

# Bauphysikalische Betrachtungen zur Anwendung der Thermographie

Autor(en): **Frank, Thomas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 14

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75108>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

der relativen Feuchtigkeit und dem Gasehalt der Atmosphäre (O<sub>2</sub> - O<sub>3</sub> - CO<sub>2</sub>) ab. Bild 4 zeigt den Transmissionsverlauf der Atmosphäre im interessierenden Spektralbereich und Bild 5 das Absorptionsvermögen der Atmosphäre in bezug auf die Messdistanz.

### Spektrale Oberflächeneigenschaften von Baumaterialien

Die *Emissivität des Messobjektes* muss unbedingt bekannt sein, um die effektive Temperatur bestimmen zu können. Die *Emissionsfaktoren* der meisten im Bau benützten Körper erscheinen in Tabelle 1. Falls sie unbekannt sind, können die Emissionsfaktoren mit dem Thermographiegerät und einem Taschenrechner direkt am Ort der Messung ermittelt werden.

Adresse des Autors: Ph. Viridis, dipl. Ing. ETHL, Freiburger Elektrizitätswerke (FEW), Pérolles 25, 1700 Freiburg.

Tabelle 1. Emissionsfaktoren der im Bauwesen verwendeten Körper. Genauigkeit: besser ± 0,03

Faserplatte, porös, unbehandelt	0,85	Eis, glatt	0°	0,97
Faserplatte, fest, unbehandelt	0,85	Eis, rau	0°	0,98
Sperrholz, unbehandelt	0,83	Schnee	-10°	0,85
Palisander, unbehandelt	0,83	Rauhreif	-10°	0,98
Eiche, gehobelt	0,90	Wasser	20°	0,96
Spanplatte, unbehandelt	0,90	Beton		0,92
Ölanstrich, grau, matt	0,97	Hohlziegel, gelb		0,78
Ölanstrich, grau, glänzend	0,96	Klinker, rot, glatt		0,86
Ölanstrich, schwarz, matt	0,94	Klinker, weiss emailliert		0,90
Ölanstrich, schwarz, glänzend	0,92	Verblendstein, rot		0,92
Ölfarben, Mittelwert aus 16 Farben	0,94	Verblendstein, gelb		0,72
Tapete, hellgrau, leicht gemustert	0,85	Vollziegel, blau, glasiert		0,90
Tapete, rot, leicht gemustert	0,90	Ziegelstein, rot		0,93
Kunststofftapete, weiss	0,84	Gipsverputz, unbehandelt		0,90
Kunststofftapete, rot	0,94	Glatte Verputz, grau		0,92
Jute, natur	0,87	Kunststoffputz, rohweiss		0,93
Jute, grün	0,88	Putz mit Farbe, weiss		0,92
Papier, weiss	0,92	Putz mit Farbe, schwarz		0,93
Lack, weiss	0,92	Putz mit Farbe, blau		0,95
Lack, klar, matt	0,93	Putz mit Farbe, olivgrün		0,95
Lack, schwarz, matt	0,97	Putz mit Farbe, dunkelgrün		0,95
Photolack, schwarz, matt	0,99	Putz mit Farbe, grün		0,95
Russ	0,95	Putz mit Farbe, rot		0,90
Dachpappe	0,93	Putz mit Farbe, dunkelrot		0,91
Erdboden, trocken	0,92	Putz mit Farbe, orange		0,94
Erdboden, nass	0,95	Putz mit Farbe, ocker		0,99
		Putz mit Farbe, gelb		0,99

Messbedingungen: a) Spektralbereich 2,0-5,6 µm (InSb-Detektor)  
 b) ε in Richtung der Normalen zum Messobjekt  
 c) Messtemperatur wenn nicht anders angegeben zwischen 20 und 40 °C

## Bauphysikalische Betrachtungen zur Anwendung der Thermographie

Von Thomas Frank, Dübendorf

### Einleitung

Die Thermographie stellt eine *neue, anspruchsvolle Messtechnik* auf dem Gebiet der Temperaturmessung dar. Deren Anwendung im Bauwesen erfordert bei der Auswertung und Interpretation der Messresultate den Einbezug einer *Vielzahl von Randbedingungen*. Die an der Gebäudehülle auftretenden Wärmetransportvorgänge müssen richtig erkannt und erfasst werden, um aufgrund der ermittelten Oberflächentemperaturen zutreffende Rückschlüsse auf das Isolationsvermögen eines Bauteiles ziehen zu können. Hierzu bedarf es einerseits der Kenntnis der material-spezifischen Oberflächeneigenschaften (spektrales Verhalten im kurz- und langwelligen Strahlungsbereich, Oberflächenrauigkeit) sowie der meteorologischen Einflussgrössen und der innenklimatischen Randbedingungen.

Thermographiemessungen halten immer nur einen *Momentanzustand* fest; es ist deshalb unerlässlich, auch Angaben über die thermische «Vergangenheit» des Messobjektes mit in die Untersuchung einzubeziehen. Das Kon-

zept einer Thermographiemessung sollte die in Bild 1 skizzierten Arbeitsschritte umfassen.

Die Anwendung der Thermographie im Bauwesen *setzt stationäre Wärmeleitungsverhältnisse voraus*. Der Zeitpunkt des Messvorganges muss nach dieser restriktiven Randbedingung gewählt werden. Im weiteren stellen die Wärmeübergangsbedingungen an den Oberflächen bei Aussenaufnahmen einen grossen Unsicherheitsfaktor dar, sind diese doch in sehr starkem Masse von den Klimafaktoren *Strahlung* und *Wind* ab-

Verwendete Symbole und Einheiten		
q	Wärmestromdichte	W/m <sup>2</sup>
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m K
θ	Temperatur	C
α	Wärmeübergangszahl	W/m <sup>2</sup> K
k	Wärmedurchgangszahl	W/m <sup>2</sup> K
ε <sub>0</sub>	Emissionsvermögen	-
ΔIR	IR-Strahlungsverlust	W/m <sup>2</sup>
v <sub>w</sub>	Windgeschwindigkeit	m/s

hängig. In der Praxis ist deshalb eine ganze *Reihe von Zusatzmessungen* erforderlich, um quantitative Aussagen über das Wärmedämmvermögen eines Bauteiles machen zu können.

Das *häufigste Anwendungsgebiet* der Thermographie liegt jedoch bei der qualitativen Begutachtung der Gebäudehülle: Inhomogenitäten in der Wärmedämmung (Wärmebrücken) können lokalisiert werden.

Bild 1. Ablaufprinzip einer Thermographiemessung



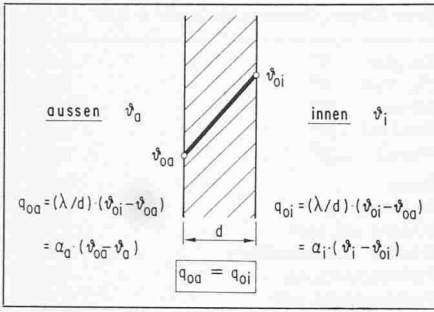


Bild 2. Temperaturprofil durch ein homogenes Bauelement im stationären Zustand

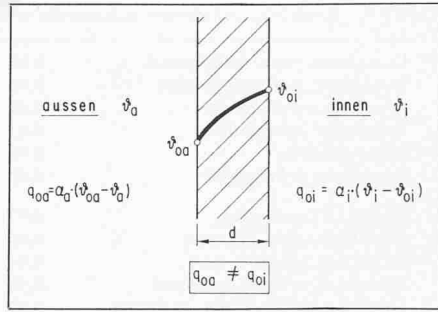


Bild 3. Temperaturverlauf durch ein homogenes Bauelement im instationären Zustand

Im folgenden werden die für eine zuverlässige Auswertung von Thermographieaufnahmen im Mittelpunkt stehenden Problemkreise, die instationäre Wärmeleitung und der Wärmeübergangsvorgang zwischen der Oberfläche und seiner Umgebung, näher erläutert.

### Wärmeleitung

Der Einsatz der Thermographie ist wie bereits erwähnt auf stationäre Wärmeleitungsverhältnisse begrenzt. Dies soll im folgenden etwas eingehender beleuchtet werden.

Nach Fourier kann für den eindimensionalen Wärmedurchgang nachfolgender Lösungsansatz verwendet werden:

$$(1) \quad q_x = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}$$

Die Wärmestromdichte  $q_x$  ist proportional zum Temperaturgradienten an der Stelle  $x$ , wobei die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  den Proportionalitätsfaktor darstellt.

Im stationären Zustand ist  $q_x$  über den ganzen Querschnitt konstant. Bei einer homogenen Wandkonstruktion wird dies durch den linearen Temperaturverlauf (Bild 2) illustriert:

Der Wärmedurchgang kann hier mit Hilfe des  $k$ -Wertes beschrieben werden (Gleichung 2). Zwischen den Oberflächentemperaturen  $\vartheta_o$ , dem  $k$ -Wert und den Wärmeübergangszahlen  $\alpha$  besteht zudem folgender, in den Gleichungen 3 und 4 aufgeführter Zusammenhang:

$$(2) \quad q_x = k \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)$$

$$(3) \quad \vartheta_{o,a} = \vartheta_a + k \cdot \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a)}{\alpha_a}$$

$$(4) \quad \vartheta_{o,i} = \vartheta_i - k \cdot \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a)}{\alpha_i}$$

Bei bekannten Wärmeübergangszahlen  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  ist es möglich, aufgrund der ermittelten Oberflächentemperaturen direkt Rückschlüsse auf den vorhandenen  $k$ -Wert des untersuchten Messobjektes zu ziehen. Dies gilt jedoch nur für den stationären Zustand und die Voraussetzung, dass die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  alle Wärmetransporte richtig erfasst. Liegt zum Beispiel eine Störwirkung in Form von Sonneneinstrahlung vor, so verlieren obenstehende Ansätze ihre Gültigkeit. Dies wird im Abschnitt «Wärmeübergangsvorgänge» näher erläutert werden.

Bei variablem Innen- und Aussenklima tritt neben dem Wärmeleitungsvorgang, wie er mit der Formel 1 erfasst werden kann, im weiteren eine Wärmespeicherung in Erscheinung. Dieser instationäre Zustand wird durch folgendes Temperaturprofil (Bild 3) charakterisiert:

Der gekrümmte Temperaturverlauf bedeutet, dass die Wärmestromdichte  $q_x$  einen variablen Wert aufweist, sowohl örtlich als auch zeitlich. Aus einer Momentanbetrachtung der Oberflächentemperaturen können demzufolge keine Rückschlüsse mehr auf den  $k$ -Wert eines Bauteiles gezogen werden. Der Einfluss des Wärmespeichervermögens auf den zeitlichen Verlauf des Wärme-

flusses an der Wandinnenoberfläche soll anhand einer leichten und einer schweren Baukonstruktion in Bild 4 und 5 veranschaulicht werden.

Wirkt von aussen eine Störfunktion in Form eines Temperaturimpulses (z.B. Sonneneinstrahlung) auf die Wandoberfläche ein, so kann ein unterschiedliches thermisches Verhalten der beiden Konstruktionen beobachtet werden: Die leichte Wand reagiert schnell auf die Störung und gibt kurzfristig einen grossen Wärmestrom an den Innenraum weiter. Die schwere Wand hingegen antwortet träge, und die Abgabe einer kleinen Wärmestromdichte erstreckt sich über einen längeren Zeitraum. Vom energetischen Standpunkt aus verhalten sich jedoch beide Konstruktionen gleich: die übertragene Wärmemenge ist gleich gross, was durch die gleichen Flächeninhalte unter den Kurven zum Ausdruck kommt. Die Speichermasse beeinflusst somit nur die Intensität und Zeitdauer der Antwort auf die Störgrösse. Für die Belange der Bauthermographie lassen sich daraus folgende Forderungen für deren Anwendung ableiten:

- Die thermische Vergangenheit eines Bauteiles muss bekannt sein, um feststellen zu können, ob stationäre Verhältnisse erreicht werden oder nicht. Am zweckmässigsten wird dies durch eine Registrierung der klimatischen Randbedingungen (Innen- und Aussenklima) über einen Zeitraum von mindestens 48 Stunden vor Messbeginn erreicht.
- Falls Störeinträge vorhanden sind, so sollten diese möglichst gering sein. Dies bedeutet in der Praxis: geringe Aussenlufttemperaturschwankungen (<2K), konstantes Innenklima (keine Nachtabsenkung!), keine Sonneneinstrahlung auf das Messobjekt sowie geringe Windeinwirkung.

### Wärmeübergang

Die in der Praxis verwendeten Wärmeübergangszahlen  $\alpha$  - zur Erfassung der Wärmetransportvorgänge an Gebäudeoberflächen - stellen einen Näherungslösungsansatz dar, welcher nur bei Mittelwertbetrachtungen über grössere Zeiträume sinnvolle Resultate liefert. Bei der Bauthermographie hingegen wird ein Momentanzustand betrachtet; die Wärmeübergangszahl kann deshalb sowohl örtlich als auch zeitlich grösseren Schwankungen unterworfen sein. Es ist daher notwendig, die am Wärmeaustausch beteiligten Einflussgrössen genauer zu analysieren. In Bild 6 sind die verschiedenen Wärmetransportvorgänge explizit dargestellt.

Bild 4. Thermisches Verhalten eines leichten Holz-wandpanels ( $k = 0,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ )

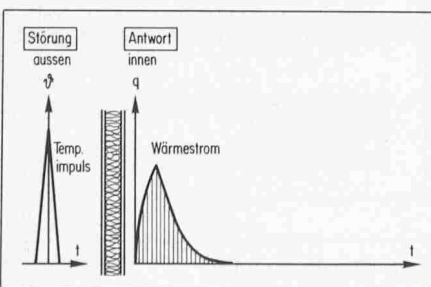
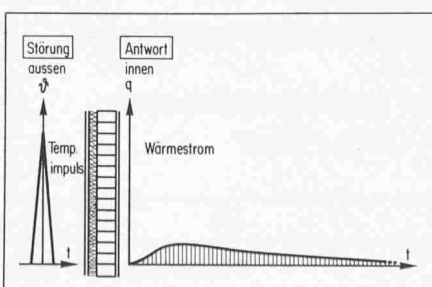


Bild 5. Thermisches Verhalten einer schweren Backsteinwand mit Aussenisolation ( $k = 0,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ )



Im Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  werden zwei unterschiedliche Wärmetransportarten zusammengefasst: der langwellige Strahlungsaustausch der Oberfläche mit der Umgebung (Infrarotstrahlungsaustausch) und der konvektive Wärmetransport zwischen der grenznahen Luftschicht und der Oberfläche. Die Wärmeübergangszahl setzt sich demzufolge aus zwei verschiedenen Anteilen zusammen:

$$(5) \quad \alpha = \alpha_{\text{Konvektion}} + \alpha_{\text{Strahlung}}$$

Diese Grössen sind zeitlich und örtlich variabel und werden durch folgende Parameter beeinflusst:

$$(6) \quad \alpha_{\text{Konvektion}} = f(\Delta \vartheta, v_{\text{Wind}}, \text{Oberflächenrauigkeit})$$

$$(7) \quad \alpha_{\text{Strahlung}} = f(\epsilon_o, \Delta IR)$$

Bedingt durch die an der Aussenoberfläche stärker schwankenden Randbedingungen (Temperatur, Strahlung, Wind) wird ersichtlich, dass der äussere Wärmeübergang  $\alpha_a$  eine schwer fassbare Grösse darstellt. In Bild 7 ist der zeitliche Verlauf des konvektiven Anteiles am Gesamtübergang über eine längere Periode dargestellt.

Die quantitativ schwer erfassbaren Wärmetransportvorgänge an der Gebäudeoberfläche sind mit ein Grund, dass thermographische Aussenaufnahmen in der Regel ohne aufwendige Zusatzmessungen nur qualitative Aussagen zulassen. Thermographiemessungen sollten sich daher auf das Gebäudeinnere konzentrieren.

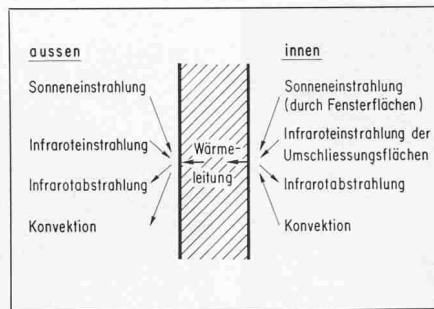


Bild 6. Explizite Darstellung der Wärmetransportvorgänge an der Gebäudehülle

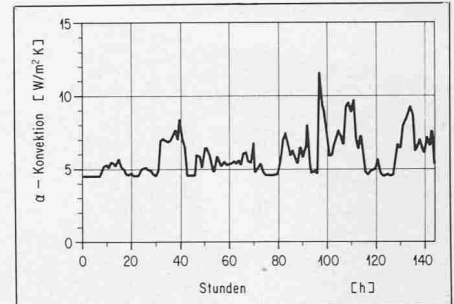


Bild 7. Konvektiver Wärmeübergang an einer horizontalen, glatten Metalloberfläche (Messresultate)

### Schlussfolgerungen

Der Einsatz der Thermographie im Bauwesen zur quantitativen Bestimmung der Wärmeverluste ist ohne Durchführung von Zusatzmessungen zur Festhaltung der Randbedingungen nicht sinnvoll. Dies wird durch eine Reihe von ausländischen Untersuchungen bestätigt [1-4]. Dasselbe gilt in noch ausgeprägterem Masse für grossräumige Messungen aus der Luft, welche einen noch höheren Schwierigkeitsgrad bei der Auswertung aufweisen [5-8].

Das Schwergewicht der Anwendung der Thermographie im Bauwesen liegt heute bei der qualitativen Beurteilung von Baukonstruktionen im Zusammenhang mit der Lokalisierung von thermischen Schwachstellen in der Gebäudehülle. Den Randbedingungen muss jedoch auch hier die notwendige Aufmerksamkeit zukommen, um eine zuverlässige Interpretation der Messresultate gewährleisten zu können.

### Literaturverzeichnis

- [1] Burch, D.M., Kusuda, T.: «An Infrared Technique for Estimating Building Heat Loss». ASHRAE Transactions 1978
- [2] Serwatzky, G.: «Infrarot-Thermographie». OEL, Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft 12, 1979
- [3] Wolfseher, U.: «Energieeinsparung sichtbar gemacht». Wksb 8, 1979
- [4] Künzel, H., Holz, D.: «Möglichkeiten und Grenzen der Infrarot-Thermographie». Bauphysik 5, 1980
- [5] Burch, D.M.: «Infrared Audits of Heat Loss». ASHRAE Transactions 1980
- [6] Goldstein, R.J.: «Application of Aerial Infrared Thermography to the Measurement of Building Heat Loss». ASHRAE Transactions 1978
- [7] Hoffman, U.: «Die Infrarot-Thermographie als Hilfsmittel für stadtklimatologische Untersuchungen». Bauphysik 1979
- [8] Burch, D.M.: «The Use of Aerial Infrared Thermography to Compare the Thermal Resistance of Roofs». NBS Technical Note 1107, 1979

Adresse des Verfassers: Th. Frank, dipl. Ing. ETH, EMPA, Abt. Bauphysik, 8600 Dübendorf.

## Anwendung der Thermographie im Bauwesen

Von Heinz Hirt, Spiez

### Anwendungsmöglichkeiten

Um den Leser in die Anwendungsgebiete einzuführen, beginnen wir mit einer Aufnahme von Oberflächentemperaturen einfacher Gegenstände. Die Krüge (Bild 1) sind auf einer thermographischen Aufnahme (Bild 2) wiederzuerkennen. Sie unterscheiden sich im Grauton: Heller Grauton bedeutet wärmer, dunkler Grauton bedeutet kälter. Der hellere Krug ist somit wärmer als der dunklere. Da beide Krüge gleiche Materialeigenschaften und gleiche Wandstärken haben, kann folgendes interpretiert werden: Der grosse Krug ist

mit mehr und wärmerer Flüssigkeit gefüllt als der kleine Krug.

Bild 1. Photographische Aufnahme zweier Krüge



Thermographische Aufnahmen im Bauwesen, z. B. die Aufnahme der Fassade (Bild 3) des Hauses (Bild 4), sind nicht so einfach zu interpretieren: Verschiedene Ursachen führen zu den unterschiedlichen Temperaturverteilungen. Für einen ersten Anwendungsbereich im Bauwesen sind einfache Grautonabstufungen hinreichend.

Bild 2. Thermographische Aufnahme zweier Krüge

