



Autoren

Univ. Prof. Dr.-Ing.
Nabil A. Fouad

Dipl.-Ing.
Torsten Richter

Institut für Bauphysik
Leibniz Universität
Hannover

Infrarot-Thermografie zur Schadensdiagnostik im Bauwesen

Möglichkeiten und Grenzen

Gebäude in Deutschland müssen aufgrund jahreszeitlich wechselnder Außenlufttemperaturen zeitweise beheizt werden. Dies ist erforderlich, um dem Nutzer ein hygienisches Raumklima mit ausreichend hoher Innenlufttemperatur bereitzustellen und um die Gebäudesubstanz zu schützen. Im Rahmen der Ressourcenschonung und Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen steigen auch die gesetzlichen Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz. Die Baupraxis zeigt jedoch, dass die oben definierten Anforderungen an Gebäuden häufig nicht eingehalten werden bzw. wurden. Baumängel, Fehler und Schäden sind teilweise die Folge. Mit Hilfe innovativer, zerstörungsfreier und schnell einsetzbarer Mess- und Untersuchungsmethoden, wie es die Bauthermografie darstellt, sind die Voraussetzungen geschaffen, derartige Mängel zu lokalisieren und anschließend Maßnahmen zur Beseitigung einzuleiten. Die Thermografie ist hierbei als Hilfsmittel zu verstehen; die letztendliche Beurteilung der vorgefundenen Situation ist nur mit Sachverstand und Erfahrung möglich.

1 Einleitung

1.1 Grundprinzipien

Ziel der Thermografie ist die Anfertigung von Momentaufnahmen, mit denen die Oberflächentemperatur bzw. -verteilung dargestellt wird. Anhand der Oberflächentemperaturverteilung kann ermittelt werden, wo wärmetechnische Unregelmäßigkeiten, beispielsweise infolge von Wärmebrücken, unterschiedlichen Feuchtegehalten oder Luftströmungen, in den die äußere Umschließungsfläche bildenden Bauteilen vorhanden sind. Thermografieaufnahmen können von der Außen- und/oder von der Innenseite aufgenommen werden. Im Folgenden soll nur auf die passive Thermografie eingegangen werden, da aktive Thermografiertechniken, wie zum Beispiel die Impuls-Thermografie bzw. die Puls-Phasen-Thermografie, im Bauwesen noch keine umfassende praktische Bedeutung besitzen und eher in der Forschung angewandt werden.

1.2 Thermogramme – Außen-aufnahmen

Zur Feststellung von Wärmebrückeneffekten werden Thermogramme oft von der Gebäudeaußenseite aufgezeichnet. Dies ist gegenüber Innenthermografien meist von Vorteil, um einen größeren Flächenbereich in einer Überblicksaufnahme zu erfassen. Zur Aufdeckung wärmetechnischer Unregelmäßigkeiten muss zwischen der Innen- und Außenseite eine entsprechend große Temperaturdifferenz vorhanden sein. In der Fachliteratur wird im Allgemeinen eine minimale Tempera-

turdifferenz von etwa 15 Kelvin angegeben, je höher dieser Wert ist umso besser. Nimmt man eine mittlere Raumlufttemperatur von etwa +20 °C an, sollten ab wärmeren Außenlufttemperaturen von etwa +5 °C keine Thermografieaufnahmen mehr angefertigt werden. Thermografieaufnahmen können natürlich auch bei wärmeren Außenklimaten durchgeführt werden. Potenzielle Fehlstellen zeichnen sich jedoch bei zu geringen Temperaturunterschieden nur noch sehr schwach oder überhaupt nicht mehr im Thermogramm ab.

Da die thermografische Messung immer ein ›Schnappschuss‹ instationärer Verhältnisse darstellt, muss die oben genannte Temperaturdifferenz bereits vor der Messung vorhanden sein. Die Temperaturunterschiede sollten möglichst lang anhaltend und gleichmäßig sein, üblicherweise werden etwa zwölf Stunden als ausreichend erachtet [17]. Weist die Außenlufttemperatur im Tagesgang z. B. sehr große Schwankungen ($\geq 30\%$ der Temperatur-

differenz zwischen Innen und Außen) auf, so ist zu hinterfragen, ob das Messergebnis dann noch aussagekräftig ist. Ausreichend große Temperaturdifferenzen liegen in Deutschland in der Regel in den Wintermonaten bzw. von etwa Oktober bis April vor.

Werden Außenthermografien angefertigt, ist besonders auf den Einfluss der Sonneneinstrahlung zu achten. Das Untersuchungsobjekt darf während und auch bereits einen ausreichenden Zeitraum vor der Messung nicht mit Sonneneinstrahlung beansprucht worden sein. Dies ist einsichtig, da durch die eingebrachte Sonnenwärme eine direkte Oberflächenerwärmung auftritt und durch oberflächennahe Wärmespeichereffekte vorab beschienener Oberflächen ebenfalls Fehlinterpretationen auftreten können. Weiterhin wird im Falle direkter Bestrahlung die Sonnenstrahlung auch reflektiert und fällt in den Strahlengang der IR-Kamera (Abb. 1).

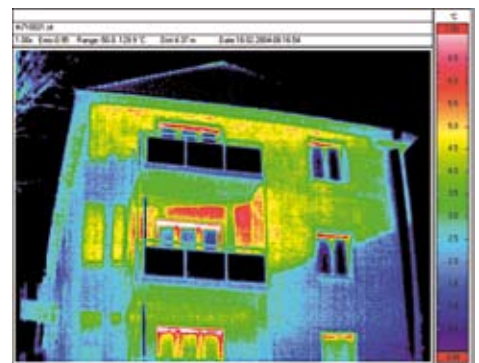


Abb.1: So sollte man es nicht machen: Auswirkungen von Schattenwürfen und direkter Sonneneinstrahlung auf Thermografieaufnahmen

Neben der direkten (Schatten werfenden) Sonneneinstrahlung kann auch die diffuse (stark gestreute, keinen Schatten werfende) Sonnenstrahlung zu Fehlmessungen führen, da Oberflächen auch durch diese ungerichtete Strahlung erwärmt werden.

Neben den oben beschriebenen Effekten bei direkter Sonneneinstrahlung ist auch der Strahlungswärmeaustausch der thermografierten Flächen mit der Umgebung zu beachten. So kann es insbesondere bei klaren Nächten vorkommen, dass sich Oberflächentemperaturen einstellen, die auch unter der Temperatur der Außenluft liegen. Dies liegt daran, dass insbesondere bei einem wolkenlosen, klaren Nachthimmel eine sehr kalte Himmelstemperatur (ca. -80 °C bis -90 °C) vorliegt und so der Strahlungswärmeaustausch mit den Gebäudeoberflächen einen größeren Einfluss gewinnt. Bei bewölktem Himmel findet der Strahlungsaustausch der Flächen vorwiegend mit den nicht so kalten Wolken statt (der Himmel ist verdeckt), der Strahlungsaustausch ist in diesem Fall geringer.

Die Oberflächentemperaturen auf Baukörpern werden sehr stark durch die Wirkung des konvektiven Wärmeüberganges beeinflusst. Bei der Anfertigung von thermografischen Aufnahmen sind daher auch die Windverhältnisse zu beachten. Hierbei ist je nach Aufgabenstellung zu entscheiden, ob der herrschende Wind bzw. die starke Änderung der Windintensität einen Einfluss auf das Untersuchungsziel hat. Anhaltspunkte für maximale Windgeschwindigkeiten werden mit 1 m/s in [17] und bis zu $6,7\text{ m/s}$ in [2] genannt.

Aus oben genannten Randbedingungen ergibt sich bei Außenaufnahmen meist die praktische Notwendigkeit, Thermografieaufnahmen in den frühen Morgenstunden und noch vor dem Sonnenaufgang aufzunehmen. Die frühen Morgenstunden sind der Nacht vorzuziehen, weil am Morgen im Regelfall die kältesten Temperaturen durch die längste Auskühlungszeit vorliegen. Das Winterhalbjahr ist daher für übliche Bauthermografien die beste Jahreszeit.

1.3 Thermogramme – Innenaufnahmen

Werden Thermogramme von der Innenseite aufgenommen, wird gegenüber der Aufnahme von außen meist nur ein kleiner flächenmäßiger Teil der Außenwände erfasst, wobei vorhandene Wärmebrücken-

phänomene durch die bessere Temperaturentwicklung meist detailreicher bzw. überhaupt erst abgebildet werden. Vielfach wird die Ansicht durch Möbel oder sonstige Einrichtungsgegenstände eingeschränkt, so dass unter Umständen ein höherer Vorbereitungsaufwand zur Durchführung der Thermografie notwendig ist. Von der Innenseite aufgenommene Thermografien bieten aber den Vorteil, dass in bewohnten Gebäuden eine relativ gleichmäßige Raumtemperatur über einen längeren Zeitraum vorherrscht und dass die bei den Außenaufnahmen dargestellten Witterungseinflüsse nicht direkt oder nur in abgeschwächter Form zu berücksichtigen sind. So ist es meist möglich, die Innenthermografieaufnahmen auch am Tage durchzuführen. Bei ausgebauten Dachgeschossen mit hinterlüfteten Dächern bzw. hinterlüfteten Außenwandkonstruktionen wird man erfahrungsgemäß zudem nur durch Innenthermografieaufnahmen zu fundierten Bewertungen durch Thermogramme gelangen.

2 Thermografie zur Lokalisierung von Wärmebrücken

2.1 Systematik der Wärmebrücken

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Bereiche in Raum abschließenden Bauteilen, an denen ein erhöhter Wärmefluss von der wärmeren zu der weniger warmen Seite hin auftritt. Das Vorhandensein von Wärmebrücken kann folgende Auswirkungen haben:

- erhöhter Wärmeverlust
- verringerte Oberflächen-Innentemperatur im Bereich der Wärmebrücken im Vergleich zu ungestörten Bauteilflächen mit der Gefahr von Tauwasser- und Schimmelpilzbefall
- Aufgrund der verringerten Oberflächen-Innentemperatur kann die thermische Behaglichkeit beeinträchtigt werden.

2.2 Beispiele

Ungedämmter Fenstersturz

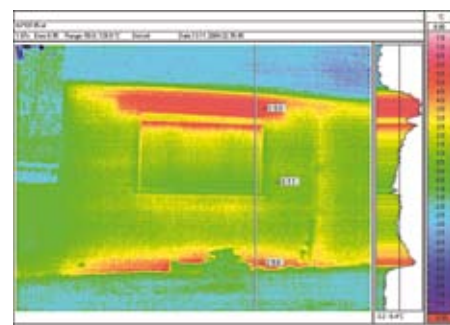
Eine typisch stoffbedingte Wärmebrücke liegt bei Bauteilen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten vor. Als klassischer Vertreter kann ein ungedämmter Betonfenstersturz angesehen werden. Ein derartiges Bauteil ist in Abb. 2 gezeigt.

Im Thermogramm ist die Wärmebrückenwirkung des Betonsturzes durch die deutlich erhöhte Oberflächentemperatur sichtbar. So beträgt die Oberflächentemperatur etwa $\theta_{se} = +5,3\text{ °C}$ gegenüber der nahezu ungestörten Wandoberflächentemperatur mit $\theta_{se} = +1,1\text{ °C}$.

Eine weitere Wärmebrücke ist am Übergang Keller-/Erdgeschoss zu erkennen. Hierbei ist zu beachten, dass im Keller die Heizungsanlage (Ölheizung) installiert ist, die eine erhebliche Abwärme produziert und somit eine Deutung der hohen Oberflächentemperaturen erst möglich macht.

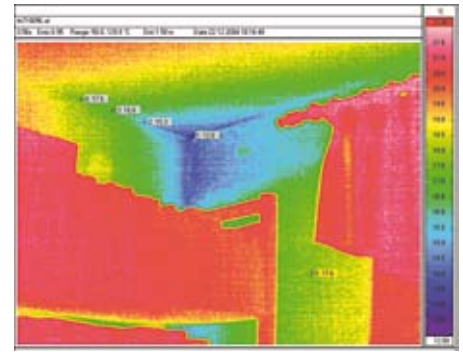
Außenwanddecke mit auskragender Betondecke

In einem Mehrfamiliengebäude (Baujahr 1962) wurden Tauwasserbildungen und



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
13.11.2004 nachts	ca. 0 °C	ca. $+22\text{ °C}$	Außenaufnahme, Klimarandbedingungen stabil (Außenlufttemperaturen um 0 °C lagen bereits 4 Tage lang an)

Abb. 2: Thermografie mit vertikaler Temperaturverteilung. Zum Zeitpunkt der Aufnahme (nachts) war die Jalousie des Fensters geschlossen, im Keller befindet sich die Heizungsanlage des Wohnhauses.



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
22.12.2004 abends	ca. -1 °C	ca. +22 °C	Innenaufnahme, stabile Kaltwetterlage über einen längeren Zeitraum

Abb.3: Thermografie Eckbereich – mit der Auswertesoftware ist die Darstellung einzelner Bezugstemperaturen entlang des Decken-Wandüberganges einer Bezugslinie möglich.

beginnende Schimmelpilzbildungen in einem Außenwand-Eckbereich eines Arbeitszimmers gerügt. Im Rahmen der Ursachenfindung wurde eine Thermografieuntersuchung des betreffenden Wandbereichs vorgenommen. Die Aufnahme zeigt eine von der Innenseite aufgenommene, außenseitig an einen Balkon angrenzende Wandecke des Arbeitszimmers.

Das innenseitig aufgenommene Thermogramm zeigt eine starke Abkühlung der deckennahen Außenwand und der angrenzenden Deckenbereiche (Differenz zum ungestörten Wandbereich etwa 5 Kelvin).

Ursächlich für die festgestellte starke Abkühlung auf der Wandinnenseite ist die geometrische Ausbildung der Konstruktion im Eckbereich. Neben der nicht vermeidbaren geometrischen Wärmebrückenbildung der Wandecke schließt außerdem oberhalb der Außenwandecke die thermisch nicht getrennte Betondeckenkonstruktion an (vgl. Abb. 3).

Es liegt somit eine geometrische (durch die Ecke) und stoffliche (infolge der durchgehenden Deckenplatte und des Fenstersturzes) Wärmebrücke vor. Anzumerken ist, dass zur Errichtung des Gebäudes die konstruktive Trennung auskragender Bauteile noch nicht Stand der Technik war und auch der Wärmedämmstandard zum damaligen Zeitpunkt mit heutigen Anforderungen nicht vergleichbar ist.

Hinsichtlich der Nutzung wurde den Mietern empfohlen, das im Eckbereich angestellte Regal (vgl. Abb. 3) weiter vom

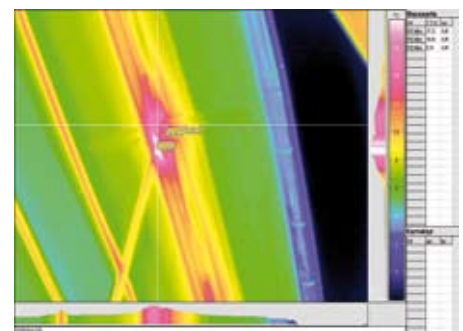
kritischen Eckbereich abzurücken. Durch diese Maßnahme wird erreicht, dass der Eckbereich durch die Verringerung des Wärmeübergangswiderstandes auf der Wandinnenseite besser erwärmt wird.

Stahlträger ohne thermische Trennung durch Außenwand geführt

Besonders kritische Wärmebrückenwirkungen können an Bauteilen entstehen, die aufgrund der Materialauswahl eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. In folgendem Beispiel ist ein Stahlträger gezeigt, der aus einem besonders warmen Innenraum (Schwimmbad) ungedämmt nach außen geführt wird. Im Durchstoßbereich wurden Undichtigkeiten bzw. Unterbrechungen der Wärmedäm-

mebene festgestellt. Im Thermogramm ist die Wärmebrückenwirkung im Bereich der Trägerdurchführung anschaulich gezeigt.

Neben den erhöhten Wärmeverlusten, der Problematik der Schimmelpilzbildungen und der allgemeinen Zerstörung der Baukonstruktion ist im Innenraum von Schwimmbädern dem Abtropfen von entstandenem Tauwasser Beachtung zu schenken. Hierbei wird es von den Gästen verständlicherweise als äußerst unangenehm empfunden, wenn Tauwasser von Bauteiloberflächen abtropft. Zudem wird die Tauwasserbildung von Laien auch vielfach als Undichtigkeit an der Konstruktion gedeutet.



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
01.03.2002 früh	ca. +2 °C	ca. +32 °C	hohe Innenlufttemperaturen bedingt durch Schwimmbad

Abb. 4: Auskragender Stahlträger wird ungedämmt durch die Fassade geführt, die Wärmebrückenwirkung durch die Temperaturerhöhung am Durchstoßpunkt ist deutlich sichtbar.

3 Thermografie zur Lokalisierung von Luftundichtigkeiten

Unterstützung der Thermografie mit Differenzdruckverfahren (Blower-Door)

Die Thermografieuntersuchungen werden zunächst im normalen Nutzungszustand durchgeführt, das heißt ohne Aufbringung eines Unter-/oder Überdrucks.

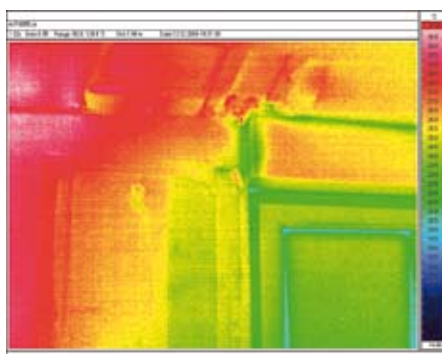
Im Anschluss daran wird eine Blower-Door-Messung mit Überdruck durchgeführt, bei der die warme Innenluft durch Fehlstellen nach außen entweichen könnte. Um einen möglichst hohen Temperaturgradienten bei der ergänzend durchgeführten Thermografiemessung zu erreichen, sollte vom Bauherrn die Heizungsanlage bereits am vorherigen Tag auf die höchste Heizleistung eingestellt werden. An potenziellen Fehlstellen durchströmt die warme Innenluft die Konstruktion und tritt an der Außenseite aus. Hierbei erwärmt sich diese Stelle und kann durch die bildgebende Thermografie sichtbar gemacht werden.

Die Thermografie mit Unterstützung durch das Blower-Door-Verfahren ist geeignet, vorhandene Luftundichtigkeiten viel intensiver zu Tage treten zu lassen und somit Fehlstellen einfacher und schneller aufzudecken. Bei der Einstellung der Druckdifferenz sollten 50 Pa nicht überschritten werden, da bei höheren Differenzdrücken Zerstörungen der Winddichtungsschicht bzw. Dampfsperre nicht ausgeschlossen werden können.

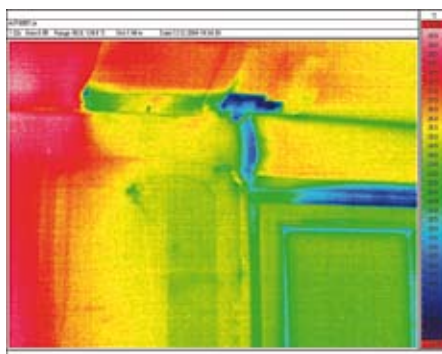
Beispiel

An einem in Holzständerbauweise errichteten Gebäude wurden Thermografieuntersuchungen in Verbindung mit der »Blower-Door« durchgeführt. Hierzu wurde die Konstruktion im Bereich des Wand-Deckenübergangs ohne Zerstörung der Winddichtung/Dampfsperre geöffnet und hinsichtlich der sich einstellenden Oberflächentemperaturen vor und während der Aufbringung eines Gebäudeunterdrucks mit Hilfe der Innenthermografie untersucht.

Die Auswertung der in Abb. 5 gezeigten Thermogramme kann mit modernen IR-Systemen durch die Anwendung der Differenzbildtechnik vereinfacht werden. Hierbei wird eine Temperaturverteilung als Subtrahend angenommen und von den folgenden Thermogrammen als Minuend abgezogen. Als Ergebnis wird die Differenz zwischen den beiden Temperaturverteilungen direkt angezeigt.



Normalzustand (A)



mit Unterdruck nach ca. 3 Minuten (B)

Abb. 5: Geöffneter Wand-Deckenbereich und Thermogramme vor/nach Aufbringung eines Unterdrucks (ca. 50 Pa)

Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen	
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur
13.12.2004 abends	ca. -1 °C	ca. +25 °C

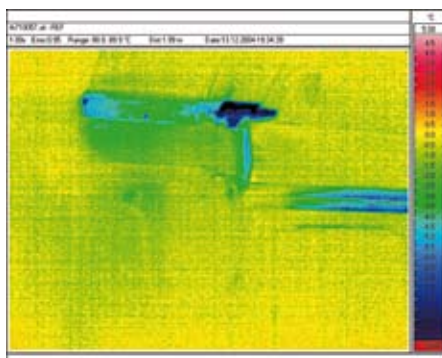


Abb. 6: Differenzbild der Temperaturverteilung vor/nach Aufbringung eines Unterdrucks, Rechenvorschrift: A - B = Differenzbild, Anzeige von $\Delta\theta$ in [K]

4 Thermografie zur Lokalisierung von Durchfeuchtungen

4.1 Prinzip

Die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] der im Bauwesen eingesetzten Baustoffe wird im Regelfall für Baustoffe im trockenen Zustand angegeben. Bei trockenen Baustoffen wird die Wärmedämmwirkung hauptsächlich durch die im Feststoffgerüst eingeschlossenen, möglichst kleinen Luftvolumen erreicht. Bei feuchten Baustoffen werden die Luftvolumen und die Poren des Feststoffgerüsts teilweise mit Wasser aufgefüllt, die Wärmeleitfähigkeit λ steigt. Dadurch leitet der feuchtere Körper besser die Wärme, sie verteilt sich schneller als beim trockenen Körper. Durch den höheren Wassergehalt und die damit verbundene größere Wärmespeicherkapazität steigt die thermische Trägheit des Materials. Weiterhin kann es bei feuchten Körpern zum Verdunsten von Wasser an der Oberfläche kommen, bei dem die benötigte Wärme dem Körper entzogen wird und dieser somit abkühlt (Prinzip der Abkühlung durch Schwitzen). Dieser durch Phasenübergänge hervorgerufene Wärmeverlust ist bei genaueren Berechnungsverfahren, wie den Abhandlungen zu den thermisch-hygrischen Transportvorgängen.

Mit Hilfe der Thermografie können die durch die Durchfeuchtungen hervorgerufenen Temperaturunterschiede auf den Oberflächen detektiert und so der Durchfeuchtungshorizont dargestellt werden. Der Feuchtegehalt kann mit diesem Verfahren jedoch nicht festgestellt werden – hierzu sind andere Untersuchungsmethoden zu verwenden.

4.2 Beispiel eines Durchfeuchtungsschadens an einer Kelleraußenwand

In einem privat genutzten Keller eines Altbaus wurde vor der Planung von Umbaumaßnahmen eine Bestandsaufnahme zur Dokumentation des Ist-Zustandes beauftragt. Hierbei war zu untersuchen, ob eine Vertikal- und Horizontalabdichtung der Kellerwände vorhanden sind und in welchem Zustand sich diese befindet. Zur Gewinnung eines schnellen Überblicks über die vorhandene Durchfeuchtung bzw. zur Lokalisierung besonders kritischer Wandbereiche wurde ergänzend die Thermografiertechnik eingesetzt.

Die Thermogramme zeigten in Verbindung mit den Messserien eines Feuchtemessgerätes, dass sich signifikante Durch-

Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
29.05.2005 abends	ca. +23 °C	ca. +19 °C	nicht genutzter Kellerraum eines Bestandsgebäudes, ergänzend wurden Messungen mit Hilfe eines dielektrischen Feuchtemessgerätes durchgeführt.

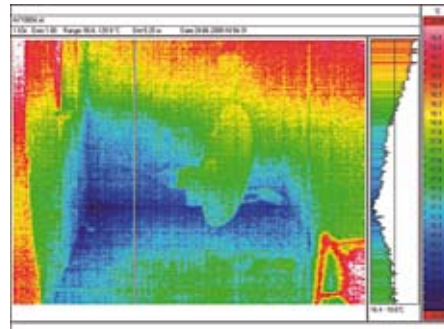


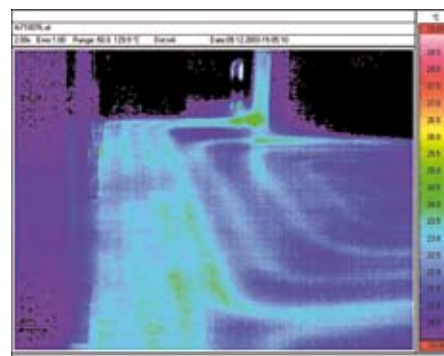
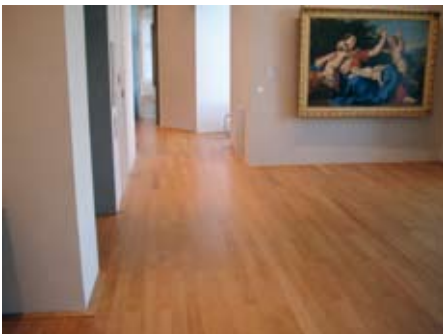
Abb. 7: Durchfeuchtete Bereiche einer Kelleraußenwand, die Form des Durchfeuchtungs horizontes ist bereits visuell wahrnehmbar.

feuchtungen – wie auch aus den sichtbaren Verfärbungen in der Fotografie zu erwarten war – tatsächlich stärker im Fußbodenbereich konzentrierten. Mit Hilfe der Thermografie konnte so ein relativ schneller Eindruck von der Bausubstanz gewonnen werden.

5 Thermografie zur Lokalisierung von Konstruktionseinzelheiten

Dokumentation des Verlaufes von Heizungsleitungen im Fußboden

Für den nachträglichen Anschluss von Konvektionsheizkörpern war der Verlauf der im Fußboden verlegten Heizleitungen zu bestimmen. Weiterhin war für den Bauherrn von Interesse, in welchem Bereich des Fußbodens der wärmere Vorlauf der Heizungsrohre verlegt wurde.



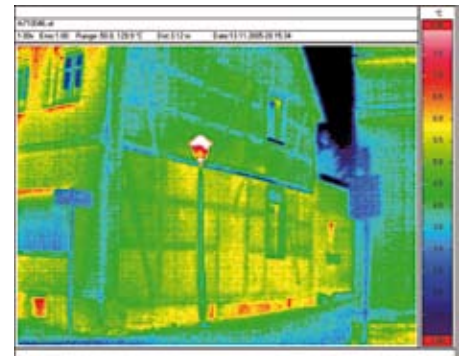
Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
09.12.2003 mittags	ca. -4 °C	ca. +20 °C	Innenaufnahme von Heizleitungen, Beginn des Anheizens erst zum Ortstermin und mit max. Vorlauftemperatur

Abb. 8: Heizleitungen zeichnen sich im Thermogramm ab.

Fachwerkstrukturen

Im Rahmen von Bestandsaufnahmen kann mit der Thermografie die Lage und der Verlauf von (überputzten) Fachwerkstrukturen festgestellt werden. Exemplarisch ist im Folgenden ein Wohnhaus mit dem im unteren Bereich verputzten Fachwerk zu sehen.

Untersuchungen zur Lage von Fachwerk können auch im Sommer durchgeführt werden, da allein durch das unterschiedliche Aufheiz- und Abkühlverhalten der Werkstoffe (Wärmespeichervermögen) Temperaturdifferenzen sichtbar werden können.



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen	
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur
13.11.2005 abends	ca. +6 °C	ca. +22 °C

Abb. 9: Sichtbarmachung verputzter Fachwerkstrukturen mit Hilfe der Thermografie

6 Temperaturverteilung von vertikal angeordneten Stahlträgern eines großflächig verglasten Luftgeschosses

Für die Standsicherheitsberechnung eines aus Stahlprofilen bestehenden Luftgeschosses eines historischen Gebäudes waren die Annahmen für die Temperaturbeanspruchungen infolge der thermischen Schichtung der Luft durch Messungen am Bauwerk zu überprüfen. Im Rahmen einer ergänzenden thermografischen Untersuchung wurden zu verschiedenen Zeitpunkten die an der in statischer Hinsicht als Bogen-Zugband-Konstruktion vorhandenen Temperaturunterschiede zwischen dem wärmeren oberen Druckbogen und dem unteren Zugband bestimmt.

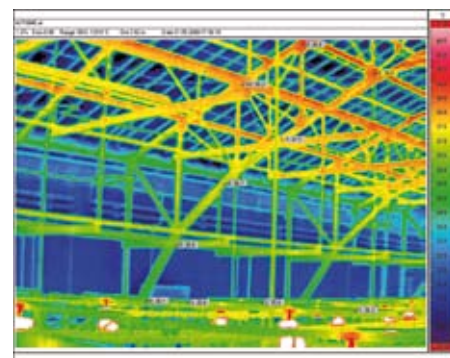
Es zeigte sich, dass sich in dem gut belüfteten Luftgeschoss eine thermische Schichtung einstellte und diese zu Temperaturunterschieden an der tragenden Konstruktion führte.

7 Thermografie zur baubegleitenden Qualitätssicherung

7.1 Beispiel zu Untersuchungen vor und nach einer energetischen Gebäudesanierung

Im Rahmen einer bauphysikalischen und energetischen Sanierungsberatung wurde im Vorfeld die vorhandene Bausubstanz auch thermografisch untersucht. Hierbei wurde dem Bauherrn durch die Thermogramme deutlich sichtbar gemacht, dass die vorhandene Bausubstanz (Erbauungsjahr 1932) den heutigen Wärmedämmanforderungen in keiner Weise mehr genügt. Stellvertretend hierfür ist in Abb. 11 ein Thermogramm dargestellt, das den ursprünglichen Bestand zeigt. Der Standort des Heizkörpers befindet sich direkt unter dem linken Fenster und ist durch eine deutliche lokale Temperaturerhöhung der Oberflächentemperatur zu erkennen. Das Zimmer auf der rechten Ansichtseite wurde zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht planmäßig beheizt und hebt sich daher von der beheizten Seite deutlich ab.

Im ausgebauten Dachbereich (linksseitig vom Dachflächenfenster bis ca. 1 m rechts des Dachflächenfensters) befindet sich ein Bad. Hier wurde im Bereich des Deckenanschlusses eine Undichtigkeit festgestellt, die bereits zu einer deutlichen Erwärmung der außenliegenden Dachziegel führte. Diese Fehlstelle war durch die



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
21.05.2003 nachmittags	ca. +18 °C	ca. +22 °C	bedeckter Himmel, nur diffuse Einstrahlung

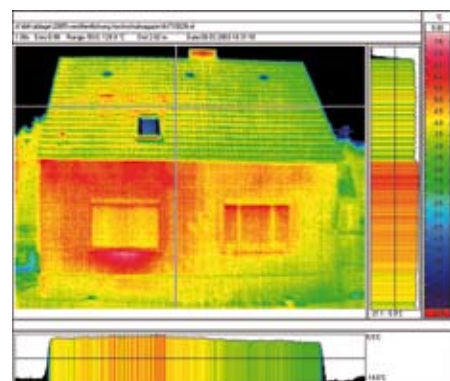
Abb. 10: Thermogramm der Druckbogen-Zugband-Konstruktion, Temperaturerhöhung der tragenden Stahlprofile mit zunehmender Höhe, hier etwa 3 Kelvin

Thermografiertechnik schnell und präzise zu lokalisieren.

Nach der Durchführung der Wärmedämm-Maßnahmen an den Außenwänden (Aufbringen eines Wärmedämmverbundsystems) und im Dachbereich wurde das Gebäude zur Dokumentation nochmals thermografiert. In Abb. 12 wird das Thermogramm mit der gleichen Skalierung wie in Abb. 11 gezeigt. Die Oberflächentemperatur der wärmedämmten Bereiche ist gleichmäßig und ohne erkennbare Fehlstellen. Eine derartige Aufnahme ist charakteristisch für ein gut wärmedämmtes Gebäude. Der Sockelbereich war zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht gedämmt, an dieser Stelle ist daher noch ein deutlicher Temperatur sprung sichtbar.

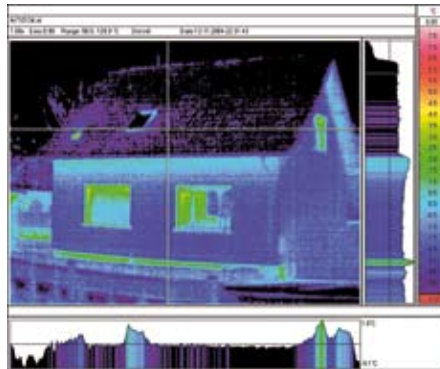
Bei gut wärmedämmten und nachgewiesenen mangelfreien Gebäuden tritt eine typische Erscheinung auf: Unterhalb

von Vorsprüngen (Dächer, Fensteröffnungen) ist oft ein Aufstauen von durch Verlustwärme erwärmter Außenluft zu beobachten. Das Abströmen der erwärmten und somit leichteren Luft kann durch die Bauform behindert sein und führt so zu einer geringen Erwärmung dieser »geschützten« Bereiche. Im Thermogramm erscheinen diese Bereiche dann wärmer. Dieser Effekt kennzeichnet in diesem Fall keine Schwachstelle und ist bei der Interpretation von Thermogrammen zu berücksichtigen. Hinzuzufügen bleibt, dass dieses Phänomen meist nur bei windstillen Wetterlagen beobachtet wird; bei stärkerer Belüftung der Oberflächen kann sich der »Warmluftschleier« durch die stärkere Belüftung nicht ausbilden. Liegen natürlich an den betreffenden Stellen Fehlstellen und Mängel vor, ist zunächst die Ursache der lokal erhöhten Temperatur in diesem Kontext zu untersuchen.



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
08.03.2003 abends	ca. -3 °C	ca. +22 °C	Gebäude wurde 1932 erbaut (Hohlblocksteine)

Abb. 11: Aufnahme vor Durchführung der energetischen Gebäudesanierung



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
13.11.2004 abends	ca. -1 °C	ca. +22 °C	Sockel noch nicht gedämmt, warmer Bereich auf der Dachfläche stammt von einem Entlüftungsrohr (Bad)

Abb. 12: Aufnahme nach Durchführung von Wärmedämm-Maßnahmen am Dach und an den Außenwänden, Sockelbereich noch nicht gedämmt, Fenster noch nicht gewechselt

7.2 Ortung von Schallbrücken bei Reihenhaustrennfugen

In einer Reihenhaus-Siedlung wurden durch Messungen des Luftschalldämm-Maßes R'_{w} teilweise schlechte Werte der Luftschalldämmung der ansonsten gleichartig aufgebauten Gebäudetrennwände festgestellt (Aufbau der Trennwände in Abb. 13). Während einige Reihenhaustrennwände der noch nicht bewohnten Gebäude sehr gute Schalldämm-Maße von etwa $R'_{w} = 66$ dB aufwiesen, gab es

auch Trennwände mit unzureichenden Messwerten von $R'_{w} = 54$ dB.

Aufgrund der Ausführung des Rohbaus wurde vermutet, dass bei der Herstellung der Deckenkonstruktion Betonreste in die Fuge zwischen den Mauerwerkswänden gelangt sind. Ist dies der Fall, ist eine erhebliche Verschlechterung des Schalldämm-Maßes sehr wahrscheinlich.

Zur Ortung der Schallbrücken mit Hilfe der Thermografie wurde ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen beiden

Seiten der Trennwand erzeugt. Hierzu wurde die eine Wohnung etwa zehn Stunden vor den Untersuchungen durch Heißluftheizungen auf etwa +32 °C aufgeheizt. In der anderen Wohnung herrschten die zum Zeitpunkt des Ortstermins vorhandenen Außenlufttemperaturen von etwa +15 °C.

Die Auswertung der Thermografien zeigte lokale Temperaturerhöhungen (vgl. Abb. 14) in Bereichen, an denen nach endoskopischer Untersuchung bzw. Bauteilöffnung fehlendes Dämmmaterial bzw. Schallbrückenbildungen vorhanden waren. Auf Grund der vorgenommenen thermografischen Untersuchungen konnten bei diesem Bauobjekt einige kritische Schallbrücken aufgezeigt und anschließend beseitigt werden.

Ergänzend ist für diese Anwendung der Thermografie noch zu erwähnen: Da das Schalldämm-Maß auch bei bereits kleinen, punktuellen Schallbrücken deutlich abfällt, diese jedoch durch die ihre geringe Wärmebrückenwirkung bei thermografischen Aufnahmen nicht auffallen, können mit diesem Verfahren sicherlich nicht alle Schallbrücken aufgedeckt werden.

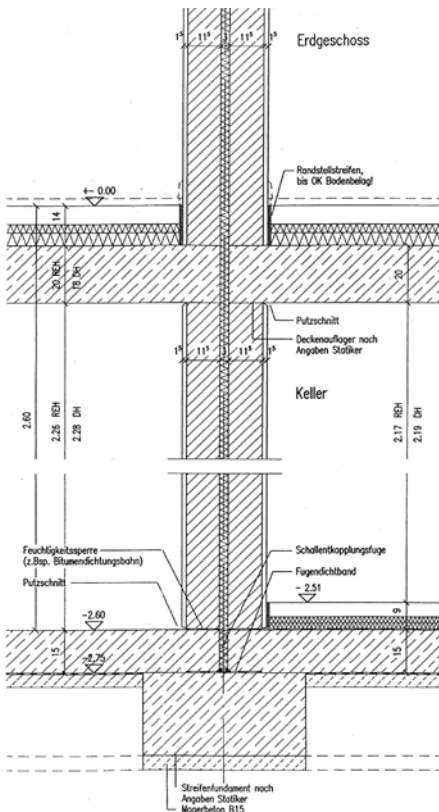
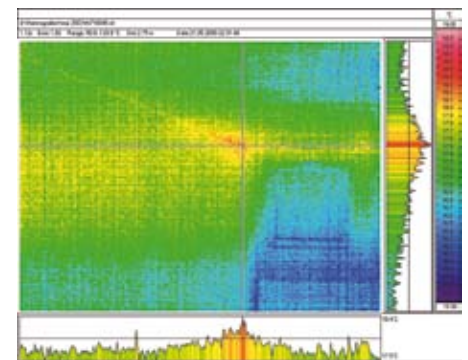


Abb. 13: Geplante Konstruktion der Reihenhaustrennwände



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
22.05.2003 nachts	ca. +15 °C	ca. +32 °C	Erzeugung eines deutlichen Temperaturunterschiedes durch starke Beheizung der Wohnung 2 mit Heißluftgebläse. Der Untersuchungszeitpunkt ist nicht optimal, da das Temperaturgefälle auf Grund der relativ hohen Außenlufttemperaturen sehr aufwendig erzeugt werden musste.

Abb. 14: Einbindung der massiven Decke über dem Kellergeschoss in die Mauerwerkstrennwand, erhöhte Oberflächentemperatur nahe des Fensters; hier wurden bei der späteren Öffnung eine fehlende Wärmedämmung in Deckenhöhe und Betonreste festgestellt.

8 Hinterlüftete Außenwandkonstruktionen

Bei hinterlüfteten Außenwandkonstruktionen ist in der Regel eine etwa 4 bis 6 cm dicke Luftschicht zwischen Vorsatz- und Wärmedämmschicht vorgesehen, die über Lüftungsschlitze am unteren und oberen Rand der Vorsatzschicht mit der Außenluft in Verbindung steht. Hierdurch soll erreicht werden, dass die Zwischenluft zirkuliert und eventuell eingedrungene Feuchtigkeit (von außen durch Schlagregen oder infolge Dampfdiffusion) wieder abgeführt werden kann (Abb. 15).

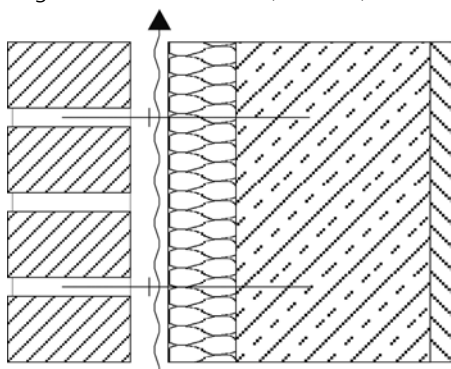


Abb. 15: Konstruktiver Aufbau einer hinterlüfteten Wandkonstruktion

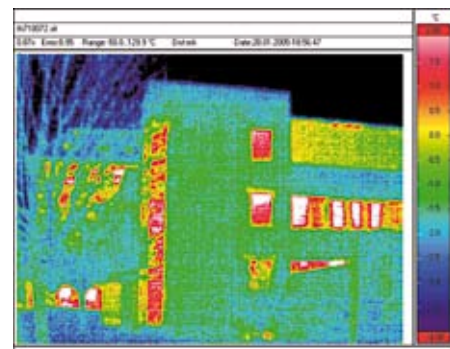
In wärmetechnischer Hinsicht führt diese Konstruktionspraxis dazu, dass die Vorsatzschicht eine nahezu gleichmäßige Temperatur annimmt (Abb. 16) und hinter der Lüftungsebene eventuell vorhandene konstruktiv bedingte Temperaturunterschiede nicht ermittelt werden können. Derartige Konstruktionen werden daher sinnvollerweise nur von innen thermografiert.

9 Zusammenfassung

Die vorherigen Kapitel und Beispiele zeigen die vielfältigen Möglichkeiten bei der Anwendung der Infrarot-Technik auf. In Kurzform sollen an dieser Stelle die zu beachtenden Einflüsse bei der Erstellung von Thermogrammen dargestellt werden, wobei deren Bedeutung und Tragweite durch die angegebenen Stichworte nur kurz umrissen werden. Die angegebenen Hinweise sind nicht starr zu verstehen, im Rahmen der Messaufgabe könnten sich andere Kriterien als maßgebend darstellen.

9.1 Allgemeine Voraussetzungen Anforderungen an Personal

- Das Personal besitzt fundierte Kenntnisse und Erfahrungen im Bereich der (Bau)Physik, Messtechnik und allgemeinen Bautechnik.



Aufnahmedatum	Temperaturrandbedingungen		weitere Informationen
	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	
28.01.2005 vormittags	ca. -1 °C	ca. +22 °C	hinterlüftete, zweischalige Außenwandkonstruktion

Abb. 16: Hinterlüftete Wandkonstruktion, durch ›Homogenisierung‹ der hinterlüfteten Vormauerschale sind kaum Temperaturunterschiede zu erkennen.

9.2 Anforderungen an Thermografiegeräte

- Das verwendete Kamera-System ist für die Durchführung von bauthermografischen Aufnahmen hinsichtlich der thermischen, geometrischen und zeitlichen Auflösung, des Temperaturbereichs sowie der Detektorempfindlichkeit bei den zu erwartenden Messtemperaturen geeignet.
- Die Auswertesoftware ist zur Bearbeitung der aufgenommenen Thermogramme und zur Erstellung eines aussagekräftigen Berichtes der durchgeführten Untersuchung geeignet.

9.3 Durchführung der thermografischen Untersuchung

Meteorologische Randbedingungen

- Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen ausreichend hoch und mit geringen Schwankungen.
- Durchführung von Außenthermografien vor Sonnenaufgang bzw. Thermogramme ohne Einfluss direkter Sonneneinstrahlung aufzeichnen.
- Verfälschung der von außen aufgenommenen Thermogramme bei hohen Windgeschwindigkeiten möglich (konvektiver Wärmeübergang), daher unter Umständen windstilles bzw. -ruhiges Wetter abwarten.

Vorbereitung thermografischer Untersuchungen

- Ortsbesichtigung im Vorfeld der Untersuchungen und Feststellung des vorhandenen Konstruktionsaufbaus aus Plänen, Baubeschreibung oder Probeöffnungen.
- Gleichmäßige und ausreichende Beheizung der Gebäude im Vorfeld der

- Thermografie (Öffnen der Innentüren zur gleichmäßigen Erwärmung), evtl. auch Umräumung von Einrichtungsgegenständen vor der Beheizung.
- Grundsätzliche Informationen der Eigentümer, Mieter und Nachbarn zur Durchführung der Thermografie, um ungewollte Alarmierungen (Polizei) bei der nächtlichen Thermografie zu vermeiden, Abklärung der Thermografiestandorte.
- Anfertigung von Normalbildern als Referenzbilder für die Thermogramme (vor, während oder nach Anfertigung der Thermogramme).

Einfluss der Messumgebung

- Messabstand so gering wie möglich halten (Einfluss der Atmosphäre, Messfleckgröße).
- Keine Thermografie bei Nebel, Regen, Schnee (Verrauschen des Thermogramms).
- Einfluss der reflektierten Umgebungsstrahlung einschätzen und gegebenenfalls Strahlungstemperatur der Umgebung messen.

Einfluss des zu messenden Körpers (Oberfläche)

- Emissionsgrade der thermografierten Oberflächen sollten bekannt sein, falls die Emissionsgrade nur abschätzend anzugeben sind, sind auch die im Thermogramm angegebenen Absoluttemperaturen bezüglich der Genauigkeit kritisch zu hinterfragen.
- Einfluss von Reflektionen auf den Oberflächen sind zu beachten (z.B. an Verglasungen).

Erfassung signifikanter Einflussgrößen

Zur Erstellung des thermografischen Berichtes und evtl. zur Bearbeitung der Thermogramme ist die messtechnische Erfassung einiger Randbedingungen notwendig:

- Datum und Uhrzeit der Messung
- Messabstand zwischen Messobjekt und Aufnahmegerät (evtl. zur Bestimmung des Einflusses beim Durchgang durch die Atmosphäre)
- Außenlufttemperatur zum Messzeitpunkt
- Entwicklung der Außenlufttemperatur bis etwa 24 h vor der Untersuchung (zur Beurteilung der allgemeinen Klimasituation)
- relative Luftfeuchte im Bereich der Messumgebung (evtl. zur Bestimmung des Einflusses beim Durchgang durch die Atmosphäre)
- Innenlufttemperatur (zur Beurteilung der allgemeinen Klimasituation)
- Windgeschwindigkeit (Einfluss des konvektiven Wärmeübergangs)
- evtl. Erfassung von Oberflächentemperaturen mit üblichen Messverfahren als Referenz zu den Thermogrammen (Emissionswertproblematik, Problematik der Reflexion der Umgebungsstrahlung bzw. Hintergrundstrahlung)
- Abschätzung bzw. Erfassung der Strahlungstemperatur des Hintergrundes (θ_{h}), bei Aufnahme der Thermogramme von außen liefern evtl. die klimatischen Randbedingungen Hinweise (bewölkter Himmel – Strahlungstemperatur nahe der Lufttemperatur, klarer Himmel – Strahlungstemperatur meist deutlich unterhalb der Lufttemperatur)

9.4 Erstellung eines Untersuchungsberichtes

Grundsätzlich hängt die Gestaltung und der Inhalt eines Untersuchungsberichtes bzw. -protokolls von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Als Bestandteile eines Berichtes sind im Allgemeinen folgende Angaben sinnvoll:

- Zweck und Ziel der Thermografie und Beschreibung des Messobjektes (z. B. Aufbau der Konstruktion, schwere/leichte Bauweise usw.)
- Aufnahmezeitpunkt, Klimadaten, Besonderheiten bei der Aufnahme
- Angaben zur verwendeten Thermografie-technik und Software
- Thermogramme mit Lagebezug in Grundriss- oder Ansichtsplänen, reale Fotoaufnahmen
- Erläuterung der Thermogramme, Be-

wertung, Angaben von Oberflächentemperaturen bzw. Temperaturunterschieden (Genauigkeit von absoluten Temperaturangaben beachten)

- Schlussfolgerungen hinsichtlich der Aufgabenstellung.

Literaturverzeichnis

- [1] ASTM C 1046, Ausgabe: 1995: Temperatur- und Wärmeflussmessungen an zur Umman- telung dienenden Bauteilen
- [2] ASTM C 1060, Ausgabe: 1990: Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings (Grundlagen für die thermografischen Überwachung von Isolierungen im Holzfachwerkbau)
- [3] ASTM D 4788, Ausgabe: 2003: Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography
- [4] Bonk, M., Anders, F.: Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz, erschienen in der Reihe Schadenfreies Bauen, Band 32, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004
- [5] DIN EN 473, Ausgabe: 2001-03 und Änderung A1 von 2003-04: Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung – Allgemeine Grundlagen
- [6] DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, insbesondere Teile 1 bis 8, Ausgaben der Teile 1982 und 1984
- [7] DIN EN 13 187, Ausgabe: 1999-05: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen, Infrarot-Verfahren
- [8] Entwurf – DIN 54162, Ausgabe: 2005-11: Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal im Verfahren der Infrarot-Thermografie – Allgemeine und spezielle Grundlagen für Stufe 1, 2 und 3
- [9] DIN 54190-1, Ausgabe: 2004-08: Zerstörungsfreie Prüfung, Thermografische Prüfung, Allgemeine Grundlagen
- [5] DIN 54190-2, Ausgabe: 2005-08: Zerstörungsfreie Prüfung, Thermografische Prüfung, Geräte
- [11] DIN 54190-3, Ausgabe: 2006-02: Zerstörungsfreie Prüfung, Thermografische Prüfung, Begriffe
- [12] Fouad, N.A., Richter, T.: Leitfaden Thermografie im Bauwesen, Fraunhofer IRB Verlag, 2006
- [13] Gubareff, G.G., Jansen, J.E., et.al.: Thermal Radiation Property Survey, Honeywell Research Center, Minneapolis, Minnesota, 1960
- [14] Leitfaden für Anwender der Infrarotthermografie bei instationären Temperaturverhältnissen zur Feststellung versteckter Bau- fehler, Fraunhofer-Institut für solare Energie-

systeme ISE, Abschlussbericht ToS4-AR-9910-E01, Thermografie im Bauwesen, 1999

- [15] Schuster, Kolobrodov: »Infrarotthermografie«, 2. Auflage 2004, Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- [16] Tingwaldt, D.P., Kunz, H.: Optische Temperaturmessung in: Zahlenwerk und Funktionen, 6. Auflage, IV/4a Technik, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967
- [17] VATH (Verband für angewandte Thermografie e.V.): Richtlinie Bauthermografie, Stand Oktober 2007 und Richtlinie Leckortung mit Thermografie, Stand Mai 2007
- [18] VDI/VDE 3511, Blatt 4: Technische Temperaturmessungen, Strahlungsthermometrie, Januar 1995

Kontakt/Information

Univ. Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad
 Leibniz Universität Hannover, Institut für Bauphysik
 Fachgebiete Bauphysik, Holzbau, Bauplanung und Bauwerkserhaltung
 Gesellschafter der Ingenieurgesellschaft CRP GmbH
 ö.b.u.v. Sachverständiger für Bauphysik und vorbeugenden Brandschutz
 Leibniz Universität Hannover
 Fakultät Bauingenieurwesen und Geodäsie
 Institut für Bauphysik
 Appelstr. 9a
 30167 Hannover
 Tel: 0511/762-2404
 E-Mail: fouad@ibh.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Torsten Richter
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Leibniz Universität Hannover, Fakultät Bauingenieurwesen und Geodäsie
 Mitarbeit in Ingenieur- und Sachverständigenbüros in Hannover und Berlin
 richter@ibh.uni-hannover.de

Das Buch zum Thema



- Theorie
- Anwendungsgebiete
- praktische Umsetzung

Leitfaden Thermografie im Bauwesen

Nabil A. Fouad, Torsten Richter
 2., unveränderte Auflage 2007, 127 Seiten,
 207 farb. Abbildungen, 49 Tabellen, Kartoniert
 ISBN 978-3-8167-7324-5 | IRB Verlag
 € 35,- | CHF 59,-

Bestellung:

Tel. 0711/970-2500 | Fax 0711/970-2508
 E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de