

Umwelteinflüsse auf die Genauigkeit von Gebäudethermografien

Georg DITTIÉ, Dittié Thermografie, Königswinter bei Bonn

Kurzfassung. Eine der klassischen, zumindest die bekannteste Anwendung der Thermografie im Bauwesen ist die Aufnahme eines beheizten Gebäudes von außen zum Sichtbarmachen von Wärmeverlusten. In der Praxis stellt sich dabei heraus, daß Thermogrammaufnahmen einigen Umwelteinflüssen unterliegen, die den Wärmestrom von innen nach außen derart überlagern, daß die Aufnahme erschwert oder gar unmöglich wird. In diesem Beitrag werden die Grenzen der Umwelteinflüsse diskutiert, bis zu denen eine aussagekräftige Thermografie von Gebäuden möglich ist.

Einleitung

Die Kenntnis, wann und unter welchen Umständen eine Thermogrammaufnahme eines Gebäudes von außen zu aussagekräftigen Resultaten führt, ist wirtschaftlich wirklich bedeutend. Denn diese Anwendung wird nicht nur vereinzelt, sondern im Rahmen von Energieberatungsprogrammen massenweise durchgeführt. Gerade in Zeiten steigender Heizenergiepreise und der Klimadebatte ist die Nachfrage nach Gebäudethermographie sehr groß. Werden die Randbedingungen zu großzügig ausgelegt oder nicht oder nur einseitig beachtet, so hat das Auswirkung auf die Qualität der Aussage und damit den Erfolg von Energieberatungskampagnen. Andererseits schwanken die Umgebungsbedingungen bei Außenaufnahmen wie in keinem anderen Gebiet der Thermografie. Hier schafft die Kenntnis der Toleranzgrenzen die Kapazitäten für eine erfolgreiche Durchführung von Gebäudethermografien

Optimale Bedingungen

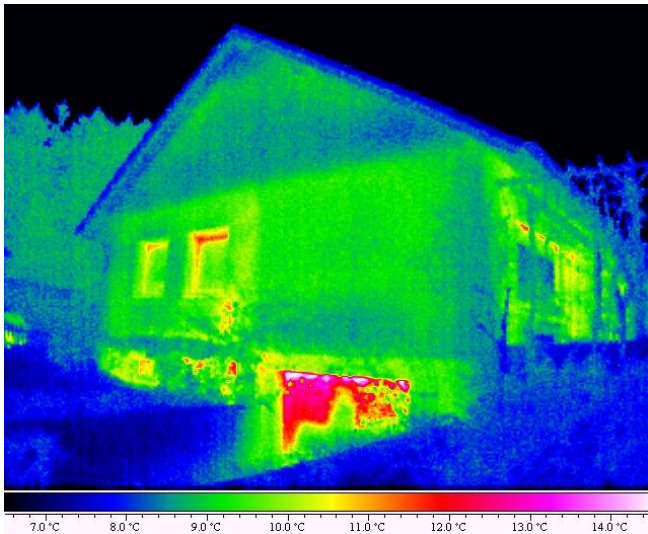


Abbildung 1: Thermogramm unter optimalen Bedingungen, nachts, bedeckter Himmel, Temperaturdifferenz > 12 Grad

Das Optimum für eine Außenthermografie ist dann gegeben, wenn der Wärmefluß durch eine gegebene Bausubstanz von keinem anderen Wärmefluß überlagert wird, also wenn keine Einstrahlung herrscht, z.B. nachts, aber ebenso keine Abstrahlung stattfindet, wie bei tief bedecktem Himmel mit einer Wolkentemperatur nahe um die Umgebungstemperatur. Auch sollte kein Wind vorherrschen und keine Verdunstungs- oder Benetzungsprozesse stattfinden. In diesem Fall wird die Qualität des Thermogramms eigentlich nur noch vom Emissionsgrad der Bauwerksoberfläche und vom Signal/Rauschabstand der IR-Kamera bestimmt.

Affine Abbildung

Oftmals, gerade von Laien, wird eine möglichst große treibende Temperaturdifferenz verlangt. Man erhofft sich so eine möglichst gute Thermogrammqualität. In dieser Forderung steckt noch die historische Erfahrung daß die ersten Thermokameras aufgrund ihres schlechten S/N-Verhältnisses außen Frostwetter und innen eine spezielle, sehr hohe Beheizung verlangten. Durch den technischen Fortschritt der letzten 20 Jahre hat sich dieser Umstand erledigt, so daß bei aktuellen Kameras der vorhandene Rauschpegel so gering ist, auch schon bei normaler Beheizung und durchschnittlich kühlem (aber nicht extra kaltem) Wetter qualitativ hochwertige Thermografie zuzulassen. Erfahrungsgemäß reichen 10 – 12 Kelvin Temperaturdifferenz aus, wenn keine Störeinflüsse vorliegen.

Ein einfacher, von jedem selbst durchzuführender Versuch zeigt, daß das Gesetz der affinen Abbildung auch in der Thermografie gilt, daß also der Kontrast in einem Thermogramm (praktisch) alleine und linear von der treibenden Temperaturdifferenz abhängt. Dazu braucht man nur dasselbe Objekt (Gebäude, Baudetail) bei verschiedenen Temperaturdifferenzen thermografieren, wobei nur die Umweltbedingungen wie fehlende Ein- und Abstrahlung sowie weitgehende Windstille konstant gehalten werden müssen. Am besten geeignet für diese Vergleichsmessungen sind Innenaufnahmen, da im Inneren von Gebäuden im wesentlichen Windstille und Strahlungsbedingungen wie in einem Hohlraum herrschen.

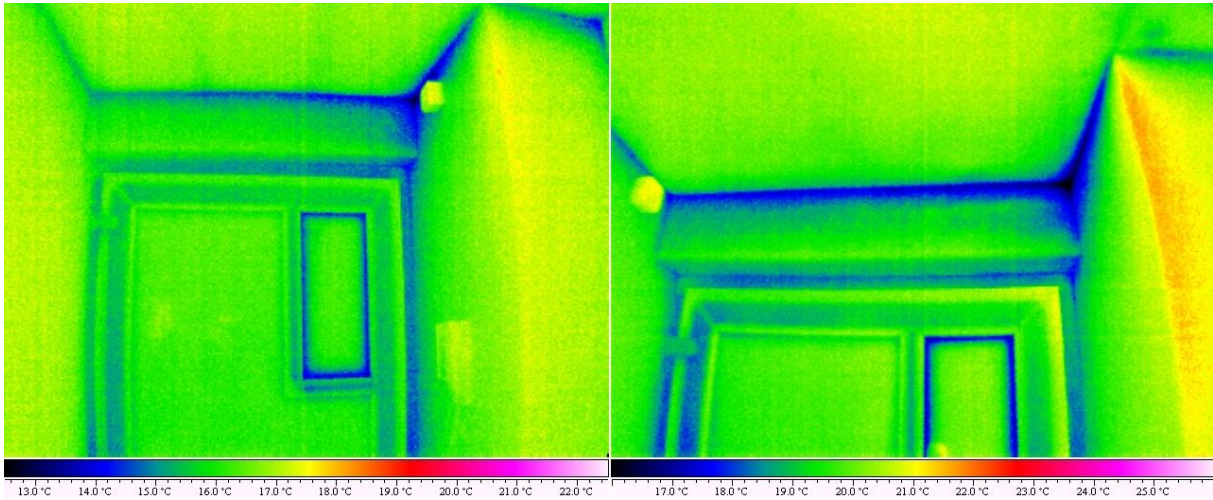


Abbildung 2: Vergleich zweier identischer Konstruktionen bei sehr unterschiedlicher Beheizung. Beide Thermogramme sind faktisch identisch.

Emissionskoeffizient

Aus Messungen und Tabellen weiß man, daß der Emissionskoeffizient von nichtleitenden Oberflächen nahe 1 liegt, wobei sich die Untergrenze so um die 0.9 bewegt. Lediglich metallische Oberflächen weichen davon mehr oder minder stark nach unten ab. Weiter variiert der Emissionskoeffizient mit dem Korrosions- bzw. Verwitterungszustand sowie vor allem mit der Rauigkeit. Spalten, offene Fugen, Hohlkehlen bilden dabei kleine Hohlräume, deren Emissionskoeffizient sich wieder dem Schwarzkörper annähern. In der Regel kann der Emissionskoeffizient einer Bauwerksoberfläche aber nur grob abgeschätzt werden.

Der systematische Fehler, der entsteht, wenn man den Emissionskoeffizient generell mit 1 annimmt, ist bei der Gebäudethermografie sehr klein, da die Temperaturabweichungen von Bilddetails zur Umgebungstemperatur nur in der Ordnung von 1/100 der Absoluttemperatur liegen und darüber hinaus nur in der vierten Wurzel eingehen. Bei einem Unterschied von Epsilon von 0.9 zu 1 entsteht ein maximaler Meßfehler von 0.6 Grad, etwas was noch in der absoluten Meßgenauigkeit der Kameras liegt und zudem ist die Meßabweichung angenähert linear proportional mit der Temperatur selber. Man macht keinen Fehler, wenn man den Emissionskoeffizient generell auf 0.95 setzt und dabei nicht vergißt, auch die Umgebungstemperatur zu bestimmen. Ist das zu schwierig, so kann ohne großen Meßfehler auch mit dem theoretischen Schwarzkörperwert von 1 gearbeitet werden.

Tageszeit

Eine beliebte Ansicht in der Gebäudethermografie ist, man möge nur nachts messen, weil dann keine Einstrahlung das Ergebnis verfälschen könne. Diese Regel berücksichtigt aber nur eine Störkomponente bei der Außenthermografie, nämlich die Energiezufuhr. Dabei kann aber die Energieabfuhr durch starke Abstrahlung in die Umwelt so groß sein, daß sie jegliche Temperaturunterschiede durch Wärmeübergang durch die Bausubstanz völlig verdeckt.

Mißt man mit einer Thermokamera in einen wolkenlosen Himmel, so kann man dort sibirische Temperaturen antreffen, wobei hier die Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft nicht mehr klein gegenüber der absoluten Temperatur und damit der Wärmestrom aufgrund des Strahlungstransports nicht mehr zu vernachlässigen ist.

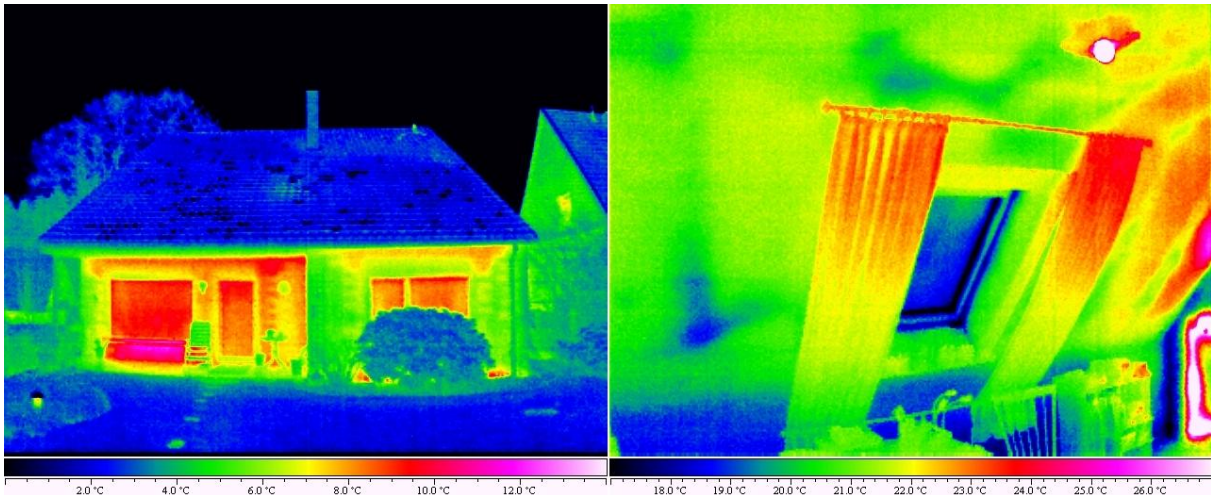


Abbildung 3: Das Dach sieht von außen gut gedämmt aus, gemessen wurde hier nachts, aber bei sternklarem Himmel. Die Innenaufnahme zeigt aber, dass die Abstrahlung außen die Dämmungsmängel überdeckt.

Dagegen können zahllose Beispiele aufgeführt werden, an denen Außenthermografie am helllichten Tag problemlos möglich ist. Diesen brauchbaren Aufnahmen ist gemeinsam, daß zum Aufnahmezeitpunkt stark bedecktes Wetter vorherrscht, so daß sowohl keine starke Einstrahlung vorliegt als auch der Strahlungsaustausch mit der Himmelshalbkugel abgeblockt ist.

Testmessungen zeigen, daß die Absorption von Tageslicht bei Beleuchtungsstärken von 1500 Lux und weniger (ca. 2 Watt pro Quadratmeter) nicht zu meßbaren Erwärmungen von Bauwerksoberflächen führt.

Wetterbedingungen

Die optimalen Bedingungen für eine Außenthermografie bei Gebäuden geben vor, daß die überlagerten Störeinflüsse klein gegenüber den vorhandenen Wärmeströmen durch die Bausubstanz sein sollen. Daraus leiten sich die bevorzugten Wetterbedingungen ab, die diese Forderungen erfüllen.

Es sollte kein starker Wind wehen. Schon die Anströmung mit Windstärke 4 erzeugt zusätzliche Wärmeübergänge je nach Auftreffwinkel von 15 – 21 Watt / qm*K. In Küstengebieten nichts ungewöhnliches, ist 4 Bft im Binnenland schon eher selten. Windstärken zwischen 1 und 3 sind gerade noch unbedenklich, zumal umstehende Nachbargebäude und Bäume eine dicke, windarme Grenzschicht verursachen.

Ob man thermografische Aufnahmen bei Regen machen darf, ist umstritten. Hier könnte eine zusätzliche Störung durch Verdunstung und durch die Kühlung durch das Regenwasser erfolgen. Eine kurze Messung mit einem Hygrometer bei fallendem Regen zeigt aber, daß die umgebende Luft durch den intensiven Kontakt mit der Tropfenoberfläche mit Wasserdampf gesättigt ist und während eines Regenfalls keine Verdunstung stattfindet, weil es kein Dampfdruckgefälle gibt. Verdunstung tritt erst bei erhöhter Einstrahlung und beim Eintreffen nicht gesättigter Luftmassen nach Regenende auf. Dann sollte man allerdings auf Aufnahmen verzichten, weil zu diesem Zeitpunkt die Verdunstungsrate und damit die Abkühlung einer Oberfläche stark von deren Kapillarität, Wärmeleitung und –kapazität abhängt, Werte, die in der Regel unbekannt sind.

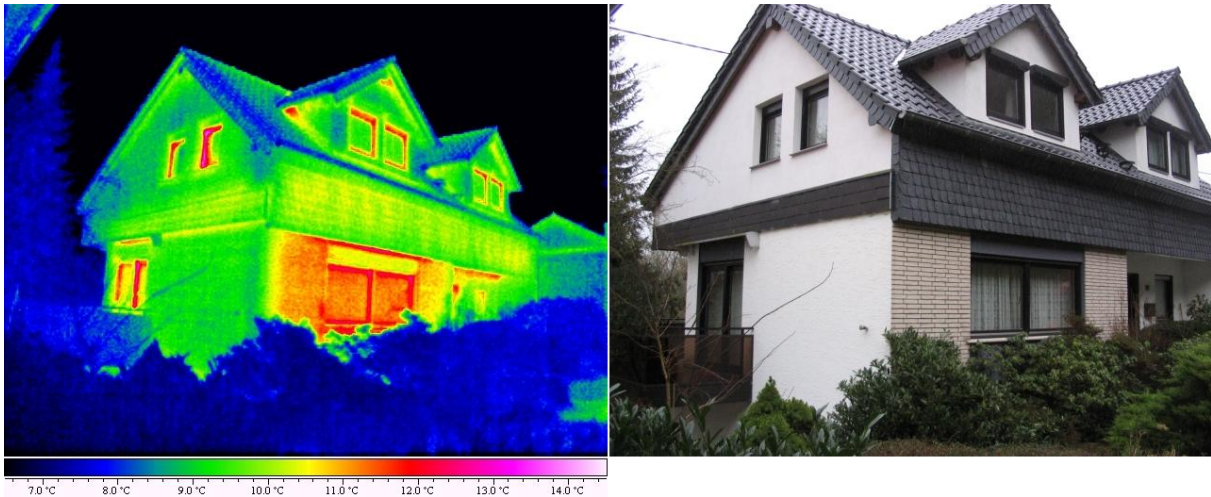


Abbildung 4: Das Thermogramm ist aussagekräftig und zeigt keine merklichen Störeinflüsse durch die Umweltbedingungen, dabei entstand es tagsüber bei fallendem Regen

Der Temperaturunterschied zwischen fallenden Regentropfen und der Umgebungsluft ist sehr gering, solange es sich nicht um schnell fallenden Hagel bei Gewittern handelt. Durchschnittliche Regentropfen brauchen ca. 10 bis 30 Minuten von der Bildung bis zum Boden (Fallgeschwindigkeit 2 – 4 m/sec bei einer Bildungshöhe von über 5000 Metern). In dieser Zeit findet ein intensiver Wärme- und Stoffaustausch mit der Umgebungsluft statt, so daß sich die Tropfentemperatur der Umgebungstemperatur anpaßt. Fällt ein mäßig starker Regen mit $3.6 \text{ mm} / \text{h} * q_m$ oder $1 \mu\text{m} / \text{sec} * q_m$, so hat dieser Regenfall eine Wärmekapazität von 0.004 kJ/K . Ein Quadratmeter Dachziegel hat zum Beispiel dagegen eine Wärmekapazität von 50 kJ/K

In jedem Fall schädlich ist klarer Himmel, ob ganz klar, diesig oder mit hohen Schleierwolken. Tagsüber herrscht dann Sonneneinstrahlung bzw. diffuse Einstrahlung, die den Wärmestrom durch die Bausubstanz um ein Vielfaches übersteigt. Nachts fällt zwar die Sonneneinstrahlung weg, aber dafür kann IR-Strahlung von der Erdoberfläche ungehindert in den Weltraum abgestrahlt werden. Die restlichen Aerosole und die molekulare Absorption setzen der Abstrahlung im thermischen IR bei klarem Wetter (Sterne sind sichtbar) nur wenig entgegen, so daß kein meßbarer Gegenstrom existiert und Oberflächen bis tief unter die Umgebungstemperatur auskühlen können. Die vereiste Autoscheibe trotz Plusstemperaturen ist das bekannteste Beispiel für diesen Abstrahleffekt.

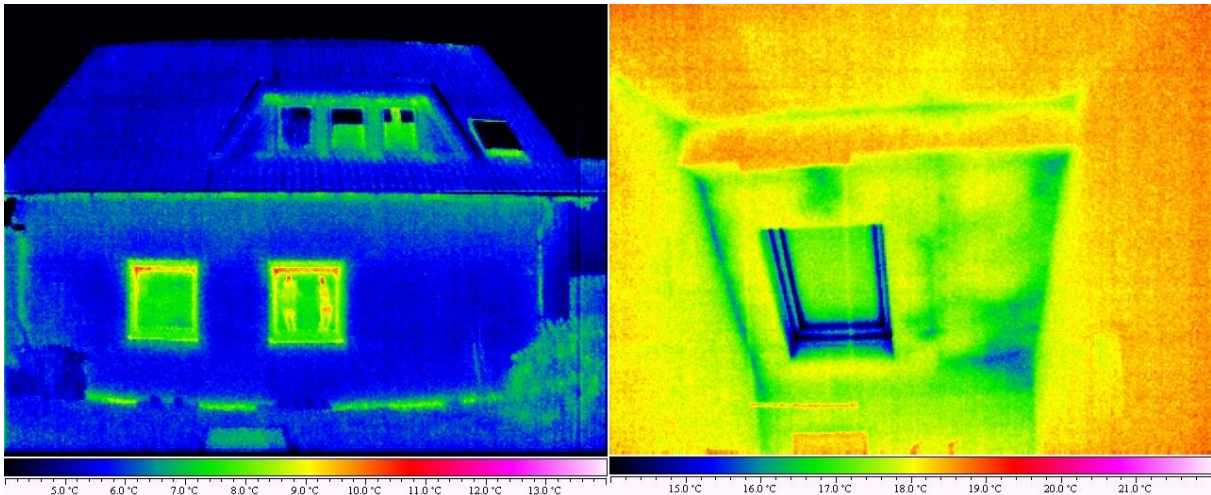


Abbildung 5: Das Außenthermogramm entstand bei klarem Wetter. Das Dach um das Schrägfenster scheint von außen teilweise gut gedämmt, von innen aber nicht: Ein Effekt der intensiven einseitigen Wärmeabstrahlung in den freien Himmel.

Günstig für eine Außenthermografie sind jedoch vollständig bedeckte Wetterlagen. Ist tagsüber kein Sonnenstand erkennbar, so ist die Wolkenschicht dicht genug, selbst wie ein opaker Festkörper zu strahlen. Dabei nimmt die sichtbare Wolkenunterschicht die Temperatur der Luft an, die in der Höhe der Wolkenuntergrenze herrscht. Typische tiefe Stratus- oder Altostratusbewölkung hat dabei eine Untergrenztemperatur, die zwischen 2 und 10 Grad unterhalb der Umgebungstemperatur am Boden liegt. Da sich eine Wolke wie ein Hohlraumstrahler verhält, kann man die wirksame Wolkentemperatur direkt messen. Störeinflüsse machen sich ab Temperaturunterschieden von 10 Grad und mehr und/oder größeren klaren Wolkenlücken bemerkbar.

Zusammenfassung

Durch die praktische Arbeitserfahrung vor Ort kann gefolgert werden, daß die simple Regel, bitte nachts und bei möglichst geringer Außentemperatur zu messen, so nicht gilt. Ebenso nicht richtig ist es, Messungen bei Regenwetter zu vermeiden.

Wesentlich ist, darauf zu achten daß der Wärmestrom von innen nach außen nicht durch andere Wärmeströme überdeckt wird, vor allem durch Vermeidung von zu starker Einstrahlung durch direkte Sonne und durch diffuses Licht, aber auch durch zu starke Abstrahlung in einen klaren Himmel. Klare Nächte sind zur Außenthermografie fast ebensowenig geeignet wie Sonnentage.

Geeignete Bedingungen für die Thermografie von Gebäuden herrschen dann vor, wenn sowohl die Einstrahlung als auch die Abstrahlung deutlich kleiner als der eigentliche Nutzeffekt durch den lokal unterschiedlichen Wärmedurchgang durch die Bausubstanz ist. Das ist bei stark bis vollständig bedecktem Wetter der Fall, wenn kein stärkerer Wind und keine diffuse Beleuchtungsstärke größer 1500 Lux herrscht. Dabei ist die Tageszeit unbedeutend.

Sehr genau kann auch bestätigt werden, daß der Absolutbetrag des Temperaturunterschiedes zwischen dem Gebäudeinneren und der Umwelt für die Qualität des Resultats bis zur gerätebedingte Grenze unbedeutend ist: Der Kontrast in einem Thermogramm hängt praktisch alleine von der treibenden Temperaturdifferenz ab und zwar linear. Es gilt das Gesetz der affinen Abbildung.