

Strahlungstemperatur der Umgebung

Bernd Glück

Die Strahlungstemperatur der Umgebung wird für eine Reihe von Berechnungen und Bewertungen benötigt. Leider übersehen die Anwender sehr oft, daß es sich hierbei um eine geometriebezogene Größe handelt. Mitunter mangelt es auch an der richtigen Einschätzung, welche Näherungen zur Berechnung opportun sind. Wichtige Normen (DIN 33403 und DIN 1946) verwenden zwar den Begriff der mittleren Strahlungstemperatur der Umgebung, geben jedoch keine Definition an oder nehmen unzulässige Umrechnungen zwischen unterschiedlichen Bezugswerten vor.

Nachfolgend werden die exakten Ableitungen zur Strahlungstemperatur der Umgebung, Näherungen mit Hinweisen auf ihre Anwendbarkeit und Beispiele vorgestellt.

Anwendungsfälle

Die Berechnung der Strahlungstemperatur der Umgebung bezogen auf eine *endliche Fläche* dient rein *wärmetechnischen Betrachtungen* und ist nur sehr selten von Bedeutung. Sie kann z.B. vorteilhaft eingesetzt werden, wenn die Wärmeströme an Heiz- oder Kühlflächen detailliert für einen genau definierten Einsatzort zu untersuchen sind.

Zur Berechnung der *Empfindungstemperatur* werden die Lufttemperatur und die Strahlungstemperatur der Umgebung benötigt. Es wird dazu die auf ein *kugelförmiges Element* bezogene Strahlungstemperatur verwendet.

Zur Betrachtung der *Strahlungstemperatur-Asymmetrie* sind die Strahlungstemperaturen der Umgebung auf unterschiedlich orientierte *Flächenelemente* zu beziehen. Die Differenz stellt dann die gesuchte Größe dar.

Die beiden letztgenannten Anwendungsfälle finden damit Eingang in Betrachtungen zur *thermischen Behaglichkeit*.

Strahlungsaustausch nach der Methode des umschlossenen Raumes

Zur genauen Ermittlung der Strahlungstemperatur der Umgebung muß Kenntnis über die Energiestromdichte durch Strahlung, die von allen raumbegrenzenden Oberflächen ausgeht, bestehen. Deshalb ist die Berechnung des Strahlungsaustausches in umschlossenen Räumen unerlässlich. Aus didaktischen Gründen wird diese Berechnung der Definition der Strahlungstemperatur der Umgebung vorangestellt.

Die Strahlungsaustauschrechnung nach der Methode des umschlossenen Raumes ist in der Literatur auch unter

dem Begriff *Bruttomethode* bekannt, allerdings wird diese Bezeichnung nicht einheitlich verwendet.

Es werden $i_{\max}$ Oberflächen, die den Raum begrenzen bzw. Oberflächen des Interieurs darstellen, in die Betrachtung einbezogen. Die Einstrahlzahlen $\Phi_{i,j}$ aller Flächen i auf j müssen bekannt sein. Grundsätzlich ist auch $\Phi_{i,i}$, d.h. die Eigenbestrahlung infolge konkaver Flächengeometrie, zu beachten.

Hilfreich ist die Zusammenfassung der Eigenemission der Oberfläche und alle reflektierten Anteile zu einer resultierenden Gesamtenergiestromdichte $\dot{f}$. Sie wird anschaulich auch Flächenhelligkeit genannt. Gemäß der Definition für den grauen Strahler gilt eine richtungsunabhängige Energiestromdichte für $\dot{f}_i$. Gut verständlich ist die Modellvorstellung, daß der resultierende Gesamtenergiestrom $\dot{F}_i$ bzw. die Flächenhelligkeit $\dot{f}_i$ unmittelbar „über“ der Fläche i „liegt“. Der resultierende Gesamtenergiestrom $\dot{F}_i$, der von der Fläche i ausgeht, beträgt

$$\dot{F}_i = \dot{f}_i A_i = \dot{E}_i + \sum_{j=1}^{i_{\max}} (1 - \varepsilon_i) \Phi_{j,i} \dot{f}_j A_j,$$

wobei $(1 - \varepsilon_i) \Phi_{j,i} \dot{f}_j A_j$ den von der Fläche j an i ausgetauschten und von i reflektierten Gesamtenergiestrom darstellt.

Beachtet man die Reziprozitätsbeziehung $\Phi_{j,i} A_j = \Phi_{i,j} A_i$, dann folgen weiter:

$$\begin{aligned} \dot{f}_i A_i &= \dot{e}_i A_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^{i_{\max}} \Phi_{i,j} \dot{f}_j A_i \\ \dot{f}_i &= \dot{e}_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^{i_{\max}} \Phi_{i,j} \dot{f}_j. \end{aligned} \quad (1)$$

Dieser Zusammenhang ist für jede Oberfläche $i = 1 \dots i_{\max}$ aufzuschreiben, so daß $i_{\max}$ Gleichungen mit den $i_{\max}$ unbekannten Flächenhelligkeiten $\dot{f}_i$ vorliegen (Gleichung (2) siehe Seite 306).

Tritt keine Eigenbestrahlung der Flächen auf, dies ist bei Ebenen der Fall, dann gilt $\Phi_{i,i} = 0$. Auf der Hauptdiagonalen stehen dann nur Elemente 1 (Gleichung siehe Seite 306).

Die unbekannten Flächenhelligkeiten $\dot{f}_i$ sind bestimmbar, wenn alle Einstrahlzahlen $\Phi_{i,j}$, alle Emissionskoeffizienten ε_i und alle Emissionsstromdichten $\dot{e}_i$ gegeben sind. Letztere folgen bei bekannten Oberflächentemperaturen $T_i = t_i + 273 \text{ K}$ aus

$$\dot{e}_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4. \quad (3)$$

Der spezifische Strahlungswärmestrom $\dot{q}_{s,i}$, der vom Körper i abgegeben wird, berechnet sich nach Bestimmung aller $\dot{f}_i$ aus der Eigenemission, vermindert um die absorbierten Anteile der zugestrahlten Energie zu

$$\begin{pmatrix} 1-(1-\epsilon_1) \Phi_{1,1} & \dots & -(1-\epsilon_1) \Phi_{1,i} & \dots & -(1-\epsilon_1) \Phi_{1,imax} \\ -(1-\epsilon_i) \Phi_{i,1} & \dots & 1-(1-\epsilon_i) \Phi_{i,i} & \dots & -(1-\epsilon_i) \Phi_{i,imax} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ -(1-\epsilon_{imax}) \Phi_{imax,1} & \dots & -(1-\epsilon_{imax}) \Phi_{imax,i} & \dots & 1-(1-\epsilon_{imax}) \Phi_{imax,imax} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{f}_1 \\ \vdots \\ \dot{f}_i \\ \vdots \\ \dot{f}_{imax} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \vdots \\ \dot{e}_i \\ \vdots \\ \dot{e}_{imax} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \dots & -(1-\epsilon_1) \Phi_{1,i} & \dots & -(1-\epsilon_1) \Phi_{1,imax} \\ -(1-\epsilon_i) \Phi_{i,1} & \dots & 1 & \dots & -(1-\epsilon_i) \Phi_{i,imax} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ -(1-\epsilon_{imax}) \Phi_{imax,1} & \dots & -(1-\epsilon_{imax}) \Phi_{imax,i} & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{f}_1 \\ \vdots \\ \dot{f}_i \\ \vdots \\ \dot{f}_{imax} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \vdots \\ \dot{e}_i \\ \vdots \\ \dot{e}_{imax} \end{pmatrix}$$

$$\dot{q}_{S,i} = \dot{e}_i - \epsilon_i \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} \dot{f}_j \quad (4)$$

Es bedeuten:

$\dot{e}$ Eigenemission nach Gl. (3)

ϵ Emissionskoeffizient

σ Strahlungskonstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$)

$\Phi_{i,j}$ Einstrahlzahl der Fläche i auf die Fläche j

$\dot{f}_j$ Flächenhelligkeit analog Gl. (1)

$$\dot{f}_j = \dot{e}_j + (1 - \epsilon_j) \sum_{k=1}^{imax} \Phi_{j,k} \dot{f}_k \quad (5)$$

Der rechentechnische Algorithmus zur Ermittlung der Einzelgrößen (Einstrahlzahlen, Emissionsstromdichte), zur Lösung des Gleichungssystems (2) und zur Endauswertung – den Strahlungswärmeströmen – ist Inhalt entsprechender Rechenprogramme [1].

Beispiel für den Strahlungsaustausch in einem Raum

Für spätere Rechnungen wird ein einfacher Raum nach Bild 1 betrachtet. Die Einstrahlzahlen sind numerisch ermittelt (Unterteilung der Dreiecksseiten $z = 20$) und anschließend aufgetretene Rechenabweichungen so kompensiert worden, daß für alle Bezugsflächen i stets $\sum \Phi_{i,j} = 1$ gilt (vgl. auch [2]). Die den Flächen zugeordneten Emissionsgrade und Temperaturen finden sich zusammen mit den Ergebnissen im Beispielausdruck (Tab. 1). Zur Kontrolle enthält die Ausgabe auch die Summenbildung

$$\text{SUM} = \sum_{i=1}^{imax} \dot{q}_{S,i} A_i$$

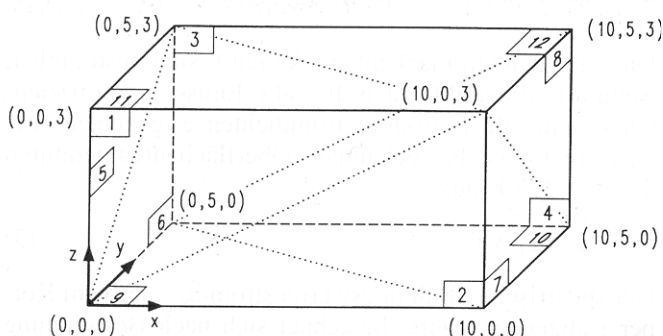


Bild 1. Geometrie eines quaderförmigen Raumes mit Kennzeichnung der dreieckförmigen Oberflächen und der Eckkoordinaten.

Eigentlich müßten alle getauschten Strahlungswärmen $\text{SUM} = 0$ ergeben. Der hier verbliebene Rest von 25,6 W ergibt einen Bilanzfehler infolge numerisch ermittelter Einstrahlzahlen von

$$\frac{25,6}{(33,63 + 29,50) 25} \cdot 100\% = 1,6\%.$$

Bezieht man die Abweichung auf den Absolutbetrag der getauschten Wärmeströme, dann beträgt der Fehler 0,8%.

Definition der Strahlungstemperatur der Umgebung

Die Strahlungstemperatur der Umgebung t_U faßt die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen t_j der mit einer Fläche i , einem Flächenelement i oder einem kugelförmigen Element i im Strahlungsaustausch stehenden Umgebung so zusammen, daß die gesamte Umgebung (Summe der Einstrahlzahlen gleich Eins) als eine einheitliche Hüllfläche der Temperatur t_U aufgefaßt werden kann. Der Strahlungswärmestrom, der von der Referenzfläche i an die reale Umgebung – bestehend aus den Einzelflächen j – bzw. an die fiktive einheitliche Umgebung U fließt, muß gleich sein.

Tabelle 1. Rechnerausdruck der Ergebnisse des Strahlungsaustausches für den im Bild 1 dargestellten Raum.

i	A_i m^2	t_i $^\circ\text{C}$	ϵ_i	$\dot{e}_i$ W/m^2	$\dot{f}_i$ W/m^2	$\dot{q}_{S,i}$ W/m^2
1	15	15	0,93	362,77	392,78	-35,93
2	15	15	0,93	362,77	392,51	-32,25
3	15	20	0,93	388,63	418,32	-5,79
4	15	20	0,93	388,63	418,05	-2,18
5	7,5	20	0,93	388,63	418,10	-2,90
6	7,5	20	0,93	388,63	418,14	-3,41
7	7,5	20	0,93	388,63	417,92	-0,55
8	7,5	20	0,93	388,63	418,32	-5,87
9	25	20	0,93	388,63	418,20	-4,25
10	25	20	0,93	388,63	418,51	-8,33
11	25	25	0,93	415,84	444,61	33,63
12	25	25	0,93	415,84	444,92	29,50

Summe aller Strahlungswärmeströme: 25,6 W

i Flächennummer; A Fläche; t Oberflächentemperatur; ϵ Emissionsgrad; $\dot{e}$ Emissionsstromdichte; $\dot{f}$ Flächenhelligkeit; $\dot{q}_s$ Wärmestromdichte durch Strahlungsabgabe

Da eine endlich große Fläche i am Strahlungsaustausch aktiv beteiligt ist, ein infinitesimal kleines Element i auf die Strahlungsbilanz des Raumes jedoch keinen Einfluß nimmt, ergeben sich unterschiedliche Berechnungsansätze für die Strahlungstemperatur der Umgebung.

Strahlungstemperatur der Umgebung nach genauer Berechnungsmethode

Gemäß der Definition ist die Strahlungstemperatur der Umgebung stets auf eine *Referenzfläche* i oder auf ein *flächen- oder kugelförmiges Referenzelement* i zu beziehen.

Strahlungstemperatur der Umgebung bezogen auf eine endlich große Fläche

Hierbei handelt es sich um den allgemeinsten Fall, wobei die *Fläche* i selbst ein Teil der Raumumschließungen oder der Interieuroberflächen $j = 1 \dots imax$ darstellt. Die Summe aller raumumschließenden Flächen j (einschließlich der Interieuroberflächen) abzüglich der Referenzfläche i bildet die Umgebungsfläche A_U . Damit gilt für die Einstrahlzahlen, wenn eine Eigenbestrahlung der Fläche i ausgeschlossen wird:

$$\Phi_{i,U} = 1; \Phi_{U,i} = \Phi_{i,U} \frac{A_i}{A_U} = \frac{A_i}{A_U}$$

$$\Phi_{i,i} = 0; \Phi_{U,U} = 1 - \frac{A_i}{A_U}$$

Die Flächenhelligkeiten $\dot{f}_i$ und $\dot{f}_U$ folgen aus dem zu Gl. (2) analogen System:

$$\begin{pmatrix} 1-(1-\epsilon_i) \Phi_{i,i} & -(1-\epsilon_i) \Phi_{i,U} \\ -(1-\epsilon_U) \Phi_{U,i} & 1-(1-\epsilon_U) \Phi_{U,U} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{f}_i \\ \dot{f}_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_i \\ \dot{\epsilon}_U \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\dot{f}_i = \frac{\dot{\epsilon}_i [1 - (1-\epsilon_U) (1-A_i/A_U)] + \dot{\epsilon}_U (1-\epsilon_i)}{1 - (1-\epsilon_U) (1-A_i/A_U) - (1-\epsilon_i) (1-\epsilon_U) A_i/A_U}$$

$$\dot{f}_U = \frac{\dot{\epsilon}_U + \dot{\epsilon}_i (1-\epsilon_U) A_i/A_U}{1 - (1-\epsilon_U) (1-A_i/A_U) - (1-\epsilon_i) (1-\epsilon_U) A_i/A_U} \quad (7)$$

Für den spezifischen Strahlungswärmestrom einer Oberfläche i an eine homogene Umgebung (aus der Sicht von i) gilt dann gemäß Gl. (4)

$$\dot{q}_{S,i} = \dot{\epsilon}_i - \epsilon_i \dot{f}_U = \frac{\sigma (T_i^4 - T_U^4)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{A_i}{A_U} \left(\frac{1}{\epsilon_U} - 1 \right)} \quad (8)$$

Die zuletzt angeschriebene Form ist in der Wärmeübertragung für den allseits umschlossenen Körper gebräuchlich.

Das Gleichsetzen der Gl. (4) und Gl. (8) liefert

$$T_U^4 = \frac{\epsilon_U + (1-\epsilon_U) \epsilon_i A_i/A_U}{\sigma \epsilon_U} \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} \dot{f}_j - \frac{(1-\epsilon_U) A_i/A_U}{\sigma \epsilon_U} \dot{\epsilon}_i \quad (9)$$

Nach *Vorgabe eines mittleren Emissionskoeffizienten für die Umgebung* ϵ_U (er gilt für die gesamte Umgebungs-

fläche A_U , d. h. alle Flächen $j = 1 \dots imax$ außer $j = i$) kann $t_U = T_U - 273$ K bestimmt werden. Der Wärmestrom $\dot{q}_{S,i}$ nach Gl. (4) wird dann richtig wiedergegeben.

Es sei nochmals hervorgehoben, daß die Strahlungstemperatur der Umgebung bei einer endlich großen Referenzfläche i von der Festlegung der Emissionsqualität der Umgebung abhängig ist.

Strahlungstemperatur der Umgebung bezogen auf ein flächen- oder kugelförmiges Element

Bei *flächen- oder kugelförmigen Elementen* i sind die Referenzflächen infinitesimal klein. Gegenüber der bisherigen Ableitung handelt es sich um den Sonderfall $A_i \ll A_U$. Diesen Sachverhalt auf Gl. (9) angewandt, ergibt

$$T_U^4 = \frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} \dot{f}_j,$$

woraus die *mittleren Strahlungstemperaturen* bezogen auf ein

Flächenelement i

$$t_{U,i} = \left(\frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} \dot{f}_j \right)^{0,25} - 273 \text{ K} \quad (10)$$

kugelförmiges Element i

$$t_{U,i} = \left(\frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j}^0 \dot{f}_j \right)^{0,25} - 273 \text{ K} \quad (11)$$

folgen.

Die vorgenannten Einstrahlzahlen entsprechen denen flächen- bzw. kugelförmiger Elemente i auf die Fläche j . Sind alle Flächenhelligkeiten $\dot{f}_j$ bekannt, so können die Strahlungstemperaturen $t_{U,i}$ genau ermittelt werden.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß infolge der „großen“ Umgebungsfläche deren Emissionsvermögen bedeutungslos ist und deshalb keiner Festlegung mehr bedarf.

Hätte man sich bei der Ableitung gleich auf Flächen- oder Kugelelemente i beschränkt, wäre man schneller ans Ziel gelangt. Wegen der Kleinheit der Elemente beeinflusst deren Energiestrom die Strahlungsbilanz des Raumes nicht. Damit nimmt die Flächenhelligkeit $\dot{f}_i$ praktisch keinen Einfluß auf die $\dot{f}_j$ -Werte der Raumumfassungen, und i kann selbstverständlich aus dem zu lösenden Gleichungssystem (2) entfallen. Für den spezifischen Strahlungswärmestrom einer Oberfläche i an die homogene Umgebung gilt somit

$$\dot{q}_{S,i} = \dot{\epsilon}_i - \epsilon_i \dot{f}_U.$$

Das Gleichsetzen mit Gl. (4) – beispielsweise bezogen auf ein kugelförmiges Element – liefert

$$\dot{f}_U = \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j}^0 \dot{f}_j \quad (12)$$

Analog zu Gl. (5) kann man für die homogene Umgebung schreiben:

$$\dot{f}_U = \dot{e}_U + (1 - \epsilon_U) \dot{f}_U$$

$$\dot{f}_U = \frac{\dot{e}_U}{\epsilon_U} = \sigma T_U^4$$

Daraus folgt nach Substituieren in Gl. (12) für die Umgebungstemperatur t_U bezogen auf ein kugelförmiges Element i

$$t_{U,i} = \left(\frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j}^0 \dot{f}_j \right)^{0,25} - 273 \text{ K.}$$

Beispiele für die Strahlungstemperatur der Umgebung

Beispiel 1

Die für den im *Bild 1* dargestellten Raum vorgenommene Berechnung des Strahlungsaustausches lieferte das in *Tab. 1* vermerkte Ergebnis. Die Fläche $i = 1$ gibt demnach $\dot{q}_{S,1} = -35,93 \text{ W/m}^2$ ab.

Die Berechnung der Umgebungstemperatur für die Fläche $i = 1$ bedarf der Kenntnis der Einstrahlzahlen $\Phi_{i,j}$ und eines geschätzten mittleren Emissionskoeffizienten der Umgebung ϵ_U . Die Einstrahlzahlen folgen aus einer numerischen Berechnung (Unterteilung der Dreiecksseiten jeweils in $z = 20$ Abschnitte; vgl. auch [2]) zu:

j	1	2	3	4	5	6
$\Phi_{1,j}$	0	0	0,10824	0,07327	0,10110	0,03812

j	7	8	9	10	11	12
$\Phi_{1,j}$	0,01511	0,02050	0,17876	0,06773	0,35341	0,04376

Für den mittleren Emissionskoeffizienten der Umgebung werden drei verschiedene Werte zugrunde gelegt. Die Ergebnisse nach Auswertung der Gl. (9) lauten:

ϵ_U	t_U °C
0,93	21,92
1	21,88
0,1	26,54

Die Auswertung der Gl. (8) liefert für alle drei Wertekombinationen das erwartete Ergebnis

$$\dot{q}_{S,1} = -35,93 \text{ W/m}^2.$$

Der Ablauf des Beispiels verdeutlichte, daß bei ohnehin exakt durchgeführten wärmetechnischen Berechnungen, z. B. mit einem kompletten Raummodell, dieser Umweg normalerweise nicht interessant ist. Bedeutungsvoll kann dieser Rechengang jedoch bei der Simulation wärmetechnischer Leistungen von flächenförmigen Heiz- oder Kühlelementen unter vorgegebenen Einbaubedingungen sein. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise Komponentenkonstruktionen optimiert werden sollen.

Beispiel 2

In dem im *Bild 1* dargestellten Raum befindet sich am Koordinatenpunkt ($x = 6 \text{ m}$; $y = 2 \text{ m}$; $z = 1,3 \text{ m}$)

ein Kugelement i. Die Einstrahlzahlen gemäß einer numerischen Berechnung (Unterteilung der Dreiecksseiten jeweils in $z = 20$ Abschnitte; vgl. auch [3]) betragen:

j	1	2	3	4	5	6
$\Phi_{i,j}^0$	0,07014	0,11546	0,05053	0,07278	0,01505	0,01442

j	7	8	9	10	11	12
$\Phi_{i,j}^0$	0,03150	0,02723	0,15335	0,16940	0,13159	0,14856

Mit den Flächenhelligkeiten nach Tabelle 1 liefert Gl. (11)

$$t_U = 20,53 \text{ °C.}$$

Strahlungstemperatur der Umgebung nach einer näherungsweisen Berechnungsmethode

Häufig sind die Flächenhelligkeiten $\dot{f}_j$ der Oberflächen j nicht bekannt, jedoch die Oberflächentemperaturen verfügbar. Ohne eine komplette Strahlungsaustauschberechnung vornehmen zu müssen, ist es deshalb sinnvoll, eine Näherungsmethode zu entwickeln, die auf den bekannten Temperaturen t_j basiert. Ausgehend von Gl. (9) folgt für Flächen mit sehr hohen Emissionskoeffizienten ($\epsilon_i \approx \epsilon_U \approx 1$), d. h. für nahezu schwarze Strahler ($\dot{f}_j \approx \dot{e}_j = \sigma T_j^4$)

$$T_U^4 \approx \frac{1}{\sigma} \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} \dot{f}_j = \sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} T_j^4. \quad (13)$$

Es ergeben sich daraus die bekannten Berechnungsgleichungen für die Umgebungstemperaturen t_U bezogen auf eine

Fläche i

$$t_{U,i} = \left[\sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} (t_j + 273)^4 \right]^{0,25} - 273 \text{ K} \quad (14)$$

Flächenelement i

$$t_{U,i} = \left[\sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j} (t_j + 273)^4 \right]^{0,25} - 273 \text{ K} \quad (15)$$

kugelförmiges Element i

$$t_{U,i} = \left[\sum_{j=1}^{imax} \Phi_{i,j}^0 (t_j + 273)^4 \right]^{0,25} - 273 \text{ K.} \quad (16)$$

Diese Gleichungen liefern genaue Ergebnisse für schwarze Oberflächen, stellen aber gleichzeitig auch gute Näherungen für *graustrahlende Flächen* dar, deren Emissionskoeffizienten annähernd gleich groß ($\epsilon_U \approx \epsilon_j$), deren Bezugsflächen A_i klein und deren Temperaturunter-

schiede relativ gering sind. Dies ist bei vielen praktischen Anwendungen (z. B. bei wärmephysiologischen Überprüfungen für Aufenthaltsräume) gegeben.

Beispiel für die Strahlungstemperatur der Umgebung näherungsweise Berechnung

Das *Beispiel 2* wird erneut aufgegriffen, jedoch an Stelle der Flächenhelligkeiten $\dot{f}_j$ finden die Oberflächentemperaturen t_j Verwendung. Sie sind aus *Tab. 1* entnehmbar. Desweiteren werden einige erweiterte Betrachtungen angeschlossen.

Beispiel 3

Die Auswertung der Gl. (16) liefert

$t_U = 20,53\text{ }^\circ\text{C}.$

Die Näherungsrechnung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der genauen Ermittlung (*Beispiel 2*). Dies ist dadurch gegeben, da die Emissionsgrade der Umfassungen gleich groß und nahe Eins sind.

Würde man in *zweiter Näherung* die Strahlungstemperatur der Umgebung lediglich aus den Celsiustemperaturen mit den Flächen gewichtet bilden, also $t_U = \Sigma A_i t_i / \Sigma A_i$ schreiben, erhielte man standortunabhängig für den Raum $t_U = 20,53\text{ }^\circ\text{C}$. Diese Übereinstimmung ist zufällig.

Würde man annehmen, daß die Flächen $j = 1$ und $j = 2$ des Raumes mit infrarotreflektierender Tapete ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,3$) beschichtet sind, dann gelten gegenüber *Tab. 1* abweichende Flächenhelligkeiten $\dot{f}_j$. Sie sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

j	1	2	3	4	5	6
$\dot{f}_j$ in W/m ²	417,41	414,60	418,64	418,35	418,54	418,37

j	7	8	9	10	11	12
$\dot{f}_j$ in W/m ²	418,32	418,54	418,68	418,71	445,11	445,12

Die Rechnung nach Gl. (11) liefert:

$t_U = 21,32\text{ }^\circ\text{C}.$

Das Ergebnis der Näherungsberechnung bleibt dagegen erhalten, da diese von den Oberflächentemperaturen ausgeht. Die Abweichung beträgt somit in diesem Fall 0,8 K.

Meßtechnische Bestimmung der Strahlungstemperatur der Umgebung

Die meßtechnische Bestimmung der Strahlungstemperatur der Umgebung ist nach den Vorschlägen in ISO 7726 möglich. Die Auswertung einer Kombimessung aus Globetemperatur und Lufttemperatur – im Falle der erzwungenen Konvektion unter Einbeziehen der Luftgeschwindigkeit – liefert die Strahlungstemperatur der Umgebung *bezogen auf ein kugelförmiges Element*. Zu praktisch gleichen Ergebnissen gelangt man, wenn die in [4] gegebenen Algorithmen – die auf exakten wärmetechnischen Ableitungen basieren – benutzt werden.

Zusammenfassung

Zur raumklimatischen Überprüfung der globalen, thermischen Behaglichkeit bezüglich der sensiblen Wärmeabgabe des Menschen wird die auf ein *kugelförmiges Element* bezogene Strahlungstemperatur der Umgebung in Kombination mit der Lufttemperatur verwendet.

Zur Überprüfung des partikulären Behaglichkeitskriteriums Strahlungsasymmetrie sind die Strahlungstemperaturen auf unterschiedlich orientierte *Flächenelemente* zu beziehen.

Die Berechnung der Strahlungstemperatur auf eine *endliche Fläche* dient rein wärmetechnischen Betrachtungen und ist nur selten bedeutungsvoll.

Sowohl die exakten als auch die näherungsweisen Berechnungsmethoden sind für die genannten Anwendungen *unterschiedlich*.

Über die Qualität von Näherungen sind keine allgemeingültigen Aussagen möglich, da der Strahlungsaustausch stets auf die Geometrie des Raumes bezogen ist. Gleiche Fehler würden somit nur bei völlig ähnlicher Geometrie (gleiche Maßstabsfaktoren für alle Abmessungen), gleichen Oberflächentemperaturen und gleichen Strahlungseigenschaften (Emissionskoeffizienten) auftreten.

Literatur

[1] Glück, B.: Wärmetechnisches Raummodell, Gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen. Karlsruhe: C. F. Müller, 1997.
[2] Glück, B.: Berechnung der Einstrahlzahlen in einem neuartigen Raummodell. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997) Nr. 1, S. 13–20.
[3] Glück, B.: Berechnung der Elementeinstrahlzahlen in einem neuartigen Raummodell. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997) Nr. 2, S. 83–88.
[4] Glück, B.: Empfindungstemperatur und ihre Meßbarkeit. Gesundheits-Ingenieur 114 (1993) Nr. 3, S. 134–142.