

# **Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Ortung von Ablösungen und Fehlstellen in Beton und Mauerwerk**

Ch. Maierhofer, R. Arndt, M. Röllig

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

## **Abstract**

Die Impuls-Thermografie hat als zerstörungsfreies Prüfverfahren für verschiedene Applikationen im Bauwesen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die aktive Erwärmung der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils und die Beobachtung des anschließenden Abkühlungsvorgangs mit einer Infrarotkamera ermöglicht die Ortung von Ablösungen und Hohlstellen im oberflächennahen Bereich sowie die Abbildung von Mauerwerksstrukturen hinter Putz. Schon mit einfachen Versuchsaufbauten vor Ort können eine Vielzahl von praxisrelevanten Fragestellungen gelöst werden.

## **Einleitung**

Für die Ortung von Inhomogenitäten und Ablösungen im oberflächennahen Bereich von Bauwerksstrukturen hat sich die Impuls-Thermografie als Zerstörungsfreies Prüfverfahren in den letzten zehn Jahren immer stärker durchgesetzt. Aufgrund der hohen Nachweisempfindlichkeit in Bauteiltiefen von 0,1 bis 10 cm [Ref 1, Ref 2, Ref 3, Ref 4] ergänzt es andere erfolgreiche ZfPBau-Verfahren wie Radar, Ultraschall und Impact-Echo, mit denen häufig erst ab einer Bauteiltiefe von 5 bis 10 cm sinnvolle Messergebnisse erzielt werden können [Ref 5, Ref 6, Ref 7].

Die Impuls-Thermografie basiert auf der aktiven Erwärmung der zu untersuchenden Struktur mit einer geeigneten Wärmequelle und der anschließenden Beobachtung des Abkühlungsverhaltens mit einer Infrarotkamera. Falls innerhalb des Probekörpers Inhomogenitäten vorhanden sind, deren thermische Materialeigenschaften sich von denen der Umgebung unterscheiden, ändert sich der Wärmefluss in diesen lokalen Bereichen. Wird die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung auf der Oberfläche mit einer Infrarot-Kamera betrachtet, können demzufolge oberflächennahe Inhomogenitäten geortet werden, sofern sie einen messbaren Temperaturunterschied auf der Oberfläche verursachen. Im einfachsten Fall kann eine Fehlstelle auf diese Art und Weise geortet und ihre laterale Position parallel zur Oberfläche ermittelt werden. Häufig, wie z. B. bei der Ortung von Ablösungen von Oberflächenbeschichtungen, reicht diese Information aus [Ref 3]. Es gibt jedoch auch Fragestellungen, bei denen eine Fehlstelle quantitativ charakterisiert werden muss, z. B. durch Art, Größe und Tiefe der Fehlstelle (z. B. Größe und Betonüberdeckung von Hohlstellen und Kiesnestern in Beton). Durch Lösung des Inversen Problems können numerischen Modellierungen des instationären Wärmetransports die quantitative Auswertung der Messdaten ermöglichen [Ref 8].

Für die Durchführung der Messungen müssen die geeigneten Erwärmungseinheiten und Messparameter an die Aufgabenstellung angepasst werden. Verschiedene Wärmequellen stehen dabei zur Verfügung. Von diesen ermöglichen Infrarotstrahler und Blitzlichtlampen eine Erwärmung mit Wärmestrahlung, während die Erwärmung mit einem Heizlüfter über Konvektion erfolgt. Der Abstand der Wärmequelle zum

Bauteil, die eingebrachte Leistung sowie die Erwärmungsdauer können variiert werden. Eine möglichst gleichmäßige Erwärmung kann durch automatisierte Bewegungen der Wärmequelle erreicht werden.

Neue Softwaretools zur Signal- und Bildauswertung verbessern den Kontrast der Fehlstellen in der bildgebenden Darstellung der Messergebnisse (z. B. im Thermogramm). Dabei hat sich die Auswertung nach der Puls-Phasen-Thermografie, d. h. die Auswertung der transienten Abkühlungsvorgänge im Frequenzbereich, als sehr hilfreich zur Reduzierung des Störeinflusses von Oberflächeninhomogenitäten und ungleichmäßiger Erwärmung erwiesen [Ref 9, Ref 10].

Das hier vorgestellte Verfahren wurde an verschiedenen Probekörpern im Laboratorium getestet und bereits in mehreren Fallstudien vor Ort eingesetzt. In diesem Beitrag werden die Anwendungsbereiche, Einflussgrößen und Grenzen des Messverfahrens anhand anschaulicher Beispiele vorgestellt.

## **Experimentelles**

### *Versuchsaufbau*

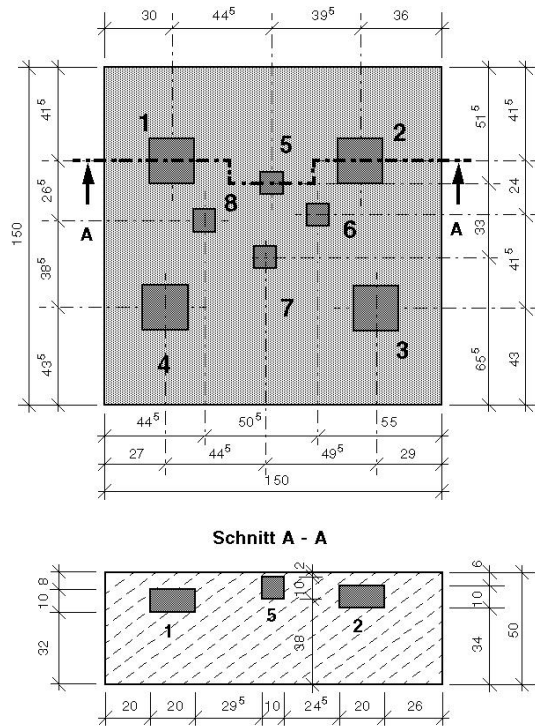
Der experimentelle Aufbau zur Durchführung der Messungen mit der Impuls-Thermografie setzt sich aus einer Erwärmungseinheit, einer Infrarotkamera Typ Inframetrics SC1000 mit einem Diodenarray bestehend aus 256 x 256 Detektoren im Wellenlängenbereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  und einer maximale Bildfrequenz von 50 Hz und einem Computersystem zur Echtzeiterfassung der Thermogramme zusammen. Je nach Kameraabstand und Objektiv können unterschiedlich große Flächen aufgenommen werden.

Um eine möglichst homogene Erwärmung der zu untersuchenden Bauteiloberfläche zu erreichen, werden drei Infrarotstrahler mit einer jeweiligen Anschlussleistung von 2400 W linienförmig übereinander angeordnet. Mit Hilfe einer motorbetriebenen Schiene kann diese Erwärmungseinheit wiederholt gleichmäßig über die Oberfläche bewegt werden. Der Abstand der Strahlungsquelle zum Objekt ist variable und betrug bei den hier durchgeführten Untersuchungen 15 cm.

Neben diesem Erwärmungssystem können für Messungen auf der Baustelle die Infrarotstrahler horizontal auf einen Wagen montiert werden. Reichen geringere Erwärmungen der Oberfläche der Bauteile aus, so werden auch ein Heizlüfter mit einer Leistung von 2000 W oder Blitzlampen eingesetzt. Letztere eignen sich zum Beispiel sehr gut zur Ortung von Ablösungen von CFK-Laminaten, die zur nachträglichen Verstärkung von Betonstrukturen eingesetzt wurden [Ref 11].

### *Probekörper*

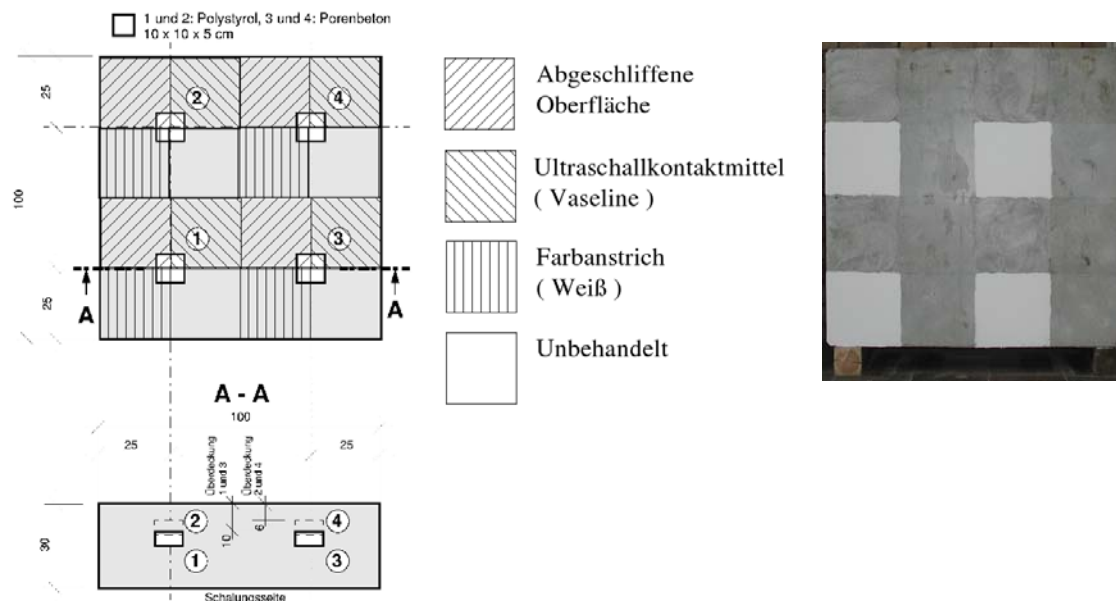
Zur systematischen Untersuchung der Nachweisbarkeit von Hohlstellen wurde zunächst Probekörper A (siehe Bild 1) hergestellt. Der Probekörper hat die Abmaße 150 x 150 x 50  $\text{cm}^3$  und enthält acht eingebaute Fehlstellen aus Polystyrol-Hartschaum mit den Abmessungen 20 x 20 x 10  $\text{cm}^3$  bzw. 10 x 10 x 10  $\text{cm}^3$ . Die Solltiefen dieser Fehlstellen lagen zwischen 2 und 10 cm. Da während des Betonierens jedoch einige Fehlstellen ihre Lage verändert hatten, wurden nach dem Austrocknen des Probekörpers Radarmessungen durchgeführt. Die aus diesen Untersuchungen bestimmte Betondeckung ist in der Tabelle in Bild 1 angegeben.



Mit Radar ermittelte Tiefe der Fehlstellen

No.	Tiefe in cm
1	9,2 ± 1,0
2	7,6 ± 1,0
3	4,0 ± 1,0
4	1,0 ± 1,0
5	3,0 ± 1,0
6	4,3 ± 1,0
7	3,5 ± 1,0
8	4,3 ± 1,0

**Bild 1** Probekörper A aus Beton mit Fehlstellen aus Polystyrol-Hartschaum in unterschiedlichen Tiefen und zwei verschiedenen Größen (Maßzahlen in cm).



**Bild 2** Skizze und Foto des Probekörpers B mit Oberflächenmodifikationen: Farbanstrich, Anschliff und Verunreinigung der Oberfläche.

In den Probekörper B mit den Abmaßen 100 x 100 x 30 cm<sup>3</sup> wurden jeweils vier Fehlstellen der Größe 10 x 10 x 5 cm<sup>3</sup> in Tiefen von 6 und 10 cm eingebaut (siehe Bild 2 links). Jeweils zwei Fehlstellen wurden durch Polystyrol-Hartschaum und Porenbeton simuliert. Diese Fehlstellen wurden so fixiert, dass ein Aufschwimmen

während des Betonierens verhindert wurde. Nach der Herstellung wurde dieser Probekörper zur Untersuchung des Einflusses von Oberflächenverunreinigungen, Anstrichen und Inhomogenitäten modifiziert. Wie in Bild 2 links dargestellt wurden Teile der Oberfläche angeschliffen, mit einem weißen Farbanstrich versehen oder mit Vaseline (Kontaktmittel für Ultraschalluntersuchungen) verunreinigt. Ein Foto der so veränderten Oberfläche des Probekörpers zeigt Bild 2 rechts.

## Auswertung

Die qualitative Auswertung der Messdaten kann allein aus den Temperaturkontrasten der Thermogramme erfolgen. Quantitative Informationen aus den Messdaten erhält man z. B. aus der Auswertung von Temperatur-Zeit-Kurven (Transienten). Zwei Transienten eines Messpunktes oberhalb einer Fehlstelle und eines Messpunktes oberhalb eines ungestörten Bereiches sowie die dazugehörige Differenzkurve sind in Bild 3 dargestellt. Charakteristisch für die Differenzkurven ist das Auftreten eines Temperaturmaximums  $\Delta T_{max}$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_{max}$ . Diese beiden Werte werden deutlich von den Materialparametern, der Erwärmungszeit und der Fehlstellengeometrie und -tiefe beeinflusst.

Der Kontrast  $C(t)$  oberhalb der Fehlstelle lässt sich dann wie folgt ermitteln:

$$C(t) = \frac{T_{nF}(t)}{T_{nR}(t)} \quad [1]$$

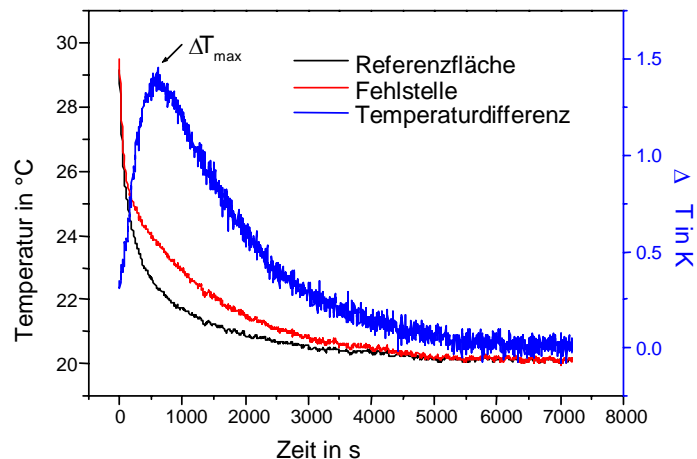
mit

$$T_{nx}(t) = \frac{T_{mess,x}(t) - T_{back}}{T_{start,x}(0) - T_{back}} \quad [2]$$

- $T_{nx}(t)$ : normierte Temperatur oberhalb der Fehlstelle (F) bzw. Referenz (R)  
 $T_{mess,x}(t)$ : gemessene Temperatur oberhalb der Fehlstelle (F) bzw. Referenz (R)  
 $T_{start,x}$ : Starttemperatur oberhalb der Fehlstelle (F) bzw. Referenz (R) nach der Erwärmung ( $t = 0$  s)  
 $T_{back}$ : Umgebungstemperatur

Wie oben erwähnt, wird eine deutliche Verbesserung des Kontrastes bei der Darstellung von Fehlstellen mit Hilfe der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) erreicht [Ref 9]. Hierbei wird auf jede Temperaturtransiente für jedes Pixel (i,j) der aufgenommenen Zeitreihe (Sequenz) mit Infrarotbildern die Fourier-Transformation angewendet. Dadurch erhält man Amplituden- und Phasenbilder für verschiedene Frequenzen. Die Vorteile der PPT gegenüber der Darstellung von Thermogrammen bei der Impuls-Thermografie sind im wesentlichen durch die Eigenschaften der Phasenbilder gegeben, die nur Informationen über die zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur enthalten:

- Tiefere Strukturen sind erkennbar
- Geringerer Einfluss von Oberflächenveränderungen wie Verunreinigungen, unterschiedlichen Emissivitäten und inhomogener Erwärmung
- Kontrastreichere Abbildung der Defektgeometrie, geringeres Rauschen und damit erhöhte Nachweisempfindlichkeit von Defekten



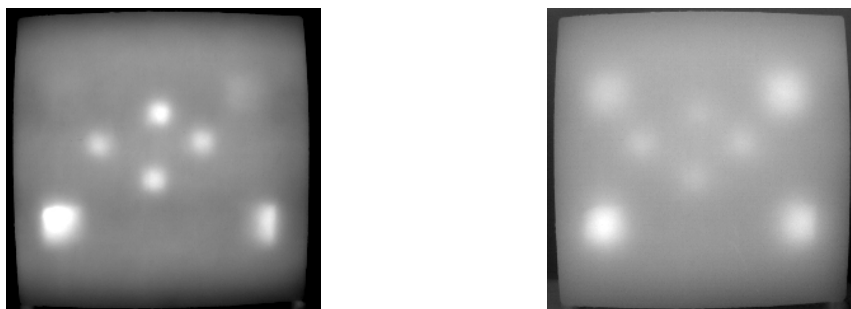
**Bild 3** Temperatur-Zeit-Kurven mit und ohne Fehlstelle und dazugehörige Differenzkurve mit einem Temperaturmaximum  $\Delta T_{max}$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_{max}$ .

### Laboruntersuchungen an Probekörpern

An den oben beschriebenen Probekörpern wurden jeweils ein Jahr nach der Herstellung Messreihen mit unterschiedlichen Erwärmungszeiten von 5 bis 60 min durchgeführt. Der Abkühlungsprozess wurde nach der Erwärmung für einen Zeitraum von 2 Stunden mit einer Bildaufnahmefrequenz von 2 Hz mit der IR-Kamera erfasst.

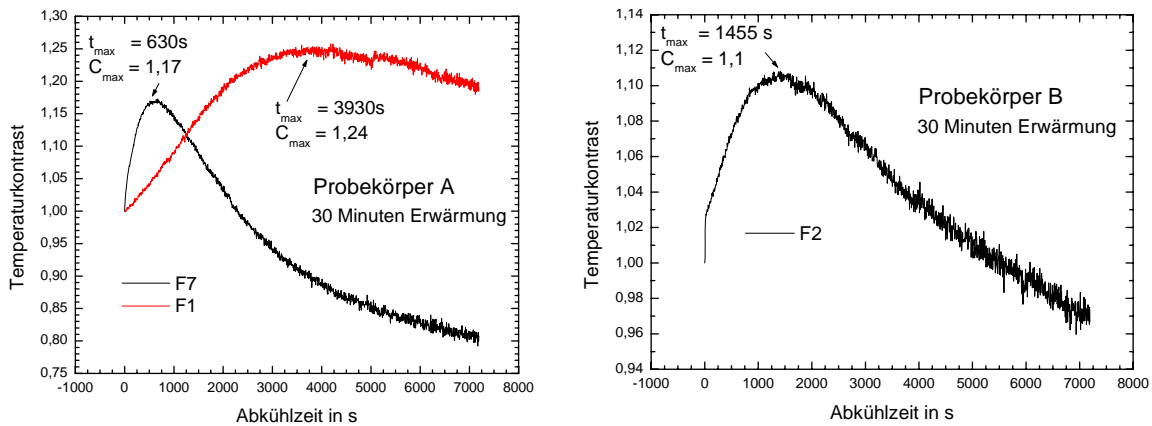
#### *Einfluss der Fehlstellentiefe auf den maximalen Temperaturkontrast*

Zwei ausgewählte Thermogramme der Abkühlungssequenz des Probekörpers A nach 30 min Erwärmung zeigt Bild 4. Nach einer Abkühlzeit von 470 s ist die Fehlstelle F7 (kleine Fehlstelle unten Mitte in Bild 4, links) mit maximalem Temperaturkontrast zu erkennen, während die tiefen großen Fehlstellen F1 und F2 kaum zu erkennen sind. Fehlstelle F1 (oben links in Bild 4, rechts) erscheint erst nach einer Abkühlzeit von 3125 s mit maximalem Kontrast.



**Bild 4** Thermogramme des Probekörpers A nach 470 s (links, Temperaturbereich 25 bis 40 °C) und 3125 s (rechts, Temperaturbereich 20 bis 30 °C) Abkühlzeit. Die Erwärmungszeit betrug 30 min.

Aus den Transienten oberhalb der Fehlstellen und in ausgewählten Referenzbereichen wurden die nach Gl. [1] normierten Temperaturkontrastkurven beispielsweise für die Fehlstellen F1 und F7 im Probekörper A und F2 (6 cm tiefe Fehlstelle aus Polystyrol) im Probekörper B ermittelt und in Bild 5 dargestellt. Die Werte des maximalen Temperaturkontrastes und den zugehörigen Zeitpunkten der Fehlstellen sind in Tabelle 1 dargestellt.



**Bild 5** Links: Normierte Temperaturkontrastkurven der Fehlstellen F1 und F7 des Probekörpers A nach einer Erwärmungszeit von 30 min. Rechts: Normierte Temperaturkontrastkurve der Fehlstelle F2 des Probekörpers B nach einer Erwärmungszeit von 30 min.

**Tabelle 1** Einfluss der Tiefe der Fehlstellen in den Probekörpern A und B auf den maximalen Temperaturkontrast bei einer Erwärmungszeit von 30 min.

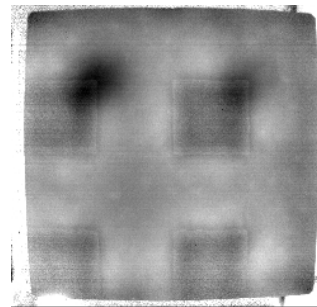
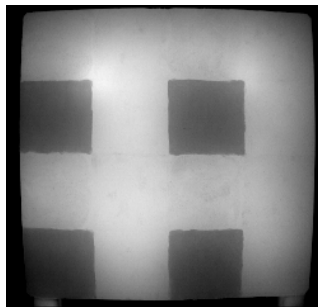
Probekörper/ Fehlstelle	Gemessene Zeit $t_{max}$ in s	Max. Temperatur- kontrast $C_{max}$	Ermittelte Überdeckung in cm (Radarmessung in Probekörper A, Sollwert für B)
A/F1	3930	1,24	9,2 ± 1,0
A/F2	3460	1,39	7,6 ± 1,0
A/F5	520	1,23	3,0 ± 1,0
A/F7	630	1,17	3,5 ± 1,0
A/F8	1005	1,21	4,3 ± 1,0
B/F2	1455	1,11	6,0

*Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächenverunreinigungen*

Thermogramm und Phasenbild bei jeweils maximalem Kontrast der Fehlstelle F2 (oben links) des durch unterschiedliche Oberflächenbehandlungen modifizierten Probekörpers B sind in Bild 6 dargestellt.

Im Thermogramm ist besonders deutlich der weiße Farbanstrich zu erkennen, der die Emissivität der Oberfläche verändert. Dahinter sind die Fehlstellen nur noch sehr undeutlich sichtbar. Die Bereiche mit angeschliffener Oberfläche bzw. mit Verunreinigungen durch Vaseline unterscheiden sich nicht eindeutig von den unbehandelten Bereichen.

Im Phasenbild ist der Einfluss des Farbanstriches wesentlich geringer als im Thermogramm. Die darunter liegenden Fehlstellen sind viel deutlicher zu erkennen. Auch hier unterscheiden sich die Bereiche mit Anschliff und Vaseline nicht von der Umgebung.



**Bild 6** Untersuchung des Einflusses verschiedener Oberflächeneigenschaften auf die Ortung der Fehlstellen im Probekörper B. Links: Thermogramm mit maximalem Temperaturkontrast für die Fehlstelle F2 nach 900 s Abkühlung (Temperaturbereich von 27 bis 39 °C), rechts: Phasenbild mit maximalem Phasenkontrast für die Fehlstelle F2 bei einer Frequenz von  $f = 2,463 \times 10^{-4}$  Hz.

## Fallstudien

Im Rahmen des von der EU geförderten Forschungsvorhaben ONSITEFORMASONRY (On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [www.onsiteformasonry.bam.de](http://www.onsiteformasonry.bam.de)) wurden an ausgewählten historischen Gebäuden eine Vielzahl von Fallstudien zur Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren durchgeführt. Dazu gehörten auch die unten vorgestellten Untersuchungen an der Wartburg in Eisenach sowie im Alten Museum in Berlin.

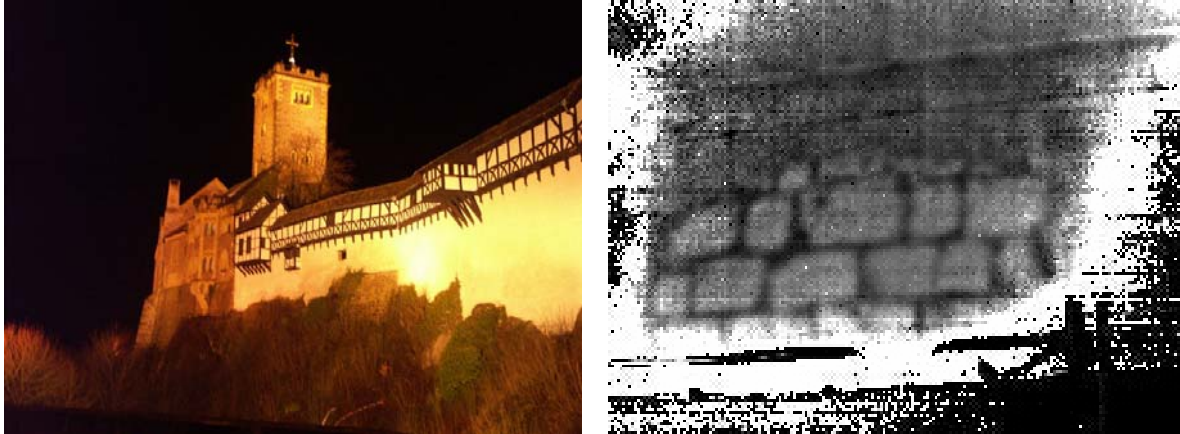
### *Ortung einer ehemaligen Türöffnung in der Wartburg*

Die Geschichte der Wartburg (s. Bild 7) geht zurück bis in das 12. Jahrhundert. Im Landgrafenzimmer im Palas der Wartburg, dem ältesten Wohngebäude dieser Art in Deutschland, war in der Nordwand zum Treppenhaus eine Türöffnung vorhanden, die später geschlossen und verputzt wurde. Heute befinden sich auf der Innenseite (Raumseite) dieser Wand auf dem Putz Ornamente und Wandmalereien. Die Außenseite der Wand zum 1950 errichteten Treppenhaus ist weiß verputzt. Zur Untersuchung der inneren Struktur dieser Nordwand sollte daher u. a. die Position dieser ehemaligen Tür mittels aktiver Thermografie ermittelt werden [Ref 12].

Dazu wurde die Wand von der Seite des Treppenhauses aus in mehreren Bereichen von jeweils 1 m<sup>2</sup> ca. 5 min mit einem Heizlüfter erwärmt. Das Abkühlungsverhalten wurde mit der oben beschriebenen Infrarotkamera jeweils über einen Zeitraum von 15 min beobachtet. Insgesamt wurde eine Fläche von 3,5 m in horizontaler Richtung und 1,2 m in vertikaler Richtung untersucht. Die anschließende

Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) im Frequenzbereich.

Bild 7 rechts zeigt ein ausgewähltes Phasenbild bei einer Frequenz von  $f = 2,463 \times 10^{-4}$  Hz. Deutlich sind die Struktur des großformatigen Mauerwerks innerhalb der ehemaligen Türöffnung sowie der obere Türbogen zu erkennen.



**Bild 7** Links: Foto der Wartburg in Eisenach. Rechts: Phasenbild eines Wandausschnitts des Landgrafenzimmers nach 5 min Erwärmung mit einem Heizlüfter. Die Struktur des Mauerwerks unterhalb des Putzes mit der ehemaligen Türöffnung ist deutlich zu erkennen.

#### *Ortung von Putzablösungen an einer Sandsteinsäule in der Rotunde des Alten Museums in Berlin*

Im Masterplan der Museumsinsel in Berlin-Mitte, der bis 2009 umgesetzt werden soll, ist auch die denkmalgerechte Grundinstandsetzung des Alten Museums enthalten. Die vorhergehende Zustandsanalyse des Gebäudes beinhaltete u. a. auch die Untersuchung der Säulen in der Rotunde des Museums, die an der Oberfläche ungleichmäßige Rissstrukturen erkennen ließen. Diese aus Sandstein aufgebauten Säulen wurden mit einem 2 bis 3 cm dicken Kalkputz versehen, der die Tragschicht für den sichtbaren 3 bis 6 mm dicken Stuckmarmorputz bildet. Ziel der Untersuchung mit der aktiven Thermografie war es, mögliche Ablösungen zwischen dem Sandstein und dem Kalkputz und/oder zwischen dem Kalkputz und dem Stuckmarmor zu orten.

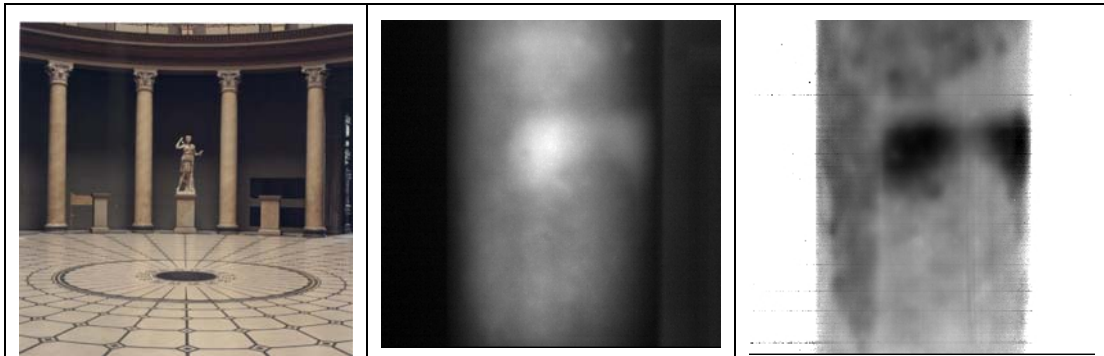
Die Untersuchung von einer Säule mit einer Gesamthöhe von 534 cm wurde mit Hilfe eines Hubsteigers realisiert. Ausgewählte Abschnitte der Säule mit einer Höhe von ca. 1 m wurden halbseitig (180°) 5 min lang mit einem Heizlüfter erwärmt. Der anschließende Abkühlungsprozess wurde mit der Infrarotkamera 15 min lang beobachtet.

Bild 8, mitte, zeigt ein ausgewähltes Thermogramm aus dem mittleren Bereich der Säule. Oberhalb und rechts der Mitte des Thermogramms ist deutlich ein hellerer Bereich mit erhöhter Oberflächentemperatur zu erkennen, der auf eine Ablösung hindeuten könnte. Als störende Effekte sind in diesem Thermogramm in der Mitte Reflexionen von anderen Strahlenquellen sowie eine Temperaturabnahme zum Rand der Säule hin aufgrund der Säulengeometrie zu erkennen. In Bild 8, rechts, ist ein Phasenbild dieser Messreihe zu sehen, wo diese Effekte aufgrund der Darstellung einer ausgewählten Frequenz herausgefiltert wurden. Die Ablösung ist



hier als dunkler Bereich mit besseren Abgrenzungen und besserem Kontrast als im Thermogramm zu erkennen.

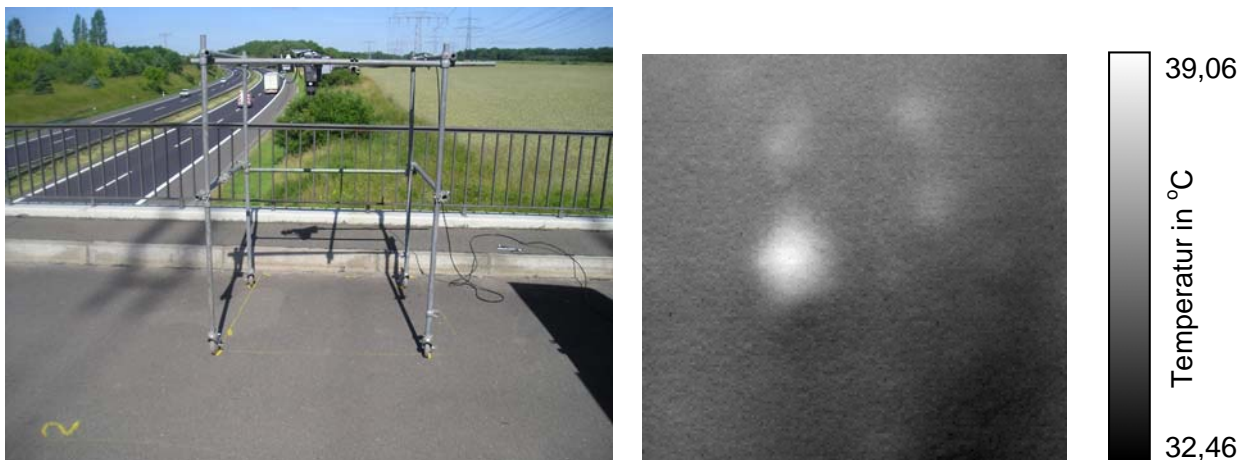
Zur Zeit kann aus diesen Messdaten noch nicht die Tiefe der Ablösung berechnet und daraus geschlossen werden, an welcher Grenzfläche diese auftritt. Für weitere quantitative Aussagen werden numerische Simulationen durchgeführt, die bisher für dünne Schichten jedoch noch große Abweichungen zu den experimentellen Messergebnissen aufweisen



**Bild 8** Links: Sandsteinsäulen mit Stuckmarmorputz in der Rotunde im Alten Museum in Berlin. Mitte: Thermogramm und rechts: Phasenbild eines 1 m hohen Ausschnitts einer ausgewählten Säule.

#### *Ortung von Asphaltablösungen auf einer Autobahnbrücke mit Hilfe der Sonnenstrahlung*

Zur Ortung von Asphaltablösungen mit Hilfe der Erwärmung durch Sonneneinstrahlung wurden Untersuchungen vor Ort an einer Betonfertigteilebrücke mit Spannstahlbewehrung durchgeführt. Der Aufbau des Brückenbelags besteht aus einer 50 mm dicken Betonausgleichsschicht, einer 10 mm dicken Asphaltmastixschicht als Abdichtung sowie einer 50 mm dicken Asphaltdeckschicht zusammen.

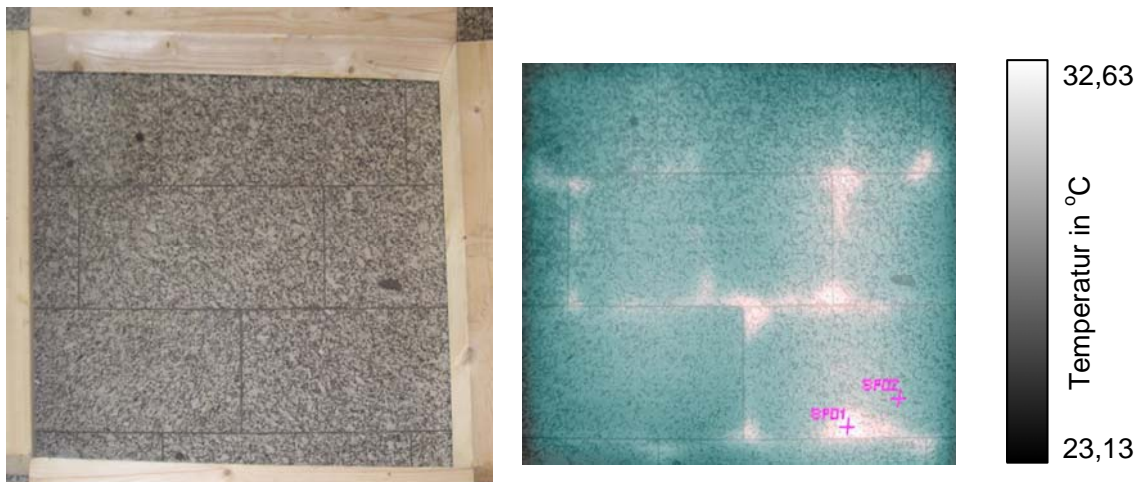


**Bild 9** Links: Messaufbau mit Infrarotkamera und Gerüst zur Abschattung der Sonnenstrahlung zur Ortung von Asphaltablösungen. Rechts: Thermogramm (10:00 Uhr Sommerzeit am 23.6.05) eines 1 x 1 m<sup>2</sup> großen Bereiches auf einer Autobahnbrücke mit Fehlstelle.

Thermogramme wurden zu unterschiedlichen Tageszeiten nach Sonnenaufgang an einem sonnigen Tag im Juni aufgenommen (Bild 9, links). Bild 9 rechts zeigt ein ausgewähltes Thermogramm aufgenommen um 10:00 Uhr bei einer gemessenen Sonneneinstrahlung von  $800 \text{ W/m}^2$ . Deutlich sind mehrere wärmere Bereiche zu erkennen, die auf Fehlstellen und/oder Ablösungen hindeuten. Die größte und wärmste Fehlstelle hat eine Temperaturdifferenz zur Umgebung von  $3,5 \text{ K}$ .

### *Ortung von Fehlstellen unterhalb von Natursteinplatten*

Da sich in einigen Bereichen eines im Mörtelbett verlegten Natursteinbodens (1,5 cm dicke Granitplatten) Platten abgelöst hatten, sollte der gesamte Boden ( $40 \text{ m}^2$ ) im Eingangsbereich eines Geschäftshauses flächendeckend untersucht werden. Die einzelnen Bereiche wurden dazu ca. 3 min mit Infrarotstrahlern in horizontaler Anordnung erwärmt. Das anschließende Abkühlungsverhalten wurde beobachtet und die Thermogramme mit maximalem Temperaturkontrast dargestellt. Bild 10 zeigt auf der linken Seite ein fotografisch entzerrtes Foto eines untersuchten Messbereiches. Das dazu entsprechend entzerrte Thermogramm mit maximalem Temperaturkontrast, überlagert mit dem Digitalfoto zur Darstellung der Fugen, ist im rechten Bild zu erkennen. Ablösungen lassen sich durch einen deutlichen Temperaturkontrast von bis zu  $8 \text{ K}$  erkennen.



**Bild 10** Links: Entzerrtes Digitalfoto eines untersuchten Bereiches (ca.  $1 \times 1 \text{ m}^2$ ) des Natursteinbodens. Rechts: Überlagerung von Thermogramm und Digitalfoto (jeweils fotografisch entzerrt). Fehlstellen unterhalb der Natursteinplatten sind deutlich als wärmere (helle) Gebiete zu erkennen.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Die oben gezeigten Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern und vor Ort am Bauwerk demonstrieren, dass die Impuls-Thermografie sehr gut zur Ortung von Fehlstellen und generell von Inhomogenitäten in Betonstrukturen, Mauerwerk sowie in Mehrschichtsystemen geeignet ist. Die Nachweisbarkeit beschränkt sich jedoch auf Defekte im oberflächennahen Bereich, d. h. auf Betondeckungen von maximal  $10 \text{ cm}$ . Bei großen Defekttiefen müssen lange Messzeiten bis zu  $1,5 \text{ Stunden}$  angesetzt werden, Defekte in Tiefen bis zu  $2 \text{ cm}$  sind jedoch auch schon nach Messzeiten von wenigen Minuten zu orten.

Am Bauwerk wurde das Verfahren bisher nur wenig eingesetzt, da die Möglichkeiten der Methode in der Baupraxis noch unbekannt sind. Die Messapparatur ist jedoch bei entsprechender Stromversorgung auf Baustellen problemlos einsetzbar. Dazu muss die zu untersuchende Bauteiloberfläche zugänglich sein, ein Berühren der Oberfläche ist aber nicht erforderlich. Es können sowohl vertikale als auch horizontale Flächen untersucht werden.

Ohne einen Vergleich der Messdaten mit Kalibrationskurven oder numerischen Simulationen sind quantitative Aussagen nur über die laterale Ausdehnung der Fehlstellen möglich. Weiterhin muss bei der quantitativen Auswertung berücksichtigt werden, dass das Bauteil sich vor dem Messbeginn nicht immer im thermodynamischen Gleichgewicht befindet, z. B. durch das Heizen eines Innenraums bei der Untersuchung einer Außenwand oder durch den Einfluss einer Sonnenbestrahlung vor der Messung.

Aber auch die Sonne selbst kann als aktive Strahlungsquelle für die instationäre Erwärmung der zu untersuchenden Bauteile genutzt werden, wie die Untersuchungen an der Autobahnbrücke zur Ortung von Hohlräumen und Ablösungen unter Asphalt gezeigt haben.

Die Impuls-Thermografie kann sowohl im Rahmen der Qualitätssicherung als auch zur Bauwerkprüfung eingesetzt werden.

## Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes *Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Teil 2*, das in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin bearbeitet wurde (u. a. Fallstudie zur Ortung von Asphaltablösungen), sowie durch das von der EU im 6. Rahmenprogramm geförderte Forschungsprojekt ONSITEFORMASONRY unterstützt.

Wir danken Herrn Uwe Meinhold und den Mitarbeitern des Betonlaboratoriums der BAM-Fachgruppe VII.1 für die Unterstützung bei der Herstellung der Probekörper.

Dr. Matthias Hemmleb hat die Entzerrung der Digitalfotos sowie die Überlagerung von Thermogrammen mit Digitalfotos realisiert.

## Literatur

Ref 1 Wyss, P., Lüthi, T., Primas, R. and Zogmal, O.: Factors affecting the detectability of voids by infrared thermography. In: Proceedings of QIRT 1996, Stuttgart, 1996, Edizioni ETS, Pisa (1997), pp. 227-232.

Ref 2 Vavilov, V., Kauppinen, T. and Grinzato, E.: Thermal characterization of defects in building envelopes using long square pulse and slow thermal wave techniques. In: Research Nondestructive Evaluation 9, New York (1997), pp. 181-200.

Ref 3 Maierhofer, Ch., Brink, A., Röllig, M. and Wiggerhauser, H.: Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the surface near region. Infrared Physics & Technology 43 (2002), pp. 271-278.

Ref 4 Arndt, R., Hillemeier, B., Maierhofer, Ch., Rieck, C., Röllig, M., Scheel, H. und Walter, A.: Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie. Bautechnik 81 (2004) 10, S. 786-793.

Ref 5 Kind, Th. und Maierhofer, Ch.: Das Impulsradarverfahren - ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufklärung in Bauwerken. In: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.3, S. 333-341

Ref 6 Krause, M., Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen. In: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.4, S. 341-352

Ref 7 Wiggerhauser, H., Impact-Echo. in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.6, S. 358-365

Ref 8 Maierhofer, Ch., Wiggerhauser, H., Brink, A. and Röllig, M.: Quantitative numerical analysis of transient IR experiments on buildings, Infrared Physics and Technology 46 (2004) pp. 173-180

Ref 9 Maldague, X. and Marinetti, S.: Pulse Phase Thermography, J. Appl. Phys. Vol. 79, No. 5 (1996), pp. 2694-2698

Ref 10 Weritz, F., Arndt, R., Röllig, M., Maierhofer, Ch. and Wiggerhauser, H., Investigation of concrete structures with pulse phase thermography. Materials and Structures 38/283 (2005), pp. 843-849

Ref 11 Helmerich, R., Maierhofer, Ch., Röllig, M., Arndt, R. and Vielhaber, J., Bond quality survey of loaded RC-beams with CFRP-plate repair using impulse-thermography. In: Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management 16.-19. Juli 2006, Porto, Portugal, in print

Ref 12 Hennen, Ch., Untersuchungen an der Wartburg. In: Tagungsband zum Feuchtetag 2004 mit Workshop ONSITEFORMASONRY, BAM Berlin, 18. und 19. November 2004, Berlin: DGZfP (2004) CD-ROM, Vortrag O3

Ref 13 Maierhofer, Ch., Hamann, M., Hennen, Ch., Knupfer, B., Marchisio, M., da Proto, F., Binda, L. and Zanzi, L., Structural evaluation of historic walls and columns in the Altes Museum in Berlin using non-destructive testing methods. In: Modena, Lourenco and Roca (eds.); Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, 10-13 November 2004, Padova, Italy, pp. 331-341