

Untersuchung von Betonstrukturen mit der Puls-Phasen-Thermografie

Ch. Maierhofer, R. Arndt, M. Röllig, F. Weritz, und H. Wiggenhauser

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Tel.: +49 (0)30 8104 1441, Fax: +49 (0)30 8104 1447
e-mail: christiane.maierhofer@bam.de

Schlüsselwörter: Puls-Phasen-Thermografie, Impuls-Thermografie, aktive Thermografie, Zerstörungsfreie Prüfung, Bauingenieurwesen, Beton, Spaltklinker, Fehlstellen

Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens wird in der BAM die Anwendung der Puls-Phasen-Thermografie als Erweiterung der Impuls-Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen untersucht. Hierzu wurden Messungen des Abkühlungsvorgangs nach aktiver Erwärmung mit einer Strahlungsquelle an Betonprobekörpern mit unterschiedlichen praxisrelevanten Fragestellungen durchgeführt und im Frequenzbereich ausgewertet. Die Vorteile der Puls-Phasen-Thermografie im Gegensatz zu Auswertungen im Zeitbereich sind die Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit der Fehlstellen, die Reduzierung des Einflusses von Oberflächeninhomogenitäten und ungleichmäßiger Erwärmung sowie die Möglichkeit einer quantitativen Bestimmung der Betondeckung.

Einführung

In vielen Bereichen der zerstörungsfreien Prüfung wird die Puls-Phasen-Thermografie (PPT) bereits seit Jahren erfolgreich zur Ortung von Defekten und Inhomogenitäten eingesetzt. Anwendungsbereiche sind z. B. die Ortung von durch äußere mechanische Einflüsse verursachten Defekten in kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) [1] und von Defekten in Aluminium und Kunststoffen [2]. Die Anwendung dieses Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen zur Ortung von Fehlstellen und Einschlüssen im oberflächennahen Bereich erscheint daher sehr vielversprechend, Veröffentlichungen hierzu sind bisher jedoch nicht bekannt. Im Gegensatz zu bisherigen Anwendungen haben die Materialien im Bauwesen deutlich geringere thermische Leitfähigkeiten, sind inhomogener und die zu ortenden Fehlstellen liegen meist tiefer. Es ist daher mit wesentlich längeren Erwärmungszeiten zu rechnen, d. h. die Inhomogenitäten erscheinen in der PPT Auswertung entsprechend bei geringeren Frequenzen.

Als Erweiterung zur Impuls-Thermografie [2, 3] wird bei der PPT das beobachtete Abkühlungsverhalten eines Testkörpers nach impulsartiger Anregung einer Frequenzanalyse unterzogen. Versuchsaufbau und Durchführung bleiben dabei gleich. Da die Transienten eines jeden Bildpunktes transformiert werden, entstehen

frequenzabhängige Amplituden- und Phasenbilder. Diese können nun vergleichbar zur Lock-In-Thermografie [4] ausgewertet werden. Die Vorteile sind ähnlich:

- Inhomogenitäten in größeren Tiefen können detektiert werden. Für die Lock-in-Thermografie wurde nachgewiesen, dass Phasenbilder Aussagen bis ungefähr zur doppelten Tiefe zulassen als die entsprechenden Amplitudenbilder [4] bzw. die Darstellung der Thermogramme im Zeitbereich.
- Geringerer Einfluss von Oberflächeninhomogenitäten wie Verunreinigungen, unterschiedliche Emissivitäten und inhomogene Erwärmung verglichen mit thermischen Bildern und den Amplitudenbildern [4]
- Kontrastreichere Abbildung der Defektgeometrie, geringeres Rauschen und damit erhöhte Nachweisempfindlichkeit von Defekten [3, 4, 5]
- Es ist nicht erforderlich, vorab die Position eines defektfreien Bereichs zu kennen. Eine solches a-priori Wissen ist jedoch notwendig für die Berechnung von Kontrastbildern bei der Impuls-Thermografie.

Zum weiteren Verständnis der PPT kann man sich vorstellen, dass die Amplitudenbilder von hohen zu niedrigen Frequenzen die aufsummierte interne Struktur eines Probekörpers (Leistungsverteilung) bis zu einer maximal erreichbaren Tiefe, die vom Frequenzspektrum des Anregungsimpulses abhängt (Tiefpassfilter-Verhalten), wiedergeben. Bei niedrigen Frequenzen sind also neben tieferliegenden Fehlstellen auch die flacheren sowie die Oberflächeninhomogenitäten zu erkennen. Phasenbilder zeigen die interne Struktur in einem bestimmten Tiefenbereich (Verteilung der Phase, hängt mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des thermischen Impulses zusammen) in Abhängigkeit von der Frequenz (Bandpassfilter-Verhalten) [2, 3, 5]. Bei niedrigen Frequenzen sind somit keine Einflüsse mehr von Oberflächeninhomogenitäten zu erkennen und die flachen Fehlstellen werden zumindest schwächer dargestellt.

Die Erwärmung kann in guter Näherung mit einem rechteckförmigen Impuls beschrieben werden. Die Frequenzanalyse zeigt, dass dabei der Großteil der Energie in den niedrigen Frequenzen enthalten ist. Je länger die Dauer des Impulses ist umso geringer ist die Frequenz der Wärmewellen und umso tiefere Strukturen können untersucht werden. Bei einer Erwärmungszeit von 60 Minuten können in Beton Eindringtiefen bis mindestens 15 cm erreicht werden [6].

In der BAM wurde die Impuls-Thermografie bisher zur Ortung folgender Inhomogenitäten in Bauteilen eingesetzt [6, 7, 8, 9]:

- Hohlstellen und Kiesnester in Beton bis zu einer Betondeckung von 10 cm
- Hohlstellen und Ablösungen von Beschichtungen (z. B. CFK-Lamine auf Beton, Putz auf Beton oder Mauerwerk)
- Fehlstellen und Ablösungen hinter Spaltklinkern (Auskleidung von Tunnelinnenwänden)
- Unverfüllte Fugen in Mauerwerk
- Erhöhte Feuchtigkeit im oberflächennahen Bereich

Im folgenden werden Auswertungen dieser Messungen mit der PPT an einem Betonprobekörper mit Polystyrolfehlstellen sowie an einem Betonprobekörper mit Fehlstellen hinter im Mörtelbett verlegten Spaltklinkern demonstriert.

Versuchsaufbau

Der experimentelle Aufbau der Impuls-Thermografie und damit auch der PPT bestehend aus einer Erwärmungseinheit, einer Infrarotkamera und einem Computersystem zur Echtzeiterfassung der Thermogramme ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die thermische Erwärmungseinheit setzt sich aus drei einzelnen Infrarot-Heizstrahlern mit einer elektrischen Anschlussleistung von je 2400 W zusammen. Diese sind linienförmig zueinander angeordnet und können senkrecht zur Anordnung gleichmäßig über die zu erwärmende Oberfläche bewegt werden. Der Abstand der Erwärmungseinheit zur Oberfläche ist variabel. Für die Messungen wurde eine Entfernung von 15 cm gewählt.

Der Wärmepuls, der auf die Oberfläche des zu untersuchenden Probekörpers aufgebracht wird, verursacht einen instationären Wärmefluss in den Probekörper hinein [10]. Die Ausbreitung der Wärme innerhalb des Probekörpers ist abhängig von den thermischen Materialparametern Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifische Wärmekapazität (c_p) und Rohdichte (ρ). Nur für ein homogenes Material ist auch die Ausbreitung der Wärme homogen. Falls innerhalb des Probekörpers Inhomogenitäten auftreten, deren thermischen Materialeigenschaften sich von denen der Umgebung unterscheiden, ändert sich der Wärmefluss in einem lokalen Bereich. Während die zeitlichen Veränderungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche mit einer Infrarot-Kamera betrachtet werden, können demzufolge oberflächennahe Inhomogenitäten geortet werden, sofern sie aufgrund des veränderten Wärmeflusses einen messbaren Temperaturunterschied auf der Oberfläche verursachen.

Der Abkühlungsprozess wird mit einer Infrarot-Kamera (Inframetrics SC 1000) betrachtet, welche senkrecht und mittig auf die Oberfläche des Probekörpers ausgerichtet ist. Sie hat einen Abstand zum Probekörper von ca. 2,80 m, so dass mit einem 32°-Weitwinkelobjektiv die gesamte Oberfläche (1,5 x 1,5 m²) beobachtet werden kann. Die Kamera nimmt die von der Oberfläche emittierte Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 3 bis 5 μm auf. Sie hat in der Brennebene eine Diodenanordnung von 256 x 256 Detektoren, von denen jeder die Strahlungsintensität an einem bestimmten Ort misst. In der Kamera werden die Strahlungsintensitäten in Temperaturwerte umgerechnet. Diese können dann zusammengesetzt auf einem Monitor als Schwarzweiß- oder Falschfarbenbilder ausgegeben werden.

Gleichzeitig werden die thermischen Bilddaten mit einer Frequenz von maximal 50 Hz und einer Amplitudendynamik von 12 Bit auf einen Computer übertragen und dort gespeichert. Nach der Aufzeichnung des Abkühlvorganges können die thermischen Daten mit Hilfe geeigneter Software analysiert werden.



Abbildung 1: Experimenteller Versuchsaufbau für die Impuls-Thermografie und die PPT.

Probekörper

Betonprobekörper mit Hohlstellen

Um die Nachweisbarkeit von Hohlstellen im Beton mit Hilfe der Impuls-Thermografie zu untersuchen, wurde in einer Holzschalung ein Probekörper aus Beton mit den Abmaßen $150 \times 150 \times 50 \text{ cm}^3$ hergestellt. In diesen Probekörper wurden acht Fehlstellen aus Polystyrol-Hartschaum, jeweils vier $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ bzw. $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ groß, in unterschiedlichen Tiefen eingebracht. Eine schematische Skizze des Probekörpers und der Fehlstellen ist in Abbildung 2 links dargestellt. Die in der Skizze angegebenen Tiefen der Fehlstellen stellen die Sollwerte der Betonüberdeckung dar. Der Probekörper wurde nach 28 Tagen ausgeschalt. Die thermografischen Messungen fanden ein Jahr nach der Herstellung statt.

An dem Probekörper wurden sechs Messreihen mit unterschiedlichen Erwärmungszeiten von 5, 10, 15, 30, 45 und 60 Minuten durchgeführt. Für jede Messreihe wurde für die Dauer von zwei Stunden der Abkühlungsprozess beobachtet und alle 0,5 Sekunden ein Thermogramm aufgenommen. Die auf diese Weise erhaltene Filmsequenz aus 14400 Bildern wurde während der Datenanalyse durch Mittlung von jeweils 10 Bildern zur Reduzierung des Rauschens auf 1440 Bilder verkleinert.

Betonprobekörper mit Spaltklinkern

Auf die Oberfläche eines unbewehrten Betonprobekörpers mit den Maßen $150 \times 150 \times 150 \text{ cm}^3$ wurden Spaltklinker, wie sie zur Auskleidung von Tunneln verwendet werden, in einem ca. 20 mm dicken Mörtelbett verlegt (Abbildung 2 rechts). Die Spaltklinker sind 8 bis 10 mm dick und haben eine geriffelte Unterseite, um einen guten Haftverbund zum Mörtel zu gewährleisten. In dieses aus drei

Schichten bestehende System (Spaltklinker, Mörtel, Beton) wurden Ablösungen zwischen Spaltklinkern und Mörtel (Fehlstellen Nr. 1 bis 9 in Abbildung 2 rechts, Einbautiefe 8 bis 10 mm) sowie zwischen Mörtel und Beton (Fehlstellen Nr. 10 bis 12, Einbautiefe ca. 30 mm) eingebaut. Die Messungen wurden wie oben beschrieben durchgeführt, die Erwärmungszeiten wurden jedoch auf 3, 6 und 12 Minuten beschränkt.

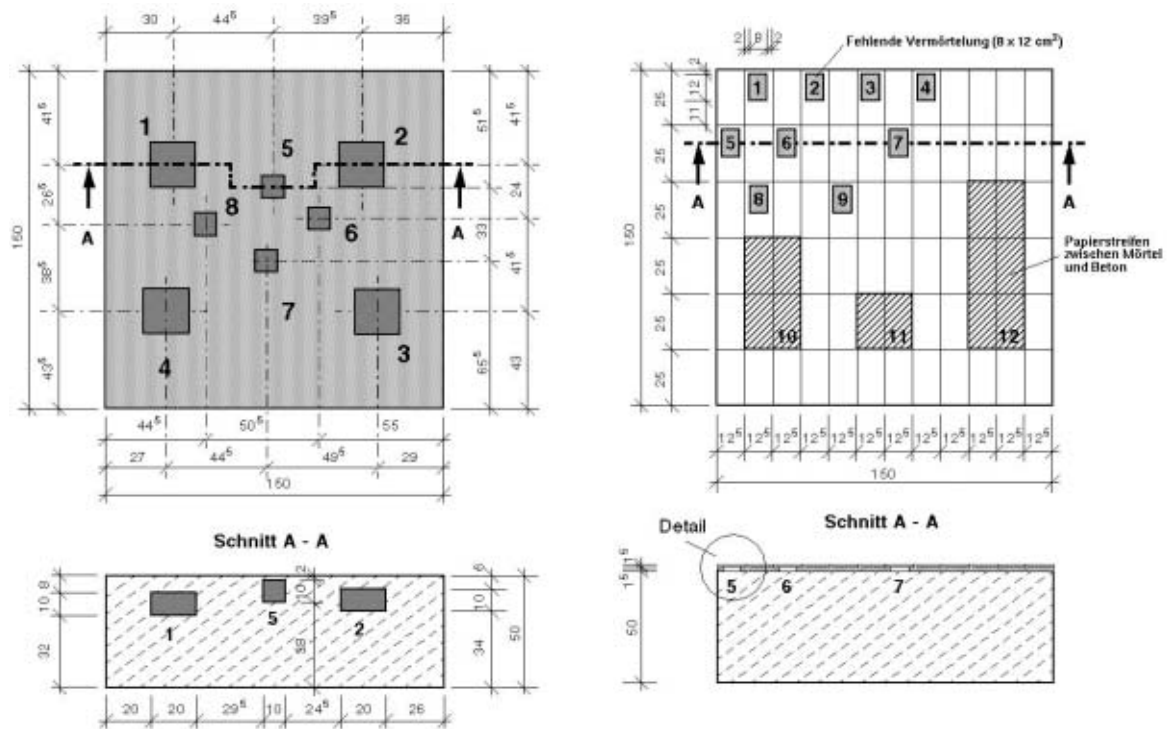


Abbildung 2: Links: Probekörper aus Beton mit Fehlstellen aus Polystyrol-Hartschaum in unterschiedlichen Solltiefen und zwei verschiedenen Größen (Maßzahlen in cm). Nr. 3 und 4 haben Solltiefen von 4 und 2 cm. Rechts: Probekörper mit Spaltklinkern im Mörtelbett; Fehlstellen Nr. 1 bis 9: fehlender Mörtel; Fehlstellen Nr. 10 bis 12: Papierstreifen zwischen Mörtel und Beton.

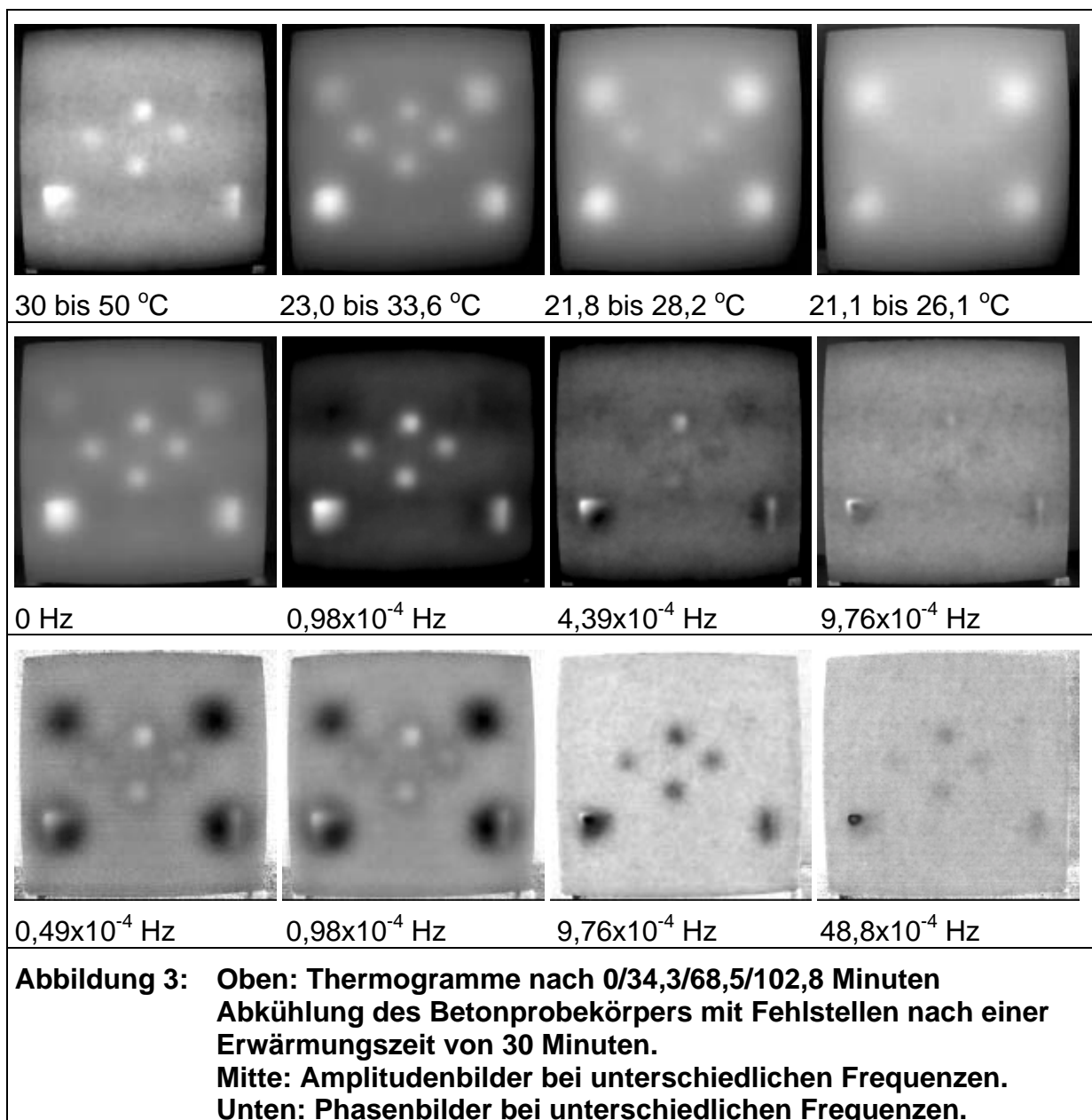
PPT Auswertung und Ergebnisse

Betonprobekörper mit Fehlstellen

In Abbildung 3 oben sind vier Thermogramme nach unterschiedlichen Abkühlzeiten von 0 bis 100 Minuten des Betonprobekörpers mit Hohlstellen nach einer Erwärmungszeit von 30 Minuten dargestellt. Die Grauwerte wurden jeweils auf Temperaturmaximum (weiß) und -minimum (schwarz) auf dem Probekörper skaliert. Bereits direkt nach der Erwärmung sind die oberflächennahen Fehlstellen Nr. 3 und 4 und Nr. 5 bis 8 in Tiefen von 1 bis 4 cm zu erkennen, während die tieferen Fehlstellen Nr. 1 und 2 erst nach 30 Minuten nachzuweisen sind. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fehlstellen Nr. 3 und 4 unbeabsichtigt schief eingebaut wurden.

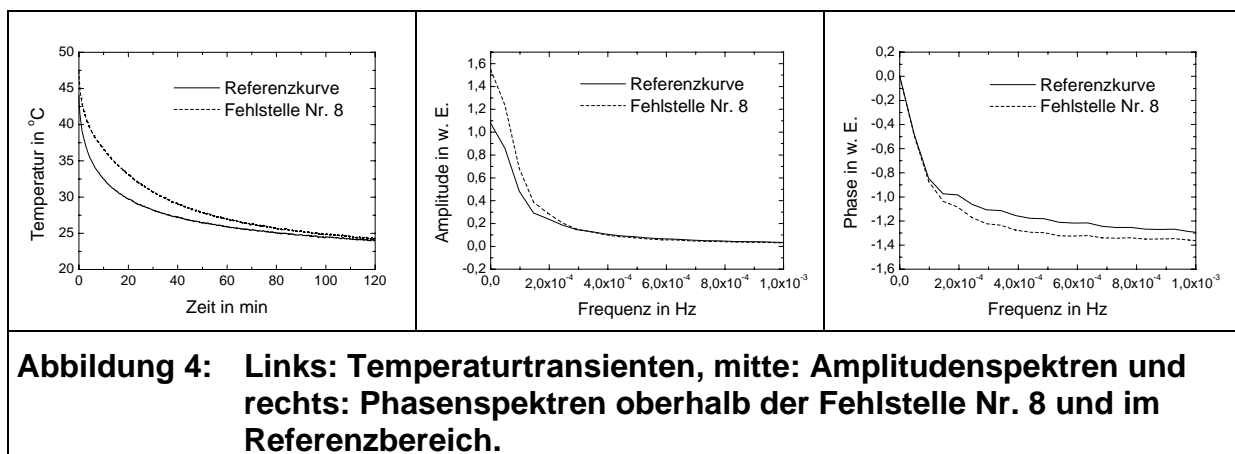
Der Temperaturverlauf (Transiente) oberhalb der Fehlstelle Nr. 8 und einem daneben liegenden Messpunkt in einem Referenzbereich sind in Abbildung 4 links dargestellt. Oberhalb der Fehlstelle ist die Temperatur direkt nach der Erwärmung deutlich höher als im Referenzbereich und nimmt zunächst langsamer ab.

Von den Temperaturtransienten sämtlicher Oberflächenpunkte wurden nun diskrete Fourier-Transformationen (FFT) berechnet. Dazu wurde zunächst der konstante Temperaturoffset (Temperatur nach maximaler Beobachtungszeit, im Idealfall ist dies die Raumtemperatur) abgezogen. Die Frequenzauflösung wurde durch Zeropadding (siehe z. B. [11], Erweiterung des Datensatzes auf 4196 Punkte mit Nullen) erhöht. Abbildung 4 mitte bzw. Abbildung 4 rechts zeigen Amplituden- und Phasenspektrum über der Fehlstelle Nr. 8 bzw. im Referenzbereich. Sowohl Amplituden- als auch Phasenspektrum unterscheiden sich insbesondere im niederfrequenten Bereich deutlich, wobei im Phasenspektrum erst ab 2×10^{-4} Hz ein Kontrast zu erkennen ist.



Amplitude und Phase für Frequenzen von 0 bis 50×10^{-4} Hz sind bildgebend in Abbildung 3 mitte und Abbildung 3 unten für alle Oberflächenpunkte zusammengefasst. Auch hier wurden die Grauwerte auf Maximum (weiß) und Minimum (schwarz) von Amplitude und Phase im Bereich der Probekörperoberfläche skaliert. Bei niedrigen Frequenzen sind sowohl in den Amplituden- als auch in den Phasenbildern alle Fehlstellen zu erkennen. Mit zunehmender Frequenz sind nur noch die flachen Fehlstellen sichtbar, wobei diese in den Phasenbildern bei deutlich höheren Frequenzen als in den Amplitudenbildern zu beobachten sind.

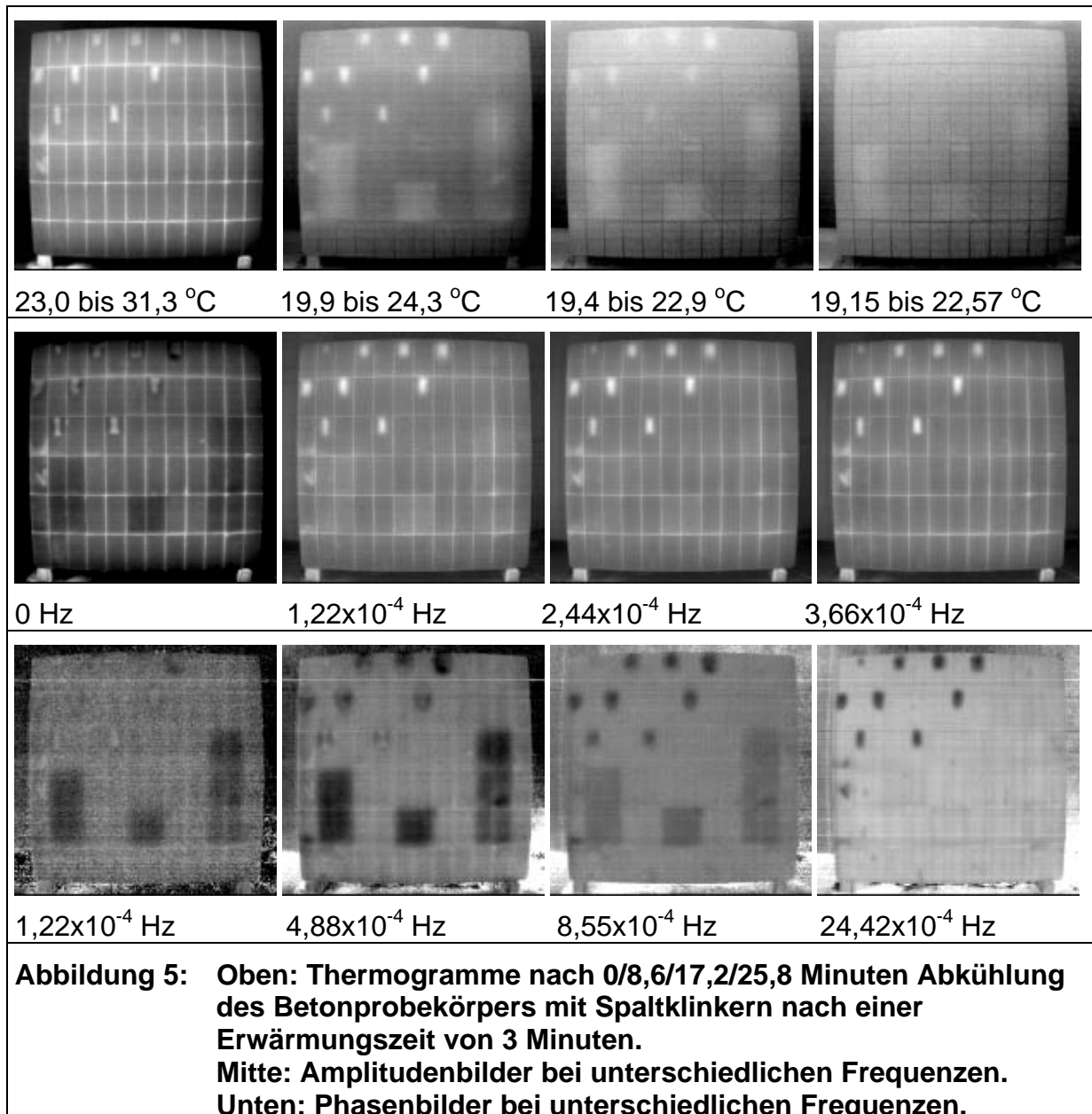
Die tiefen Fehlstellen Nr. 1 und 2 sind in den Phasenbildern wesentlich besser zu erkennen als in den Amplitudenbildern und auch besser als in den oben dargestellten Thermogrammen. Auch treten in den Phasenbildern keine Streifen durch inhomogene Erwärmung auf wie im Thermogramm nach 0 Minuten Abkühlung und wie in den Amplitudenbildern.



Betonprobekörper mit Spaltklinker

Die Thermogramme nach unterschiedlichen Abkühlzeiten von 0 bis 25 Minuten nach 3 minütiger Erwärmung sind in Abbildung 5 oben dargestellt. Die flacheren Fehlstellen Nr. 1 bis 9 sind sofort nach dem Abschalten der Strahlungsquelle zu erkennen, die tieferen Fehlstellen Nr. 10 bis 12 erscheinen erst nach 8 Minuten.

Die zugehörigen Amplituden- und Phasenbilder für verschiedene Frequenzen sind darunter zu sehen (Abbildung 5 mitte und unten). Bei niedrigen Frequenzen sind nur die tief liegenden Fehlstellen Nr. 10 bis 12 deutlich zu erkennen, während die flacheren Fehlstellen erst mit zunehmender Frequenz erscheinen. Die tiefen Fehlstellen zeichnen sich in den Phasenbildern wesentlich kontrastreicher ab als in den Amplitudenbildern und in den Thermogrammen. Während die Fugen in den Amplitudenbildern sehr deutlich sind, sind sie in den Phasenbildern nur sehr schwach zu sehen.



Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung der Puls-Phasen-Thermografie im Bauwesen als Ergänzung zur Impuls-Thermografie ist sinnvoll zur Verbesserung des Nachweises der Fehlstellen, da diese häufig mit besserem Kontrast dargestellt werden können. Insbesondere die Phasenbilder zeigen nur geringe Einflüsse der Oberflächeninhomogenitäten (Fugen, inhomogene Erwärmung). Dadurch werden Einschränkungen durch inhomogene Oberflächen und/oder inhomogene Erwärmung zum Teil aufgehoben und der Anwendungsbereich der Impuls-Thermografie erweitert.

Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Frequenz, bei der die Fehlstellen in den Phasenbildern erscheinen, und deren Einbautiefe. Kalibrationsmessungen ermöglichen so zukünftig eine quantitative Abschätzung der Einbautiefe der Fehlstellen. Mit Hilfe der Phasenbilder können Informationen aus größerer Tiefe mit besserem Kontrast als in den Amplitudenbildern dargestellt

werden, d. h. tiefer liegende Fehlstellen sind in den Phasenbildern besser zu erkennen.

Im Rahmen des DFG Projektes werden weitere systematische Untersuchungen durchgeführt, z. B. Ortung von Ablösungen kohlefaserverstärkter Lamine auf Beton, Putzdickenbestimmung und die Bestimmung von Fehlstellengeometrien. Außerdem wird der Einfluss von Bewehrung, Feuchte und von unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften auf die Ortung von Fehlstellen untersucht.

Danksagung

Die präsentierte Arbeit wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Projektes „Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksflächen mit der Impuls-Thermografie, Teil 2“ (Ma 2512) unterstützt.

Referenzen

- [1] Vavilov, V., Marinetti, S., Grinzato, E. and Bison, P. G.: Thermal tomography, characterization and pulse phase thermography of impact damage in CFRP, SPIE Vol. 3361, 1998, pp. 275-281.
- [2] Maldague, X. and Couturier, J.-P.: Review of pulsed phase thermography, Invited Lecture, 15./16. Sept. 1997, Florence, Italy, L. R. Abozzo, G. M. Carlomagno, C. Corsi, eds., Atti della Fondazione G. Ronchi, Firenze, 53, [1], 1997, pp. 271-286.
- [3] Maldague, X. and Marinetti, S.: Pulse Phase Thermography, J. Appl. Phys. Vol. 79, No. 5, 1996, pp. 2694-2698.
- [4] Wu, D., Wu, C. Y. and Busse, G.: Investigation of resolution in lock-in thermography: theory and experiment, in: Proceedings of QIRT 1996, Pisa: Edizioni ETS (1997) pp. 269-274.
- [5] Vavilov, V. and Marinetti, S.: Thermal Methods Pulsed Phase Thermography and Fourier-Analysis Thermal Tomography, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 35, No. 2, 1999, pp. 134-145.
- [6] Brink, A., Maierhofer, C., Röllig, M. und Wiggerhauser, H.: Auswertungsmethoden der Impuls-Thermografie zur Ortung von Fehlstellen in Betonstrukturen, in: Thermografie-Kolloquium 2001, 22.09.2001, Universität Stuttgart, DGZfP-Berichtsband auf CD 77, 2001, Vortrag 14
- [7] Maierhofer, Ch., Brink, A. Röllig, M. und H. Wiggerhauser: Anwendung der Impuls-Thermografie als quantitatives zerstörungsfreies Prüfverfahren im Bauwesen
In: DGZfP-Jahrestagung 06.-08. Mai 2002 in Weimar, DGZfP-Berichtsband BB 80-CD, Vortrag 45, Berlin (2002)
- [8] Maierhofer, Ch., Brink, A., Röllig, M. und Wiggerhauser, H.: Impulse thermography for locating voids and honeycombing in concrete structures supported by numerical simulations, in: Häupl, P. and J. Roloff (eds.); Proceedings of 11. Symposium of Building Physics, 26.-30. September 2002, Dresden, S. 242-252.

- [9] Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben: Struktur- und Feuchteuntersuchungen von Bauteil- und Bauwerksoberflächen mit der Impuls-Thermografie, Geschäftszeichen WI 1785/1-1/2 und HI 636/2-1/2, Berlin, 2001 (unveröffentlicht).
- [10] Maldague, X.: Theory and practice of Infrared Technology for non-destructive testing, John Wiley and Sons, Inc., 2001
- [11] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T.: Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, Cambridge, 1988, 735 p.