

Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen an der terrestrischen Umgebung –Abstract–

Für den Wärmeübergang an der Außenseite von Fassadenbauteilen sind neben der Konvektion auch der langwellige Strahlungsaustausch mit der äußeren Umgebung und dem Himmelsgewölbe sowie die kurzwellige Absorption der Sonnenstrahlung zu berücksichtigen. In der VDI 2078 [1] werden alle 3 genannten physikalischen Effekte in einer kombinierten Außentemperatur nach Nehring zusammengefasst. Diese fiktive Außentemperatur unterliegt jedoch Einschränkungen in der Anwendung, da sie die mehrfachen Reflexionen im Außenraum vernachlässigt.

Einführung

Zur Beschreibung des Wärmeüberganges auf der äußeren Bauteiloberfläche eignet sich das in *Bild 1* dargestellte Modell.

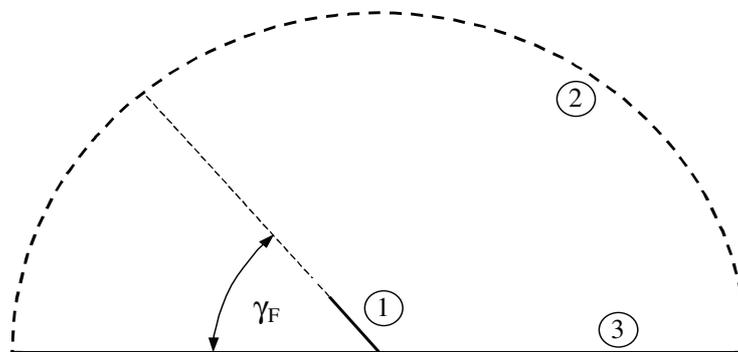


Bild 1: Modell zur Bestimmung der kombinierten Außentemperatur
Fläche 1 - Bauteiloberfläche,
Fläche 2 – Himmelsgewölbe,
Fläche 3 - terrestrische Umgebung

Es wird davon ausgegangen, dass die Fläche 1 sehr klein gegenüber den Flächen 2 und 3 ist. D.h., Verschattungseffekte können vernachlässigt werden. Weiterhin wird angenommen, dass eine Umgebungsbebauung nur in einem genügend großen Abstand zur Fläche 1 vorhanden ist. Sollte dies nicht der Fall sein, könnte näherungsweise hierfür auch der Flächenneigungswinkel γ_F um einen Verdeckungswinkel erhöht werden.

Die langwellige Wärmeabstrahlung an das Himmelsgewölbe unterliegt den Gesetzen der Gasstrahlung. Beim Durchgang der Strahlung ausgehend von einer Bauteiloberfläche durch die Atmosphäre wird die Strahlungsintensität durch Absorption und Streuung geschwächt (Gesetz von Bouguer). Bei großer Weglänge wird die Strahlung durch den Gaskörper vollständig absorbiert bzw. geht an den Weltraum verloren. Der Gaskörper kann daher nicht als eine feste Begrenzungsfläche betrachtet werden, wie es bei der Strahlungsaustauschberechnung in umrandeten Gebieten üblich ist. Dagegen emittiert die Atmosphäre Strahlung mit einem vom Partialdruck (hauptsächlich von Wasserdampf) abhängigen Emissionsgrad $\varepsilon_2 < 1$.

Dieser Effekt wird bei Nehring durch eine fiktive Absenkung der Außentemperatur berücksichtigt. Gleichwohl bewirkt die kurzwellige Absorption der Sonnenstrahlung auf der Oberfläche eine fiktive Temperaturerhöhung. Mit dem Ansatz

kann der Wärmestrom auf der äußeren Bauteiloberfläche weiterhin durch $\dot{q}_1 = \alpha_A (\theta_A - T_1)$ beschrieben werden.

Die langwellige Temperaturabsenkung ist bei unbewölktem Himmel, wie er bei extremen Hitze- oder Kälteperioden vorliegt, besonders hoch. Allgemein bekannt ist die langwellige Abstrahlung an den Weltraum auch bei der nächtlichen Auskühlung in der Wüste.

In der Nehring'schen kombinierten Außentemperatur sind jedoch die Reflexionen zwischen den beteiligten Oberflächen vernachlässigt. Dies kann zu erheblichen Fehlern führen, wenn für den Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung ein Wert von $\varepsilon_3 < 0,9$ (z.B. für parkende Kraftfahrzeuge, gegenüberliegende Fassaden mit Alu-Verkleidung, Wasserflächen vor der Fassade usw.) eingesetzt wird. Im Grenzfall lässt sich mit der Nehring'schen kombinierten Außentemperatur eine Temperaturabsenkung von bis zu -30 K errechnen. Um derart unrealistische Werte zu vermeiden, wurde für den Emissionsgrad der Umgebung bei den äquivalenten Temperaturdifferenzen in der *VDI 2078 [1]* einheitlich $\varepsilon_3 = 0,9$ angenommen. Diese Annahme dürfte auch den gängigen Kühllastprogrammen nach dem EDV-Verfahren der *VDI 2078* zugrunde liegen.

In [2] wird eine kombinierte Außentemperatur mit Berücksichtigung der langwelligen Reflexionen vorgestellt. Die max. mögliche Temperaturabsenkung beträgt hier -6 K. Im Regelfall liegt sie bei $-2,5$ bis $-1,5$ K. Die Gültigkeit der vorgestellten Gleichung wird in [2] anhand von Grenzwertüberlegungen im Vergleich zur Nehring'schen Gleichung nachgewiesen.

Im neuen Kühllastprogramm von der C.A.T.S. Software GmbH ist die kombinierte Außentemperatur mit Berücksichtigung der langwelligen Reflexionen eingearbeitet. Gleichzeitig ist einem Vorschlag in [3] zufolge die langwellige Temperaturabsenkung auch bei der Aktion „Außentemperatur vor transparenten Außenflächen“ berücksichtigt, da der Effekt der langwelligen Wärmeabstrahlung an den Himmel selbstverständlich auch bei transparenten Flächen wirksam ist.

Das neue Kühllastprogramm von C.A.T.S. ermöglicht somit eine bessere Berücksichtigung der thermischen Umgebung der Außenfassade. Um die Anwendung zu verdeutlichen und um eine stichpunktartige Kontrolle des Programms vorzunehmen werden nachfolgend einige Rechenbeispiele angegeben.

Formelsammlung

Die Tabelle 1 stellt alle notwendigen Formeln zusammen.

Tabelle 1: Formelsammlung für die Berechnung der kombinierten Außentemperatur

Glg.	Bezeichnung	Formel
1	langwellige Temperaturabsenkung mit Reflexionen	$\Delta T_{\text{langw.}} = -\frac{\varepsilon_1 C_S}{\alpha_A} \left[(1 - \varphi_{1,3} \varepsilon_3) (1 - \varepsilon_2) \right] \left(\frac{\vartheta_{\text{AL}}}{100} \right)^4 + \frac{\alpha_{\text{S1,3}}}{\alpha_A} (T_3 - T_{\text{AL}})$
2	langwellige Temperaturabsenkung ohne Reflexionen (Nehring)	$\Delta T_{\text{langw.}} = -\frac{\varepsilon_1 C_S}{\alpha_A} \left[1 - \varphi_{1,2} \varepsilon_2 - \varphi_{1,3} \varepsilon_3 \right] \left(\frac{\vartheta_{\text{AL}}}{100} \right)^4$
3	Außentemperatur	$T_A = T_{\text{AL}} + \Delta T_{\text{langw.}}$
4	kombinierte Außentemperatur	$\theta_A = T_A + \frac{\dot{s}_A}{\alpha_A}$
5	Emissionsgrad der atmosphärischen Gegenstrahlung	$\varepsilon_2 = 0,099 \left(\frac{\vartheta_{\text{AL}}}{100} \right)^2$
6	Einstrahlzahl der Fläche 1 auf Fläche 3	$\varphi_{1,3} = 1 - \varphi_{1,2} = \frac{1 - \cos [\gamma_F + f_V (\pi - \gamma_F)]}{2}$
7	äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_A = \varepsilon_1 C_S \beta_{\text{AL},1} + \alpha_K$ Winter: $\alpha_A = 25,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ Sommer: $\alpha_A = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
8	Temperaturfaktor zwischen Oberfläche i und j	$\beta_{i,j} = \frac{\left(\frac{\vartheta_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_j}{100} \right)^4}{T_i - T_j} \approx 0,04 \left(\frac{\vartheta_m}{100} \right)^3$
9	Strahlungswärmeübergangskoeffizient für Strahlung von Fläche 1 auf Fläche 3	$\alpha_{\text{S1,3}} = \varphi_{1,3} \varepsilon_1 \varepsilon_3 C_S \beta_{1,3}$

- T_{AL} Außenlufttemperatur in °C
- ϑ_{AL} Außenlufttemperatur in °K
- T_1 Oberflächentemperatur der Fläche 1 (Bauteiloberfläche) in °C
- T_2 Oberflächentemperatur der Fläche 2 (Himmelsgewölbe, $T_2 = T_{\text{AL}}$ angenommen) in °C
- T_3 Temperatur des Erdbodens (terrestrische Umgebungstemperatur) in °C
- ϑ_i bzw. j Oberflächentemperatur der Fläche i bzw. j in °K
- ϑ_m mittlere Oberflächentemperatur der Fläche i und j in °K
- $\Delta T_{\text{langw.}}$ langwellige Temperaturabsenkung mit und ohne Reflexionen in K
- T_A Außentemperatur in °C
- θ_A kombinierte Außentemperatur mit und ohne Reflexionen in °C
- C_S Strahlungskonstante des schwarzen Körpers = $5,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$
- f_V Anteil der projizierten Verbauungsfläche an der sichtbaren Himmelsfläche (0,0...1,0)
- \dot{s}_A absorbierte kurzwellige Strahlung auf der Oberfläche in W/m^2
- α_A äußerer Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- α_K konvektiver äußerer Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, abhängig von der Oberflächenlage, -temperatur, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur

$\alpha_{S1,3}$	Strahlungswärmeübergangskoeffizient für Strahlung von Fläche 1 auf Fläche 3 in $W/(m^2 K)$
$\beta_{i,j}$	Temperaturfaktor zwischen Oberfläche i und j in K^3
γ_F	Neigungswinkel gegen die Horizontale
ϵ_1	Emissionsgrad der Wandoberfläche
ϵ_2	Emissionsgrad der atmosphärischen Gegenstrahlung
ϵ_3	Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung
$\varphi_{i,j}$	Einstrahlzahl für Fläche i auf Fläche j

Je nach Einsatz der langwellige Temperaturabsenkung $\Delta T_{\text{langw.}}$ in die Außentemperatur T_A ergibt sich ein Ergebnis mit oder ohne Berücksichtigung der Reflexionen. Die kombinierte Außentemperatur unterscheidet sich von der Außentemperatur nur durch die Absorption der Sonnenstrahlung. D.h., nachts sind beide Temperaturen gleich.

Die aufgeführten Formeln sind vollständig angegeben. D.h., sie gelten auch für den Fall einer von der Außenlufttemperatur abweichenden terrestrischen Umgebungstemperatur T_3 und einer Verbauung des Horizontes mit einer anteiligen Verbauungsfläche f_V , die auf ein Kugelzweieck verteilt wird. Für die Anwendung dieser Möglichkeit ist jedoch die Frage des Abrisses der Umgebungsbebauung zu beachten.

Darüber hinaus ist die Berechnungsformel für den äußeren Wärmeübergangskoeffizienten α_A angegeben. Er ist abhängig von der Beschaffenheit der äußeren Bauteiloberfläche (metallisch/nicht-metallisch) sowie von den Temperaturverhältnissen und der Windgeschwindigkeit. Je nach Berechnungsfall sollte hier ein konstanter Mittelwert ermittelt werden. Beispielhaft ist der Unterschied zwischen sommerlichen und winterlichen Verhältnissen angegeben. Bei metallischen äußeren Bauteiloberflächen wird eine Korrektur empfohlen.

Rechenbeispiele

Beispiel 1: Standardfall im Sommer

Es ist die Außentemperatur für eine senkrechte, unverbaute Wand bei unbewölktem Himmel im Sommer zu berechnen.

Ausgangsdaten:

Neigungswinkel gegen die Horizontale	$\gamma_F = 90^\circ$
anteilige Verbauungsfläche	$f_V = 0,0$
Außenlufttemperatur	$T_{AL} = 32^\circ C$
Temperatur des Erdbodens	$T_3 = 32^\circ C$
Emissionsgrad der Wandoberfläche	$\epsilon_1 = 0,9$
Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung	$\epsilon_3 = 0,9$
äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_A = 13,5 W/(m^2 K)$

Berechnung:

Einstrahlzahl für Wandoberfläche an Himmelsgewölbe nach Glg. (6): $\varphi_{1,3} = 1 - \frac{1 + \cos 90^\circ}{2} = 0,5$

Emissionsgrad der Gegenstrahlung nach Glg. (5): $\epsilon_2 = 0,099 \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^2 = 0,922$

Außentemperatur nach Glg. (1) und (3) bei $T_3 = T_{AL}$:

$$T_A = 32 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{13,5} [(1 - 0,5 \cdot 0,9)(1 - 0,922)] \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^4 = 32 - 1,4 = \underline{\underline{30,6 \text{ °C}}}$$

Zum Vergleich Außentemperatur ohne Reflexionen entsprechend Glg. (2) und (3):

$$T_{A,Nehring} = 32 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{13,5} [1 - (1 - 0,5) \cdot 0,922 - 0,5 \cdot 0,9] \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^4 = 32 - 2,9 = \underline{\underline{29,1 \text{ °C}}}$$

Obwohl das Himmelsgewölbe und die terrestrische Umgebung auf Außenlufttemperaturniveau liegen, ist für den Wärmeübergang an der Außenseite mit einer um 1,4 K niedrigeren Außentemperatur zu rechnen. Die Kühllast ist durch die Berücksichtigung der Reflexionen etwas höher, da die Außentemperatur um **1,5 K** über der Nehring'schen Außentemperatur liegt.

Beispiel 2: Variation Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung

Es ist die Außentemperatur für eine senkrechte, unverbaute Wand bei unbewölktem Himmel im Sommer zu berechnen. Die Wand grenzt an einen Parkplatz mit hoher Belegung.

Ausgangsdaten:

Neigungswinkel gegen die Horizontale	$\gamma_F = 90^\circ$
anteilige Verbauungsfläche	$f_V = 0,0$
Außenlufttemperatur	$T_{AL} = 32 \text{ °C}$
Temperatur des Erdbodens	$T_3 = 32 \text{ °C}$
Emissionsgrad der Wandoberfläche	$\epsilon_1 = 0,9$
Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung	$\epsilon_3 = 0,5$
äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_A = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Berechnung:

Einstrahlzahl für Wandoberfläche an Himmelsgewölbe nach Glg. (6): $\phi_{1,3} = 1 - \frac{1 + \cos 90^\circ}{2} = 0,5$

Emissionsgrad der Gegenstrahlung nach Glg. (5): $\epsilon_2 = 0,099 \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^2 = 0,922$

Außentemperatur nach Glg. (1) und (3) bei $T_3 = T_{AL}$:

$$T_A = 32 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{13,5} [(1 - 0,5 \cdot 0,5)(1 - 0,922)] \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^4 = 32 - 1,9 = \underline{\underline{30,1 \text{ °C}}}$$

Zum Vergleich Außentemperatur ohne Reflexionen entsprechend Glg. (2) und (3):

$$T_{A,Nehring} = 32 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{13,5} [1 - (1 - 0,5) \cdot 0,922 - 0,5 \cdot 0,5] \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^4 = 32 - 9,5 = \underline{\underline{22,5 \text{ °C}}}$$

Der Unterschied mit/ohne Reflexionen beträgt hier **7,6 K**! Je niedriger der Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung, desto größer wird der Fehler bei der Berechnung ohne Reflexionen. Die Nehring'schen Außentemperatur ist daher für die flexible Eingabe der Emissionsgrade in einem EDV-Programm nicht geeignet.

Beispiel 3: Variation Verbauungsfläche

Wie Beispiel 1, jedoch mit einem Verbauungsgrad von 50 % ($f_V = 0,5$).

Einstrahlzahl für Wandoberfläche an Himmelsgewölbe nach Glg. (6):

$$\phi_{1,3} = \frac{1 - \cos [90^\circ + 0,5 \cdot (180^\circ - 90^\circ)]}{2} = 0,854$$

Außentemperatur nach Glg. (1) und (3) bei $T_3 = T_{AL}$:

$$T_A = 32 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{13,5} [(1 - 0,854 \cdot 0,9)(1 - 0,922)] \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^4 = 32 - 0,59 = \underline{\underline{31,4 \text{ °C}}}$$

Zum Vergleich Außentemperatur ohne Reflexionen entsprechend Glg. (2) und (3):

$$T_{A, \text{Nehring}} = 32 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{13,5} [1 - (1 - 0,854) \cdot 0,922 - 0,854 \cdot 0,9] \left(\frac{32 + 273,15}{100} \right)^4 = 32 - 3,2 = \underline{\underline{28,8 \text{ °C}}}$$

Die Zunahme der Einstrahlzahl $\phi_{1,3}$ von 0,5 auf 0,854 dokumentiert, dass nun Teile des Himmelsgewölbes als terrestrische Umgebung zählen. Mit zunehmender Verbauung der Himmelsfläche muss die langwellige Wärmeabstrahlung abnehmen. Die Außentemperatur nähert sich dann der Außenlufttemperatur, da $T_2 = T_3 = T_{AL}$ angenommen wurde. Bei der Nehring'schen Außentemperatur stellt sich eine umgekehrte Tendenz ein. Die Außentemperatur änderte sich von 29,1 °C auf 28,8 °C. Mit Berücksichtigung der Reflexionen ergab sich eine Änderung von 30,6 °C auf 31,4 °C, also eine Annäherung an die 32 °C Außenlufttemperatur.

Beispiel 4: Standardfall im Winter

Es ist der stationäre Wärmestrom durch ein senkrechtes, unverbautes Fenster bei unbewölktem Himmel im Winter zu berechnen.

Ausgangsdaten:

Neigungswinkel gegen die Horizontale
anteilige Verbauungsfläche

$$\gamma_F = 90^\circ$$

$$f_V = 0,0$$

Innentemperatur

$$T_I = 20 \text{ °C}$$

Außenlufttemperatur

$$T_{AL} = -14 \text{ °C}$$

Temperatur des Erdbodens

$$T_3 = -14 \text{ °C}$$

Emissionsgrad der Wandoberfläche

$$\epsilon_1 = 0,9$$

Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung

$$\epsilon_3 = 0,9$$

äußerer Wärmeübergangskoeffizient

$$\alpha_A = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Wärmedurchgangskoeffizient (mit Rahmen)

$$U = 1,4 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Berechnung:

Einstrahlzahl für Wandoberfläche an Himmelsgewölbe nach Glg. (6):

$$\phi_{1,3} = 1 - \frac{1 + \cos 90^\circ}{2} = 0,5$$

Emissionsgrad der Gegenstrahlung nach Glg. (5):

$$\epsilon_2 = 0,099 \left(\frac{-14 + 273,15}{100} \right)^2 = 0,665$$

Außentemperatur nach Glg. (1) und (3) bei $T_3 = T_{AL}$:

$$T_A = -14 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{25} [(1 - 0,5 \cdot 0,9)(1 - 0,665)] \left(\frac{-14 + 273,15}{100} \right)^4 = -14 - 1,7 = \underline{\underline{-15,7 \text{ °C}}}$$

Stationärer Wärmestrom durch das Fenster:

$$\dot{q} = U (T_I - T_A) = 1,4 \cdot (20 + 15,7) = \underline{\underline{50 \text{ W/m}^2}}$$

Der Transmissionswärmebedarf wäre gegenüber einer Berechnung mit $T_A = -14 \text{ °C}$ um 5 % höher. Der Unterschied liegt in der Größenordnung der früheren Normaußentemperaturkorrektur aus der DIN 4701 Teil 1 und 2 (Ausgabe 1983). D.h., auch bei der Heizlastberechnung sollte die langwellige Wärmeabstrahlung berücksichtigt werden, da bei extremer Kälte von einem klarem Himmel auszugehen ist.

Zum Vergleich Außentemperatur ohne Reflexionen entsprechend Glg. (2) und (3):

$$T_{A,\text{Nehring}} = -14 - \frac{0,9 \cdot 5,67}{25} [1 - (1 - 0,5) \cdot 0,665 - 0,5 \cdot 0,9] \left(\frac{-14 + 273,15}{100} \right)^4 = -14 - 2,00 = \underline{\underline{-16 \text{ °C}}}$$

Zusammenstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus obigen Rechenbeispielen sind in der Tabelle 2 noch einmal übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Ergebnisse für die Außentemperatur aus den Rechenbeispielen

Beispiel	mit Reflexionen	ohne Reflexionen (Nehring)	Differenz
1 Standardfall im Sommer ($T_{AL} = 32 \text{ °C}$)	30,6	29,1	1,5
2 Variation Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung ($\epsilon_3 = 0,5$)	30,1	22,5	7,6
3 Variation Verbauungsfläche ($f_V = 0,5$)	31,4	28,8	2,6
4 Standardfall im Winter ($T_{AL} = -14 \text{ °C}$)	-15,7	-16,0	0,3

Die Nehring'schen Außentemperatur weist eine höhere Empfindlichkeit gegenüber der Parametervariation auf.

Literatur

- [1] **VDI 2078 Ausgabe Juli 1996** : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] **Nadler, N.:** Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen an der terrestrischen Umgebung. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997) Heft 6, Seite 310 - 315.
- [3] **Nadler, N.:** Korrekturvorschläge zum EDV-Verfahren der VDI 2078.
Teil 1a: Algorithmen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 8, S. 59-66
Teil 1b: Algorithmen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 9, S. 62-66
Teil 2a: Vergleichsrechnungen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 10, S. 83-90
Teil 2b: Vergleichsrechnungen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 11, S. 75-78