

Thermographische Messtechnik

Autor(en): **Virdis, Philippe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

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

Heft 14

PDF erstellt am: **19.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75107>

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.

Thermographie im Bauwesen

Was ist Thermographie? Die nachfolgende Artikelreihe zeigt die physikalischen und anwendungstechnischen Grundlagen und Eigenheiten dieses neuen Messverfahrens zur Feststellung von Temperaturunterschieden an Gebäuden. Das Verfahren gestattet, mittels

Sichtbarmachung von unterschiedlichen Oberflächentemperaturen an Fassaden von beheizten Gebäuden festzustellen, wo durch Wärmebrücken infolge schlechter Isolation mehr Wärme verloren geht als in ihrer Umgebung. Thermographie kann man zweckmässig

anwenden, wenn an die Fassadenrenovation eines alten Gebäudes geschritten werden soll oder wenn bei einem Neubau Zweifel daran bestehen, ob seine Ausführung den im Vertrag vereinbarten Bedingungen hinsichtlich Isolierfähigkeit entspricht. R.G.

Thermographische Messtechnik

Temperaturmessung von Oberflächen

Von Philippe Viridis, Freiburg

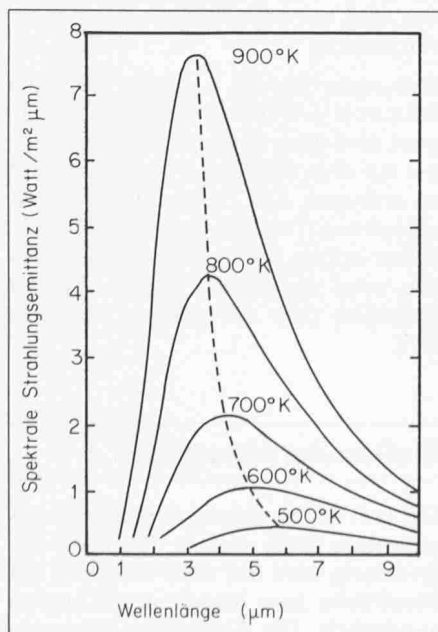
Physikalische Grundlagen

Spektrale Leistungsdichte

Die Thermographie ist eine moderne Anwendung der Strahlungsphysik, die u.a. erlaubt, die Temperatur eines Gegenstandes sichtbar zu machen.

Es ist jedermann wohl bekannt, dass ein stark erhitztes Objekt (z.B. ein Metallstück) weissglühend wird. Dieser Körper strahlt *sichtbare Wellen* des elektromagnetischen Spektrums aus; steigt die Temperatur, dann ändert sich gleichzeitig die Farbe (von rot zu gelb usw.). Die-

Bild 1. Zusammenhang zwischen absoluter Temperatur und spektraler Emittanz des schwarzen Körpers. Plancksches Strahlungsgesetz



se Farbgliederung entspricht einer Wellenlängenmodifikation der Strahlung je nach Temperatur. Jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (-273°C) liegt, sendet eine Wärmestrahlung aus. Diese Strahlung ist für das menschliche Auge erst bei hohen Temperaturen sichtbar. Bei normalen Temperaturen liegt sie im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums.

Der *Strahlungsfluss* eines Körpers hängt von seiner Temperatur, seinem Emissionsfaktor, der Wellenlänge der ausgesandten Strahlung und der Umgebungstemperatur ab. Max Planck hat die spektrale Leistungsdichte der Strahlung des schwarzen Körpers mit der nachstehenden Formel (Plancksche Formel) beschrieben:

$$W(\lambda) = \frac{2\pi h \cdot c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \cdot 10^{-6}$$

wobei:

- $W(\lambda)$ = Spektrale Leistungsdichte des schwarzen Körpers pro Mikrometer
- c = Lichtgeschwindigkeit
- h = Plancksche Konstante = $6,6 \times 10^{-34}$ Js
- k = Boltzmannsche Konstante = $1,4 \times 10^{-23}$ J/K
- T = absolute Temperatur des schwarzen Körpers
- λ = Wellenlänge

Strahlung des schwarzen Körpers

Der schwarze Körper ist ein *idealer Wärmestrahler*, der die gesamte einfallende Strahlung absorbiert.

Die Kurve (Bild 1) zeigt, dass das Maximum sich mit wachsender Temperatur gegen kürzere Wellenlängen verschiebt. Andererseits liegt das Maximum im Fall einer Raumtemperatur bei einer grösseren Wellenlänge (etwa $10 \mu\text{m}$). Durch die Messung der Strahlungswellenlänge eines schwarzen Körpers kann man seine *Oberflächentemperatur* bestimmen.

Um die totale Emittanz W des schwarzen Körpers zu ermitteln, integriert man die Plancksche Formel von $\lambda = 0$ bis zu $\lambda = \infty$ (Boltzmannsche Formel):

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W(\lambda) d\lambda = \sigma \cdot T^4 [\text{Watt/m}^2]$$

wobei:

$$\sigma = \text{Boltzmannsche Konstante} = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

Die Boltzmannsche Formel beweist, dass die ganze gestrahlte Leistung sich *entsprechend der vierten Potenz* der absoluten Temperatur verändert. Auf der graphischen Darstellung (Bild 1) entspricht die totale Emittanz W der Fläche unter der Planckschen Kurve bei einer bestimmten Temperatur.

Strahlung der realen Körper

Es gibt in der Natur keinen idealen schwarzen Körper. Das Verhalten der realen Körper kann nach den drei nachstehenden Prozessen beschrieben werden. Ein Teil der einfallenden Strahlung wird direkt *weiterübertragen* (T), ein anderer Teil wird *reflektiert* (R) und der dritte Teil *absorbiert* (A), vgl. Bild 2.

Ein weiterer Faktor, die *Emissivität* ϵ , bestimmt das Verhältnis zwischen der spektralen Emittanz eines Gegenstandes und jener eines schwarzen Körpers mit derselben Temperatur und Wellenlänge.

$$\epsilon = \frac{W_{\text{Objekt}}}{W_{\text{schwarzer Körper}}}$$

Es gibt drei Typen von Körpern im Zusammenhang mit der Emissivität:

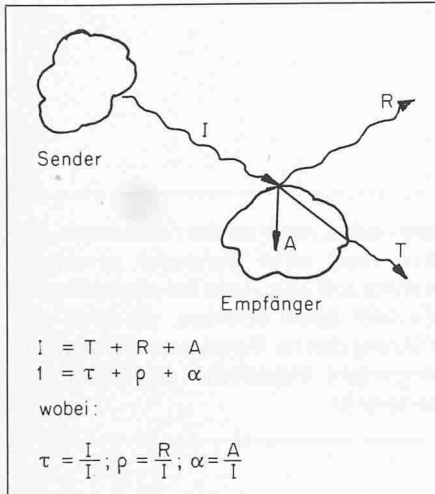


Bild 2. Strahlungsprozess der realen Körper

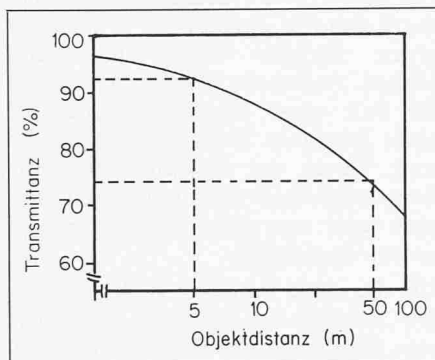


Bild 5. Zur Erfassung der am Ort der Messfläche vorhandenen Temperatur ist eine entsprechende Korrektur notwendig

1. der schwarze Körper für welchen $\varepsilon = 1$
2. der graue Körper für welchen $0 < \varepsilon < 1$
3. der selektive Strahler, dessen Emissivität sich mit der Wellenlänge verändert: $E = \varepsilon(\lambda)$

In der Praxis steht der Techniker meistens grauen Körpern gegenüber.

Messgerät-Typen

Mit Hilfe geeigneter Detektoren ist es möglich, die Ausstrahlungsintensität zu messen und sie in ein im Verhältnis zur Temperatur stehendes Signal umzuwandeln. Der grosse Vorteil solcher Detektoren liegt in der Möglichkeit, *berührungslose Temperaturmessungen* auszuführen.

Es gibt mehrere Ausrüstungen mit sehr verschiedenen Möglichkeiten:

- Die Pyrometersysteme sind leichte und tragbare Messgeräte, die eine *punktueller Abtastung* des zu untersuchenden Objektes ausführen. Die so erhaltene Information ist *quantitativ*.

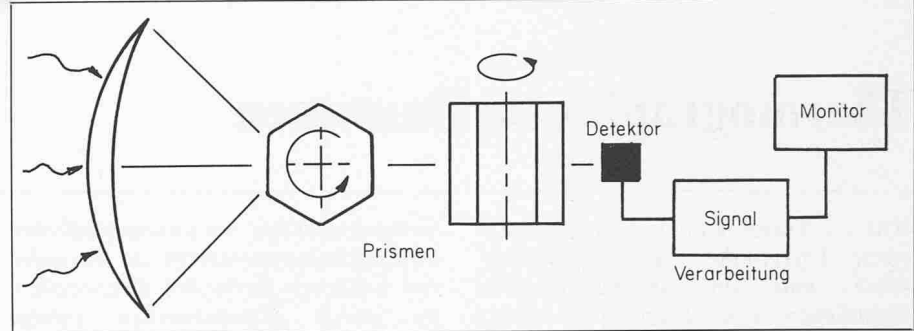


Bild 3. Strahlungsverlauf in der Kamera

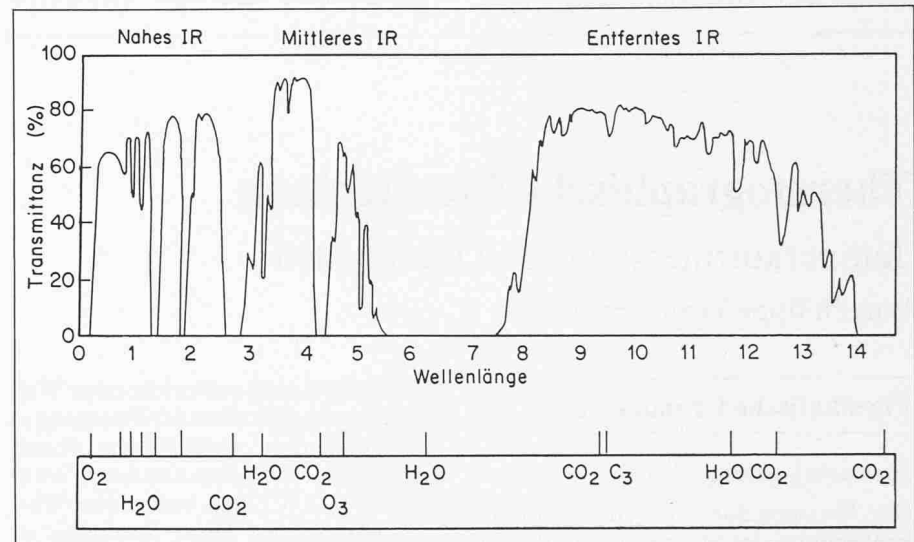


Bild 4. Transmission der Atmosphäre. Die Intensität der Absorptionsverluste hängt von der Distanz zwischen Messobjekt und Detektor ab

Einige Apparate bieten Verarbeitungsmöglichkeiten des Signals, wie z.B. die Eintragung und Speicherung des Maxi-, Mini- und Mittelwertes.

- Die *qualitativen Thermovisionssysteme* erzeugen ein *thermisches Bild* entsprechend der Temperaturverteilung der Objektoberfläche. Diese Apparate werden als Kontrollgeräte benutzt und erlauben *keine Messung*.
- Die meisten IR-Kameras sind heute hochentwickelte Systeme, die eine feine *quantitative Messung* der Temperatur und deren Verteilung ermöglichen. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Geräte sind ein breiter Temperaturbereich und eine hohe Temperaturauflösung, von denen die letzte für die Wärmedämmungsmessung der Gebäude absolut notwendig ist.

Wenn die Strahlung die Atmosphäre durchdrungen hat, wird sie durch die *infrarotdurchlässige Linse* (Germanium, Silizium) erfasst. Um ein Bild zu erstellen, wird das Signal mit Hilfe von zwei rotierenden Prismen Punkt um Punkt abgetastet und auf den Detektor projiziert. Der *Detektor* wandelt die IR-Strahlung in ein elektrisches Signal um. Die hohe Empfindlichkeit der Detektoren wird nur bei niedrigen Temperaturen erreicht.

Deswegen werden sie mit flüssigem Stickstoff (-196 °C) gekühlt. Das Signal wird dann *elektronisch verarbeitet*, um auf dem *Bildschirm* ein Wärmebild zu erzeugen. Die Darstellung der verschiedenen Temperaturen des Messobjektes erfolgt durch eine kontinuierliche oder stufenweise Steigerung der Grautöne oder der Farben auf dem Bild.

Messgerät-Prinzip

Eine Thermovisionsausrüstung umfasst eine Kamera mit auswechselbarer Linse, ein Wiedergabegerät (schwarz/ weiss oder farbig), einen Fotoapparat sowie eine Batterie für den netzunabhängigen Betrieb (Bild 3).

Einfluss der Atmosphäre

Die von der Strahlung durchquerte Atmosphäre wirkt wie ein *Filter*; die IR-Strahlung wird auf dem Weg von der Messfläche zum Empfänger (Kamera) geschwächt. Die Absorption hängt von

der relativen Feuchtigkeit und dem Gasgehalt der Atmosphäre ($O_2 - O_3 - CO_2$) 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. Virdis, dipl. Ing. ETHL, Freiburger Elektrizitätswerke (FEW), Pérolles 25, 1700 Freiburg.

Tabelle 1. Emissionsfaktoren der im Bauwesen verwendeten Körper. Genauigkeit: besser $\pm 0,03$

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	Glatter 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^2
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/m K$
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$
α	Wärmeübergangszahl	$W/m^2 K$
k	Wärmedurchgangszahl	$W/m^2 K$
ϵ_0	Emissionsvermögen	-
ΔIR	IR-Strahlungsverlust	W/m^2
v_W	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

