

## 2. Zerstörungsfreie Infrarotthermographie an historischen Oberflächen

C. Franzen, Th. Löther

### Kurzfassung

Im Zuge der Entwicklung und Erprobung nicht destruktiver Untersuchungsmethoden für den Einsatz bei denkmalpflegerischen Fragestellungen hat sich in den letzten Jahren die Infrarotthermographie als eine der wichtigsten zerstörungsfreien Untersuchungstechniken etabliert. Das war einerseits durch Fortschritte bei den Kamerasystemen selbst und andererseits auch durch Fortschritte im Handling des komplexen Verfahrens möglich. Durch den gezielten Einsatz dieser berührungslosen Messtechnik lassen sich mit der nötigen Erfahrung und kritischen Auswertung der Ergebnisse viele neue Erkenntnisse für die Denkmalpflegeforschung und Schadendiagnose erarbeiten. Der für die Zukunft zu erwartende verstärkte Einsatz der Infrarotthermographie in der Bauwerksdiagnose sollte daher die bestehenden vielfältigen Erfahrungen berücksichtigen, um den Wissensstand sinnvoll zu erweitern.

### Einführung

Alle Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von 0,0 K (-273,15°C) senden elektromagnetische Strahlung aus. Bei der quantitativen Infrarotthermographie oder auch Infrarot-Strahlungstemperaturmessung wird die Intensität dieser ausgesandten EM-Strahlung bestimmt und daraus die Temperatur des Körpers berührungslos ermittelt. Infrarotstrahlung liegt in dem Teil des elektromagnetischen Strahlungsspektrums, 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. Die

vom IDK für Messungen verwendete VARIOSCAN 3021 ST von InfraTec arbeitet zwischen 8–12 µm Wellenlänge. Es wird ausschließlich die Oberflächentemperatur des untersuchten Festkörpers detektiert. Diese Temperatur wird von der Kamera zweidimensional hochauflösend bestimmt und von einer Software in einen Farbcode übertragen.

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).

Zur Bestimmung der absoluten Oberflächentemperatur sind daher verschiedenen Einflussparameter zu berücksichtigen. Reale Messobjekte werden mit dem strahlungsphysikalischen Modell des Schwarzen Strahlers in Bezug gesetzt. Die Stoffkennzahl Emissionsgrad  $\epsilon$  kennzeichnet die spezifische Ausstrahlung des realen Gegenstandes im Verhältnis zu der des Schwarzen Strahlers:

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

mit  $\epsilon$ -Emissionsgrad, der abhängig von  $\lambda$ -Wellenlänge und  $T$ -Temperatur ist, sowie einem  $M_{\text{real}}$ -realen Messobjekt relativ zu einem  $M_{\text{bb}}$ -black box – dem Schwarzen Strahler.

Der Schwarze Strahler hat einen Wert von  $\epsilon = 1$ , 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  $\epsilon$  ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung auszusenden. Der Absorpti-

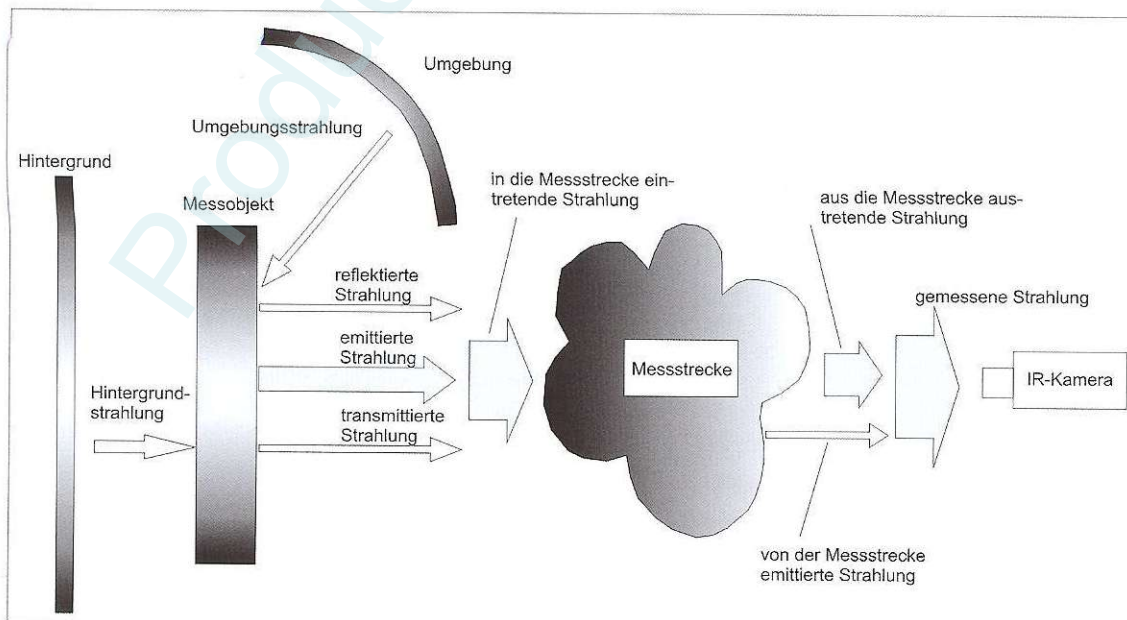


Abb. 1: Einflussfaktoren auf die gemessene Strahlung (modifiziert nach: InfraTec 2004, Seminarunterlagen)

www.InfraTec.de

onsgrad  $\alpha$  ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung aufzunehmen. Der Transmissionsgrad  $\tau$  ist eine Maßzahl für das Vermögen Infrarotstrahlung durchzulassen. Der Reflexionsgrad  $\rho$  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  $\varepsilon$  drückt daher auch aus, wie hoch die Anteile sind, die für Transmission und für Reflektion berücksichtigt werden müssen.

Die Transmission von IR-Strahlung kann bei den meisten Baustoffen gleich null gesetzt werden. Der Emissionsgrad der meisten Baustoffe ist nahe 1. Der Reflektionsanteil kann vernachlässigt werden, wenn die korrekte Absoluttemperatur nicht so bedeutend für die Auswertung ist und die Umgebungsstrahlung nahe der Temperatur des Objektes liegt. Störstrahlungsquellen müssen gemieden werden. Bei der passiven Thermographie unter Sonnenbestrahlung muss die Sonne als „Störquelle“ in die Auswertung mit einbezogen werden. Die tatsächlichen Oberflächentemperaturen liegen daher zumeist unter den von der Kamera bestimmten Werten. Über Kontrollmessungen kann der Korrekturfaktor für die Temperatureinzelwerte bestimmt werden.

Grundsätzlich lassen sich bei der Infrarotthermographie im Bausektor zwischen so genannter aktiver und passiver Thermographie unterscheiden. Als passive Thermographie werden Vorgehensweisen bezeichnet, bei denen die Oberflächentemperatur nicht aktiv verändert wird. In realen Umgebungen sind Körper so gut wie nie mit ihrer Umgebung in Temperaturgleichgewicht. Über den Tagesverlauf und insbesondere direkte Sonnenanstrahlung werden insbesondere draußen exponierte Untersuchungsobjekte ständig in ihrer Temperatur verändert. In diesem dynamischen System kommt es ständig zum Wärmeaustausch, um die Differenzen auszugleichen. Daraus folgt, dass in den allermeisten Fällen auch bei der passiven Thermographie Tempera-



Abb. 2: Dresden, Stallhof, Arkaden, rechts, östlicher Teil; historisches Mauerwerk

turungleichgewichte vorliegen und Effekte hervorrufen können. Bei der aktiven Thermographie wird der Untersuchungsgegenstand definiert zusätzlich in seiner Temperatur verändert. Hinter dem Körper, in dem Körper oder vor bzw. auf dem Körper wird die Temperatur aktiv verändert. Das kann durch eine Abkühlung oder durch Aufheizung geschehen. Dadurch wird die Oberflächentemperatur verändert und Inhomogenitäten zeigen sich durch anomale Temperaturänderungen.

## Anwendungsgebiete in der Denkmalpflege

Die Anwendungsgebiete der IR-Thermographie in der Bau- und Denkmalpflege lassen sich grob mit den Stichworten: Bauforschung, Bauuntersuchung und Schadensdiagnose beschreiben. Die Übergänge zwischen den Untersuchungsansätzen sind gleitend und in vielen Fällen kommt es bei der Untersuchung des einen Schwerpunktes auch zu neuen weiteren Erkenntnissen in einem anderen Segment. Über verschiedene Objektbeispiele aus der Arbeit des IDK sollen exemplarisch Beispiele aus den unterschiedlichen Gesichtspunkten vorgestellt werden. Für baugeschichtliche Untersuchungen an historischen Mauerbereichen sind in vielen Fällen Öffnungen des Putzes nötig, um Aussagen zum konstruktiven Aufbau machen zu können. Bei der Schadensdiagnose von Hohlstellen wird auch heute noch vielfach mit Perkussionsuntersuchungen gearbeitet. Diese sind per Definition nicht berührungsfrei (zu weiteren organoleptischen Methoden s. a. JULING und FRANZEN 2009).

Die berührungslose und zugleich auch bildgebende Infrarotthermographie bietet hier eine zeitgemäße Alternative.

### Dresdner Residenzschloss, Langer Gang, Stallhof

Die Bauarbeiten zur Neuinszenierung des Dresdner Residenzschlusses erfordern immer wieder zerstörungsfreie Untersuchungen am originalen und an 1945 wieder aufgebauten Bestand. Auch der Bereich des Stallhofs mit seiner Straßenseite des so genannten Langen Gangs, an dem der berühmte Fürstenzug dargestellt ist, sollte untersucht werden. Es wurden 2006 im Stallhof und 2010 am Langen Gang jeweils passive Thermographieuntersuchungen durchgeführt.



Abb. 3: Lichtoptisches Foto zu Abb. 2

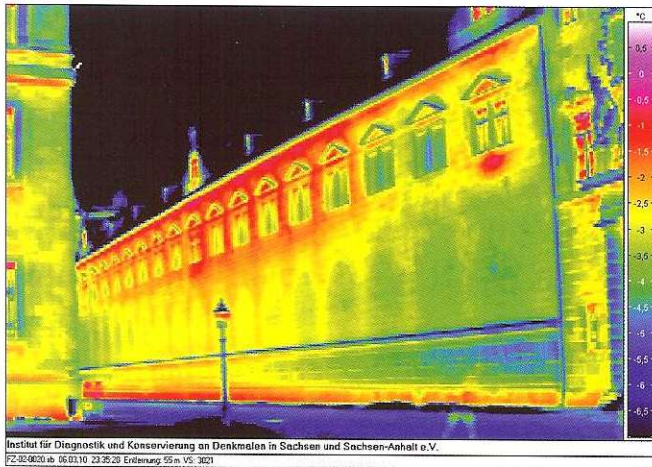


Abb. 4: Dresden, Übersicht auf Langen Gang neben dem Georgenbau

Bei den Untersuchungen im Stallhof ging es vor allem um die Bestimmung der tatsächlichen Oberflächentemperaturen, da zu geringe Temperaturen im Umfeld einen zügigen Fortgang der restauratorischen Arbeiten an den Oberflächen gefährdeten. Im Zuge der Untersuchungen konnte dann im östlichen Teil des Stallhofs, oberhalb der Arkadenbögen ein deutlicher Wechsel im Mauerwerksaufbau unter dem Putz nachgewiesen werden. Der Wechsel zwischen an der Oberfläche wärmeren unregelmäßigem Bruchsteinmauerwerk und kühlerem regelmäßigem (Ziegel-) Mauerwerk in diesem Bereich kann durch Reparaturarbeiten nach dem Krieg erklärt werden.

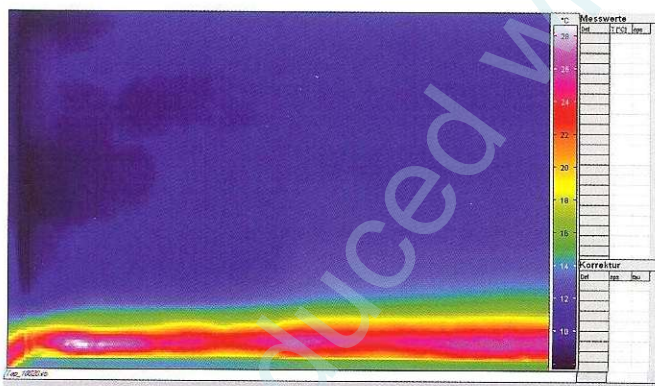


Abb. 6: Schloß Freital Burgk, Tapetenzimmer (2005)

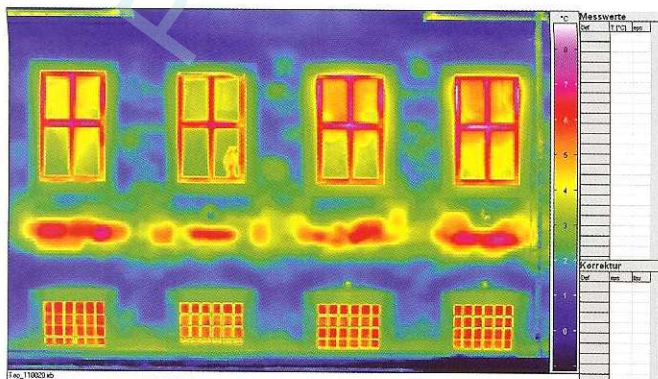


Abb. 8: Schloß Freital Burgk, Fassade (2005)



Abb. 5: Foto zu IR-Aufnahme Abb. 4

Auf der straßenseitigen nördlichen Fassade des Langen Ganges, die den Fürstenzug trägt, wurde nachts bei etwa  $-6^{\circ}\text{C}$  die Oberfläche thermographiert (Abb. 4, Abb. 5). Die Bögen der Arkaden werden im Temperaturbild deutlich sichtbar. Im oberen Teil zeigen sich unterschiedliche thermische Raumstrukturen.

### Schloss Freital-Burgk

In Schloss Freital-Burgk wurde in den 1990er Jahren eine Sockeltemperierung zur Beheizung der Räume eingebaut. Auch im so genannten Tapetenzimmer mit handgedruckten Panoramatape-



Abb. 7: Foto zu IR-Aufnahme (2005)



Abb. 9: Foto zu Abb. 8, (2005)

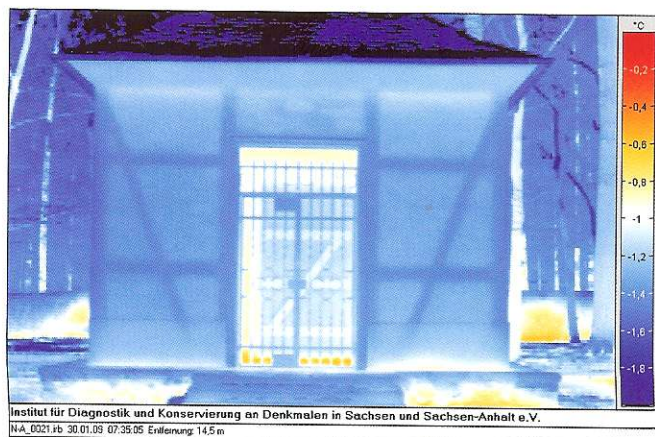


Abb. 10: Hermsdorf, Pavillon, Nordwand, IR-Aufnahme (2009)



Abb. 11: Foto, Nordseite zu Abb. 10, (2009)

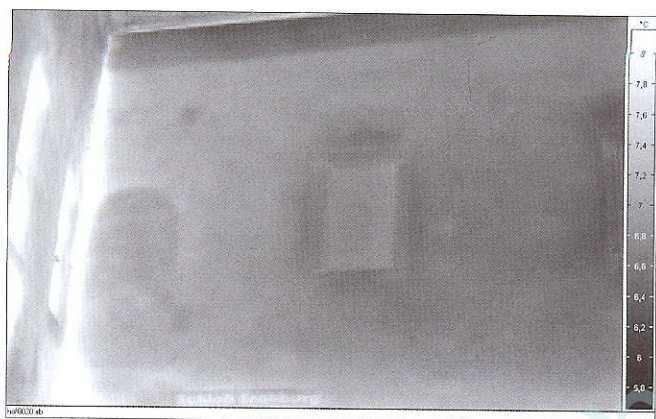


Abb. 12: Schloss Frohburg, Hoffassade – vermauerter Türbereich links, IR-Aufnahme (2007)



Abb. 13: Foto zu Abb. 12, (2007)

ten aus der ersten Hälfte 19. Jahrhunderts verläuft im Sockelbereich die Temperierungsleitung. Der tatsächliche Wärmeeffekt auf das Mauerwerk sollten untersucht werden.

An der Wand des Tapetenzimmers direkt an den Stellen, hinter denen das Heizungsrohr verlegt wurde, wurden im Innenraum Oberflächentemperaturen von etwa 24°C mit einem Höchstwert von 31,6°C (Abb. 6) gemessen. Die Panoramatapete machte in Bereich des Temperaturmaximums einen sehr trockenen, spröden Eindruck (Abb. 7). Die Temperatur nimmt nach oben hin innerhalb von Dezimetern auf einen unbeeinflussten Bereich, gemessen etwa 12°C hin ab. Bauliche Veränderungen im Mauerwerk, wie nachträgliches Vermauern von Fenstern mit anderem Material, sind auch im Tapetenzimmer anhand der Oberflächentemperatur eindeutig ablesbar.

Außen zeichnet sich die Heizung deutlich an der Wand ab. Hier lag der Höchstwert bei 7,4°C vor einem Hintergrund von etwa 1°C Grundtemperatur der Fassade, bei steigenden Umgebungstemperaturen von Minusgraden ausgehend.

### Hermsdorf, Schlosspark, Pavillon

Im Schlosspark der Schlossanlage in Hermsdorf nördlich von Dresden wurden im Rahmen einer Diplomarbeit an der Hochschule für Bildende Künste in Dresden Konservierungsstrategien für die chinesisches Gewölbemalereien in einem Gartenpavillon erarbeitet (FÖRSTER 2009). Die IR-schadensdiagnostischen

Untersuchungen im Pavillon gestalteten sich u. a. aufgrund der Raumgröße als schwierig. Die begleitend angefertigten passiven Aussenaufnahmen (Abb. 10, Abb. 11) stellen aber in der Folge eine wichtige Grundlage zur Feststellung des konstruktiven Aufbaus des Pavillons dar.

### Frohburg, Steinerne Saal

Im Schloss Frohburg sollten durch Infrarot-Thermographieaufnahmen Erkenntnisse über bauphysikalische Schwachstellen in der Westwand gesammelt werden. Im Ostflügel des Schlosses erfolgte eine umfangreiche Restaurierung an dem monumentalen Wandgemälde von Carl Ludwig Kaaz aus dem frühen 19. Jahrhundert. Die Schäden, die sich auf das gesamte Wandgemälde der Westwand im Steinernen Saal erstrecken, bestehen vor allem aus einer Ablösung der Malschicht vom Untergrund. In der aus Naturstein bestehenden und verputzten Außenwand sind zwei Fenster vermauert worden, um eine durchgängige Malfäche zu schaffen. Die Fenstergewände der vermauerten Fenster sind nur noch in der Außenfassade erkennbar. Zur Klärung der Fragen bezüglich bauphysikalischer Schwachstellen dieser Außenwand, speziell im Bereich der vermauerten Fenster, erfolgten im Innen- und Außenbereich Infrarot-Thermographieaufnahmen und Lichtbildaufnahmen. Neben den Resultaten der bauphysikalischen Untersuchung konnte auch für die Bauforschung eine zusätzliche

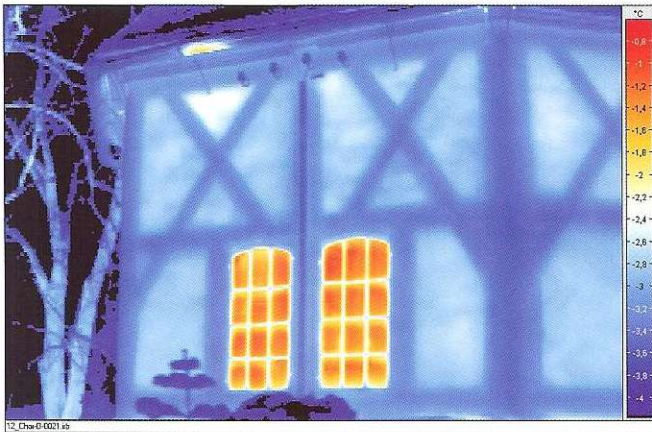


Abb. 14: Petershain, Dorfkirche, Ostflügel, (2005)



Abb. 15: Foto zu Abb. 14, (2005)

Information bezüglich eines vermauerten Türbereichs gewonnen werden.

### Petershain, Dorfkirche

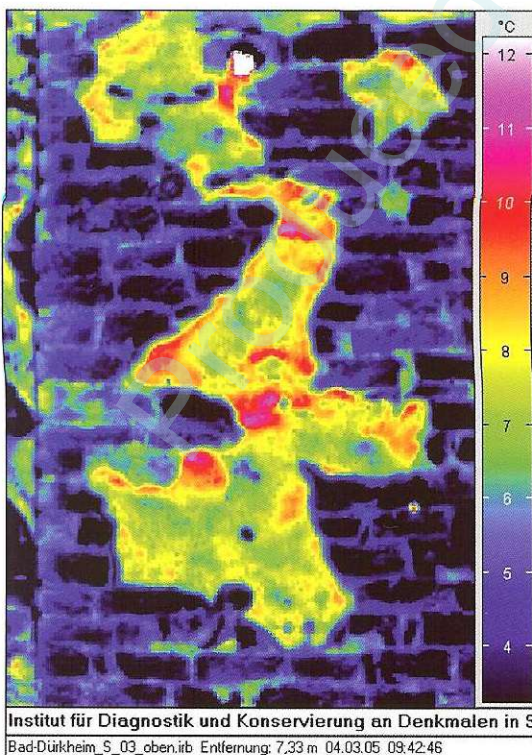
Für ein Sanierungskonzept der Dorfkirche in Petershain, Quitzdorf am See, sollten Fragen zum konstruktiven Aufbau geklärt werden. Es wurde ein Vorgehen in aktiver Thermographie gewählt. Der Ofen in der Kirche wurde am späten Abend in Betrieb genommen. In den frühen Morgenstunden einer kalten Winternacht im Januar 2005 wurden bei  $-8^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur die Fassadenoberflächen thermographiert. Der Wärmedurchgang durch den überputzten Fachwerkbau lässt an den Oberflächentemperaturen die Konstruktion des Wandaufbaus gut ablesen (Abb. 14, Abb. 15).

### Bad Dürkheim, Klostersruine Limburg

An der Klostersruine Limburg in Bad Dürkheim wurden Mitte der 1990er Jahre die aus salischer Zeit stammenden Außenputze konserviert. Nach etwa einer Dekade sollte die Nachhaltigkeit dieser Maßnahme nachvollzogen werden. Daher wurden im Jahr 2005 IR-Untersuchungen durch das IDK in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Steinkonservierung Mainz (IFS) vorgenommen. Mit aufgehender Sonne wurden gezielt verschiedene Putzstellen untersucht. Nach kurzer Einstrahlung der Sonne auf die Mauerwerksoberfläche zeicheten sich deutlich nicht angebundene Putzbereiche durch deutliche erhöhte Temperaturen ab (Abb. 16, Abb. 17).

### Niesky, Konrad Wachsmann Haus

Im Rahmen der anstehenden Innen- und Außenrestaurierung des sogenannten Wachsmann Hauses in Niesky sollte durch



Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in S  
Bad-Dürkheim\_S\_03\_oben.irb Entfernung: 7,33 m 04.03.05 09:42:46



Abb. 16: (links) Bad Dürkheim, Klostersruine Limburg, Romanische Putzfläche (2005)

Abb. 17: (rechts) Foto zu Abb. 16, (2005)

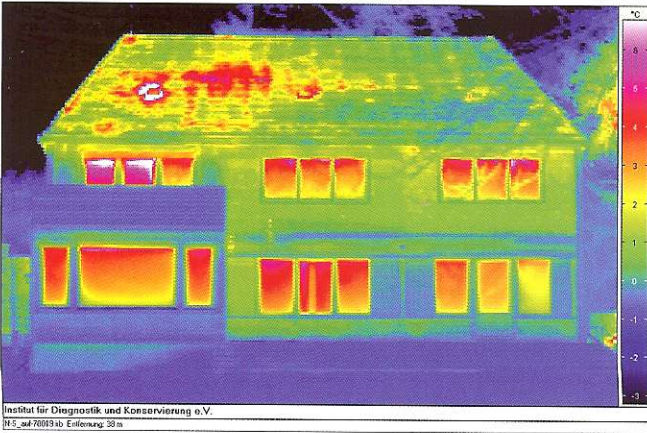


Abb. 18: Niesky, Konrad Wachsmann Haus



Abb. 19: Foto zu Abb. 18

eine Thermographieuntersuchung bauphysikalische Problem-  
punkte an dem Block- und Ständerbau ermittelt werden. Bei  
diesem Haustyp handelt es sich um eine frühe Form der Holz-  
fertigbauweise der Firma Christoph und Unmark aus Niesky.  
Dieses Haus ist als Wohnhaus des Architekten Konrad Wachsmann  
(1901–1980) 1927 errichtet worden. Durch die angefer-  
tigten Thermographieaufnahmen konnten für die anstehenden  
architektonischen Planungen notwendige energetische Ertüch-  
tigungen besser in ein denkmalpflegerischen Konzept einge-  
bunden werden. So konnten bestimmte Problembereiche wie  
z.B. Dach, Dachkasten, Baufuge Anbau bildlich dargestellt wer-

den. Diese hier erfassten Untersuchungs- und Planungsergeb-  
nisse können auch auf andere Gebäude dieses Bautyps übertra-  
gen werden. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde der  
Innenraum des Gebäudes durch Heizquellen erwärmt, um bau-  
physikalische Schwachpunkte im Außen- und Innenbereich zu  
lokalisieren.

**Wilschdorf, Wandmalereien**

Im Rahmen der anstehenden Sanierung des Dachstuhls und der  
Mauerkrone der Christopheruskirche in Dresden – Wilschdorf,



Abb. 20: Wilschdorf, Lichtbild mit Schadenskartierung im Messbereich C

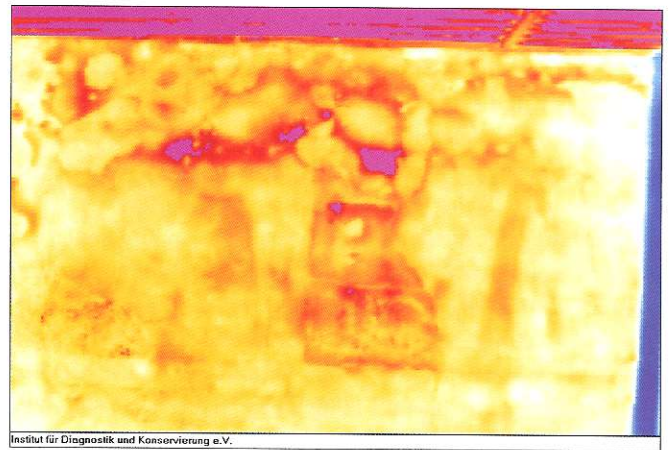


Abb. 21: IR-Aufnahme nach 15 min Erwärmung

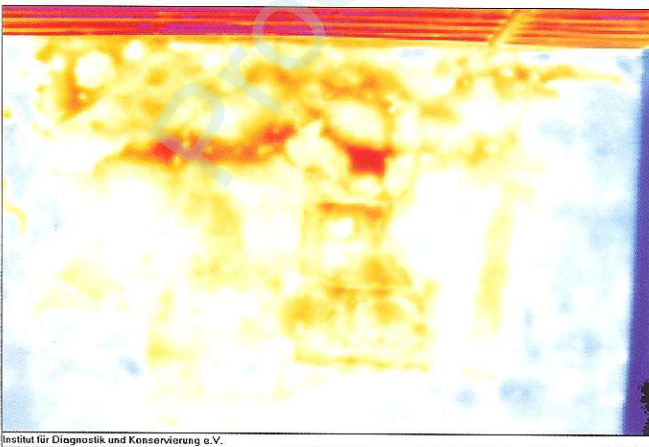


Abb. 22: IR-Aufnahme nach 2 min Abkühlung

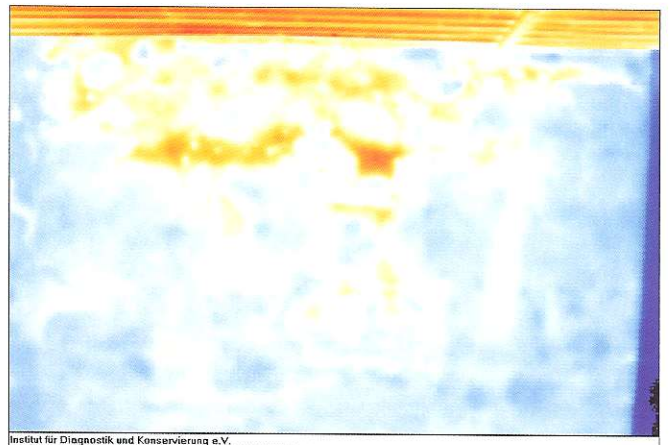


Abb. 23: IR-Aufnahme nach 4 min Abkühlung

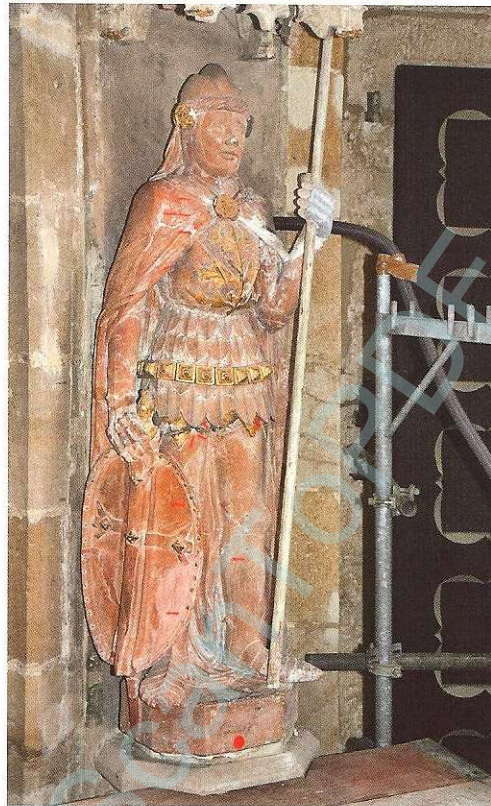
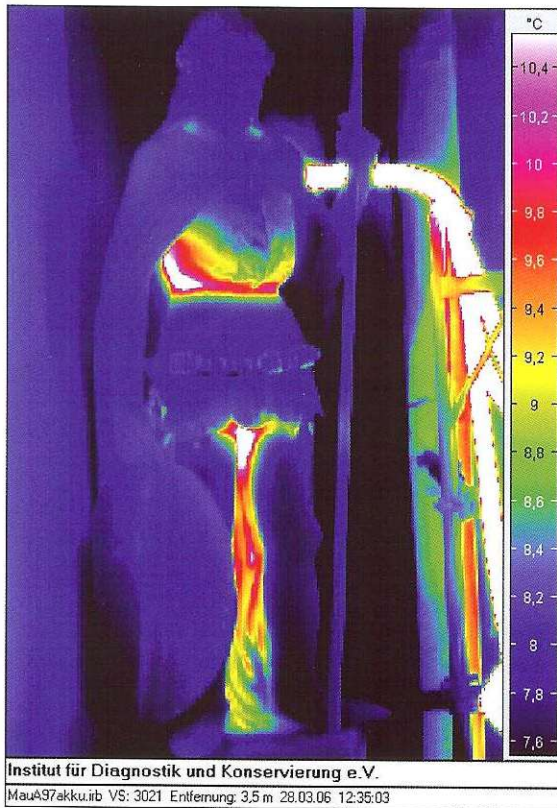


Abb. 24: (links) Meissen, Aktive Thermographie an Terrakottafigur des Mauritius (2006)

Abb. 25: (rechts) Foto zu Abb. 24 (2006)

wurde die Standsicherheit des im 15. Jahrhundert gefassten Mauerpuzzes im Anschlussbereich an die Holzbalkendecke in Frage gestellt. Bei dem in großen Bereichen gelockerten und zum Teil sehr hohl klingenden Putz, drohte mit Eintreten mechanischer Belastungen und Vibrationen bei einer äußeren Baumaßnahme ein Ablösen der Malerei von der Trägerwand. Da die Sanierung zeitnah erfolgen sollte, mussten schnellstmöglich Grundlagen für notwendige Sicherungsmaßnahmen erarbeitet werden. Zur Lokalisierung der Ausdehnung der Schadstellen im Bereich der Wandmalereien erfolgte eine Untersuchung der Wandoberflächen mithilfe aktiver Thermographie. Die Wandmalereien wurden in vier etwa gleichbreite Abschnitte eingeteilt. Die Oberfläche dieser Wandabschnitte wurde dann durch Wärmequellen *um ca. 6 K gleichmäßig und zeitlich begrenzt erwärmt*. Die mit der IR-Kamera dokumentierte Aktivierungsphase der Wandoberflächen betrug ca. 15 min und die der Abkühlung ca. 10 min. Als Ergebnisse wurden nach der Auswertung des Bildmaterials Kartierungen mit den entfestigten, bzw. hohl liegenden Putzbereichen erarbeitet (Abb. 20 bis Abb. 23).

### Meissen Dom, Terrakottafiguren

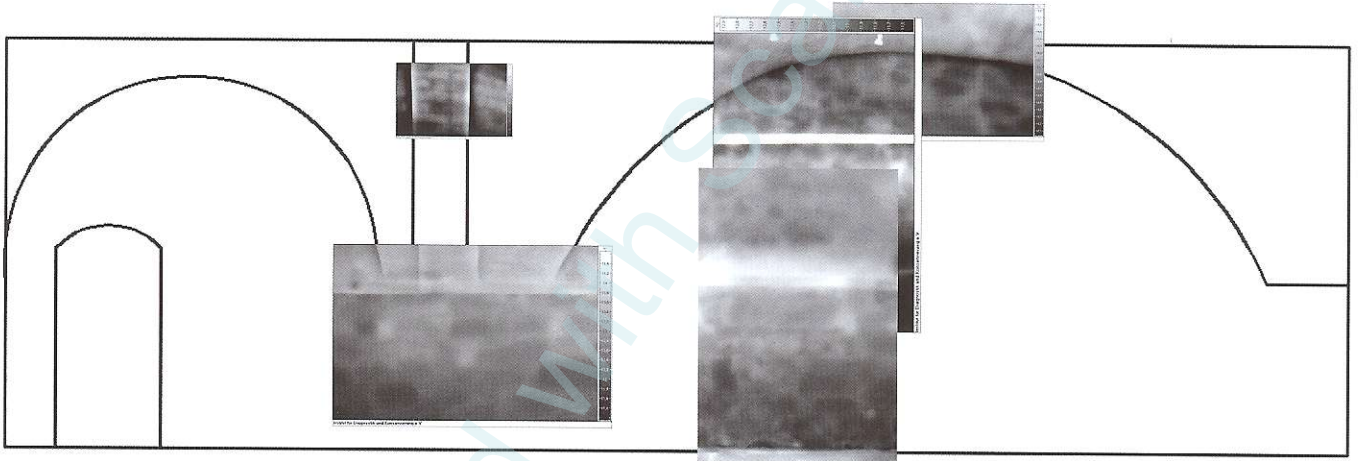
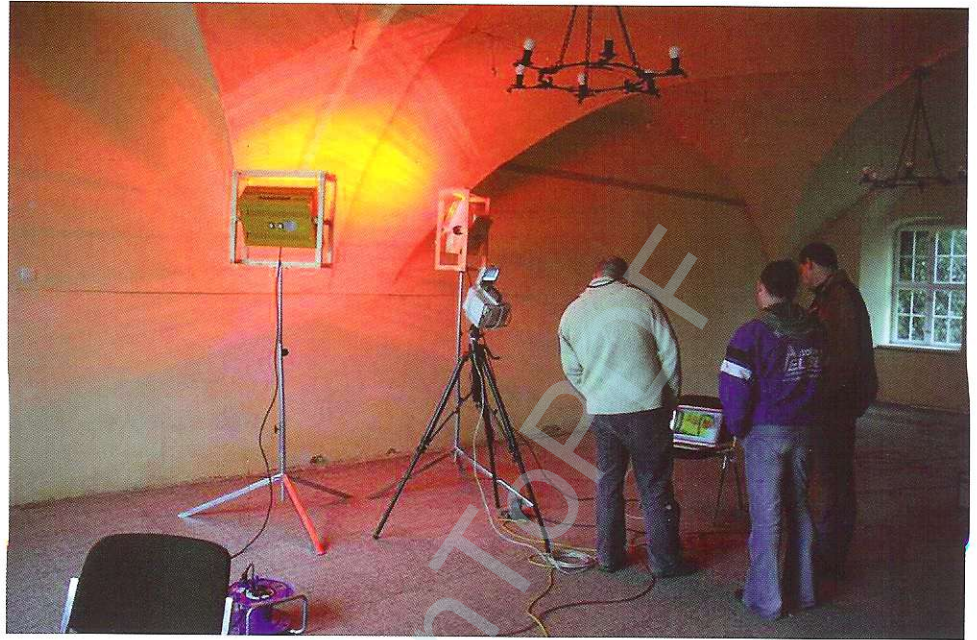
Im Rahmen der Entwicklung von Reinigungs- und Konservierungsverfahren zur Sanierung zweier bedeutender, umweltgeschädigter Terrakotta-Figuren in der wettinischen Grablege im Dom zu Meissen (DBU-Projekt: Restaurierung von Terrakotaplastiken am Meißener Dom, AZ: 21348) wurden im März 2006 Untersuchungen mittels Infrarotthermographie an den Terrakottaskulpturen durchgeführt. Es wurde ein für derartige Figuren methodisch innovativer Untersuchungsansatz verfolgt, der in der Bauthermographie schon länger erfolgreich einge-

setzt wird. Die Figuren wurden von innen mit Warmluft aufgeheizt. Dieser Ansatz verfolgt zwei von einander unabhängige Ziele. Zum einen war zu erwarten, dass es an undichten Stellen von innen nach außen zu einem Austritt der wärmeren Luft kommt. Die Rissstellen werden dabei an der außen liegenden Austrittsstelle stark aufgeheizt. So lassen sich durchgehende Risse im IR-Bild detektieren. Zum anderen kommt es bei einer gleichmäßigen Erwärmung des Inneren der Figuren in Abhängigkeit von der Wärmeleitung zu einem Transport der Wärme nach außen. Unterschiedliche Wärmeleitung verursacht unterschiedliche Oberflächentemperaturen während des Prozesses. So lassen sich Aussagen über Heterogenitäten in der Tiefe des Materials machen. Dünne Bereiche geben schneller einen Temperaturunterschied im Vergleich zur gleichmäßigen Ausgangsbasis wieder als dicke. Auch eine unterschiedliche Materialzusammensetzung durch Einschlüsse mit anderer Dichte spiegeln sich in der Oberflächentemperatur wider.

Erwärmte Luft wurde mit einem Schlauch durch eine Öffnung in die jeweilige Figur eingeleitet. In regelmäßigen Abständen wurde die Oberflächentemperatur der Figur dokumentiert. In Abb. 25 wird die Figur des Hl. Mauritius aus dem Blickwinkel der IR-Kamera dargestellt. Von rechts, aus der Sicht des Betrachters, wird durch den Schlauch der warme Luftstrom in eine Aussparung im Rücken der Figur (vergl. auch GERTKEMPER 2007) geführt. Die Oberfläche weist im Grundzustand der Figur eine gleichmäßig verteilte Temperatur von etwas unter 8°C auf. Die Infrarot-Thermographieaufnahme (Abb. 24) zeigt die Temperaturentwicklung der Figur während des Versuchs. Es kommt gleich zu Beginn der Untersuchung zu einem Ausweichen des warmen Luftstroms durch eine Öffnung unterhalb des Rockes zwischen den Beinen. Dort kommt es zu einer Temperaturer-

Abb. 26: (oben) Aktive Thermographie im Schloß Nöthnitz (2007)

Abb. 27: (unten) Die Ergebnisse der IR-Untersuchungen in eine einfache Wandabwicklung platziert (2007)



höhung bis auf etwa  $12^{\circ}\text{C}$ . Zudem wird sukzessiv die Verengung im Bereich der Taille aufgeheizt. Im weiteren Verlauf wird die Mantelfläche zwischen den Beinen bis hinunter zum Bodenbereich erwärmt. Dabei kommt es zu den stärksten Temperaturunterschieden an den erhabenen modellierten Falten. Das zeigt, dass diese Erwärmung durch den nach unten aus dem Loch austretenden Luftstrom hervorgerufen wurde und es sich hier nicht um eine Aufheizung von Innen heraus handelt. Auch der Brustpanzer erfährt noch eine weitere Aufheizung. Diese geschieht von unten nach oben und paust die Verzierungen auf dem Brustpanzer ab. Risse, die eventuell bisher unentdeckt geblieben waren, konnten nicht detektiert werden.

#### Nöthnitz, Schloss

Um eine Aussagen über den baukonstruktiven Aufbau des Erdgeschossbereichs im Schloss Nöthnitz zu erhalten ohne großflächig Bereiche des Innenputzes abnehmen zu müssen erfolgte eine aktive Infrarotthermographieuntersuchung dieser Wandbereiche. So konnten der Wandaufbau und die verwendeten Materialien bestimmt werden. Die Zwischenwände sind aus

Bruchstein und die Gewölbe mit Ziegeln gemauert. Das Ziegelgewölbe scheint in dem untersuchten Schlossbereich nachträglich eingezogen worden zu sein, was an den deutlichen Bau fugen nachzuvollziehen ist.

#### Jena-Lichtenhain

An der spätmittelalterlichen Außenwandmalerei der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain werden objektbezogene Methoden zur dauerhaften Sicherung des Bestandes dieses national wertvollen Kunstwerkes erarbeitet. Das Projekt „Modellhafte Bestandserhaltung stark anthropogen umweltgeschädigter spätmittelalterlicher Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain“ wird von der Deutschen Bundesstiftung gefördert (AZ: 24522).

Für die restauratorische Bearbeitung unumgänglich sind hier Erfassungen der entfestigten bzw. hohl liegenden Putzbereiche. Im Januar 2008 erfolgte durch das IDK eine aktive Infrarot-Thermografie zur Hohlstellendetektion an der Wandoberfläche der Außenwandmalerei (Abb. 28, Abb. 29). Durch die aktive Infrarot-Thermografie als eine berührungslose Untersuchungsme-





Abb. 28: Außenwandmalereien an der Nicolaikirche Jena-Lichtenhain (2007)

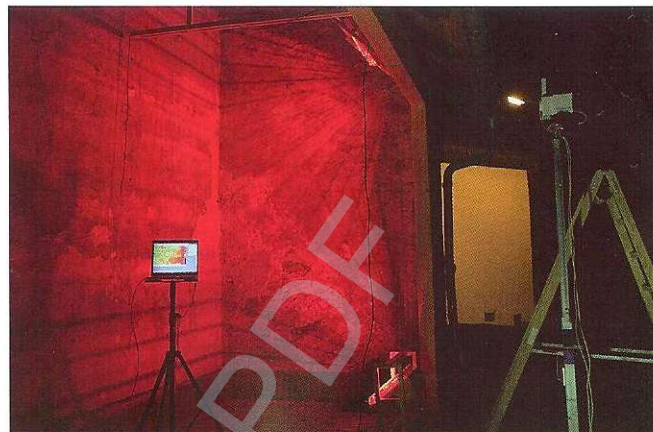


Abb. 29: Aktive Thermographie zur Schadensdiagnose (2008)

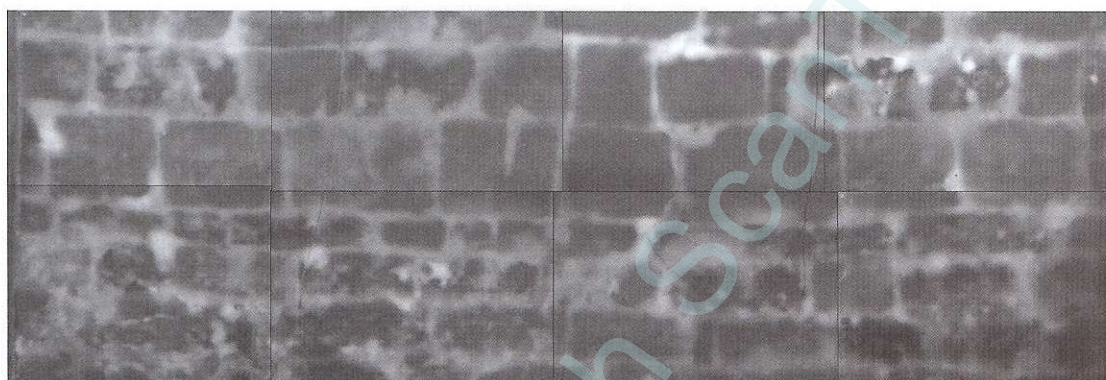


Abb. 30: Deutlich sichtbare Mauerwerksstruktur in zusammengesetzten IR-Bildern



Abb. 31: Schadbildkartierung der entfestigten und hohl liegenden Putzbereiche auf der Wandmalerei

thode ist es möglich, Oberflächenbereiche mit thermisch unterschiedlichem Verhalten zu erfassen und zu dokumentieren.

Die Auswertung erfolgte in grafischer Form auf Basis der Foto- und Messbildaufnahmen von den beteiligten Restauratoren. Durch die unterschiedliche Aufheiz- und Abkühlgeschwin-

digkeiten an der Wandoberfläche, können Rückschlüsse auf die Tiefenverteilung der entfestigten Putzbereiche oder der Hohlstellen geschlossen werden. Dadurch ist es möglich, entfestigte Bereiche von stärker gefährdeten Bereichen, die auch hohl liegen können, zu unterscheiden. In der grafischen Auswertung

werden beide Schädigungsstufen einzeln dargestellt und dann auf einem Lichtbild überlagert. So ist eine Orientierung am Wandgemälde sehr gut möglich.

Als „Nebenprodukt“ konnten für die Bauforschung am Objekt Erkenntnisse zum Wandaufbau geliefert werden. Deutlich sind in den IR-Aufnahmen die Mauerstruktur, der Fugenverlauf und die verwendeten Materialien erkennbar (Abb. 30). Durch diese Visualisierung der Mauerstruktur konnten auch Zusammenhänge zwischen Schädigungsgrad des Bildträgers und Fugenverlauf des Mauerwerks verdeutlicht werden (Abb. 31).

## Ausblick

Durch energiebezogene Untersuchungen ist ein stark vermehrter Einsatz der Infrarotthermographie auch im Denkmalsektor zu erwarten. Diese Entwicklung wird unterstützt durch gesunkene Anschaffungskosten und eine leichtere Handhabung der komplexen Technik. Nur eine sachorientierte Auswertung und physikalisch belastbare Interpretationen der häufig in Farbdarstellung abgebildeten Oberflächentemperaturverteilungen führen zu anschaulichen und aussagekräftigen Ergebnissen von denen in naher Zukunft viele Erkenntnisse auch für die Bauuntersuchung und Bauforschung zu erwarten sind.

## Literaturquellen

- FÖRSTER, S.: Der Pavillon (18. Jh.) im Schlosspark Hermsdorf bei Dresden. Untersuchungen zur Raumschale und Erarbeitung eines Konservierungs- und Restaurierungskonzeptes für die chinesisches Gewölbemalereien. Diplomarbeit an der Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2009, S. 16, Anhang D.2.
- FRANZEN, C., LÖTHER, TH., MEINHARDT-DEGEN, J., WEISE, S.: Berührungslose Hohlstellendetektion an Wandmalereien, in: G. Grassegger, G. Patitz, O. Wöllbert (Hrsg.) Natursteinsanierung Stuttgart 2008, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 2008, S. 43 - 50.
- FRANZEN, C., LÖTHER, TH.: Dresden, Residenzschloß, Stallhof - Infrarotthermographische Untersuchungen der Oberflächen, Bericht DD 15/2009, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2009, 13 Seiten.
- FRANZEN, C., LÖTHER, TH.: Hermsdorf - Schlosspark, Pavillon, Bericht DD 05/2009, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2009, 8 Seiten.
- FRANZEN, C., WEISE, S.: Dorfkirche in Petershain - Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Salzbelastung und zur Gebäudestruktur, Bericht DD 01/2005, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2005, 16 Seiten.
- FRANZEN, C., WEISE, S.: Infrarotthermographische Untersuchungen. in: Günter Donath (Hrsg.) Aus Ton gebrannt, Terrakottafiguren im Dom zu Meissen, 2007, S. 116 - 118.
- FRANZEN, C.: Dresden, Residenzschloß, Langer Gang - IR-Thermographieuntersuchungen, Bericht DD 21/2010, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2010, 12 Seiten.
- FRANZEN, C.: IR-Thermographieaufnahmen im Schloß Freital-Burgk, unveröffentlichter Kurzbericht des IDK, Februar 2005, 9 Seiten
- FRANZEN, C.: Torgau, Schöner Erker - Untersuchungen zur Klärung der offenen Fragen, Empfehlung zur Restaurierungskonzeption, Bericht DD 29/2006, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2006, 102 Seiten.
- FRANZEN, C., LÖTHER, TH., MEINHARDT-DEGEN, J., WEISE, S.: DBU-Projekt „Detektierung und Konservierung infolge von Umwelteinflüssen hohlstehender Wandmalereien am Beispiel der national wertvollen mittelalterlichen Kirchen in Kühren und Bad Schmiedeberg“ (AZ 21045006) Bericht DD 34/2007, online veröffentlichter Bericht des IDK, 2007, 134 Seiten.
- GERTKEMPER H.-J.: Ergebnisse der Röntgenuntersuchungen. in: Günter Donath (Hrsg.) Aus Ton gebrannt, Terrakottafiguren im Dom zu Meissen, 2007, S. 94 - 97.
- JULING H., FRANZEN C.: Schadensdiagnose. - In: Schwarz H.-J., Steiger M. (Hrsg.) Salzsäuren an Kulturgütern: Stand des Wissens und Forschungsdefizite, 2009, S. 52-58.
- LÖTHER, TH., FRANZEN, C., WEISE, S.: Dresden - Wilschdorf, Ev.-luth. Christopheruskirche - Beurteilung der Standsicherheit des Wandputzes, Bericht DD 18/2007, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2007, 11 Seiten.
- LÖTHER, TH., FRANZEN, C.: Dresden, Schloß, Stallhof - Infrarotthermographie, Bericht DD 11/2009, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2009, 12 Seiten.
- LÖTHER, TH., MEINHARDT-DEGEN, J., WEISE, S., FRANZEN, C.: Hohlstellendetektion an mittelalterlichen Wandmalereien mittels aktiver IR-Thermographie. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Thermographie-Kolloquium 2007, BB 107-CD Stuttgart, 124 - 130.
- LÖTHER, TH.: Frohburg, Schloss, Steinerner Saal - Infrarot-Thermographie zur Detektierung bauphysikalischer Schwachstellen in der Westwand (Außenwand), DD 04/2007, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2007, 5 Seiten.
- LÖTHER, TH.: Niesky, Wachsmann Haus - Infrarotthermographie, DD 07/2009, unveröffentlichter Bericht des IDK, 2009, 47 Seiten.