Ein Vorschlag zur Berücksichtigung der Empfindungstemperatur in Räumen des Wohnungs- und Gesellschaftsbaus

Dr.-Ing. B. GLUCK, VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut –

Bei den in Wohn- und Gesellschaftsbauten üblichen Raumgeometrien und Oberflächentemperaturen ist eine vereinfachte Ermittlung der Empfindungstemperatur praktikabel. Die Ergebnisse könnten beispielsweise bei Grundsatzuntersuchungen zur Wärmebedarfsberechnung oder eventuell direkt bei der Wärmebedarfsberechnung anstelle des Zuschlages für kalte Außenwände Berücksichtigung finden.

Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Empfindungstemperatur

Nach den Angaben von *Macskásy* [1] gilt für die analytische Ermittlung der Empfindungstemperatur

$$t_e = 0{,}46 \cdot t_L + 0{,}54 \cdot t_{Str}, \qquad (1)$$

wobei t_l die Lufttemperatur und t_{Str} die Strahlungstemperatur darstellen.

Die Strahlungstemperatur ist ausgehend von den Oberflächentemperaturen T_W und den entsprechenden Einstrahlzahlen φ_{MW} nach Gl. (2)

$$t_{Str} = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^{n} (\varphi_{MW} \cdot T_W{}^4)_i} - 273 \qquad (2)$$

zu errechnen. Die Einstrahlzahlen auf den Menschen zu beziehen, würde großen rechnerischen Aufwand bereiten und stark vom Standort abhängig sein. Deshalb wird ein Vorschlag von *Kraft* [2] aufgegriffen, und die Einstrahlzahlen werden auf einen in Raummitte 1,50 m über dem Fußboden gelegenen „Strahlungspunkt" bezogen. Dieser Ort ist identisch mit dem für die Lufttemperaturmessung. Die Einstrahlzahl errechnet sich nach *Kollmar* [3] zu

$$\varphi = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \cdot \arctan \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{h}\right)^2 + \left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}}{\left(\frac{a}{h}\right) \cdot \left(\frac{b}{h}\right)}, \qquad (3)$$

wenn der Punkt mit dem Abstand h senkrecht über dem Eckpunkt einer Rechteckfläche mit den Seiten a und b liegt.

Handelt es sich um eine Strahlungsheizung, so wird der Projektant die Überprüfung der Empfindungstemperatur in der Regel vornehmen, da ihm die Ermittlungen der Einstrahlzahlen geläufig sind. Projektanten, die bisher nur Projekte für den Wohnungs- und Gesellschaftsbau mit konventionellen Heizungssystemen anfertigten, wird dagegen der rechnerische Aufwand zur mehrfachen Lösung der Gl. (3) von detaillierteren Überlegungen zur Empfindungstemperatur abhalten. Aus diesem Grunde wurde untersucht, welche Abweichungen entstehen, wenn Gl. (2) total linearisiert wird, so daß sich die Strahlungstemperatur als arithmetisches Mittel der Wandtemperaturen, gewogen mit den Flächenverhältnissen, darstellt.

Es gilt

$$t_{\mathrm{Str}} = \sum_{i=1}^{n} (v \cdot t_{\mathrm{W}})_{\mathrm{i}} \tag{4}$$

mit dem Flächenverhältnis

$$v_{\mathrm{i}} = \frac{A_{\mathrm{i}}}{\sum_{i=1}^{n} A_{\mathrm{i}}} = \frac{A_{\mathrm{i}}}{A_{\mathrm{ges}}}. \tag{5}$$

Um die Abweichung zwischen dem Näherungswert (Gl. (4)) und dem exakten Wert (Gl. (2)) an praktischen Werten zu ermitteln, werden zwei Wandtypen (Außenwand AW und Innenwand IW) mit jeweils konstanten Oberflächentemperaturen betrachtet.

Die Abweichung beträgt

$$\Delta t_{\mathrm{Str}} = v_{\mathrm{AW}} \cdot t_{\mathrm{AW}} + v_{\mathrm{IW}} \cdot t_{\mathrm{IW}} - \sqrt[4]{\varphi_{\mathrm{AW}} \cdot T_{\mathrm{AW}}^4 + \varphi_{\mathrm{IW}} \cdot T_{\mathrm{IW}}^4} + 273. \tag{6}$$

Nach Definition muß

$$v_{\mathrm{AW}} + v_{\mathrm{IW}} = 1; \qquad \varphi_{\mathrm{AW}} + \varphi_{\mathrm{IW}} = 1$$

gelten, so daß die Substitution

$$v_{\mathrm{IW}} = 1 - v_{\mathrm{AW}}; \qquad \varphi_{\mathrm{IW}} = 1 - \varphi_{\mathrm{AW}} \tag{7}$$

vorgenommen werden kann. Desweiteren wird

$$v_{\mathrm{AW}} = \varphi_{\mathrm{AW}} + \Delta\varphi_{\mathrm{AW}} \tag{8}$$

gesetzt, wobei $\Delta\varphi_{\mathrm{AW}}$ den absoluten Fehler des Flächenverhältnisses gegenüber dem exakten Winkelverhältnis darstellt.

Die in Wohn- und Büroräumen vorkommenden Seitenverhältnisse nach Bild 1 führen zur maximalen Abweichung von

$$\Delta\varphi_{\mathrm{AW,\ max}} = 0{,}05. \tag{9}$$

Die Substitution von Gl. (7) und (8) in Gl. (6) liefert

$$\Delta t_{\mathrm{Str}} = (\varphi_{\mathrm{AW}} + \Delta\varphi_{\mathrm{AW}}) \cdot t_{\mathrm{AW}} + (1 - \varphi_{\mathrm{AW}} - \Delta\varphi_{\mathrm{AW}}) \cdot t_{\mathrm{IW}} - \sqrt[4]{\varphi_{\mathrm{AW}} \cdot T_{\mathrm{AW}}^4 + (1 - \varphi_{\mathrm{AW}}) \cdot T_{\mathrm{IW}}^4} + 273. \tag{10}$$

Es ist interessant zu wissen, bei welchen φ_{AW} der größte absolute Fehler $|\Delta t_{\mathrm{Str,max}}|$ durch Benutzen der Näherungsgleichung (4) auftritt. Deshalb wird die Ableitung der Gl. (10) gleich Null gesetzt,

$$\frac{d\,(\Delta t_{\mathrm{Str}})}{d\,\varphi_{\mathrm{AW}}} = t_{\mathrm{AW}} - t_{\mathrm{IW}} - \frac{1}{4}\,[\varphi_{\mathrm{AW}} \cdot T_{\mathrm{AW}}^4 + (1 - \varphi_{\mathrm{AW}}) \cdot T_{\mathrm{IW}}^4]^{-3/4} \cdot (T_{\mathrm{AW}}^4 - T_{\mathrm{IW}}^4) = 0 \tag{11}$$

und nach φ_{AW} aufgelöst

$$\varphi_{\mathrm{AW}} = -\frac{[T_{\mathrm{IW}}^4 - T_{\mathrm{AW}}^4]^{1/3}}{[4 \cdot (t_{\mathrm{IW}} - t_{\mathrm{AW}})]^{4/3}} + \frac{T_{\mathrm{IW}}^4}{T_{\mathrm{IW}}^4 - T_{\mathrm{AW}}^4}. \tag{12}$$

Nach TGL 10 686, Bl. 3, darf bei Bauten mit geringerer hygienischer Bedeutung — z. B. Bürobauten — die Differenz zwischen Lufttemperatur und Oberflächentemperatur der Außenwand maximal $t_{\mathrm{L}} - t_{\mathrm{AW}} = 7$ K betragen. An den Oberflächen der Fenster wird natürlich eine niedrigere Temperatur vorliegen, so daß als Mittelwert für die weitere Rechnung $t_{\mathrm{L}} - t_{\mathrm{AW}} = 10$ K angenommen wird. Mit guter Näherung kann die Oberflächentemperatur der Innenwände gleich der Lufttemperatur gesetzt werden. Es gilt

$$t_{\mathrm{L}} = t_{\mathrm{IW}} = 20 \cdots 30\ ^{\circ}\mathrm{C} \tag{13}$$

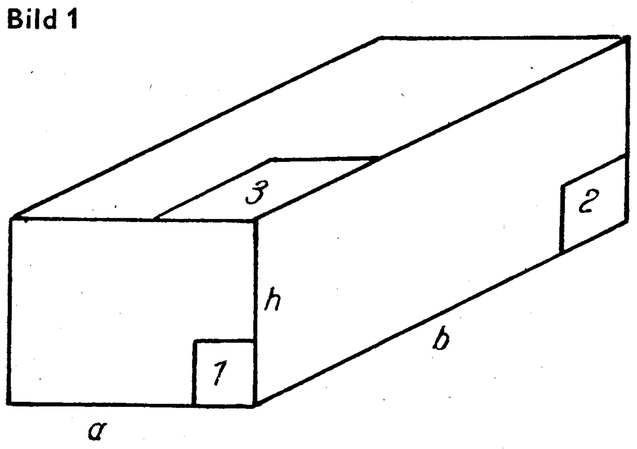
und entsprechend

$$t_{\mathrm{AW}} = 10 \cdots 20\ ^{\circ}\mathrm{C}. \tag{14}$$

Für diese Temperaturen ergibt Gl. (12)

$$\varphi_{\mathrm{AW}} = 0{,}5. \tag{15}$$

Bild 1



Erklärung
AW 1 – Wand 1 ist Außenbegrenzung
AW 1, AW 3 – Wand 1 und Decke 3 sind Außenbegrenzungen

	a in m	b in m	h in m	$\frac{a}{a}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{h}{a}$	φ_1	φ_2	φ_3	v_1	v_2	v_3	$\lvert\Delta\varphi_{\max}\rvert$
Variante I	4	6	3	1	1,5	0,75	0,080	0,168	0,252	0,111	0,167	0,222	
AW 1													0,031
AW 2													0,001
AW 3													0,030
AW 1, AW 2													0,030
AW 1, AW 3													0,001
AW 2, AW 3													0,031
AW 1, AW 2, AW 3													0
Variante II	2	6	3	1	3	1,5	0,044	0,288	0,168	0,083	0,250	0,167	
AW 1													0,039
AW 2													0,038
AW 3													0,001
AW 1, AW 2													0,001
AW 1, AW 3													0,038
AW 2, AW 3													0,039
AW 1, AW 2, AW 3													0
Variante III	4	3	3	1	0,75	0,75	0,190	0,120	0,190	0,182	0,136	0,182	
AW 1													0,008
AW 2													0,016
AW 3													0,008
AW 1, AW 2													0,008
AW 1, AW 3													0,016
AW 2, AW 3													0,008
AW 1, AW 2, AW 3													0

Setzt man die praktischen Werte der Gl. (9), (13), (14) und (15) in Gl. (10) ein, so erhält man

$$|\Delta t_{\mathrm{Str,max}}| \approx 0{,}65\ \mathrm{K}. \tag{16}$$

Dieser maximale Fehler liegt im Genauigkeitsbereich der grundlegenden Annahmen, d. h. die linearisierte Näherung nach (Gl. 4) erfüllt die praktischen Anforderungen vollkommen.

Die Empfindungstemperatur kann somit

$$t_{\mathrm{e}} = 0{,}46 \cdot t_{\mathrm{L}} + 0{,}54 \cdot \sum_{i=1}^{n} (v \cdot t_{\mathrm{W}})_{\mathrm{i}} \tag{17}$$

geschrieben werden.

bzw. endgültig

$$t_{\mathrm{L}} = t_{\mathrm{e}} + 0{,}54 \cdot \frac{\dot{Q}_{\mathrm{o}}}{\alpha \cdot A_{\mathrm{ges}}} \tag{20}$$

folgt. Wird die Wärmeübergangszahl $\alpha = 6{,}7\ \mathrm{kcal/m^2 \cdot h \cdot K}$ gesetzt, so erhält man die Zahlenwertgleichung

$$t_{\mathrm{L}} = t_{\mathrm{e}} + 0{,}08\ \frac{\dot{Q}_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{ges}}} \tag{21}$$

mit $\dot{Q}_{\mathrm{o}}$ in kcal/h und A_{ges} in m². Diese Gleichung ist in Bild 2 ausgewertet. Die dem Heizungsprojektant angegebene

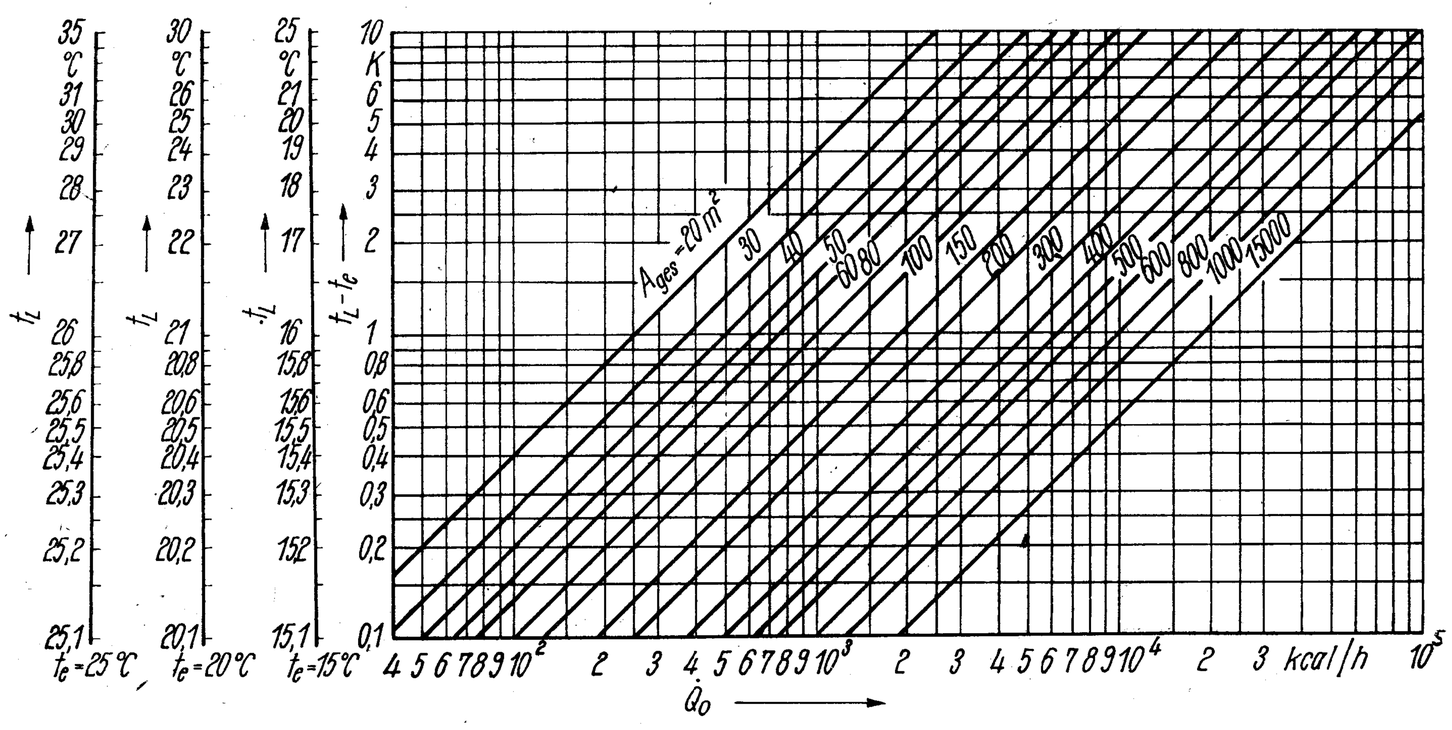


Bild 2

Die mögliche Anwendung des Verfahrens bei der Wärmebedarfsberechnung

Der Zuschlag für kalte Außenwände ist dazu angetan, daß durch eine höhere Lufttemperatur die niedrige Strahlungstemperatur, verursacht durch die Außenwandfläche, kompensiert wird. Diese wärmephysiologische Maßnahme sollte direkt in der Annahme einer höheren Lufttemperatur ihren Niederschlag finden, d. h. den physikalischen Sachverhalt unmittelbar wiedergeben. Dies hätte folgende Vorteile:

1. Die Berechnung könnte ohne Zuschlag z_{A} erfolgen,
2. der Lüftungswärmebedarf würde auch entsprechend den wirklichen Temperaturverhältnissen ermittelt,
3. die Bemessung der Heizflächen könnte nach der wirklich vorhandenen Heizflächenübertemperatur erfolgen,
4. die örtliche Einregulierung der Heizflächen könnte nach genau vorgegebenen Solltemperaturen vorgenommen werden.

Die erforderliche Lufttemperatur kann ausgehend vom zuschlagfreien Wärmebedarf $\dot{Q}_{\mathrm{o}}$, der für $t_{\mathrm{L}} = t_{\mathrm{e}}$ errechnet wurde, abgeleitet werden. Nimmt man konstante Wärmeübergangszahlen an den Wandoberflächen an, so ergibt sich die Luftübertemperatur über der Außenwandtemperatur zu

$$\vartheta_{\mathrm{L}} = t_{\mathrm{L}} - t_{\mathrm{WA}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{o}}}{\alpha \cdot A_{\mathrm{AW}}}, \tag{18}$$

womit

$$t_{\mathrm{L}} = 2{,}17 \cdot t_{\mathrm{e}} - 1{,}17 \cdot [v_{\mathrm{AW}} \cdot (t_{\mathrm{L}} - \vartheta_{\mathrm{L}}) + v_{\mathrm{IW}} \cdot t_{\mathrm{L}}] \tag{19}$$

Raumtemperatur würde dann als Empfindungstemperatur verstanden, und bei der Wärmebedarfsberechnung würde statt des bisherigen Ermittelns eines D-Wertes und des Zuschlages z_{A} die Ermittlung der realen Lufttemperatur stehen. Der endgültige Transmissionswärmebedarf könnte dann beispielsweise nach Gl. (22)

$$\dot{Q}_{\mathrm{T}} = \dot{Q}_{\mathrm{o}} \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{L}} - t_{\mathrm{a}}}{t_{\mathrm{e}} - t_{\mathrm{a}}} + z_{\mathrm{H}} \right) \tag{22}$$

einschließlich des Zuschlages für die Himmelsrichtung z_{H} berechnet werden. Der Zuschlag für Heizunterbrechung wurde hierbei fortgelassen, was in letzter Zeit von einigen Autoren begründet gefordert wurde [4], [5].

Abschließend sei noch darauf verwiesen, daß die ermittelte Lufttemperatur im Raum selbstverständlich nur für den Auslegungsfall, d. h. bei minimaler Außentemperatur, vorliegen muß. Sie nimmt linear mit steigender Außentemperatur t_{a} ab, so daß bei $t_{\mathrm{e}} = t_{\mathrm{a}}$ auch $t_{\mathrm{L}} = t_{\mathrm{e}}$ gilt.

Literatur

[1] *Macskásy:* Vorlesungen an der TU Dresden

[2] *Kraft:* Vorlesungen an der TU Dresden

[3] *Kollmar:* Die Strahlungsheizung

[4] *Kast:* Überlegungen zu den Zuschlägen für Betriebsunterbrechungen und kalte Außenflächen der DIN 4701, *„Gesundheitsingenieur“* 1970

[5] Kollmar: Zuschlag z_{A} — Ausgleich der kalten Außenflächen, *„Gesundheitsingenieur“* 1970