

## **Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen an der terrestrischen Umgebung**

Bei der Berechnung des Wärmeüberganges an der Außenseite einer Fassade ist die Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung, die konvektive Wärmeaufnahme bzw. -abgabe und der langwellige Strahlungsaustausch mit der äußeren Umgebung und dem Himmelsgewölbe zu berücksichtigen. Zur Vereinfachung des Rechenablaufes werden diese physikalischen Vorgänge in formale Übereinstimmung mit einer rein konvektiven Wärmeaufnahme gebracht. Für den Wärmeübergangskoeffizienten und für die Lufttemperatur werden dabei hypothetische Größen derart eingesetzt, daß im Ergebnis die tatsächliche Wärmestromdichte erhalten bleibt. Gleichzeitig erfolgt hiermit eine Linearisierung, die als Voraussetzung bei weitergehenden Berechnungen, z.B. bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078 [1,2], gilt.

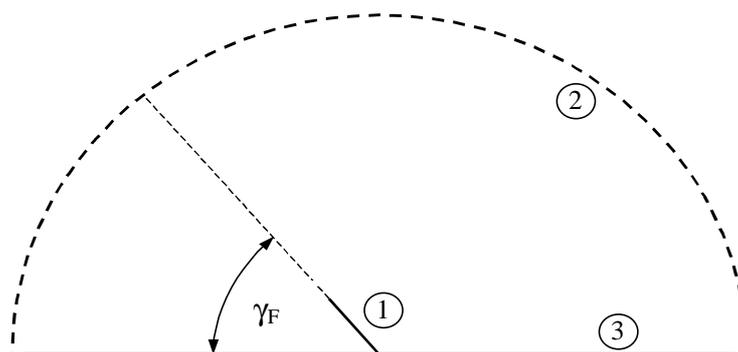
Mit der Ermittlung dieser Ersatzgrößen haben sich schon einige Autoren befaßt. In der Literatur treten die Begriffe „Sonnenlufttemperatur nach *Mackey Wright* [3]“, „Strahlungslufttemperatur nach *Haferland Heindl* [4]“ und „kombinierte Außentemperatur nach *Nehring* [5]“ auf. Die Sonnenlufttemperatur steht heute nicht mehr zur Diskussion, da sie nicht den langwelligen Strahlungsaustausch beinhaltet. Für die Strahlungslufttemperatur ist eine umfangreiche Berechnung notwendig. Die kombinierte Außentemperatur bietet eine einfache Handhabung und fand Eingang in die VDI 2078 [1].

Die Strahlungslufttemperatur und die kombinierte Außentemperatur wurde von einigen Autoren untersucht und mitunter kontrovers diskutiert [6, 7]. *Roloff* [9] stellte durch experimentelle Untersuchungen fest, daß die kombinierte Außentemperatur zu niedrige Werte liefert. Ein Grund hierfür könnte sein, daß *Nehring* die mehrfachen Reflexionen im Außenraum nicht berücksichtigte.

**Im folgenden Beitrag wird gezeigt, daß unter Berücksichtigung der Reflexionen tatsächlich eine höhere kombinierte Außentemperatur die Folge wäre. Außerdem werden neuere Erkenntnisse, die sich bereits in Richtlinien und Normen etabliert haben, eingearbeitet. Dabei wurde darauf geachtet, daß die Genauigkeitsanforderungen den praktischen Verhältnissen gerecht werden. Die einfache Handhabung bleibt auch für die in diesem Modell entwickelte Außentemperaturdefinition erhalten.**

## Modellbildung

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



**Bild 1 :** Modell zur Bestimmung der kombinierten Außentemperatur  
Fläche 1 - Wandoberfläche,  
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. Näherungsweise könnte hierfür auch der Flächenneigungswinkel  $\gamma_F$  um einen Verdeckungswinkel erhöht werden.

Die Gesamtwärmeaufnahme der Oberfläche 1 setzt sich aus dem langwelligen Strahlungsaustausch mit dem Himmelsgewölbe  $\dot{q}_{S,21}$  und der terrestrischen Um-

gebung  $\dot{q}_{S,31}$  sowie der konvektiven Wärmeaufnahme  $\dot{q}_K$  und der absorbierten Sonnenstrahlung  $\dot{s}_A$  zusammen. Mit einem Ansatz der Form

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_{S,21} + \dot{q}_{S,31} + \dot{q}_K + \dot{s}_A = \alpha_A (\theta_A - T_1) \quad (1)$$

$\alpha_A$  äußerer Wärmeübergangskoeffizient in  $W/(m^2 K)$

$T_1$  Oberflächentemperatur der Fläche 1 in  $^{\circ}C$

$\dot{q}_1$  Gesamtwärmeaufnahme der Fläche 1 in  $W/m^2$

werden die einzelnen Anteile in einer hypothetische Temperatur  $\theta_A$  und einem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_A$  zusammengefaßt.

Das Himmelsgewölbe ist ein Gaskörper mit unterschiedlichen Bestandteilen, von denen sich einige diatherman (strahlungsdurchlässig) verhalten. Dagegen sind andere Gase und Dämpfe, vor allem der Wasserdampf und  $CO_2$ , selektive Strahler. Der Gaskörper kann daher nicht als eine feste Begrenzungsfläche betrachtet werden, wie es bei der Strahlungsaustauschberechnung in umrandeten Gebieten üblich ist.

Nach den Gesetzen der Gasstrahlung wird die Strahlungsintensität einer Oberfläche beim Durchgang durch die Atmosphäre 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. Dagegen emittiert die Atmosphäre Strahlung mit einem vom Partialdruck (hauptsächlich von Wasserdampf) abhängigen Emissionsgrad  $\epsilon_2 < 1$ .

D.h., das 2. Kirchhoffsche Gesetz (Absorption gleich Emission) ist für das Gasgemisch insgesamt nicht anwendbar. Da für den Absorptionsgrad  $\alpha_2 = 1$  gilt, ist für den Reflexionsgrad  $\rho_2 = 0$  anzunehmen.

*Nehring* [5] berücksichtigte diese Verhältnisse in einer von ihm definierten kombinierten Außentemperatur. Der langwellige Strahlungswärmeverlust wird in der kombinierten Außentemperatur durch eine Temperaturabsenkung unter

die Außenlufttemperatur ausgedrückt. Dieser Term enthält jedoch nicht die mehrfachen Reflexionen im Außenraum.

Mit dem in *Bild 1* dargestellten vereinfachten Modell lassen sich die mehrfachen Reflexionen analytisch bestimmen, da nur 3 Flächen zu betrachten sind. Es sind hierbei nur die Geometrien differentielle Fläche, begrenzte Halbkugel und Kreisfläche sowie die Reflexionsgrade  $\rho_1 \dots \rho_3$  einer mathematischen Behandlung in einem Reflexionsmodell zu unterziehen.

## Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen

Das Modell liefert mit  $T_2 = T_{AL}$

$$\theta_A = T_{AL} - \frac{\varepsilon_1 C_S}{\alpha_A} [(1 - \varphi_{1,3} \varepsilon_3)(1 - \varepsilon_2)] \left( \frac{\vartheta_{AL}}{100} \right)^4 + \frac{\alpha_{S1,3}}{\alpha_A} (T_3 - T_{AL}) + \frac{\dot{s}_A}{\alpha_A} \quad (2)$$

$$\text{mit } \alpha_A = \varepsilon_1 C_S \beta_{AL,1} + \alpha_K, \quad \beta_{i,j} = \frac{\left( \frac{\vartheta_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{\vartheta_j}{100} \right)^4}{T_i - T_j} \approx 0,04 \left( \frac{\vartheta_m}{100} \right)^3$$

$$\alpha_{S1,3} = \varphi_{1,3} \varepsilon_1 \varepsilon_3 C_S \beta_{1,3}, \quad \varphi_{1,3} = 1 - \varphi_{1,2} = 1 - \frac{1 + \cos \gamma_F}{2}$$

$\theta_A$  kombinierte Außentemperatur mit Reflexionen in °C

$T_{AL}$  Außenlufttemperatur in °C

$\vartheta_{AL}$  Außenlufttemperatur in K

$T_3$  Temperatur des Erdbodens (Umgebungstemperatur) in °C

$\vartheta_1$  Oberflächentemperatur in K

$\beta_{i,j}$  Temperaturfaktor zwischen Oberfläche i und j in K<sup>3</sup>

$\vartheta_m$  mittlere Oberflächentemperatur der Fläche i und j in K

$\alpha_K$  konvektiver äußerer Wärmeübergangskoeffizient in W/(m<sup>2</sup> K), abhängig von der Oberflächenlage, -temperatur, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur

$\alpha_{S1,3}$	Strahlungswärmeübergangskoeffizient für Strahlung von Fläche 1 auf Fläche 3 in $W/(m^2 K)$
$\varepsilon_1$	Emissionsgrad der Wandoberfläche
$\varepsilon_2$	Emissionsgrad der Gegenstrahlung
$\varepsilon_3$	Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung
$C_S$	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers = $5,67 W/(m^2 K^4)$
$\varphi_{i,j}$	Einstrahlzahl für Fläche i auf Fläche j
$\gamma_F$	Neigungswinkel gegen die Horizontale
$\dot{s}_A$	absorbierte kurzwellige Strahlung auf der Oberfläche in $W/m^2$

Der äußere Wärmeübergangskoeffizient steht durch den Temperaturfaktor und den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit zur Oberflächentemperatur. Diese unerwünschte Eigenschaft würde eine iterative Berechnung erfordern. Angesichts der Unsicherheiten bei den komplexen konvektiven Vorgängen läßt sich jedoch ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient rechtfertigen. *Nehring* formte hierfür den Algorithmus so um, daß das Temperaturniveau durch den Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur bestimmt wird. Für sommerliche Verhältnisse ermittelte er für den Temperaturfaktor den Wert  $1,05 K^3$ , was einer mittleren Temperatur zwischen Außenluft und Oberfläche von ca.  $24 ^\circ C$  entsprechen würde. Der Temperaturfaktor verhält sich weitgehend stabil gegenüber Temperaturänderungen. Eine Differenz von 10 K in der mittleren Temperatur entspräche etwa einer Änderung um  $0,1 K^3$ .

Die Umgebungstemperatur ist in Glg. (2) formal getrennt ausgewiesen, da sie sich durch Absorption von Sonnenstrahlung erheblich von der Außenlufttemperatur unterscheiden kann. Damit wurde auch einer Empfehlung der VDI 3789 [10] entsprochen. Theoretisch müßte hierzu auch der äußere Wärmeübergangskoeffizient angepaßt werden. Die Unterschiede sind aber derart gering, daß man hierauf verzichten kann. Problematisch ist die Kenntnis über die Höhe der Umgebungstemperatur. Die Differenz zur Außenlufttemperatur geht mit ca.  $0,1...0,3$  ein. Das bedeutet, Fehler in einer Abschätzung werden damit auch entsprechend gemindert.

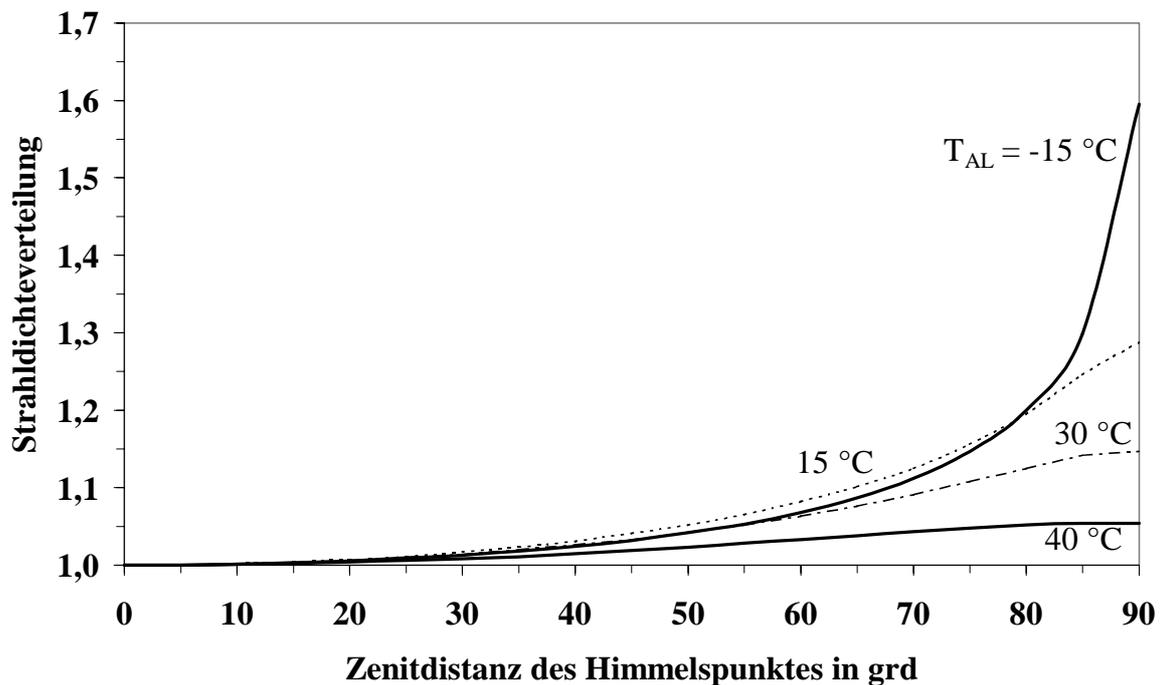
Als Schlußfolgerung kann gezogen werden, daß der äußere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_A$  in Glg. (2) als ein auf das Temperaturniveau angepaßter konstanter Wert einzutragen ist. Der Wert sollte mindestens den Sommer- und Winterfall berücksichtigen. Als Richtwerte könnten gelten :

Winterfall nach DIN 4701 [11] :  $\alpha_A = 25,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Sommerfall nach CEN TC89/WG6 N. 225 [12] :  $\alpha_A = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

### **Emissionsgrad der Gegenstrahlung**

Der Emissionsgrad der atmosphärischen Gegenstrahlung  $\varepsilon_2$  wurde bisher konstant zu 0,74 im Sommer angenommen und bestimmte sich aus Untersuchungen über den Partialdruck des Wasserdampfes. Neuere Untersuchungsergebnisse gibt die VDI 3789 [10] an. Danach ist der Emissionsgrad der Gegenstrahlung über den Zenitwinkel nicht konstant und auch temperaturabhängig zu berechnen. Analog zur Behandlung einer gleichartigen Problematik bei der kurzwelligen Diffusstrahlung kann man die örtliche Abhängigkeit als Strahldichtevertelung darstellen. In *Bild 2* ist die Strahldichtevertelung unter Bezug auf die Zenitstrahldichte für verschiedene Temperaturen aufgetragen. Sie entspricht damit einem Verhältnis von Emissionsgraden. Der Bezugswert der Temperatur ist in der VDI 3789 [10] die Außenlufttemperatur, gemessen in 2 m Höhe.



**Bild 2 :** Strahldichtevertelung für langwellige Gegenstrahlung  
(rotationssymmetrisch, wolkenlose Atmosphäre)

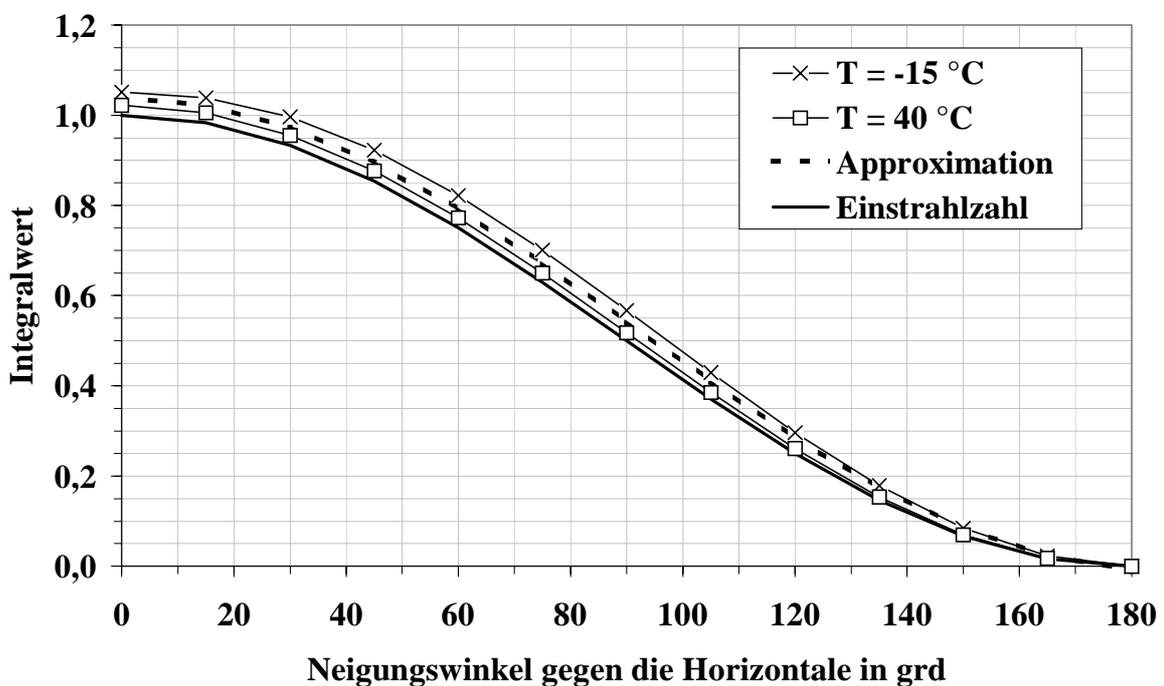
Am Horizont ist eine Anhebung des Emissionsgrades zu erkennen, die bei warmen Temperaturen deutlich geringer ausfällt.

Aufgrund dieser Anhebung wird sich der mittlere Emissionsgrad auch mit dem Flächenneigungswinkel ändern. Mit zunehmendem Winkel sieht die Fläche 1 einen immer größer werdenden Anteil der horizontnahen Gebiete. Die strahlende Fläche des Himmelsgewölbes nimmt dagegen gleichzeitig ab. D.h., die Zunahme des mittleren Emissionsgrades (intensive Größe) mit steigendem Winkel geht einher mit einer Schwächung durch die abnehmende Fläche des strahlenden Gaskörpers.

Dieser geometrische Einfluß kommt im effektiven Emissionsgrad zum Ausdruck. Den effektiven Emissionsgrad erhält man, wenn man über den gesamten vom Flächenelement 1 sichtbaren Halbraumausschnitt unter Berücksichtigung der Strahldichtevertelung integriert und den Integralwert mit dem Emissionsgrad im Zenit multipliziert. Im Falle einer konstanten Strahldichtevertelung würde der Integralwert die Einstrahlzahl  $\phi_{1,2}$  ergeben. Für die hierfür notwendige 2-fach-Integration empfiehlt die VDI 3789 [10] eine

Doppelsumme zu bilden. Allerdings gibt die Richtlinie nur unzureichend Auskunft über die variablen Integrationsgrenzen bei geneigten Flächen. Außerdem dürfte dieser Vorschlag für praktische Anwendungen zu aufwendig sein.

Mit Hilfe einer numerischen Romberg-Integration wurden die Integralwerte für verschiedene Temperaturen und Flächenneigungswinkel berechnet und in *Bild 3* mit der Einstrahlzahl verglichen.



**Bild 3 :** Integralwert der Strahldichtevertelung im Vergleich mit Einstrahlzahl und Approximation durch  $\varphi_{1,2}^* = 0,514 [1 + 1,021 \cos (0,966 \gamma_F)]$

Die Einstrahlzahl zeigt für hohe Temperaturen erwartungsgemäß eine sehr gute Übereinstimmung mit den Integralwerten. Im Temperaturbereich von -15 bis 40 °C wurden alle Werte einer Approximation unterzogen, deren Ergebnis im Bild gestrichelt dargestellt ist. Der Einsatz der Approximationsfunktion in die Berechnung der kombinierten Außentemperatur zeigte jedoch nur geringfügige Unterschiede. D.h., für wärmetechnische Berechnungen, in denen neben der langwelligen Strahlung auch die Konvektion wirksam ist, kann auf die Berücksichtigung der Strahldichtevertelung verzichtet werden. Von dieser Annahme ging auch *Nehring* aus.

Die numerisch berechneten effektiven Emissionsgrade sind in *Tabelle 1* vertafelt. Die Abnahme mit zunehmenden Flächenneigungswinkel belegt, daß der Einfluß der Flächenabnahme größer ist, als der Anstieg der Strahldichtevertelung.

Für den Emissionsgrad der horizontalen Fläche ( $\gamma_F = 0 \text{ grad}$ ) ergab sich in Übereinstimmung mit der VDI 3789 [10]

$$\epsilon_2 = 0,099 \left( \frac{\vartheta_{AL}}{100} \right)^2 \quad (3)$$

Dieser Wert ist in die kombinierte Außentemperatur zu übernehmen, da in dieser die Geometrieverhältnisse getrennt berücksichtigt sind (Reflexionsmodell).

Aus *Tabelle 1* geht hervor, daß  $\epsilon_2$  mit zunehmender Außenlufttemperatur ansteigt. D.h., in den Sommermonaten ist der bisher angenommene Wert von 0,74 (s. VDI 2078 [1]) unzutreffend.

**Tabelle 1** : Effektiver Emissionsgrad der langwelligen Gegenstrahlung durch numerische Integration (vgl. mit Näherung  $\epsilon_{2,eff} \approx \epsilon_2 \varphi_{1,2}$ )

T <sub>AL</sub> °C	Flächenneigungswinkel gegen die Horizontale in grad												
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
-15	<b>0,66</b>	0,65	0,62	0,58	0,52	0,44	0,36	0,27	0,19	0,11	0,05	0,02	0,00
-10	<b>0,69</b>	0,68	0,65	0,60	0,54	0,46	0,37	0,28	0,19	0,12	0,06	0,02	0,00
-5	<b>0,71</b>	0,70	0,67	0,62	0,56	0,47	0,38	0,29	0,20	0,12	0,06	0,02	0,00
0	<b>0,74</b>	0,73	0,70	0,65	0,58	0,49	0,40	0,30	0,21	0,13	0,06	0,02	0,00
5	<b>0,76</b>	0,75	0,72	0,67	0,60	0,51	0,41	0,31	0,21	0,13	0,06	0,02	0,00
10	<b>0,79</b>	0,78	0,75	0,69	0,62	0,52	0,42	0,32	0,22	0,13	0,06	0,02	0,00
15	<b>0,82</b>	0,81	0,77	0,72	0,64	0,54	0,44	0,33	0,23	0,14	0,06	0,02	0,00
20	<b>0,85</b>	0,84	0,80	0,74	0,66	0,56	0,45	0,34	0,23	0,14	0,06	0,02	0,00
25	<b>0,88</b>	0,87	0,83	0,76	0,68	0,57	0,46	0,35	0,24	0,14	0,07	0,02	0,00
30	<b>0,91</b>	0,90	0,85	0,79	0,70	0,59	0,47	0,35	0,24	0,14	0,07	0,02	0,00
35	<b>0,94</b>	0,93	0,88	0,81	0,71	0,60	0,48	0,36	0,24	0,14	0,07	0,02	0,00
40	<b>0,97</b>	0,95	0,91	0,83	0,73	0,62	0,49	0,37	0,25	0,15	0,07	0,02	0,00

Die Strahldichtevertelung der Umgebung wird in der VDI 3789 [10] als konstant angenommen, obwohl auch hier aufgrund unterschiedlicher Weglängen des Strahls durch den Gaskörper zur Fläche 1 eine verschiedene Schwächung vorliegen könnte.

## Kombinierte Außentemperatur nach Nehring

Die von *Nehring* und in der VDI 2078 [1] angegebene Form der kombinierten Außentemperatur mit einem Term für den Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur ist für EDV-Berechnungen sehr unpraktikabel. Der Literaturstelle [5] kann man auf Seite 188 (dort Glg. 13a) entnehmen, daß dieser Term wieder auf  $(\vartheta_{AL}/100)^4$  zurückgeführt werden kann. Auch ein zahlenmäßiger Vergleich zeigt nur geringe Unterschiede.

Damit läßt sich die kombinierte Außentemperatur nach *Nehring* in einer vergleichbaren Form zu Glg. (2) angeben

$$\theta_{A,Nehring} = T_{AL} - \frac{\varepsilon_1 C_S}{\alpha_A} [1 - \varphi_{1,2} \varepsilon_2 - \varphi_{1,3} \varepsilon_3] \left( \frac{\vartheta_{AL}}{100} \right)^4 + \frac{\dot{s}_A}{\alpha_A} \quad (4)$$

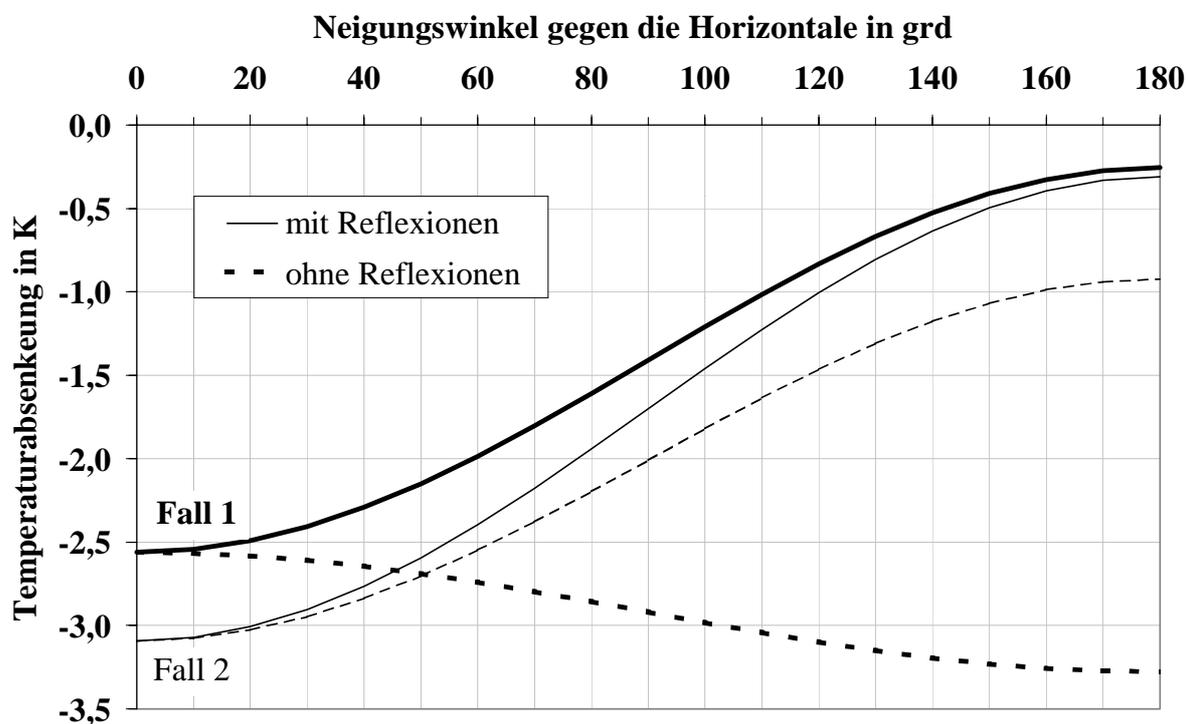
*Nehring* setzte die Oberflächentemperaturen der Flächen 2 und 3 auf Außenlufttemperaturniveau  $T_2 = T_3 = T_{AL}$ . Wird dies auch in Glg. (2) vollzogen, zeigt sich nur ein Unterschied im Term für die Temperaturabsenkung. *Bild 4* und *5* zeigt daher nur beispielhaft einen Vergleich zwischen den beiden Temperaturabsenkungen nach Glg. (2) und (4).

Der negative Term stellt die Temperaturabsenkung infolge langwelliger Wärmeabstrahlung dar. Setzt man Glg. (2) oder (4) in Glg. (1) ein, ist zu erkennen, daß unter Abwesenheit kurzwelliger Strahlung selbst bei Temperaturgleichheit zwischen Wandoberfläche und Außenluft eine langwellige Strahlungswärmeabgabe erfolgt. Die erhöhte Strahlungswärmeabgabe kann dazu führen, daß in der Nacht die Oberflächentemperatur unter die Außenlufttemperatur absinkt. Der Vorgang wird allerdings durch das Erreichen der Taupunkttemperatur begrenzt.

Diese bereits von *Nehring* getroffene Aussage führte in der Fachwelt teilweise zu einer Ablehnung der kombinierten Außentemperatur, da man von der Vorstellung eines in sich abgeschlossenen Systems ausging. Durch experimentelle Untersuchungen konnte dieser Sachverhalt zumindest tendenziell bestätigt werden (*Daus* [8], *Roloff* [9]).

## Diskussion und Vergleich

Für horizontale Dächer ohne höhere Umgebungsbebauung haben die Reflexionen an der Umgebung (Fläche 3) keinen Einfluß, da die Fläche 1 die Fläche 3 nicht sieht und für  $\rho_2 = 0$  gilt. Die Temperaturabsenkung ist daher in beiden Gleichungen identisch. Gleiche Verhältnisse stellen sich ein, wenn auch die Umgebung als schwarzer Körper wirkt ( $\epsilon_3 = 1$ ).



**Bild 4 :** Temperaturabsenkung infolge langwelliger Wärmeabstrahlung (Sommer- und Winterfall)

Fall	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\alpha_A$ in W/(m <sup>2</sup> K)	$T_{AL}$ in °C
1	0,90	0,92	0,90	13,5	32
2	0,90	0,67	0,90	25,0	-14

Ein thermodynamisch abgeschlossenes System liegt vor, wenn das Himmelsgewölbe keine Strahlung an den Weltraum abgibt. Da dann außer der Reflexion auch die Transmission Null ist, muß für den Emissionsgrad  $\varepsilon_2 = 1$  gelten. D.h., das Himmelsgewölbe wirkt auch bei der Emission schwarz. Eine Temperaturabsenkung infolge langwelliger Abstrahlung tritt in diesem Fall nicht auf. Glg. (2) liefert hierfür auch erwartungsgemäß den Wert Null. Glg. (4) weist eine Temperaturabsenkung kleiner Null auf.

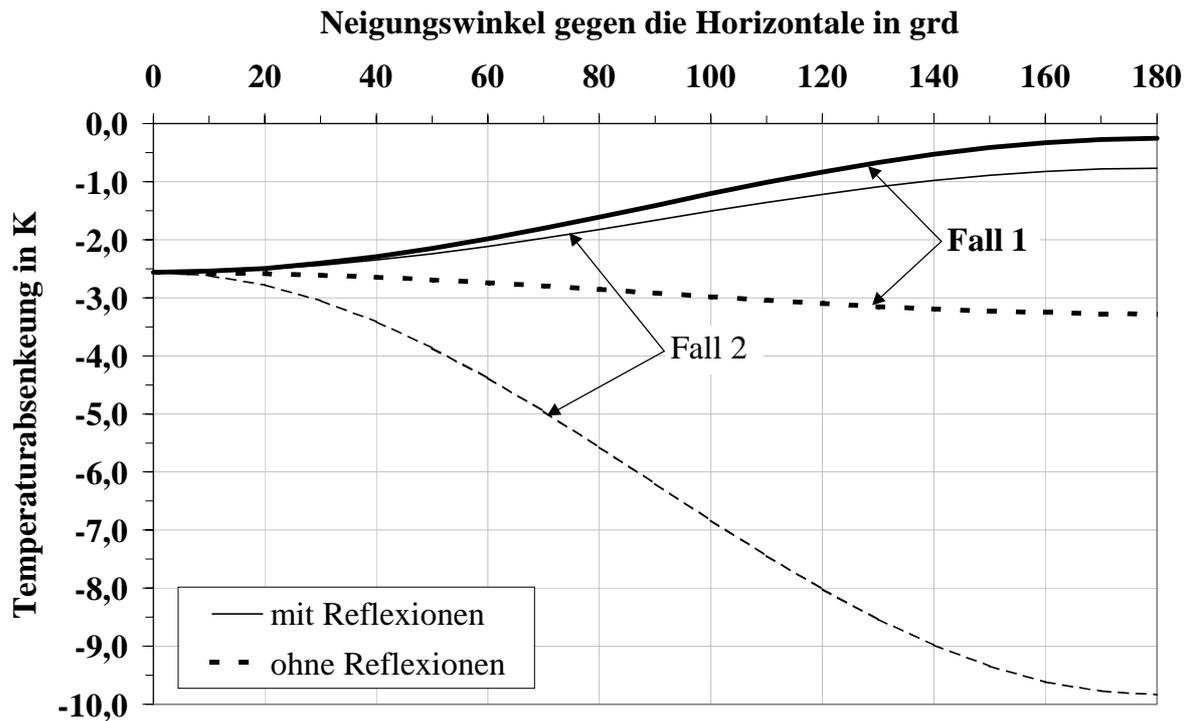
Bei  $\varepsilon_3 < 1$  und für zunehmenden Neigungswinkel steigt der Anteil des Strahlungsaustausches mit der Umgebung. Da für diesen jedoch die Gesetzmäßigkeiten eines thermodynamisch abgeschlossenen Systems angenommen wurden, muß die Temperaturabsenkung kleiner werden. Die Berücksichtigung der Reflexionen, welche zu einer Intensivierung dieses Strahlungsaustausches führen, muß daher zu noch kleineren Werten in der Temperaturabsenkung führen.

Dies erklärt den grundsätzlichen Unterschied beider Kurven für mit und ohne Reflexionen. Die Abstrahlung an das Himmelsgewölbe bei einem Neigungswinkel von 180 grad entsteht durch die Reflexion an der Umgebung zum Himmelsgewölbe.

Bei senkrechten Flächen beträgt die Temperaturabsenkung ca. 1,5 K. Der Unterschied zur kombinierten Außentemperatur nach *Nehring* kann beträchtlich sein. Dieser resultiert einerseits aus der Korrektur früherer Annahmen ( $\varepsilon_2 = 0,74$ ,  $\alpha_A = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ) für den Sommerfall und andererseits aus der Berücksichtigung der Reflexionen.

Letzteres wirkt sich erwartungsgemäß besonders dann aus, wenn die Umgebung einen niedrigen Emissionsgrad aufweist (s. *Bild 5*). Dies kann z.B. bei metallischen Oberflächen (parkende Kraftfahrzeuge, Fassaden mit Alu-Verkleidung usw.) gegeben sein. Für einen extremen Fall mit  $\varepsilon_3 = 0,10$  geht die Temperaturabsenkung nach Glg. (4) bis auf ca.  $-30 \text{ K}$  herunter, dagegen die nach Glg. (2) auf ca.  $-2,3 \text{ K}$ .

Es kann daher bestätigt werden, daß die kombinierte Außentemperatur nach *Nehring* für Neigungswinkel größer Null zu niedrige Werte liefert. Der Effekt der langwelligen Abstrahlung an den Weltraum ist aber vorhanden und wird durch die Reflexionen an der Umgebung nur geschwächt.



**Bild 5 :** Temperaturabsenkung infolge langwelliger Wärmeabstrahlung

Fall	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\alpha_A$ in $W/(m^2 K)$	$T_{AL}$ in $^{\circ}C$
1	0,90	0,92	0,90	13,5	32
2	0,90	0,92	<b>0,70</b>	13,5	32

## Außentemperatur

Es ist davon auszugehen, daß auch bei transparenten Bauteilen (Verglasungen) der Effekt der langwelligen Wärmeabstrahlung an das Himmelsgewölbe vorhanden ist.

Die kurzwellige Strahlungsabsorption ist bei diesen Bauteilen getrennt zu berechnen. Gleiches könnte auch für die nichttransparenten Bauteile geschehen.

Zur Vereinheitlichung empfiehlt es sich, die kurzwellige Strahlungsabsorption aus der Glg. (2) abzutrennen und in eine gesonderte Berechnung zu stellen. Es

ergibt sich somit eine Außentemperatur  $T_A$ , die für alle außenliegende Bauteile anwendbar ist

$$T_A = T_{AL} - \frac{\varepsilon_1 C_S}{\alpha_A} \left[ (1 - \varphi_{1,3} \varepsilon_3)(1 - \varepsilon_2) \right] \left( \frac{\vartheta_{AL}}{100} \right)^4 + \frac{\alpha_{S1,3}}{\alpha_A} (T_3 - T_{AL}) \quad (5)$$

Für Kühllastberechnungen nach VDI 2078 [1] sollte die Außentemperatur anstelle der Außenlufttemperatur in die Aktionsgröße E(4) einfließen.

## **Berücksichtigung der Umgebungsbebauung**

Das Modell nach *Bild 1* ist für reale Gebäude mit einer Verbauung der Umgebung nicht zutreffend. Da die Verbauung hinsichtlich der Strahlung den Eigenschaften der Fläche 3 zuzuordnen ist, sollte sie bei größeren sichtbaren Anteilen in der Außentemperatur berücksichtigt werden.

Die VDI 3789 [10] empfiehlt hierfür, die Umriss der Verbauung auf das Himmelsgewölbe zu projizieren und die Projektionsfläche von der Integration auszuschließen. Um diesen Aufwand zu vermeiden, kann man eine Näherung durch einen Zuschlag auf den Flächenneigungswinkel erzielen.

Durch den bereits erwähnten Verdeckungswinkel wird aus dem Himmelsgewölbe ein Kugelzweieck ausgeschnitten und führt zu einer verringerten Einstrahlzahl  $\varphi_{1,2}$ . Damit wird gleichzeitig die Einstrahlzahl  $\varphi_{1,3}$  erhöht, was auch bei zunehmender Verbauungsfläche folgerichtig ist.

Da die Strahldichteverteilung vernachlässigt wird, spielt es keine Rolle, an welcher Stelle der Ausschnitt erfolgt. Allerdings besteht auch bei konstanter Strahldichteverteilung für die Einstrahlzahl  $\varphi_{1,2}$  eine Abhängigkeit von der Azimutdifferenz zur Verbauungsfläche. Die Näherung setzt also voraus, daß die Lage und Umrißform der Verbauung keinen nennenswerten Einfluß hat.

Unter dieser Voraussetzung kann der Verdeckungswinkel aus einem Anteil der projizierten Verbauungsfläche zur gesamten sichtbaren Himmelsfläche ermittelt werden. Die projizierte Verbauungsfläche wird damit gleichmäßig auf ein

Kugelzweieck verteilt. Mit dem Flächenanteil  $f_V$  errechnet sich die erweiterte Einstrahlzahl zu

$$\varphi_{1,3} = \frac{1 - \cos [\gamma_F + f_V (\pi - \gamma_F)]}{2} \quad (6)$$

$f_V$  Anteil der projizierte Verbauungsfläche an der sichtbaren Himmelsfläche (0,0...1,0)

und ist in Glg. (5) einzusetzen. Für die Temperatur  $T_3$  und für den Emissionsgrad  $\varepsilon_3$  sind geeignete Mittelwerte für Verbauung und Erdboden zu wählen.

Bei einem Flächenanteil von  $f_V = 1,0$  findet ein Modellwechsel statt, da hierbei die Fläche 2 nicht mehr existiert. Folglich kann die Umgebungsbebauung auch keine reflektierte Strahlung an das Himmelsgewölbe abgeben. Die Temperaturabsenkung müßte in diesem Fall Null betragen. Das neue thermodynamisch abgeschlossene Modell liefert für den Strahlungsaustausch zwischen der sehr kleinen Fläche 1 und der sehr großen Fläche 3 den Ersatzwert für  $\varphi_{1,3} = 1/\varepsilon_3$ . Der äußere Wärmeübergangskoeffizient müßte theoretisch durch  $\alpha_A = \alpha_{S1,3} + \alpha_K$  gebildet werden.

## Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Definition der Außentemperatur nach Glg. (5) wird die konvektive und die langwellige Strahlungswärmeaufnahme unter Berücksichtigung der wesentlichen physikalischen Effekte besser erfaßt, als der entsprechende Teil der kombinierten Außentemperatur nach *Nehring*.

Die langwellige Strahlungsabsorption durch das Himmelsgewölbe bewirkt in beiden Definitionen eine Temperaturabsenkung der Außentemperatur unter die Außenlufttemperatur.

Mit den früheren Annahmen über die Höhe der Emissionsgrade und des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten ist der Unterschied in der Temperaturabsenkung

noch nicht so gravierend. Merkliche Differenzen stellen sich jedoch ein, wenn neuere Erkenntnisse über diese Parameter zum Einsatz kommen. Insbesondere ist die bedenkenlose Wahl eines Emissionsgrades für die terrestrische Umgebung unter Verwendung der kombinierten Außentemperatur nach *Nehring* riskant. Hier kann sich eine Temperaturabsenkung von  $-20$  bis  $-30$  K errechnen. Die max. mögliche Temperaturabsenkung nach Glg (5) liegt bei  $-6$  K. Im Regelfall beträgt sie  $-2,5$  bis  $-1,5$  K.

Die vorgenommenen Erweiterungen bieten eine einfache Möglichkeit, Temperaturunterschiede zwischen der terrestrischen Umgebung und der Außenlufttemperatur sowie die Verdeckung des Himmelsgewölbes durch Verbauung zu berücksichtigen. Auf die Lösung einer Gleichung 4. Grades gem. [4] und eines Doppelintegrals gem. [10] kann unter praktischen Genauigkeitsanforderungen verzichtet werden.

Das Anwendungsgebiet für die hier definierte Außentemperatur ist in der Kühllastberechnung und in der thermischen Gebäudesimulation zu sehen. Da die erreichbaren Temperaturabsenkungen an extremen Wintertagen in der Größenordnung der Normaußentemperaturkorrektur für schwere Bauarten liegt, ist auch eine Verwendung in der Wärmebedarfsberechnung nach DIN 4701 [11] denkbar.

Bei der thermischen Gebäudesimulation ist für  $\varepsilon_2$  der bewölkte Himmel zu beachten (s. VDI 3789 [10]).

## Literatur

- [1] VDI 2078 Ausgabe Oktober 1994 : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] *Jahn, A; Nadler, N. und Guo, J.*: Neuausgabe der VDI-Kühllastregeln - VDI 2078/1993-. Erläuterungen zum EDV-Verfahren. Gesundheits-Ingenieur 114 (1993) H. 3, S. 117-126.
- [3] *Mackey, C. O. und Wright, L. T.* : Periodic heat flow – homogeneous walls or roofs. ASHVE Transactions Vol. 50 (1944), S. 293 – 312.

- [4] *Haferland, F. und Heindl, W.* : Der Einfluß des Schichtaufbaues von Außenwänden auf den Temperaturverlauf bei periodischen Aufheiz- und Abkühlungsvorgängen infolge Sonneneinstrahlung und Heizunterbrechung.  
Wärme-, Klima- und Sanitärtechnik, 21 (1969) Heft 12, S. 370-372.
- [5] *Nehring, G.*: Über den Wärmefluß durch Außenwände und Dächer in klimatisierte Räume infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden meteorologischen Elemente. Gesundheits-Ingenieur 83 (1962) Heft 7, S. 185-189, Heft 8, S. 230-242, Heft 9, S. 253-269.
- [6] *Koch, A. und Pechinger, U.*: Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sonnen- und Wärmestrahlungseinflüssen auf Gebäudeoberflächen. Gesundheits-Ingenieur 98 (1977) Heft 10, S. 265-280.
- [7] *Wolfseher, U.*: Der Wärmetransport an Bauteiloberflächen unter besonderer Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches Gesundheits-Ingenieur 102 (1981) Heft 4, S. 184-200.
- [8] *Daus, W.*: Über die Abstrahlung von Flachdächern durch die Atmosphäre und ihren Einfluß auf den Wärmeschutz. Diss. TU Darmstadt 1967.
- [9] *Roloff, J.*: Das thermische Verhalten von Bauoberflächen unter Sonneneinstrahlung. Diss. TU Dresden 1971.
- [10] VDI 3789 Blatt 2 Ausgabe Oktober 1994 : Umweltmeteorologie. Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen. Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung.
- [11] DIN 4701 Teil 1 und 2 Ausgabe März 1983 : Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfes von Gebäuden.
- [12] CEN TC89/WG6 N. 225, Revision 4, Mai 1997 : Thermal Performance of Buildings. Room cooling load calculation. General criteria for a simplified calculation method.

## Nachtrag Rechenbeispiele

### Beispiel 1:

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

#### Ausgangsdaten:

Neigungswinkel gegen die Horizontale	$\gamma_F = 90^\circ$
Außenlufttemperatur	$T_{AL} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur des Erdbodens	$T_3 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$
Emissionsgrad der Wandoberfläche	$\varepsilon_1 = 0,9$
Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung	$\varepsilon_3 = 0,9$
äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_A = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

#### Berechnung:

Einstrahlzahl für Wandoberfläche an Himmelsgewölbe nach Glg. (2):

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

Emissionsgrad der Gegenstrahlung nach Glg. (3):

$$\varepsilon_2 = 0,099 \left( \frac{32 + 273,15}{100} \right)^2 = 0,922$$

Außentemperatur nach Glg. (5) bei  $T_3 = T_{AL}$ :

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

Zum Vergleich Außentemperatur ohne Reflexionen entsprechend Glg. (4):

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

Die Kühllast ist demnach unter Berücksichtigung der Reflexionen höher.

## Beispiel 2:

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

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

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

Außentemperatur nach Glg. (5) bei  $T_3 = T_{AL}$ :

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

Zum Vergleich Außentemperatur ohne Reflexionen entsprechend Glg. (4):

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

## Beispiel 3:

Es ist der stationäre Wärmestrom durch eine senkrechte, unverbaute Außenwand bei unbewölktem Himmel im Winter zu berechnen.

### Ausgangsdaten:

Neigungswinkel gegen die Horizontale	$\gamma_F = 90^\circ$
Innentemperatur	$T_I = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
Außenlufttemperatur	$T_{AL} = -14 \text{ } ^\circ\text{C}$
Temperatur des Erdbodens	$T_3 = -14 \text{ } ^\circ\text{C}$
Emissionsgrad der Wandoberfläche	$\varepsilon_1 = 0,9$
Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung	$\varepsilon_3 = 0,9$
äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_A = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Wärmedurchgangskoeffizient	$k = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

### Berechnung:

Einstrahlzahl für Wandoberfläche an Himmelsgewölbe nach Glg. (2):

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

Emissionsgrad der Gegenstrahlung nach Glg. (3):

$$\varepsilon_2 = 0,099 \left( \frac{-14 + 273,15}{100} \right)^2 = 0,665$$

Außentemperatur nach Glg. (5) 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 die Wand :

$$\dot{q} = k (T_I - T_A) = 0,5 \cdot (20 + 15,7) = \underline{\underline{17,9 \text{ W / m}^2}}$$

Der Transmissionswärmebedarf wäre gegenüber einer Berechnung mit

$T_A = -14 \text{ °C}$  um 5 % höher.