

Möglichkeiten und Grenzen der Thermografie, Bauforschung an historischen Gebäuden mittels Infrarot-Untersuchung

1. Einleitung

In der Entwicklung der letzten Jahre steigerte sich die geometrische und radiometrischen Auflösung von Wärmebildkameras bei stetig sinkenden Preisen. War die Verwendung von Thermal-kameras aufgrund der hohen Preise lange Zeit spezialisierten Dienstleistern vorbehalten, ist die Thermalkamera heute ein weit verbreitetes Messgerät zur berührungslosen Temperaturmessung. Dabei findet der Umstand, dass dieser berührungslosen Messmethode enge physikalische Grenzen gesetzt sind, aktuell wenig Beachtung. In diesem Beitrag soll vor Allem auf die Physik der Messmethode eingegangen werden, um daraus resultierend die Möglichkeiten und die Grenzen der Thermografie darzustellen und im Weiteren beispielhaft einige Anwendungsmöglichkeiten aufzeigen.

2. Historisches

Die Entdeckung der Infrarot Strahlung wird dem Astronomen, Physiker und Musiker Friedrich Wilhelm Herschel (* 15. November 1738 in Hannover; † 25. August 1822 in Slough) zugeschrieben. Seine Beobachtungen legten den Schluss nahe, dass es neben dem für das menschliche Auge wahrnehmbaren Spektrum des sichtbaren Lichts, noch weitere Strahlung gibt, wie u.a. die Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich des Infrarot. Entsprechend dem heutigen physikalischen Kenntnisstand ist sowohl das sichtbare Licht als auch die Infrarotstrahlung ein Spektralbereich der elektromagnetischen Strahlung.

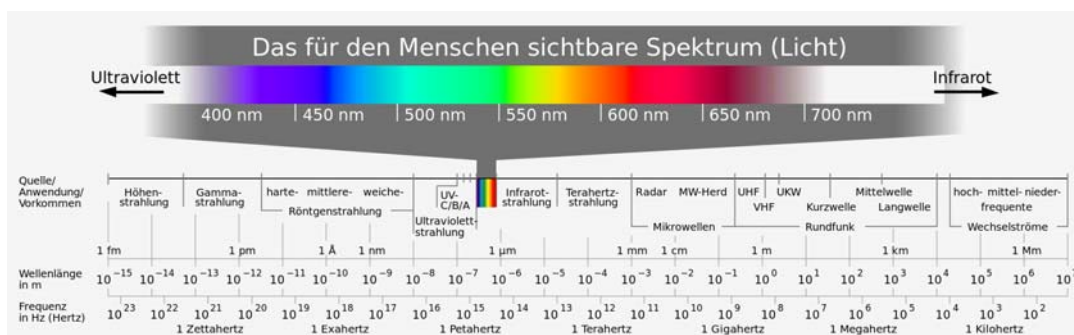


Abb.: 01.: Spektralbereich der elektromagnetischen Strahlung.

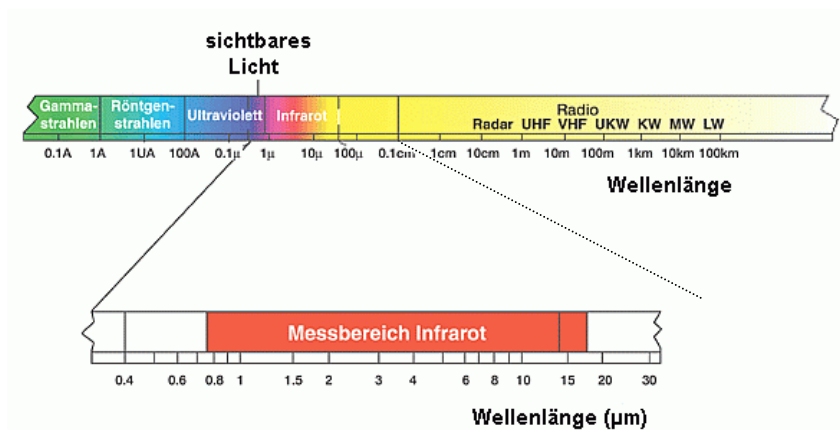


Abb.: 02.: Der für Thermografie genutzte Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung.

3. Die Nutzung der IR-Messtechnik in Abhängigkeit der Wellenlänge

In Abhängigkeit der Durchlässigkeit der Atmosphäre für verschiedene Wellenlängenbereiche ist die Einteilung der einzelnen Wellenlängenbereiche primär durch die damit verbundenen messtechnischen Anwendungsbereiche vorgegeben.

- NIR: 0,78 – 1,4 μm (Near IR oder auch IR-A): Neben dem Einsatz in der künstlerischen Fotografie, wird dieser Spektralbereich zur Überwachung und Beurteilung von Vegetation eingesetzt und findet auch Anwendung in der Gemäldebeurteilung und Gemälderestaurierung, da gewisse Farbmaterialien für diese elektromagnetische Strahlung transparent sind.
- SWIR: 1,4 – 3,0 μm (Short Wave IR oder auch IR-B): Dieser Wellenlängenbereich wird vorrangig in der automatisierten Überwachung im industriellen Bereich eingesetzt, da sich die Wellenlänge gut zur Beobachtung von Hochtemperaturprozessen eignet.
- MWIR: 3,0 – 5,0 μm (Mid wave IR oder auch IR-C): Neben luftgestützten Systemen, welche vorrangig beim Waldbrandmonitoring verwendet werden, kommt dieser Wellenlängenbereich auch bei industriellen messtechnischen Anwendungen zum Einsatz. Die in den vergangenen Jahren in diesem Spektralbereich noch eingesetzten Handkameras werden heute zunehmend durch Langwellenkameras ersetzt.
- LWIR: 5,0 – 15 μm (Longwave IR ebenso auch IR-C): Infrarotkameras mit den typischen Wellenlängen von 7 – 14 μm sind heute die am weitesten verbreiteten Systeme. Sie sind für die typischerweise auch in der Bauthermografie detektierten Temperaturen im Bereich

von 300 Kelvin (ca. 27 Grad Celsius) optimiert und umfassen meist einen Messbereich von minus 40 Grad Celsius bis etwa plus 600 Grad Celsius. Die technologische Entwicklung der letzten Jahre hat bei den in diesem Bereich als Sensoren verwendeten Microbolometern (sog. Focal Plane Arrays; FPA) zu geometrischen Auflösungen bis etwa ein MP (Megapixel) geführt. Für anspruchsvolle und aussagekräftige Bauthermografie ist zumindest eine geometrische Auflösung von 0,3 MP (z.B.: 640 x 480 Pixel) erforderlich. Um die geringsten Wärmeunterschiede zuverlässig detektieren zu können, ist eine qualitativ hochwertige radiometrische (thermische) Auflösung erforderlich. Bei guten Systemen liegt diese radiometrische Auflösung bei unter 35 mK, d.h. Temperaturunterschiede unter 0,04 Grad sind erkennbar. Um den räumlichen Anwendungsbereichen der Bauthermografie zu entsprechen, ist ein System mit Wechseloptiken zweckmäßig. Eine Weitwinkeloptik für beengte Raumsituationen ist ebenso notwendig, wie ein Normal- oder ein Teleobjektiv, um auch weiter entfernte Bereiche mit der erforderlichen hohen geometrischen Auflösung abbilden zu können. Bei der Detektion geringer Temperaturunterschiede fehlt oft der für einen herkömmlichen Autofokus erforderliche thermische Kontrast. Es empfiehlt sich daher die Verwendung eines Messsystems mit der Möglichkeit der manuellen Fokussierung.

- FIR: 15µm – 1000 µm (Far IR ebenso auch IR-C): Die Strahlung in diesem Wellenlängenbereich wird auch Terrahertzstrahlung genannt und reicht mit Wellenlängen bis 1 mm an die oberste Grenze des Infrarotspektrums. Sensoren in diesem Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich detektieren Temperaturstrahlung nahe dem absoluten Nullpunkt und fanden auch beim ‚Herschel Weltraumteleskop‘ Verwendung.

4. Von der Strahlung zur Temperatur

Betrachten wir im Weiteren handelsübliche Infrarot Kameras mit einem Wellenlängenbereich von 7 – 14 µm (LWIR) so werden diese als bildgebendes Messsystem auch ‚Wärmebildkamera‘ oder ‚Thermalkamera‘ genannt. Diese Bezeichnung ist in gewisser Weise irreführend, denn tatsächlich ist das System für diesen Spektralbereich ausschließlich für elektromagnetische Wellen empfindlich. Eine passendere Bezeichnung wäre daher ‚Strahlungsbildkamera‘. Die in den Detektor einer Infrarot-Kamera (IR-Kamera) gelangende Strahlung lässt nämlich nur bedingt direkte Rückschlüsse auf die Temperatur der zu beobachtenden Oberfläche zu. So kommt zu der von einer Oberfläche aufgrund ihrer Eigentemperatur ausgehenden Wärmestrahlung auch ein Anteil der sog. reflektierten Umgebungstemperatur (oft auch als ‚reflektierte Temperatur‘,

„Umgebungstemperatur“, „reflektierte Umgebungtemperaturstrahlung“, „Hintergrundtemperatur“ o. Ä. bezeichnet) hinzu. In diesem Zusammenhang sollte auch nicht unerwähnt bleiben, dass sämtliche Körper welche eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin, d.h. $-273,15\text{ °C}$) haben – also in der Praxis jeder Körper – elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich emittieren. Je wärmer der Körper, desto kurzwelliger und intensiver ist die abgegebene Strahlung. Das diesbezügliche Verhalten wird vom sogenannten Planck'schen Strahlungsgesetz beschrieben.

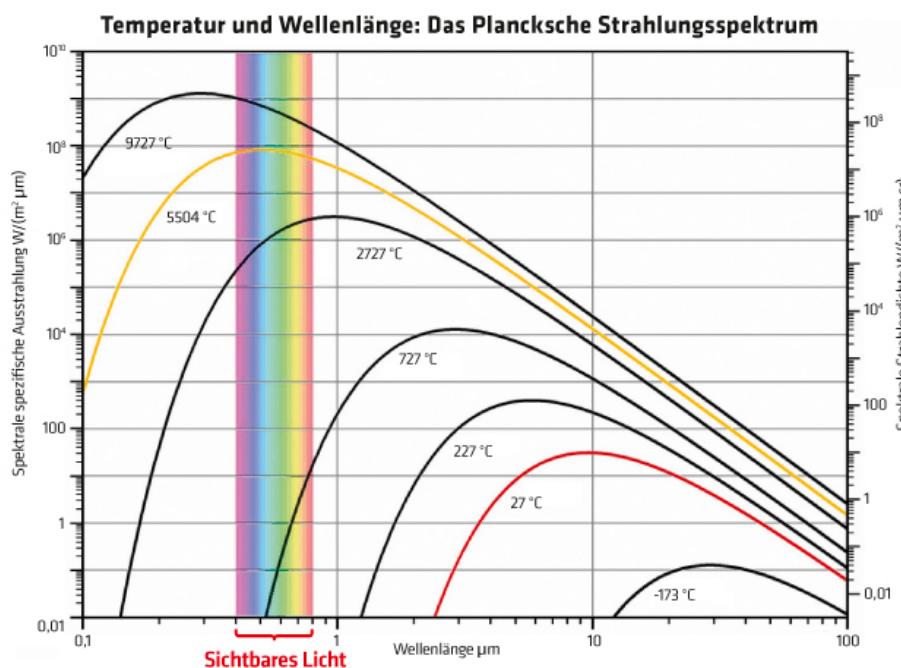


Abb.: 03.: Planck'sches Strahlungsgesetz.

Messtechnisch bedeutet der oben beschriebene Umstand jedoch, dass auf jede zu messende Oberfläche auch Wärmestrahlung aus der gesamten umgebenden Hemisphäre einfällt. Diese einfallende Strahlung wird von der zu befundenden Oberfläche reflektiert und vom Detektor der IR-Kamera miterfasst. Analog zum sichtbaren Licht sei die Vorstellung zulässig, dass jeder Körper der Umgebung – mit einer Temperatur über 0 Kelvin selbst „leuchtet“ und, dass dieses „Leuchten“ die „Helligkeit“ der zu untersuchenden Oberfläche beeinflusst. Zur Veranschaulichung sei auch erwähnt, dass beispielsweise umgebendes Mauerwerk entsprechend seiner Temperatur (z. B.: $+5\text{ °C}$) strahlt, wohingegen ein klarer Himmel nur mit minus 30 bis minus 70 Grad Celsius strahlt. In welchem Ausmaß diese Umgebungtemperaturstrahlung von der zu beobachtenden Oberfläche reflektiert wird, hängt von dessen Emissionskoeffizien-

ten ϵ ab. Dieser Emissionskoeffizient gibt als Maßzahl das Verhältnis von Eigenstrahlung zur reflektierten Strahlung an und liegt – theoretisch – zwischen $\epsilon = 0$ und $\epsilon = 1$. Ein Material mit einem $\epsilon = 0$ wäre ein idealer Spiegel, welcher die eintreffende Strahlung ausschließlich reflektiert und keine eigene Wärmestrahlung emittiert, $\epsilon = 1$ hat ein sogenannter ‚Schwarzer Strahler‘ welcher ausschließlich seine eigene Wärmestrahlung emittiert und keinen Reflexionsanteil besitzt. In der Praxis haben die gängigen Baumaterialien Emissionskoeffizienten zwischen $\epsilon = 0,2$ (Metalle), $\epsilon = 0,85$, $\epsilon = 0,7$ (Kunststoffe), $\epsilon = 0,85$ (Glas) und $\epsilon = 0,92$ (Mauerwerk). Der Reflexionsanteil ist bei höheren Emissionskoeffizienten zwar gering, jedoch verringert sich der Emissionskoeffizienten bei Kondensat und Bauteilfeuchte, womit wieder ein besonderes Augenmerk auf mögliche thermischen Reflexionen zu legen ist, um nicht etwaigen Reflexionsphänomene als vermeintliche Temperaturdifferenzen zu interpretieren.

Strahlung zu Temperatur:	Temperaturreflexionen aus der Umgebung:
1. Emissionskoeffizient ϵ 2. Refl. Temp. aus der Umgebung 3. Lufttemperatur 4. Luftfeuchte 5. Entfernung	<i>Außenthermografie:</i> Himmel (-70 ... -30 °C); Wolken (0... -20 °C); Bäume, Häuser (-10...+10 °C) <i>Innenthermografie:</i> Umgebendes Mauerwerk (15 – 25 °C), Heizkörper (30 – 60 °C), Fußbodenheizung, kalte Fenstergläser

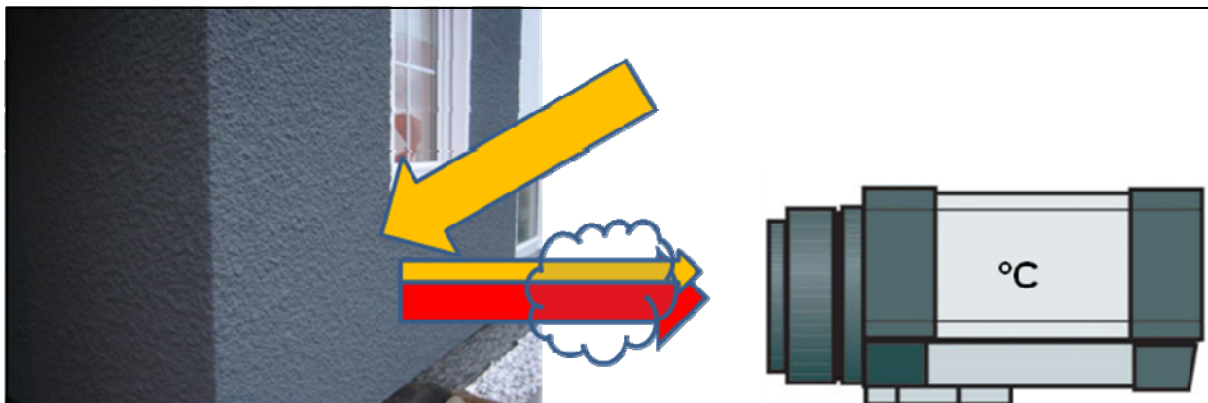


Abb.: 04.: Eigenstrahlung (rot) und Reflexion der Temperaturstrahlung aus der Umgebung (orange) sowie Einfluss der Atmosphäre (Transmission).

Zur Ermittlung der Temperatur der zu beobachtenden Oberfläche aus der auf den Sensor einfallenden Strahlung sind die Temperaturstrahlung der Umgebung und der Emissionskoeffizient unbedingt erforderlich. Einen weiteren maßgeblichen Einfluss auf ein Messergebnis hat die Transmission der Wärmestrahlung durch die Atmosphäre. Dieser Transmissionsanteil wird aus Lufttemperatur, Luftfeuchte und Entfernung der IR-Kamera vom Meßobjekt bestimmt. Der Transmissionsanteil ist bei den in der Bauthermografie üblichen Distanzen verhältnismäßig gering und zudem innerhalb einer Aufnahme konstant.

Wie bereits ausgeführt, gibt jedes Objekt mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt elektromagnetische Strahlung ab. Diese Strahlung der Umgebung wird bei der Bauthermografie anteilmäßig von der Wärmestrahlung der Fassade überlagert. Bei der Außenthermografie sind diese Umgebungstemperaturen die Temperaturen des Himmels, der Wolken sowie jene der umgebenden Objekte oder der umliegenden Vegetation. Unabhängig vom Emissionskoeffizienten ε spielt auch die Oberflächenstruktur im Reflexionsverhalten eine maßgebliche Rolle. Verwitterte und raue Oberflächen reflektieren – analog zur diffusen Streuung – die Umgebungstrahlung der gesamten Hemisphäre. Glatte Oberflächen reflektieren nach dem Prinzip *„Einfallswinkel entspricht dem Ausfallswinkel“* nur Teilbereiche der Umgebung. Die weit verbreitete Aussage, dass sich glatte Oberflächen wegen des hohen Reflexionsanteils nicht zur Thermografie eignen, ist diesbezüglich irreführend. Bei bekanntem Emissionskoeffizienten ε und bekannter Umgebungstemperatur (Umgebungsstrahlung) ist die Temperaturbestimmung eindeutiger als bei rauen Oberflächen, da bei diesen die Anteile der strahlenden Hemisphäre schwer zu quantifizieren ist. Dieser Umstand ist unabhängig vom Emissionskoeffizienten ε . Wie die folgenden Beispiele zeigen, sind entsprechende Reflexionen auch an Materialien mit hohem ε (z.B. Beton oder gebrannter Ton $\varepsilon \sim 0,92$) gut zu erkennen und in der Thermografie entsprechend zu beachten.

Bei Innenaufnahmen ist für die Umgebungsstrahlung meist die Temperatur des umgebenden Mauerwerks anzusetzen. Dabei sind aber Reflexionen von Heizquellen oder Fußbodenheizungen ebenso zu bedenken, wie kalte Fenstergläser. Besonders bei der Befundung von Fensterlaibungen ist zur korrekten Temperaturermittlung der Laibung meist auch die Glastemperatur als Parameter zur Befundauswertung erforderlich. Zur thermografischen Ermittlung der Glastemperatur ist dann ein korrekter Emissionskoeffizient ε für Glas zu verwenden.

5. Lamberteffekt

Der Emissionskoeffizient ϵ als Maß für der Anteil der reflektierten Temperaturstrahlung und ist nicht nur vom Material sondern auch vom Betrachtungswinkel abhängig.

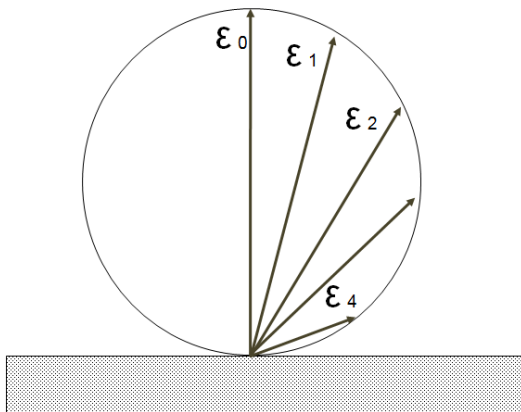


Abb.: 05.: Der Emissionskoeffizient ist abhängig vom Betrachtungswinkel. Flache Beobachtungswinkel verringern den Emissionskoeffizienten und verstärken damit den reflexiven Anteil der Umgebungsstrahlung. ($\epsilon_0 > \epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3 > \epsilon_4$).

6. Auswirkungen der physikalischen Grundlagen der Thermografie in der Praxis

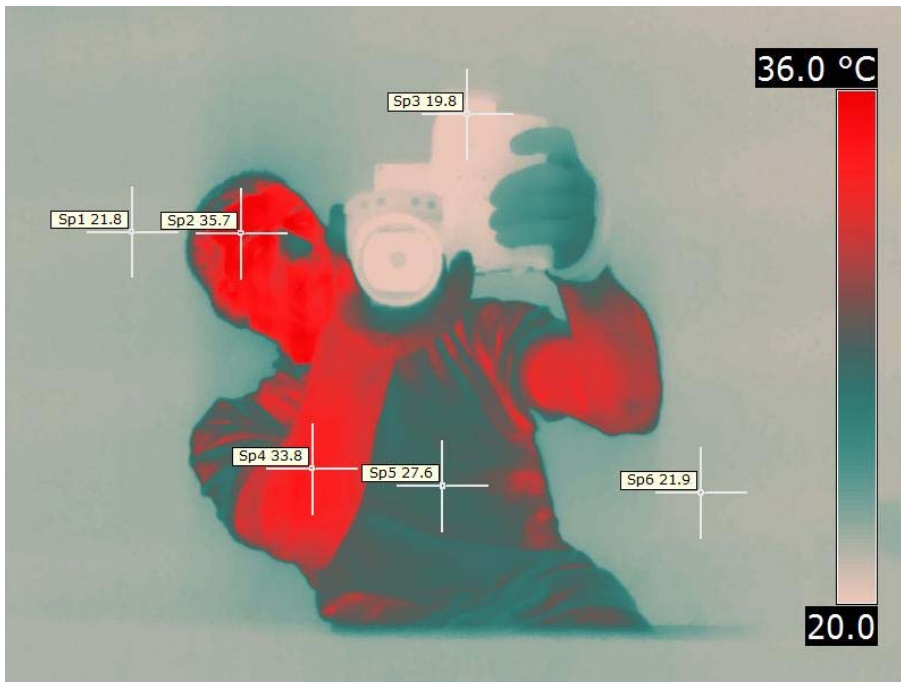


Abb.: 06.: Metallische Oberflächen – hier Aluminium – sind mit ihrer glatten Oberfläche und den geringen Emissionskoeffizienten ideale „Spiegel“ für den in der Thermografie verwendeten langwelligigen Frequenzbereich.

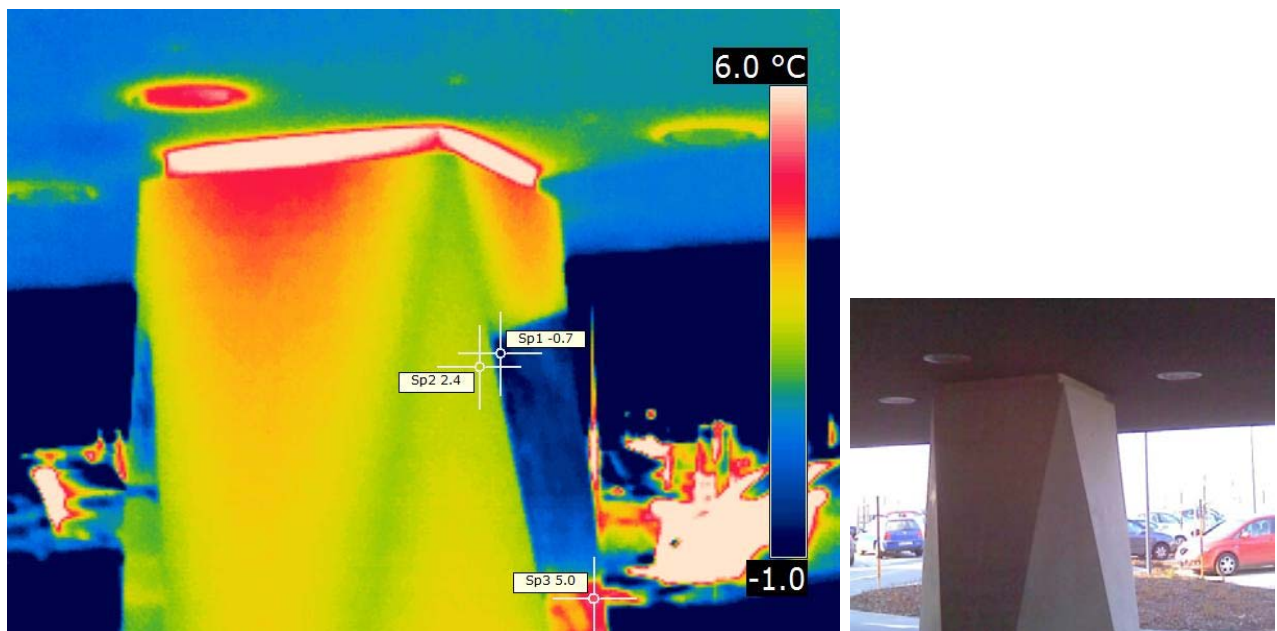


Abb.: 07.: Scheinbare Temperaturdifferenzen durch Reflexion des klaren Himmels und der Abwärme eines PKW an einer Betonoberfläche.

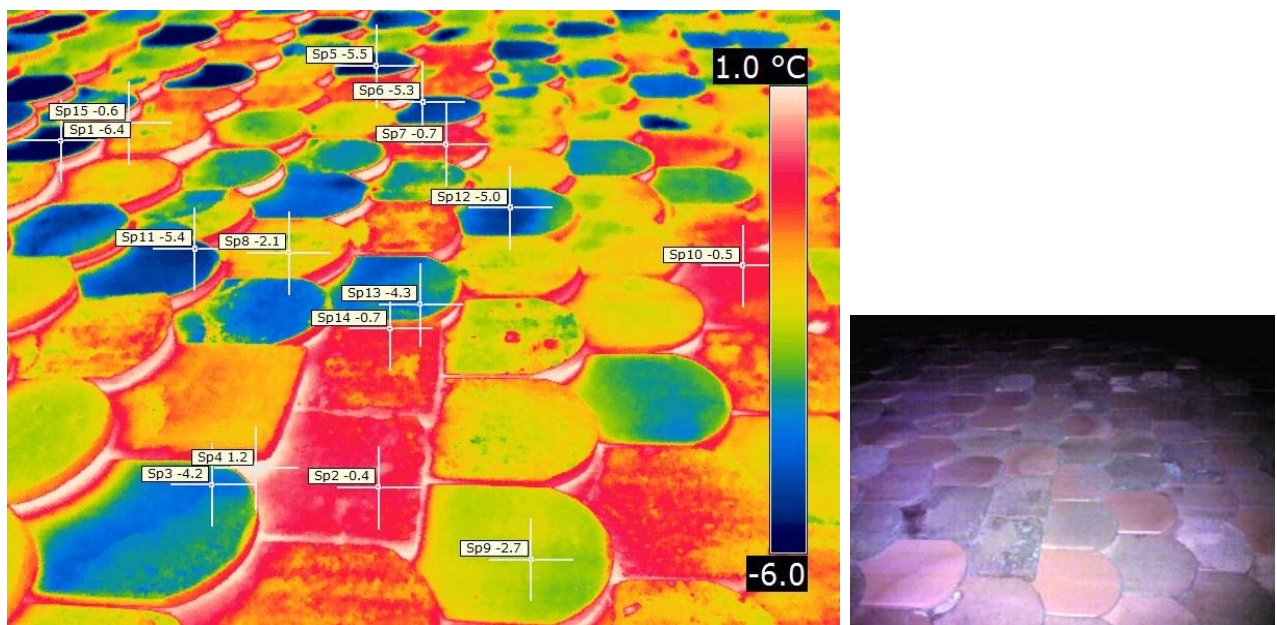


Abb.: 08.: Scheinbare Temperaturdifferenzen zwischen den Ziegeln eines Tondaches. Glatte Oberflächen der Tonziegel reflektieren bei identem Emissionskoeffizienten den Himmel wobei verwitterte Materialien stärker die Temperatur der umgebenden Objekte reflektieren und damit wärmer erscheinen.

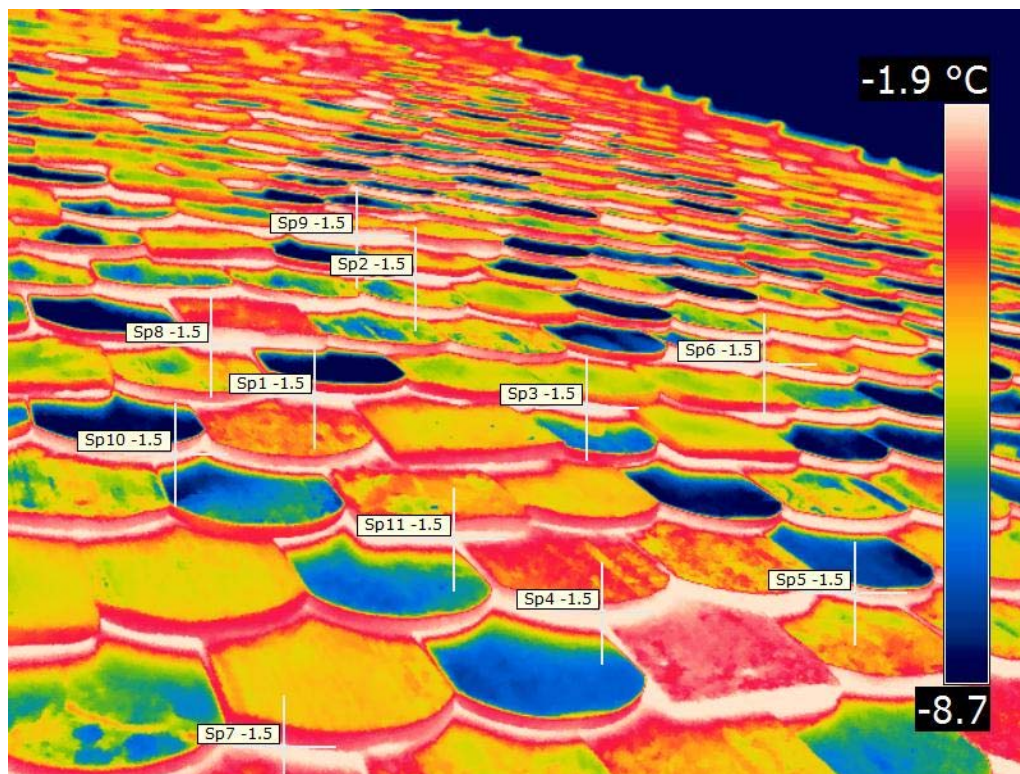


Abb.: 09.: Erst durch Nutzung der sog. Hohlraumstrahlung ist die Temperatur des Daches ermittelbar.

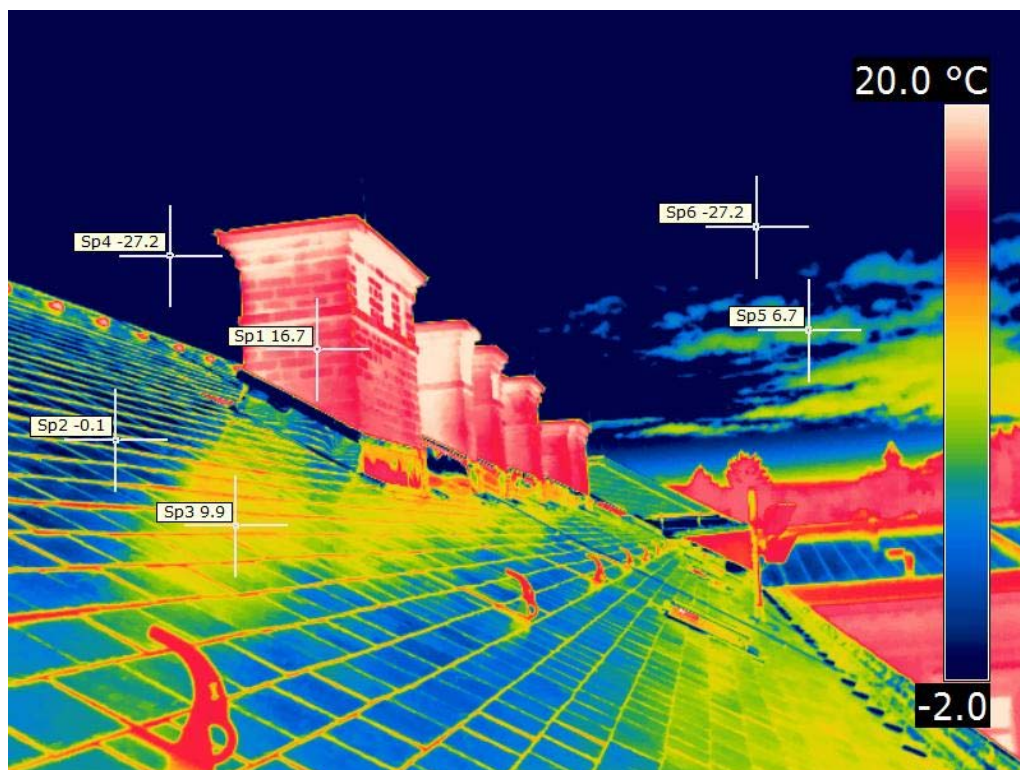


Abb.: 10.: Reflexionen von Bauteilen; Wolken und Himmel spiegeln sich an einem Schieferdach. Durch den flachen Winkel verringert sich der Emissionskoeffizient, der Anteil der Reflexion nimmt zu.



Abb.: 11.: Wasser hat einen sehr hohen Emissionskoeffizienten ($\epsilon \sim 0,95$). Durch den flachen Winkel ist der Lambert Effekt – und damit die Spiegelung - deutlich erkennbar.

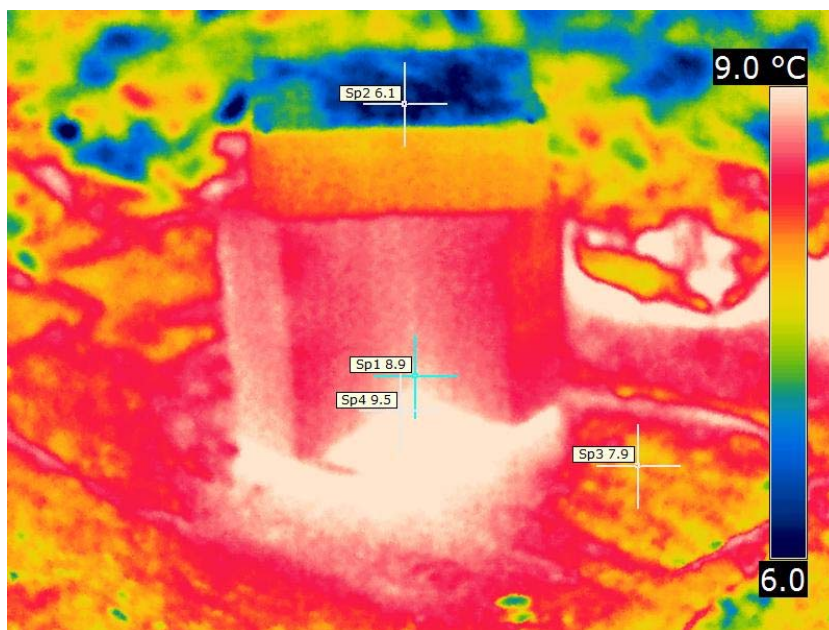


Abb.: 12.: Strahlungsinformation versus Thermalinformation; Einfache Beispiele zeigen die physikalischen Grundlagen der Thermografie.

Alle in den obigen Beispielen gezeigten Effekte zeigen sich in jeder thermografischen Aufnahme und sind bei der Befundaufnahme zu berücksichtigen. Einfache Interpretationen der thermografischen Aufnahme unter alleiniger Berücksichtigung der Strahlungsinformation führen zwangsläufig zu fehlerhaften thermischen Interpretationen. Werden diese Effekte jedoch erkannt und deren Auswirkungen in der Befundung bzw. der Auswertung der Befundung berücksichtigt, ergeben sich mit der Thermografie eine Reihe erfolgreicher Einsatzmöglichkeiten.

7. Anwendungen: Untersuchung von Wärmedämmverbundsystemen.

Bei der thermografischen Befundung geht es primär darum, mangelhafte Ausführung von WDVS zu erkennen und zu dokumentieren. Verarbeitungsmängel sind vor allem mangelhafte Verklebungen, fehlerhafte oder fehlende Verdübelung, sowie Mängel bei Plattenstößen und bei der Verarbeitung von Passstücken.

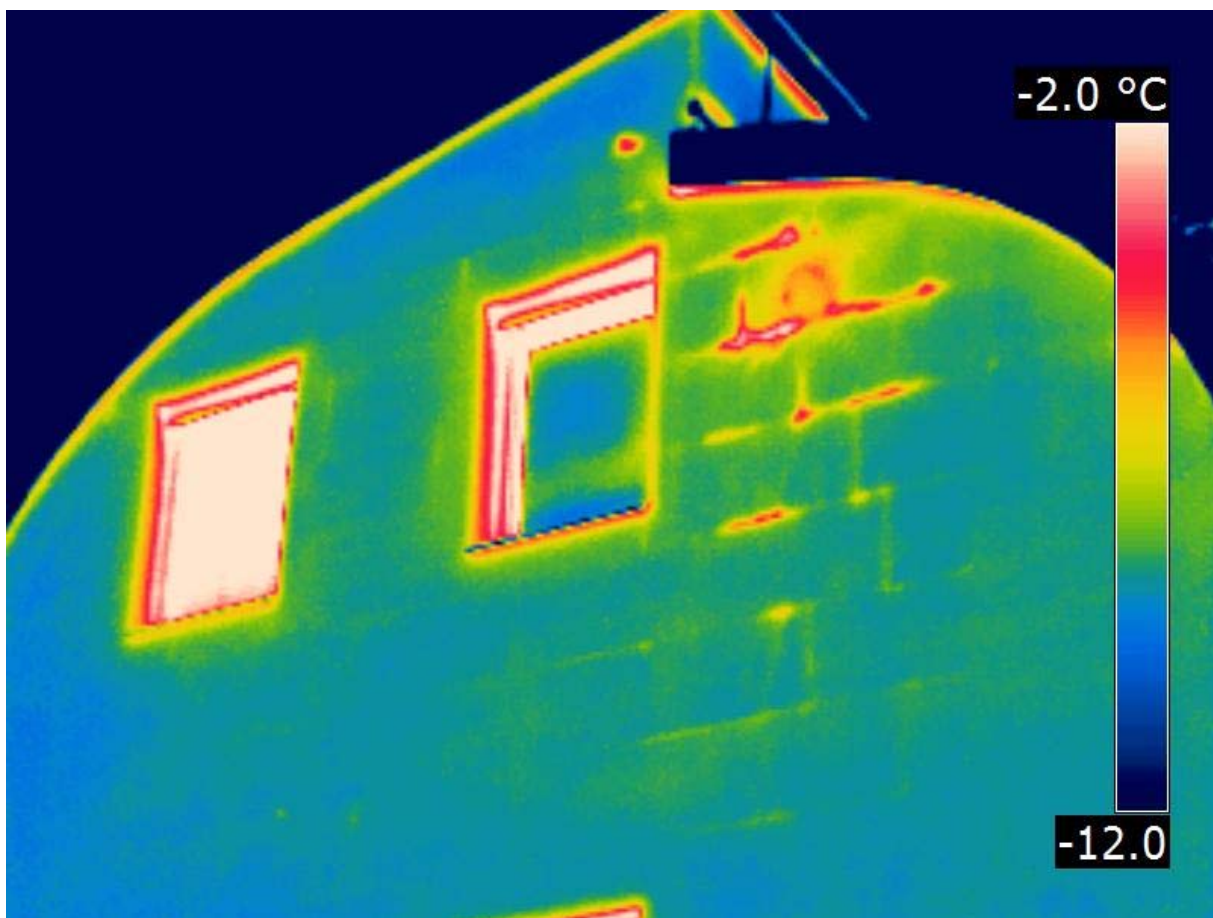


Abb.: 13. Verarbeitungsmangel an einem WDVS: Luft strömt zwischen Mauerwerk und WDVS nach oben und tritt im oberen Fassadenbereich zu Tage.

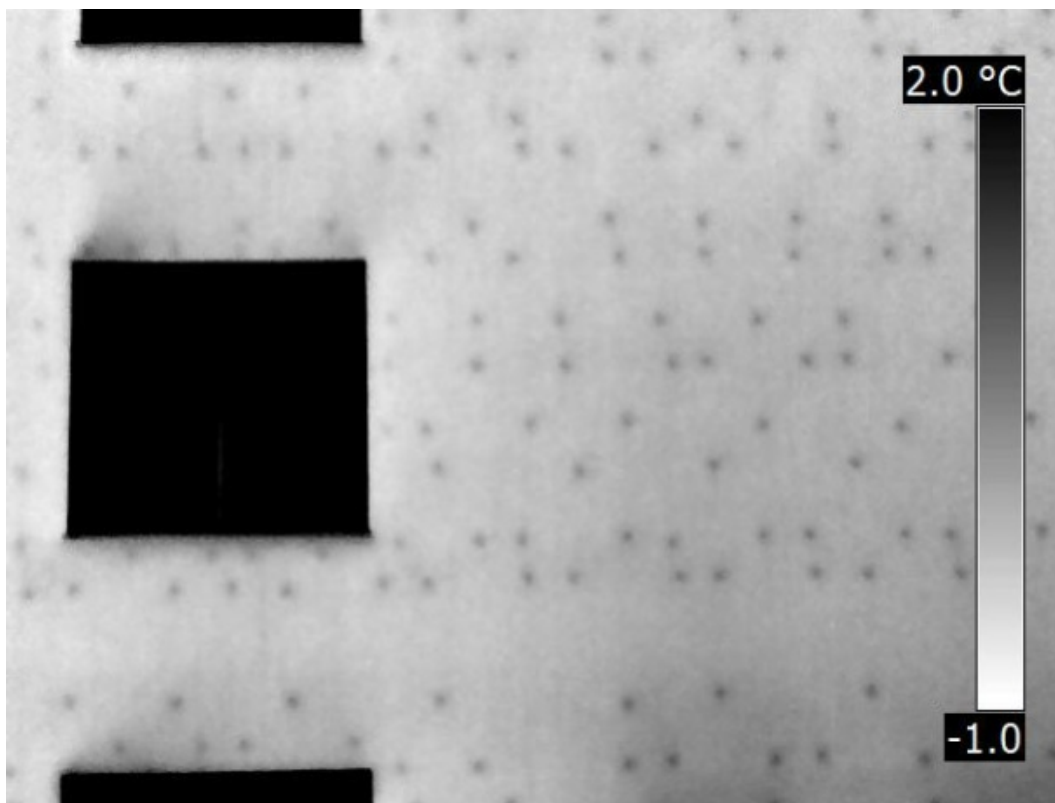


Abb.: 14.: Dübelmuster sind auch unter der Putzschicht deutlich zu erkennen.

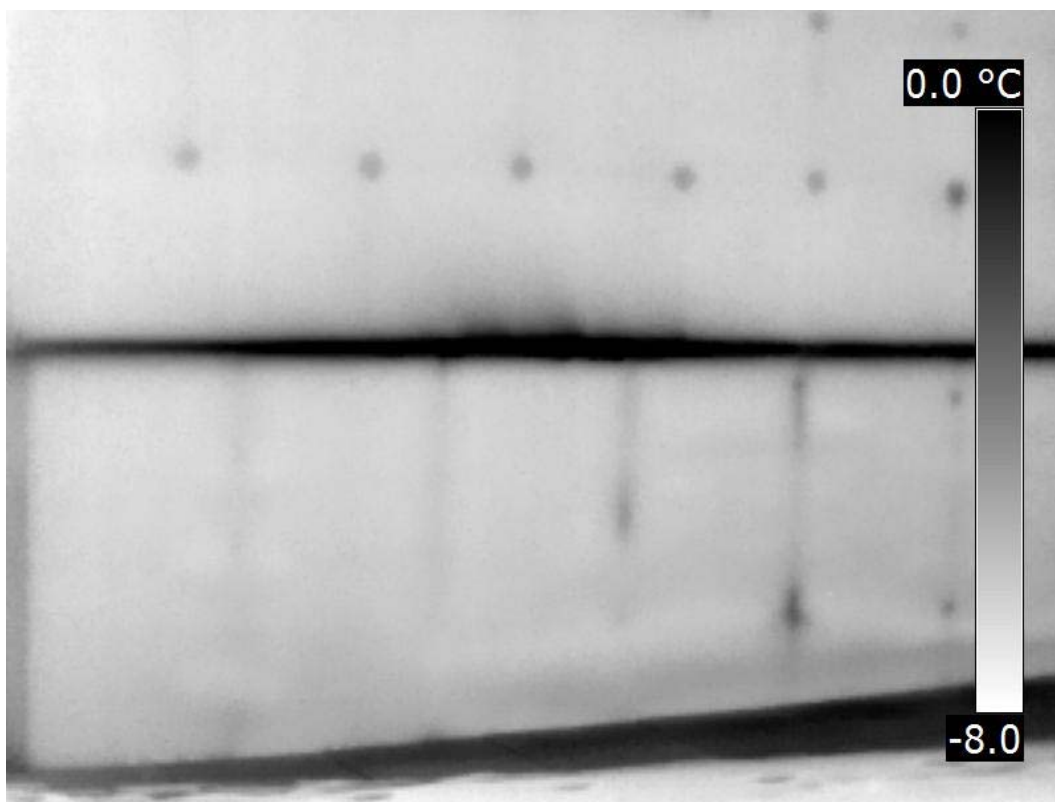


Abb.: 15.: Plattenstöße und Dübel an einem WDVS im Sockelbereich.

8. Anwendungen: Funktionskontrolle von Fußbodenheizungen.

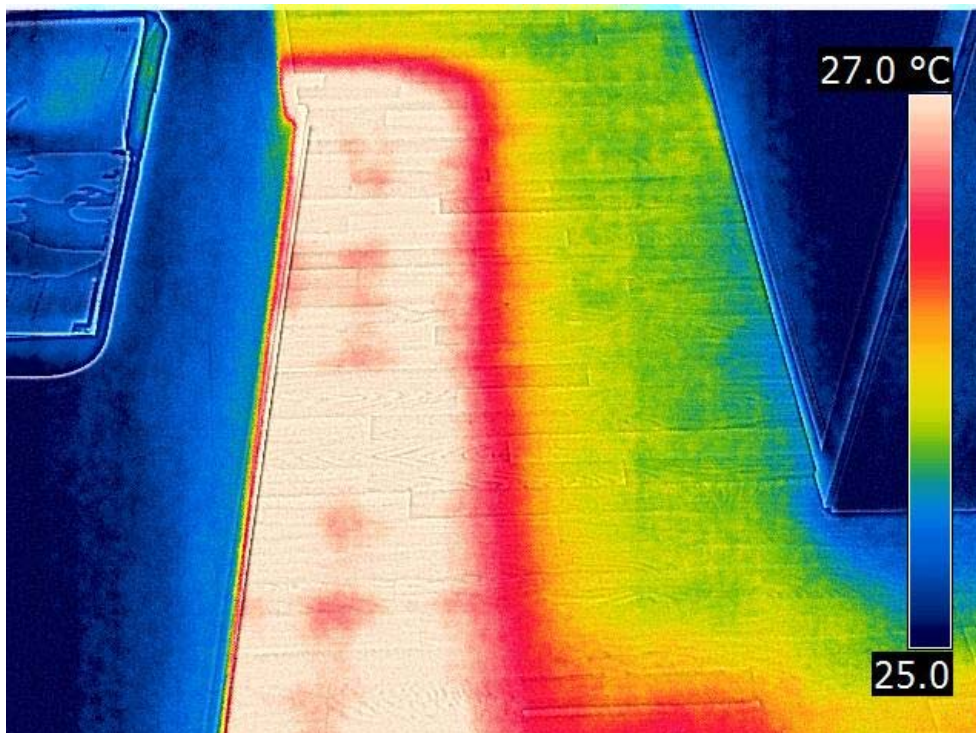


Abb.: 16.: Auch bei sehr geringen Temperaturdifferenzen lässt sich die Leitungsführung gut erkennen.



Abb.: 17.: Qualitätskontrolle an einer Fußbodenheizung; Position und Abstand der Heizungsleitung sind gut zu erkennen.



Abb.: 18.: Mangelhafte Regelung führt zu unterschiedlichen Temperaturniveaus innerhalb eines Raumes.

9. Anwendungen: Fehlerdetektion an PV Anlagen

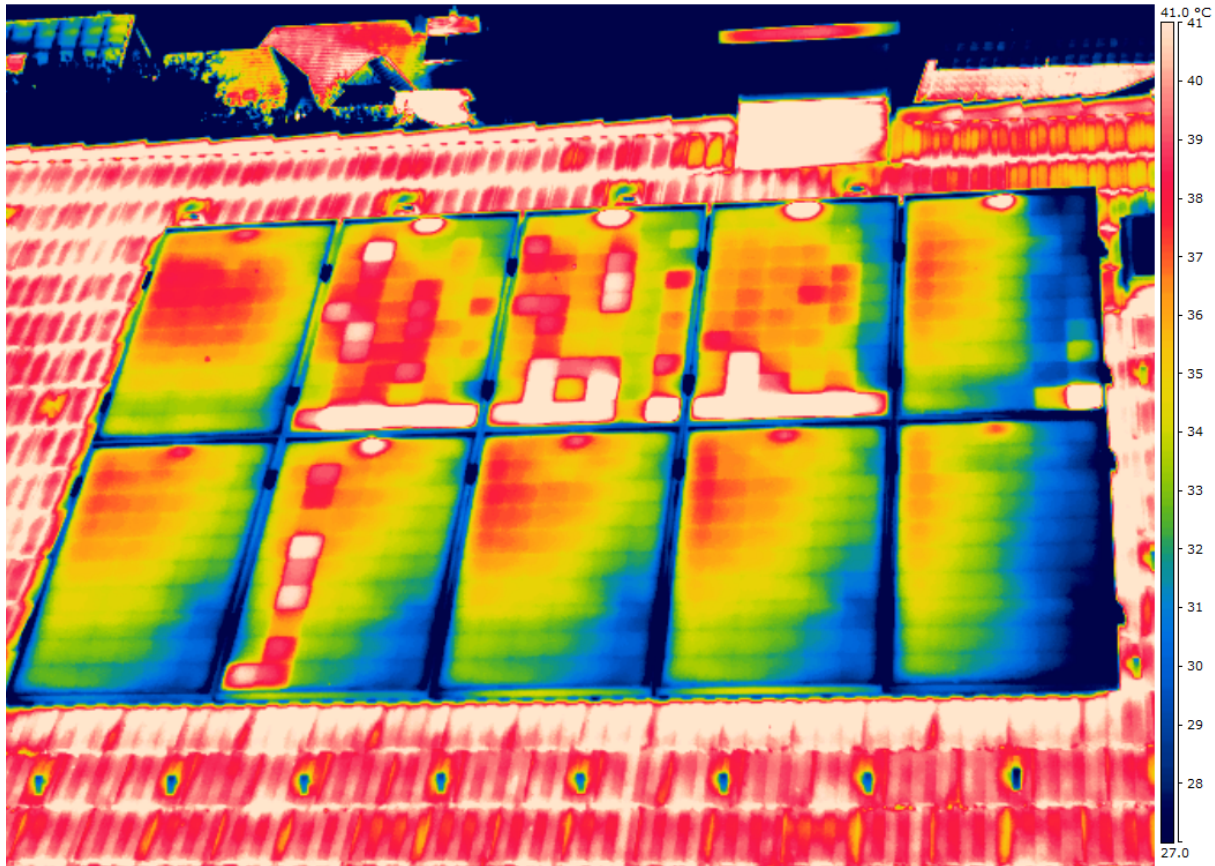


Abb.: 19.: Blitzschaden an einer Photovoltaikanlage: Durch die Blitzeinwirkung wird die Elektronik einzelner PV - Module beschädigt, die PV – Module liefern keine Leistung mehr.

1.1 Micro- burst	1.2 Modul defekt	1.3 Modul defekt	1.4 Modul defekt	1.5 Zelle defekt (hotspot)
1.6 Modul mangelfrei	1.7 Modul defekt	1.8 Modul mangelfrei	1.9 Modul mangelfrei	1.10 Modul mangelfrei

Abb.: 20.: Modulkataster: Übersichtsschema und Zustandsklassifikation einer PV – Anlage basierend nach dem Stringplan der Anlage.

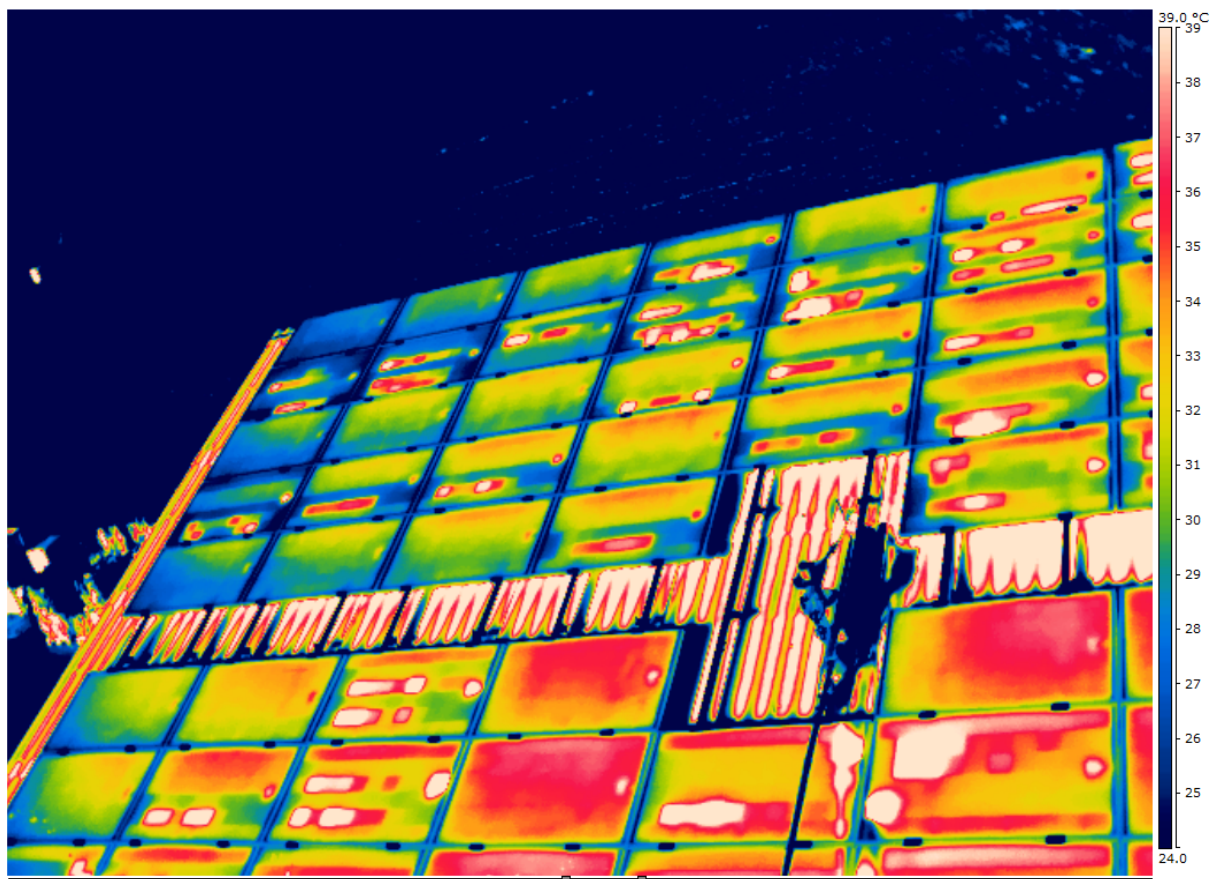


Abb.: 21.: Blitzschaden an einer Photovoltaikanlage am Dach einer Industrieanlage: Schadhafte und mangelfreie PV – Module sind ohne Demontage zu lokalisieren.

1.1 Modul mangelfrei	1.2 Modul mangelfrei	1.3 Modul mangelfrei	1.4 Modul defekt	1.5 Modul mangelfrei	1.6 Modul defekt	1.7 Modul defekt	1.8 Modul defekt	1.9 Modul mangelfrei	1.10 Modul defekt	1.11 Modul mangelfrei	1.12 Modul mangelfrei
2.10 Modul defekt	2.9 Modul defekt	2.8 Modul defekt	2.7 Modul defekt	2.6 Modul defekt	2.5 Modul defekt	2.4 Modul defekt	2.3 Modul defekt	2.2 Modul defekt	2.1 Modul defekt	2.14 Modul defekt	2.13 Modul mangelfrei
2.11 Modul mangelfrei	2.12 Modul mangelfrei	2.13 Modul mangelfrei	2.14 Modul defekt	3.1 Modul defekt	3.2 Modul defekt	3.3 Modul mangelfrei	3.4 Modul mangelfrei	3.5 Modul mangelfrei	3.6 Modul mangelfrei	3.7 Modul mangelfrei	3.8 Modul mangelfrei
4.6 Modul defekt	4.5 Modul defekt	4.4 Modul defekt	4.3 Modul mangelfrei	4.2 Modul defekt	4.1 Modul defekt	3.14 Modul defekt	3.13 Modul defekt	3.12 Modul mangelfrei	3.11 Modul mangelfrei	3.10 Modul mangelfrei	3.9 Modul mangelfrei
4.7 Modul mangelfrei	4.8 Modul mangelfrei	4.9 Modul mangelfrei	4.10 Modul defekt		4.11 Modul defekt	4.12 Modul defekt	4.13 Modul defekt	7.1 Modul defekt	7.2 Modul defekt	7.3 Modul defekt	7.4 Modul defekt
5.4 Modul mangelfrei	5.3 Modul mangelfrei	5.2 Modul defekt	5.1 Modul mangelfrei		7.10 Modul mangelfrei	7.9 Modul mangelfrei	7.8 Modul mangelfrei	7.7 Modul mangelfrei	7.6 Modul mangelfrei	7.5 Modul mangelfrei	7.4 Modul mangelfrei
5.5 Modul mangelfrei	5.6 Modul defekt	5.7 Modul defekt	5.8 Modul mangelfrei	6.7 Modul defekt	6.14 Modul defekt	7.11 Modul mangelfrei	7.12 Modul mangelfrei	7.13 Modul mangelfrei	7.14 Modul mangelfrei	8.1 Modul mangelfrei	8.2 Modul mangelfrei
5.12 Modul defekt	5.11 Modul defekt	5.10 Modul defekt	5.9 Modul defekt	6.8 Modul defekt	6.13 Modul defekt	8.8 Modul mangelfrei	8.7 Modul mangelfrei	8.6 Modul mangelfrei	8.5 Modul mangelfrei	8.4 Modul mangelfrei	8.3 Modul mangelfrei
5.13 Modul defekt	5.14 Modul defekt	6.3 Modul defekt	6.4 Modul defekt	6.9 Modul defekt	6.12 Modul mangelfrei	8.9 Modul mangelfrei	8.10 Modul mangelfrei	8.11 Modul mangelfrei	8.12 Modul mangelfrei	8.13 Modul mangelfrei	8.14 Modul mangelfrei
6.1 Modul defekt	6.2 Modul defekt	6.4 Modul mangelfrei	6.5 Modul defekt	6.10 Modul defekt	6.11 Modul mangelfrei	9.1 Modul mangelfrei	9.2 Modul mangelfrei	9.3 Modul mangelfrei	9.4 Modul mangelfrei	9.5 Modul mangelfrei	9.6 Modul mangelfrei

Abb.: 22.: Modulkataster: Übersichtsschema und Zustandsklassifikation einer PV – Anlage basierend nach dem Stringplan der Anlage.

10. Anwendung: Einsatzmöglichkeiten in der Bauforschung

Die Infrarotthermografie ermöglicht in der Bauforschung einen vollkommen neuen Zugang. Diese nicht-invasive Untersuchungsmethode ist gerade im besonders sensiblen Bereich des geschützten Baudenkmals ein unschätzbares Werkzeug für die Forschung, weil dabei auf Eingriffe in die Substanz, die zwangsläufig immer Zerstörungen mit sich bringen, verzichtet werden kann. Die gewonnenen Informationen bilden zusätzlich eine höchst präzise Grundlage für alle weiteren invasiven Befundungen. Der Blick hinter Putze oder bemalte Flächen gestattet außerdem eine rasche Visualisierung größerer bauhistorischer Zusammenhänge in einem Gebäudekomplex.



Abb.: 23.: Schloss Schernberg, beheizte Innenräume: Neben dem vermauerten gotischen Fenster zeigt sich auch rechteckige Öffnungen.

In der Anwendung der Infrarotthermografie im Zuge der Bauforschung lassen sich grundsätzlich zwei unterschiedliche Rahmenbedingungen unterscheiden. Liegt bei den durch ein Mauerwerk getrennten Räumen eine Temperaturdifferenz vor, bilden sich die im Mauerwerk befindlichen Materialien mit unterschiedlicher thermischer Leitfähigkeit auch an ihrer Oberflä-

che mit einem entsprechenden Temperaturverlauf ab. Geringe Temperaturdifferenzen der benachbarten Räume bzw. geringe Unterschiede der thermischen Leitfähigkeiten der verbauten Materialien bilden sich auch nur zu geringen Temperaturdifferenzen an der Oberfläche ab. Diese sind entsprechend schwierig zu detektieren bzw. zu interpretieren.



Abb.: 24.: Schloss Schernberg, beheizte Innenräume: Unter dem Putz der Aussenfassade zeichnen sich vermauerte Bogenfenster ab.

Trennt das Mauerwerk Räume mit einer großen Temperaturdifferenz – zum Beispiel einen gut beheizten Innenraum zur kalten Außenluft – und haben die verbauten Materialien große Unterschiede hinsichtlich ihrer thermischen Leitfähigkeit, bilden sich an der Oberfläche auch gut messbare Temperaturunterschiede ab. Diese Methode wird in der klassischen Bauthermografie auch eingesetzt, um bauliche Mängel wie etwa Wärmebrücken oder mangelnde Luftdichtheit zu erkennen und zu dokumentieren.



Abb.: 25.: Residenz Salzburg, beheizte Innenräume: Vermauerte Fester im Innenhof.



Abb.: 26.: Residenz Salzburg Innenraum zu unbeheiztem Dachboden,: Trambalken zeichnen sich an der Decke des Karabinierisaal ab.

Gänzlich andere Voraussetzungen finden sich bei der bauthermografischen Befundung mittels Infrarot - Kamera bei unbeheizten Objekten. Hierbei werden die natürlichen tageszeitlichen oder auch jahreszeitlichen Erwärmungen des Mauerwerks genutzt. Bei beheizten Objekten sind die Unterschiede in der thermischen Leitfähigkeit ausschlaggebend, bei unbeheizten Objekten sind dahingegen die Unterschiede der spezifischen Wärmekapazität der verwendeten Baumaterialien maßgeblich.



Abb.: 27.: Schloss Eggenberg, unbeheiztes Mauerwerk: Am Mittelturm wird die Grenze zwischen mittelalterlichem Mischmauerwerk und barockem Ziegelverband sichtbar.

Die spezifische Wärmekapazität ist ein Maß für die Wärmespeicherfähigkeit eines Stoffes. Materialien mit geringer spezifischer Wärmekapazität erwärmen sich rascher bzw. kühlen auch wieder schneller ab, während Materialien mit größerer spezifischer Wärmekapazität sich langsamer erwärmen, bzw. ebenso langsamer abkühlen. In der Praxis treten die Auswirkungen der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherfähigkeit stets gemeinsam auf. Die Herausforderung besteht darin, die überwiegenden Effekte in Abhängigkeit von Material und Umgebungsbedingungen zur thermografischen Befundung zu nutzen. Eine entsprechende

Beobachtung hinsichtlich der unterschiedlichen Wärmespeicherfähigkeit der verwendeten Baumaterialien machte bereits 1942 der Bauhistoriker und Salzburger Landesplaner Richard Schlegel ⁽¹⁾. Während Dipl. Ing. Schlegel die seltene Möglichkeit einer außergewöhnlichen meteorologischen Gegebenheiten erkannte und die wenigen Stunden am Morgen des 25. Jänner 1942 nutzte, um baugeschichtliche Details einzelner Objekte anhand von Raureisbildung fotografisch zu dokumentieren, erlaubt die derzeit zur Verfügung stehende Technik auch bei ungleich einfacheren meteorologischen Bedingungen eine entsprechende Befundung durchzuführen.

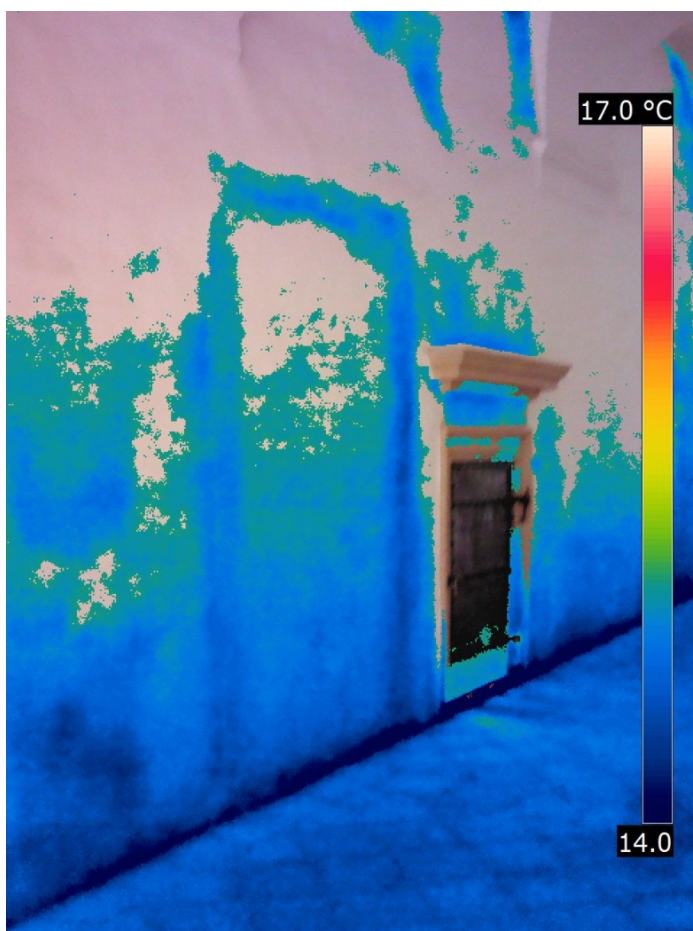


Abb.: 28.: Schloss Eggenberg, unbeheiztes Mauerwerk: Das steinerne Gewände eines barocken Türrahmens bildet sich während der Erwärmung des Frühjahrs kühler gegenüber dem Ziegelmauerwerk ab.

In Abhängigkeit der verwendeten Materialien und der Wandstärken sind oft die tageszeitlichen Temperaturdifferenzen dafür ausreichend. Bei massiven Wandstärken, welche wie in Schloss Eggenberg meist deutlich über 1 m liegen, kann der jahreszeitliche Temperaturverlauf gut genutzt werden. Die klarsten und kontrastreichsten Thermografieaufnahmen konnten in den Monaten April und Mai gemacht werden.

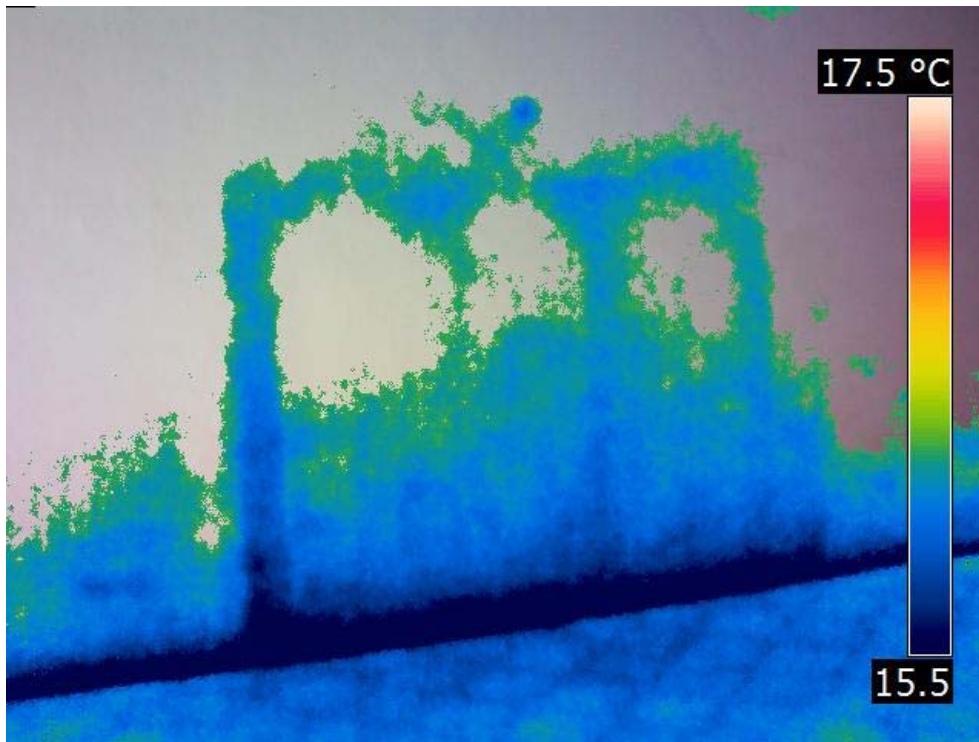


Abb.: 29.: Schloss Eggenberg, unbeheiztes Mauerwerk: dreibogigen Renaissancefensters hinter dem barocken Außenputz bei der thermografischen Befundung.



Abb.: 30.: Schloss Eggenberg: Dreibogiges Renaissancefensters nach der Freilegung.

Dabei zeigten sich Materialien mit größerer spezifischer Wärmekapazität (z. B. Sandstein oder Bruchstein mit hoher Wärmespeicherfähigkeit) kühler gegenüber beispielsweise Ziegelmauerwerk mit vergleichsweise geringer Wärmespeicherfähigkeit. In Abhängigkeit der Lage des Mauerwerks und einer eventuellen Sonneneinstrahlung auf das Mauerwerk konnten auch Qualitätsunterschiede bei der Befundung in tageszeitlicher Abhängigkeit gemacht werden. Während der herbstlichen Abkühlung zeigten sich die im Frühjahr kühl erschienenen Bauwerksdetails entsprechend warm. Bei gleichmäßig durchwärmtem bzw. abgekühltem Mauerwerk konnten diese Effekte naturgemäß nicht zur thermografischen Befundung genutzt werden. Um bei unbeheizten Objekten auch außerhalb der beschriebenen Zeitfenster Befundungen durchführen zu können, bietet sich jedoch die Möglichkeit an, einzelne Räume mittels mobiler Heizgeräte zu erwärmen und die zu befundenden Bereiche dergestalt thermisch zu durchleuchten. Die Sensibilität der eingesetzten Infrarot-Kameras verlangt dabei nur eine Aufwärmung des Mauerwerks von wenigen Zehntel Grad. Damit kann eine Schädigung der zu befundenen Substanz größtenteils ausgeschlossen werden. Eine weitere Form dieser sogenannten „aktiven Thermografie“ ist die Erwärmung des zu befundenden Bereiches von jener Seite, von der auch die IR-Aufnahme erfolgt. Dabei wird das Mauerwerk mittels Heizstrahler oder auch durch großflächig angebrachte elektrische Heizmatten geringfügig erwärmt und im Anschluss wird der räumliche und zeitliche Temperaturverlauf mittels IR-Kamera aufgezeichnet und ausgewertet.

Bei erfolgreicher Anwendung dieser Methodik ergibt sich dann eine „Temperaturlandkarte“ eines Mauerwerksbereiches, einer Fassade oder von ganzen Bauwerksbereichen. Im Wärmestrahlungsbild des Mauerwerks lassen sich damit unterschiedliche Materialien sowie Wechsel der verwendeten Baumaterialien aufspüren. Damit können nachträglich verschlossene Gebäudeöffnungen, Baunähte, die Lage von Kaminen, ehemalige Geschossdecken oder auch Gerüsthölzer lokalisiert werden. Auch bei Temperaturdifferenzen von nur wenigen Zehntel Grad zeigen sich oft verborgene Strukturen ähnlich einer Röntgendarstellung. Dabei sind sowohl im Innen- als auch im Außenbereich von Gebäuden Umbauten und Veränderungen ohne invasive Befundung lokalisierbar.

(1) Vgl. *Richard Schlegel*, Baufunde durch Rauhrefbildung, in: Mitteilungen der Gesellschaft für Salzburger Landeskunde, 82/83, 1942/43, Salzburg 1943, S. 77–80.