

Bauthermografie: Vom bunten Bild zur zuverlässigen Prüfaussage

Georg DITTIÉ, Schütte, Kirchner und Partner Bausachverständige, Bonn

Zusammenfassung. Thermografie ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, die im Baubereich zu vielseitigen Aussagen führen kann. Durch einen gegebenen Temperaturunterschied beiderseits der Bausubstanz entsteht ein Wärmestrom, der je nach Wärmewiderstand zu unterschiedlichen Oberflächentemperaturen führt, die dann mit einer IR-Kamera abgebildet werden können. Aus dem entstehenden Thermogramm kann nun auf die Ursachen der inneren Wärmewiderstände und damit die Beschaffenheit der Bausubstanz geschlossen werden. Ein zweites wichtiges Funktionsprinzip ist die Temperaturveränderung von Oberflächen durch Feuchtigkeit, sei es durch Kapillartransport und Verdunstung oder durch Kondensatbildung. Sie liefert oftmals wertvolle Hinweise auf die Ursachen und von Feuchteschäden und deren zeitlicher Entwicklung. Erst in jüngerer Zeit gewinnt als dritter Zweig auch die Auswertung von Thermogrammen an Bedeutung, die unter stationären Verhältnissen bzw. aktiver Anregung gewonnen wurden.

Damit die Thermografie als visuelles und bildgebendes Prüfverfahren richtig eingesetzt werden kann, ist sicherzustellen, dass Thermogramme grundsätzlich immer unabhängig von Messobjekt und treibender Temperaturdifferenz dargestellt werden und dass dafür gesorgt wird, dass Störeinflüsse begrenzt bleiben. Zudem sollten die thermischen Verhältnisse in der Bausubstanz über einen hinreichend langen Zeitraum von einem bis einigen Tagen stationär sein, oder die Änderung bzw. Anregung genau genug kontrolliert wird.

Thermografie ist die Abbildung von Temperaturunterschieden über deren Infrarotemission. Dabei wird ausgenutzt, dass jede Oberfläche von sich aus Infrarot abstrahlt, wenn sie eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt hat, bei höheren Temperaturen mehr, bei geringeren weniger. Eine Thermografiekamera zeichnet diese IR-Abstrahlung auf und ordnet ihr Temperaturen zu, wobei es sich eingebürgert hat, das reine Helligkeitsbild nachträglich zum besseren Verständnis einzufärben. Bei ingenieurmäßigem Einsatz ist es oft auch besser, bei der reinen Schwarzweiß-Darstellung zu bleiben um eine farbpsychologische Fehlinterpretation des Betrachters von vornherein zu vermeiden.

In der Bauthermografie (zumindest in der passiven) lässt sich zur Zeit aufgrund des rapiden Preisverfalls bei den Thermografiekameras allerdings der fatale Trend beobachten, dass es nur noch auf eine schöne bunte und plakative Darstellung ankommt, deren Interpretation so offensichtlich sei, dass sie dem Endanwender überlassen werden kann. Dabei wird völlig übersehen, durch welche Wärmetransportmechanismen ein Thermogramm überhaupt entsteht und welchen Störeinflüssen es unterliegt, etwas, was Laien und oberflächlich Angelegerte regelmäßig überfordern wird.

Einhaltung von neutralen Gestaltungsregeln

Die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen in einem passiven Thermogramm kommen dadurch zustande, dass einem Wärmestrom lokal unterschiedliche Widerstände entgegengesetzt sind. Der Wärmestrom wird dabei von einem vorgefundenen

Temperaturgefälle zwischen den beiden Seiten der Bausubstanz angetrieben. Die Wärmewiderstände hängen dabei von der Form (Architektur) und von den Materialeigenschaften ab. Gut gedämmte Oberflächen mit einem geringen Wärmestrom zeigen geringe Temperaturunterschiede, schlecht gedämmte entsprechend höhere entsprechend dem höheren Wärmestrom.

Problematischer wird die angepasste Wahl der Temperaturspanne (Kontrast) und der Farbpalette bei instationären Thermogrammen und bei der aktiven Thermografie. Hier ist teilweise eine starke Nachbearbeitung der Thermogrammbilder notwendig, um sehr schwach ausgeprägte Kontraste des Nutzsignals gegen wesentlich stärkere Schwankungen des Bildhintergrundes sichtbar zu machen.

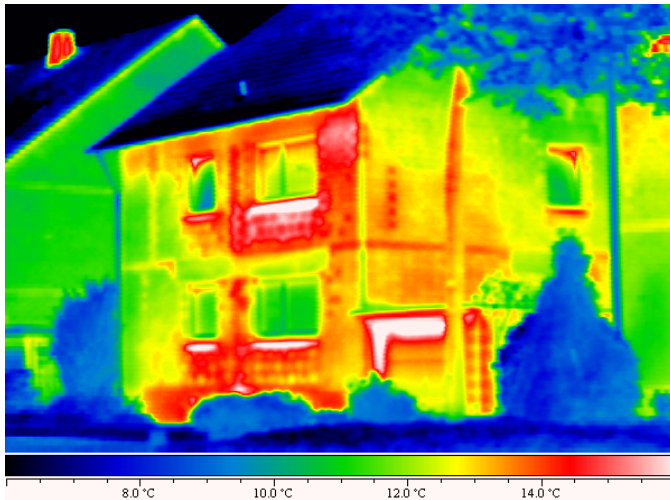


Abbildung 1: Dünnwandiges, ungedämmtes Gebäude aus den 1950ern mit zahlreichen Wärmebrücken ab Betonteilen, Heizkörpernischen und Fensterbänken.

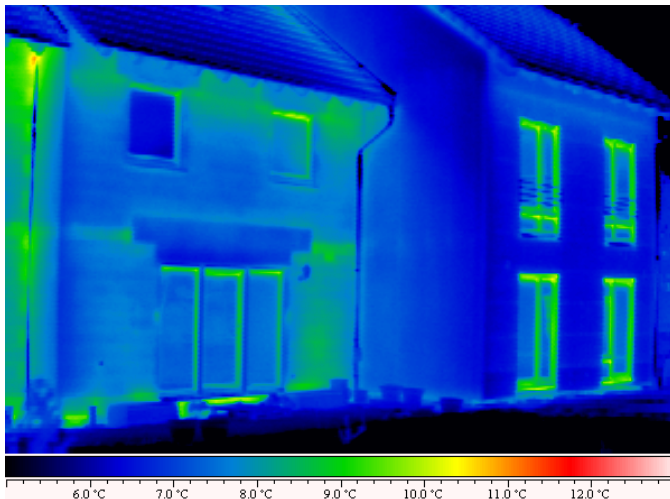


Abbildung 2: Zwei Gebäude nach modernem Niedrigenergiestandard, das rechte in innen gedämmter Holzständerbauweise, das linke erbaut aus hochdämmenden Mauersteinen mit abgedämmten Betonteilen.

In Abbildung 1 und 2 werden zwei Gebäude mit sehr unterschiedlichem energetischen Verhalten gegenübergestellt. Deutlich ist die starke thermische Strukturierung eines nicht gedämmten Hauses zu erkennen, weil die verschiedenen Bauteile je nach Wärmeleitwert verschieden große Wärmeströme nach außen hindurch treten lassen. Dort, wo der Wärmestrom besonders aufkonzentriert wird, spricht man von einer Wärmebrücke.

Bei den Wärmebrücken unterscheidet man zwei Arten, einmal die durch die Form verursachten geometrischen Wärmebrücken, die hauptsächlich an Kanten und Ecken von Außenwänden, an Decken und Gebäudesockeln auftreten. Typisch für die geometrischen Wärmebrücken ist deren gleichmäßige Temperaturverteilung, die ohne Sprünge von der

allgemeinen Oberfläche bis zum Temperaturminimum unmittelbar in der geometrischen Kante oder Ecke verläuft.

Im Gegensatz dazu wird in der modernen, energiesparenden Bauweise darauf geachtet, dass der Wärmestrom durch die Bausubstanz an keinem Ort einen zulässigen, geringen Grenzwert überschreitet. Dadurch herrschen in solchen Thermogrammen nur geringe Kontraste und ein allgemeines Temperaturniveau der abgebildeten Oberflächen um die Umgebungstemperatur herum vor. Sofern Wärmebrücken vorhanden sind, sind sie nur noch schwach ausgeprägt.

Dabei ist die korrekte Darstellung eines Thermogramms von großer Bedeutung: Es liegt in der Natur des Menschen, für die Interpretation eines Thermogramms zunächst nicht auf die Temperaturen, sondern auf die Farben zu achten, die ja erst der Aufnahme künstlich hinzugefügt werden. Um hierbei Fehldeutungen zu vermeiden, müssen zur Darstellung von Thermogrammen Regeln eingehalten werden, die die Darstellung neutral zur Aufnahme und Aufnahmetechnik machen. Das betrifft sowohl den Temperaturbereich, der im Thermogramm dargestellt wird, als auch die mittlere Temperatur.

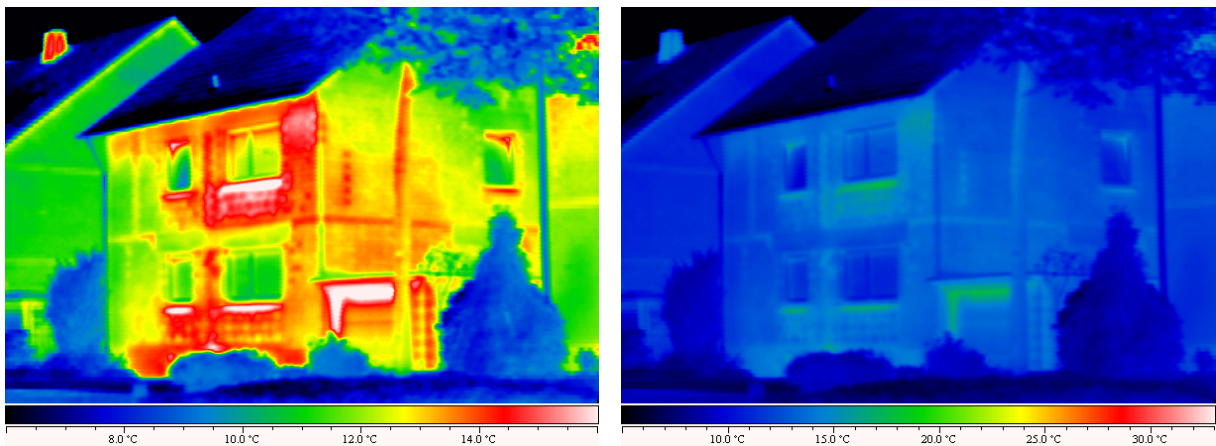


Abbildung 3: Aus jeder „Energieschleuder“ kann man mit zu weiter Skalierung ein Niedrigenergiehaus machen. (Links korrekt, rechts fehlerhaft skaliert)

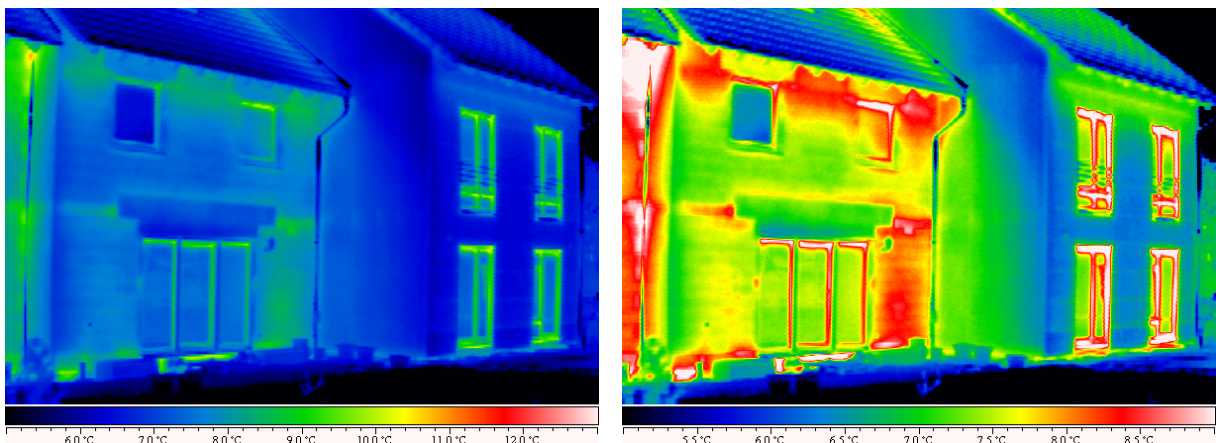


Abbildung 4: Ebenso ist es möglich, durch zu enge Skalierung aus einem echten Niedrigenergiehaus eine „Energie-Katastrophe“ zu machen. (Links korrekt, rechts fehlerhaft skaliert)

Die Regeln der Darstellungsneutralität fordern, dass zum einen der Temperaturbereich im Thermogramm immer proportional zum Unterschied zwischen der Innen- und der Außentemperatur ist. Zweitens sollte auch die Umgebungstemperatur nicht direkt am Unterrand (Außenaufnahme) beziehungsweise am Oberrand (Innenaufnahme) liegen.

Die Darstellung eines Gebäude-Thermogramms ist dann darstellungsneutral, wenn folgende, einfache Regeln eingehalten werden:

- Alle Thermogramme sollten grundsätzlich dieselbe Farbpalette nutzen.
- Die Skalierung sollte immer um 0,5 bis 0,7 mal der Temperaturdifferenz liegen.
- Bei Außenaufnahmen sollte die Umgebung bei etwa 20 % der Skala liegen.
- Bei Innenaufnahmen sollte die Innenraumtemperatur bei 70 % liegen.

Diese Werte sind empirisch. Sie variieren mit der Art der gewählten Farbpalette des jeweiligen Kameraherstellers. Hält man sich jedoch an diese regeln und wechselt die einmal gewählte Farbpalette nicht, so ist eine sehr objektneutrale Darstellung gewährleistet.

Die Abbildung 3 verdeutlicht den Einfluss, den eine fehlerhafte Wahl des Temperaturbereichs auf die Aussage haben: In diesem Fall ist der Temperaturbereich viel zu weit eingestellt, dazu auch die Umwelttemperatur ins zu Kalte gelegt: Ein offensichtlich völlig ungenügend gedämmtes Haus wird zum „Energiesparwunder“.

Der umgekehrte Fall wird in Abbildung 4 dargestellt. Hier ist die Bereichswahl viel zu eng gewählt, eigentlich sehr feine Kontraste werden stark überhöht dargestellt und suggerieren teils enorme Wärmedurchgänge, die aber nachweislich beim untersuchten Objekt nicht vorhanden sind. Dieser Fall ist ziemlich häufig, gerade im Bereich der Anbieter billiger Energiechecks wird mit knalligen Farben und viel zu enger Bereichswahl gearbeitet, um besondere Effekte zu erzielen und die Aussage zu dramatisieren, aber für eine objektiven Bewertung der Thermogramme ist das nicht sinnvoll.

Einfluss von Störgrößen auf die Thermografie

Das Thermogramm unterliegt verschiedenen Störgrößen und Einflüssen wie Aufheiz- und Abkühlungsprozessen, Wind, Regen, Sonneneinstrahlung und Abstrahlung in die Umwelt. Diese externen Störgrößen sollten ca. 10 % des Nutzsignals nicht übersteigen und wenn schon vorhanden, gleichförmig auf das gesamte abgebildete Objekt einwirken.

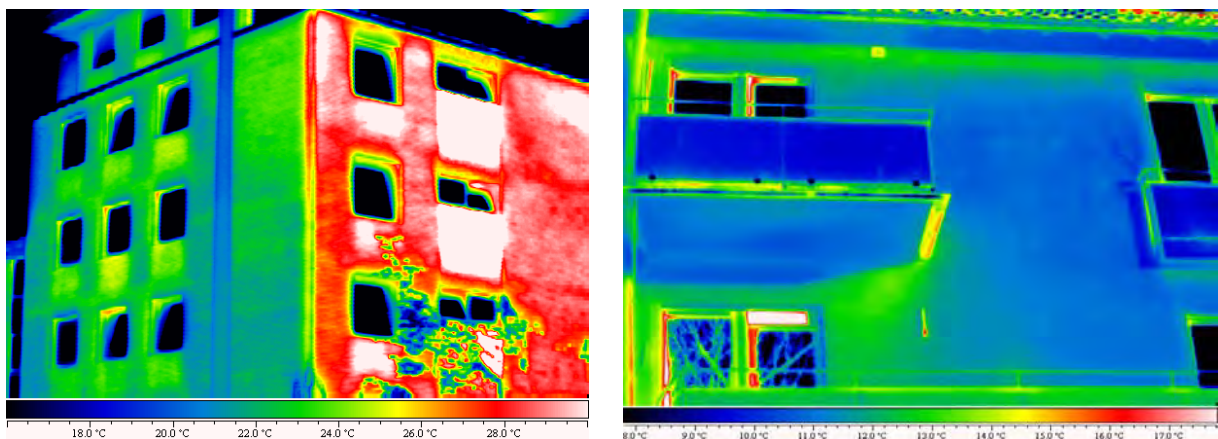


Abbildung 5: Links ein nächtliches Thermogramm nach einem sonnigen Tag, rechts ein Thermogramm bei nur sehr dünner Bewölkung: beide Thermogramme zeigen einen zu stark verfälschenden Einfluss der Sonneneinstrahlung.

Die problematischste Störgröße bei Außenaufnahmen sind direkte und auch indirekte Sonneneinstrahlung sowie ein starkes Strahlungsungleichgewicht, was vor allem bei wolkenlosem Wetter vorherrscht. Selbst durch Dunst oder Höhenbewölkung abgemilderte Sonneneinstrahlung kann die IR-Eigenemission typischerweise um das Zehnfache übersteigen. Weiterhin kann Wärme nach längerer Sonneneinstrahlung in

Bauteilen mit hoher Wärmekapazität wie Beton oder massives Mauerwerk noch lange nach Tagesende gespeichert werden. Dazu macht der Auskühlungsprozess die thermische Umgebung stark instationär, was die korrekte Auswertung weiter erschwert.

Nachts zu messen vermeidet zwar Sonneneinstrahlung, sorgt aber ebenfalls für Probleme, wenn zur Aufnahmezeit klares Wetter herrscht. Die festen, in etwa umgebungswarmen Gebäudeoberflächen strahlen thermisches IR in die Umgebung ab, der klare Himmel strahlt aber kaum thermisches IR zurück, weil die Luft im thermischen IR durchsichtig ist und die abgestrahlte Wärme in den Weltraum entweicht. Es herrscht ein starkes, auskühlend wirkendes Ungleichgewicht, umso mehr, je weiter eine Oberfläche dem Himmel zugeneigt ist.

In Abbildung 6 ist so ein Beispiel angeführt: Von außen wirkt das Dach des ansonsten sanierungsbedürftigen Hauses gut gedämmt, weil sehr kalt und ohne Temperaturdifferenz zur Umgebung. Eine Innenaufnahme desselben Objekts zeigt aber zahlreiche Lücken in der unzureichenden Dachdämmung. Eine Außenaufnahme alleine hätte hier zu einer folgenreichen Fehlinterpretation geführt. Nicht nur aus diesem Grund ist es erforderlich, Bauthermografie sowohl von außen als auch von innen zu betreiben.

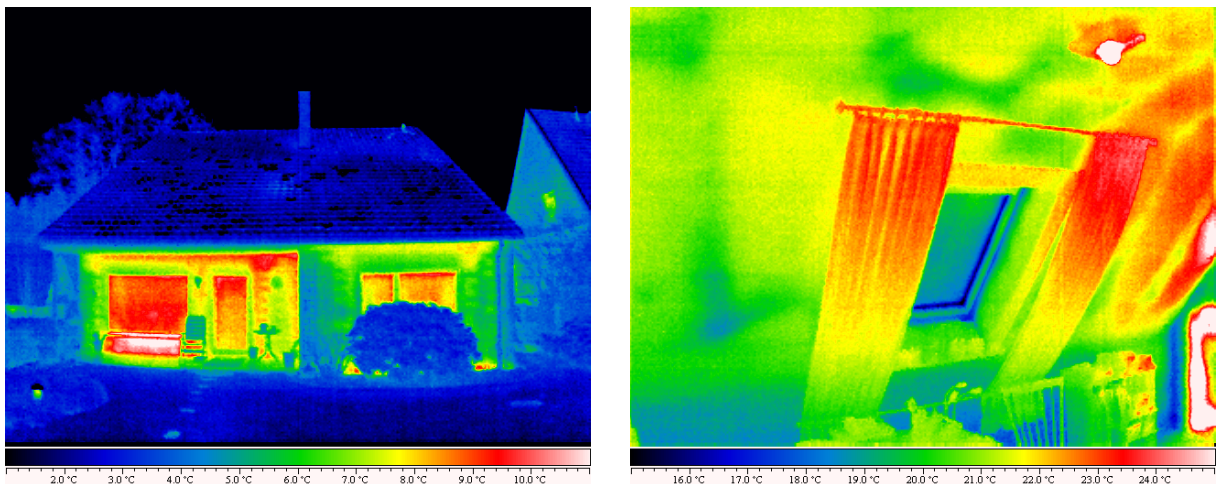


Abbildung 6: Intensive Abstrahlung von thermischem IR in einen klaren Himmel kann die Temperatur von Dachflächen stark absenken und so von außen einen guten Dämmstandard vortäuschen. Hier kann eine Innenaufnahme die tatsächlichen Verhältnisse einer mangelhaften Dämmung klären.

Erstaunlicherweise hat dagegen Regen auf eine Außenthermografie kaum Auswirkungen. Solange der Niederschlag nicht zu stark ist und es nicht aufgehört hat zu regnen, hat das Regenwasser die Umwelttemperatur, und es findet auch keine Verdunstung statt, weil die Luft während des Regens mit Wasserdampf voll gesättigt ist. Dafür ist die Wolkenuntergrenze von Regenwolken fast so warm wie die Umgebung, es herrscht fast ausgeglichenes thermisches Strahlungsgleichgewicht. Ein praktischer Versuch zeigt schnell, dass Außenthermografie bei leichtem, andauerndem Regen zu hochgenauen Ergebnissen führt.

Die Umweltbedingungen, die für eine erfolgreiche störungsarme Bauthermografie von außen vorherrschen sollen, sind wie folgt:

- Eine Außenthermografie von Gebäuden ist unabhängig von der Tageszeit, sofern die Lichtstärke nicht ca. 1500 Lux überschreitet.
- Nicht heller Himmel, sondern klarer Himmel ist zu vermeiden.
- Leichter Regenfall kleiner 0.5 mm/h ist tolerabel, ebenso schwacher Wind bis 2 m/s (ca. 2 bft).

- Die Wetterlage muss hinreichend stationär sein. Die Erfahrung gibt mindestens 3 bis 7 Tage Latenzzeit vor, so dass stark wechselnde Wetterlagen zu vermeiden sind.
- Die vorherrschende Außentemperatur ist bedeutungslos, sofern eine genügend große Temperaturdifferenz gewährleistet werden kann. Das hängt natürlich von der Kamera ab, Sehr gute Kameras wie Scannerkameras können schon bei 8 – 10 K Differenz, die normalen Mikrobolometer ab 12 – 15 K gute Ergebnisse abliefern.

Bei der Bauthermografie von innen werden die Verhältnisse gleich viel störungsärmer. Im Gebäudeinneren herrscht praktisch Strahlungsgleichgewicht. Es regnet nicht und es herrscht kein Wind. Einzig kann Sonneneinstrahlung durch die Fenster vorkommen.

Dazu kommt, dass der Wärmewiderstand zwischen Innenluft und Innenoberfläche etwa doppelt so hoch ist wie der Wärmewiderstand Oberfläche-Luft außen. Das macht die Kontraste bei Innenaufnahmen deutlich stärker. Zusammen mit den erheblich geringeren Störeinflüssen sind Innenaufnahmen Außenaufnahmen immer vorzuziehen, wenn eine Alternative besteht.

Dokumentation von Thermogrammen

Bei der passiven Bauthermografie ist man darauf angewiesen, welche Umgebungsbedingungen wie Temperaturdifferenz und Wetter man zum Zeitpunkt der Aufnahmen vorfindet. Diese lassen sich nur in Grenzen durch die Terminwahl und begrenzte Vorbereitungen beeinflussen.

Die Dokumentation sorgt dafür, dass eine Gebäudethermografie dennoch immer reproduzierbar bleibt, trotz nur im Moment der Aufnahme wirksamen Umweltbedingungen. Sie erfüllt dann ihren Zweck, wenn die Aussage von Dritten nachvollzogen werden kann, wenn diese beim Ortstermin und bei der Auswertung nicht dabei gewesen sind.

Eine vollständige Dokumentation muss mindestens enthalten:

- Datum und Uhrzeit der Thermogrammaufnahme
- Einstellparameter der Kamera
- Seriennummer des Thermogramms und der Kamera, Kameratyp
- Außen- und Innentemperatur
- Bei Außenaufnahmen Informationen zu Wind, Wetter, Wolken und Einstrahlung
- Ein Begleitfoto mit selbem Standort, Ausschnitt, Perspektive
- Information zum Aufnahmeobjekt und zum Auftraggeber bzw. Projekt
- Die Dokumentation sollte die Abschätzung der Störgrößen zulassen.

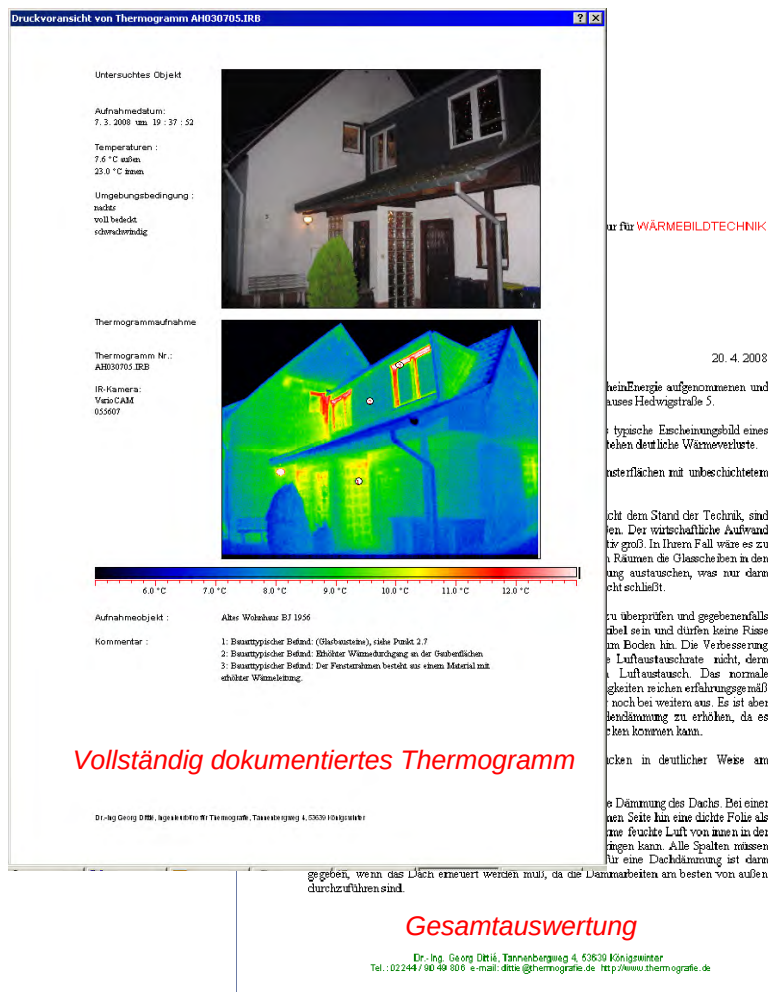


Abbildung 7: Zu einer vollständigen Dokumentation gehören immer Informationen zum Wetter zu den Temperaturen außen und innen und auch ein Foto im visuellen Licht.

Was alles zu einer Dokumentation gehört, ist in der DIN 54190 festgehalten.

Die Interpretation des Thermogramms sollte dann auch in einem formulierten Schreiben festgehalten werden.

Es sollte dazu auch selbstverständlich sein, dass zu einer Auswertung auch eine Gesamtzusammenfassung gehört. Die Aussage eines Thermogramms wird auch vom bautechnischen und physikalischen, thermodynamischen Wissen mitbestimmt. Der Endanwender ist Nicht-Thermograf, es ist unverzichtbar, die Schlussfolgerungen aus den Thermogrammen fertig zu formulieren: Thermografien auswerten ist komplex und *keine Aufgabe* für Nichtfachleute.

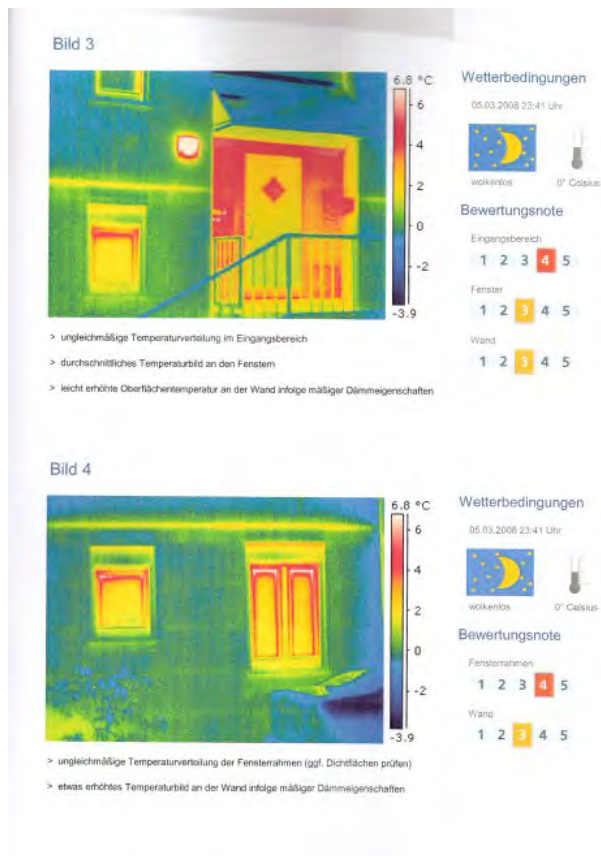


Abbildung 8: So geht's nicht!

Diese Dokumentation ist unvollständig, es fehlen ganz wichtige Angaben wie die Innentemperatur oder auch das Begleitfoto, was wurde da eigentlich thermografiert?

Dazu ist auch die Temperaturskalierung nicht der (vermutlichen) Temperaturdifferenz angepasst, sie ist zu eng und täuscht zu große Wärmeübergänge vor.

Zudem ist die Auswertung arg pauschal. Was soll der Endkunde mit dieser Information anfangen – soll er selber eine Handlungsempfehlung ableiten?

Der Nutzen für den Endverbraucher ist also Null, wegen zu starker Kontrastierung wird eher Verwirrung gestiftet.

Leider kann in der Praxis wie im Beispiel aus Abbildung 8 gerade bei den sehr billigen Anbieter beobachtet werden, dass der Endanwender mit den Thermogrammen alleine gelassen wird, oder nur sehr allgemeine Aussagen getroffen werden, die sich nicht mit dem individuellen Objekt beschäftigen. Gerade eine unzureichend Dokumentation im Zusammenspiel der Nichteinhaltung der Darstellungsregeln lassen im allgemeinen Publikum die Thermografie in ein schlechtes Licht geraten, obwohl die Bauthermografie ein hochgenaues zerstörungsfreies Analysemittel ist.

Beispiele für zerstörungsfreie passive Thermografie bei Dämmungsfehlern

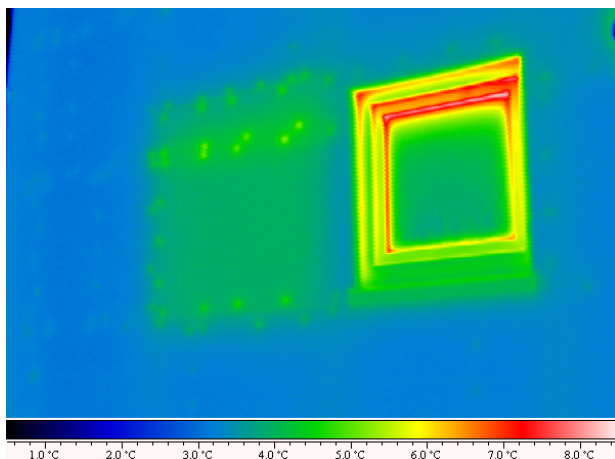


Abbildung 9: Gefachefeld eines Holzständer-Bauwerks, bei dem vergessen wurde, Dämmstoff einzublasen. Der Mangel offenbart sich auch, ohne dass das Bauwerk geöffnet werden muss.

In Abbildung 9 ist ein typisches Thermogramm dargestellt, in dem ein tatsächlicher Dämmungsmangel aufgedeckt wurde, um anschließend nachgebessert zu werden. An der Stelle, wo kein Dämmstoff vorhanden ist, ist die Wärmeleitung der Wand natürlich erhöht, damit ist auch die Differenztemperatur zur Umgebung höher.

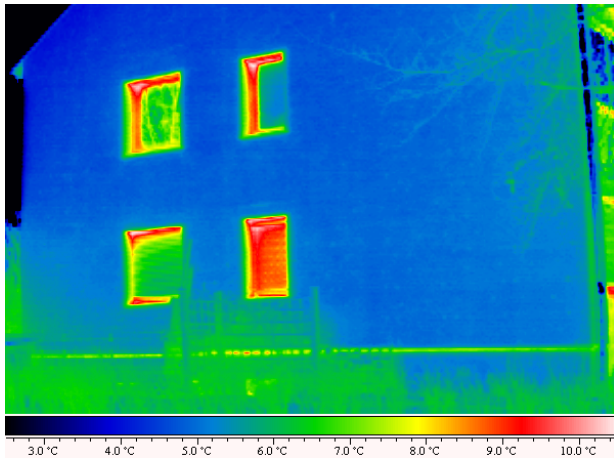


Abbildung 10: Bei dieser nachträglich gedämmten Giebelwand beschwerte sich der Auftraggeber über anhaltende Kälteerscheinungen in den Wohnungen und bezweifelte die Wirksamkeit der Dämmung.

Ursache waren aber stark windundichte Rollladenkästen, durch die kalte Zugluft in die Wohnungen eindringen konnte.

Passive und direkt ausgewertete Thermografie ist auch sehr dienlich, wenn es um die Ursachenermittlung von Mängelrügen geht. Im Fall aus Abbildung 10 wurde die Malerfirma, die das Wärmedämmverbundsystem auf die Giebelseite aufgebracht hatte beschuldigt, nicht sachgemäß gearbeitet zu haben, weil die Räume zur Giebelseite nach wie vor Kälte- und Zugserscheinungen aufwiesen. Mit einer Thermografie konnte die ordnungsgemäße Wirkung des WDVS, korrekte Dübelverteilung, die Anbringung einer Tragschiene unten und das Vorhandensein einer Perimeterdämmung bis zur Erdkante nachgewiesen werden. Die Firma hatte korrekt gearbeitet. Vielmehr konnten die Rolladenkästen als Ursache ausgemacht werden, die dann umgehend von einem Schreiner abgedichtet wurden.

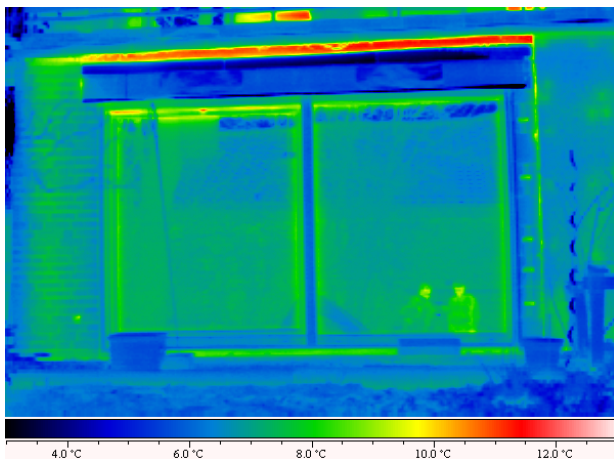


Abbildung 11: Nach Einbau des modernen Wärme-schutzfensters mit IR-Sperrschicht zeigte sich oberhalb des Fensters im Inneren Schimmel an der Decke. Das Fenster wurde als Ursache verdächtigt.

Tatsächlich war aber übersehen worden, dass der Betonsturz oberhalb des Fensters nicht gedämmt worden war und sich diese Wärmebrücke aufgrund des nun dichteren Fensters auswirken konnte.

Auch für die Aufklärung von unerwarteten Effekten wie in Abbildung 11 dargestellt, kann Thermografie weiter helfen. Gerade der Fall der Auswirkungen von nachträglich eingebauten, hochdichten Fenstern in ansonsten ungedämmt bleibende Gebäude kann visualisiert werden. Gerade weil die Fenster hochdicht sind, wird der Energieverlust durch Lüftungsverluste unterbunden und Energie eingespart, die Wärmebrücken verbleiben aber. Dadurch dass es durch die verminderte Lüftung im Inneren feuchter wird, kann sich nun an Wärmebrücken Kondensat bilden. Dichte Fenster sollten also nicht mit Wärmedämmung verwechselt werden.

Diese drei Beispiele zeigen thermische Sachverhalte an Bauwerken einfach durch sachgerechte Darstellung und anschließende direkte Interpretation auf. Berechnet wird hier nichts, ebenso wenig ein konkreter Temperaturwert abgelesen.

Thermografie von Glasoberflächen

An sich ist Glas als mineralisches, nicht leitendes Material ein fast idealer Wärmestrahler, nur es hat eine sehr glatte Oberfläche, die auch thermisches IR-Licht recht gut reflektiert. Sorgt man aber dafür, dass sich eine Oberfläche im Glas spiegelt, die in etwa gleichwarm wie das Glas ist, so lassen sich sehr wohl die Glas- und damit Fenstereigenschaften wie in Abbildung 12 ermitteln. Insbesondere bei Innenaufnahmen geht das aufgrund des Strahlungsgleichgewichts im Gebäude ganz gut.

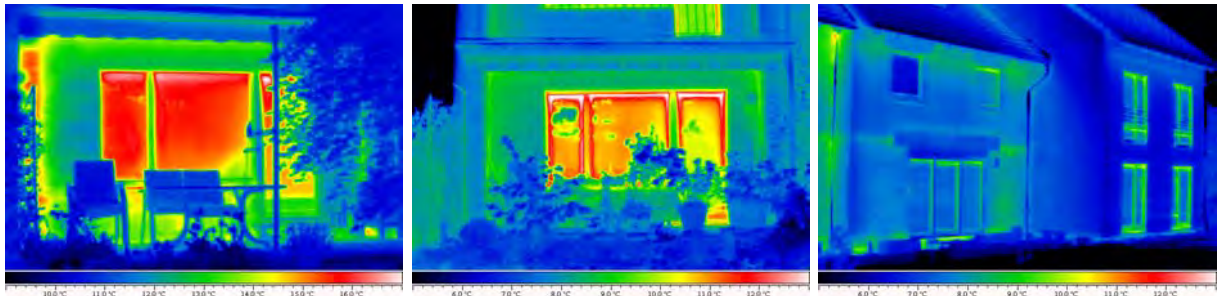


Abbildung 12: Von links nach rechts: Einfachglas mit U-Wert um 6, unbeschichtetes Doppelglas mit $U \sim 2,4$ bis 3 und rechts eine moderne Wärmeschutzverglasung mit $U \sim 1,1$ bis $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Zumindest die Klassifikation eines Fensters ist mit Thermografie gut möglich, wobei die Methode natürlich nicht so präzise arbeitet, dass ein Wärmeschutzglas mit einem U-Wert von 1,3 von einem mit $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu unterscheiden wäre, aber ein unbeschichtetes Doppelglas lässt sich problemlos von einem modernen Wärmeschutzglas unterscheiden. Das ist in der Praxis dann bedeutend, wenn es um die Entscheidung geht, ob ein Wärmeschutzglas eingebaut wurde oder nicht.

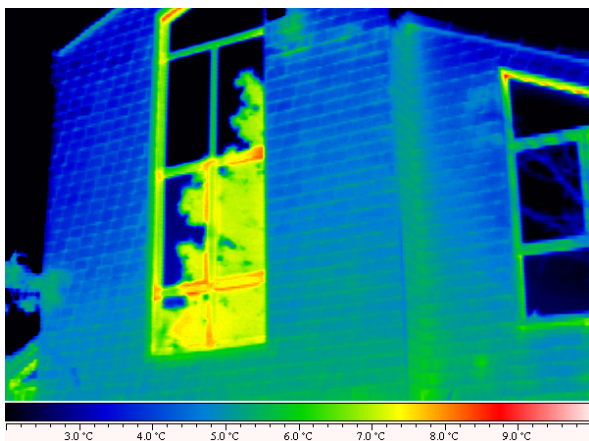


Abbildung 13: Auf Fensterglas kann man nur dann messen, wenn sich die in etwa gleich warme Umgebung im Glas spiegelt. Das ist im Erdgeschoß häufig der Fall. In oberen Etagen und bei dem Himmel zugeneigten Glasflächen ist eine Messung aufgrund der Reflektion des kalten Himmels nicht möglich.

Das eindrucksvolle Beispiel aus Abbildung 12 funktioniert nur deshalb von außen, weil zum Aufnahmezeitpunkt Strahlungsgleichgewicht durch tiefe Wolken vorherrschte und weil sich speziell bei Parterrefenstern leicht die in etwa gleichwarme Umgebung im Glasspiegeln kann. Bei klarerem Wetter und etwas höher gelegenen Fenstern kann sich aber der kalte Himmel im Glasspiegeln und so die aussage sehr stark verfälschen. Bei Messungen an Fensterglas sollte also nur unter ganz kontrollierten Umgebungsbedingungen oder am besten gleich nur aus dem Innenraum heraus gemessen werden.

Die wirklich quantitative Messung von Temperaturen auf glatten Glasoberflächen ist aber durch Präparieren mit einem fast idealen Strahler, z.B. Klebeband, möglich, auf dem dann punktuell gemessen wird.

Eine gewisse Ausnahme davon ist das Messen auf Glasoberflächen zu Innenräumen hin. Es gelten zwar dieselben Reflektionsgesetze wie bei Außenaufnahmen, aber es herrscht fast Strahlungsgleichgewicht im inneren von Gebäuden, so dass der Messfehler sich nicht stark bemerkbar macht.

Thermografie mit aktiver Anregung (Erzeugung einer Druckdifferenz)

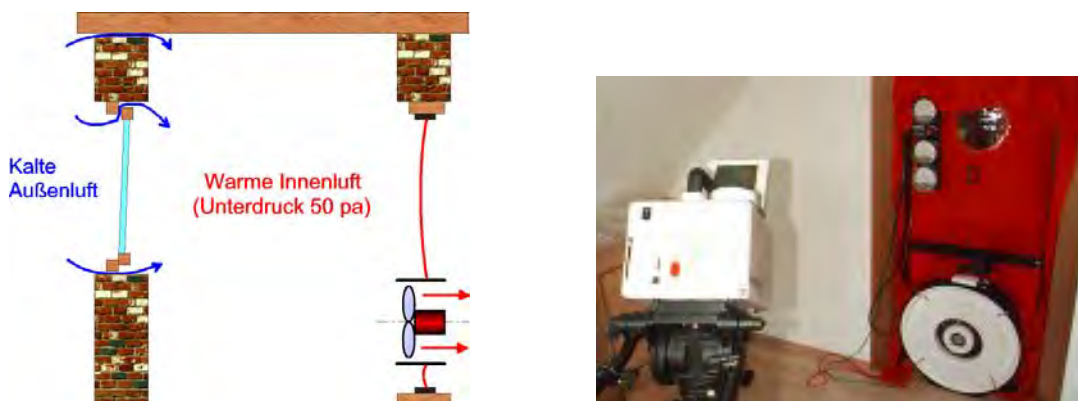


Abbildung 14: Thermografie kombiniert mit einem Gebläse, die kalte bzw. warme Luft von außen ansaugt, ist ein sehr empfindliches Verfahren, auch kleine Luftleckagen aufzufinden. Dazu wird in eine Tür ein Ventilator eingebaut, der im Gebäudeinneren einen Unterdruck erzeugt. Eingesaugte Kaltluft macht sich im Thermogramm als kalte Fahne bemerkbar.

Ein wichtiges Prüfverfahren im Bauwesen ist es, wenn das Differenzdruckverfahren mit der Thermografie kombiniert wird. Es kann schon unter die aktiven Verfahren eingeordnet werden. Hierbei wird im Gebäudeinneren ein Unterdruck erzeugt, der Kaltluft von außen einsaugt oder mit einem Überdruck Warmluft nach außen ausgeblasen. Die Luft selber kann thermografisch nicht nachgewiesen werden, weil Luft im thermischen IR durchsichtig ist, aber sie kühlt berührte Oberflächen ab, so dass an diesen Stellen typische Blasfahnen im Bild entstehen, deren Intensität der Undichtigkeit in etwa proportional ist.

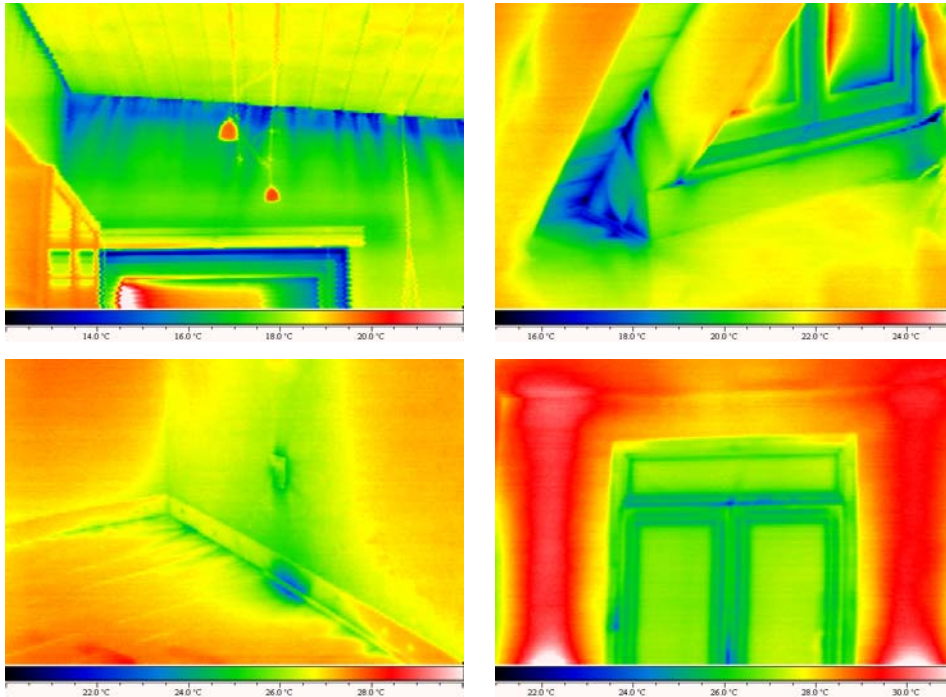


Abbildung 15: Verschiedene Beispiele an Dächern, Dämmungen, Installation und Fenstern, wie kalte Luft bei Unterdruck Undichtigkeiten in Bauwerken sichtbar macht.

Die Auswertung eines Thermogramms unter Unterdruckbetrieb ist wieder rein qualitativ durch Sichtprüfung des Thermogramms. Die Intensität der Blasfahnen hängt von der Temperaturdifferenz der eingesaugten Luft, von der Strömungsgeschwindigkeit und vom Überstreichwinkel einer festen Oberfläche ab, sehr viele unwägbare Parameter für eine quantitative Auswertung.

Thermografie unter instationären Verhältnissen

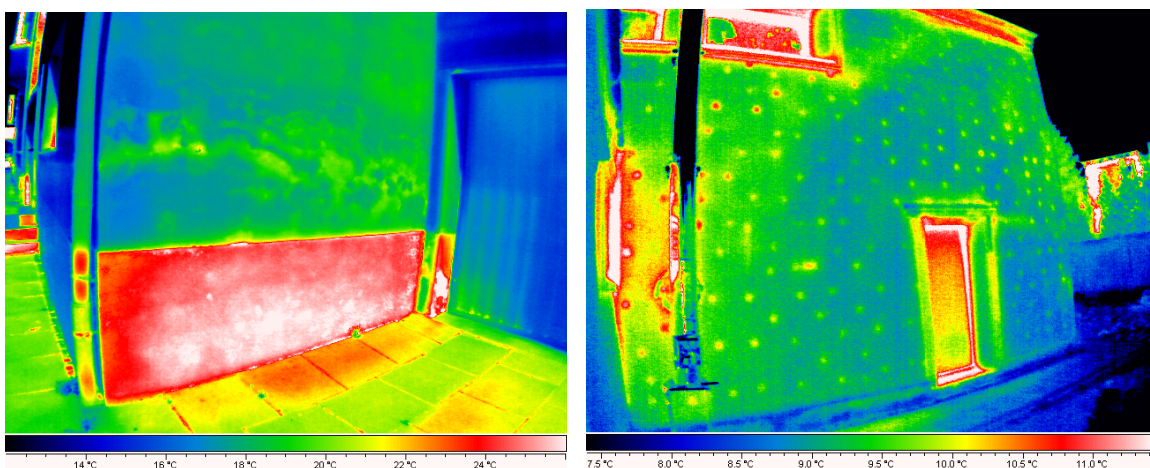


Abbildung 16: Zwei typische Thermogramme, die nur dadurch eine nutzbare Aussage liefern können, weil vor der Thermogrammaufnahme ein Aufheiz- oder Abkühlungsprozess ablief. Links werden Putzablösungen und aufsteigende Feuchtigkeit sichtbar, weil die Sonne die Bausubstanz unterschiedlich schnell aufwärmt, rechts werden die Dübel eines Wärmedämmverbundsystems dadurch sichtbar, weil sie langsamer auskühlen als der dünne Putz.

Die Thermografie unter instationären Verhältnissen ist der Zwischenbereich zwischen der stationären, passiven und der unter kontrolliert angeregten aktiven Thermografie. Es werden lediglich natürlich vorkommende Änderungen der Umgebungsbedingungen ausgenutzt. Weil diese kaum kontrollierbar sind, ist die Aussage aus so gewonnenen Thermogrammen rein qualitativ, weitere Berechnungen sind nicht vorgesehen. Für diese Art der Thermografie existieren noch keine Regelwerke.

Thermografie zur Beurteilung von Feuchteschäden

Eine völlig andere Ursache für Abkühlungen von Oberflächen ist, wenn Wasser auf einer durchfeuchteten Oberfläche verdunstet und sie somit abkühlt. Hierbei muss weiter unterschieden werden, ob es auf einer durch eine Wärmebrücke abgekühlten Oberfläche zu Kondensatbildung von Luftfeuchtigkeit kommt, oder eine Oberfläche durch Verdunstung von Wasser in der Bausubstanz abgekühlt wird.

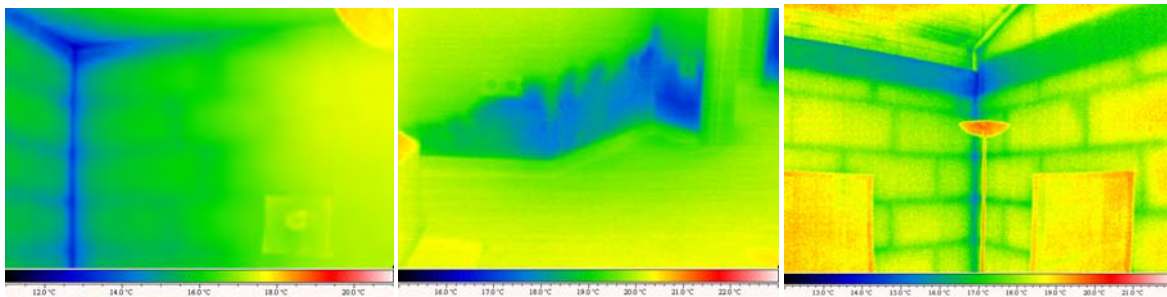


Abbildung 17: Drei verschiedene Thermogramme von Feuchteschäden: Links eine typische Wärmebrücke durch den Beton der Decke und des Ringankers oben, überlagert vom geometrischen Eckeffekt, in der Mitte eine intensive Durchfeuchtung der Bausubstanz durch einen Rohrbruch im Bodenaufbau und rechts eine Wärmebrücke, die aber für Schimmelbildung zu schwach ausgeprägt ist, hier tritt temperaturabhängige Staubablagerung (Fogging) auf.

Die grundsätzlich verschiedenen Feuchtigkeiterscheinungen sind anhand ihrer Form leicht auseinander zu halten. Durch lokale Unterschiede im dynamischen Gleichgewicht von Kapillartransport und Verdunstung erscheinen echte Durchfeuchtungen der Bausubstanz sehr unregelmäßig, darüber hinaus auch scharf begrenzt, während eine rein oberflächliche Kondensatbildung streng der Form der zugrunde liegenden Wärmebrücke folgt. Dazu trocknet eine Durchfeuchtung aus, wenn sie von der Wasserzufuhr abgeschnitten wird, wobei die Verdunstung ständig schwächer wird, während eine Kondensatbildung immer streng dem treibenden Temperaturgefälle folgt.

Erweist sich eine feuchte Stelle im Gebäudeinneren als Kondensatbildung auf einer Wärmebrücke, so kann mittels der Thermografie auch geklärt werden, ab welchen Temperatur- und Luftfeuchtwerten es zu Kondensatbildung kommt, um die zu planende Innendämmung auszulegen. Dabei wird davon Gebrauch gemacht, dass sich ein unter Realbedingungen aufgenommenes Thermogramm in eins umrechnen lässt, das unter normierten Idealbedingungen, z.B. aus DIN 4108 so entstehen würde.

Ein Sonderfall liegt vor, wenn bei völlig trockener Bausubstanz auch in einer Klimasimulation kein Hinweis auf Kondensat- und Schimmelbildung vorliegt, aber Ablagerungen an kühlen Stellen klar sichtbar sind: Hierbei handelt es sich um Staubablagerungen, dem so genannten Fogging.

Ausgesprochen häufig ist die Fragestellung, ob ein beobachteter Feuchteschaden durch das unsachgemäße Nutzerverhalten oder durch einen Bauwerksmangel verursacht

wird. In den Abbildungen 17 und 18 ist ein solcher typischer Fall dargestellt. Aus der übereinstimmenden glatten Form von Schaden und Wärmebrücken ergibt sich, dass es sich hier um einen ausschließlichen Kondensatschaden handelt, dass also nur die Oberfläche, aber nicht die Bausubstanz selber betroffen ist. Eine zerstörende Öffnung der Wand ist hier nicht mehr erforderlich.

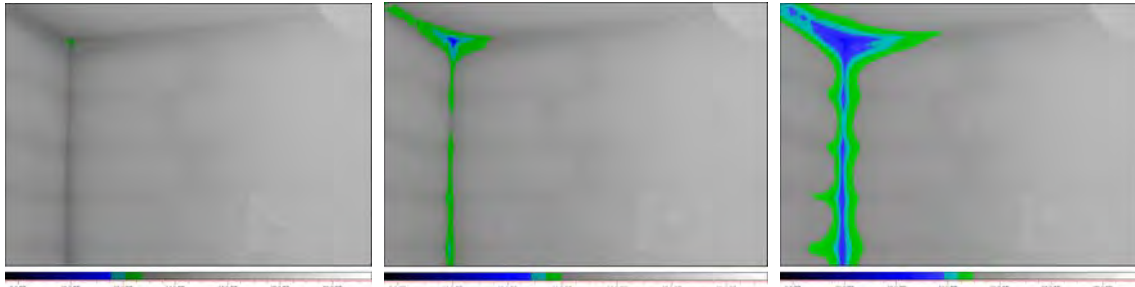


Abbildung 18: Numerische Tauwasser- und Schimmelsimulation aus einem Realthermogramm für die Fälle -5°C / +20°C / 50 % r.F. aus DIN 4108 links, -5°C / +21°C / 55 % r.F. mitte und -5°C / +20°C / 60 % r.F. im rechten Bild. Nur eine kleine Variation an den Parametern entscheiden darüber, ob ein Schaden eintritt oder nicht.

Ginge es rein nach den Temperatur- und Feuchtwerten der DIN 4108, so könnte das Bauwerk als schadenssicher gelten. Aber schon eine nur geringfügige Variation der Parameter für das Innenklima zeigt auf, dass das Bauwerk keineswegs tauwassersicher ist, denn die Parameter bewegen sich alle im zulässigen Bereich der Lüftungsnorm 1946, die man als normales Nutzerverhalten voraussetzen kann. Gerade in Zeiten, wo die Oberflächen in Wohnungen mit Laminat, Fliesen und Vinyltapeten immer stärker versiegelt werden und ihnen die Pufferfähigkeit für Wasserdampf genommen wird, kann eine durchgehend geringe Luftfeuchtigkeit von konstant 50 % nicht mehr gewährleistet werden. Die Thermografie zeigt auf, dass gerade solche häufigen Fälle differenzierter zu bewerten sind, als nur mit einer groben Ja-Nein-Entscheidung.

Wenn die Randbedingungen hinreichend gut bekannt und dokumentiert sind, so spricht wie im obigen Beispiel nichts dagegen, aus einem Thermogramm auch Temperaturwerte abzulesen und diese entsprechend bauphysikalisch zu interpretieren. Wie bei jedem Messverfahren entstehen systematische und zufällige Fehler. Zumindest die systematischen Fehler kann man durch Anpassung von Messung und dem Einfließen genau bestimmter Umgebungsparameter auf ein hinreichendes Maß reduzieren.

Schlussfolgerung und Ausblick

Thermografie ist ein wertvolles vielseitiges und vor allem zerstörungsfreies Analysewerkzeug im Bauwesen. Dazu ist es unabdingbar, daß die Voraussetzungen und Arbeitsregeln eingehalten werden und reproduzierbar gearbeitet, ausgewertet und dokumentiert wird. Werden diese Bedingungen eingehalten, so kann das Verfahren sehr vielfältige Aussage mit hoher Verlässlichkeit ermöglichen.

Um das zu gewährleisten, gibt es Richtlinien für die Bauthermografie, deren Einhaltung einen notwendigen Qualitätslevel ermöglichen. Diese Richtlinien sind aber derzeit erst in einem fortschreitenden Entwicklungsprozess begriffen.

Auch in der Normung zur passiven Bauthermografie ist eine Entwicklung zu beobachten: Derzeit steht der Entwurf zur DIN EN 13187 im Diskussionsprozess, der sich mit den thermischen Messverfahren im Bauwesen beschäftigt. Neuere Verfahren wie die quantitative Auswertung von Bauthermogrammen oder die Aufnahme unter

nichtstationären Bedingungen sind hier aber noch nicht erfasst. Hier besteht noch deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Angefangen bei der energetischen Bewertung eines Gebäudes ist die Thermografie dort besonders stark, wenn es um lokale thermische Befunde geht - Das können zum einen trockene Wärmebrücken sein, die durch hohe Wärmeableitung oder aufgrund der Form entstehen. Zum anderen können auch die Art und die Ursache für Feuchteschäden an Gebäuden ermittelt und nachvollzogen werden, sei es Kondensatbildung auf besonders kühlen Stellen an Wärmebrücken oder durch Wasser, das sich kapillar in der Bausubstanz ausbreitet. Zum dritten ist Thermografie ein empfindliches Mittel um auch Luftundichtigkeiten aufzuspüren, wenn sie mit einer aktiven Anregung durch Unterdruck kombiniert wird.

Das alles wird wie gesagt berührungs- und zerstörungsfrei geleistet, durch die moderne Datenverarbeitung auch sehr zeitnah und ohne großen Aufwand. Daher ist die Akzeptanz von Thermografie auch sehr groß, wenn sie sachgemäß durchgeführt wird.

Genau daran hapert es im Marktangebot an Thermografiedienstleistung derzeit aber. Durch den starken Preisverfall bei den einfachen Thermografiekameras ist das Bewusstsein geschwunden, es hier mit einer komplexen, vielen Störfaktoren unterworfenen Messtechnik zu tun zu haben, die auch so etwas wie sorgfältiges Arbeiten, vollständige Erfassung der Umgebung und eine Ausbildung über die Hintergründe der Messtechnik erfordert. Ganz im Gegenteil sehen Thermogrammbilder zunächst erstmal sehr eindrucksvoll aus, vor allem wenn sie unzulässig eng kontrastiert ist. Nur genau dadurch wird die Aussagekraft von Thermogrammen zerstört. Einfaches Hingucken reicht eben nicht.

Dieser Trend zur leichtfertigen Billigthermografie im Bauwesen macht deutlich, wie wichtig eine Ausbildung nach den Regelwerken und eine Zertifizierung als Sachkundenachweis ist. Hier sollte auch die Ausbildung zur passiven Thermografie wieder ernster genommen werden.