



# Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen

C. MAIERHOFER, M. RÖLLIG, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

A. HASENSTAB, A. SCHÖNITZ, TÜV Rheinland, LGA Nürnberg

**Kurzfassung.** An industriell vorgefertigten Stahlbeton-Unterzügen wurden nach dem Einbau unter anderem durch Sichtprüfung und Klopftests Verdichtungsmängel festgestellt. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde zunächst ein Konzept zur Ortung dieser und weiterer vermuteter Fehlstellen mittels aktiver Thermografie erstellt. Dieses Messkonzept war die Grundlage weiterführender großflächiger Untersuchungen zur Erfassung des Gesamtzustandes und zur Planung der Instandsetzungsmaßnahmen.

## Einführung

Ziel der Anwendung der Infrarot(IR)-Thermografie im Bauwesen ist es, die im Thermogramm dargestellte Temperaturverteilung auf der Bauwerksoberfläche zur Zustandsanalyse des Bauwerks heranzuziehen. Eine breite Anwendung findet die Bauwerksthermografie im Bereich des Wärmeschutzes. Sie wird aber zunehmend auch für eine Vielzahl von anderen Aufgaben der Bauwerksdiagnostik eingesetzt. Dabei handelt es sich zumeist um das Auffinden und die Beurteilung von unter der Bauwerksoberfläche liegenden Konstruktionselementen, Inhomogenitäten, Defekten und Ablösungen, deren thermische Eigenschaften sich von denen des umgebenden Materials unterscheiden [Ref 1, Ref 2, Ref 3, Ref 4, Ref 5]. Dadurch ändert sich der Wärmefluss in diesen lokalen Bereichen, die sich deshalb in der Temperaturverteilung auf der Bauwerksoberfläche, insbesondere wenn ein instationärer Wärmefluss vorliegt, abzeichnen. Ein instationärer Wärmefluss kann durch sich verändernde Temperaturdifferenzen an der Innen- und Außenseite einer Gebäudehülle, z. B. durch Erwärmung mit Sonnenstrahlung oder durch aktive Erwärmung bzw. Abkühlung, erzeugt werden. Werden zusätzliche Energiequellen genutzt, spricht man von aktiver oder auch Impuls-Thermografie [Ref 6].

Im Bauwesen eignet sich die Impuls-Thermografie für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Ortung von Ablösungen von Oberflächenbeschichtungen (Kohlefaserlaminat (CFK) auf Beton, Putze auf Beton oder Mauerwerk, Fehlstellen in Spritzbetonbeschichtungen, Bitumenbahnen als Beschichtungen von Stahlbrücken)
- Ortung von Hohlstellen in Beton und Mauerwerk (Verdichtungsmängel in Beton, Fehlstellen in sanierten Mauerwerksfugen)

Aufgrund der hohen Nachweisempfindlichkeit in Bauteiltiefen von 0,1 bis 10 cm [Ref 2] ergänzt die Impuls-Thermografie andere erfolgreiche zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen wie Radar, Ultraschall und Impact-Echo, mit denen meist erst ab einer

Bauteiltiefe von 3 bis 10 cm sinnvolle Messergebnisse erzielt werden können. Häufig ist daher eine Verfahrenskombination mit Radar oder Ultraschall sinnvoll [Ref 7].

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Anwendung der aktiven Thermografie zur Ortung von Fehlstellen in industriell vorgefertigten Stahlbeton-Unterzügen in einer Tiefgarage vorgestellt. Nach dem Einbau der Unterzüge wurden u. a. durch Sichtprüfung und Klopfests Verdichtungsmängel festgestellt. Diese Stellen wurden zum Teil geöffnet und anschließend mit Reparaturmörtel verfüllt. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde zunächst aufgezeigt, dass die Fehlstellen in den oberflächennahen Bereichen nahe der äußeren Bewehrungslage mit Hilfe der aktiven Thermografie geortet werden können. Anhand der Ergebnisse wurde ein Konzept zur Ortung dieser und weiterer vermuteter Fehlstellen mittels aktiver Thermografie erstellt. Dieses Messkonzept war die Grundlage weiterführender großflächige Untersuchungen zur Erfassung des Gesamtzustandes und zur Planung der Instandsetzungsmaßnahmen.

## **1 Grundlagen und Anwendung der Aktiven Thermografie im Bauwesen**

Für eine definierte Lagebestimmung von Inhomogenitäten in oberflächennahen Bereichen wurden in den letzten Jahren verschiedene aktive Verfahren der IR-Thermografie entwickelt [Ref 6]: die Lock-In-Thermografie, die Impuls-Thermografie und eine Zusammenführung dieser beiden Verfahren, die Puls-Phasen-Thermografie (PPT). Allen aktiven Verfahren gemeinsam ist die Nutzung einer definierten Energiequelle zur thermischen Anregung eines betrachteten Bauteils.

Bei der in diesem Beitrag vorgestellten Anwendung der Impuls-Thermografie wird die Oberfläche des betrachteten Bauteiles für ein bestimmtes Zeitintervall erwärmt. Der anschließende Abkühlungsvorgang wird bildgebend mit einer IR-Kamera aufgenommen. Dazu wird die zeitliche Veränderung der Oberflächentemperatur als Abfolge von Thermogrammen digitalisiert und gespeichert. Die Daten werden in Temperaturwerte umgerechnet und über die Temperaturdifferenz kann zwischen gestörten und ungestörten Bereichen unterschieden werden. Während der Abkühlung wird der Zeitpunkt des maximalen Kontrastes einer Fehlstelle u. a. durch deren Tiefe (Betonüberdeckung) beeinflusst. In der Regel kann eine Fehlstelle nur dann geortet werden, wenn deren Überdeckung (Tiefe) nicht größer als deren Durchmesser ist.

Bei der PPT werden ähnlich wie bei der Lock-In-Thermografie die durch die einzelnen Detektorelemente des Kameraarrays erfassten Transienten mittels diskreter Fast Fourier Transformation (FFT) ausgewertet [Ref 8, Ref 9, Ref 10, Ref 11]. Wird dies für alle Bildpunkte durchgeführt, entstehen für jede diskrete Frequenz Amplituden- und Phasenbilder. Die Frequenzen können über eine Kalibrierung in eine Tiefenachse umgerechnet werden. Die Phasenbilder stellen im Frequenzraum eine Art Querschnitt durch das betrachtete Bauteil dar – je höher die Frequenz, desto dichter unter der Oberfläche befindet sich das erkennbare Tiefenprofil und umgekehrt. Die Vorteile gegenüber der herkömmlichen Impuls-Thermografie sind ähnlich denen, die aus der Lock-In-Thermografie bekannt sind. Die Einflüsse einer inhomogenen Oberfläche und einer ungleichmäßigen Erwärmung sind in den Phasenbildern deutlich geringer als in den Thermogrammen. U. a. dadurch werden eine erhöhte Nachweisempfindlichkeit der Defektgeometrie und eine bessere Tiefenauflösung erzielt.

## **2 Aufgabenstellung und Durchführung der Messungen**

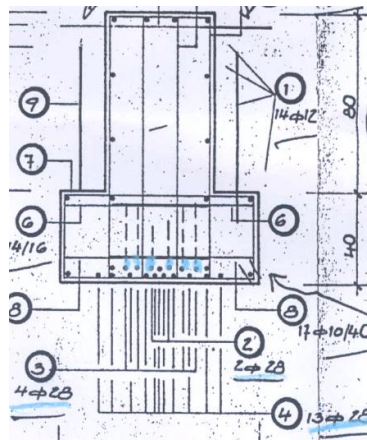
An den Unterzügen einer Tiefgarage wurden durch Sichtprüfung und Klopfests Verdichtungsmängel festgestellt. Nach dem Entfernen der Betondeckung wurden größere

Fehlstellen im Beton im Bereich der unteren Bewehrungslage sichtbar, die vermutlich auf Verdichtungsfehler und falsche Körnung zurückzuführen sind. Abbildung 1 zeigt zwei geöffnete Fehlstellen. Innerhalb der beiden sichtbaren Bewehrungslagen ist kaum Mörtel oder Beton zu erkennen. Ziel der Untersuchung war es festzustellen, in welchem Umfang weitere statisch relevante Fehlstellen vorhanden sind.

Da großflächige Untersuchungen durch Abklopfen der Oberfläche oder durch Entnahme von Bohrkernen sehr aufwendig und nicht immer anwendbar sind, sollten möglichst zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt werden. Aufgrund des hohen Bewehrungsgehaltes (s. Abbildung 2) und der zum Teil nur sehr geringen Überdeckung der Fehlstellen waren Untersuchungen mit Radar oder Ultraschallecho/Impact-Echo nicht möglich. Daher wurde ein entsprechendes Untersuchungskonzept basierend auf der Impuls-Thermografie aufgestellt und durchgeführt.



**Abbildung 1** Zwei geöffnete, oberflächennahe Fehlstellen der untersuchten Messbereiche



**Abbildung 2** Ausschnitt aus dem Bewehrungsplan mit 19 Stabstählen mit einem Durchmesser von jeweils 28 mm im unteren Bereich

### 2.1 Voruntersuchung zur Erstellung eines Messkonzeptes

Voruntersuchungen zum Nachweis der Machbarkeit der Ortung der Fehlstellen mit der Impuls-Thermografie sowie die Erstellung eines Messkonzeptes erfolgten durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Zur Erwärmung der Unterzüge wurden zwei Heraeus MMS 2400 Infrarotstrahler mit jeweils 2400 Watt Leistung verwendet. Mit diesen Strahlern wurde eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  in einem Abstand von 2 cm über einen Zeitraum von 15 min gleichmäßig erwärmt. Das Abkühlungsverhalten dieser Fläche wurde 60 min lang mit einem IR-Kamerasystem, bestehend aus einer IR-Kamera und einem Computersystem zur Echtzeiterfassung der digitalen Bilddaten, aufgenommen. Die hier verwendete IR-Kamera ThermoCAM SC1000

verfügt über ein Focal-Plane-Array (FPA) Detektor bestehend aus 256 x 256 Detektorelementen (PtSi-Schottky-Dioden, Spektralbereich 3,4 bis 5  $\mu\text{m}$ ) und ermöglicht eine Temperaturauflösung von 0,07 K bei 30°C.

Die Auswertung der an insgesamt vier Messfeldern erfassten Thermografiesequenzen erfolgte anhand der Thermogramme sowie der mit Hilfe der PPT ermittelten Amplituden- und Phasenbilder.

## 2.2 Großflächige Untersuchungen

Die großflächigen Untersuchungen von 27 Unterzügen mit insgesamt 140 m Messlänge wurden von der LGA Bautechnik GmbH durchgeführt.

Der Aufbau zur Durchführung der Messungen setzte sich aus einer Erwärmungseinheit, einer IR-Kamera Typ ThermaCAM B640 von FLIR Systems und einem Computersystem zur Erfassung und Bearbeitung der Thermogramme zusammen. Um eine möglichst homogene Erwärmung der zu untersuchenden Bauteiloberfläche zu erreichen, wurden hier sechs Infrarotstrahler des Typs cata BC 1300 mit einer jeweiligen Anschlussleistung von bis zu 1300 W nebeneinander angeordnet (s. Abbildung 3 links). Durch einen fahrbaren Unterbau kann diese Erwärmungseinheit wiederholt gleichmäßig über die Oberfläche bewegt werden. Der Abstand von der Wärmequelle zum Objekt ist variabel und betrug bei den hier durchgeführten Untersuchungen 2 bis 3 cm.

Die IR-Kamera ThermaCAM B640 verfügt über ein Focal-Plane-Array (FPA) Detektor bestehend aus 640 x 480 Detektorelementen (ungekühlter Mikrobolometer, Spektralbereich 7,5 bis 13  $\mu\text{m}$ ) und ermöglicht eine Temperaturauflösung von 0,06 K bei 30°C (s. Abbildung 3 rechts). Zusätzlich ist in das System eine digitale Kamera integriert. Je nach Kameraabstand und Objektiv können unterschiedlich große Flächen aufgenommen werden. Die durchschnittlich erfassten Bereiche haben eine Kantenlänge von 1,5 bis 1,7 m.



**Abbildung 3** Erwärmungseinheit (links) und IR-Kamera mit angeschlossenen Messrechner (rechts) zur Durchführung der großflächigen Messungen (LGA Bautechnik GmbH)

Die Korrektur der atmosphärischen Transmission erfolgte durch die Eingabe der Atmosphären- und Umgebungstemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und des Kameraabstandes zum Bauteil. Vor jeder Messung wurden die relative Luftfeuchte, die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur des Unterzuges gemessen und erfasst. Im Anschluss wurde der Unterzug für ca. 20 min gleichmäßig mittels IR-Strahler erwärmt.

Danach erfolgte die Aufnahme der Thermogramme zur Erfassung des Abkühlverhaltens mit einer Bildwiederholrate von 0,1 Hz. Beobachtet wurde über einen Zeitraum von 40 bis 70 min, bis vorher festgelegte Abbruchkriterien, wie z. B. bestimmte Temperaturdifferenzen, erreicht wurden.

Zur Vorbereitung der Messungen wurden die Unterzüge in den vier Hauptachsen in Abschnitte von 1 m Länge unterteilt und markiert. Nach dem Markieren der zu untersuchenden Bereiche wurden diese zusätzlich fotografiert.

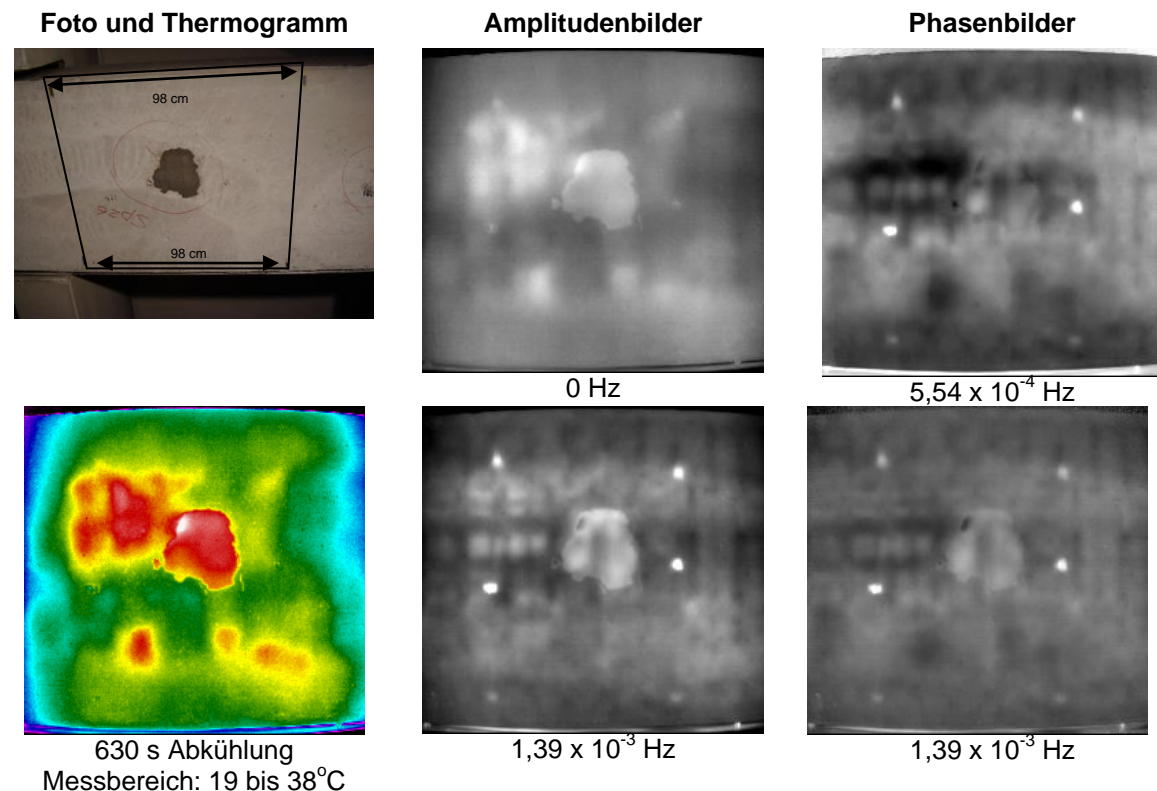
### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ergebnisse der Voruntersuchung

Im Folgenden werden die Ergebnisse von zwei der vier untersuchten Messstellen vorgestellt. Die Darstellungen umfassen jeweils ein Foto der Messstelle, ein ausgewähltes Thermogramm sowie Amplituden- und Phasenbilder bei jeweils zwei unterschiedlichen Frequenzen.

In Abbildung 4 ist im Foto der **Messfläche 1** eine Ausbesserung mit Reparaturmörtel gut erkennbar. Die folgenden Fragestellungen sollten hier beantwortet werden:

- Füllt der Reparaturmörtel die gesamte Fehlstelle?
- Sind weitere, nicht durch Abklopfen ermittelbare Fehlstellen vorhanden/detektierbar?
- Haben die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Betons und des Reparaturmörtels einen Einfluss auf die Messung?

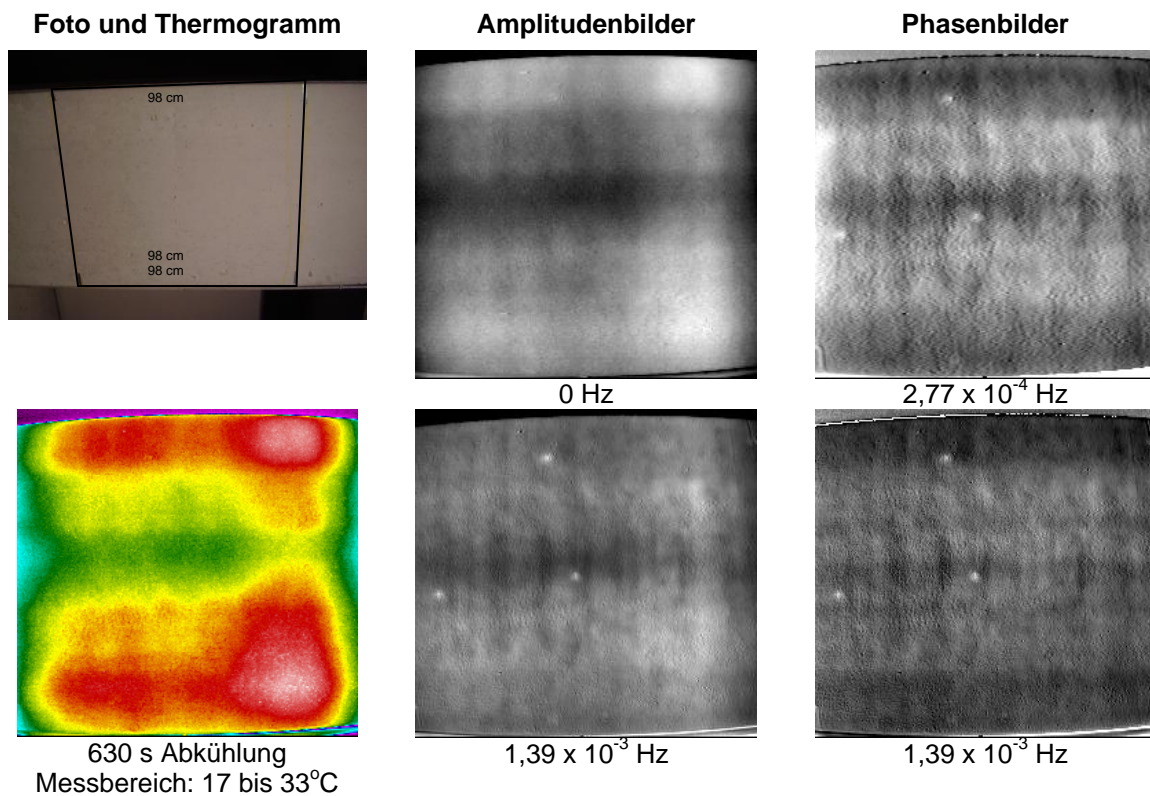


**Abbildung 4** Foto, Thermogramm und Amplituden- und Phasenbilder eines ca. 1 m<sup>2</sup> großen Messbereiches mit Fehlstelle nach 15 min Erwärmung mit IR-Strahlern

Im Thermogramm in Abbildung 4 ist diese Reparaturstelle als Bereich mit deutlich erhöhter Oberflächentemperatur erkennbar. Dies lässt vermuten, dass der Reparaturmörtel nicht das gesamte Volumen der Fehlstelle ausfüllt. Weitere Bereiche mit erhöhter Oberflächentemperatur weisen auf zusätzliche Fehlstellen hin, die noch nicht durch Abklopfen detektiert wurden. Einzelne, sehr kleine Flächen höherer Temperatur zeigen oberflächennahe Abstandshalter an.

In den Amplitudenbildern bei 0 Hz und  $1,39 \times 10^{-3}$  Hz sind die Fehlstellen als helle Bereiche, insbesondere bei 0 Hz, sehr gut zu erkennen. Zusätzlich zu den Informationen in den Thermogrammen sind in den Amplitudenbildern auch Teile der Bewehrung als dunkle Streifen sichtbar (besonders deutlich bei  $1,39 \times 10^{-3}$  Hz).

In den Phasenbildern erscheinen die Fehlstellen als dunkle Bereiche. Auch hier tritt der größere Kontrast bei der niedrigeren Frequenz auf. Der Einfluss der zur Umgebung veränderten Oberflächeneigenschaften des Reparaturmörtels ist in den Phasenbildern fast nicht mehr zu erkennen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Reparaturmörtel zwar eine ähnliche Temperaturleitfähigkeit wie der umgebende Beton hat, aber eine andere Emissivität auf der Oberfläche aufweist. Da hier unterhalb des Reparaturmörtels ebenfalls ein dunklerer Bereich vorhanden ist, ist auch dies ein Hinweis darauf, dass die Fehlstelle mit dem Reparaturmörtel nicht vollständig verfüllt wurde.



**Abbildung 5** Foto, Thermogramm und Amplituden- und Phasenbilder eines ca.  $1 \text{ m}^2$  großen Messbereiches ohne Fehlstelle (Referenzbereich) nach 15 min Erwärmung mit IR-Strahlern

Das Foto der **Messfläche 2** ist in Abbildung 5 dargestellt. Es war durch Abklopfen keine Fehlstelle auffindbar, daher wurde dieser Bereich als Referenzmessfläche herangezogen. Hier stellten sich die folgenden Fragen:

- Zeigt sich ein erkennbares anderes Temperaturabklingverhalten als in den Bereichen mit Fehlstellen?
- Sind weitere, nicht durch Abklopfen ermittelbare Fehlstellen vorhanden/detektierbar?

Ein Thermogramm des Messfeldes 2 ist in Abbildung 5 dargestellt. Es sind keine Temperaturerhöhungen, die auf Fehlstellen zurückgeführt werden könnten, erkennbar. Die in der rechten Hälfte beobachtete Temperaturerhöhung ist durch einen kurzfristigen Stillstand der Strahlungseinheit bei der Erwärmung entstanden. Die weiteren Strukturen im Thermogramm wurden wahrscheinlich durch die Bewehrung verursacht.

In den Amplitudenbildern der Messreihe sind die Bewehrungsstäbe als dunkle schmale Streifen erkennbar. Der in beiden Bildern in der Mitte vorhandene breite horizontale dunkle Streifen deutet auf eine besonders hohe Bewehrungsdichte hin. Auch hier sind wieder die Positionen der Abstandshalter als helle Flecken zu sehen. Deutliche Fehlstellen wie an der Messstelle 1 sind nicht vorhanden.

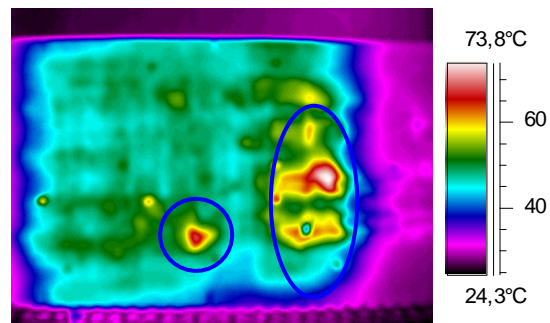
Auch in den Phasenbildern sind keine eindeutigen Fehlstellen detektierbar. In beiden Phasenbildern sind die Bewehrungsstäbe als helle bzw. dunkle Streifen und die Abstandshalter als helle Flecken vorhanden.

### 3.2 Ergebnisse der großflächigen Untersuchung mit zeitoptimiertem Messkonzept

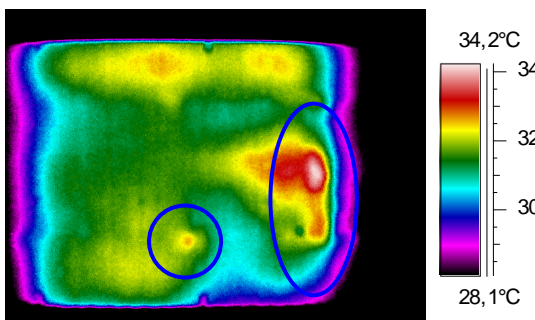
Die hier exemplarisch aufgezeigten Ergebnisse sind in der unten stehenden Abbildung 6 dargestellt.



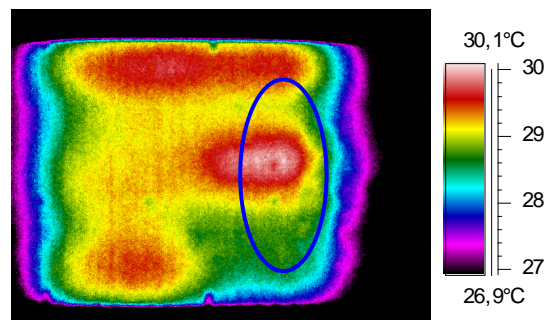
Digitalbild,  
Schadstellen rot markiert



Thermogramm kurz nach der Erwärmung,  
Hohlstellen blau markiert



Thermogramm nach 20 min Abkühlung



Thermogramm nach 60 min Abkühlung

**Abbildung 6** Exemplarisches Ergebnis eines Ausschnittes der großflächigen Untersuchungen

Im Foto erkennt man deutlich eine Stelle mit abgeschlagenem Beton und sichtbarer Bewehrung. In den dargestellten Thermogrammen, die nach unterschiedlichen Abkühlungszeiten aufgenommen wurden, ist diese Stelle als deutlich wärmere (rote bzw. weiße) Fläche zu sehen. In allen nachfolgenden Thermogrammen ist eine tiefere Fehlstelle weiterhin als rote bzw. weiße Fläche sichtbar. Diese ist vermutlich mit den Fehlstellen im oberflächennahen Bereich verbunden. Zusätzlich befindet sich eine weitere Fehlstelle unterhalb der aufgeschlagenen Stelle. Die weiteren Strukturen im Thermogramm wurden durch die Heizstäbe der Erwärmungseinheit und durch im Unterzug vorhandene Bewehrung und Abstandshalter verursacht.

#### **4 Messstrategie für effektive großflächige Untersuchungen**

Die gesuchten Fehlstellen sind in den unbearbeiteten Thermogrammen, die mit der zur IR-Kamera mitgelieferten kommerziellen Software dargestellt wurden, klar zu erkennen. Der Temperaturkontrast einer gestörten Stelle zur ungestörten Umgebung beträgt in einigen Fällen bis zu 15 K. Weitere wissenschaftliche Auswertungen mit an der BAM entwickelten Programmen sind für die bearbeitete Fragestellung nicht notwendig. Das Abkühlverhalten und der hohe Temperaturkontrast der untersuchten Flächen lassen eine Untersuchung mit einer Aufnahmefrequenz von nur 0,1 Hz und weniger zu. Des Weiteren sind die Anforderungen an das IR-Kamerasystem gering. Es genügt ein Kamerasystem, wie es in der Baupraxis üblich ist.

Um eine insgesamt größere Fläche zu untersuchen, können Messflächen auch parallel vermessen werden. Das ist durch nacheinander erwärmte Flächen und darauf abgestimmte alternierende Aufnahmen der Thermogramme zu festen Zeiten, möglichst kurz nach der Erwärmung, möglich. Eine 15-minütige Erwärmung sowie die Beobachtung des Abkühlvorgangs für die Dauer von einer Stunde und weniger ermöglichen in den Thermogrammen neben der Ortung flacher Fehlstellen, die bereits nach dem Abschalten der Wärmequelle zu erkennen sind, auch die Detektion tieferer Fehlstellen, die erst nach längerem Abkühlen sichtbar werden.

#### **Referenzen**

Ref 1 Maierhofer, Ch., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Wather, A., Scheel, H. and B. Hillemeier: Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 4, pp. 393-401

Ref 2 Maierhofer, Ch., Arndt, R. and Röllig, M.: Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. *Infrared Physics & Technology* 49 (2007) 3, pp. 213-217

Ref 3 Arndt, R., Maierhofer, Ch. and Röllig, M.: Quantitative Pulse-Phase-Thermography for Masonry and Concrete Structures. In: *Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006*, Berlin: DGZfP, BB 103-CD

Ref 4 Grinzato, E., Luprano, V.A.M., Marinetti, S., Bison, P.G., Trentin, R., Tundo, A. and Tatì, A.: Thermal NdE of FRP applied to civil structures. *Proceedings of 8<sup>th</sup> Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, June 2006, Padova, Italy, No. 075

Ref 5 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 6 Maldague, X. P. V.: *Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing*. John Wiley and Sons, 2001, 684 p.

Ref 7 Maierhofer, Ch., Arndt, R., Borchardt, K., Hasenstab, A., Röllig, M. and J. Wöstmann, Structural assessment with radar and active thermography. In: Radic, J., Rajcic, V., Zarnic, R. {(eds.);} *Proceedings of*



the International Conference Cultural Heritage, The Construction Aspects of the Heritage Protection, Dubrovnik, Croatia, 14-17 October 2006, pp. 77-85

Ref 8 Busse, G.: Non-destructive Evaluation of polymer materials. NDT & E International Vol. 27, No. 5, 1994, pp. 253-262

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

Ref 10 Ibarra-Castanedo, C. and Maldague, X.: Pulsed phase thermography reviewed. QIRT Journal Vol. 1, No. 1, 2004, pp. 47-70

Ref 11 Arndt, R., Maierhofer, Ch. and Röllig, M.: Quantitative Pulse-Phase-Thermography for Masonry and Concrete Structures. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD