

TEMPERATURVERHÄLTNISSE AN AUßENOBERFLÄCHEN UNTER STRAHLUNGSEINFLÜSSEN

Manfred Kehrer, Thomas Schmidt
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany
manfred.kehrer@ibp.fraunhofer.de
thomas.schmidt@ibp.fraunhofer.de

KURZFASSUNG

Temperaturen an Außenoberflächen werden neben Wärmeströmen infolge Wärmeleitung des Bauteils und konvektiven Wärmeströmen aus der umgebenden Luft auch durch Strahlungseinflüsse bestimmt. Meistens wird dabei nur kurzwellige solare Einstrahlung berücksichtigt, welche die Bauteiloberfläche tagsüber erwärmt. Die langwellige, thermische Abstrahlung der Bauteiloberfläche wird oft vernachlässigt, wodurch die realen Verhältnisse meist nur mit eingeschränkter Genauigkeit wiedergegeben werden.

Es wird gezeigt, wie sich alle relevanten Strahlungsanteile an der Bauteiloberfläche bilanzieren lassen, die zur Erhöhung bzw. Erniedrigung der Oberflächentemperatur beitragen. Die Validierung von Berechnungsergebnissen mit WUFI® durch Vergleich mit Freilandmessungen am IBP zeigt generell eine gute Übereinstimmung.

ABSTRACT

Temperatures of exterior surfaces are affected by various heat fluxes. Beside the heat fluxes due to heat conduction through the building component and heat convection from the surrounding air, radiation effects are important as well. Usually only the short-wave radiation heating up the component's surface during the day is taken into account. The long-wave, thermal emission of the component's surface is often neglected. Realistic temperature conditions on the component's surface can not be computed very well in this way.

It is shown how the balance of all relevant radiation components can be evaluated which lead to an increase or decrease of the surface temperature. Validation of the WUFI® results by comparison with measurements at the IBP test site demonstrates generally good agreement between measurement and calculation.

EINLEITUNG

Temperaturen an Außenoberflächen werden durch Wärmeströme verschiedener Art beeinflusst. Neben Wärmeströmen infolge Wärmeleitung des Bauteils

und konvektiven Wärmeströmen aus der umgebenden Luft spielen Strahlungseinflüsse eine entscheidende Rolle. Meistens wird dabei nur die kurzwellige solare Einstrahlung berücksichtigt, welche die Bauteiloberfläche tagsüber erwärmt. Die langwellige Abstrahlung der Bauteiloberfläche wird oft vernachlässigt oder lediglich durch eine pauschale Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten wie in (DIN EN ISO 6946, 2004) wiedergegeben. Bei hygrothermischen Programmen werden diese Einflüsse bisher ignoriert. Die realen Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen können dabei nur mit eingeschränkter Genauigkeit reproduziert werden. Insbesondere die nächtliche Abkühlung von himmelsorientierten Außenoberflächen bis unter die Umgebungslufttemperatur, wie sie in der Praxis regelmäßig auftritt, kann auf diese Weise nicht berechnet werden. Für eine Beurteilung der Gefahr von Algenwachstum an Außenoberflächen bedingt durch Taupunktunterschreitungen, wie sie bereits seit Jahren beobachtet werden (Klingenberg, 2000), oder für eine Beurteilung von Frost-Tau-Belastungen muss dieser Effekt allerdings berücksichtigt werden. Neueste Erkenntnisse in (Energy Design Update, 2006) belegen, dass es in bestimmten Klimazonen zu Aufwechungen von Flachdächern kommen kann, wenn diese Effekte außer Acht gelassen werden.

SIMULATION

Zur Berechnung der Temperaturen an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen ein auf physikalischen Grundlagen basierendes Berechnungsmodell für die Strahlung an Außenoberflächen entwickelt und in WUFI® (H.M. Künzel, 1994) integriert.

Berechnungsmodell

Um den Einfluss aller relevanten Strahlungsanteile auf die Oberflächentemperatur eines Bauteils mit WUFI® zu quantifizieren, werden diese wie folgt bilanziert:

$$I = a \cdot I_s + \varepsilon \cdot I_l - I_e \quad (1)$$

I [W/m²] Nettostrahlung an der Bauteiloberfläche

a [-]	kurzwellige Absorptionszahl der Bauteiloberfläche
I_s [W/m ²]	kurzwellige Solarstrahlung
ε [-]	langwellige Emissions- und Absorptionszahl der Bauteiloberfläche
I_l [W/m ²]	langwellige Gegenstrahlung
I_e [W/m ²]	langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche

Dabei bewirkt ein positiver Wert von I eine Erwärmung der Bauteiloberfläche und ein negativer Wert eine Abkühlung. Die Teilstrahlungen I_s und I_l lassen sich wie folgt weiter aufteilen:

$$I_s = I_{s,dir.} + g_{atm.} \cdot I_{s,diff.} + g_{terr.} \cdot I_{s,refl.} \quad (2)$$

$I_{s,dir.}$ [W/m ²]	direkte Solarstrahlung auf die Bauteiloberfläche
$g_{atm.}$ [-]	atmosphärischer Gesichtsfeldfaktor
$I_{s,diff.}$ [W/m ²]	diffuse Solarstrahlung
$g_{terr.}$ [-]	terrestrischer Gesichtsfeldfaktor
$I_{s,refl.}$ [W/m ²]	vom Erdboden reflektierte Solarstrahlung

$$I_l = g_{atm.} \cdot I_{l,atm.} + g_{terr.} \cdot (I_{l,terr.} + I_{l,refl.}) \quad (3)$$

$I_{l,atm.}$ [W/m ²]	atmosphärische Gegenstrahlung
$I_{l,terr.}$ [W/m ²]	terrestrische Gegenstrahlung
$I_{l,refl.}$ [W/m ²]	vom Erdboden reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung

Die beiden Gesichtsfeldfaktoren werden dabei nach (DIN EN ISO 6946, 1996) wie folgt berechnet:

$$g_{atm.} = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4)$$

β [°] Neigung des Bauteils (90° für eine vertikale Wand)

und

$$g_{terr.} = 1 - g_{atm.} \quad (5)$$

In Abbildung 1 sind diese Strahlungsverhältnisse an der Außenoberfläche eines Bauteils dargestellt.

Die Gleichungen (2) und (3) enthalten jeweils drei Strahlungsanteile. Werden Klimadateien z.B. aus (Christoffer, 2004) verwendet, so sind davon nur $I_{s,diff.}$ und $I_{l,atm.}$ bekannt. Unter zusätzlicher Kenntnis von $I_{s,dir,h.}$ (direkte, normale Solarstrahlung auf eine horizontale Ebene), wie sie ebenfalls in (Christoffer, 2004) erhältlich ist, lassen sich jedoch alle noch unbekanntem Strahlungsanteile darauf wie folgt zurückführen:

$$I_{s,refl.} = \rho_{s,terr.} \cdot (I_{s,dir.,h} + I_{s,diff.}) \quad (6)$$

$\rho_{s,terr.}$ [-] kurzwelliger Reflexionsgrad des Erdbodens

$$I_{l,terr.} = \varepsilon_{l,terr.} \cdot \sigma \cdot T_{terr.}^4 \quad (7)$$

σ [W/m²K⁴] Stefan-Boltzmann-Konstante

$\varepsilon_{l,terr.}$ [-] langwelliger Emissionsgrad des Erdbodens
 $T_{terr.}$ [K] Temperatur des Erdbodens

$$I_{l,refl.} = \rho_{l,terr.} \cdot I_{l,atm.} \quad (8)$$

$\rho_{l,terr.}$ [-] langwelliger Reflexionsgrad des Erdbodens

Für die Temperatur des Erdbodens kann nachts näherungsweise die Umgebungslufttemperatur angenommen werden. $I_{s,dir.}$ kann nach (VDI, 1994) ebenfalls aus $I_{s,dir,h.}$ unter Kenntnis des Sonnenstandes berechnet werden.

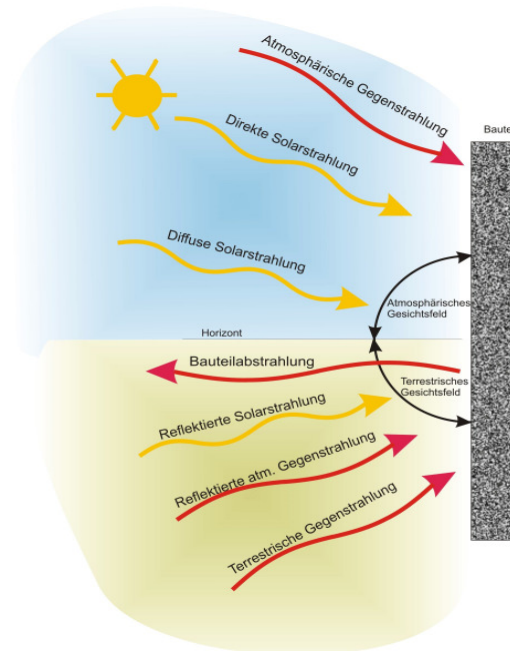


Abbildung 1: Strahlungsverhältnisse an einer vertikalen Außenoberfläche

Alle bisher aufgeführten Strahlungsanteile sind im Allgemeinen vor einer Berechnung explizit bekannt und hängen nicht implizit von noch unbekanntem Berechnungsergebnissen ab. Die langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche dagegen hängt von der Temperatur der Bauteiloberfläche nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz wie folgt ab:

$$I_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Sur}^4 \quad (9)$$

T_{Sur} [K] Temperatur der Bauteiloberfläche

Um diese nichtlineare Abhängigkeit in einem linearen Gleichungssystem, wie es von WUFI[®] verwendet wird, zu berücksichtigen, wird Gleichung (9) durch eine lineare Taylorreihenentwicklung ersetzt. Dabei wird als Entwicklungspunkt für die Taylorreihenentwicklung der vor jeder Iteration bekannte momentane Wert der Oberflächentemperatur verwendet. Dies führt zu

$$I_{e,lin} = \varepsilon \sigma T_0^4 + 4 \varepsilon \sigma T_0^3 \cdot (T - T_0) \quad (10)$$

$I_{e,lin}$ [W/m²] linearisierte Emissionsstrahlung

T_0 [K]	Temperatur der Bauteiloberfläche vor einem Iterationsschritt
T [K]	zu bestimmende Temperatur der Bauteiloberfläche nach dem Iterationsschritt

Validierung

Zur Validierung des Berechnungsmodells wird ein Vergleich von gemessener und berechneter Oberflächentemperatur einer am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen stehenden Testwand mit einem Wärmedämmverbundsystem folgenden Aufbaus (von außen nach innen) durchgeführt:

- Hellgraue Wandfarbe
- 2 mm Deckputz
- 3 mm Armierungsputz
- 10 cm EPS
- 36,5 cm Ziegel
- 1 cm Innenputz

Wegen der thermischen Trennung des Außenputzes vom Innenklima und vom wärmespeichernden Ziegel wird seine Oberflächentemperatur hauptsächlich von den äußeren Randbedingungen (Temperatur und Strahlung) bestimmt. Nächtliche Abkühlungen bis unter die Lufttemperatur sind deshalb zu erwarten, wodurch sich dieser Aufbau gut für eine Validierung eignet.

Die Testwand ist nach Norden orientiert. Die Oberflächentemperatur wird mit einem PT 100-Messfühler ermittelt, der bündig mit der Oberfläche in den Putz eingebracht wurde. Außerdem werden die Lufttemperatur, die senkrecht auf die Testwand einfallende kurzwellige Solarstrahlung I_s sowie die langwellige Gegenstrahlung I_l gemessen. Die für die Berechnung zusätzlich notwendige relative Luftfeuchte wird von der nahe stehenden Wetterstation des Instituts übernommen. Die kurzwellige Absorptionszahl $a=0,39$ und die langwellige Emissionszahl $\varepsilon=0,96$ der Wandfarbe wurden im hauseigenen Labor gemessen. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an der Außenoberfläche wird mit $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen, was nach (DIN EN ISO 6946, 1996) der ungefähren Windgeschwindigkeit von 1 m/s während des Vergleichszeitraums entspricht.

Ergebnisse und Ausblick

Abbildung 2 zeigt die gemessene und die berechnete Oberflächentemperatur der Testwand über einen Zeitraum von drei Tagen. Außerdem ist zusätzlich die Temperatur der Außenluft eingetragen. Während tagsüber maximale Unterschiede von bis zu $2 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen Messung und Berechnung zu erkennen sind, wird die gemessene nächtliche Unterkühlung praktisch ohne Unterschied rechnerisch nachvollzogen. Bei einer Berechnung ohne explizite Strahlungsbilanz, bei der der langwellige Strahlungs-

austausch lediglich über eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten realisiert wird, könnte sich keine nächtliche Unterkühlung bis unterhalb der Umgebungslufttemperatur einstellen und es würden somit die realen Verhältnisse nicht wiedergegeben werden.

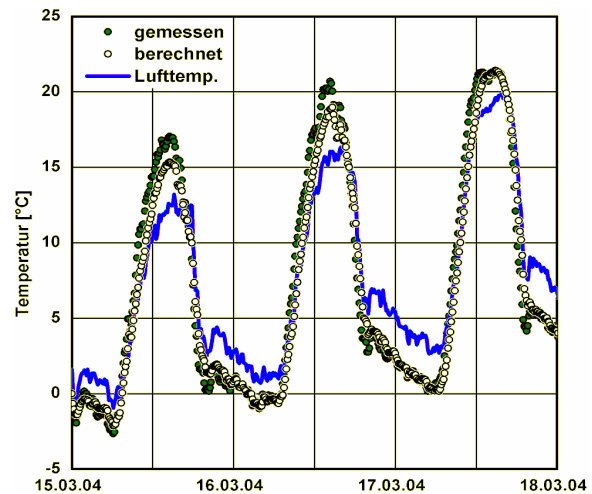


Abbildung 2: Gemessene und berechnete Oberflächentemperatur der Testwand

Die Ergebnisse zeigen, dass die realen Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen durch die Gleichungen (1), (9) und (10) beschrieben werden können. Weitere Untersuchungen zur Validierung der restlichen Gleichungen werden derzeit durchgeführt.

LITERATUR

- Christoffer, J.; Deutschländer, Th.; Webs, M.: Testreferenzjahre, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (2004).
- DIN EN ISO 6946, Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, November 1996.
- Energy Design Update®: In Arizona, White Roofing Causes Wet Insulation, Aspen Publishers, Vol. 26, No. 6 (2006), S. 4-6.
- Klingenberg, G., Venzmer, H.: Algen auf Fassaden nachträglich gedämmter Plattenbauten – Schadensmaß, Ursachen und Lösungen für ein Anti-Algenkonzept. FAS-Schriftenreihe (2000) Heft 11, S. 29-40.
- Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart (1994).
- VDI-Richtlinie 3789; Umweltmeteorologie – Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen. Berechnung der kurz- und langwelligeren Strahlung (1994).