

248



BK-Mi 2374
1

Projekt: IR-Thermografie im Bauwesen

II 13 -
Geschäftsz.: BI 5-80 01 98-8

Kurzbericht

Ziel des Projektes war die systematische Untersuchung der Auswirkung der Umgebungsbedingungen und der verwendeten Ausrüstung beim Einsatz der Thermografie zur Visualisierung versteckter Verarbeitungsfehler oder Bauschäden. Die Zuverlässigkeit der Methode sollte verbessert werden.

Die Untersuchungen wurden schwerpunktmäßig anhand mehrerer Testaufbauten mit gezielt eingebauten Fehlern durchgeführt. Sowohl thermografische Messungen als auch punktuelle Langzeitmessungen von Oberflächentemperaturen führten zu konkreten Schlußfolgerungen, die im Leitfaden für Anwender zusammengefaßt sind.

Im Rahmen des Projektes wurde der Einsatz der Thermografie zur Visualisierung versteckter Fehler und Schäden am Bau bei typisch instationären Temperaturverhältnissen, bei Sonneneinstrahlung oder kontrollierter Aufheizung, zum ersten Mal systematisch untersucht. Vor- und Nachteile, günstige und ungünstige Situationen sind im Leitfaden dargestellt.

Leitfaden für Anwender der Infrarotthermografie bei instationären Temperaturverhältnissen zur Feststellung versteckter Baufehler

1. Empfohlene Ausrüstung

Bezüglich des Wellenlängenbereichs sind für Anwendungen im Bauwesen (relevante Temperaturen -20°C bis +80°C) Kameras, die im sogenannten langwelligen atmosphärischen Fenster (8 - 14µm) empfindlichen sind, geeignet. Grund dafür ist einerseits, daß das Maximum der emittierten Wärmestrahlung im Fall der relevanten Temperaturen diesem Bereich entspricht. Andererseits ist die Transmission der Atmosphäre im langwelligen atmosphärischen Fenster wesentlich höher als im kurzwelligen (3 - 5µm). Der langwellige Bereich ist somit für Messungen im Freien und über große Entfernungen geeignet.

Für die Anwendung der Thermografie zur Feststellung versteckter Baufehler oder Schäden ist eine möglichst hohe Temperaturauflösung (möglichst besser als 0,1°) und damit verbundene Bildqualität wesentlich. Da Kamerasysteme mit

Einzeldetektor (sogenannte "Scanner" - das Meßobjekt wird mittels eines mechanischen Ablensystems "gescannt") zur Zeit noch eine bessere Temporaufauflösung bieten im Vergleich zu den neuen Focal Plane Array (FPA) Kameras mit Detektormatrix, sind sie zu empfehlen. Das Kühlsystem sollte die nötige Auflösung gewährleisten.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die räumliche Auflösung der Kamera. 1,5 mrad (bei einer Objektentfernung von 1m beträgt der Durchmesser des Einzelflecks, der jedem Pixel zugeordnet ist, 1,5 mm) ist ein Wert, den gute, kommerzielle Kamerasysteme zur Zeit aufweisen, und der im Falle vorliegender Anwendung auch gewährleistet sein sollte.

Kamera und Zubehör sollten für den Außenbetrieb geeignet sein.

2. Einfluß der Umgebungsbedingungen

2.1 Allgemeine Hinweise

Messungen bei **Regen** oder sehr **hoher Luftfeuchtigkeit** sollten vermieden werden. Auch im Bereich des atmosphärischen Fensters zwischen 8 und 14 μm wird Strahlung von Wassermolekülen absorbiert. Wenn sich lokal ein Wasserfilm auf die zu vermessende Fläche gelegt hat, so kann dieser zu einer lokalen Veränderung des Emissionsgrades der Oberfläche und folglich zu einer verfälschten Temperaturmessung führen. Andererseits entziehen verdunstende Wassertropfen der Oberfläche Wärme, so daß lokal eine zu tiefe Temperatur gemessen werden kann.

Bezüglich des **Windes** sollten Messungen bei gleichmäßigen Windverhältnissen mit Windgeschwindigkeiten unter etwa 2m/s durchgeführt werden. Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann sich eine turbulente Strömung über der Testfläche ausbilden. Eine ungleichförmige Temperaturverteilung ergibt sich dann aufgrund lokal unterschiedlicher Wärmeübergänge und kann zu Fehlinterpretationen führen.

Auch sonstige **externe Quellen für Temperaturunterschiede** an der zu vermessenden Fläche sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Diesbezüglich sind Teilverschattungseffekte und die Reflexion von Objekten aus der Umgebung zu erwähnen. Der Einfluß von Umgebungsreflexionen ist um so ausgeprägter, je niedriger die Emissivität des zu vermessenden Objektes ist. Im Falle üblicher Fassadenputze ist die Emissivität mit etwa 0,9 jedoch in der Regel hoch.

2.2 Typische Tageskategorien

Es folgen Empfehlungen für Messungen bei unterschiedlichen jahreszeit- und witterungsbedingten Umgebungsbedingungen,:

1. Hoher Temperaturunterschied zwischen innen und außen, keine oder niedrige Einstrahlung; typisch für: **Wintertag, bedeckt**

Diese Randbedingungen werden in der Regel bei thermografischen Messungen am Bau angestrebt.

Gemessen wird aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen innen und außen, bei möglichst konstanten Bedingungen. Geeignet zur Visualisierung sind dann Fehler oder Schäden, die eine signifikante lokale Änderung im Wärmedurchlaß der Wand bewirken (Wärmebrücken, z.B. Fuge mit Mörtel zwischen Dämmplatten). Fehler, die den Wärmedurchlaß der Wand nur vernachlässigbar beeinflussen (z.B. stark oberflächenlokalisierte Verarbeitungsfehler wie eine lokale Dämmplattenvertiefung oder Dämmplattenversatz) sind bei diesen Bedingungen oft thermografisch nicht feststellbar.

Sehr niedrige Einstrahlungswerte (unter $20-30 \text{ W/m}^2$) stören die Visualisierung der Fehlerstellen in der Regel nicht. Trotzdem stellt die Einstrahlung in diesem Fall einen Unsicherheitsfaktor dar, da sie im Vergleich zum Temperaturunterschied innen - außen zu einem gegenläufigen Effekt führt. Ob und wann sich die Effekte gegenseitig aufheben und kein meßbarer Temperaturunterschied an der Oberfläche zustande kommt, hängt von der Beschaffenheit der Fehlerstelle, dem Temperaturunterschied innen - außen und der Einstrahlung ab. Kann es nicht vermieden werden, auch bei niedrigen Einstrahlungswerten zu messen, so sollte im Falle variabler Einstrahlung (z.B. bei Sonnenaufgang oder Untergang) über 1 bis 2 Stunden eine Aufnahmenssequenz gemacht werden. Auch wenn kurzfristig der Nulldurchgang der Temperaturdifferenz an der Oberfläche zustande kommt, werden so, bei typisch instationären variablen Bedingungen, bestehende Fehlerstellen doch noch sichtbar gemacht.

2. Hoher Temperaturunterschied zwischen innen und außen, hohe Einstrahlung ohne starke Schwankungen; typisch für: **Wintertag, klar**

Unter diesen Bedingungen sollten Fehlerstellen vermessen werden, die keine große Variation des Wärmedurchgangs der Wand bewirken und nahe der Außenoberfläche lokalisiert sind (z.B. Dämmplattenvertiefung oder Plattenversatz in Wärmedämmverbundsystemen). Dadurch, daß die lokale Variation im Wärmedurchgang nur sehr gering ist, wird die Auswirkung des ΔT innen - außen auf die Temperaturverteilung an der Oberfläche nur gering sein. Durch die an der Oberfläche lokal hohen Wärmeströme bei Einstrahlung werden diese Strukturen jedoch thermografisch sichtbar.

Fehlerstellen, die den Wärmedurchlaß der gesamten Wand signifikant beeinflussen (Wärmebrücken) sollten bei hohen Werten des Temperaturunterschiedes innen - außen in der kalten Jahreszeit vorzüglich vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang vermessen werden (unter Punkt 1 diskutiert).

3. Hoher Temperaturunterschied zwischen innen und außen, hohe Einstrahlung mit starken Schwankungen über den Tag; typisch für: **Wintertag, wolkig**

Kurzzeitige Variationen der Einstrahlungswerte widerspiegeln sich in der Variation der Oberflächentemperaturen. Diese Fluktuationen führen bei thermografischer Beobachtung zu einem schnell variierenden Erscheinungsbild der Fassade. Thermografische Messungen sind, wegen wiederholter Aufheiz- und Abkühlprozesse, bei stark variierenden Einstrahlungswerten unzuverlässig und sollten, unabhängig von der Jahreszeit, vermieden werden.

Während der kalten Jahreszeit überlagert sich der fluktuierenden Einwirkung der Einstrahlung zusätzlich ein gegenläufiger, durch den Temperaturunterschied innen – außen bedingter Effekt, der in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Fehlerstelle (Wärmebrückeneffekt), mehr oder weniger ausgeprägt ist.

4. Geringer Temperaturunterschied zwischen innen und außen, hohe Einstrahlung ohne kurzfristige Fluktuationen über den Tag; typisch für: **Sommertag, klar**

Auch im Sommer, wenn die Außenlufttemperatur nachts nur geringfügig unter der Raumlufttemperatur liegt und tagsüber höher ist als diese, ist es möglich thermografische Untersuchungen versteckter Fehlerstellen an Fassaden durchzuführen. Sowohl Fehler, die den Wärmedurchgang der Wand stark beeinflussen als auch oberflächenrelevante Modifikationen können bei Einstrahlung, ohne kurzfristige starke Fluktuationen, gut visualisiert werden. Die Messungen sollten vorzüglich bei gleichzeitig hohen Einstrahlungswerten und Temperaturunterschieden innen - außen (mit der Außenlufttemperatur über der

Raumlufttemperatur) durchgeführt werden, da beide Effekte jetzt in derselben Richtung wirken. So besteht z.B. in der Aufheizphase zwischen 10 und 12 Uhr die Möglichkeit sowohl Fehlerstellen, die sich hauptsächlich aufgrund abweichender Speichereffekte von der ungestörten Umgebung abheben (z.B. Dämmplattenversatz), als auch Strukturen, die hauptsächlich aufgrund des Temperaturunterschiedes innen - außen (diesmal mit höherer Temperatur außen) sichtbar werden, (z.B. Dübel) gut zu visualisieren. Messungen in der Abkühlphase, gegen abend, sind dann relevant wenn Strukturen, die sich hauptsächlich durch eine unterschiedliche Speicherfähigkeit von der Umgebung abheben, visualisiert werden sollen, da dann der Temperaturunterschied innen - außen bereits geringer ist.

Es muß jedoch auch darauf hingewiesen werden, daß Untersuchungen am Bau zur Visualisierung von Fehlerstellen oder Schäden, die bei Sonneneinstrahlung durchgeführt werden, stark auf Störungen reagieren. Die Außenfläche wird zwar stark aufgeheizt, Wind, Einstrahlungsschwankungen oder Teilverschattungseffekte können aber leicht Änderungen in der Temperaturverteilung bewirken, die in derselben Größenordnung sind wie die Auswirkung der Fehlerstellen. Deshalb ist es bei Messungen bei Sonneneinstrahlung immer empfehlenswert nicht nur Einzelaufnahmen sondern über etwa 1 Stunde aufgenommene Sequenzaufnahmen zu speichern und auszuwerten.

5. Geringer Temperaturunterschied zwischen innen und außen, niedrige oder fluktuierende Einstrahlung über den Tag; typisch für: **Sommertag bedeckt oder wolkig**

Bei niedrigen Temperaturunterschieden zwischen innen und außen (nachts niedrigere und tags höhere Außenlufttemperatur im Vergleich zur Raumlufttemperatur) und niedriger und/oder fluktuierender Einstrahlung sind keine günstigen Voraussetzungen für thermografische Messungen gegeben. Fehler, die eine erhebliche Änderung des Wärmedurchlasses der Wand bewirken, können u.U. nachts visualisiert werden, wenn der Temperaturunterschied zwischen innen und außen über mehrere Stunden über 5° beträgt.

2.3 Messungen bei kontrolliert aufgeheizter Testfläche

Messungen bei kontrolliert aufgeheizter Testfläche sind möglich. Die Aufheizung mittels eines IR-Lampenfeldes wurde getestet. Grundsätzlich sollte, in Abhängigkeit von der Leistung der Heizvorrichtung, über mindestens 1 - 2 Stunden aufgeheizt werden, um auch die tieferen Schichten aufzuwärmen. Die Testwand sollte im Abkühlverhalten vermessen werden, in der Regel nicht früher als eine halbe Stunde nach Beenden des Aufheizprozesses. Da die Effekte des Aufheizens und Abkühlens auf die Temperaturverteilung an der

Oberfläche von Testwänden mit versteckten Fehlerstellen oder Schäden gegenläufig sind, sollte so der "Nulldurchgang" des Temperaturunterschiedes vermieden werden. Auch sollten sich Strukturen in der Wand auf die Oberflächentemperaturverteilung auswirken und Oberflächenstörungen, die während des Aufheizens zu einem unregelmäßigen thermografischen Erscheinungsbild der Fassade führen, abklingen.

Tatsache ist, daß die Erfahrung mit kontrolliert aufgeheizten Testwänden zur Zeit noch sehr gering ist. Durch den zusätzlichen Aufwand bei der Bereitstellung der Ausrüstung zur flächig gleichförmigen Aufheizung von Fassaden werden die Untersuchungen teurer. Dort wo aufgrund der Ausrichtung der Fassade, wie auch anderer Randbedingungen (z.B. keine oder geringe Teilverschattungseffekte und Umgebungsreflexionen) auch Messungen ohne zusätzliche Aufheizung möglich sind, sollten diese vermieden werden.

Ob sich die thermografische Visualisierung von Verarbeitungsfehlern und Schäden am Bau bei kontrolliert aufgeheizten Testwänden für bestimmte Anwendungen durchsetzen wird, ist noch unklar.

3. Durchführung der Messung

Daß für die Visualisierung versteckter Fehler und Schäden am Bau Kamerasysteme mit möglichst hoher Temperaturauflösung und räumlicher Auflösung zum Einsatz kommen sollten, wurde bereits bei der empfohlenen Ausrüstung diskutiert.

Bezüglich der Aufstellung der Apparatur sollte bei optimaler Fokussierung ein möglichst kleiner Abstand der Kamera zur Testwand angestrebt werden. Bei geringem Abstand der Kamera zur Testfassade erscheinen kritische Stellen im Bild größer, auch kann dann in der Regel ein kleinerer Temperaturbereich für die Aufnahme gewählt werden, so daß auch kleine Temperaturunterschiede mit kontrastierenden Farben dargestellt werden, und die Fehler so optisch leichter zu identifizieren sind.

Auch die endliche räumliche Auflösung der Kamera wirkt sich auf die Visualisierung von Fehlern in Abhängigkeit vom Abstand der Kamera zum Testobjekt aus. Die mittlere Bildpunktauflösung der Kamera zeigt welche reale Fläche auf einen Bildpunkt der Kamera abgebildet wird. Sie hängt vom Bildfeld der Kamera, der Pixelauflösung und dem Abstand der Kamera zum Testobjekt ab. Fehlerstellen bewirken an der Fassadenoberfläche lokal eine Temperaturverteilung. Ist der Abstand der Kamera zur Fassade groß genug, um den räumlichen Bereich mit den höchsten Temperaturwerten nicht aufzulösen, so wird der vermessene maximale Temperaturunterschied jetzt kleiner sein als bei geringerem Abstand der Kamera zur Testwand. Diese Abhängigkeit der Temperaturauflösung vom Abstand Kamera - Testobjekt, aufgrund einer begrenzten räumlichen Auflösung der Apparatur, ist ein weiterer

Grund mit der Kamera möglichst nah an der zu untersuchenden Fassade zu stehen.

Um größere Flächen thermografisch zu untersuchen, sollte von Gesamtaufnahmen von Flächen von 1,5 bis 3 m² ausgegangen werden, die dann unterteilt werden, um die Teilflächen separat mit geringerem Abstand der Kamera aufzunehmen.

Bei senkrechtem Beobachtungswinkel muß im Falle der Vermessung von Flächen, die sich nach dem Lambert - Gesetz verhalten (ist bei rauen Putzoberflächen der Fall), keine Korrektur wegen unterschiedlichen Abstrahlwinkeln innerhalb des Öffnungswinkels der Kamera durchgeführt werden. Beim Abtasten des Objektes durch die Kamera kompensieren eine größere erfaßte Fläche und die nach dem Kosinusetz abnehmende Emissivität einander. Die Temperatur der vermessenen Körper wird über die ganze erfaßte Fläche richtig wiedergegeben.

Wird die Neigung der Kamera variiert, so ergibt sich eine Verzerrung des Bildes und eine Verschlechterung der räumlichen Auflösung. Beide Effekte sind für die Anwendung zur Feststellung von Schäden am Bau von Nachteil. Auch geringe Abweichungen von der wahren Temperaturverteilung sind zu erwarten. Im Falle der hier diskutierten Anwendung sollten möglichst symmetrische Meßbedingungen (Kamera senkrecht zur Fassade) realisiert werden. Wenn Gesamtaufnahmen zur groben Orientierung am Bau oft auch mit geneigter Kamera durchgeführt werden, so sollten die empfohlenen Aufnahmen von Teilflächen, nach Möglichkeit, mit senkrecht ausgerichteter Kamera erfolgen.

4. Rechnerische Nachbildung praxisrelevanter Fälle

Praxisrelevante Anwendungssituationen für die keine experimentelle Erfahrung vorliegt können rechnerisch nachvollzogen werden. In der Regel müssen dazu 3-dimensionale instationäre Berechnungen der Wärmeleitung durch komplexe Fassadenstrukturen durchgeführt werden. Nur wenige Geometrien können näherungsweise 2-dimensional behandelt werden.

Die Simulationen sind anspruchsvoll und zeitintensiv und können für Situationen, für die es inhaltlich und finanziell vertretbar ist, bei Fachinstituten in Auftrag gegeben werden. Ein weiterer Nachteil der Simulationen besteht darin, daß sie für die Praxis oft wichtige Störeinflüsse nur sehr schwer oder gar nicht (mit vertretbarem Aufwand) erfassen. Das ist zum Beispiel bei den störanfälligen Messungen bei Sonneneinstrahlung der Fall.

Praxiserfahrung und experimentelle Untersuchungen bleiben also prioritär beim Aufbau des nötigen Wissens für den effektiven Einsatz der Thermografie zur Visualisierung versteckter Bauschäden.