Erhöhung der inneren Fenstertemperatur durch Anordnung von Strahlungsheizflächen

Bernd Glück

Mit neuzeitlichen Glasscheibenkonstruktionen (Spezialgläser mit Beschichtungen; evakuierte oder mit speziellen Gasen gefüllte Zwischenräume) sind niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten erreichbar. Dies verleitet einige Architekten erneut zur Vollverglasung der Gebäudeumschließungen. Aus gestalterischen Gründen dürfen dann meistens keine örtlichen Raumheizkörper eingesetzt werden. Um Diskomfort im Außenwandbereich zu vermeiden, müssen an der Glasfläche herabfallende Kaltluftströme verhindert bzw. in ihrer Wirkung begrenzt und die Abstrahlung der Personen im Raum an die Glasfläche minimiert bzw. durch gleichgerichteten Strahlungsaustausch mit Oberflächen höherer Temperatur kompensiert werden. Die letztgenannte Möglichkeit ist zweifellos aus energetischer Sicht zu bevorzugen. Sie läßt sich aber mit der Forderung nach einer unverstellten Glasfassade praktisch kaum realisieren. In den meisten Fällen wird eine Anhebung der inneren Glasscheibentemperatur durch einen Warmluftschleier bewirkt, den man durch Einblasen von warmer Luft oder durch Estrichkonvektoren erzeugt. Andere Systeme beheizen direkt oder indirekt die Tragprofile der Glasfassade. Sie erreichen damit je nach Anordnung eine Temperaturerhöhung der Scheibe durch Strahlung und Konvektion und teilweise auch eine in den Raum gerichtete Strahlungskomponente.

Die genannten Varianten bedingen einen relativ großen gerätetechnischen Aufwand. Es soll deshalb untersucht werden, inwieweit fensternahe Flächenheizungen eine Temperaturerhöhung der Glasscheibeninnenflächen im Winterfall bewirken können. Es wird dabei an Fußbodenheizungen mit höhertemperierten Randstreifen und an beheizbare Randstreifen von Kühldecken, die im Sommerfall der Wärmelastabführung dienen, gedacht.

1. Vereinfachte Berechnung

Bild 1 zeigt eine Glasfassade F, die im Strahlungswärmeaustausch mit den übrigen Raumumfassungen und im konvektiven Wärmeaustausch mit der Luft steht.

Wäre keine zusätzliche Bestrahlung durch eine Heizfläche vorhanden, z. B. ein heizbarer Deckenabschnitt H wird nicht betrieben, so gilt vereinfacht für eine Fläche A_F der Glasfassade die Wärmebilanz

$$A_F \kappa_F (t_F - t_a) = A_F \alpha_K (t_L - t_F) + A_F \alpha_S (t_U - t_F) . \qquad (1)$$

Dr. sc. techn., Dr.-Ing. Bernd Glück, c/o Rud. Otto Meyer.

Es bedeuten:

t_F Temperatur der inneren Fassadenoberfläche
t_a Außentemperatur
t_L Lufttemperatur in Nähe der inneren Fassadenfläche
t_U mittlere Oberflächentemperatur der Umfassungen (Wände, Decke, Boden, ohne Fassadenfläche)
κ_F Teilwärmedurchgangskoeffizient der Glasfassade. Er wird aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten k_F und dem inneren genormten Wärmeübergangskoeffizienten α_i gebildet:

$$\frac{1}{\kappa_F} = \frac{1}{k_F} - \frac{1}{\alpha_i} \quad \text{mit} \quad 1/\alpha_i = 0{,}13\ \mathrm{m^2\,K/W} \qquad (2)$$

α_K Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion

$$\alpha_K = 1{,}44 (t_L - t_F)^{0{,}32} \quad \text{in} \quad \mathrm{W/(m^2\,K)} \qquad (3)$$

α_S Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung [3, S. 216]

$$\alpha_S = \varepsilon_{F,H} \sigma b = (0{,}86 \ldots 0{,}93) \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot (1 \ldots 1{,}1) \cdot 10^8\ \mathrm{W/(m^2\,K)}$$

$$\alpha_S \approx 5{,}4\ \mathrm{W/(m^2\,K)} .$$

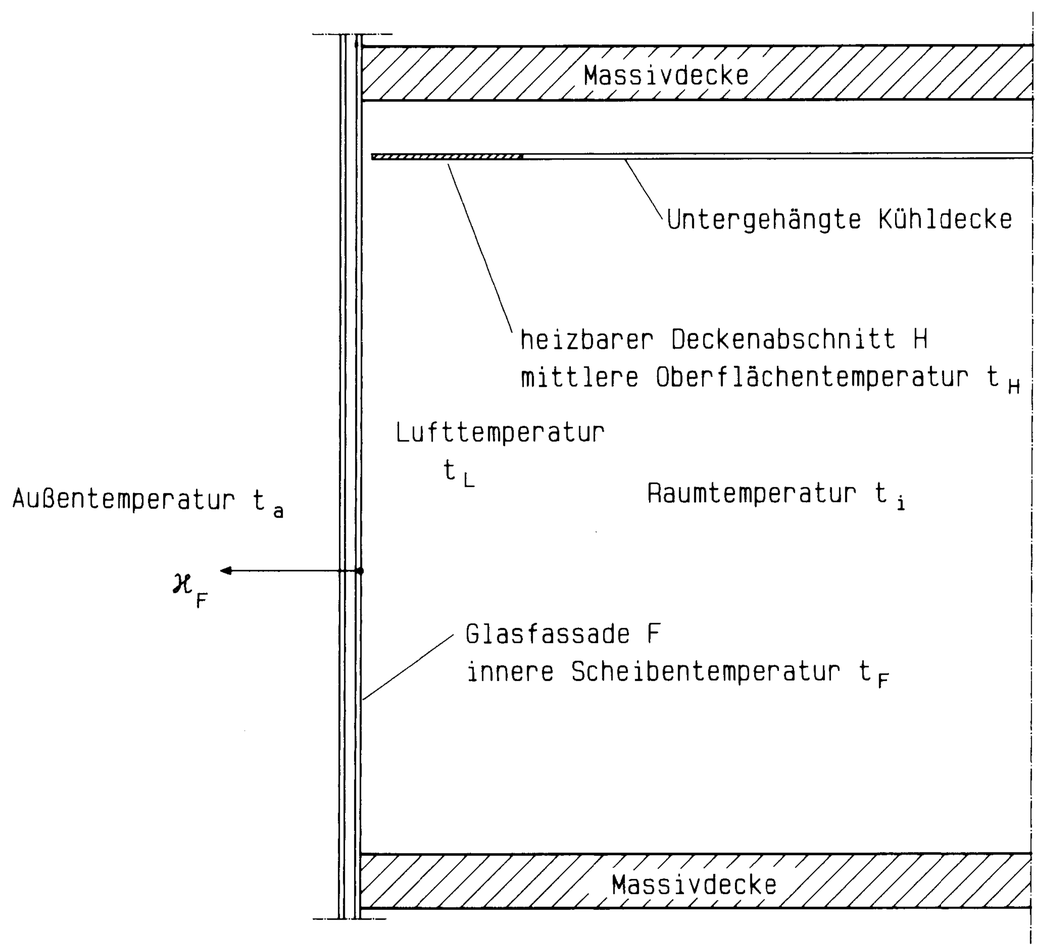

Bild 1. Schematischer Raumquerschnitt mit einer Glasfassade und einem heizbaren Deckenabschnitt mit Kennzeichnung der Temperaturen und dem Teilwärmedurchgangskoeffizienten der Fassade.

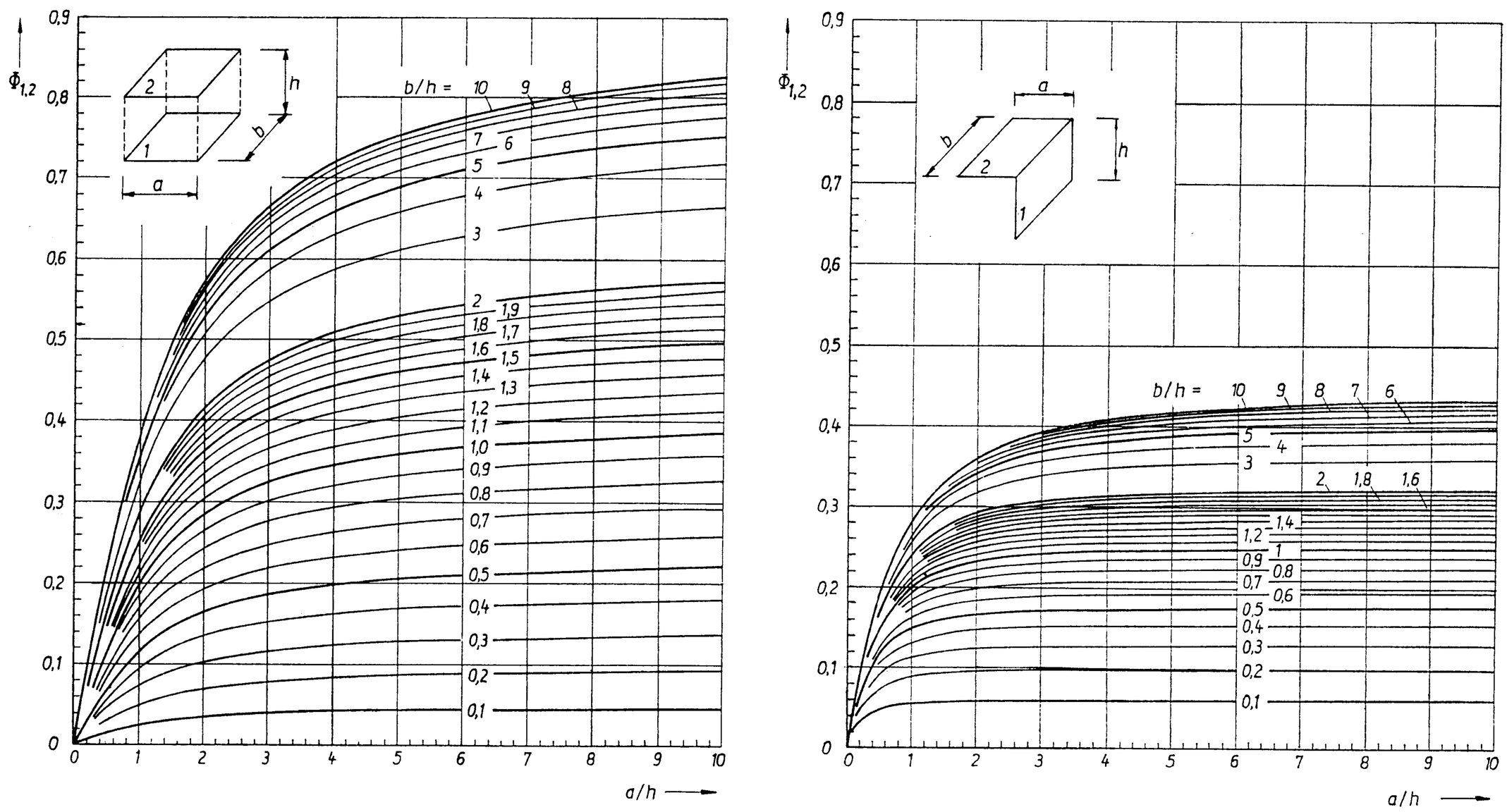

Bild 2. Flächeneinstrahlzahlen von gleich großen parallelen Rechteckflächen und senkrecht zueinander stehenden Flächen mit einer gemeinsamen Kante.

Die Elimination von t_F in Gl. (1) liefert

$$t_F = \frac{\alpha_K t_L + \alpha_S t_U + \kappa_F t_a}{\alpha_K + \alpha_S + \kappa_F} . \tag{4}$$

Wird eine spezielle Strahlungsheizfläche zur Temperaturerhöhung der inneren Glasfläche betrieben, z. B. der Deckenabschnitt H, so ist in Gl. (1) der Strahlungswärmestrom zu differenzieren:

$$A_F \kappa_F (t_F^* - t_a) = A_F \alpha_K (t_L - t_F^*) + A_F \Phi_{F,H} \alpha_S (t_H - t_F^*) + \\ + A_F (1 - \Phi_{F,H}) \alpha_S (t_U - t_F^*) . \tag{5}$$

Zusätzlich bedeuten:

t_F^* Temperatur der inneren Fassadenoberfläche bei Betrieb der Strahlungsheizfläche H

$\Phi_{F,H}$ Einstrahlzahl der Fassadenfläche A_F auf die Strahlungsheizfläche A_H.

Die Elimination von t_F^* in Gl. (5) ergibt:

$$t_F^* = \frac{\alpha_K t_L + \Phi_{F,H} \alpha_S t_H + (1 - \Phi_{F,H}) \alpha_S t_U + \kappa_F t_a}{\alpha_K + \Phi_{F,H} \alpha_S + (1 - \Phi_{F,H}) \alpha_S + \kappa_F} . \tag{6}$$

Unter der Annahme, daß sich durch die zusätzliche Strahlungsheizfläche H die Lufttemperatur t_L und die Oberflächentemperaturen der Wand-, Decken- und Bodenfläche in erster Näherung nicht ändern, ergibt sich die Temperaturerhöhung des inneren Fassadenglases zu

$$t_F^* - t_F = \frac{\alpha_S \Phi_{F,H} (t_H - t_U)}{\alpha_K + \alpha_S + \kappa_F} . \tag{7}$$

Das Einsetzen praktischer Näherungswerte $\alpha_K = 2{,}2\ W/(m^2\ K)$, $\alpha_S = 5{,}4\ W/(m^2\ K)$ sowie $t_U = t_i$ liefert die zugeschnittene Größengleichung

$$t_F^* - t_F = \frac{\Phi_{F,H} (t_H - t_i)}{\kappa_F / 5{,}4 + 1{,}4} \quad \text{in} \quad K \tag{8}$$

mit κ_F in $W/(m^2\ K)$. Die betrachteten Fenster- und Heizflächen gehen in die Berechnungsgleichung nicht direkt ein, sie sind in der Einstrahlzahl $\Phi_{F,H}$ bezüglich ihrer geometrischen Zuordnungen jedoch enthalten.

Die Einstrahlzahlen können nach den üblichen Verfahren [1; 2; 3] berechnet bzw. im Standardfall den Diagrammen des *Bildes 2* entnommen werden.

Sieht man von zweidimensionalen Temperaturausgleichsvorgängen in den Glasscheiben ab, so kann zur Bestimmung der Temperaturänderung infolge Bestrahlung an signifikanten Stellen auch die Einstrahlzahl eines Flächenelementes $\varphi_{F,H}$ Verwendung finden.

1.1 Beispiel 1

Ein Großraumbüro (Länge 15 m, Tiefe 15 m, Höhe 3,8 m) wird durch eine Glasfassade mit einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten $k = 0{,}8\ W/(m^2\ K)$ begrenzt. Ein rechtwinklig an die Glasfläche anschließender Decken- oder Bodenstreifen von je einer Breite B = 1,5 m soll beheizbar sein. Die erreichbaren Oberflächentemperaturen betragen: Deckenstreifen $t_H = 42\,°C$; Bodenstreifen $t_H = 30\,°C$. Es sind die möglichen Temperaturerhöhungen der inneren Glasoberfläche infolge der Strahlungswirkung der genannten Heizflächen abzuschätzen.

Lösung

Aus Gl. (2) folgt der Teilwärmedurchgangskoeffizient

$$\kappa_F = (1/0{,}8 - 0{,}13)^{-1} \quad W/(m^2\ K) = 0{,}89\ W/(m^2\ K) .$$

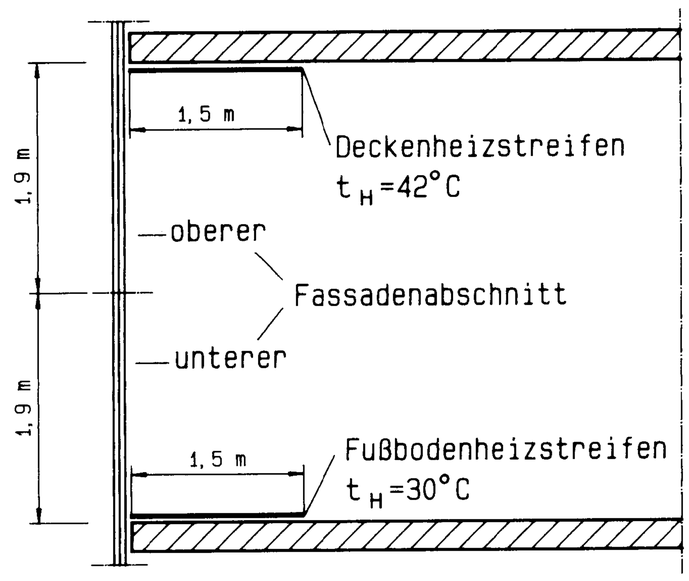

Bild 3. Fassaden- und Heizbandquerschnitt mit geometrischen Abmessungen und Oberflächentemperaturen zur rechnerischen Bestimmung der mittleren Temperaturerhöhung des Fassadenober- und -unterteils.

Gemäß *Bild 3* wird die Fassade rechnerisch in einen oberen und in einen unteren Abschnitt der Höhen 1,9 m unterteilt, um den unterschiedlichen Strahlungseinfluß zu erkennen. Zur Berechnung der Flächeneinstrahlzahlen mit Hilfe des in *Bild 2* dargestellten Diagramms sind folgende Schritte notwendig:

oberer Fassadenabschnitt – Decke

$h = 1{,}9\ \text{m};\ a = 1{,}5\ \text{m};\ b = 15\ \text{m} \rightarrow a/h = 0{,}79;\ b/h = 7{,}9$

$\Phi_{Fo,HD} = 0{,}25$

unterer Fassadenabschnitt – Decke

I. Einstrahlzahl Decke – Gesamtfassade

$h = 1{,}5\ \text{m};\ a = 3{,}8\ \text{m};\ b = 15\ \text{m} \rightarrow a/h = 2{,}5;\ b/h = 10$

$\Phi_{HD,F} = 0{,}38$

II. Einstrahlzahl Decke – oberer Fassadenabschnitt

$h = 1{,}5\ \text{m};\ a = 1{,}9\ \text{m};\ b = 15\ \text{m} \rightarrow a/h = 1{,}3;\ b/h = 10$

$\Phi_{HD,Fo} = 0{,}31$

III. Einstrahlzahl Decke – unterer Fassadenabschnitt

$$\Phi_{HD,Fu} = \Phi_{HD,F} - \Phi_{HD,Fo} = 0{,}38 - 0{,}31 = 0{,}07$$

$$\Phi_{Fu,HD} = \Phi_{HD,Fu}\,\frac{B}{H/2} = 0{,}07\,\frac{1{,}5}{1{,}9} = 0{,}055\,.$$

Wegen der vorhandenen Symmetrie gelten:

unterer Fassadenabschnitt – Boden

$$\Phi_{Fu,HB} = 0{,}25$$

oberer Fassadenabschnitt – Boden

$$\Phi_{Fo,HB} = 0{,}055\,.$$

Damit liefert Gl. (8) die mittlere Temperaturerhöhung der Fassadenabschnitte durch Strahlung unter Annahme $t_i = 20\,°C$ für

oberen Fassadenabschnitt bei Deckenheizung

$$(t_F^* - t_F)_{Fo,DH} = \frac{0{,}25 \cdot (42 - 20)}{0{,}89/5{,}4 + 1{,}4}\ \text{K} = 3{,}5\ \text{K}$$

unteren Fassadenabschnitt bei Deckenheizung

$$(t_F^* - t_F)_{Fu,DH} = \frac{0{,}055 \cdot (42 - 20)}{0{,}89/5{,}4 + 1{,}4}\ \text{K} = 0{,}8\ \text{K}$$

oberen Fassadenabschnitt bei Bodenheizung

$$(t_F^* - t_F)_{Fo,BH} = \frac{0{,}055 \cdot (30 - 20)}{0{,}89/5{,}4 + 1{,}4}\ \text{K} = 0{,}4\ \text{K}$$

unteren Fassadenabschnitt bei Bodenheizung

$$(t_F^* - t_F)_{Fu,BH} = \frac{0{,}25 \cdot (30 - 20)}{0{,}89/5{,}4 + 1{,}4}\ \text{K} = 1{,}6\ \text{K}\,.$$

2. Verbesserte Berechnung

Die Strahlungsaustauschrechnung nach einem neuen Näherungsverfahren [3, S. 213], das auf der Bruttomethode aufbaut, wird in folgenden Schritten abgearbeitet:

Gesamtenergiestromdichte

$$\dot{e}_i = \varepsilon\sigma(t_i + 273)^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \text{W/(m}^2\,\text{K}^4) \qquad (9)$$

mittlere Flächenhelligkeit des „Raumes"

$$\dot{f}_m = \frac{\dot{e}_D A_D + \dot{e}_B A_B + \dot{e}_U A_U + \dot{e}_F A_F}{\varepsilon(A_D + A_B + A_U + A_F)} \qquad (10)$$

spezifischer Strahlungswärmestrom, den die Fassade F vom Raum erhält

$$\dot{q}_{S,F} = -\,\dot{e}_F + \varepsilon[\Phi_{F,D}\dot{e}_D + \Phi_{F,B}\dot{e}_B + (1 - \Phi_{F,D} - \Phi_{F,B})\dot{e}_U] + \varepsilon(1 - \varepsilon)\dot{f}_m\,. \qquad (11)$$

Dabei bedeuten:

- A_D beheizbare Deckenfläche
- A_B beheizbare Bodenfläche
- A_F Fassadenfläche
- A_U übrige Umfassungsfläche (unbeheizte Wand-, Decken- und Bodenfläche)
- $\dot{e}_D$ Eigenemission des beheizten Deckenstreifens der Temperatur t_D
- $\dot{e}_B$ Eigenemission des beheizten Bodenstreifens der Temperatur t_B
- $\dot{e}_F$ Eigenemission der Fassade mit der Temperatur t_F
- $\dot{e}_U$ Eigenemission der übrigen Umfassung bei der Temperatur t_U
- ε einheitlicher Emissionskoeffizient aller Raumumfassungen ($\varepsilon = 0{,}93$)
- $\Phi_{F,D}$ Einstrahlzahl der Fassadenfläche auf die beheizbare Deckenfläche
- $\Phi_{F,B}$ Einstrahlzahl der Fassadenfläche auf die beheizbare Bodenfläche.

Der durch Konvektion von der Luft an die Glasfassade F übertragene spezifische Wärmestrom beträgt unter Beachtung von Gl. (3)

$$\dot{q}_{K,F} = \alpha_K(t_L - t_F)\,. \qquad (12)$$

Die Wärmestrombilanz der inneren Fassadenoberfläche ergibt im stationären Fall analog Gl. (1)

$$\kappa_F(t_F - t_a) = \dot{q}_{K,F} + \dot{q}_{S,F}\,, \qquad (13)$$

woraus die innere Glasoberflächentemperatur folgt:

$$t_F = \frac{\alpha_K t_L + \kappa_F t_a + \dot{q}_{S,F}}{\alpha_K + \kappa_F}\,. \qquad (14)$$

Die Auswertung der Gln. (9) bis (14) einschließlich der analytischen Berechnung der Einstrahlzahlen wurde mit einem Rechenprogramm vorgenommen. Die Ermittlung der inneren Fassadentemperatur t_F erfolgte iterativ.

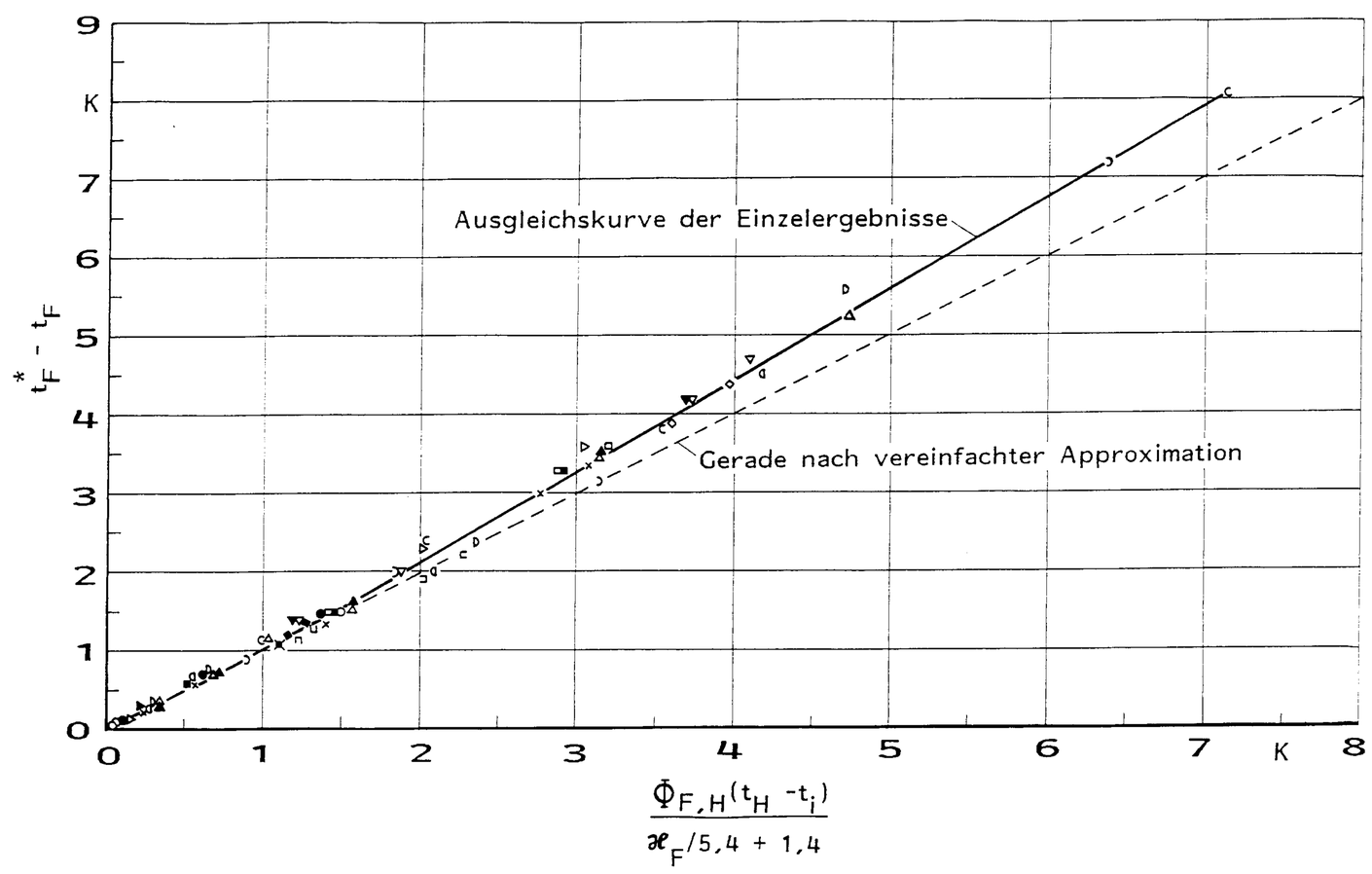

Bild 4. Berechnungsergebnisse nach der Bruttomethode mit Ausgleichskurve in Gegenüberstellung zur vereinfachten Approximation nach Gl. (8)

Symbol	H m	L m	T m	B_D m	B_B m	κ_F W/(m² K)
△	3,8	15	15	1,5	0	0,89
▲				0	1,5	
○	3,8	5	4	0,5	0	0,89
●				0	0,5	
□	3,8	5	4	1,5	0	0,89
■				0	1,5	
×				1,5	0	1,2
▽	2,4	5	4	1,5	0	0,89
▼				0	1,5	
◇				1,5	0	1,2
◆				0	1,5	
▷	2,4	5	4	0,5	0	0,89
▶				0	0,5	
⬣				0,5	0,5	
⊳	4	20	15	1	0	1
⊲						2
⊔				1	1	1
⊓						2
⊂	4	20	15	2	0	1
⊃						2
[				2	2	1
]						2

2.1 Beispiel 2

Der verbesserte Berechnungsgang ist auf die im Beispiel 1 gegebenen Werte anzuwenden. Die Fassade F wird wiederum in zwei flächengleiche Abschnitte (oben) Index „o" und unten Index „u" unterteilt. Ergänzend gelten die Oberflächen- und Lufttemperaturen:

Bezugsvariante

$t_D = 20\,°C$; $t_B = 20\,°C$; $t_U = 20\,°C$; $t_{Lo} = 19\,°C$, $t_{Lu} = 18\,°C$

beheizter Deckenstreifen

$t_D = 42\,°C$; $t_B = 20\,°C$; $t_U = 20\,°C$; $t_{Lo} = 19\,°C$, $t_{Lu} = 18\,°C$

beheizter Bodenstreifen

$t_D = 20\,°C$; $t_B = 30\,°C$; $t_U = 20\,°C$; $t_{Lo} = 19\,°C$, $t_{Lu} = 18\,°C$.

Lösung

Die Ergebnisse der Rechenprogrammauswertung liefern bei Deckenheizung DH und Bodenheizung BH folgende innere Fassadentemperaturen:

Bezugsvariante

$t_{Fo} = 16{,}16\,°C$ $\qquad$ $t_{Fu} = 15{,}89\,°C$

beheizter Deckenstreifen

$t^*_{Fo} = 20{,}06\,°C$; $\qquad$ $t^*_{Fu} = 16{,}77\,°C$

$(t^* - t)_{Fo,DH} = 3{,}9\,K$; $\qquad$ $(t^* - t)_{Fu,DH} = 0{,}9\,K$

beheizter Bodenstreifen

$t^*_{Fo} = 16{,}52\,°C$; $\qquad$ $t^*_{Fu} = 17{,}55\,°C$

$(t^* - t)_{Fo,BH} = 0{,}4\,K$; $\qquad$ $(t^* - t)_{Fu,BH} = 1{,}7\,K$.

Die Temperaturerhöhungen der Glasscheibe liegen nach dem verbesserten Berechnungsverfahren geringfügig höher (ca. 10%) als nach der vereinfachten Methode.

3. Umfassender Vergleich der Berechnungsmethoden

Da ein direkter Vergleich ausscheidet, wurden zahlreiche geometrische und wärmetechnische Variationen berechnet. Die Temperaturdifferenzen einer indirekt beheizten und einer Vergleichsfassade $(t^*_F - t_F)$ sind im *Bild 4* in Abhängigkeit des Variablenkomplexes

$$\frac{\Phi_{F,H}(t_H - t_i)}{\kappa_F/5{,}4 + 1{,}4}$$

gemäß Gl. (8) aufgetragen. Würden die vereinfachte und die verbesserte Berechnungsmethode exakt gleiche Ergebnisse haben, so müßten die berechneten Werte $(t_F^* - t_F)$ auf der gestrichelten Geraden liegen.

Es ist festzustellen, daß der gewählte Variablenkomplex als Abszisse eine gute Korrelation um die durchgezogene Kurve gewährleistet. Die Ergebnisse liegen jedoch – wie im Einzelfall (Beispiel 2) bereits festgestellt – über denen des vereinfachten Verfahrens. Da dieses etwa die untere Streubereichsgrenze repräsentiert, liegt man mit dem vereinfachten Verfahren auf der „sicheren" Seite, wobei bis zum praktischen Bereich von $(t_F^* - t_F) = 4$ K der Fehler kleiner als 10% beträgt. Das heißt, unabhängig von der Raumgeometrie und den vorhandenen Oberflächen- und Lufttemperaturen kann in einfacher Weise Gl. (8) Anwendung finden. Die Anordnung der Heizfläche wird ausreichend genau durch die Einstrahlzahl $\Phi_{F,H}$ erfaßt.

4. Vereinfachte Berechnung der Einstrahlzahl

Die analytische Ermittlung der Einstrahlzahlen oder das Auswerten von Diagrammen (*Bild 2*) beschränkt sich auf einfache geometrische Zuordnungen. Geneigte oder schiefwinklig berandete Flächen sind nur der numerischen Berechnung [1; 4] zugänglich.

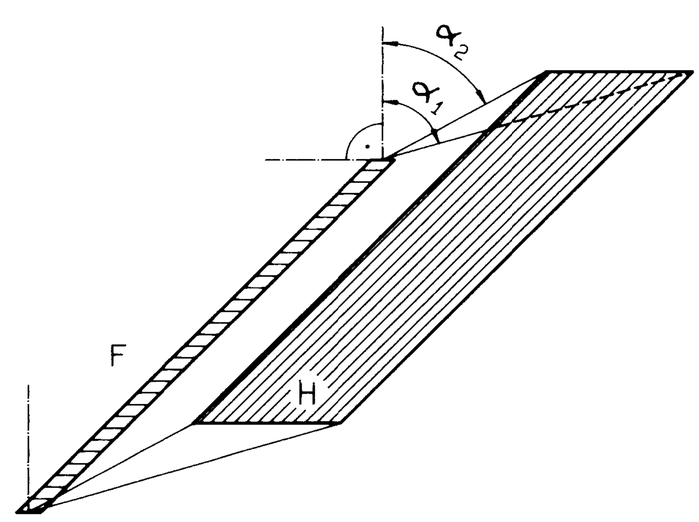

Bild 5. Geometrische Beziehungen zur Ermittlung der Einstrahlzahl eines unendlich langen Streifenelementes auf eine unendlich lange Fläche mit parallelen Längsbegrenzungen.

Eine einfache Lösung ist bei unendlich langen Streifenelementen und Flächen möglich, wenn ihre Begrenzungen aus Parallelen bestehen. Es gelten dann gemäß *Bild 5* für die Einstrahlzahl eines infinitesimal kleinen Flächenstreifens der Fassade F auf das Heizband H

$$\bar{\varphi}_{F,H} = 0{,}5(\sin\alpha_1 - \sin\alpha_2)\,. \qquad (15)$$

Einen Einblick in die Fehlerentwicklung bei endlich langen, rechtwinklig zugeordneten Flächen zeigt *Bild 6*.

Für sehr lange, beliebig geneigte, jedoch ebene Fassaden F werden nachfolgend zwei Sonderfälle des Strahlungsaustausches mit Heizstreifen behandelt.

4.1 Fußboden-Randheizung

Mit den Bezeichnungen des *Bildes 7* ergibt sich der im *Bild 8* dargestellte Datenflußplan.

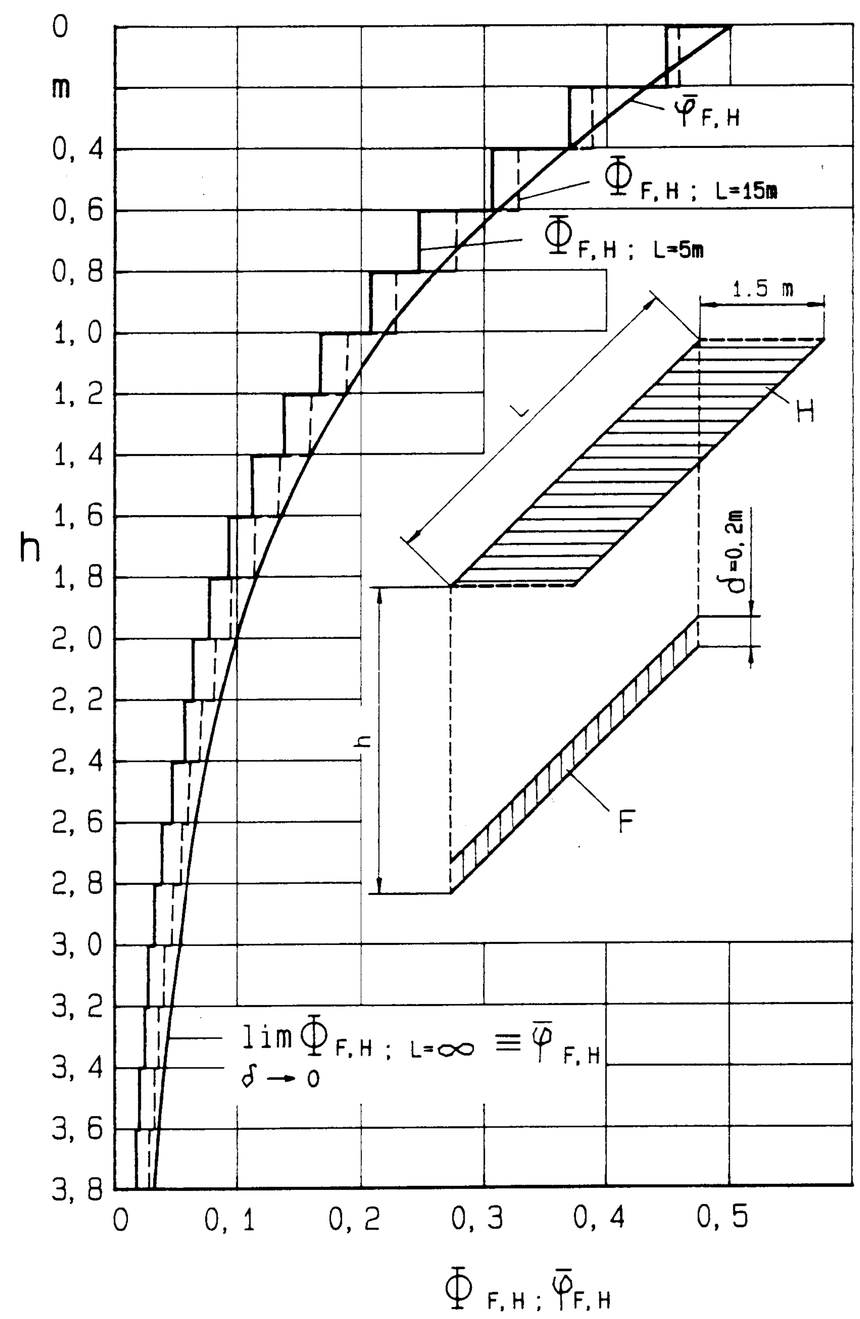

Bild 6. Einstrahlzahl $\bar{\varphi}_{F,H}$ eines unendlich langen Streifenelementes F (Breite $\delta \to 0$) auf eine unendlich lange Fläche H in Gegenüberstellung zur Einstrahlzahl $\Phi_{F,H}$ zwischen zwei endlichen Flächen F (Breite $\delta = 0{,}2$ m) und H der Längen L = 5 m bzw. 15 m.

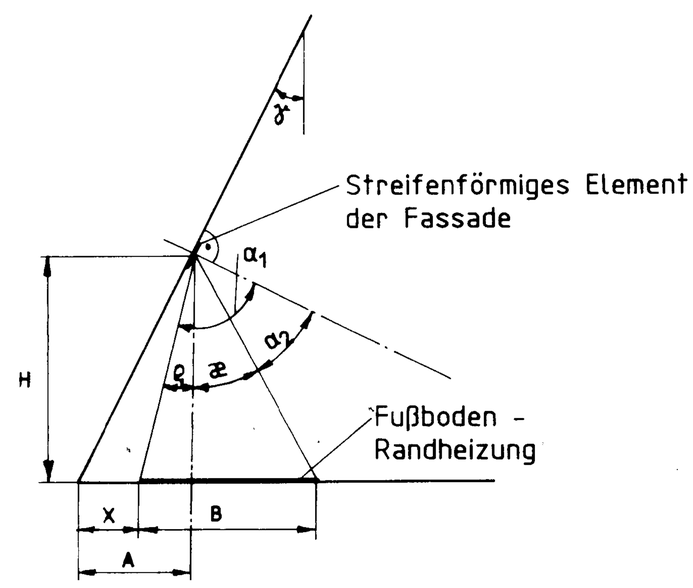

Bild 7. Geometrische Beziehungen zur Berechnung der Einstrahlzahl eines unendlich langen Streifenelementes der Fassade auf einen unendlich langen, beheizten Fußboden-Randstreifen.

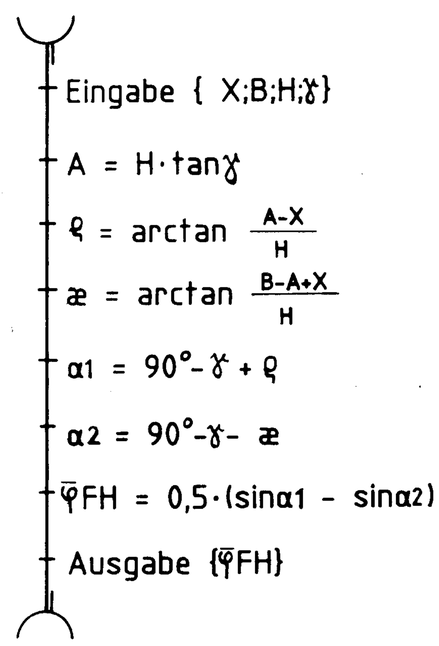

Bild 8. Berechnungsablauf zur Ermittlung der Einstrahlzahl auf Grundlage der im Bild 7 dargestellten geometrischen Verhältnisse.

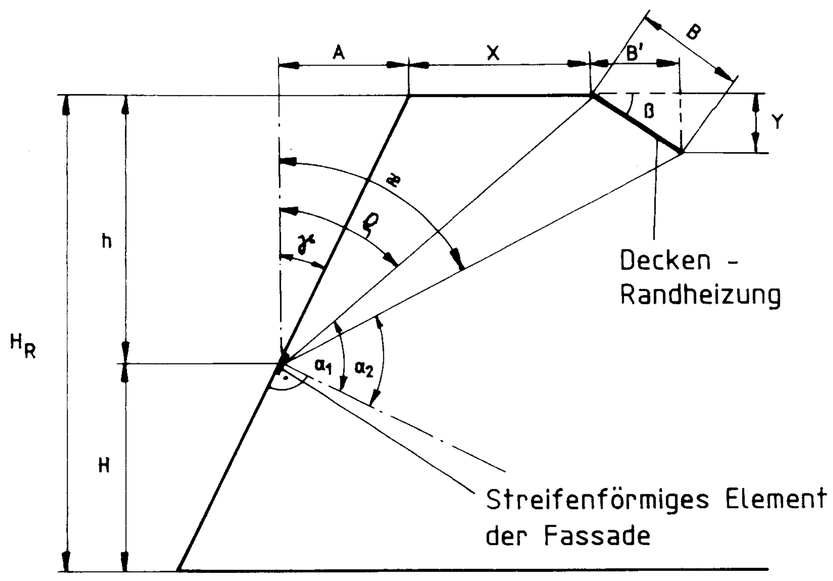

Bild 9. Geometrische Beziehungen zur Berechnung der Einstrahlzahl eines unendlich langen Streifenelementes der Fassade auf einen unendlich langen, beheizten Decken-Randstreifen.

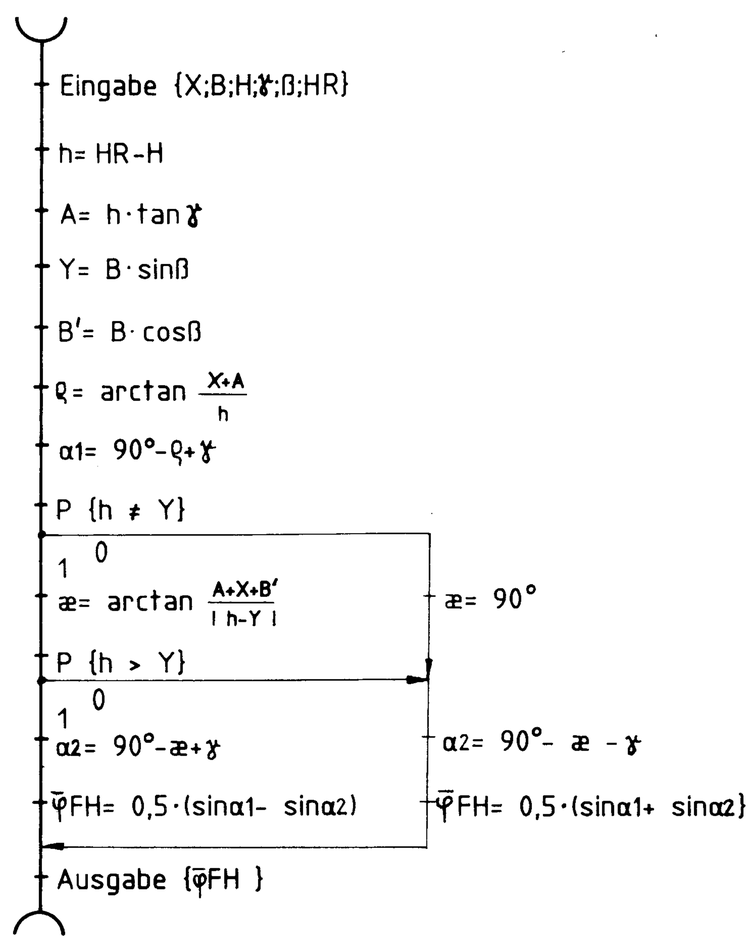

Bild 10. Berechnungsablauf zur Ermittlung der Einstrahlzahl auf Grundlage der im Bild 9 dargestellten geometrischen Verhältnisse.

Für X = 0; B = 1,5 m; H = 2 m; $\gamma = 0°$ folgen A = 0; $\varrho = 0°$; $\kappa = 36{,}9°$; $\alpha 1 = 90°$; $\alpha 2 = 53{,}1°$; $\bar{\varphi}FH = 0{,}1$. Dieser Wert stimmt für h = H mit *Bild 6* überein.

4.2 Decken-Randheizung

Aus *Bild 9* folgend kann der Datenflußplan des *Bildes 10* entwickelt werden. Für X = 0; B = 1,5 m; h = HR – H = 2 m; $\gamma = 0°$; $\beta = 0°$ ergeben sich A = 0; Y = 0; B′ = B; $\varrho = 0°$; $\alpha 1 = 90°$; $\kappa = 36{,}9°$; $\alpha 2 = 53{,}1°$; $\bar{\varphi}_{F,H} = 0{,}1$. Es besteht wiederum Übereinstimmung mit *Bild 6*.

4.3 Beispiel 3

Ein Großraumbüro großer Länge wird durch eine gegen die Vertikale um 13,5° geneigte Glasfassade (k = 0,8 W/(m² K) bei einer Raumhöhe H_R = 3,8 m begrenzt. Es ist die Temperaturerhöhung über die gesamte Fassadenhöhe abzuschätzen, wenn eine Deckenstrahlungsheizfläche (B = 1,5 m bei $\beta = 0°$ oder 20°; B = 1 m bei $\beta = 45°$) mit einer Oberflächentemperatur von t_H = 42 °C oder ein beheizter Fußbodenstreifen (B = 1 m) mit einer Oberflächentemperatur von t_H = 30 °C wirksam werden. Es sind verschiedene Anordnungen zu variieren. Für die Raumtemperatur gelte t_i = 20 °C.

Lösung

Die Temperaturerhöhung wird nach Gl. (8) berechnet, wobei gemäß Beispiel 1 κ_F = 0,89 W/(m² K) gilt und für $\Phi_{F,H}$ die Einstrahlzahl eines sehr schmalen Flächenstreifens $\bar{\varphi}_{F,H}$ nach Gl. (15) substituiert wird.

Die Berechnung der $\bar{\varphi}_{F,H}$ erfolgt in Abhängigkeit der Anordnung nach den Ablaufplänen der *Bilder 8* und *10*.

Die Ergebnisse sind im *Bild 11* aufgezeichnet.

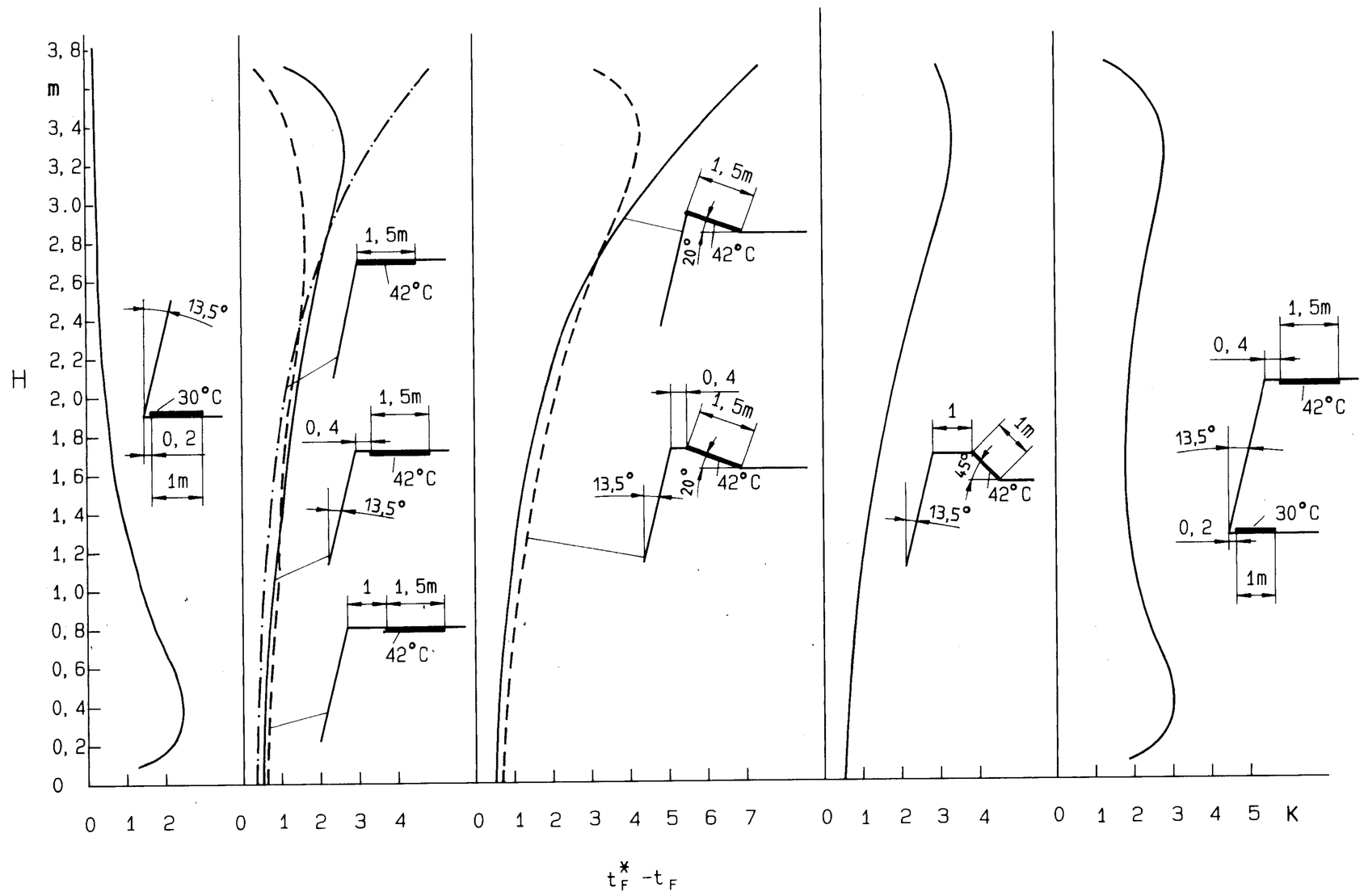

Bild 11. Berechnete Temperaturerhöhung der Glasfassade durch Strahlungseinwirkung in Abhängigkeit der Heizflächenanordnung, dargestellt über die vertikale Höhe.

5. Zusammenfassung

Die Anhebung der inneren Oberflächentemperatur von Glasfassaden durch Strahlungsheizflächen, die in den Boden, den Wänden oder der Decke integriert sind, ist mit einfachen Mitteln (Gl. (8)) berechenbar. Die Ergebnisse stimmen gut mit denen genauerer Methoden (Bruttomethode) überein. Die Ermittlung der Einstrahlzahlen kann in einfachen Fällen für Flächen mittels Diagrammen (*Bild 2*) bzw. bei sehr langen Fassadenflächen für Streifenelemente mit kleinen Rechenprogrammen (*Bilder 8* und *10*) erfolgen.

Die Ergebnisse des Beispiels 3 (*Bild 11*) zeigen die *theoretischen* Temperaturerhöhungen über dem Höhenprofil. Ein ausgeglichener Verlauf ist durch das Zusammenwirken von Decken- und Fußbodenheizstreifen erreichbar.

Die berechneten Temperaturprofile werden sich in Wirklichkeit infolge der zweidimensionalen Wärmeleitung in der Glasscheibe und wegen der Überlagerung der konvektiven Wärmeströme – vor allem bei wirkungsvollen Fußbodenrandheizungen – nicht so eindeutig ausbilden. Die vereinfacht, für unendlich lange Fassaden berechneten Einstrahlzahlen berücksichtigen keine Verschattungen durch Fassadenkonstruktionselemente. Sie reduzieren jedoch die Einstrahlung der Heizfläche auf die Glasscheibe vor allem in Heizflächennähe.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Strahlungsheizung – Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen und Karlsruhe: Verlag C. F. Müller 1981.

[2] VDI-Wärmeatlas. Düsseldorf: VDI-Verlag.

[3] *Glück, B.:* Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren (Reihe: Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: Verlag für Bauwesen 1989.

[4] *Glück, B.:* Berechnung von Einstrahlzahlen – Stand und mögliche Weiterentwicklung im Anwendungsbereich der Heizungstechnik. Gesundheits-Ingenieur 107 (1986) H. 2, S. 98–108. 117–118.