

Wie Bauwerksoberflächen zu ihren Temperaturen kommen

Georg DITTIÉ¹

¹ Dittié Thermografie, Königswinter

Kontakt E-Mail: dittie@thermografie.de

Kurzfassung: In der klassischen Bauthermografie werden Bauwerke anhand der Verteilung ihrer Oberflächentemperaturen beurteilt. Im Vortrag wird erläutert, wie es durch Wärmeübertragungsprozesse zu diesen Temperaturen kommt. Die Praxis zeigt, dass die Einflüsse des Emissionskoeffizienten oftmals überschätzt, die ganz grundlegenden Mechanismen der Wärmeübertragung durch die Bausubstanz oder gar zwischen Umwelt und Bauwerk unterschätzt bzw. sogar ignoriert werden. Durch Messungen und geometrische Betrachtungen gelingt es, die Größenordnungen der einzelnen Faktoren zu bestimmen, die letztendlich die Temperatur am Messobjekt bestimmen.

Einführung

Anlass des Beitrags ist der immer wieder mal auftretende Fall, dass Thermogramme von Gebäuden auftauchen, die bei sehr kaltem, aber auch klarem Wetter von außen her aufgenommen wurden. Bei so einem Wetter wird natürlich von allen Oberflächen Infrarotlicht in die Umgebung abgestrahlt und durch diesen Energieabtransport gekühlt, wobei die Oberflächen um so mehr auskühlen, je mehr sie dem klaren Himmel ausgesetzt sind.

In Unkenntnis dieser eigentlich alltäglichen Wärmeabgabe durch Abstrahlung werden dann die niedrigen Oberflächentemperaturen so interpretiert, als ob das Gebäude besonders gut gedämmt oder wahlweise der Emissionskoeffizient der abgebildeten Oberfläche besonders gering sei.

So eine Interpretation wird problematisch, wenn mithilfe solcher Thermogramme ein Bauwerk bewertet werden soll. Tatsächliche thermische Schwachstellen, Strukturen oder Auffälligkeiten werden übersehen, fehlerhaft interpretiert oder können erst gar nicht visualisiert werden. Wegen des hohen Wertes des Prüfobjekts kann das erhebliche wirtschaftliche und juristische Konsequenzen haben.

Deshalb ist es wichtig, dass besonders bei der Ausbildung zum Gebäudethermografen darauf geachtet wird, dass die Wärmeübertragung und damit der tatsächliche Energietransport vom Gebäude in die Umwelt klar gemacht und die Bedeutung des Emissionskoeffizienten für übliche Baustoffe dazu in die rechte Relation gesetzt wird. Es



hat sich herausgestellt, dass der Emissionskoeffizient mit Ausnahme von Metallblechen und Glas faktisch keine Rolle spielt.

Emissionskoeffizient von Baustoffen

Es ist bekannt, dass der Emissionskoeffizient von Fensterglas nicht vernachlässigt werden kann. Ebenso kann der Emissionskoeffizient bei Metallen nicht vernachlässigt werden, wobei sich Metalloberflächen an Bauwerken wegen des praktisch immer unbekanntem Verschmutzungs- und Korrosionsgrades ohnehin nicht reproduzierbar thermografieren lassen.

Zunächst wird der Emissionskoeffizient von typischen Baustoffen untersucht, exemplarisch an einer Dachpfanne, an mineralischem Rauputz, an Beton und an KS-Stein, aber eben auch auf unbeschichtetem Fensterglas.

Der Emissionskoeffizient wird mit einer einfachen Apparatur gemessen. Die aus der Umgebung reflektierte Infrarotstrahlung wird dabei von einer temperierten Glocke bereitgestellt, die über die zu messende Oberfläche gestülpt wird. Weiter wird die zu bestimmende Oberfläche mit einem Referenzstreifen präpariert, dessen Emissionskoeffizient bekannt ist und auf dem die tatsächliche Oberflächentemperatur bestimmt werden kann. Nun wird durch ein Loch in der temperierten Glocke Baustoffoberfläche und Referenzstreifen thermografiert. Dabei ist nur darauf zu achten, dass die Glocke eine Temperatur hat, die mindestens 20 K von der Objekttemperatur abweicht und dass man die Messung zügig durchführt, damit sich das Messobjekt nicht durch die Glocke aufheizt. Damit sind alle drei Temperaturen $T_{\text{körper}}$, T_{messung} und $T_{\text{reflekted}}$ bekannt und können in die Berechnungsformel für den Emissionskoeffizienten eingesetzt werden: $\varepsilon = (T_{\text{messung}}^4 - T_{\text{reflekted}}^4) / (T_{\text{körper}}^4 - T_{\text{reflekted}}^4)$



Abb. 1: Testaufbau zum Einmessen des Emissionskoeffizienten, bestehend aus Prüffläche (hier Rauputz), Vergleichsstreifen und temperierter Haube, die auf ca. 50 °C aufgeheizt wird.

Als Referenzstreifen hat sich glatter Malerkrepp bewährt, dessen Emissionskoeffizient bei Raumtemperatur um die 0,99 liegt, wie mit einer Kalibriermessung bestimmt wurde.

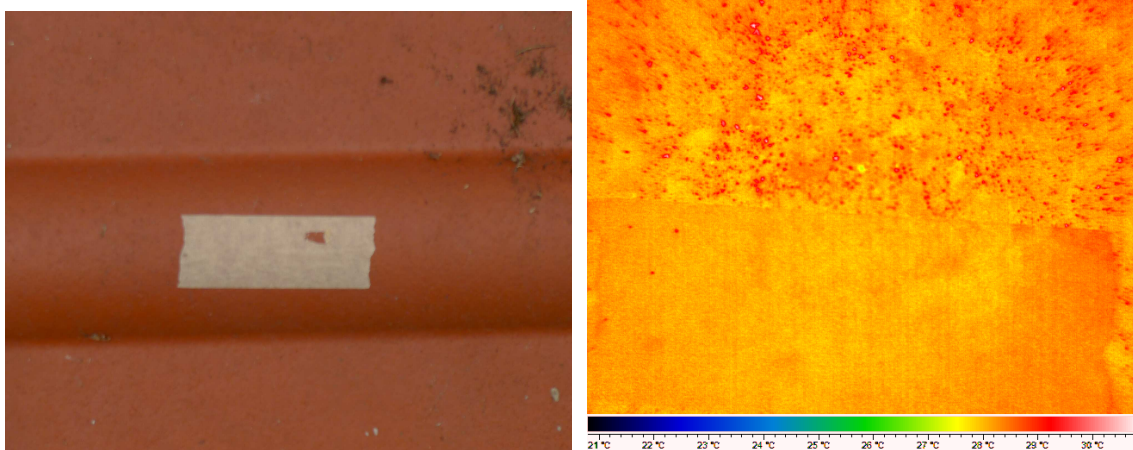


Abb. 2: Links eine präparierte Dachpfanne, rechts die Makroaufnahme der Pfanne und des Vergleichsstreifens. Bei der Aufnahme war die Abdeckhaube auf ca. 50°C aufgeheizt.

Bei keinem der Baustoffe ergibt sich ein Emissionskoeffizient, der wesentlich von 0,99 abweicht, der Unterschied zum idealen Strahler ist teilweise nicht mehr wahrnehmbar. Das ist einerseits dadurch zu erklären, dass alle nichtmetallischen Baustoffe Nichtleiter und damit ohnehin gute IR-Emittenten sind, aber vor allem auch an der Rauigkeit der Oberflächen, die teilweise erheblich größer ist als die Wellenlänge des Infrarotlichts und damit natürlich schon Hohlraumeffekte zeigt.

Die einzige Ausnahme ist das Fensterglas. Je nach Verschmutzungsgrad liegt hier der Emissionskoeffizient bei 0,90 bis 0,88. Dabei hat Glas schon eine ideal glatte Oberfläche, wenn man die Wellenlänge des IR-Lichtes als Maßstab nimmt.

Dächer sind da besonders auffällig: Dacheindeckungen kühlen bei klarem Wetter sehr stark aus, weil sie aufgrund des Planckschen Gesetzes Infrarotstrahlung in den klaren Himmel abgeben, aber von dort so gut wie nichts zurückbekommen, weil die mittlere Temperatur dort erheblich geringer ist. Dieser Effekt sollte jedem bekannt sein, der sein Auto unter freiem Himmel parkt – Eiskratzen ist angesagt, auch wenn die Lufttemperatur nicht unter den Gefrierpunkt gesunken ist. Auch das übliche Material, aus dem Dachpfannen gefertigt sind, hat einen Emissionskoeffizienten nahe dem idealen Strahler. Damit ist die Oberflächentemperatur von Dächern tatsächlich so niedrig. Das besagt aber nichts, wie gut das Dach tatsächlich gedämmt ist.

Wärmeübertragung an Bauwerken

Betrachten wir also die tatsächliche Wärmeübertragung an Bauwerksoberflächen. Sobald die Umgebungstemperatur sich von der Oberflächentemperatur unterscheidet, fließt Wärme zu oder ab. Dieser Wärmefluß vom Bauwerk in die Umgebung besteht aus einem konvektiven Teil und einem Strahlungsanteil.

Der konvektive Teil besteht zunächst einmal aus der natürlichen Auftriebskonvektion, die alleine durch den Temperaturunterschied zustande kommt, auch bei Windstille. Die Berechnung hängt von der Orientierung der Oberfläche und ihrer Größe ab sowie von den Stoffeigenschaften der Luft. Den Wärmeübergangskoeffizient α_K kann man z.B. mit Hilfe des VDI-Wärmeatlas [1] berechnen oder auch aus vorgefertigten Diagrammen ablesen. Für

normale Bauwerke im Metermaßstab und bei im Bauwesen typischen Temperaturdifferenzen von wenigen Grad beträgt der konvektive Anteil zwischen 2 und 3 W/m²K. Die Temperaturdifferenz hierbei ist der Unterschied zwischen Bauwerksoberfläche und der Temperatur der ungestörten Luft.

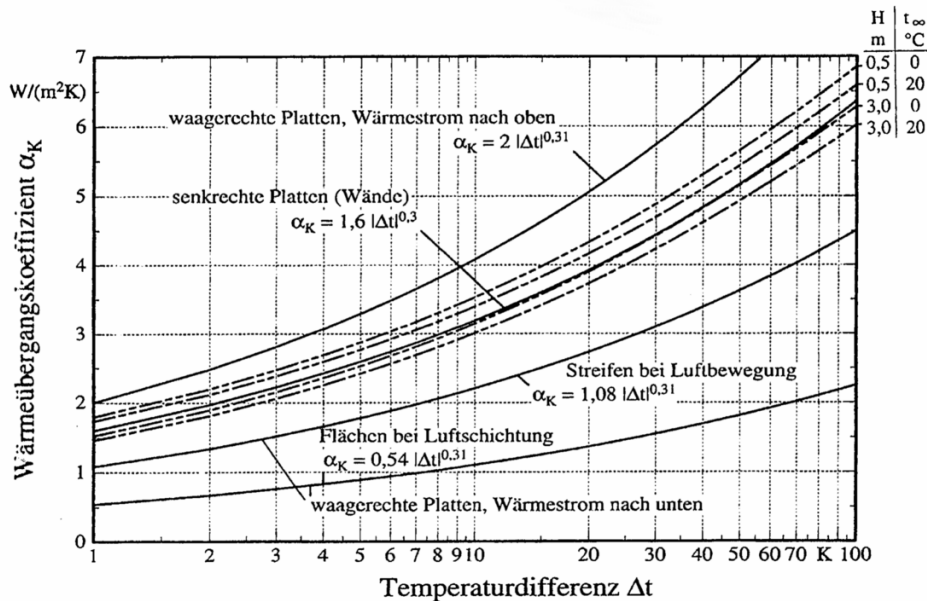


Abb. 3: Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient je nach Orientierung, Größe und Temperaturdifferenz. Grafik aus Recknagel, Sprenger, Schramek, Taschenbuch für Heizung+Klimatechnik, OldenbourgVerlag S. 187 Kapitel 1.3.5

Den Strahlungsanteil kann man durch die Stefan-Boltzmann-Gleichung und dem Differenzenquotient für 1 K selber bestimmen:

$$\alpha_{\text{Str}} = \sigma * (T_{\text{bauwerk}+0,5}^4 - (T_{\text{bauwerk}-0,5})^4) \quad \text{gilt nur bei } T_{\text{Umgebung}} = T_{\text{strahlung}}$$

Wichtig ist hier, dass man zur Berechnung des Wärmestroms als Temperaturunterschied den zwischen Bauwerksoberfläche und der Strahlungstemperatur der Umgebung nimmt, wobei letztere mit der reflektierten Temperatur identisch ist. Speziell bei Außenaufnahmen bei klarem Wetter kann sich diese Strahlungstemperatur ganz erheblich von der Lufttemperatur unterscheiden. Das typische α_{Str} liegt bei 5,5 W/m²K und damit schon mehr als doppelt so hoch wie der konvektive Anteil α_K .

Für Innenräume ist die Sache einfach, weil Innenräume allseitig geschlossen sind und die Strahlungstemperatur der Innenoberflächen in der Regel gleich der Lufttemperatur ist. Damit wird $\alpha_{\text{ges}} = \alpha_K + \alpha_{\text{Str}} = 2,1 + 5,5 = 7,6$ W/m²K. Genau dieser Wert wird auch in der DIN 4108 [3] für den Wärmeübergangskoeffizienten für Innenoberflächen angegeben und ist damit rechnerisch sehr schön nachvollziehbar.

Bei Außenaufnahmen ist die Sache komplizierter, denn jetzt muß der konvektive Anteil des Wärmestroms mit der Lufttemperatur und der Strahlungsanteil mit der teilweise deutlich abweichenden Strahlungstemperatur berechnet werden. Ein Wärmeübergangskoeffizient α_{ges} macht wenig Sinn, weil ja zwei verschiedene Temperaturdifferenzen wirksam sind:

$$q_{\text{gesamt}} = \alpha_K * (T_{\text{Bauwerk}} - T_{\text{Luft}}) + \alpha_{\text{Str}} * (T_{\text{Bauwerk}} - T_{\text{strahlung}}) \quad \text{gilt allgemein}$$

Wie stark die Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur abweicht, wird dadurch klar, indem man vom Objekt aus in die Umgebung schaut und bestimmt, welche Flächenanteile der klare und damit sehr kalte Himmel am Halbraum hat. Dieser Flächenanteil kann durch Integration der einzelnen Temperaturen über die Halbraumfläche ermittelt werden. Man sieht aber sofort, dass die Strahlungstemperatur stark variieren kann, je nach Nachbarschaft, Bäumen, Bewölkungsanteile, Dunstgehalt der Atmosphäre.

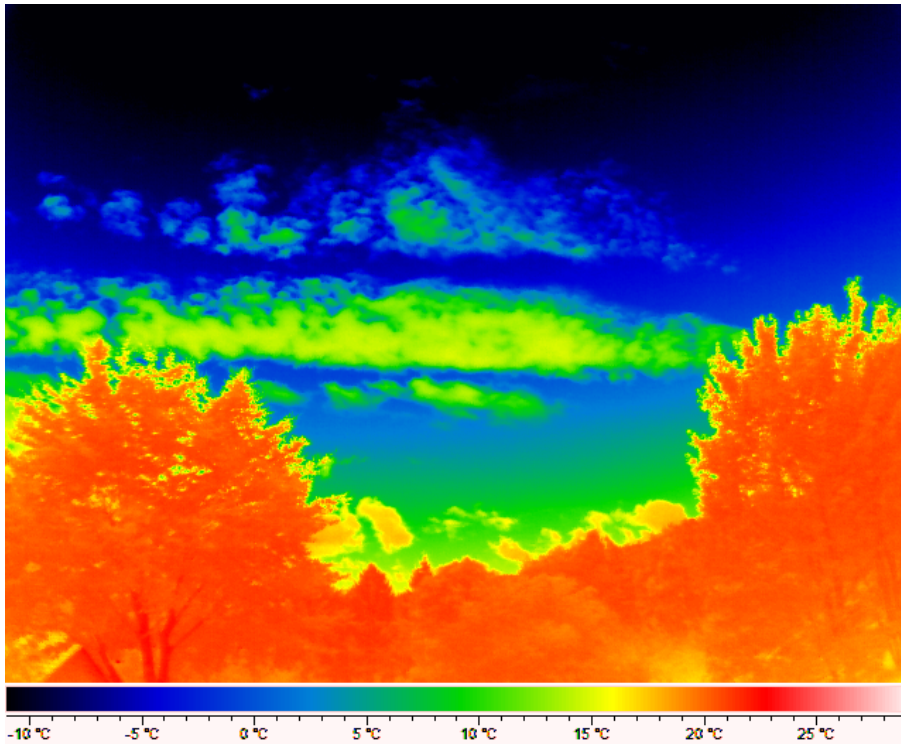


Abb. 4: Thermische Umgebung bei mäßig schönem Wetter vom Messobjekt aus gesehen. Der Himmel hat eine IR-Temperatur zwischen +10 (Wolken) und bis zu -15 °C, die Bäume haben Temperaturen um die +18 °C, also alles sehr uneinheitlich. Zudem sorgen die ziehenden Wolken für ständig andere Flächenanteile, was das Einmessen der Strahlungstemperatur schwierig macht.

Einfluß der Geometrie auf die Wärmeübertragung

Damit kommt der Einfluß der Geometrie ins Spiel. Je nach Lage eines Oberflächenpunktes wird der kalte Himmel mehr oder weniger vom etwa umgebungswarmen Bauwerk selber abgeschirmt. Typische Beispiele hierfür sind Dach- und Balkonüberstände und vor allem die Fenster- und Türleibungen.

Der Einfluß der Gebäudegeometrie kann anhand von Laibungen leicht demonstriert werden: Bei Außenthermografien sieht man am oberen Rand von Laibungen öfters einen wärmeren Rand. Sehr leicht kann man sich dazu verleiten lassen, diesen Effekt so zu interpretieren, dass dort warme Luft z.B. aus einem undichten rahmen oder aus einem Rolladenkasten austritt, obwohl dort sich z.B. kein Rolladenkasten befindet oder sich Tür bzw. Fenster als durchaus dicht erweisen.

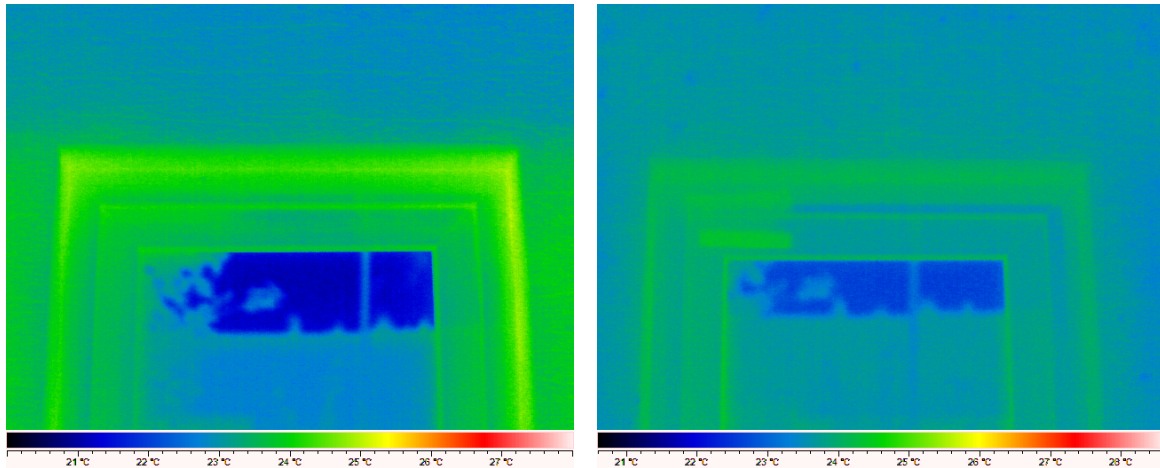


Abb. 4: Thermischer Abschattungseffekt an einer nachweislich luftdichten Türlaibung. Links bei klarem Nachthimmel, rechts bei Regenwetter und tief hängenden Wolken, die die Abstrahlung von Infrarot merklich begrenzen und den Kontrast des Effekts mindern.

Dieser warme Streifeneffekt kommt in erster Linie dadurch zustande, dass Oberflächen, die sich sehr nah am Rahmenanschluß, also tief unter dem Überstand der Laibung befinden, dadurch sehr wenig bis nichts vom kalten Himmel „sehen“. Dadurch ist die Differenz Oberfläche/Umgebung und in Folge der Wärmeabtransport kleiner als für Ort die sich sehr weit vorne an der Kante zur allgemeinen Wandfläche befinden.

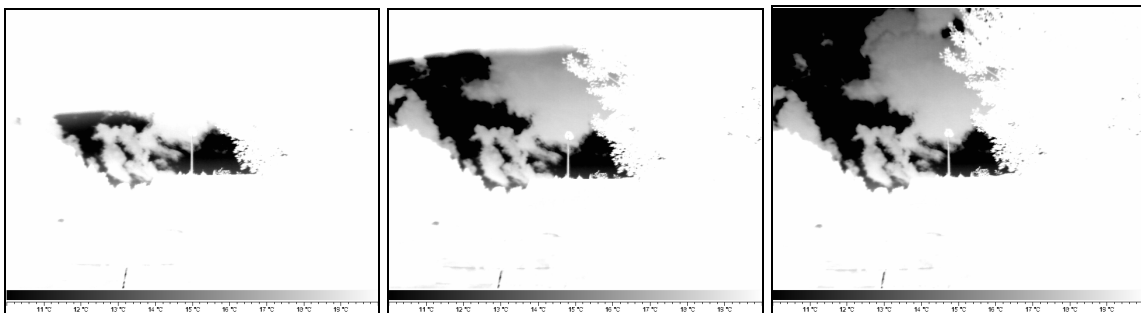


Abb. 5: Drei Thermogramme vom Ort der Türlaibung aus, links direkt am Rahmen, in der Mitte auf der Hälfte zur Vorderkante der Laibung und rechts direkt an der Vorderkante. Die Wanddicke bestimmt, welcher Flächenanteil kalter Himmel vom jeweiligen Ort aus IR-Strahlung aufnehmen kann. Hinten wenig, in der Mitte schon mehr und vorne ein Vielfaches.

Unter sehr tiefen Überständen wie Dachüberständen, Balkone und Terrassenüberdachungen kann dieser Effekt soweit gehen, dass das allgemeine Temperaturniveau des Bauwerks angehoben wird. Dazu kommt dann auch die behinderte Abströmung von erwärmter Luft, also eine Verringerung des konvektiven Wärmetransports. Das darf nicht mit einer schlechteren Wärmedämmung des betroffenen Gebäudeteils verwechselt werden.

Temperaturbildung an Gebäudeoberflächen

Wie sich herausgestellt hat, ist die Temperatur auf Gebäudeoberflächen tatsächlich so, wie sie von der Thermokamera angezeigt wird, wenn es sich um opake Nichtleiter, also alle Baustoffe außer Glas und blankem Metall handelt. In der passiven Gebäudethermografie ist es Voraussetzung, dass sich die Temperatur nicht ändert. Das ist dann der Fall, wenn der

Wärmestrom von der abgebildeten Oberfläche in die Umgebung im Gleichgewicht mit dem Wärmestrom durch Wärmeleitung aus dem Bauwerk heraus im Gleichgewicht befindet.

Damit wird die große Bedeutung der Wärmeübertragungsprozesse an Bauwerken klar, denn der Thermogrammkontrast hängt direkt vom Koeffizienten α_{ges} ab. Ist dieser Koeffizient dann davon abhängig, wo man gerade hinschaut (Gebäudegeometrie) oder wie Wetter (klarer Himmel, ziehende Wolken) und Umgebung (Nachbargebäude, Baumbestand) beschaffen ist, so wird die passive Gebäudethermografie von außen ein schwieriges, wenn Unterfangen.

Referenzen

- [1] VDI-Wärmeatlas
- [2] Recknagel, Sprenger, Schramek Handbuch für Heizung+Klimatechnik, Oldenbourg Verlag
- [3] DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“