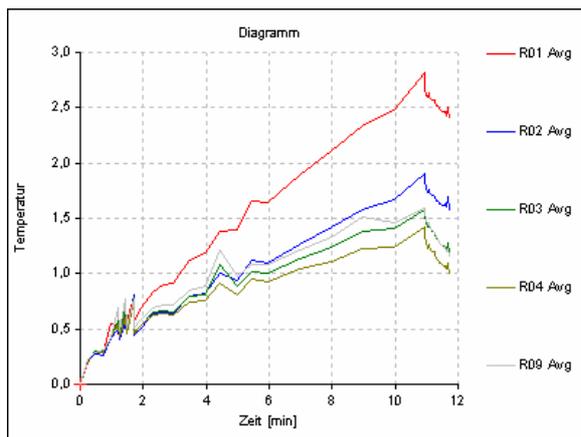


Abb. 146 Messfelder R01 - R04 und R09

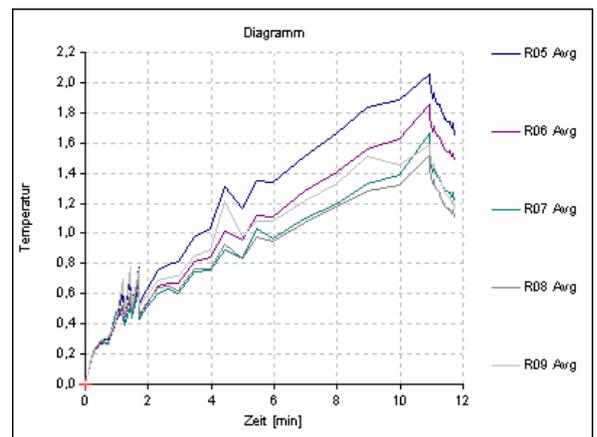


Abb. 147 Erwärmungskurven R01 - R05 und R09

4.8 Versuchswand Freiberger Fürstengruft

Durch eine bauliche Maßnahme in der Fürstengruft im Freiberger Dom (Abb. 148), war es möglich eine Putzfläche mit hohl stehenden Putzbereichen zu untersuchen und danach den Putz zu entfernen um die Abgrenzungen der Hohlstellen in die Tiefe zu dokumentieren.



Abb. 148 Blick in die Fürstengruft im Freiberger Dom

4.8.1 Voruntersuchungen

Beim Putz handelte es sich vermutlich um einen Trass-Kalk-Mörtel, der aufgrund der Unebenheiten der unterliegenden Natursteinwand in Schichtstärken zwischen 0,5 cm und 2 cm bei einer Sanierung im Jahr 2002 aufgebracht worden war. Durch Salze und Feuchtigkeit aus dem Wandinneren ist es zu einer Ablösung einzelner Putzbereiche gekommen. Das IDK war vom Sächsischen Immobilien und Baumanagement beauftragt worden Untersuchungen zu diesem schnellen Zerfall des Innenputzes durchzuführen. Das Schadensbild und die Schadensprogression erforderten den Putz großflächig abzunehmen und einen angepassten Neuputz aufzubringen. Aus diesen Umständen ergab sich die Möglichkeit destruktive Untersuchungen an hohl stehendem Wandputz durchzuführen.

An der Westseite der Gruft mit Tonnengewölbe wurde eine Versuchsfläche ausgewählt und markiert. Die 1,20 m x 0,80 m große Fläche (Abb. 149) wurde wiederum in 24 gleich große Felder eingeteilt, die eine Abmessung von jeweils 20 x 20 cm aufweisen. Mit Hilfe dieser Felder war ein Übertragen von Ergebnissen einer haptischen Untersuchung für eine Hohlstellenkartierung sehr gut möglich. Abb. 149 zeigt eine Lichtbildaufnahme der Untersuchungsfläche. Zur Orientierung der IR-Aufnahmen wurden an den Ecken schwarze Klebebandpunkte angebracht. Wie auf dem Foto zu erkennen zeichnet die salzinduzierte Verwitterung im Innenraum in etwa den Mauerwerksverband wieder. Die Salzausblühungen und die damit einhergehenden Schäden verlaufen entlang der Fugen. Hohlstellen und Ablösungen von Putz waren an weiteren Stellen an der Wand teilweise durch beulenartige Aufwölbungen zu erkennen.



Abb. 149 Probewand in der Freiburger Fürstengruft mit Kartierungsraster

In enger Zusammenarbeit mit einer Restauratorin wurde eine Perkussionsuntersuchung durchgeführt. Die Ergebnisse der Perkussionsuntersuchung wurden in eine Skizze übertragen (Abb. 150). Es zeichnet sich deutlich ab, dass die Ablösungen weit über den optisch schon geschädigten Bereich hinaus gehen und große zusammenhängende Flächen bilden.

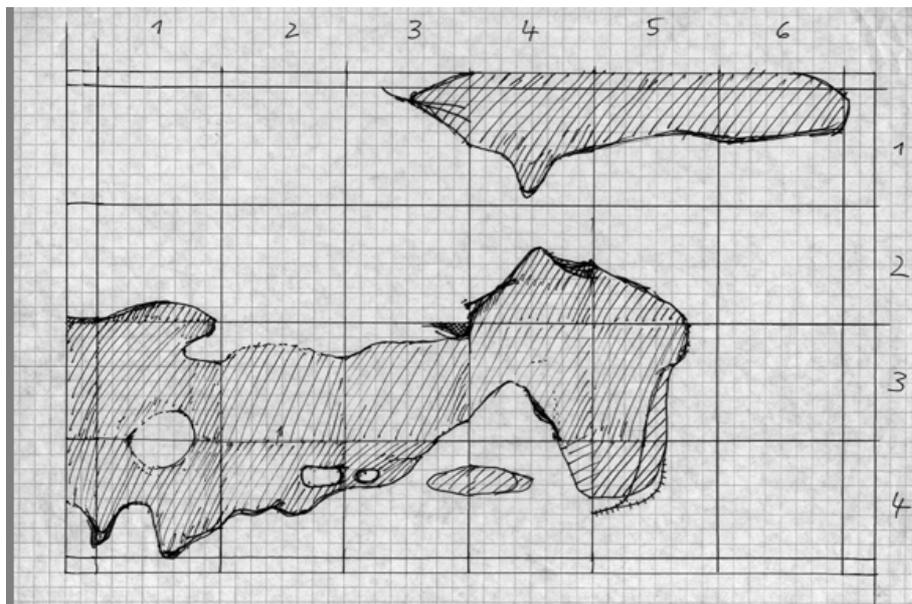


Abb. 150 Klopfkartierung, Hohlstellen, Freiburger Fürstengruft

4.8.2 Versuchsdurchführung in der Fürstengruft

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 151 dargestellt. Die beiden Infrarotheizstrahler wurden mit einem Abstand von 2,0 m auf die Probenwand ausgerichtet, um eine möglichst homogene Erwärmung der Oberfläche zu erreichen. Der Versuchsaufbau, mit den dargestellten Abständen und Entfernungen, folgt den Ergebnissen der Voruntersuchungen zur Geometrie und Leistung der Heizstrahler. Die Heizleistung der beiden Heizstrahler entsprach jeweils 2 x 1500 Watt, also zusammen 6000 Watt.

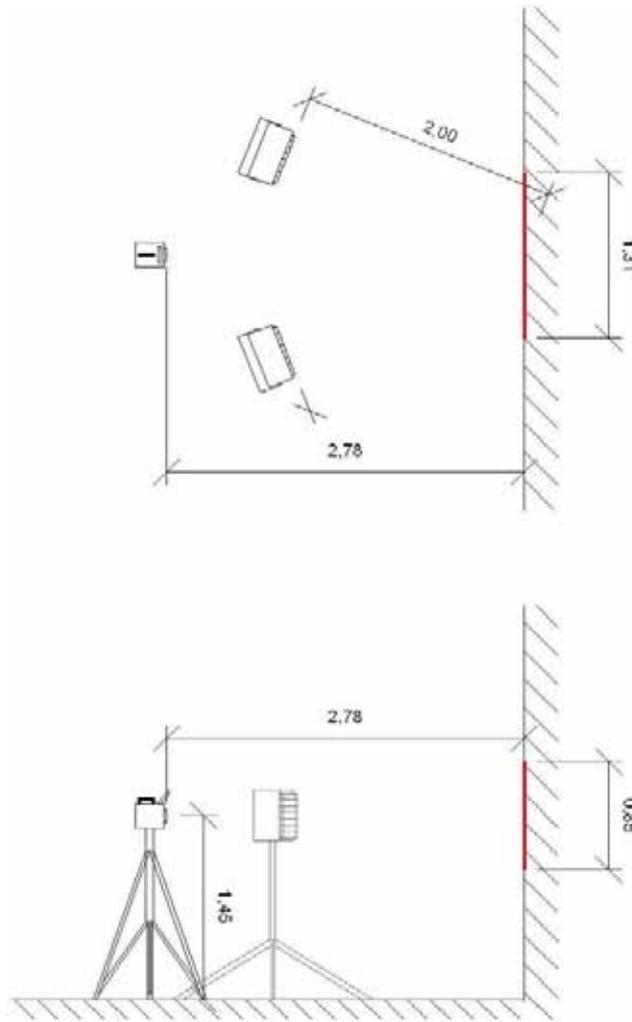


Abb. 151 Aufbau des Versuchs an der Probenwand in der Fürstengruft; oben: Grundriss, unten: Ansicht



Abb. 152 Versuchsdurchführung an der Probenwand in der Fürstengruft, Aktivierungsphase



Abb. 153 Aufbau des Versuches an der Probenwand in der Fürstengruft (abgedeckter Zustand)

In einem festgelegten Rhythmus wurden während des Versuches die Heizstrahler abgedeckt (Abb. 152, Abb. 153). Dadurch ließen sich die Reflektionsanteile der Strahlerleistung an den Oberflächen abschirmen. Insgesamt erfolgte die Erwärmung des Probekörpers über 8 min. Danach wurde noch eine Abkühlungsphase von mehreren Minuten beobachtet. Alle 5 sec wurde eine IR-Aufnahme gemacht, wobei bei jeder 3. und 4. Aufnahme die Heizstrahler abgedeckt wurden. Die Erwärmungskurven in Abb. 154 zeigen das typische Sägezahnmuster.

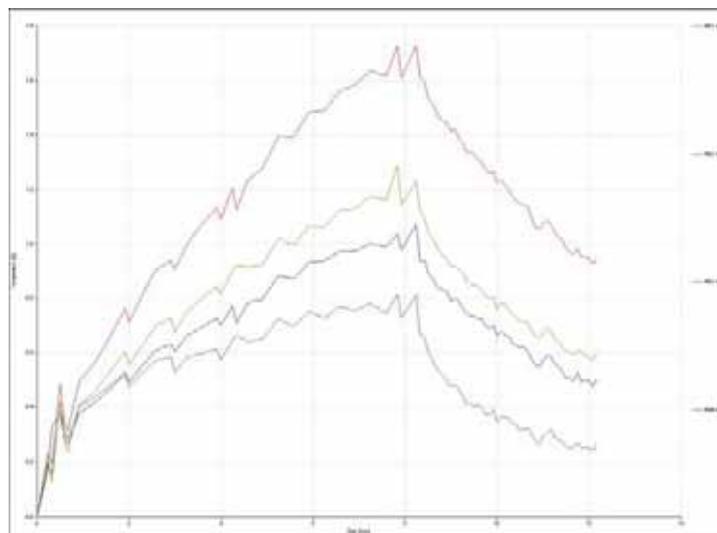


Abb. 154 Erwärmungskuren der Versuchsfläche, ausschließlich „abgedeckte“ Ergebnisse

4.8.3 Ergebnis

Die Infrarotthermographieaufnahmen der Untersuchungen in der Freiburger Fürstengruft wurden am Rechner ausgewertet. In Abb. 155 sind IR-Aufnahmen aus verschiedenen Phasen der Untersuchung dargestellt. Die thermischen Anomalien, die durch die Hohlstellen hervorgerufen werden, wurden in zwei Kategorien unterteilt und in eine Kartierung eingetragen (Abb. 156). Das Bild, das sich ergibt ist nahezu identisch mit der Perkussionskartierung (Abb. 150).

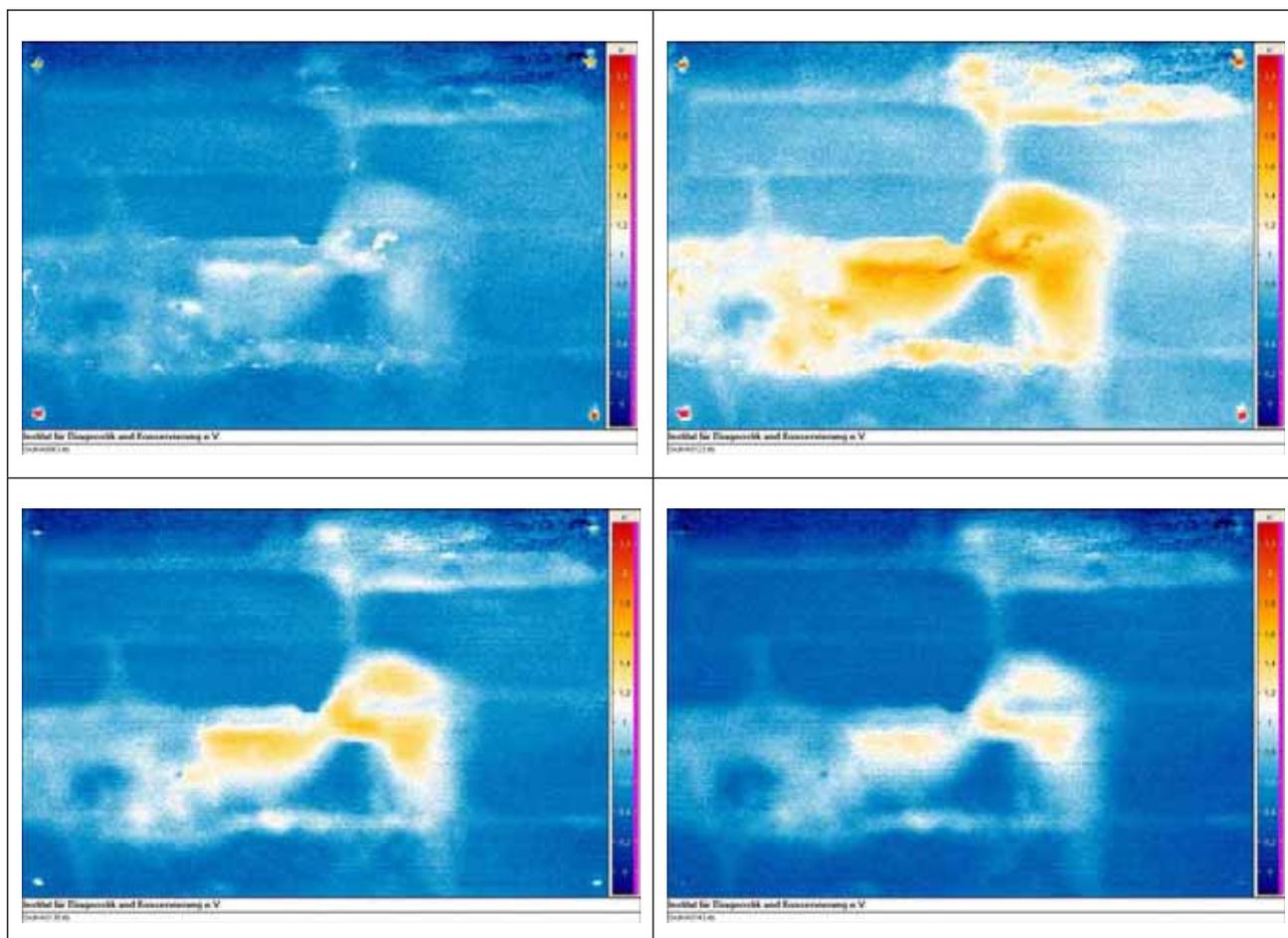


Abb. 155 IR-Aufnahmen im Differenzbildmodus / oben: Aufheizphase, unten: Abkühlphase

Nicht nur die Umrisslinien der beiden großen Schadensflächen sind sehr ähnlich, sondern auch die „Inseln“ von scheinbar noch angebundenen Stellen innerhalb der losen Flächen finden sich in beiden Kartierungen wieder.

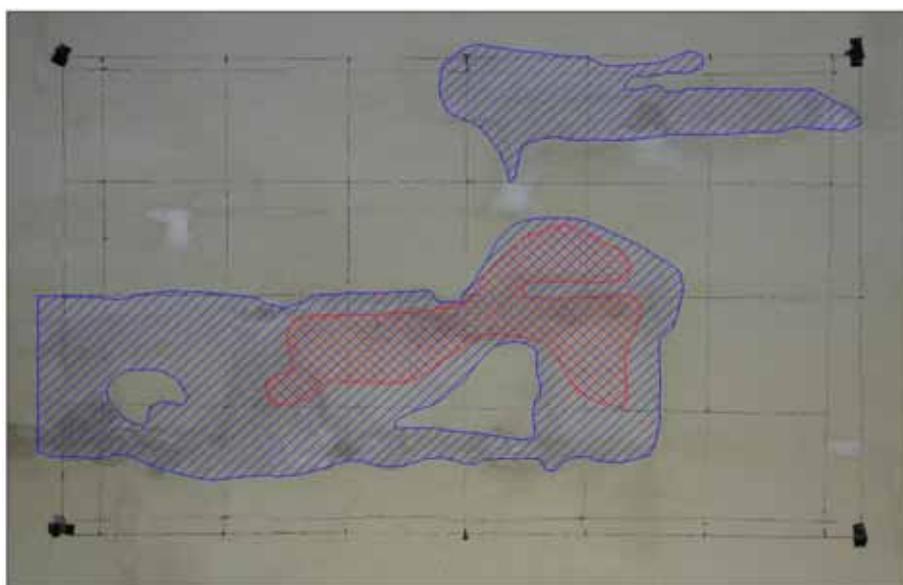


Abb. 156 Hohlstellenkartierung nach Auswertung der Thermographieaufnahmen, blaue Schraffur - thermisch auffällige Stellen; rote Schraffur - besonders starke thermische Anomalien

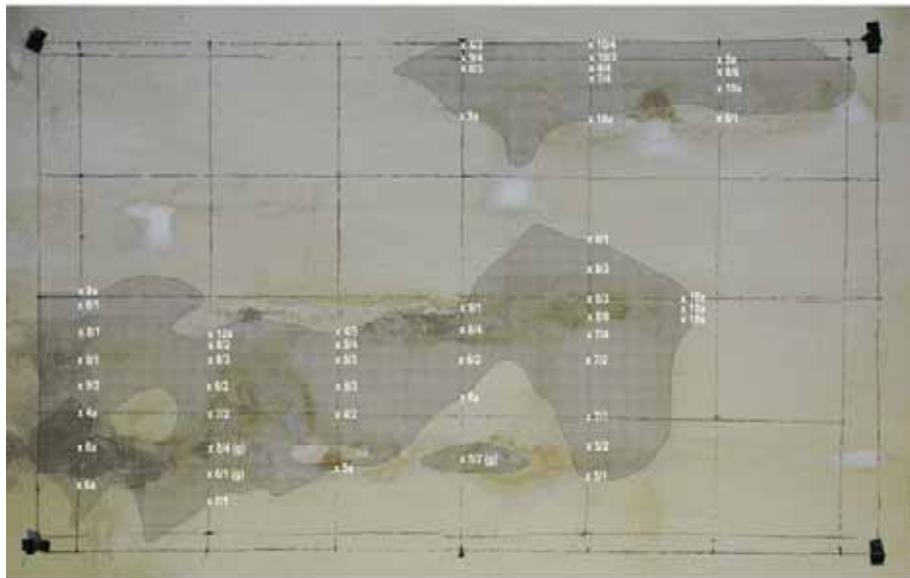


Abb. 157 Dokumentation der Holstellentiefen, Tiefe/Höhe der Hohlstelle in mm

An der Untersuchungsfläche in der Freiburger Fürstengruft konnte noch weiter gegangen werden. Der geschädigte Wandputz trug keine Wandmalereien und konnte nach der berührungslosen Untersuchung destruktiv weiter untersucht werden. An den Stellen, an denen eine Hohlstelle vermutet wurde, wurde entlang der Raster-Hilfslinien Schnitte in die Wand gesetzt. An diesen Schnitten konnten die Ablösungen vom Putz beobachtet und ausgemessen werden. Es wurden immer die Tiefe der Hohlstelle = Putzschichtdicke und die Höher der Hohlstelle = Abstand zur festen Wand gemessen. Es dokumentiert sich der unruhige Verlauf der Hohlstellenrückseiten. Zum Teil liegen die Putzschollen noch an oder sind mit Gruß hinterfüllt. Damit sind sie zwar nicht mehr angebunden ans Mauerwerk aber haben noch eine thermische Kopplung. Diese kann die Interpretation erschweren. Die Kopplung entscheidet auch, ob sich eine Hohlstelle gut im IR-Bild abzeichnet oder nicht. Am deutlichsten Zeichnen sich Bereiche ab, die große Abstände zur festen Anbindung haben. Die Putzschichtdicke und die Hohlstellenhöhe spielen dabei keine Rolle.



Abb. 158 Versuchswand nach Abnahme der losen Putzschollen zur Vermessung

5 Objektuntersuchungen

5.1 Battaune

Die Dorfkirche in Battaune (Abb. 159) etwa 10 km nordöstlich von Eilenburg wurde im 1200 aus Raseisenstein erbaut. Um 1500 erfolgte eine Erweiterung der Saalkirche nach Westen. Im 10. Jahrhundert wurde die vergleichsweise große Halbrundapsis mit goldenen Sternchen auf blauem Grund übermalt. Die originale romanische Malerei stammt etwa von 1240 und ist im Zackenstil ausgeführt. Typisch für den Zackenstil sind unter anderem das Lösen der der Gewandteile aus den Umrisslinien, so dass sie scharfkantig und spitz absteigen oder abfallen und in spitzen Winkeln endende Faltenbildungen. Das in der Apsiskalotte vorliegenden ikonographische Programm kann aufgrund der sich durchdrückenden Nimbren rekonstruiert werden. Es ist als typisch für die Romanik einzustufen. Dargestellt sind in der Mitte Maiestas Domini, begleitet von den vier Evangelisten. Die zentrale Darstellung wird von Maria und Johannes dem Täufer flankiert. In der unteren Zone der Apsis befindet sich ein Vorhangmotiv. Die Wandmalereien in Battaune stehen denen der Dorfkirche Pretzien nahe.



Abb. 159 Dorfkirche Battaune, Aussenansicht

5.1.1 Objektidentifikation

Objektstandort: 04838 Battaune

Teilobjekt: Wandmalerei der Apsis

Eigentümer: Evangelisch– Lutherische Kirche

Wissenschaftliche Untersuchung und Betreuung:

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

beratende Restauratorin: Dipl.-Rest. C. Kelm (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen)

restauratorische Voruntersuchung

Wilfried Sitte, Dipl.-Rest.

Beschreibung der Untersuchungsfläche

Darstellung:	klassisch romanisches Bildprogramm in drei Abschnitten, unten: Vorhangmalerei, nach oben mit Fries abgeschlossen; mittlerer Teil: Darstellung von Heiligen mit Schriftrollen und Nimben, mit umlaufenden Fries abgeschlossen; oben: Maiestas Domini, Christus und Evangelistensymbole, an den Seiten zwei Heiligendarstellungen
Maße:	Höhe ca. 4,85 m, Breite ca. 4,95 m, Tiefe ca. 3,06 m
Material / Technik:	Malereien affresco, partiell organische Bindemittel
Datierung:	1. Hälfte des 13. Jahrhunderts
Künstler:	unbekannt
Einordnung:	originale romanische Wandmalerei um 1240
Standort:	in der ostgerichteten Apsis
Objektgeschichte:	erbaut im 1200, Erweiterung nach Westen um 1500, Übermalung der Apsis im 19. Jahrhundert

Bisherige Restaurierungsmaßnahmen:

1996	Betreuung durch Restaurator, Befunduntersuchungen zum Bestand, Sicherheitsbeklebungen
Literatur:	Dülberg (1997)

5.1.2 Untersuchungen

Auf dem Mauerwerk liegt ein zweilagiger Putz mit feinen Anteilen von zerkleinerten oder ausgeschlammten Raseneisenstein. Die Farbmittel wurden weitgehend affresco aufgebracht. Unter Anregung mit UV-Licht lassen sich secco aufgebrachte Bereiche lokalisieren. Entsprechend der durch die Sinopia vorgegebenen Formen erfolgte die Auslegung der Fondflächen. Neben Ocker- und Rottönen (Erden) wurden auch Blau (Azurit) und Grün (Malachit) eingesetzt. Die Höhungen und die Modellierungen der Gesichter erfolgte in Kalkweiß. In vielen Bereichen verfügt die Putzschicht über keine ausreichende Bindung zum Untergrund. Das macht partiell die Refixierung der Putzschicht an ihren Untergrund mit einem entsprechend angepasstem Klebemittel nötig.

Die kunsthistorisch wertvollen, romanischen Wandmalereien in der Dorfkirche in Battaune sind in die Apsis eingebettet. Als eines es ersten Ergebnisse in diesem Projektteil wurde festgestellt, dass die konkave Geometrie, auf der die Malerei in der Apsis liegt (Abb. 160), einen immensen störenden Einfluss auf die Versuchsanordnung der aktiven Thermografie hat. Wie die Vorversuche eindeutig belegen, ist die gleichmäßige Aufheizung der zu untersuchenden Fläche ein wichtiger Parameter für zuverlässige Ergebnisse. Die Gleichmäßigkeit wird dabei definiert von der Form der Temperaturquelle, punktförmig oder flächig, dem Verhältnis von Quellenfläche zu Versuchsfläche und der geometrischen Anordnung. Für die konkave Geometrie kann derzeit aber keine IR-Strahlungsquelle zur Aufheizung gefunden werden, die das Konkave nachzeichnet und mit Rücksicht auf die starken Entfernungsgradienten zwischen Quelle und Wandoberfläche diese ohne signifikanten Gradienten aufheizt. Daher wurde nach langen Abwägen in diesem Frühjahr vorgeschlagen, wegen der unkalkulierbaren Fehlerquellen die Wandmalereien von Battaune nicht als Pilotflächen zu untersuchen. Bei den sofort eingeleiteten Überlegungen zu einem anderen geeigneten Objekt wurde vom LfDS vorgeschlagen die Kirche von Kühren und Betracht zu ziehen.

Der mittelalterliche Wandmalereizyklus in der Kirche in Kühren stellt den größten zusammenhängenden Wandmalereizyklus in Sachsen dar. Im Vergleich zu Battaune ornamentieren sich die Malereien ebenso den vollständigen Chorraum, der aber einer geraden Geometrie folgt.



Abb. 160 Dorfkirche Battaune, Apsis mit teilweise freigelegter romanischer Wandmalerei

5.2 Kühren

Bei der 1348 erstmals urkundlich erwähnten Dorfkirche in Kühren handelt es sich um einen romanischen Bau mit rechteckigem Chor und rechteckigem Langhaus. Zwischen beiden spannt sich der runde Triumphbogen (Abb. 161). Im 17. Jahrhundert erfolgte der Einbau von Emporen im Langhaus. Bei der Restaurierung der Kirche seit 1952 entdeckte man im Inneren außergewöhnlich reiche Wandmalereien von 1430/40. Der gesamte Chor, der Triumphbogen und Teile der Nord- und Süd- wand des Saales sind figürlich und ornamental bemalt. Im Kirchenschiff ist ein etwa 6 m hoher Christophorus dargestellt. Der Chorraum ist unter anderem mit Darstellungen der Marienverkündigung, der vierzehn Nothelfer, der zwölf Apostel, der Kreuzigung und des Marientodes reichhaltig verziert.



Abb. 161 Kühren, Kirche, Sicht durch das Kirchenschiff in den Chorraum

An der Nordwand der Dorfkirche zu Kühren im Anschluss an die Chorwand ist der Heilige Christophorus dargestellt. Die Wandmalerei zeigt ihn als weißhaarigen Hünen in leicht gebeugter Haltung. Er trägt das Jesuskind über den Fluss. Stützend mit seiner rechten Hand hält er das Kind auf seiner rechten Schulter. Sein Blick ist zum Jesuskind gerichtet. In seiner linken Hand hält er einen belaubten Eichenbaum. Das Jesuskind hält in seiner linken Hand einen Reichsapfel. Die rechte Hand ist segnend ausgestreckt. Beide Figuren sind in üppige faltenreiche Gewänder gehüllt.

5.2.1 Objektidentifikation

Objektstandort: Ev. Pfarrkirche Kühren
Schulstr. 12
04808 Kühren- Burkartshain

Teilobjekt: Wandmalerei im Innenraum der Kirche an der Nordwand des Langhauses

Eigentümer: Evangelisch-Lutherische Kirche

Wissenschaftliche Untersuchung und Betreuung:
Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

beratender Restaurator:
Dipl.-Rest. T. Nimoth (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen)

restauratorische Voruntersuchung und Ausführung:
Heidelmann & Hein¹⁶⁰

Beschreibung der Untersuchungsfläche

Darstellung: Hl. Christophorus

Maße: Höhe ca. 5,24 m, Breite ca. 2,37 m

Material/ Technik: Kalkmörtelputz mit freskal gebundener Malerei

Datierung: Wandmalerei 1430-1440 (nach Dehio 1998)

Künstler/Hersteller: unbekannt

Einordnung: spätgotische Wandmalerei in romanischer Saalkirche aus verputztem Bruchsteinmauerwerk und dachreiterartigem Turmaufsatz, rechteckiger Chor, Triumphbogen und Nord- und Südwand des Langhauses mit figürlicher und ornamentaler Wandmalerei im Chor und auch Darstellungen aus dem Leben Christi

Standort: im Kircheninnenraum auf der Nordwand des Kirchenschiffes ab 1,2 m Höhe nach oben aufgehend

Objektgeschichte: die Kirche wird 1348 erstmals urkundlich erwähnt, vermutliche Anbringung der Wandmalereien im Zuge einer Renovierung der Kirche nach Brandschätzung der Hussiten, im 19. Jh. Einbau von Emporen im Langhaus

Bisherige Restaurierungsmaßnahmen:

1952 kommt es bei Bauarbeiten in der Kirche zufällig zur Entdeckung und später Freilegung der bis dahin überputzten Wandmalereien,

1993 findet eine Reinigung und Konservierung (Festigungen, Anböschungen) durch

Literatur: Christian Rietschel, Bernd Langhof: Dorfkirchen in Sachsen, Berlin 1968, S.151, Georg Dehio: Sachsen II, S. 450f.
Infoheft Kirche

¹⁶⁰ Heidelmann & Hein Restauratorenengesellschaft mbH, Schnorrstraße 70, 01069 Dresden

5.2.2 Schadensaufnahme

Im gesamten Bereich der untersuchten Wandmalerei sind extreme Rissbildungen überwiegend als Krakelee zu finden. Diese wurden in einer detaillierten Schadenskartierung erfasst (Abb. 162). Die Risse sind durch einen Strich mit senkrechten kleinen Strichen dargestellt. Über das gesamte Bildwerk sind zahlreiche Hohlstellen mit zum Teil verformten Putzschollen unregelmäßig verteilt zu finden. Die Hohlstellen sind in der Schadenskartierung mit einer Schraffur erfasst. Auffällig sind auch partielle Putzausbesserungen aus unterschiedlichen Zeiten zumeist in Kombination mit mürbe erscheinenden Untergründen des originalen Wandputzes.

Die optisch sichtbaren Risse und Altergänzungen wurden erfasst und auf einen Plan übertragen. Mittels Perkussionsuntersuchung wurden die Hohlstellen durch die eingebundene Restaurierungsfirma (Heidemann & Hein Restauratorenengesellschaft mbH) detektiert. Eine detaillierte Schadenskartierung für die gesamte Wandmalerei an der Nordwand des Langhauses wurde digital erstellt (Abb. 162). Es erfolgte die Einteilung der Probestellen für die Musterrestaurierung nach Auswertung der ersten Wärmebildaufnahmen und der Perkussionsuntersuchungen.

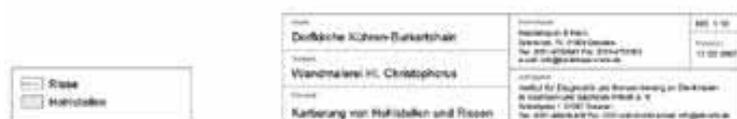
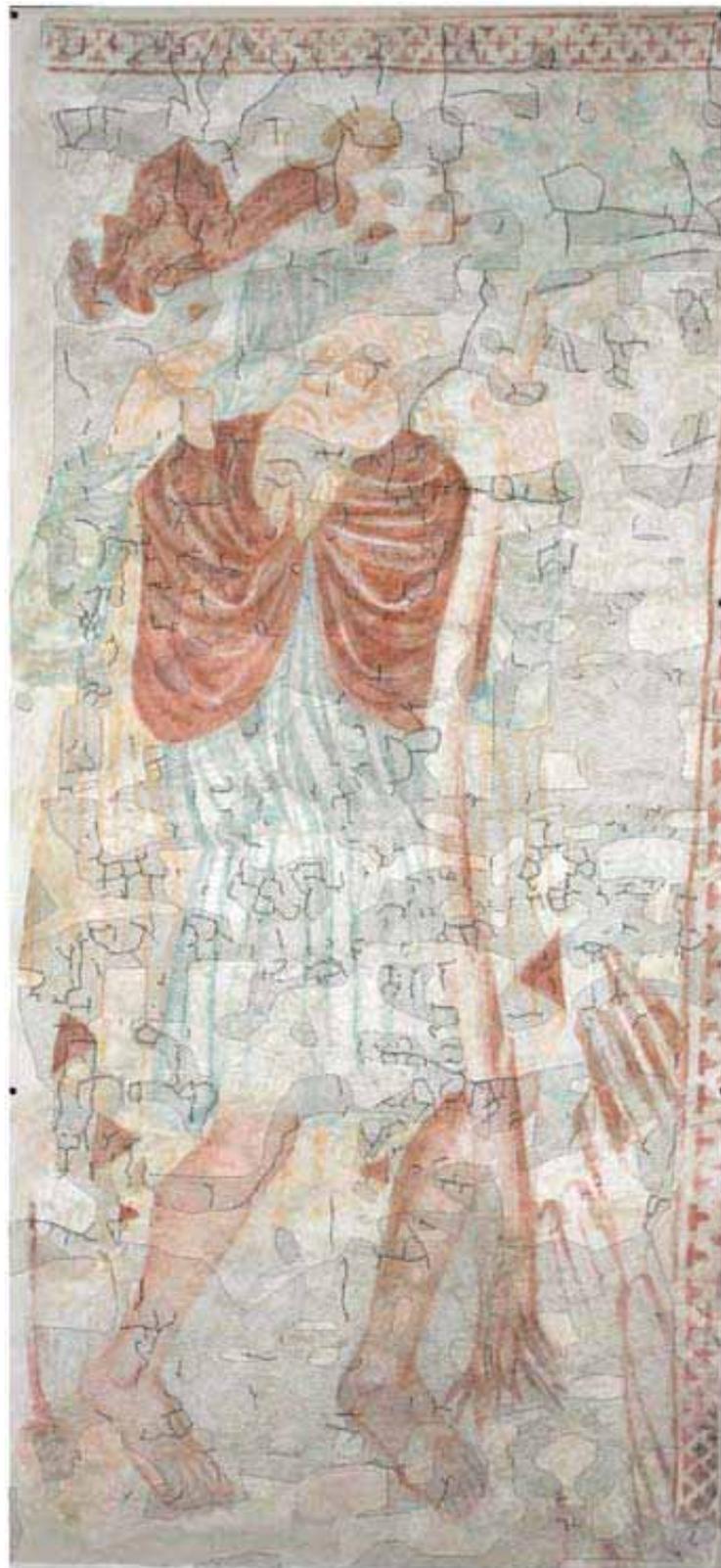


Abb. 162 Schadenskartierung (aus: Bericht Probeachse, Heidemann & Hein)

5.2.3 Untersuchungsparameter

Die in der Höhe 5,20 m große Wandmalerei wurde in drei Höhenabschnitte unterteilt. Die Bemaßung ist in Abb. 163 dargestellt. An allen drei Wandflächen wurde die gleiche Versuchsdurchführung angewendet. Für die höheren Untersuchungsabschnitte wurde mit Stativen gearbeitet, um die Aktivierungs- und Messinstrumente auf eine Arbeitsebene mit dem Bildausschnitt zu bringen. Die Gesamtaufheizzeit wurde etwas variiert in Abhängigkeit des Zeitpunktes des „Durchschlagens“ der Mauerstruktur im IR-Bild. Die IR-Kamera wurde auf die Bildmitte eines Untersuchungsfeldes eingestellt. Abb. 164 bis Abb. 169 dokumentieren den Versuchsaufbau.

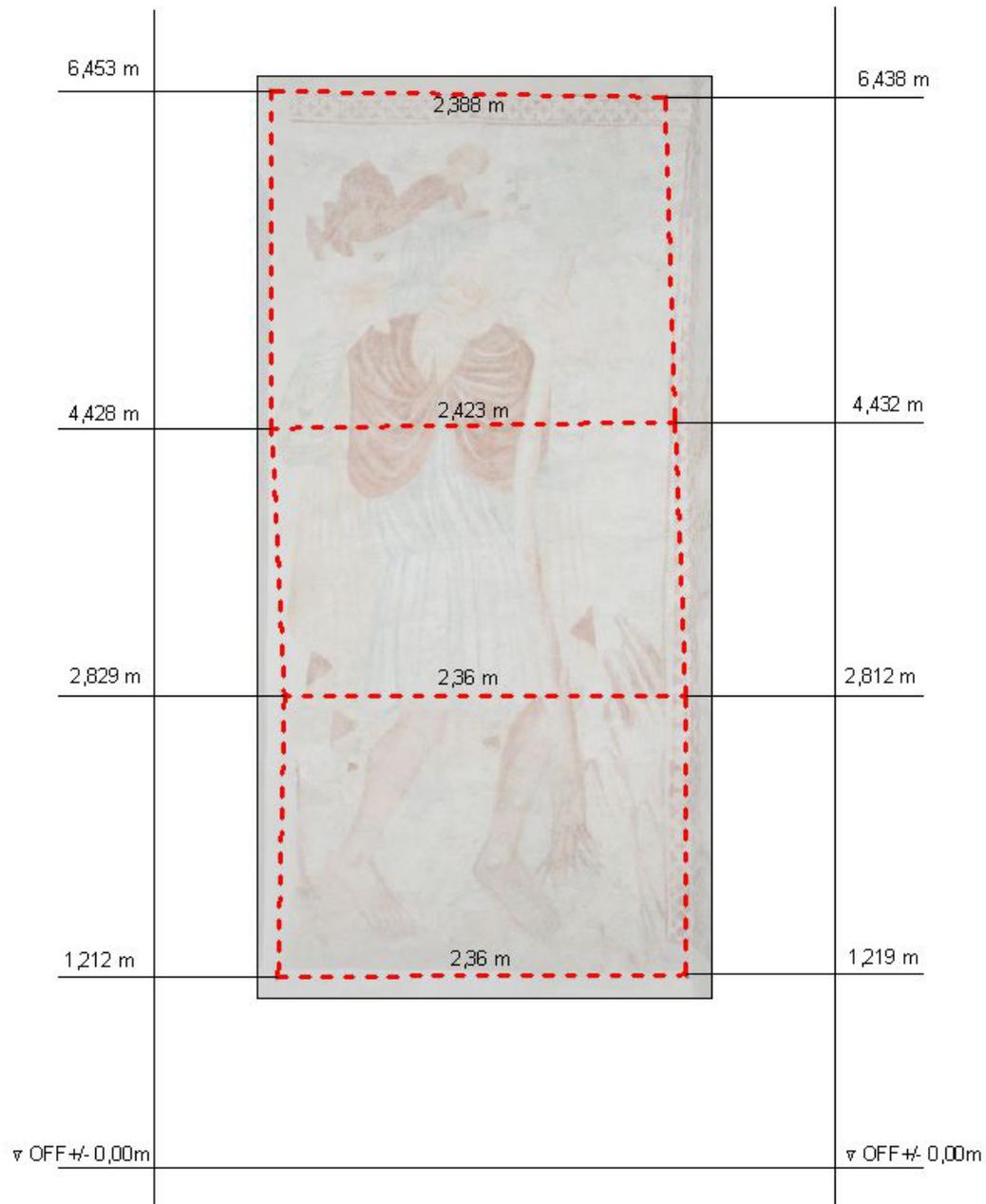


Abb. 163 Bemaßung der Untersuchungsflächen

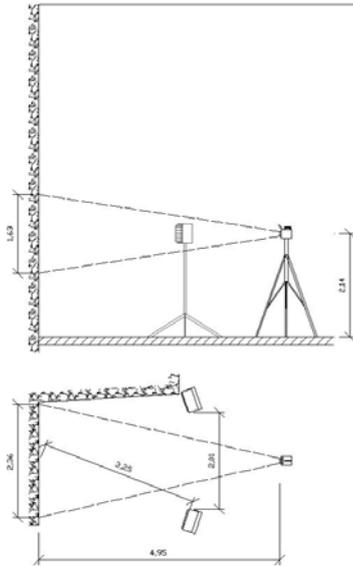


Abb. 164 Schema des Untersuchungsaufbaus



Abb. 165 Versuchsaufbau oberes Feld



Abb. 166 Versuchsvorbereitungen



Abb. 167 Abgedeckter Zustand während der Messung



Abb. 168 Untersuchung im unteren Feld



Abb. 169 Untersuchung im oberen Feld

Es wurde alle 5 sec ein Bild aufgenommen. Nach der Vorlaufzeit von 2 min für die Strahler wurde die Messung gestartet. Es wurde gepulst gearbeitet. Über den Aufheizablauf von 25 min wurden die ungestörten Aufheizzeiten verlängert. Diagramme zeigen den Rythmus. Danach wurde die Abkühlung dokumentiert.

5.2.4 Oberes Untersuchungsfeld

Das obere Untersuchungsfeld erstreckt sich von 4,4 m bis 6,4 m und stellt den Kopf von Christophorus mit dem Jesuskind dar (Abb. 170). Die Schadenskartierung weist Schäden sind vor allem oberhalb von Jesus bis zu Fries und im Gewand des Christophorus aus.



Abb. 170 Oberes Untersuchungsfeld

In Abb. 171 sind die Erwärmungskurven für eine kalte Fläche und eine wärmende Fläche im oberen Untersuchungsfeld dargestellt. Es wurde über 25 min aktiviert und weitere 5 min die Abkühlung beobachtet. Das Sägezahnmuster verdeutlicht das rhythmische Pulsen der Aufheizung. Zur Auswertung wurden die Aufnahmen der Untersuchungsphasen mit Abdeckung heran gezogen.

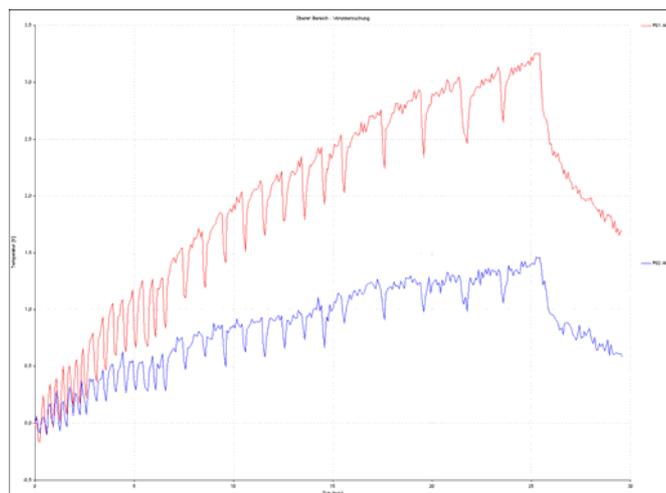


Abb. 171 Erwärmungskurve für eine kalte Fläche (blau) und eine wärmende Fläche (rot) im oberen Untersuchungsfeld

Oberes Untersuchungsfeld

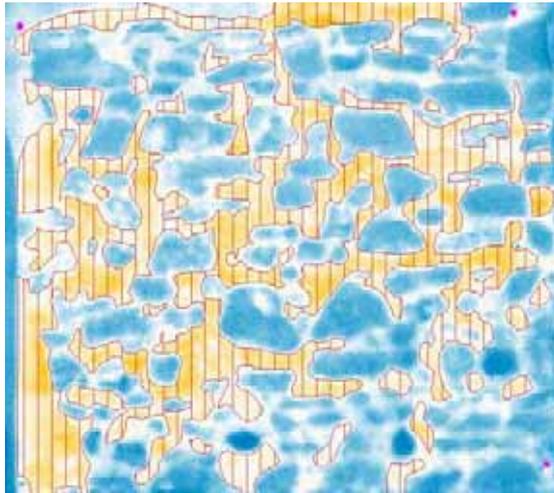


Abb. 172 Oberer Bereich bei Beginn der Abkühlung

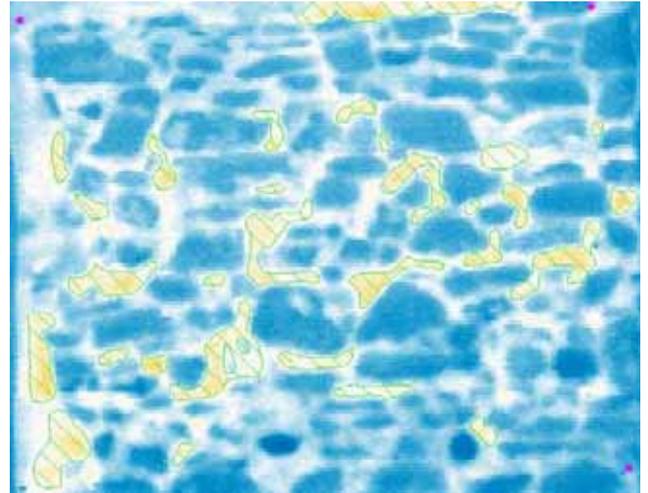


Abb. 173 Oberes Untersuchungsfeld in fortgeschrittener Abkühlung

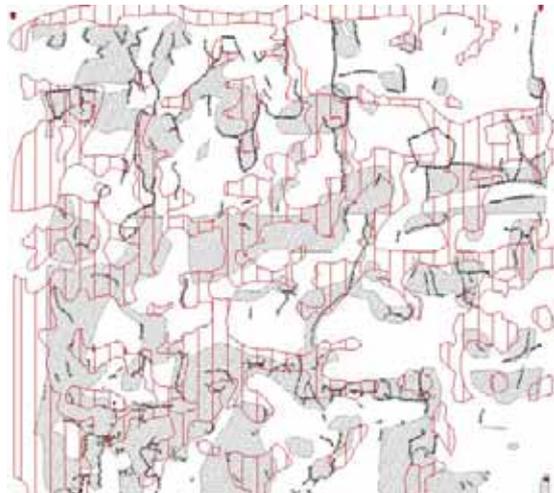


Abb. 174 Vergleich der Kartierung Heidelbergmann & Hein mit der IR-Kartierung nach Abb. 172



Abb. 175 Vergleich der Kartierung Heidelbergmann & Hein mit der IR-Kartierung nach Abb. 173



Abb. 176 Graphische Darstellung der IR-Kartierung von Abb. 172 auf dem Foto Wandmalerei



Abb. 177 Graphische Darstellung der IR-Kartierung von Abb. 173 auf dem Foto Wandmalerei

Die Auswertung der IR-Aufnahmen und Interpretation in Form von Kartierungen berücksichtigt verschiedene Phasen der Untersuchung. So wurden Aufnahmen bei beginnender Abkühlung und bei fortschreitender Abkühlung getrennt betrachtet und ausgewertet. Die Ergebnisse aus der beginnenden Abkühlung beschreiben offensichtlich am ehesten Putzbereiche, die als „entfestigt“ zu bezeichnen wären. Für diese Kartierung wurde eine Schraffur in rot mit senkrechten Linien ausgewählt. In der fortgeschrittenen Abkühlung zeichnen sich die hohl stehenden Putzbereiche am deutlichsten ab. Diese Bereiche wurden mit einer grünen, schräg verlaufenden Schraffur nachgezeichnet. Prinzipiell lassen sich die Kartierungen übereinander legen und mit unterschiedlichen Schraffuren die Schadensbereiche klassifizieren. Exemplarisch ist das in Abb. 178 dargestellt. Für die einzelnen Untersuchungsbereiche werden aber die Schadenskategorien einzeln von den entsprechenden IR-Aufnahmen abgeleitet.

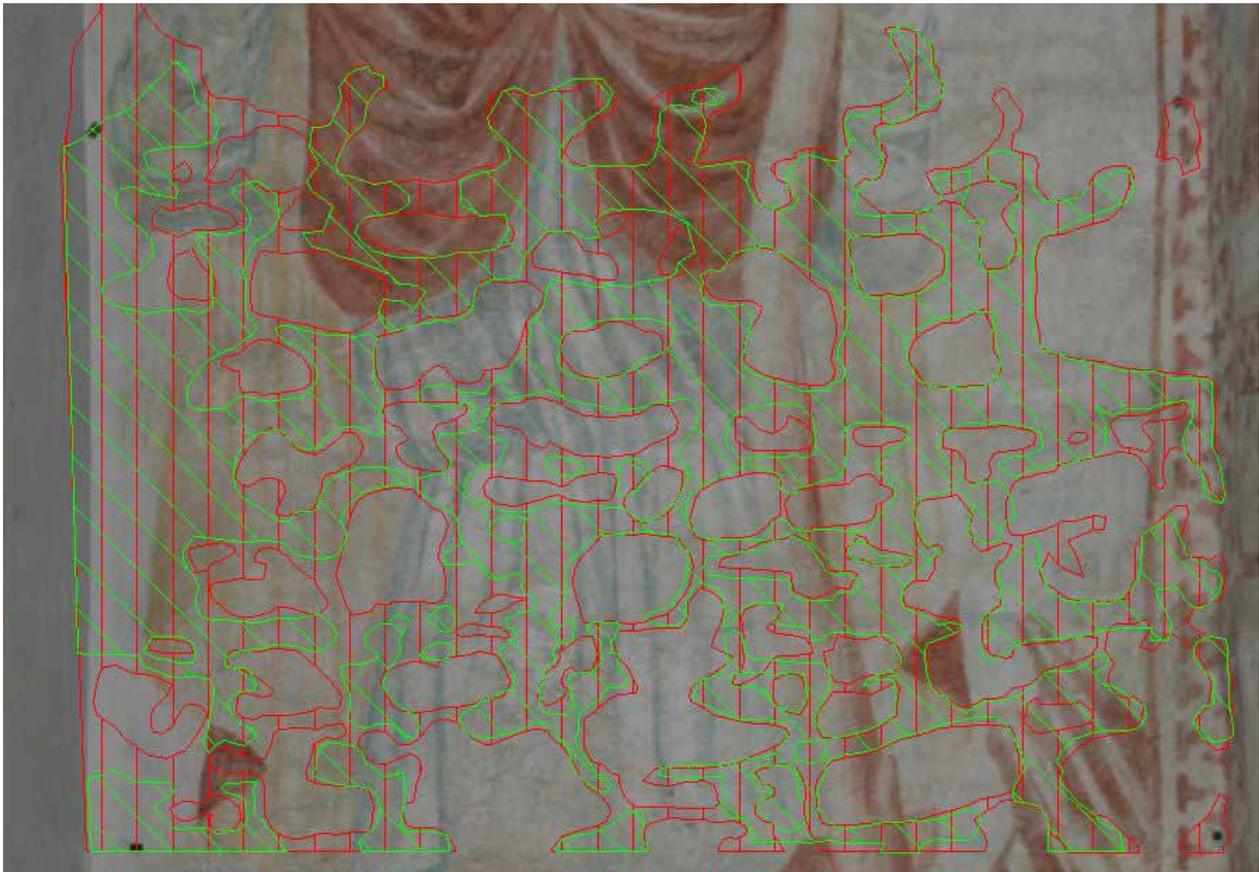


Abb. 178 Rote Schraffur (entfestigte Bereiche) und grüne Schraffur (Hohlstellen) aus der Interpretation unterschiedlicher IR-Sequenzen zusammen in einer Kartierung auf der Grundlage eines Fotos dargestellt (mittlerer Bereich)

5.2.5 Mittleres Untersuchungsfeld

Im mittleren Untersuchungsfeld von 2,8 m bis 4,4 m Höhe befindet sich die Gewanddarstellung der Christophorus (Abb. 179). Auf einem blau gezeichneten Untergewand trägt er einen außen roten und innen gelb angelegten Umhang. Der untere Bildabschnitt verläuft auf der Höhe der Knie. Die Schadenskartierung zeigt Hohlstellen unregelmäßig verteilt über den gesamten Untersuchungsausschnitt.



Abb. 179 Mittleres Untersuchungsfeld

In sind die Erwärmungskurven für eine kalte Fläche und eine wärmende Fläche im mittleren Untersuchungsfeld dargestellt. Es wurde über 25 min aktiviert und weitere 10 min die Abkühlung beobachtet. Das Sägezahnmuster verdeutlicht das rhythmische Pulsen der Aufheizung. Zur Auswertung wurden die Aufnahmen der Untersuchungsphasen mit Abdeckung heran gezogen.

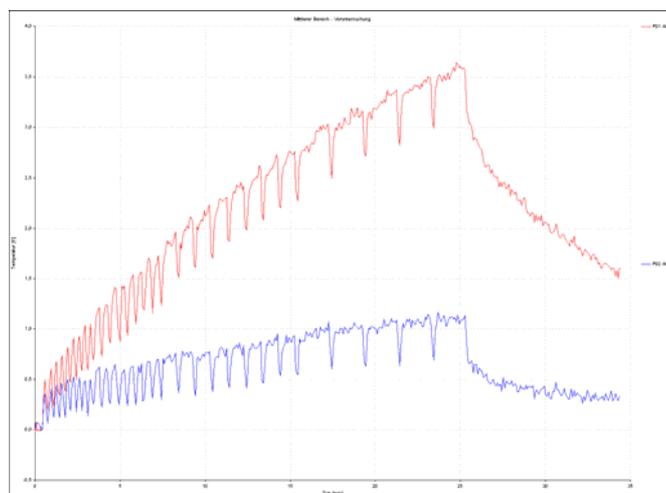


Abb. 180 Erwärmungskurven für eine kalte Fläche (blau) und eine wärmende Fläche (rot) im mittleren Untersuchungsfeld

Mittleres Untersuchungsfeld

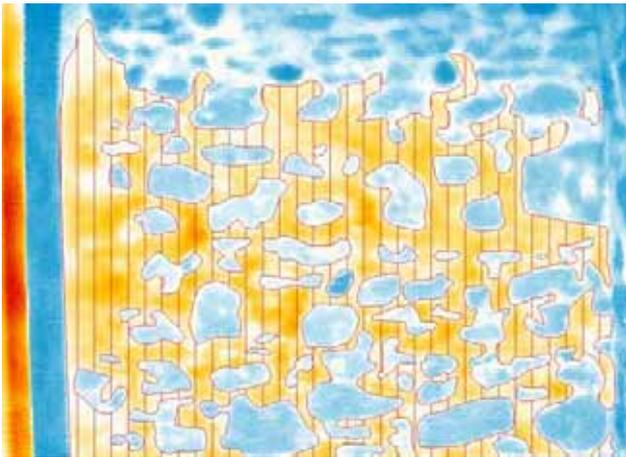


Abb. 181 Mittleres Untersuchungsfeld bei Beginn der Abkühlung

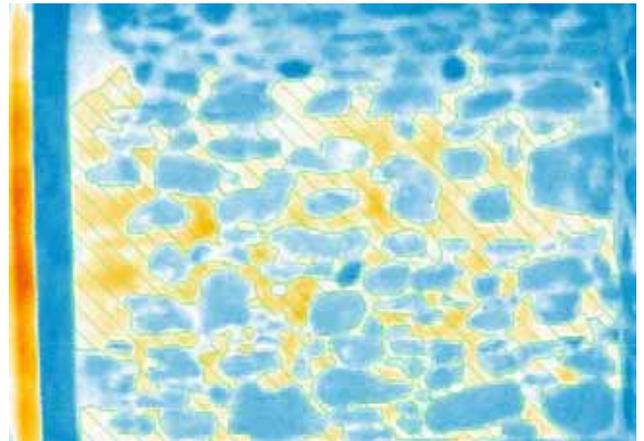


Abb. 182 Mittleres Untersuchungsfeld in fortgeschrittener Abkühlung

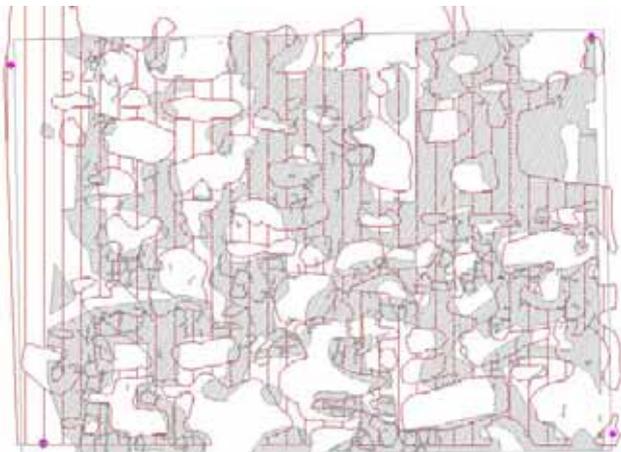


Abb. 183 Vergleich der Kartierung Heidelbergmann & Hein mit der IR-Kartierung nach Abb. 181

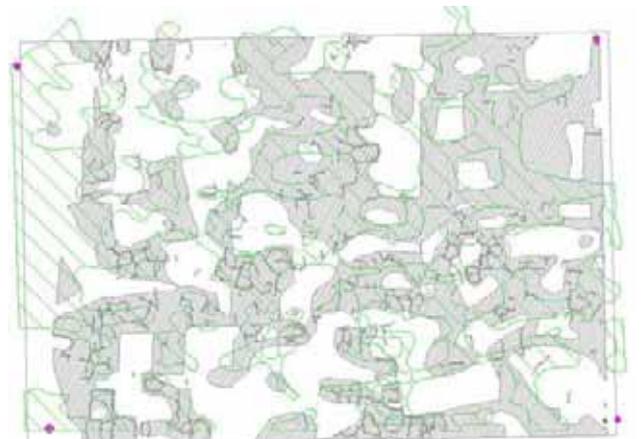


Abb. 184 Vergleich der Kartierung Heidelbergmann & Hein mit der IR-Kartierung nach Abb. 182



Abb. 185 Graphische Darstellung der IR-Kartierung von Abb. 181 auf dem Foto Wandmalerei



Abb. 186 Graphische Darstellung der IR-Kartierung von Abb. 182 auf dem Foto Wandmalerei

5.2.6 Unteres Untersuchungsfeld

Das untere Untersuchungsfeld zeigt den Ausschnitt mit den Beinen und Füßen des Christophorus. Hier zeigt die Schadenskartierung die flächig größten Hohlstellen an der Wandmalerei.



Abb. 187 Unteres Untersuchungsfeld

In Abb. 188 sind die Erwärmungskurven für eine kalte Fläche und eine wärmende Fläche im unteren Untersuchungsfeld dargestellt. Es wurde über 25 min aktiviert und weitere 5 min die Abkühlung beobachtet. Das Sägezahnmuster verdeutlicht das rhythmische Pulsen der Aufheizung. Zur Auswertung wurden die Aufnahmen der Untersuchungsphasen mit Abdeckung heran gezogen.

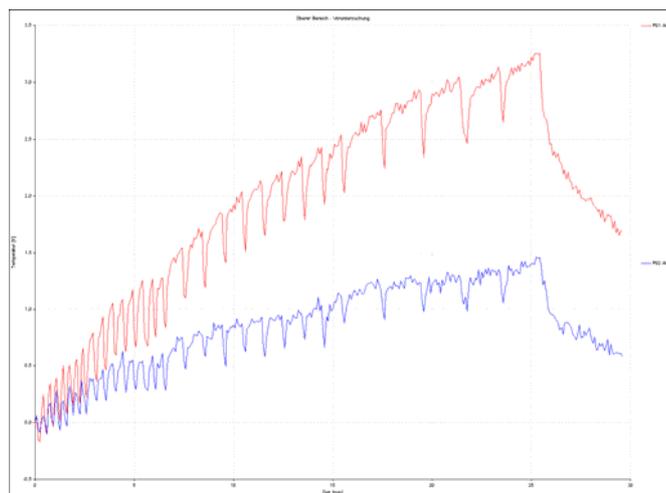


Abb. 188 Erwärmungskurve für eine kalte Fläche (blau) und eine wärmende Fläche (rot) im unteren Untersuchungsfeld

Unteres Untersuchungsfeld, Voruntersuchungen

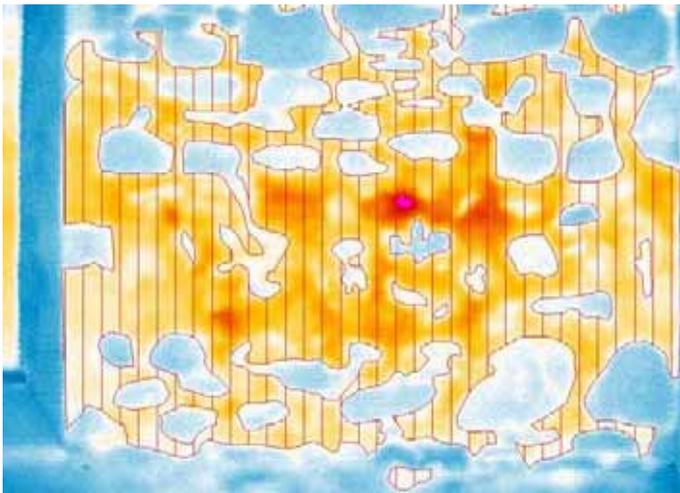


Abb. 189 Unteres Untersuchungsfeld bei Beginn der Abkühlung

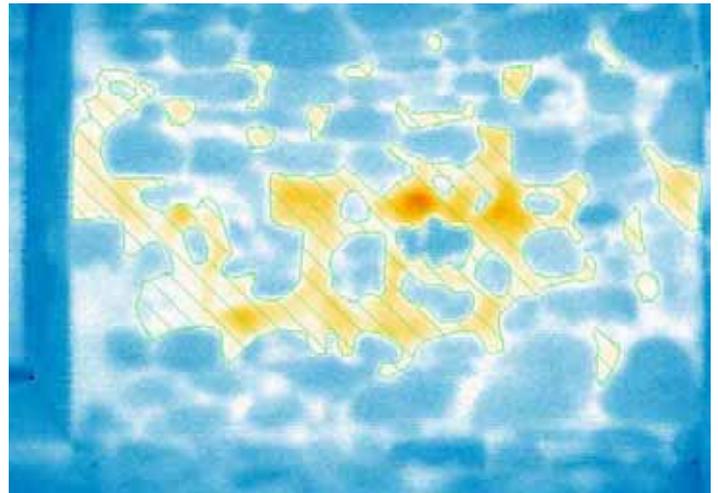


Abb. 190 Unteres Untersuchungsfeld in fortgeschrittener Abkühlung

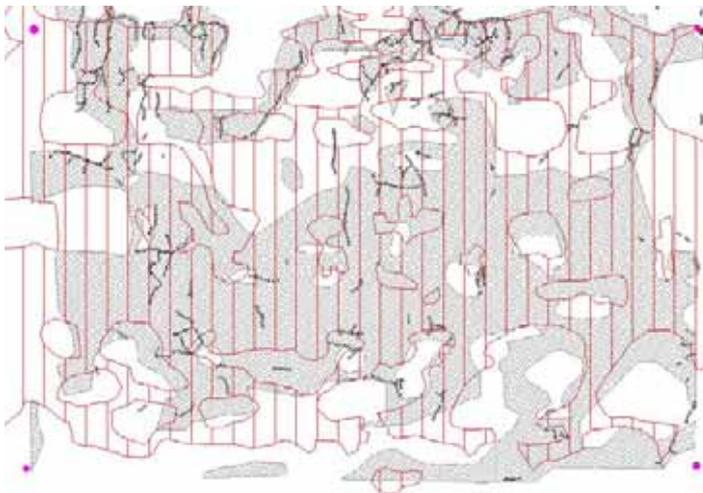


Abb. 191 Vergleich der Kartierung Heidelmann & Hein mit der IR-Kartierung nach Abb. 189

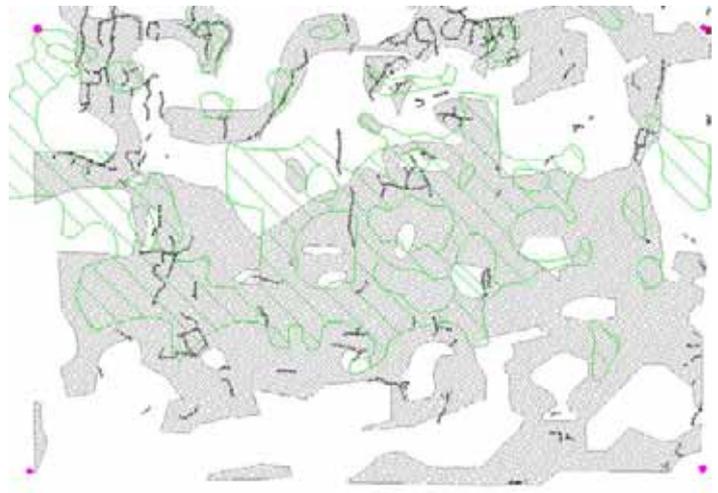


Abb. 192 Vergleich der Kartierung Heidelmann & Hein mit der IR-Kartierung nach Abb. 190



Abb. 193 Graphische Darstellung der IR-Kartierung von Abb. 189 auf dem Foto Wandmalerei



Abb. 194 Graphische Darstellung der IR-Kartierung von Abb. 190 auf dem Foto Wandmalerei

5.2.7 Hinterfüllung und Nachuntersuchung

Es wurden zwei Probeflächen mit den Maßen 50x50cm im unteren Bereich der Wandmalerei angelegt. In diese wurden Bohrungen zur Injektion (\varnothing 4mm) gesetzt. Auf das Vornässen der Hohlstelle mit einem Alkohol - dest. Wasser Gemisch (1:1) folgte das Hinterfüllen der Hohlstellen mit einem Injektage material auf Basis von dispergierten Weißkalkhydrat zur Herstellung eines Haftverbundes der Putzschicht zum Natursteinmauerwerk. Die Applikation erfolgte mit Injektionsspritzen und – schläuchen unter partieller Zugabe eines Fließmittels zur Optimierung des Fließverhaltens. Mit einem farblich eingestellten Restauriermörtel wurden die Bohreintrittsöffnungen geschlossen (Abb. 195).

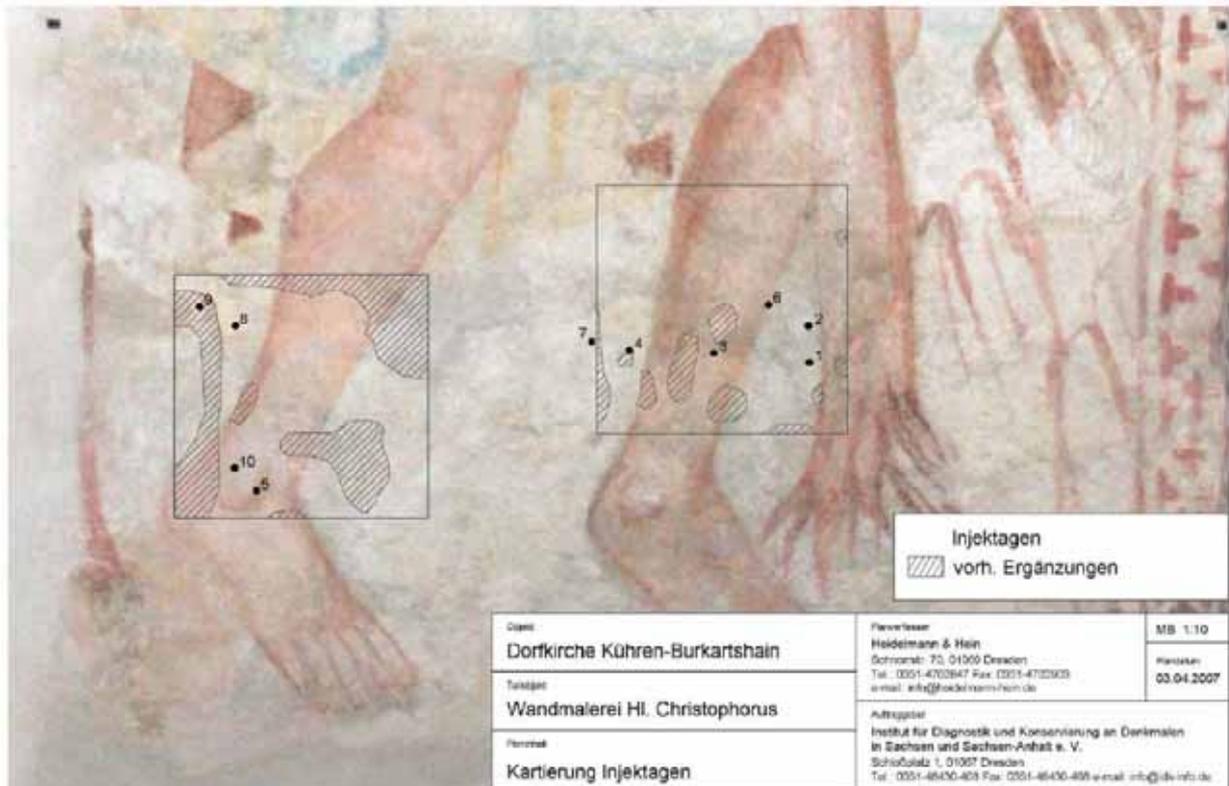


Abb. 195 Maßnahmenkartierung im unteren Untersuchungsfeld (aus: Bericht Probeachse, Heidelmann & Hein)

Nachuntersuchungen, unteres Untersuchungsfeld



Abb. 196 Nachuntersuchung des unteren Untersuchungsfeldes bei Beginn der Abkühlung

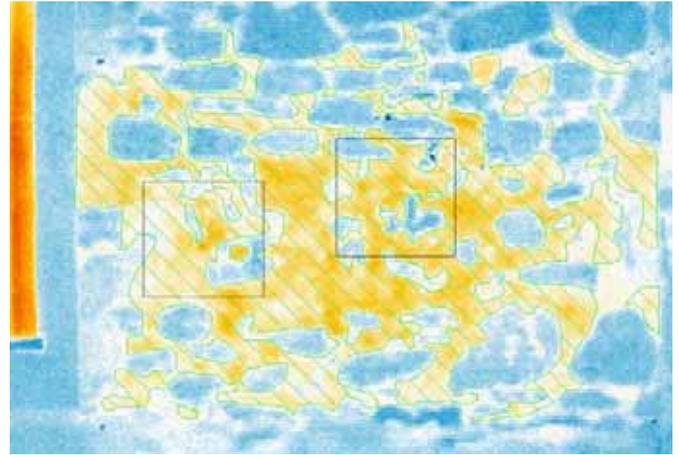


Abb. 197 Nachuntersuchung des unteren Untersuchungsfeldes in fortgeschrittener Abkühlung

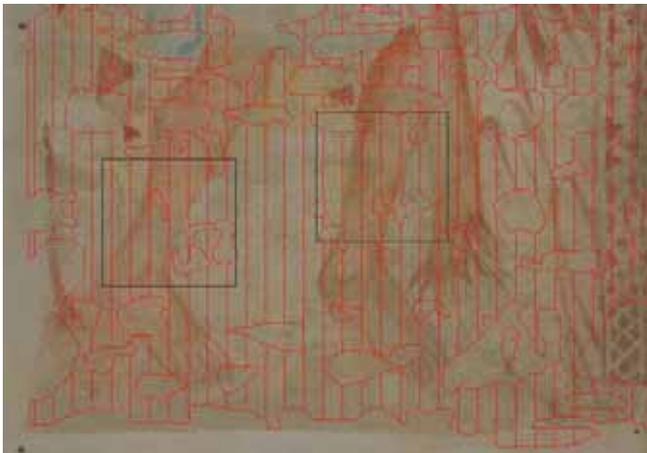


Abb. 198 Graphische Darstellung der IR-Kartierung der Nachuntersuchung von (Abb. 196) auf dem Foto Wandmalerei



Abb. 199 Graphische Darstellung der IR-Kartierung der Nachuntersuchung (Abb. 197) auf dem Foto Wandmalerei

Der Vergleich der Nachmessungen mit den Vormessungen am unteren Untersuchungsfeld zeigt nachweislich geringere Aufheizungen im Bereich der hinfüllten Hohlstellen. Die verbesserte Anbindung der vormals abgelösten Putzschollen zeigt sich somit auch durch eine stärkere thermische Anbindung an das Mauerwerk.

Mittels aktiver Thermographie können Hinterfüllungen von Hohlstellen offensichtlich berührungslos und zerstörungsfrei nachgewiesen werden.

5.3 Bad Schmiedeberg

In Sachsen-Anhalt wurden mittelalterliche Wandmalereien in der südlichen Vorhalle der evangelischen Kirche St. Nikolai in Bad Schmiedeberg als Referenzobjekt für die IR-Untersuchungen im Projekt ausgewählt (Abb. 200). Bad Schmiedeberg liegt in hügeliger Landschaft in der Dübener Heide im Landkreis Wittenberg, in Sachsen-Anhalt. Die evangelische Stadtkirche St. Nikolai ist eine große, dreischiffige Hallenkirche aus der 2. Hälfte des 15. Jh. und diente zwischen 1813 und 1816 als Universitätskirche der Universität Wittenberg. Im südwestlichen Teil der Kirche befinden sich noch Reste des 1429 zerstörten, spätromanischen Vorgängerbaus, der heute noch romanische Wandmalereien trägt. An diesen wurden die Untersuchungen durchgeführt.

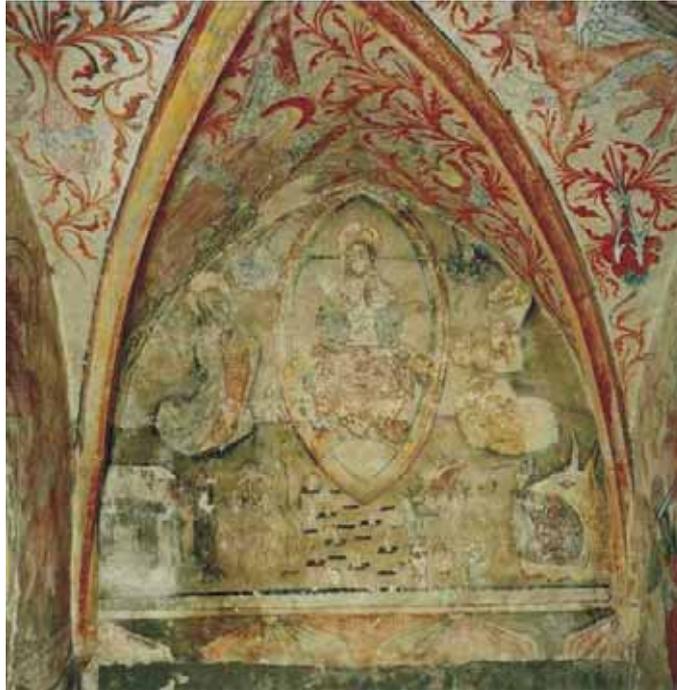


Abb. 200 Wandmalerei an der Ostwand der südlichen Vorhalle (Photo: J. Körber)

Die teilweise stark geschädigten Wandmalereien sind heute in den Südvorbau der Kirche integriert, wurden 1904 freigelegt und anschließend übermalt. Die West- und Ostwand der Vorhalle sind besonders stark infolge von Feuchteinwirkung und Salzkristallisation gefährdet. Abstehende Putzblasen haben sich daraufhin gebildet. Deren Ausdehnung ist bislang unklar. Bislang konnten nur erste Notsicherungen durchgeführt werden, um ein Abfallen von Teilen der Wandmalereien zu verhindern.

Über dem Kirchenportal an der Nordwand ist die archaisch wirkende thronende Muttergottes und seitlich St. Nikolaus und Maria mit Kind zu finden. An der Südwand ist die Vertreibung aus dem Paradies, an der Westwand Geißelung und Dornenkrönung Christi sowie an der Ostwand das jüngste Gericht dargestellt. Darüber hinaus befinden sich im Gewölbe zwischen Rankenwerk die Evangelistensymbole.

5.3.1 Objektidentifikation

Objektstandort: Kirche St. Nikolai
Kirchstraße 5
06905 Bad Schmiedeberg

Teilobjekt: Wandmalereien in der südlichen Vorhalle

Eigentümer: Evangelische Kirche

Wissenschaftliche Untersuchung und Betreuung:
Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

beratender Restaurator:
Dr. Thomas Danzl (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen)

restauratorische Voruntersuchung und Ausführung:
Joachim Körber¹⁶¹

Beschreibung der Untersuchungsfläche

Darstellung: thronende Muttergottes und seitlich St. Nikolaus und Maria mit Kind

Maße: 150 cm x 160 cm, 230 cm hoch über dem Boden

Material/ Technik: Secco-Malerei

Datierung: romanisch

Künstler/Hersteller: unbekannt

Einordnung: romanische Wandmalereien

Standort: südliche Vorhalle, Ostwand

Objektgeschichte: Reste des 1429 zerstörten Vorgängerbaus der dreischiffigen Hallenkirche
aus der 2. Hälfte des 15. Jahrhunderts

Bisherige Restaurierungsmaßnahmen:

1904 Freilegung, Übermalung

19?? Ausbesserung von Fehlstellen mit weichem Kalkmörtel

19?? weitere Ausbesserungen mit zementhaltigem Mörtel

1995 Notsicherungsmaßnahmen

1999 Hinterfüllungen

5.3.2 Untersuchungen

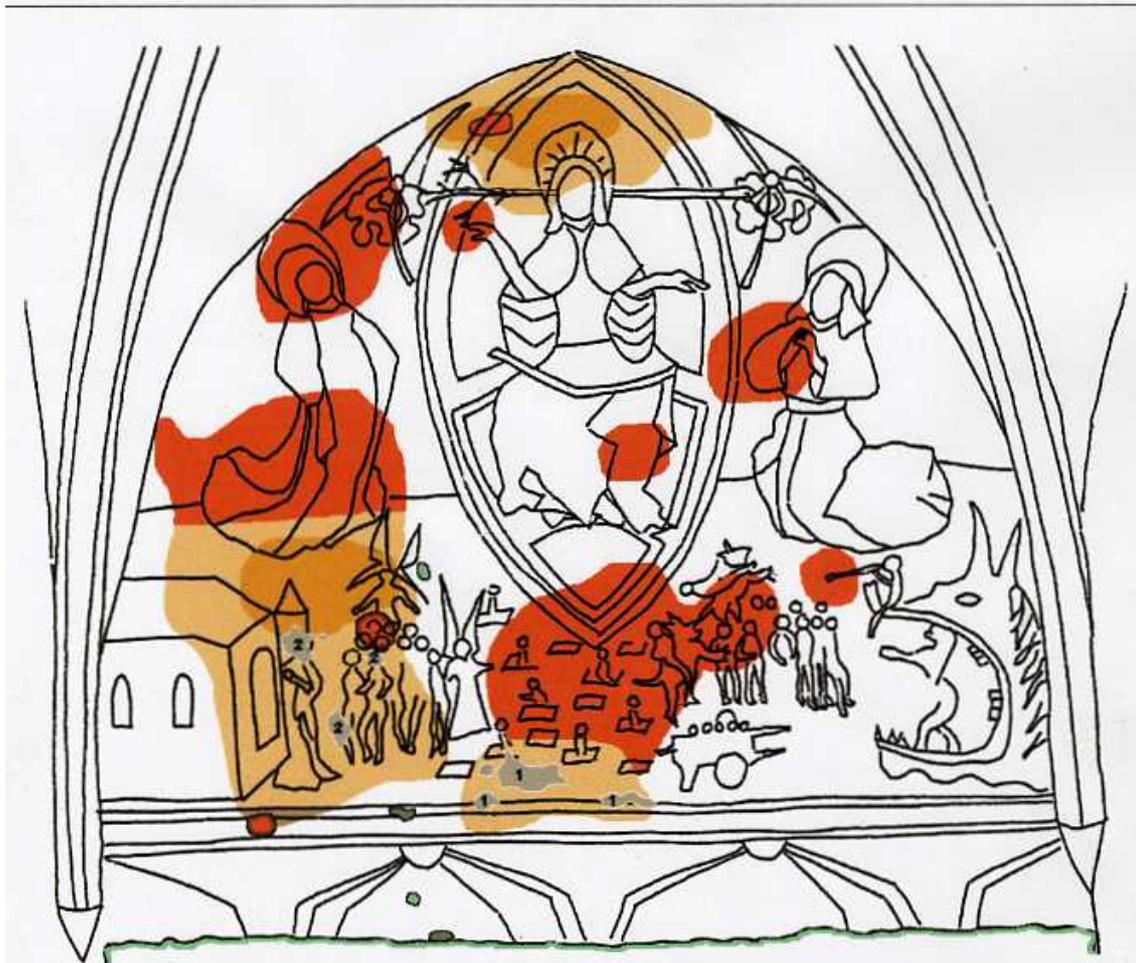
5.3.2.1 Beschreibung

Die teilweise stark geschädigten Wandmalereien sind in Secco-Technik ausgeführt und wurden 1904 freigelegt und anschließend übermalt (Angaben durch Herrn J. Körber). Auf allen Wand- und Gewölbeflächen ist noch der originale Putz vorhanden. Er ist einlagig aufgebracht und dann oberflächlich mit einem Kellenrücken verdichtend geglättet worden. Es zeigen sich gravierende Schäden in Form großflächiger Putztrennungen, die sowohl zwischen Putzmörtel und Mauerwerk als auch innerhalb des Putzmörtels liegen. Stellenweise gibt es große, sehr weit abstehende Blasen, die nur selten noch komplett geschlossen sind. Entweder sie sind zur Mitte hin aufgebrochen oder scheren an den Randbereichen ab. In vielen Fällen liegt in der unteren Hälfte der Putzblasen lockeres, bröckeliges Material eingeschlossen. Anfang des vergangenen Jahrhunderts erfolgten einige Ausbesserungen von Fehlstellen innerhalb des erhaltenen Originalputzes. Sie wurden mit weichem Kalkmörtel ausgeführt. In

¹⁶¹ Joachim Körber, Lutherstr. 45, 06886 Lutherstadt Wittenberg

jüngerer Zeit ist dann noch einmal mit zementhaltigem Mörtel ausgebessert worden. Die Abb. 201 zeigt den Zustand der ausgewählte Musterfläche an der Ostseite der Vorhalle, der zum Zeitpunkt der Vormessungen mit der aktiven IR-Thermographie vorlag. Die entsprechende Darstellung beruht auf der Perkussionskartierung des Bildausschnittes, die durch den Restaurator J. Körber vorgenommen worden ist. Die verschiedenen Farben kennzeichnen einerseits vorangegangene Sicherungsmaßnahmen und andererseits Hohlstellen unterschiedlicher Tiefen.

BAD SCHMIEDEBERG	bearbeitet Juli 1999	SEITE 10
STADTKIRCHE		
RESTAURIERUNG WANDMALEREI IN DER SÜDVORHALLE	Wand	Ostwand
Joachim Körber Lutherstraße 45 06886 Lu.-Wittenberg Tel/Fax 03491 / 40 35 39		
Putzblasen		



	Kalkmörtelputz in Putzfehlstelle und Anböschung der Putzkante im Rahmen der Notsicherungsmaßnahme von 1995
	HGZ II - Mörtel in Putzfehlstelle , Probe von 1998
	Hinterfüllung mit HGZ II , Juni 1999 (insgesamt ca. 8 Kg Trockenmenge)
	Bereiche mit bis zu 4 cm von der Mauer absteher Putzscheibe
	HGZ II - Mörtel in Putzfehlstelle mit Kalksteinmehl , Juni 1999 1 Auf 120 g HGZ II - Pulver + 25 ml Wasser + Emulgator_PUR, Mowilith + 10 g Kalksteinmehl , mittel 2 Auf 120 g HGZ II - Pulver + 25 ml Wasser + Emulgator_PUR, Mowilith + 30 g Kalksteinmehl , mittel
	noch loses Putzgefüge nach der Hinterfüllung
	noch unbehandelte Putzblasen, bis 3 cm von der Mauer absteher

Abb. 201 Kombinierte Schadens- und Maßnahmenkartierung an der Ostwand der Vorhalle (Körper 1999)

KIRCHE BAD SCHMIEDEBERG		DATUM: 2. DEZEMBER 1995		BLATT-NR.: 11			
NOTSICHERUNGSMAßNAHMEN		KIRCHE, VORHALLE					
ROSANNA MINELLI ANNASTRASSE 4 99867 GOTHA TEL. 03621/709787 0171/3212524 JOACHIM KÖRBER LUTHERSTRASSE 45 06886 LUTHERST. WITTENBERG TEL. 03491/403539		GE- BÄUDE	EBENE	RAUM	RAUM- BEGR.	DETAIL FLÄCHE	BEF.- NR.
FOTODOKUMENTATION			EG	VH			
BEMERKUNG: Südwand (Wand a), links, Vorzustand - große Fehlstellen und Aufplatzung, Schadenskartierung siehe Blatt 20		ANH. TEXT		<input type="checkbox"/>			
		ANH. FOTO		<input checked="" type="checkbox"/>			
		ANH. PLAN		<input type="checkbox"/>			
							
Bearbeiter: Rosanna Minelli / Joachim Körber							

Abb. 202 Dokumentation Notsicherungsmaßnahmen (Körper/Minelli)

KIRCHE BAD SCHMIEDEBERG		DATUM: 2. DEZEMBER 1995		BLATT-NR.: 13	
NOTSICHERUNGSMÄßNAHMEN		KIRCHE, VORHALLE			
ROSANNA MINELLI ANNASTRASSE 4 99867 GOTHA TEL. 03621/709787 0171/3212524		GE- BÄUDE	EBENE	RAUM	RAUM- BEGR.
JOACHIM KÖRBER LUTHERSTRASSE 45 06886 LUTHERST. WITTENBERG TEL. 03491/403539					DETAIL FLÄCHE
FOTODOKUMENTATION			EG	VH	BEF- NR.
BEMERKUNG: Südwand (Wand a), Mitte, Vorzustand - Fehlstellen und Aufplatzung, Schadenskartierung siehe Blatt 20		ANH. TEXT <input type="checkbox"/> ANH. FOTO <input checked="" type="checkbox"/> ANH. PLAN <input type="checkbox"/>			
					
Bearbeiter: Rosanna Minelli / Joachim Körber					

Abb. 203 Dokumentation Notsicherungsmaßnahmen (Körber/Minelli)

5.3.2.2 Messfelder

Im Rahmen der Voruntersuchungen sind auf der linken Hälfte der Malerei der Ostwand (Abb. 204) insgesamt zwei Messfelder angelegt worden. Da sich allerdings die durch den Restaurator hinterfüllten Bereiche auf das ursprünglich Messfeld 2 konzentrieren bzw. drei bearbeitete und zuvor stark gefährdete Hohlstellen oberhalb des voruntersuchten Bereiches liegen, konzentriert sich die Darstellung der Ergebnisse auf Messfeld 2.

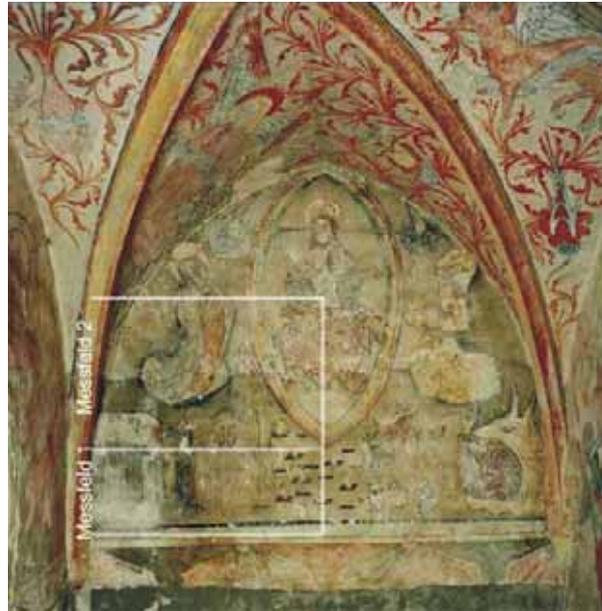


Abb. 204 Lokalisierung der Messfelder

5.3.2.3 Aufheiztechnik

Zwei Infrarotstrahler wurden sowohl bei den Voruntersuchungen als auch bei den Nachuntersuchungen der Hinterfüllmaßnahme mit jeweils der halben Leistung (1500 Watt pro Strahler) über 15 Minuten eingesetzt. Dadurch war eine relativ homogene Erwärmung des untersuchten Wandausschnitts möglich.

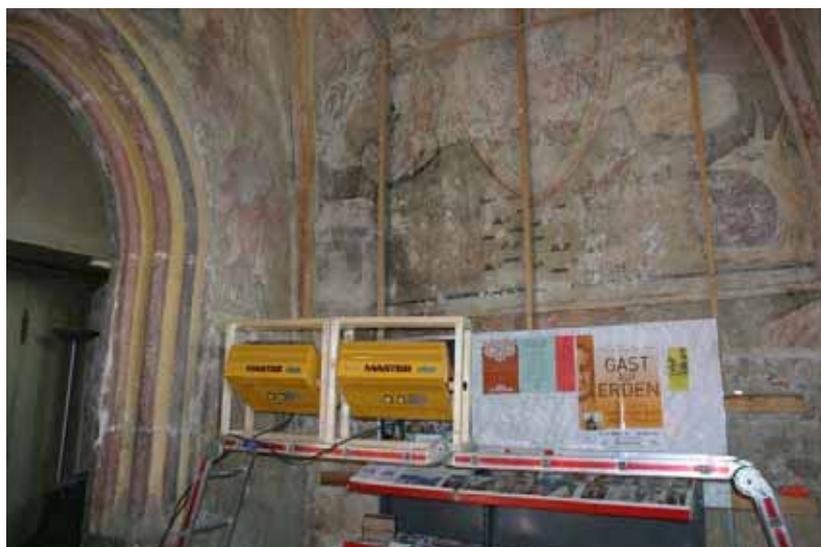


Abb. 205 Aufheizung durch IR-Heizstrahler

5.3.2.4 Voruntersuchungen

Zur Sicherung kam vor einiger Zeit eine Stützlattung vor die Wandmalerei (Abb. 206). Sie ist allerdings nicht mit dem Bildfeld verbunden. Die Holzlatten zeichnen sich deutlich in den IR-Thermographie-Bildern ab und können so als Orientierung dienen.



Abb. 206 Holzlattung zur Sicherung

Im Rahmen der Voruntersuchungen, die im April 2006 ausgeführt wurden, konnten im unteren Teil des Bildfeldes 2 mit bloßem Auge vor allem bereits gesicherte und darüber weitgehend hohl liegende Bereiche beobachtet werden. Die gesicherten Zonen fallen im Photo durch die hellen Mörtelflecken auf. In Abb. 207 sind die Ergebnisse der Perkussionskartierung des Restaurators einem Photo gegenübergestellt.

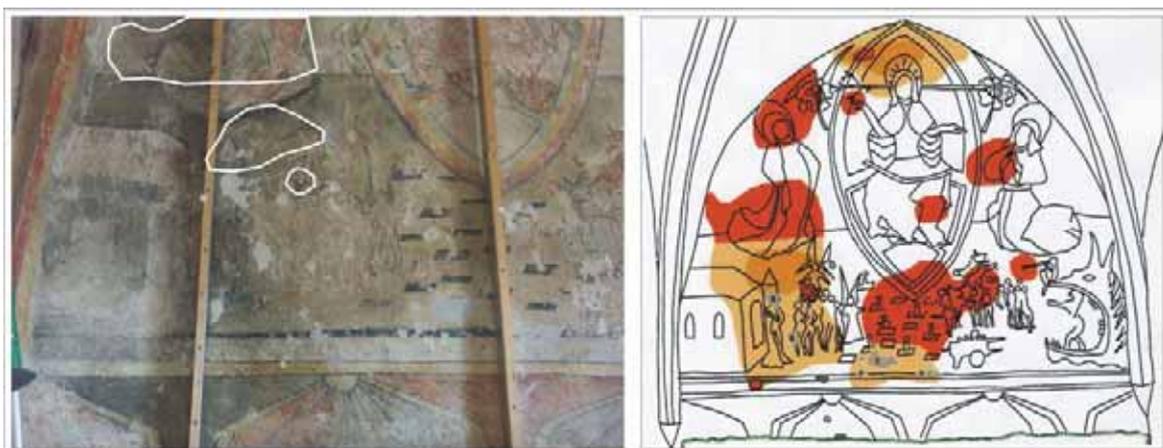


Abb. 207 Darstellung der zum Zeitpunkt der Voruntersuchungen hohl liegenden Bereiche

Hier sind die kritischen Zonen nochmals vermerkt, die auch bei eigener Überprüfung durch leichtes Klopfen zumindest qualitativ bestätigt werden konnten.

Zunächst wurde der ausgewählte Wandmalereiausschnitt mit den beiden Strahlern (siehe oben) 15 Minuten erwärmt. In der folgenden Abbildungsreihe (Abb. 208) sind Aufnahmen der sich daran anschließenden Abkühlungsphase dargestellt, die 20 Minuten mit der Kamera verfolgt wurde. In die Bilder sind zur Orientierung Bildelemente der Wandmalerei integriert worden. In der ersten Abbildung,

die zu Beginn der Abkühlphase aufgenommen worden ist, sind noch zusätzlich die Stellen mit hellgrauen Linien umkreist, in denen gemäß der Perkussionskartierung Hohlstellen erwartet werden.

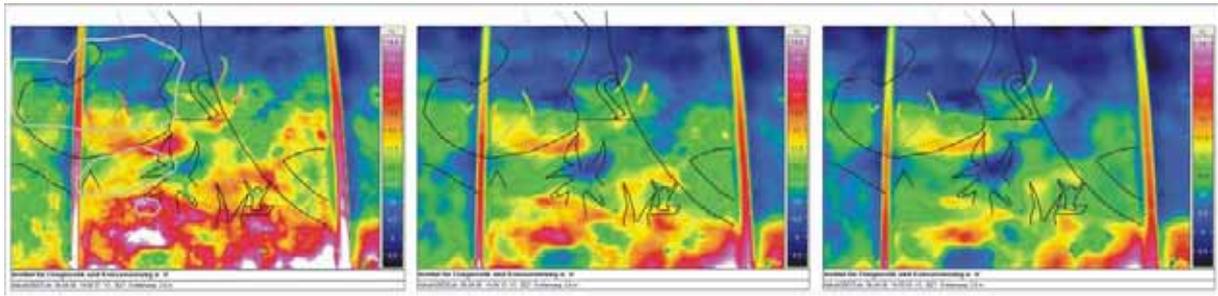


Abb. 208 Voruntersuchungen – Abkühlphase; mit Markierung (gemäß Kartierung) hohl liegender Bereiche (hellgraue Umrahmungen), Temperaturskalen normiert

Bei der Betrachtung der ersten Aufnahmen der Abkühlphase ist die durch Perkussion im unteren Teil des großen Gewandes detektierte Hohlstelle mit Hilfe der Infrarot-Thermographie nicht in dem *erklopften* Zustand nachvollziehbar. Die sich darunter anschließende weitaushaltendere Hohlstelle, die sich entsprechend der Kartierung vom Kopf des Engels über einen Teil der rechten Flügel hin zur Turmspitze erstreckt, scheint entsprechend der IR-Aufnahme doch etwas anders gelagert zu sein. Ein entsprechender Schwerpunkt markiert sich eher an der Spitze des Engelflügels und stellt damit dar, dass die beiden Hohlstellen offenbar miteinander verbunden sind. Gut zeichnet sich in der IR-Aufnahme die Hohlstelle unterhalb der rechten Hand des Engels ab. Betrachtet man die Abbildung 5, in der der Zustand der Voruntersuchung dokumentiert ist, fällt auf, dass sich in engster Umgebung dazu bereits hinterfüllte Bereiche befinden, die an der Oberfläche durch Mörtelflecken auffallen. Eine eindeutige Differenzierung dieses Bereiches in hohl liegend und bereits in gewisser Weise hinterfüllt kann nicht erfolgen.

Betrachtet man die Abkühlungsreihe unter Beachtung der Gesetzmäßigkeit, dass sich eine Diskontinuität, eine Delamination oder ein Hohlraum wie eine thermische Barriere verhält und den Wärmefluss, der beim Abkühlen zur kühleren Umgebung hin erfolgt, behindert, kristallisieren sich deutlich hohl liegende und daher mit Luft gefüllte Zonen heraus. Überall, wo sich ein Fehler mit geringerer Wärmeleitfähigkeit (Luft) unter der Oberfläche befindet, müsste die Temperatur über diesem Bereich länger erhöht bleiben. Neben Zonen nahe dem unteren Bildrand erweisen sich sowohl der vordere Teil des Gewandes am Übergang zum Flügel als auch die Zone unterhalb der Hand des Engels als hohl liegend.

5.3.2.5 Nachuntersuchungen

Die Nachuntersuchung der Maßnahme erfolgt im März 2007. In kurzer Folge auf die Hinterfüllmaßnahme im Juni 2006 ist bereits eine orientierende Nachuntersuchung durchgeführt worden. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt nur unzureichenden Reaktionszeit für den eingebrachten Mörtel und wegen der im Vergleich zur Voruntersuchung jahreszeitlich bedingten unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, die einen voneinander abweichenden Temperaturgradient zur Umgebung nach sich ziehen, wird diese Untersuchung hier nicht wiedergegeben.

Die Aufheizphase währte auch im Rahmen der Nachuntersuchungen 15 Minuten, die Abkühlphase wurde bis zu einer halben Stunde beobachtet.

In Abb. 209 ist das beobachtete Bildfeld mit einer Aufnahme der Aufheizphase im Vergleich dargestellt, um eine bessere Orientierung zu ermöglichen.

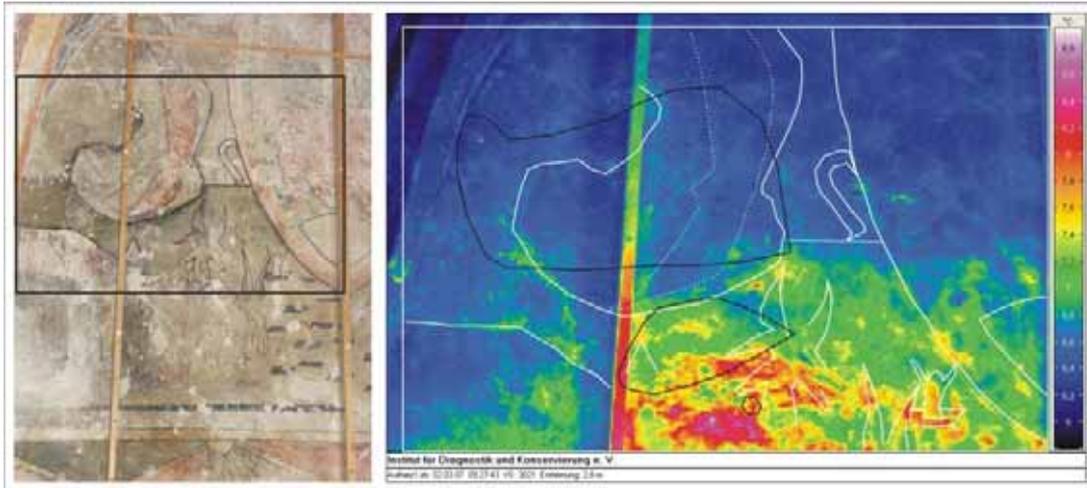


Abb. 209 Nachuntersuchungen – Lokalisierung des beobachteten Bereichs; mit Markierung (gemäß Kartierung) hohl liegender Bereiche (schwarze Linien)

Die Aufheizphase der Nachuntersuchung ist zur genaueren Analyse der beobachteten Phänomene ebenfalls dargestellt. Die Temperaturskalen sind auch wieder normiert. Zur besseren Orientierung, gerade mit Hinblick auf die kritischen Bereiche, die sich in der Voruntersuchung herauskristallisiert haben, sind Wandmalereielemente in die Thermographieaufnahmen eingefügt (Abb. 210).

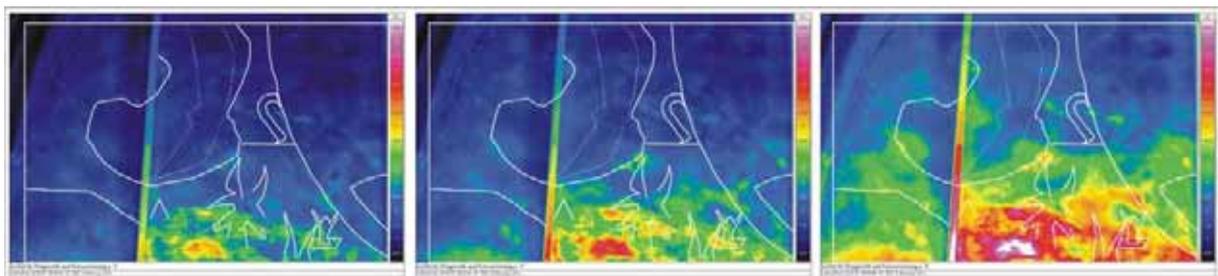


Abb. 210 Nachuntersuchungen – Darstellung der Aufheizphase; mit Wandmalereielementen zur Orientierung

Die darauf folgende Abkühlphase ist in Abb. 211 wiedergegeben. Sie wurde insgesamt über 30 Minuten dokumentiert. Die entsprechenden Bilder sind auf eine Temperaturskala normiert. Die im Rahmen der Voruntersuchung als hohl liegend klassifizierten Bereiche der Wandmalerei sind nur noch wenig auffällig. Im unteren Teil des großen Gewandes ist eine Minute nach dem Ausschalten der IR-Heizstrahler (erstes Bild) vorne und hinten jeweils noch eine im Vergleich zur Umgebung deutlich wärmere Zone zu beobachten. Gleiches gilt für die nähere Umgebung der Turmspitze und für den Bereich unterhalb der rechten Hand des Engels. Bereits nach drei Minuten (zweites Bild) sind die beschriebenen Zonen innerhalb des Gewandes und bei der Turmspitze gut abgekühlt. Hier ist durch die Restaurierungsmaßnahme eine gute Anbindung des Untergrundes erfolgt.

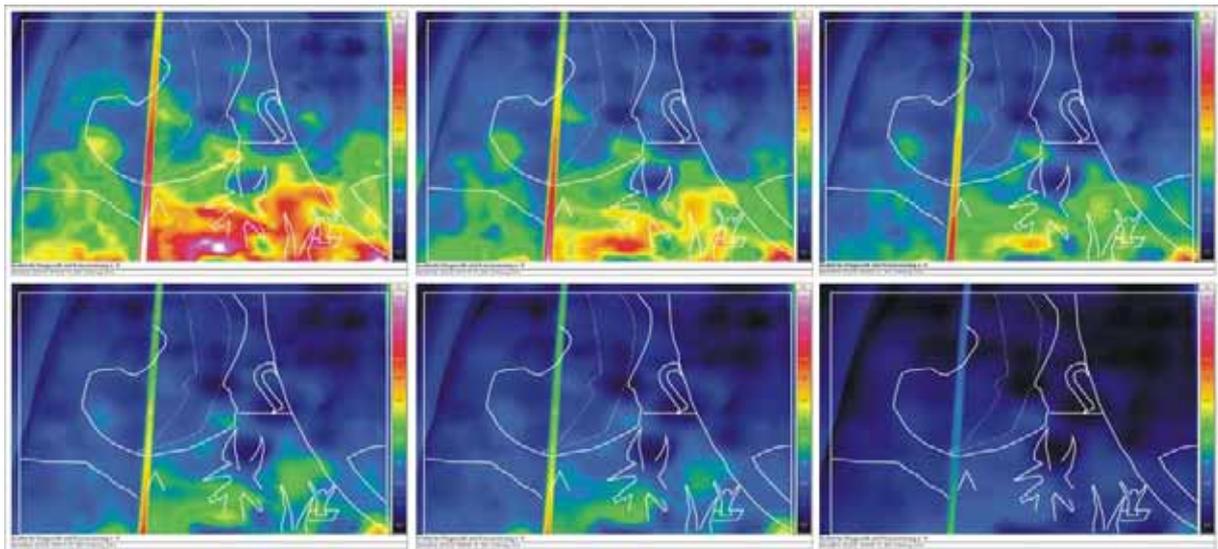


Abb. 211 Nachuntersuchungen – Darstellung der Abkühlphase; mit Wandmalereielementen zur Orientierung des Wandmalereiausschnittes

Die Hohlstelle, die unterhalb der rechten Hand des Engels detektiert wurde, scheint noch nicht einwandfrei behoben zu sein. Im Vergleich zu den beiden anderen restaurierten Zonen währt der Abkühlungsprozess etwas länger. Allerdings ist die Temperaturverteilung an der Oberfläche nach 10 Minuten nach der Abstellung des Wärmeimpulses auch hier unauffällig.

Zusätzlich wurde im Rahmen der Nachuntersuchungen noch der Einfluss der IR-Heizstrahler auf die Infrarotaufnahme der Wandmalerei überprüft, indem sich entsprechende Bilder gleichen Aufheizgrades (nach 15 Minuten) - einmal mit abgedeckten Strahlern und einmal ohne Abdeckung - miteinander verglichen worden sind. Das hierbei untersuchte Bildfeld erfasst eine Zone, die oberhalb des schwerpunktmäßig betrachteten Bereiches liegt. Hierbei konnten keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden, außer dass die beobachteten Phänomene bei nicht abgedeckten Strahlern – speziell im linken Bildfeld – stellenweise etwas gezacktere Ränder aufweisen (Abb. 212).

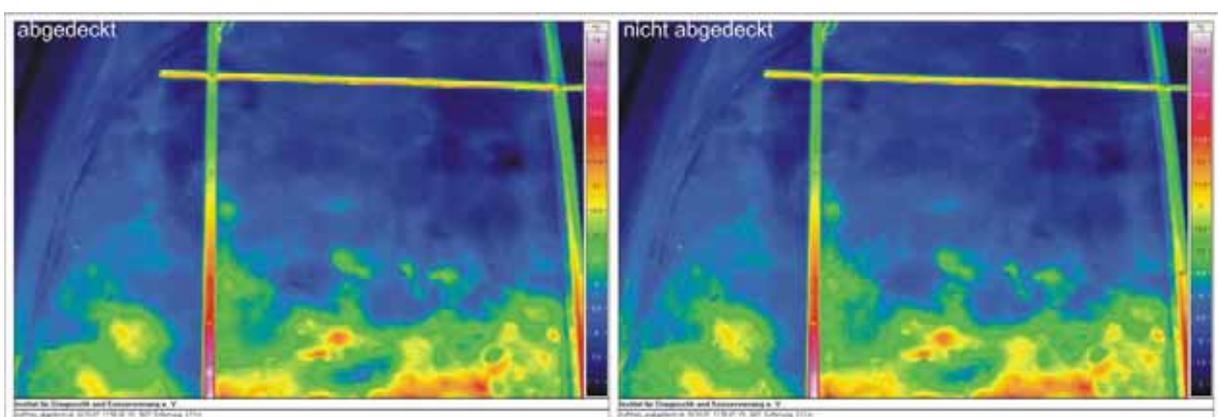


Abb. 212 Vergleich der abgedeckten und nicht abgedeckten Messung

5.3.3 Restauratorische Maßnahmen

5.3.3.1 Hinterfüllmaßnahme

Die schraffierten Bereiche (Abb. 213) stellen die im Juni 2006 durch Herrn Körper hinterfüllten Hohlstellen dar. Die kleinen schwarzen Kreise markieren die einzelnen Injektionsstellen. Die weiße Schraf-

fur (2) kennzeichnet Bereiche, die nach der Hinterfüllung beim leichten Beklopfen nicht mehr hohl klingen. Für den Restaurator demnach eine gelungene Maßnahme widerspiegeln. Die mit schwarzer Schraffur (1) gekennzeichneten Flächen sind nur Putztrennungen. Auch stark verdünnter Injektionsmörtel konnte hier nur in sehr geringem Maße eingebracht werden.

5.3.3.2 Hinterfüllmaterial

Einige der im Rahmen der jüngsten Sicherungsmaßnahme, die Grundlage der wiedergegebenen vergleichenden IR-Untersuchung ist, verwendeten Injektionsstellen sind bereits 2002 angelegt worden. Über die zuvor erweiterten Öffnungen innerhalb bereits vorhandener Fehlstellenbereiche ist damals kleineres Mörtelmaterial abgesaugt worden. In diese Putzöffnungen wurden dann Injektionsschläuche eingesetzt, die mit Kalkmörtel fixiert wurden. Der Mörtel gewährleistete gleichzeitig auch eine Abdichtung der Hohlstelle. Die Arbeiten sind zum damaligen Zeitpunkt aus finanziellen Gründen eingestellt worden. Im Juni 2006 konnten die Arbeiten im Rahmen des dargestellten IR-Projektes fortgesetzt werden. Zunächst erfolgte die Trockenreinigung der inzwischen wieder enorm verstaubten Oberfläche. Der gesamte linke Bereich, der die Musterflächen zum Teil repräsentiert, wurde vor der Verfüllung mit Japanpapier kaschiert (Tyloseleim). Unmittelbar vor der Injektion mit dem Hinterfüllmörtel wurde intensiv mit Ethylalkohol (70%ig) benetzt.

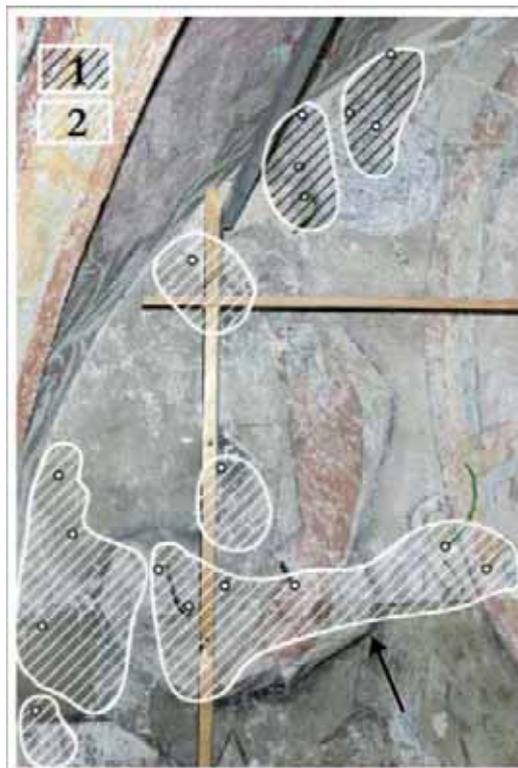


Abb. 213 Kartierung der Hinterfüllungen mit HGZ-Mörtel, Juni 2006 (Abbildung J. Körber).

Als Hinterfüllmörtel kam entsprechend der Maßnahme von 1999 HGZ-Mörtel zum Einsatz. Die verwendete Rezeptur stammt von Dr. K. G. Böttger vom Fachbereich Bau und Werkstoffchemie der Universität Siegen. Geliefert wurde der Mörtel von der Firma Krusemark aus Mühlheim/Main. Im Vergleich zu der Maßnahme von 1999 verfügt der nun produzierte Mörtel über einen wesentlich feineren Hüttensand und würde für den Zweck der Hinterfüllung der Wandmalerei somit zu hohe Druckfestigkeiten erreichen. Deshalb wurde auf Empfehlung von Herrn Dr. Böttger und der Herstellerfirma zu einem Raumteil des Fertigmörtels noch ein Raumteil Zuschlag (Hüttensand und Borosilikat-

Hohlgaskügelchen (fein)) zugemischt. Der Injektionsmörtel wurde vom Restaurator nach folgendem vorgeschriebenen Ansatz zubereitet:

- 50 ml dest. Wasser
- 3,3 ml Desmodur DA-L, darin dispergiert
- 4,0 ml Styrolacrylat Sokrat 2802 NA, dazu dispergiert
- 50 g Trockenmörtel
- 50 g Zuschlagstoff (Hüttensand und Borosilikat-Hohlgaskügelchen)

Dieser, im Vergleich zu 1999 verwendete Mörtel benötigt keine Emulgatorkomponente mehr. Zum Verschließen der Injektionslöcher wurde derselbe, über Nacht stehen gelassene Injektionsmörtel verwendet. Wegen der grauen Eigenfarbe ist hierfür noch ein geringer Anteil braungelb färbender Erdpigmente und etwas Trockenmörtel zugesetzt worden. Die während der Injektion mit Watte provisorisch abgedichteten Risse und kleineren Löcher sind anschließend gesäubert und mit dem entsprechenden Mörtel verschlossen worden. Der eingesetzte frei modifizierte Mörtel wurde vom ausführenden Restaurator selbstständig entschieden und eingesetzt. Begleitende Untersuchung zu den Mörtel-eigenschaften durch das IDK erfolgten nicht.

5.3.4 Ergebnis

Die Infrarot-Thermographie-Messung hat sich an den Wandmalereien in Bad Schmiedeberg bezüglich der Detektion von Hohlstellen bzw. der Kontrolle der restauratorischen Hinterfüllung dieser Bereiche bewährt. In Anlehnung an die Perkussionskartierung des Restaurators konnten im Rahmen der Voruntersuchung eindeutig hohl liegende Bereiche detektiert werden. Allerdings ist es mit der Methode der IR-Thermographie am Objekt nicht gelungen auseinanderzuhalten, ob die Hohllage innerhalb des Putzmörtels oder zwischen Putzmörtel und Mauerwerk liegt. Ebenso war es nicht möglich, Aussagen über die Tiefe der Hohlstelle zu machen. Die lang anhaltende Abkühlphase gibt zwar einen Hinweis darauf, dass ein größeres Luftpolster zwischen Putzoberfläche und festem Untergrund liegt. Jedoch kann das auch auf eine weitreichende Hohlstelle hinweisen. Ohne die Grundlage der Kartierung des Restaurators hätten im Rahmen der Voruntersuchung auch andere Phänomene in der Farbverteilung für mögliche hohl liegende Bereiche gehalten werden können. Hier war die Unterscheidung zwischen den Mörtelplomben und den Hohlstellen stellenweise schwierig. Die Nachuntersuchungen haben gezeigt, dass die Verfüllung der Hohlstellen, zumindest innerhalb der großen Ablösung im unteren Teil des Gewandes und zwischen rechtem Engelsflügel und der Turmspitze, vollständig erfolgt ist. Es konnten hier keine Phänomene beobachtet werden, die auf eine gravitative Verteilung des Hinterfüllmörtels schließen lassen. Dementsprechend wären zum Beispiel hohl liegende Zipfel im oberen Bereich der abgelösten Zonen denkbar gewesen. Vor dem Hintergrund der verschiedenen Abkühlzeiten der drei hauptsächlich untersuchten abgelösten Bereiche liegt die Vermutung nahe, dass bei dem Bereich unterhalb der rechten Hand des Engels vermutlich keine optimale Anbindung der einzelnen Lagen erfolgt ist. Dennoch kühlt die Hohlstelle sehr homogen aus, was auf eine gleichmäßige Verteilung des Hinterfüllmaterials schließen lässt.

Sowohl die Hohlstelle unterhalb der rechten Hand des Engels, die in der Kartierung des Restaurators klein und eher kreisrund dargestellt wurde, als auch die auskartierte abgelöste Zone zwischen rechtem Flügel und Turmspitze waren höchstwahrscheinlich weiterreichender. In den entsprechenden IR-Aufnahmen war zu erkennen, dass die hohl liegenden Bereiche zwischen rechtem Engelsflügel und dem großen Gewand miteinander in Verbindung standen. Somit konnte die Perkussionskartierung des Restaurators um weiterreichende Informationen ergänzt werden.

6 Literatur

- ALMESBERGER, D.; TONCIC, M. (1995): Diagnosis and recovery of the damaged building in Sarajevo and Mostar. In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE). Berlin, D. September 26-28, 1995. Proceedings. Vol. 2 Posters. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), Jg 48 (1995), S. 911-918.
- ARNDT, D.; BORCHARDT, K.; CROY, P.; GEYER, E.; HENSCHEN, J.; MAIERHOFER, C.; NIEDACK-NAD, M.; RUDOLPH, M.; SCHAURICH, D.; U.A. (1994): Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom.. In: Forschungsbericht 200 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1994.
- AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A. (2003): Emissivity considerations in building thermography. In: Energy and Buildings 35 (2003), S. 663–667.
- AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A. (2004): Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. In: Journal of Cultural Heritage 5 (2004), S. 119–127.
- AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A.; THEOULAKIS, P. (2003): Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging. In: Infrared Physics & Technology 44 (2003), S. 183–190.
- BAGGIO, P.; BONACINA, C.; GRINZATO, E.; BISON, P.; BRESSAN, C. (1993): Non-destructive tests for measurement of moisture content in porous building materials. Theoretical and experimental approach. In: Conservation of stone and other materials: proceedings of the international RILEM/UNESCO congress held at the UNESCO headquarters, Paris, June 29-July 1, 1993. S. 252-260.
- BINDERNAGEL F. (2006): Die Putzritzungen an der Außenfassade des östlichen Kreuzgangflügels im Magdeburger Dom. Erarbeitung eines Konservierungs- und Restaurierungskonzepts für eine mehrfach restaurierte Fassadengestaltung aus dem 13. Jahrhundert. Diplomarbeit, HfBK Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, Fachklasse für Wandmalerei und Architekturfarbigkeit
- BISON, P.G., BARDESCHI, M.D., GRINZATO, E.G., KAUPPINEN, T., ROSINA, E., TUCCI, G. (1996): Survey of facades based on thermal scanning: Palazzo della Ragione, Milano, Italy. In: Thermosense XVIII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. SPIE 2766, S. 55-64.
- BISON, P.G., BRAGGIOTTI, A., BRESSAN, C., GRINZATO, E.G., MARINETTI, S., MAZZOLDI, A., VAVILOV, V. (1995): Crawling spot thermal nondestructive testing (NDT) for plaster inspection and comparison with dynamic thermography with extended heating. In: Thermosense XVII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. SPIE 2473, S. 53-66.
- BISON, P.G.; GRINZATO, E.; BRAGGIOTTI, A.; MAZZOLDI, A.; VAVILOV, V. (1996): Non destructive evaluation of cracks in porous building materials by use of crawling spot thermal technique. In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 15B (1996). Proceedings of the Twenty-Second Symposium, Seattle, USA, 30.7.-4.8.1995. S. 1895-1901.
- BISON, P.G.; GRINZATO, E.; MARINETTI, S.; BRAGGIOTTI, A. (1998): Fresco thermographic inspection by convective heating technique. In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 17B (1997). Proceedings of the Twenty-Fourth Annual Symposium, San Diego, USA, July 27-August 1, S. 1769-1776.
- CARLOMAGNO, G.M.; MEOLA, C. (2001): Infrared thermography in the restoration of cultural properties.. In: Thermosense XXIII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. SPIE 4360.

- CARLOMAGNO, G.M.; MEOLA, C. (2002): Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT. In: NDT&E International 35 (2002), Heft 8, S. 559-565.
- DEHIO G. (1998): Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler – Sachsen II; Regierungsbezirke Leipzig und Chemnitz; Georg Dehio, Barbara Bechter, Wiebke Fastenrath, Heinrich Magirius Barbara Bechter, Wiebke Fastenrath, Heinrich Magirius; Deutscher Kunstverlag; München, Berlin.
- DEMAUS, R. (2000): Non-destructive assessment of timber. In: Building Conservation Journal 25 (2000), S. 10-13.
- DEMAUS, R. (2000): Thermographic surveying. In: Historic churches (2000), S. 27-29.
- DÖPPNER, J. (2000): Berührungslos: Bauthermografie. Ein Verfahren zum Sichtbarmachen von Bauschäden. In: Bautenschutz Bausanierung 23 (2000), Nr. 7, S. 12-15.
- DÜLBERG Angelica/ SITTE Wilfried (1997): Entdeckung außergewöhnlich qualitätvoller Wandmalereien des Zackenstils in der Dorfkirche von Battaune, erste kunsthistorische Bemerkungen und restauratorische Erkenntnisse, in: Denkmalpflege in Sachsen, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Hrg: Landesamt für Denkmalpflege Sachsen 1997, S. 30 – 34.
- FISCHER, R. (2001): Thermographische Putzuntersuchung: Ein Hilfsmittel für die Restaurierung römischer Wandmalerei ?. In: Arbeitsblätter für Restauratoren, Gruppe 7, Jg 34 Heft1, 2001, S. 169-176.
- FRICK, J.; SIMON, S.; GÜLKER, G.; JOOST, H. (2001): Vergleichende Untersuchungen mittels Videoholographie und Thermographie an einem Deckengemälde in der alten Bibliothek des Lycee Charlemagne in Paris. In: Thermographie-Kolloquium 2001, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP). CD-ROM 77-CD. V04, Stuttgart, D, 22. Sep, 2001, S. 1-4.
- FRUMUSELU, D. (1999): Application of IR thermography to NDT of art monuments. In: Insight Vol.41 (1999), Nr. 9, Sept., S. 582-584.
- GAYO, E.; MACIAS, A.; PALOMO, A.; MORALES, G. (1992): Application of infrared thermography to the study of moisture in the Cathedral of Toledo.. In: 3rd International Conference on Nondestructive Testing, Microanalytical Methods and Environment Evaluation for Study and Conservation of Works of Art. Italian Society for Nondestructive Testing (1992), S. 989-1002.
- GINELL, W. (1993): Consolidation of stone. . In: Proceedings of the Eighth Int. Conference on Thermal Engineering and Thermography, Budapest, Hungary, 1993.
- GRIEGER, R. (2005): Die Konservierung und Restaurierung der wiederentdeckten Wandmalerei-fragmente aus dem 17. und 18. Jahrhundert in der Grabkapelle des Bartholomäus Jacobi auf dem Nikolaifriedhof in Görlitz, Diplomarbeit FH Erfurt
- GRINZATO, E. (2001): Infrared and thermal testing for conservation of historical buildings. In: Infrared and thermal testing. ASNT Nondestructive Testing Handbook, 3. Aufl., Vol. 3, Editor: Malague, P.V.; Moore, P.O., 2001, Chapter 18, Part 5, 624-646.
- GRINZATO, E. (2004): Temperature monitors works of art health as human beings. In: 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT, CD-ROM Proceedings, Internet Version (www.ndt.net), Aug 30 - Sep 3, 2004 - Montreal, Canada, paper code 34.
- GRINZATO, E., BISON, P.G., BRESSAN, C., MARINETTI, S., MAZZOLDI, A.; BRAGGIOTTI, A. (1995): Detection and quantitative evaluation of plaster pathologies in historical buildings by thermal methods.. In: Int. Conf. Science and Technology for the safeguard of cultural heritage in Mediterranean basin. Catania, Italy, Nov. 1995. geliefert, Vol. 1; nicht enthalten
- GRINZATO, E., BISON, P.G., BRESSAN, C., MARINETTI, S., VAVILOV, V. (1994): Active thermal testing of delaminations in frescoes' plaster. In: 4th International Conference Non-destructive Testing of Works of Art Berlin 3.-8. Oktober 1994, Teil I, S. 357-366.

- GRINZATO, E., BISON, P.G., BRESSAN, C., MAZZOLDI, A. (1998): Nde of frescoes by infrared thermography and lateral heating. In: Proceedings of Quantitative Infrared Thermography QIRT 1998, Lodz, Poland, S.64-70.
- GRINZATO, E., BISON, P.G., MARINETTI, S. (2000): Thermal NDE enhanced by 3D numerical modeling applied to works of art. In: Roma 2000, 15th WCNDT, Veröffentlicht unter ndt.net/article.
- GRINZATO, E., BRESSAN, C., MARINETTI, S., BISON, P.G., BONACINA, C. (2002): Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR Thermography: Giotto at Infrared.. Journal of Infrared Physics and Technology Vol 43 (2002), S. 165-169.
- GRINZATO, E., MARINETTI, S., BISON, P.G.; CONCAS, M.; FAIS, S. (2004): Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones.. In: Infrared Physics & Technology 46 (2004), S. 63–68.
- GRINZATO, E., MAZZOLDI, A. (1991): Infrared detection of moist areas in monumental buildings based on thermal inertia analysis. In: Proc. SPIE Vol. 1467, Thermosense XIII, S. 75-82.
- GRINZATO, E.; BISON, P.; MARINETTI, S.; VAVILOV, V. (1994): Nondestructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography. In: Research in Nondestructive Evaluation 5 (1994), Heft 4, S. 257-274.
- GRINZATO, E.; BRESSAN, C.; MAZZOLDI, A. (1998): The quantitative IR thermography for the diagnosis of frescoes. Advanced Infrared Technology and Applications. Proc. of the 4th Int. Workshop, Firenze, I, September 15 -16, 1997. Florenz, 1998, S. 345-365.
- GRINZATO, E.; BRESSAN, C.; PERON, F.; ROMAGNONI, P.; STEVAN, A.G. (2000): Indoor climat conditions of ancient buildings by numerical simulation and thermal measurements. In: Thermosense XXII, SPIE 4020, (2000), S. 314-323.
- GRINZATO, E.; MARINETTI, S. (1994): Materials NDE by non linear filtering applying heat transfer models. In: Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials, Proc. of the NATO Advanced Res. Workshop, Quebec City, CDN, August 17-20, 1993, S.117-132.
- GRINZATO, E.; PERON, F.; STRADA, M. (1999): Moisture monitoring of historical buildings by long period temperature measurements. In: Thermosense XXI, SPIE 3700 (1999), S. 471-482.
- GRINZATO, E.G., VAVILOV, V., MARINETTI, S., BRESSAN, C. (1995): Methodology of processing experimental data intransient thermal nondestructive testing (NDT). In: Thermosense XVII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. SPIE 2473, S. 167-178.
- GRINZATO, E.; BISON, P.G.; MARINETTI, S. (2002): Monitoring of ancient buildings by the thermal method. Journal of Cultural Heritage 3 (2002), S. 21–29.
- JOOß, M., GRASSEGER, G., FRICK, J. (1997): Infrarot-thermografische und chemische Voruntersuchungen am Meissner. In: Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten: 2. Statuskolloquium des Deutsch-Französischen Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmalern, Bonn, 12.-13.12.1996. Champs-sur-Marne: Programme franco-allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, 1997, S. 167-171.
- KNETTEL, K.M. (2004): Thermographic investigation of a circa 1920s building with water intrusion problems.. In: Proc. SPIE Vol. 5405, , Thermosense XXVI, S. 144-149.
- KRÜGER, G.; GREYER, E. (2001): Thermographie an den Skulpturen des Westportals des Freiburger Münsters zur Ortung von Gipsergänzungen unter einer Farb- und Schmutzschicht. In: Thermographie-Kolloquium 2001, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., (DGzFP). CD-ROM 77-CD. V05, Stuttgart, D, 22. Sep, 2001, S. 1 (Kurzfassung).
- LUDWIG, N.; REDAELLI, V.; ROSINA, E.; AUGELLI, F. (2004): Moisture detection in wood and plaster by IR thermography.. In: Infrared Physics & Technology 46 (2004), S. 161–166.

- LUDWIG, N.; ROSINA, E. (1998): Heat transfer models applied to thick masonry analysis. In: Advanced Infrared Technology and Applications. Proc. of the 4th Int. Workshop, Firenze, I, September 15 -16, 1997, Florenz, 1998, S. 367-378.
- MALAGUE, P.V.; MOORE, P.O. (EDITORS) (2001): Infrared and thermal testing. ASNT Nondestructive Testing Handbook, 3. Aufl., Vol. 3. 2001.
- MALDAGUE, X.P.V. (2001): Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- MEINLSCHMIDT, P., BOTHE, T., HINSCH, K., MEHLKORN, L. (1998): Nondestructive testing and evaluation of historical monuments using thermography and electronic speckle pattern interferometry (ESPI). In: Nondestructive evaluation of materials and composites, 2, SPIE 3396, S. 28-36.
- MEINLSCHMIDT, P.; BROSCHE, K. (2001): Untersuchung mithilfe der IR-Thermographie: Schäden an Wandwertäfelungen im Postdamer Neuen Palais. In: Restauro 106 (2001), Nr. 2, S.134-140.
- MEINLSCHMIDT, P.; MEHLKORN, T. (1999): Stress Screening on repaired mortar surfaces using nondestructive testing methods. In: Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings VI, BrebbianC.A. & Jäger (Hrsg.), Southampton/Boston, 1999, S. 35-44.
- MILELLA, N. (1992): La Mappatura termografica di superfici affrescate di grandi dimensioni: un metodo per la realizzazione delle riprese e per la loro rappresentazione. In: 3a Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Viterbo 4-8 ottobre 1992, S. 421.
- MILLER, B.F. (1977): The feasibility of using thermography to detect subsurface voids in painted wooden panels. In: Journal of the American Institute for Conservation JAIC 1977, Vol. 16, Nr. 2, S. 27-35.
- MOROPOULOU, A.; AVDELIDIS, N.P. (2001): Emissivity measurements on historic building materials using dual wavelength infrared thermography. In: Thermosense XXIII, SPIE, Orlando, 2001, S. 224-228.
- MOROPOULOU, A.; AVDELIDIS, N.P., KOUI, M., KANELLOPOULOS, N.K. (2000): Dual band infrared thermography as a NDT tool for the characterisation of the building materials and conservation performance in historic structures. In: Nondestructive Methods for Materials Characterisation, Vo. 591, Materials Research Society, Pittsburgh, 2000, S. 169-174.
- MOROPOULOU, A.; AVDELIDIS, N.P., KOUI, M., TZEVELEKOS, I. (2000): Determination of emissivity for historic building materials using infrared thermography. In: Journal of Thermology International 10 (2000), S. 115-118.
- MOROPOULOU, A.; AVDELIDIS, N.P.; KOUI, M. (2000): Compatibility assessment of building materials using infrared thermography. In: Roma 2000, 15th WCNDT, Veröffentlicht unter ndt.net/article.
- MOROPOULOU, A.; KOUI, M.; CHRISTARAS, B.; TSIOURVA, T. (1998): Non-destructive evaluation of the performance of mortars on historic masonries. In: Journal of European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology 55 (1998), S. 243-266.
- MOROPOULOU, A.; TSIOURVA, T.; BISBIKOU, K.; TSANTILA, V.; BISCANTIN, G.; LONGEGA, G.; GROGGIA, M.; DALAKLIS, E.; PETRITAKI, A. (2002): Evaluation of cleaning procedures on the facades of Bank of Greece historical building in the center of Athens. In: Journal of Building and Environment 37 (2002), S. 753-760.
- N.P. AVDELIDIS, N.P.; DELEGOU, E.T.; MOROPOULOU, A. (2004): A THERMOGRAPHIC SURVEY FOR THE MONITORING OF MOISTURE IN POROUS STONE. In: 16th WCNDT 2004 -

- World Conference on NDT CD-ROM Proceedings, Internet Version (www.ndt.net) Aug 30 - Sep 3, 2004 - Montreal, Canada, paper code 804.
- RIETSCHER, C., Langhof, B. (1968): Dorfkirchen in Sachsen, Berlin 1968
- ROSINA, E. (1998): Thermography and Georadar to Identify Moisture in Ancient Walls.. In: Proceedings of the 7th European Conference on Non-Destructive Testing, 26-29 May 1998.
- ROSINA, E.; AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A.; DELLA TORRE, S.; PRACCHI, V.; SUARDI, G. (2004): IRT monitoring in planned preservation of built cultural heritage. In: 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT, CD-ROM Proceedings, Internet Version (www.ndt.net), Aug 30 - Sep 3, 2004 - Montreal, Canada, paper code 81.
- ROSINA, E.; ROBISON, E.C. (2002): Applying infrared thermography to historic wood-framed buildings in North America. IN: APT bulletin, Vol.33 (2002), Nr.4, S.37-44.
- ROSINA, E.; ROCHE, G. (2000): Analysis of moisture for the preservation of frescoes at Malpaga castle.. In: ROMA 2000, 15th World Conference on Non-Destructive Testing (15th WCNDT), Roma, Italien.
- SCHIRRIPA SPAGNOLO, G., GUATTARI, G., GRINZATO, E., BISON, P.G., PAOLETTI, D., AMBROSINI, D. (2000): Frescoes Diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography. Proc. 6th International Conference on "Non Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage", Rome May 17-20 1999. Neuauflage auch auf NDT.net, The e-Journal of Non Destructive Testing, www.ndt.net, vol. 5, n° 1, January 2000.
- SCHWARZ, A (1989/1990): Infrarot-Thermographie zur berührungslosen Bestimmung von Dichte- und Feuchtedifferenzen an historischen Wandmalereien. In: Wandmalerei-Schäden. Arbeithefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 8, 1990, S. 33-36 ebenfalls in: Bautenschutz und Bausanierung. Zeitschrift für Bauinstandhaltung und Denkmalpflege 12, 1989, Heft 6.
- TAVUKÇUOĞLU, A.; DÜZGÜNEŞ, A; CANER-SALTIK, E.N.; DEMIRCID, Ş. (2004): Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzıkarahan (Aksaray), Turkey.. In: NDT&E International (2004), In press.
- VAVILOV, V.; KAUPPINEN, T.; GRINZATO, E. (1997): Thermal characterisation of defects in building envelopes using long square pulse, and slow thermal wave techniques. In: Research in Nondestructive Evaluation Vol. 9 (1997), S. 181-200.
- VAVILOV, V.; MARINETTI, S.; GRINZATO, E.; BISON, P.G.; DAL TOE, S.; BURLEIGH, D. (2002): Infrared thermographic nondestructive testing of frescos. Thermal modeling and image processing of three dimensional heat diffusion phenomena. In: Materials Evaluation 60 (2002), Heft 3, S.452-460.
- VOLINIA, M. (1999): The use of IR thermographic survey to analyse the conservation conditions of plaster: the instance of Valentino Castle. In: Proceedings of Advanced Infrared Technology and Application, Venedig, (1999).
- VOLINIA, M. (2000): Integration of qualitative and quantitative infrared surveys to study the plaster conditions of Valentino Castle. In: Thermosense XXII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. SPIE 4020, S. 324-334.

Danksagung

Unser Dank geht an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, durch deren finanzielle Förderung das Projekt möglich gemacht wurde. Auch möchten wir unserem Kollegen Uwe Kalisch danken, der uns bei den Untersuchungen und Diskussionen zur Positionierung der Aufnahmen sehr geholfen hat. Unsere Kollegin Frau Schmid-Kamke arbeitete und wirtschaftete im formalen Teil, den ein Projekt mit sich bringt, und sorgte in diesem Bereich für einen ausgezeichneten Ablauf. Danke. Nicht zuletzt geht unser Dank an Prof. Dr. Steffen Laue, der im Jahr 2002 seine Ideen in einen Antrag einarbeiten durfte und als die Bewilligung 2004 vorlag, leider schon seinem Ruf an die FH-Potsdam gefolgt war. Steffen, wir hoffen wir haben „Dein“ Projekt in Deinem Sinne ausgearbeitet.