

Thermografie am Schichtsystem Putz auf Beton im Labor und in der Praxis

Rainer KRANKENHAGEN, Mathias RÖLLIG, Christiane MAIERHOFER,
 BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin;
 Joachim HÖHN, Ingenieurbüro Dipl.-Ing. (FH) BDB Joachim Hoehn Bau- und
 Projektmanagement, Hamburg

Kurzfassung: In einem Gebäude aus den 1980er Jahren traten Probleme bei der Haftung des Deckenputzes im Innenbereich auf. Zur Untersuchung bietet sich, neben dem herkömmlichen Abklopfen, prinzipiell die aktive Thermografie als zerstörungsfreie Messmethode an, um oberflächennahe Inhomogenitäten nachzuweisen. Putzablösungen, die zu einem Luftspalt zwischen Beton und Putzschicht führen, bilden eine solche Inhomogenität. Die nach einer Erwärmung der Putzoberfläche mit einer Mikrobolometerkamera aufgenommenen Thermografie-Sequenzen zeigten viele Details, ließen jedoch keine eindeutige Interpretation zu. Deshalb wurden die Vor-Ort-Messungen durch Laboruntersuchungen an bereits abgebrochenen Putzstücken ergänzt. Trotz des einfachen Aufbaus der untersuchten Struktur ließen sich die Befunde vor Ort nicht vollständig im Labor nachvollziehen. Die Ursachen für diese Abweichungen werden diskutiert und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen zu dieser praxisrelevanten Problemstellung.

1 Einführung

An einem mehrstöckigen Bürohaus (erbaut 1980er Jahren) trat nach Malerarbeiten eine spontane Putzablösung im Deckenbereich eines Raumes auf. Bei späteren Sanierungsarbeiten in anderen Räumen konnten Details der Deckenablösung fotografisch erfasst werden. Abbildung 1 zeigt eine typische Putzablösung von etwa 30 cm Durchmesser. Mit Blick auf die Bruchkante wird erkennbar, dass der vorhandene Putz offenbar dreilagig war: die unterste Schicht haftet noch fest am Beton, die beiden anderen Schichten haben sich gelöst, sind untereinander aber noch im Verbund. In anderen Räumen hingegen löste sich der gesamte Putz glatt vom Beton (siehe Abbildung 2).

Um Gefährdungen von Personen sowie Sachschäden in den betroffenen Räumen zu vermeiden, möchte der Vermieter einen Überblick über den Umfang der schadhaften Bereiche haben. Eine entsprechende Schadenskartierung ist Voraussetzung für die Planung der notwendigen Sanierungsmaßnahmen. Neben dem herkömmlichen Abklopfen bietet sich die aktive Thermografie als Diagnoseverfahren an.

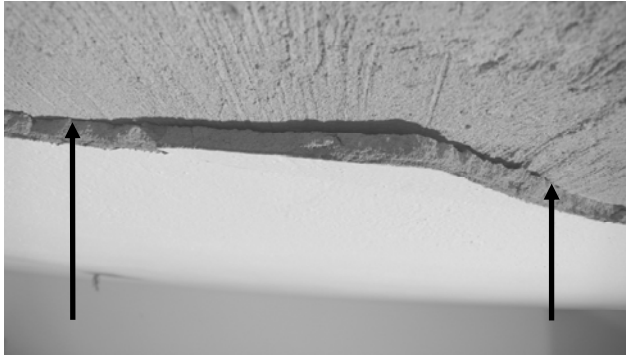


Abbildung 1: Detail bei abgeplatzter Decke, die Pfeile markieren den Rand der Ablösung, Abstand der Pfeile etwa 20 cm

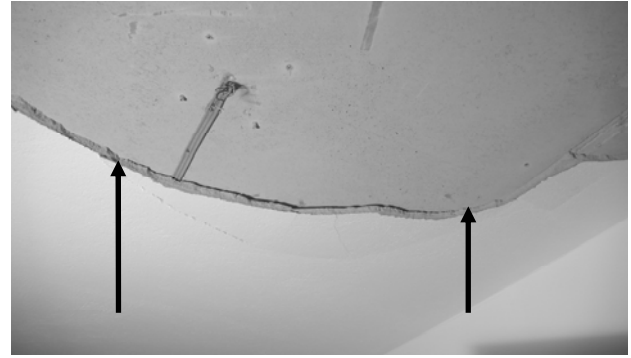


Abbildung 2: Teilansicht einer abgeplatzten Decke, die Pfeile markieren den Rand der Ablösung, Abstand der Pfeile etwa 50 cm, halblinks oben sind ein ca. 3 cm breites Flachbandkabel und 4 Dübel von der Deckenleuchte erkennbar

2 Thermografische Verfahren im Bauwesen

Die Infrarot-Thermografie misst die Wärmestrahlung des zu untersuchenden Objektes, dessen Spektrum zum Großteil im infraroten Wellenlängenbereich liegt und von der Temperatur abhängt (Planck'sche Strahlungskurve). Durch geeignete Umrechnungen lässt sich aus der Strahlungsintensität die Oberflächentemperatur des Objekts ableiten. Mit einer IR-Kamera kann diese Strahlung aus einem bestimmten Bildausschnitt erfasst und flächenaufgelöst dargestellt werden. Die bildhafte Darstellung der so ermittelten Temperaturverteilung wird als Thermogramm bezeichnet.

Ziel der thermografischen Untersuchung im Bauwesen ist es, die im Thermogramm dargestellte Temperaturverteilung auf der Bauwerksoberfläche zur Zustandsanalyse des Bauwerkes zu nutzen. 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, die einen thermischen Kontrast an der Oberfläche hervorrufen. Die Entstehung eines solchen Kontrasts ist an zwei Bedingungen geknüpft:

- thermisches Ungleichgewicht, d.h. es fließt Wärme innerhalb des zu untersuchenden Objektes
- thermische Eigenschaften variieren innerhalb des Objektes

Ein Wärmefluss kann durch sich verändernde Temperaturdifferenzen an Innen- und Außen-seite 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. Inhomogenitäten wie Einschlüsse, Ablösungen oder Risse beeinflussen das thermische Verhalten der untersuchten Struktur. Für das Bauwesen relevant sind z. B. die sehr niedrige thermische Leitfähigkeit von Luft und die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser in Relation zu üblichen Baustoffen. Luftgefüllten Hohlräume innerhalb eines sonst massiven Baukörpers, wie sie in den Abbildungen 1 und 2 gezeigt sind, sollten daher deutliche Kontraste ergeben.

Bei der für diese Vorstudie angewendeten Impuls-Thermografie (IT) wird die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteiles für ein bestimmtes Zeitintervall erwärmt und danach die Abkühlung mit einer IR-Kamera aufgenommen (eine genauere Beschreibung ist in Ref. [1] nachzulesen).

3 Untersuchungsergebnisse

Es wurden drei verschiedene Messverfahren zur Untersuchung der Problematik eingesetzt:

1. Vor-Ort-Messungen an äußerlich intakten Raumdecken
2. Bestimmung des Parameters Temperaturleitfähigkeit α an bereits abgelösten Putzproben
3. Labormessungen an Probekörpern mit originalen Putzstücken

Ziel der Labormessungen war es, die Vor-Ort-Situation bei bekannter Geometrie so gut wie möglich nachzubilden, um die Ergebnisse der Vor-Ort-Messungen besser bewerten zu können. Die thermische Anregung erfolgte mit einem 2400 W Infrarotstrahler, der auf einem fahrbaren Gestell fixiert worden war (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Erwärmung der Raumdecke durch den Infrarotstrahler



Abbildung 4: äußerlich intakte Raumdecke mit kastenförmigen Deckenlampen

3.1 Vor-Ort-Messungen

Die Untersuchung wurden mit der VarioCAM hr IR-Kamera von Infra-Tec durchgeführt (640 x 480 Pixel bei 50 Hz Bildrate). Hierbei handelt es sich um eine ungekühlte Mikrobolometerkamera, die besonders für mobile Einsätze geeignet ist. Die folgende Abbildung 5 zeigt typische Thermogramme eines untersuchten Raumes unmittelbar nach 10 min Erwärmung, die für beide Deckenhälften getrennt erfolgte. Die seitliche Begrenzung der jeweiligen Messfläche ist durch die Lampen, die gedachte Mittellinie zwischen den Lampen sowie die jeweilige Wand gegeben. Die Abmessung der Messfläche betrug 1,55 m x 2,1 m.

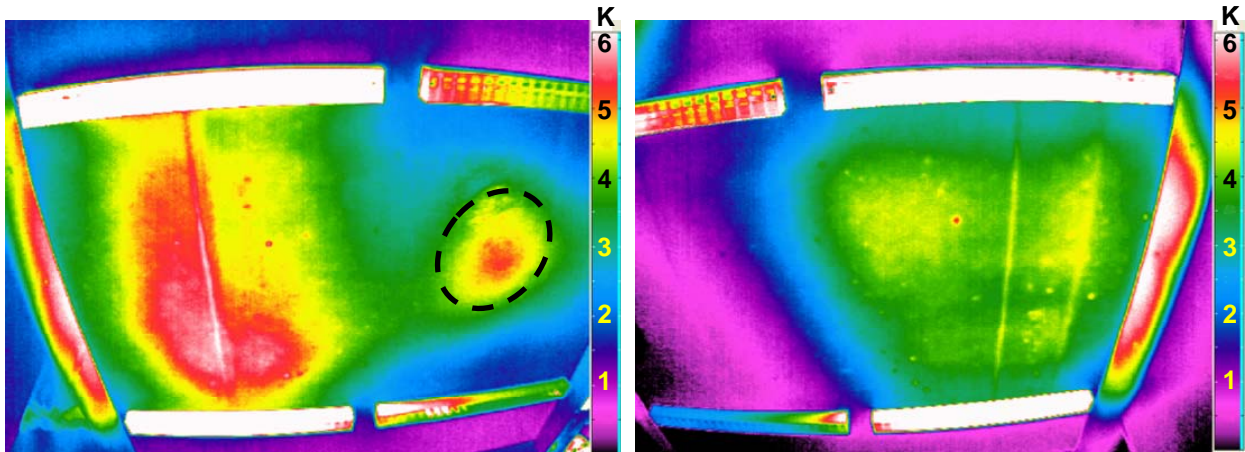


Abbildung 5: Thermogramme der Decke in einem Raum nach Erwärmung mit IR-Strahler über 10 min, Verzerrungen resultieren aus der Verwendung eines Weitwinkelobjektivs, Kameraabstand 2,35 m, der markierte Bereich im linken Bild ist die Reflexion aus der Reststrahlung des darunter abgestellten IR-Strahlers

Bei der Interpretation der Thermogramme ist zu beachten, dass die Anregung nicht ganz gleichmäßig erfolgte und dass man mit Randeffekten rechnen muss, da am Rand die eingebrachte Wärme teilweise in nicht erwärmte Bereiche abfließt. Beide Thermogramme weisen typische Details auf:

- Lange streifenförmige Erwärmung
- Kleine fast runde Erwärmungen
- Größere flächige Erwärmungen

Auffällig ist außerdem der höhere Temperaturanstieg in den erwärmten Bereichen der linken Deckenhälfte im Vergleich zur rechten Hälfte.

3.2 Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit α

Bei der mathematischen Beschreibung der Wärmeleitung durch eine Differentialgleichung wird der Materialparameter Temperaturleitfähigkeit benötigt, der sich aus den physikalischen Materialparametern gemäß Gleichung 1 ergibt:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c * \rho}$$

Gleichung 1: Temperaturleitfähigkeit α ergibt sich aus der Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c , die Einheit von α ist m^2/s oder cm^2/s

Bei der Messung der Temperatur an der Deckfläche eines zylinderförmigen Probestücks nach Einwirkung eines Wärmeimpulses an der Bodenfläche bildet sich ein typischer Verlauf heraus, der in Abbildung 6 erkennbar ist. Nach schnellem Anstieg entsteht ein Maximum, gefolgt von einem langsamen Abklingen. Bei der Auswertung wird die Zeit ermittelt, bis zu der die Hälfte des Maximalwertes erreicht wird (Ref. [2]). Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde der Wärmeimpuls über den kurzzeitigen Kontakt der Putzprobe mit einer Heizplatte realisiert (Kontaktzeit 2s), danach erfolgte die Messung des Temperaturverlaufs an der Rückseite der Putzprobe mit der VarioCAM Thermografiekamera. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

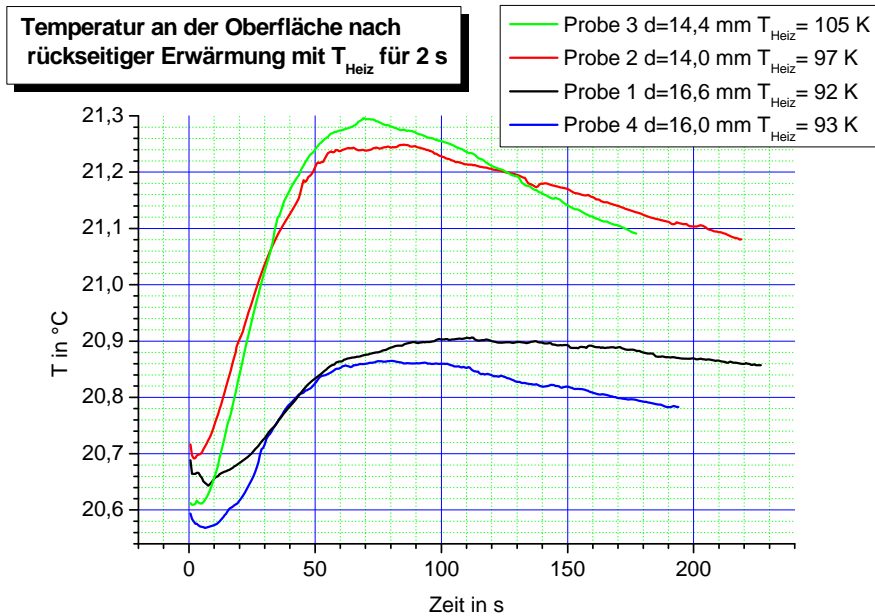


Abbildung 6: zeitlicher Verlauf der Temperatur an 4 Putzproben nach rückseitiger Erwärmung, typische Zeiten zur Erreichung der Hälfte des Maximalwertes liegen etwa bei 30 s, der teilweise Temperaturrückgang zu Beginn der Messung ist auf thermische Driftvorgänge innerhalb der ungekühlten Kamera zurückzuführen

Unter Nutzung der in Ref. 2 angegebenen Berechnungsformel erhält man Werte von etwa $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Temperaturleitfähigkeit.

3.3 Labormessungen

Wegen des Fehlens von Referenzflächen vor Ort (Deckenbereiche, von denen bekannt ist, ob der Putz noch fest haftet oder nicht) wurden weitere Untersuchungen im Labor an bereits abgeplatzten Putzstücken durchgeführt.

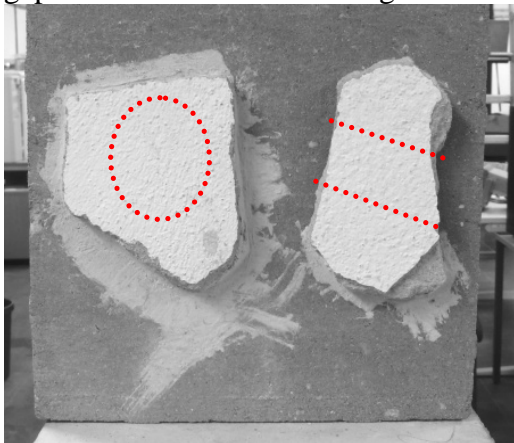


Abbildung 7: Probekörper 1 mit 2 präparierten Hohlräumen, deren Lage durch die roten Punktlinie gezeigt wird, der rechte Hohlraum ist seitlich offen

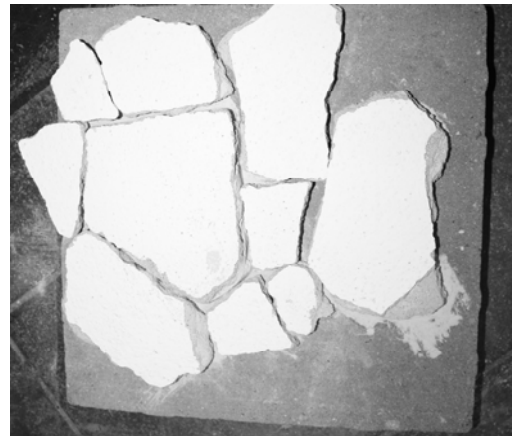


Abbildung 8: Probekörper 1 mit zusätzlichen lose aufgelegten Putzstücken zur thermischen Abschirmung

Hierzu wurden zwei Probekörper durch Aufkleben von jeweils zwei Putzstücken auf Betonplatten hergestellt, die Kleberschichtstärke betrug 4-5 mm. Die Kleberschichtstärke wurde so hoch bemessen, um zuverlässig Hohlräume ohne Restkontaktflächen zu erhalten. Diese Hohlräume dienen als Labormodell für Putzablösungen, im Folgenden als Defekte bezeichnet. Der

Probekörper 1 enthält einen geschlossenen und einen seitlich offenen Defekt (siehe Abbildung 7), auf Probekörper 2 befinden sich zwei vollflächig verklebte Putzstücke ohne Defekte (ohne Bild). Nachteilig an den Probekörpern ist, dass bei oberflächiger Erwärmung ein undefinierter Wärmeeintrag in die Betonplatte entsteht, der bei der Vor-Ort-Messung nicht auftrat. Deshalb wurde bei den Messungen die Betonplatte so weit wie möglich mit weiteren Putzstücken abgedeckt, um den Wärmeeintrag zu minimieren (siehe Abbildung 8).

Die Erwärmung der Putzstücke auf den Probekörpern erfolgte mit Heißluft. Die Anregung mit dem IR-Strahler führte zu stärkerer Erhitzung an den Kanten infolge der fehlenden Farbbedeckung und ist daher nicht geeignet für die Probekörper. Die Erwärmungsdauer betrug jeweils 5 Minuten, der Wärmeeintrag war etwas niedriger als bei den Vor-Ort-Messungen.

Die Aufnahme der Thermogramme erfolgte mit einer gekühlten Thermografiekamera InSb 640 SM der Firma Thermosensorik (640 x 512 Pixel Auflösung bei einer Bildrate von 100 Hz). Diese Kamera hat eine bessere thermische Auflösung und wird für Labormessungen verwendet. Die Thermogramme sind in Abbildung 9 zu sehen. Zunächst wurde der Probekörper 2 mit dem vollflächig verklebten Putzstück vermessen. Von den zur Abschirmung zusätzlich aufgelegten losen Putzstücken (siehe Abbildung 8) wurden zwei Teile als Vergleichsstücke ausgewählt und analog erwärmt.

Es zeigte sich bereits während der Messung, dass sich die zur Abschirmung aufgelegten Putzstücke unterschiedlich stark erwärmten. Prinzipiell lässt sich feststellen, dass sich deutliche Temperaturunterschiede zwischen aufgelegten Putzstücken herausbildeten, während sich fester Putz (Fläche A) und loser Putz (Fläche B) thermisch annähernd gleich verhielten.

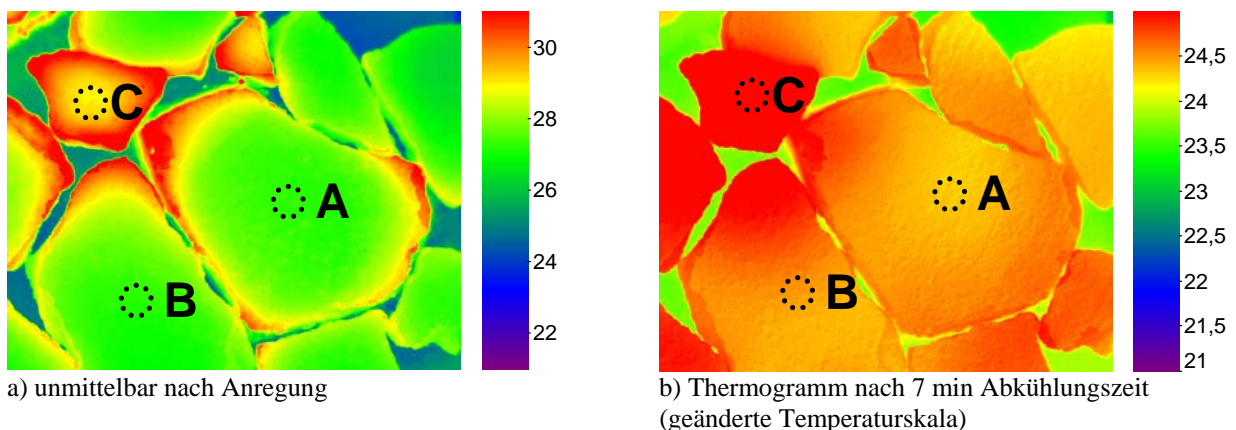


Abbildung 9: Thermogramme des Probekörpers 2 nach Heißluftanregung, Temperaturen in °C, Starttemperatur 23,2°C

Messfläche A liegt im fest haftenden Putzstück, die Messflächen B und C befindet sich auf verschiedenen aufgelegten losen Putzstücken

Danach wurde die gleiche Messung am Probekörper 1 mit dem präparierten Hohlraum durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Bei dieser Messung traten nur an den Putzrändern geringe Überhitzungen auf, eine ungleichmäßige Erwärmung ganzer aufgelegter Putzstücke fand hingegen nicht statt. Nach 5 min Erwärmung hat sich bei allen Putzstücken, unabhängig vom Haftungszustand, die annähernd gleiche Temperatur von 27°C eingestellt (Abbildung 10a). Während der Abkühlung wird der präparierte Hohlraum als wärmerer Bereich sichtbar (Messfläche A in Abbildung 10b). In der Kontaktzone des Putzstücks (Messfläche A1) findet eine schnellere Abkühlung statt. Das locker aufliegende Stück (Messfläche B) verhielt sich ähnlich dem Putz direkt über dem Hohlraum.

Die Ergebnisse beider Messungen sind daher widersprüchlich. Am Probekörper 2 gab es keinen sichtbaren Unterschied zwischen gebundenem und lose aufgelegten Putz. Bei der Messung am Probekörper 1 trat ein deutlicher Unterschied zwischen fest gebundenem Be-

reich einerseits und Putz ohne Rückkontakt andererseits. Dieses Verhalten wird im folgenden Kapitel diskutiert.

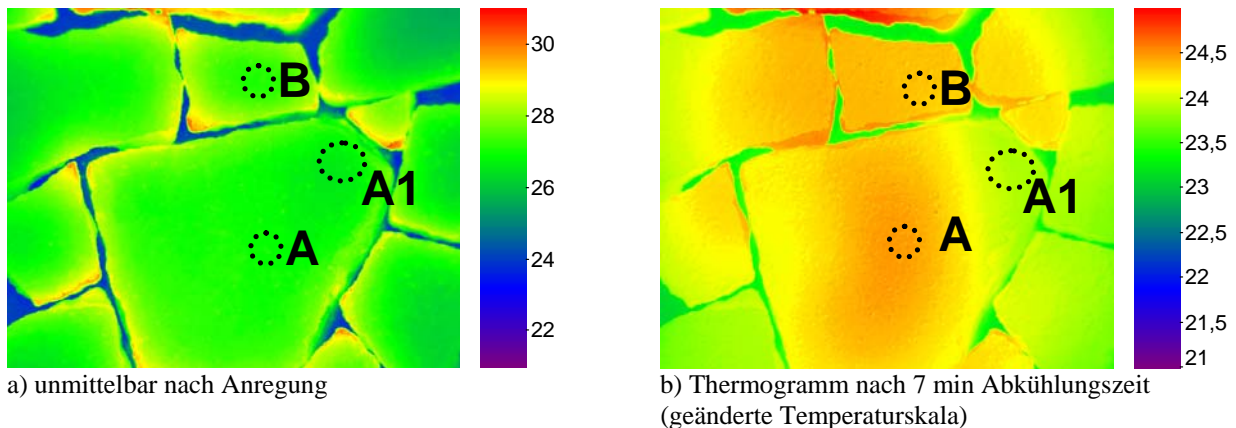


Abbildung 10: Thermogramme des Probekörpers 1 nach Heißluftanregung, Temperaturen in °C, Starttemperatur 23,0 °C

Messfläche A liegt im fest haftenden Putzstück direkt über dem Hohlraum, unter der Messfläche A1 hat das Putzstück Haftung mit dem Beton, Messfläche B befindet sich auf einem aufgelegten Putzstück

4 Diskussion der Messergebnisse

Die visuelle Bewertung der Laborergebnisse hatte zu widersprüchlichen Aussagen geführt. Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob feste und abgelöste Putzstücke überhaupt an Hand ihres thermischen Verhaltens unterscheidbar sind. Hierzu wurde der zeitliche Verlauf der Temperaturdifferenz, gemittelt über die einzelnen Messflächen, als Graph aufgetragen.

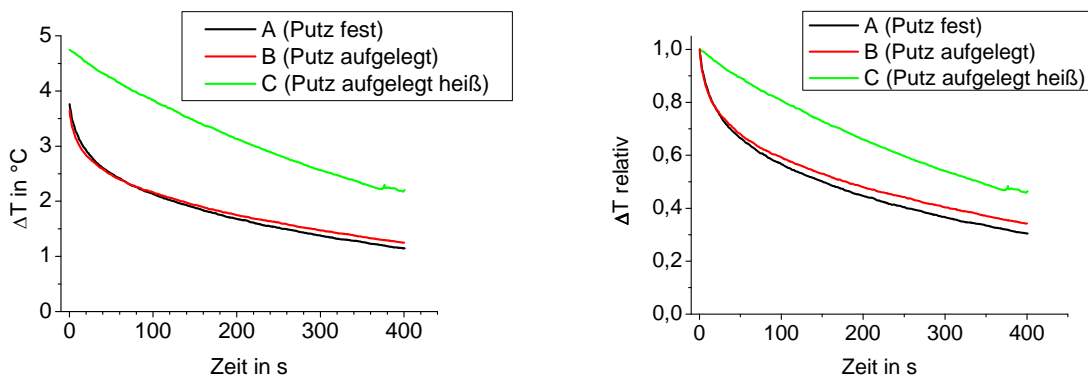
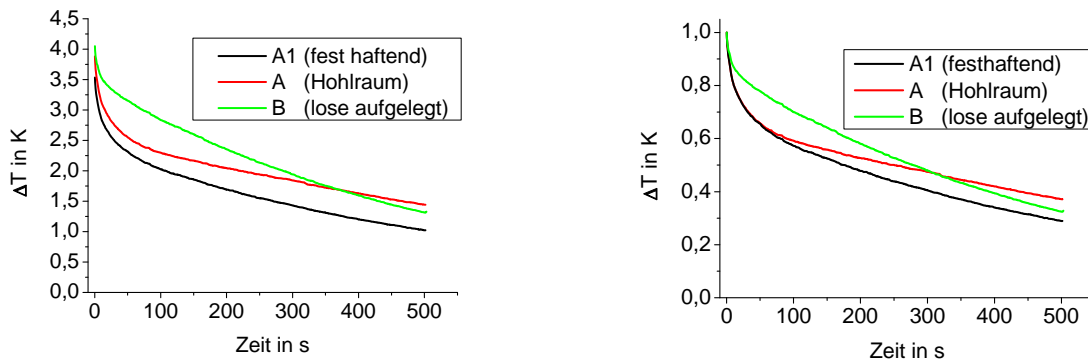


Abbildung 11: zeitlicher Verlauf der Temperatur in den ausgewählten Bereichen am Probekörper 2 (siehe Abbildung 9),

Es ist offensichtlich, dass sich das aufgelegte Putzstück C fast linear abkühlt, während die beiden anderen Bereiche eher exponentiell kühler werden. Es wird auch erkennbar, dass es einen Unterschied zwischen Bereich A und B gibt, der feste Bereich A kühlt sich etwas schneller ab, wie es zu erwarten wäre. Es ist zu vermuten, dass das wärmer gewordene Putzstück C einen deutlich schlechteren thermischen Kontakt zur Betonplatte hatte als Putzstück B (z.B. durch unebene Rückseite oder feine Körnchen, welche einen großflächigen mechanischen Kontakt verhinderten).

In Abbildung 12 sind die zeitlichen Verläufe für die Messungen am Probekörper 1 dargestellt. Der fest haftende Bereich A1 kühlt wiederum am schnellsten ab. Der umschlossene Hohlraum A und das großflächig lose aufliegende Putzstück B unterscheiden sich qualitativ deutlich. Während sich der lose Bereich B langfristig der Temperatur von A1 nähert, vergrößert sich

der Temperaturunterschied zwischen A1 und dem Hohlraum A noch. Dieses Verhalten ist bisher nicht verständlich.



a) Temperaturdifferenz zur Ausgangstemperatur 23,0°C b) auf 1 normierte Darstellung der Abkühlung
Abbildung 12: zeitlicher Verlauf der Temperatur in den ausgewählten Bereichen am Probekörper 1 (siehe Abbildung 10)

Offensichtlich sind lose aufgelegte Putzstücke nicht als Referenz geeignet, da der Abstand nicht eindeutig festgelegt ist. Der Abstand zwischen Putz und Beton beeinflusst jedoch das thermische Verhalten dieser Struktur deutlich, wie weitere Untersuchungen zeigten, die hier nicht dokumentiert sind.

Da sich im zeitlichen Verhalten Unterschiede zwischen verschiedenen Bereichen beim Laborversuch offenbarten, sollen diese Daten nunmehr direkt mit den Kurvenverläufen der Vor-Ort-Messung verglichen werden. Hierzu wurden Bereiche im Thermogramm der Deckenfläche ausgewählt, bei denen relativ markante Kontraste auftraten. Abbildung 13 zeigt das Thermogramm der rechten Raumseite mit 4 markierten Bereichen, in denen die Zeitabhängigkeit der Temperatur erfasst wurde. Diese Zeitverläufe wurden zusammen mit denen der Labormessung an Probekörper 1 in Abbildung 14 aufgetragen. Der direkte Vergleich zwischen Probekörper und Vor-Ort-Messung zeigt nur teilweise Übereinstimmungen. Der Putz bei den Labormessungen kühlte sich anfänglich generell schneller ab. Im Langzeitbereich ab etwa 150 s zeigt sich eine gewisse Übereinstimmung zwischen losem Putzkörper B und den wärmeren Bereichen E3 und E4. Der Verlauf des R2 als kühler Bereich weist eine Krümmung auf, die bei keiner der Labormessungen auftrat. E1 als mutmaßlicher Punktdefekt entspricht, vom Zeitverhalten her, ab 250 s dem festen Bereich A1 des Probekörpers.

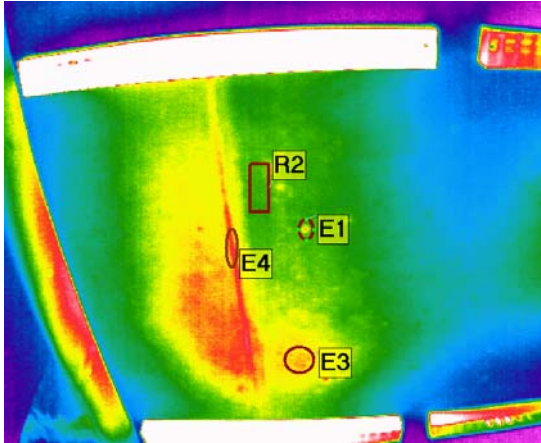


Abbildung 13 Thermogramm der Raumdecke unmittelbar nach der Erwärmung mit gekennzeichneten Bereichen

E1: punktförmiger Bereich

R2: relativ gering erwärmter Bereich

E3: großflächig erwärmter Bereich

E4: Bereich in einer streifenförmigen Struktur

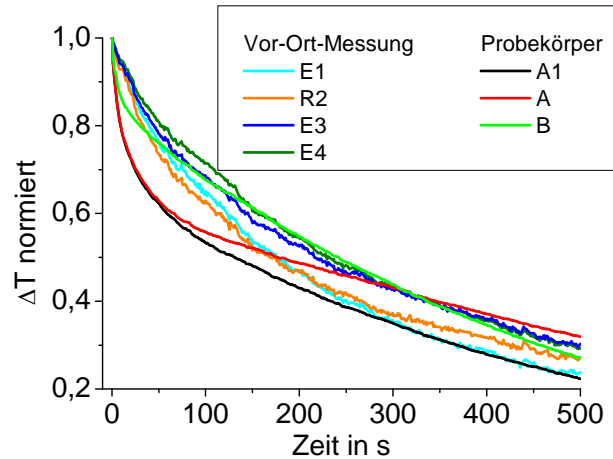


Abbildung 14: normierte Darstellung der Abkühlung in den verschiedenen Bereichen und Vergleich mit der Labormessung am Probekörper 1

5 Zusammenfassung

Der hohe Wert der Temperaturleitfähigkeit von $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ weist auf einen sehr harten betonähnlichen Putz hin. Eine eindeutige Zuordnung der deutlich unterscheidbaren Bereiche in den Thermogrammen der Decke zu abgelöstem oder nicht abgelöstem Putz an diesen Stellen ist angesichts der bisherigen Datenlage nicht möglich. Bestimmte Strukturen wie das Flachbandkabel lassen sich jedoch erkennen. Neben Putzablösungen zwischen den einzelnen Lagen (siehe Abbildung 1) sowie zum Beton können auch Dickenschwankungen des Putzes oder veränderte Materialzusammensetzung thermische Kontraste hervorrufen.

Weitere systematische Untersuchungen sind an optimierten Probekörpern sowie mit längerer Erwärmungszeit geplant. Diese werden durch Simulationsrechnungen zum Wärmefluss ergänzt.

Referenzen

[1] Maierhofer, Ch., and Röllig, M.: Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Ortung von Ablösungen und Fehlstellen in Beton und Mauerwerk, Fachtagung Bauwerksdiagnose 2006, Berlin: DGZfP

[2] F. Cernuschi et al., Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques, International Journal of Thermophysics, 25(2), 2004