Erforderliche Heizleistung für Hallenbauten in Abhängigkeit des Heizungssystems (Teil II)

Dr. sc. techn. Bernd GLÜCK
VEB Forschung und Rationalisierung Technische Gebäudeausrüstung

4. 3. Konvektiver Wärmeübergang

Da – wie im Abschnitt 1 (Problemstellung) bereits bemerkt – keine allgemeingültigen, nutzungsfähigen Algorithmen zur Nachbildung der konvektiv verursachten Luftbewegung existieren, muß auf vereinfachte Beziehungen, die aus bekannten Nußeltgleichungen abgeleitet wurden, zurückgegriffen werden. So findet der Ansatz

$$\alpha_j = K\,|t_{L,j} - t_j|^{0,32} \quad \text{in W/(m}^2\text{ K)} \tag{22}$$

mit t in °C Verwendung. Es gelten für die Wände $K = 1{,}44$, für Decken und Fußböden bei Wärmestrom von oben $K = 1{,}04$ und bei Wärmestrom von unten $K=1{,}92$. Des einfacheren Algorithmus wegen werden für die Strahlplatten-Oberflächen die gleichen Ansätze verwendet.
Der Ansatz nach Gl. (22) beruht auf der freien Auftriebsströmung. Die an den Außenwänden herabfallende Kaltluft und die infiltrierte Außenluft überlagern jedoch eine erzwungene Strömung, deren Wirksamkeit kaum erfaßbar ist. Die in /7/ vorgestellte Auswertung nimmt zwar auf die genannten Effekte Bezug, die Aussagen gelten aber nur für übliche Büro- und Wohnräume mit Fußbodenheizungen.

Je nachdem, wie die Aufheizung der eingedrungenen Außenluft erfolgt, ergeben sich große Unterschiede in der Verteilung der Oberflächen- und Lufttemperaturen.
Mischt sich die infiltrierte Außenluft unmittelbar mit der Raumluft, so hat im Behaglichkeitszustand die Raumluft die niedrigste Temperatur und die Oberflächentemperaturen der Umfassung nehmen die höchsten Werte an. Wird dagegen die herabfallende Kaltluft an den Wänden und am Fußboden erwärmt, so ergeben sich bei der geforderten Empfindungstemperatur die höchste Raumlufttemperatur und die niedrigsten Umfassungstemperaturen. Die Realität wird sicherlich zwischen diesen Grenzfällen liegen, wobei vielfältige Faktoren, wie Lage der Fugen, Hallenausrüstung, Heizungssystem u. a. m. Einfluß nehmen.
Um zu praktikablen Ergebnissen zu gelangen, werden später mehrere Varianten durchgerechnet. Deshalb wird in Gl. (1) der konvektive Wärmestrom gesplitet und

$$\dot{q}_{K,j} = \dot{q}'_{K,j} + \alpha_j\,(t_j - t_{L,j}) \tag{23}$$

gesetzt. Der effektive Lüftungswärmebedarf beträgt

$$\dot{Q}_L = n_L BLH\,\varrho_L\,c_L\,(t_{L,2} - t_a), \tag{24}$$

wobei n_L die Außenluftwechselzahl in h^{-1} darstellt.
Es wird weiterhin angenommen, daß die Luft bei $t_{L,2}$ abströmt. Als zugeschnittene Größengleichung gilt mit den im Abschnitt 3. vereinbarten Größen

$$\dot{Q}_L = 0{,}381\,n_L\,BLH\,(t_{L,2} - t_a) \text{ in W}, \tag{25}$$

und mit dem Wärmekapazitätsstrom

$$\dot{C}_L = 0{,}381\,n_L\,BLH \text{ in W/K} \tag{26}$$

errechnet sich

$$\dot{Q}_L = \dot{C}_L\,(t_{L,2} - t_a). \tag{27}$$

Erfolgt eine teilweise Erwärmung der infiltrierten Luft an den Wandflächen 2 und 3 sowie mit doppelter Intensität am Fußboden, so ergibt sich in grober Näherung der Ansatz

$$\dot{q}'_{K,5} = K_L \frac{\dot{Q}_L}{0{,}5\,(A_2 + A_3) + A_5} \tag{28}$$

$$\dot{q}'_{K,2} = \dot{q}'_{K,3} = 0{,}5\,\dot{q}'_{K,5}\,.$$

Der Koeffizient K_L liegt zwischen den theoretischen Grenzen 0 und 1. Er gibt den Anteil der Lufterwärmung an den genannten Flächen an.

Die in Gl. (23) vorgenommene Superposition ist aus thermodynamischer Sicht nicht exakt. Es wird in Wirklichkeit ein merkliches Absenken der Lufttemperatur an der Oberfläche durch den Außenluftanteil erfolgen und das treibende Temperaturpotential erhöhen. Da mit dem Faktor K_L aber ohnehin nur eine grobe Approximation möglich ist, kann Gl. (23) so gedeutet werden, daß $\dot{q}'_{K,j}$ die Reduzierung der Oberflächentemperatur bewirkt und damit eine veränderte Ankoppelung durch $\alpha_j(t_j - t_{L,j})$ gegeben ist.
Gl. (1) liefert mit $\varkappa^* = \varkappa_j$ unter Beachten von Gl. (23) die ***allgemeingültige Oberflächentemperatur***

$$t_j = \frac{\alpha_j t_{L,j} + \varkappa^* t_a - \dot{q}_{S,j} - \dot{q}'_{K,j}}{\alpha_j + \varkappa^*}\,. \tag{30}$$

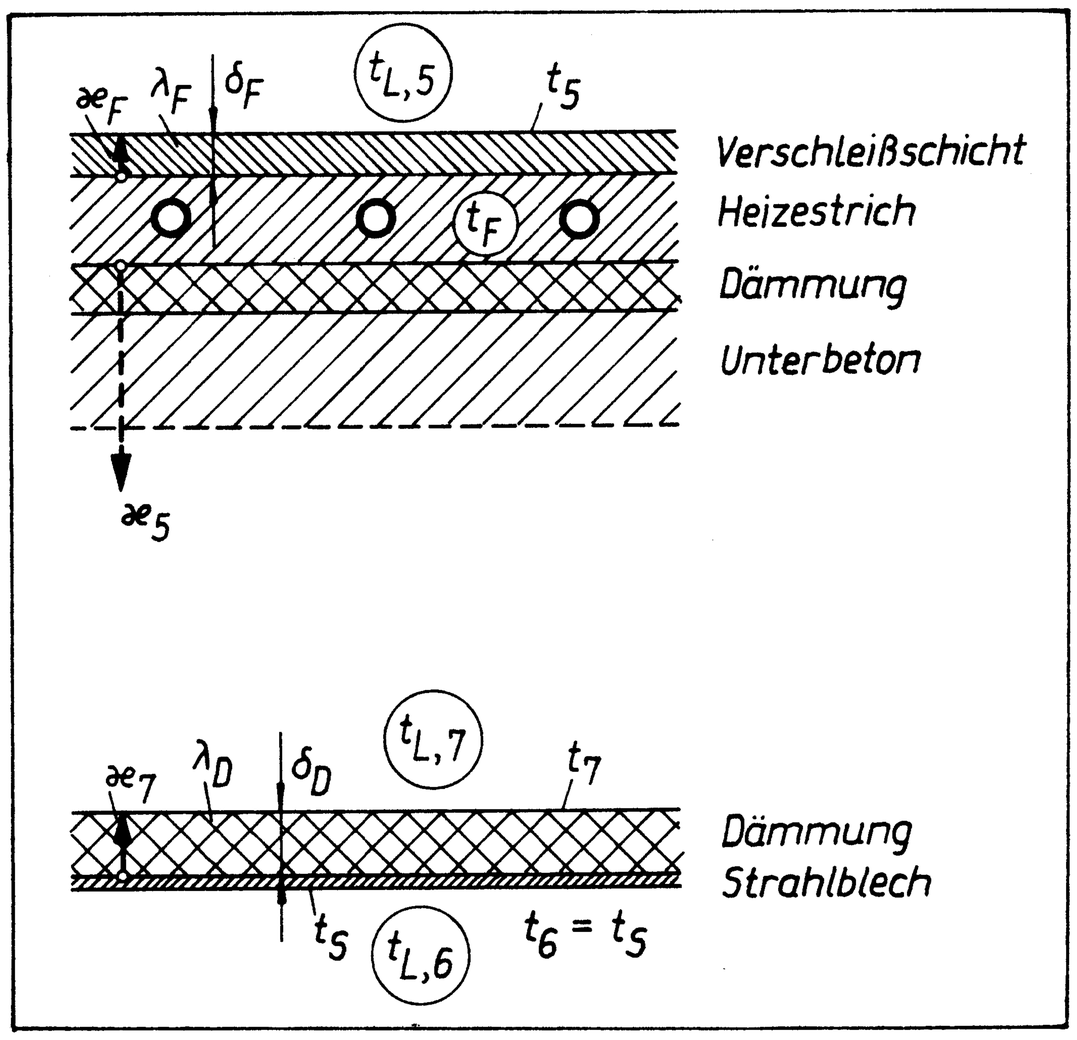
Diese Gleichung gilt uneingeschränkt für die ***Wände*** ($j = 2$) und ($j = 3$). Für ***Wand*** ($j = 1$) sowie für die ***Decke*** ($j = 4$) ist $\dot{q}'_{K,j} = 0$.
Bei Betrachten des ***unbeheizten Fußbodens*** (j=5) ist anstelle von t_a die Erdreichtemperatur t_{EB} einzusetzen, die mit $\varkappa_5$ korrespondiert. Das heißt, es sind $\varkappa_5$ und t_{EB} in einer Vorrechnung so zu bestimmen, daß sich mit diesen Werten der genormte Transmissionswärmestrom an das Erdreich nachbilden läßt.
Für einen ***beheizten Fußboden*** ($j = 5$) kann gemäß der Rippentheorie von einer mittleren homogenen Temperatur im Heizestrich t_F ausgegangen werden. Sie ist in Gl. (30) anstelle von t_a anzusetzen. Mit den im Bild 8 vermerkten Größen folgt weiter:

$$\varkappa^* = \varkappa_F = \frac{\lambda_F}{\delta_F}\,. \tag{31}$$

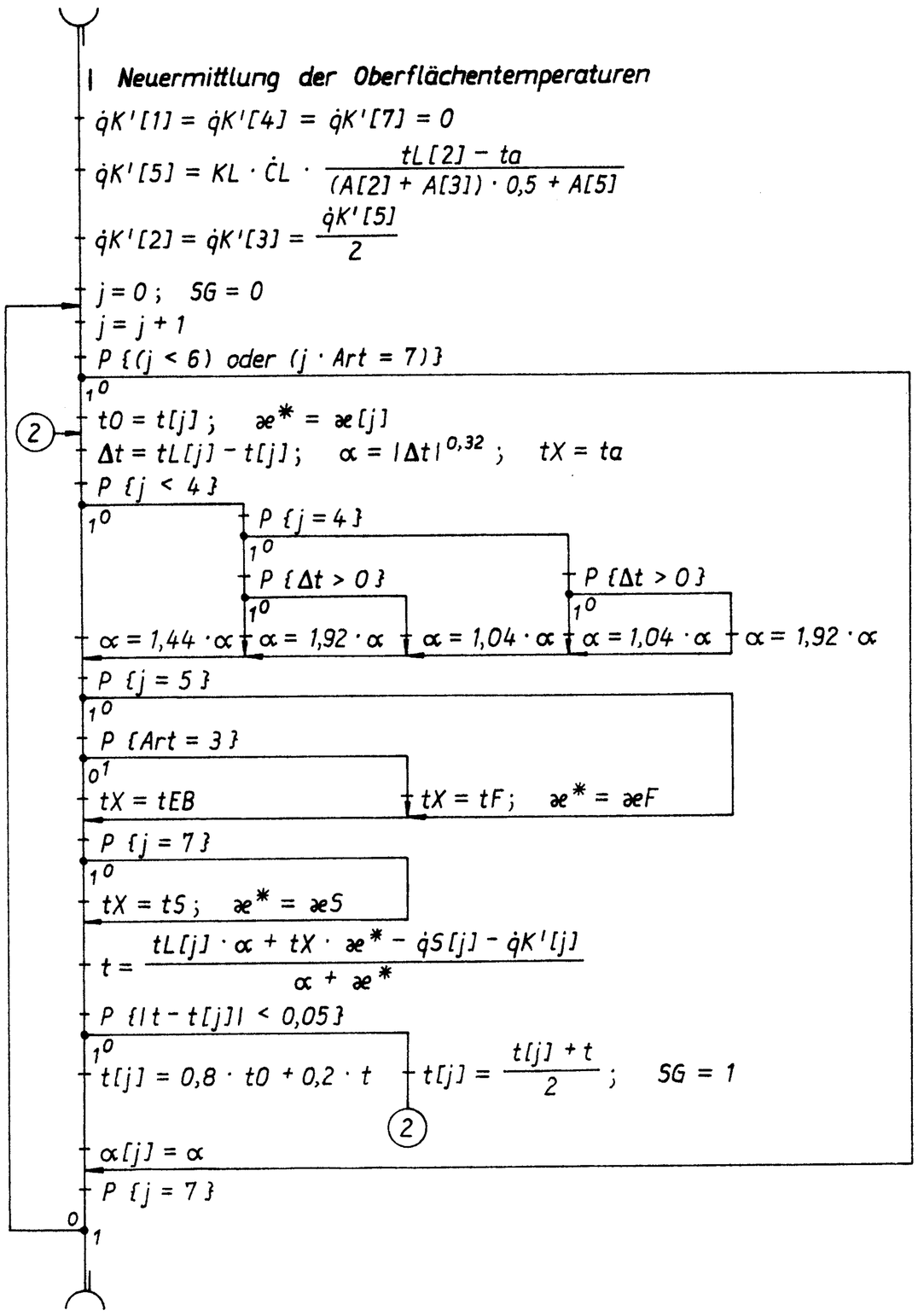
Bei einer ***Strahlplattenheizung*** gilt die Besonderheit, daß von der bekannten Oberflächentemperatur t_S ausgegangen werden kann. Somit liegt $t_6 = t_S$ fest. Zu bestimmen ist lediglich die Temperatur auf der Oberseite der Dämmschicht. t_7 (Bild 8). Zur Bestimmung dieser Größe kann wiederum Gl. (30) verwendet werden, wobei für t_a die Strahlblechtemperatur t_S und für

$$\varkappa^* = \varkappa_S = \varkappa_7 = \frac{\lambda_F}{\delta_F}\,. \tag{32}$$

einzusetzen sind. Weiter gilt $\dot{q}'_{K,7} = 0$.



8 Aufbau und wärmetechnische Daten einer idealisierten Heizfläche
oben: Fußbodenheizfläche unten: Strahlplatte



9 Unterprogramm [WAEUEB] zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs und der Oberflächentemperaturen

Weichen die mit Gl. (30) ermittelten Temperaturen von den vorher getroffenen Annahmen um ≥ 0,05 K ab, so erfolgt eine Neuberechnung der α-Werte nach Gl. (22) und der Oberflächentemperaturen nach Gl. (30). Der Rechnungsablauf ist im Unterprogramm [WAEUEB] (Bild 9) dargestellt. Die wiederholte Temperaturbestimmung wird durch die Steuergröße $SG = 1$ vermerkt. Um eine stabile Lösungsentwicklung zu erreichen, werden die jeweils neuen Temperaturen aus den eben errechneten und den ursprünglich angenommenen gemittelt.

4. 4. Bilanzierung der Gesamtwärmeströme

Zur Ermittlung des ***effektiven Transmissionswärmeverlustes*** ist

$$\dot{Q}_T = \sum_{j=1}^{5} A_j \varkappa_j \, \Delta t_j \tag{33}$$

zu bilden. Als Temperaturdifferenz wird angesetzt:

$\Delta t_j = t_j - t_a$ Wände, Decke ($j = 1 \ldots 4$)
$\Delta t_j = t_j - t_{EB}$ Fußboden ($j = 5$), unbeheizt
$\Delta t_j = t_F - t_{EB}$ Fußboden ($j = 5$), beheizt.

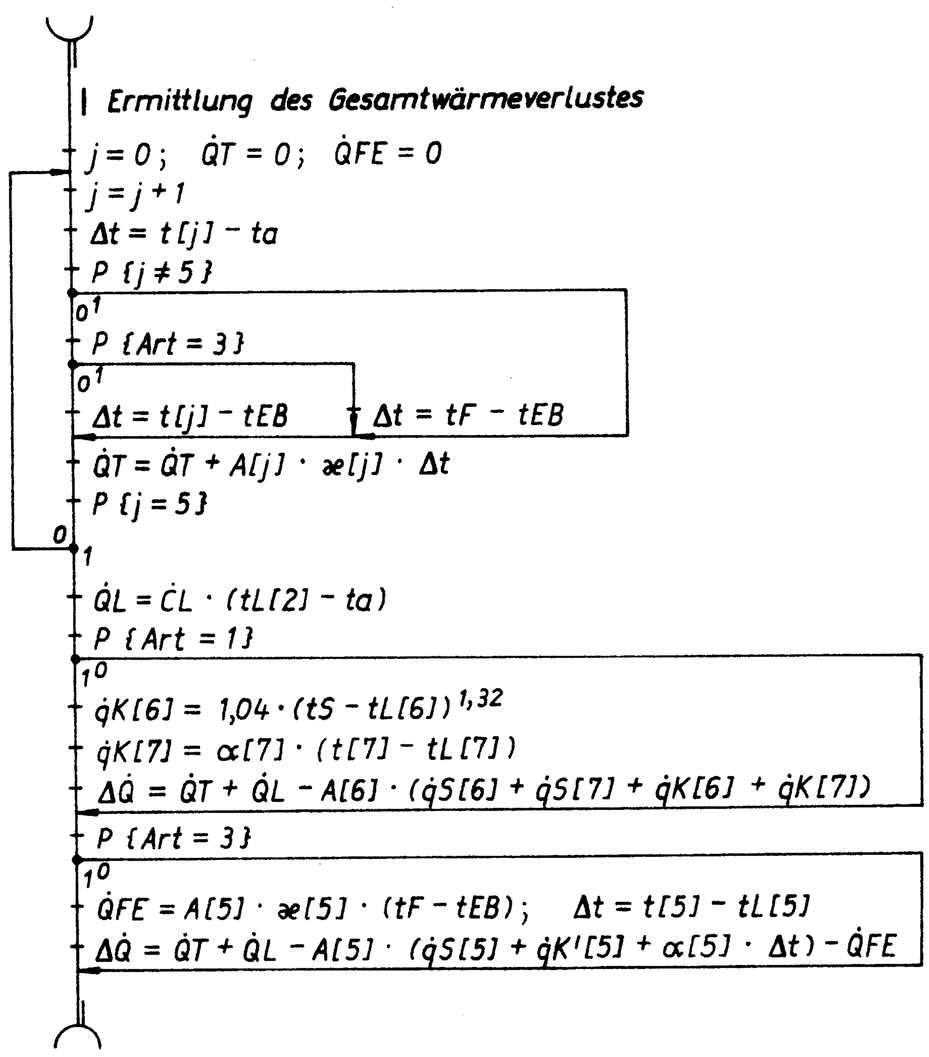
Der effektive ***Lüftungswärmebedarf*** $\dot{Q}_L$ wird nach Gl. (27) bestimmt. Diesen beiden systembezogenen Wärmeverlusten steht die ebenfalls ***systembezogene Wärmeabgabe der Heizflächen*** gegenüber. Für die Strahlplattenheizung gilt

$$\dot{Q}_H = A_6 \, (\dot{q}_{S,6} + \dot{q}_{S,7} + \dot{q}_{K,6} + \dot{q}_{K,7}). \tag{34}$$

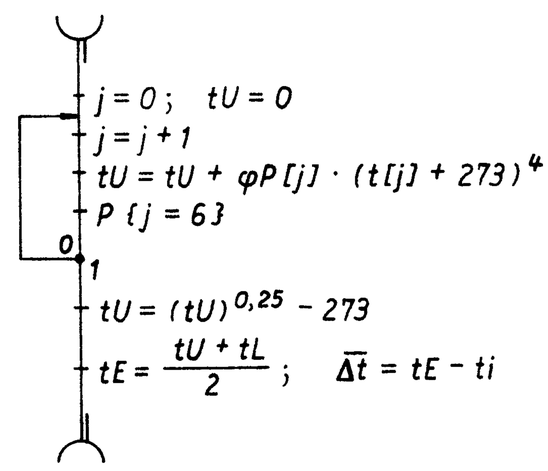
Die Strahlungs-Wärmestromdichten $\dot{q}_S$ sind nach Gl. (20) zu bestimmen. Die Konvektions-Wärmestromdichten $\dot{q}_K$ können nach den folgenden, zugeschnittenen Größengleichungen (t in °C) bestimmt werden:

$$\dot{q}_{K,6} = 1{,}04 \, (t_S - t_{L,6})^{1.32} \quad \text{in W/m}^2 \tag{35}$$

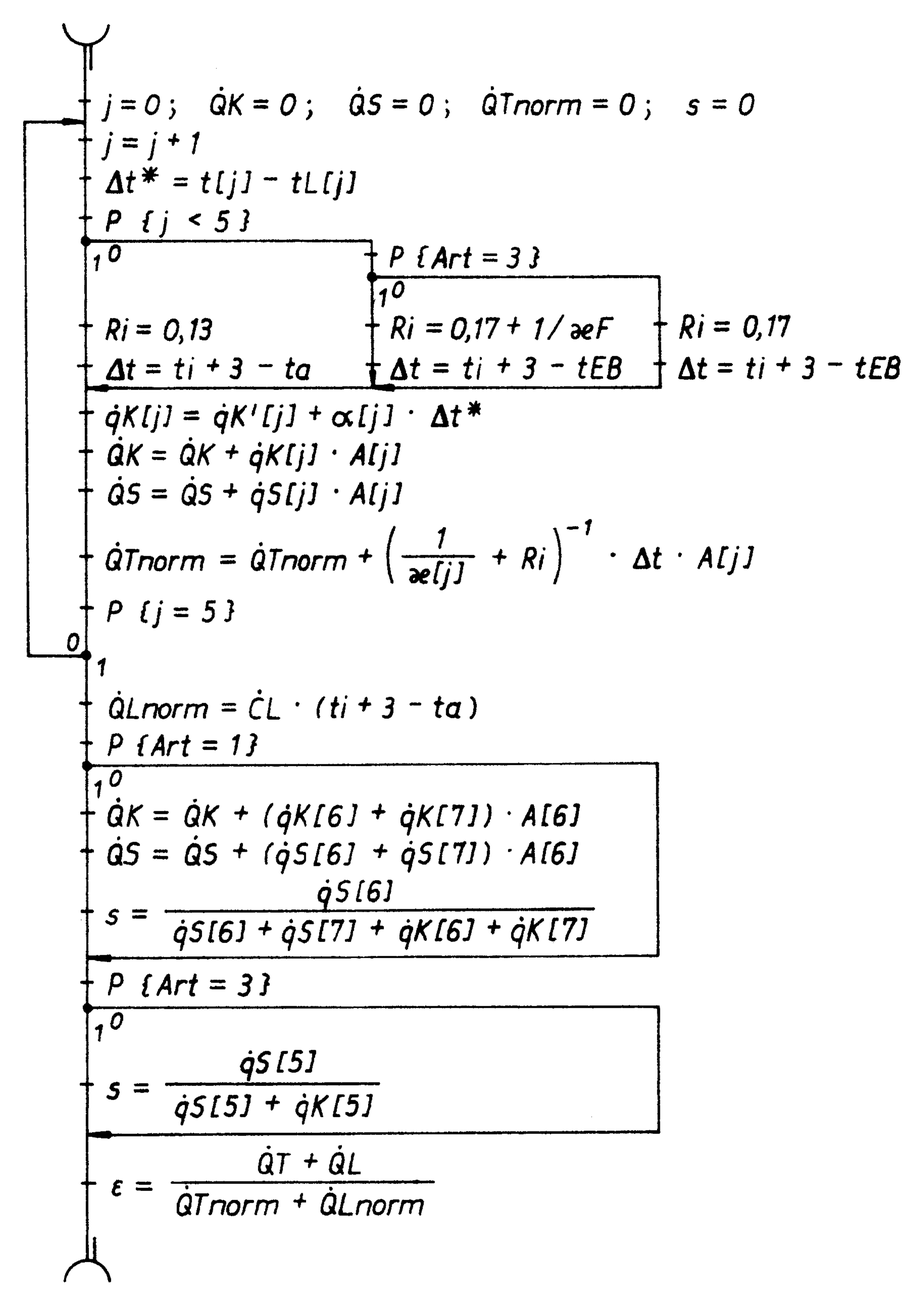
$$\dot{q}_{K,7} = \alpha_7 \, (t_7 - t_{L,7}) \quad \text{in W/m}^2 \tag{36}$$



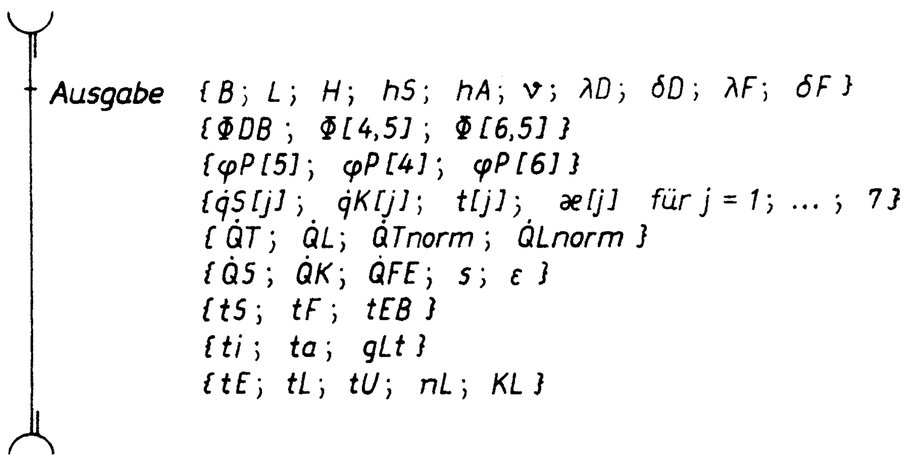
10 Unterprogramm [BIL] zur Bilanzierung des Gesamtwärmeverlustes und der erforderlichen Heizenergie



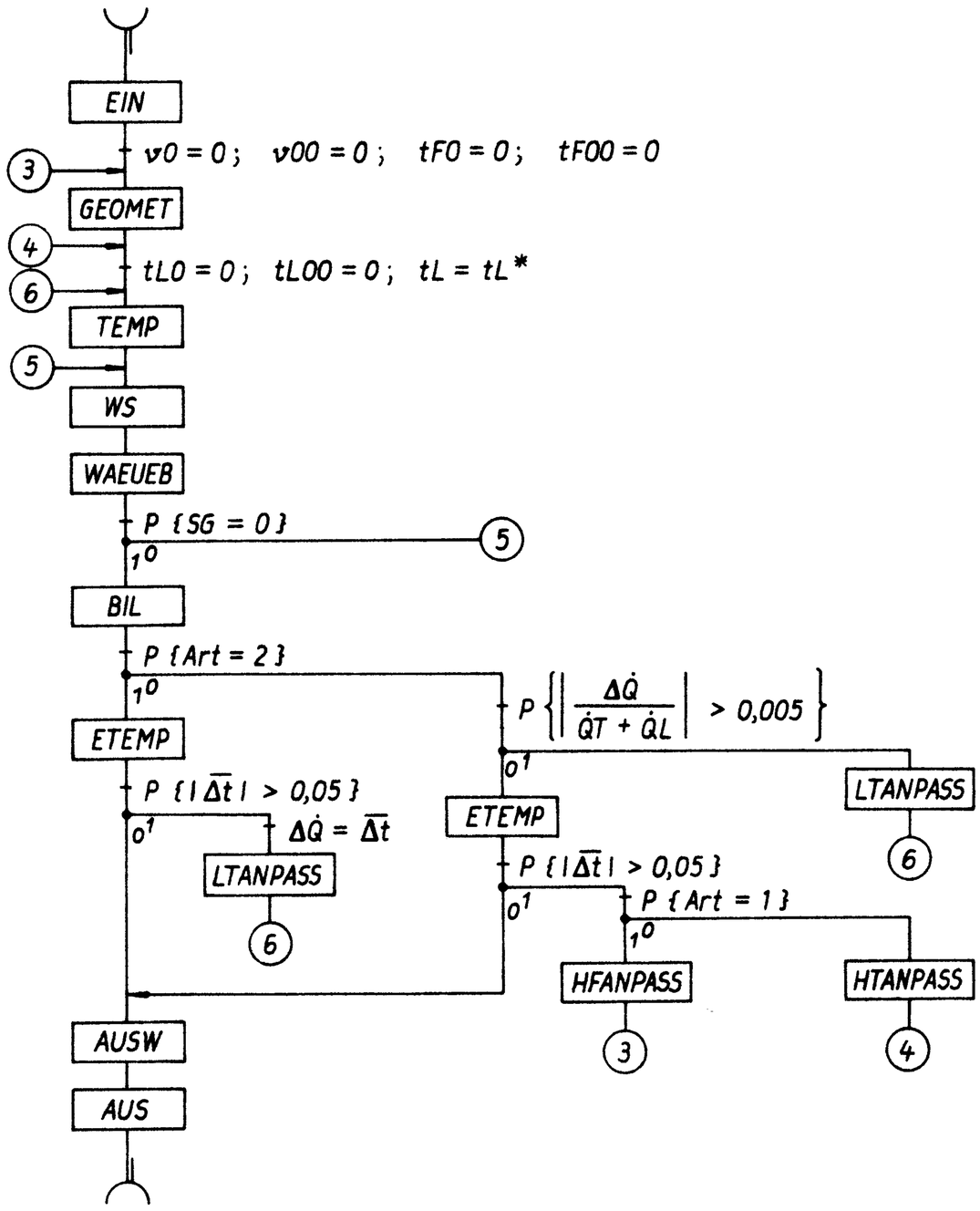
11 Unterprogramm [ETEMP] zur Bestimmung der Empfindungstemperatur und der Abweichung von der Norm-Innentemperatur



12 Unterprogramm [AUSW] zur energetischen Auswertung des Berechnungsbeispiels



13 Unterprogramm [AUS] zur Datenausgabe



14 Unterprogramm [WBHALLE] zur wärmetechnischen Beurteilung von Heizsystemen in Hallenbauten

Für die Fußbodenheizung berechnet sich der Gesamtwärmestrom zu

$$\dot{Q}_H = A_5\,(\dot{q}_{S,5} + \dot{q}_{K,5}) + A_5\,\varkappa_5\,(t_F - t_{EB}), \tag{37}$$

wobei für die Konvektions-Wärmestromdichte die zusammengesetzte Form gilt (t in °C):

$$\dot{q}_{K,5} = \dot{q}'_{K,5} + \alpha_5\,(t_5 - t_{L,5}) \qquad \text{in W/m}^2 \tag{38}$$

Die Berechnungsfolge ist im Unterprogramm [BIL] (Bild 10) aufgezeigt. Die Bilanzdifferenz $\Delta\dot{Q}$ wird abgespeichert.

4. 5. Empfindungstemperatur

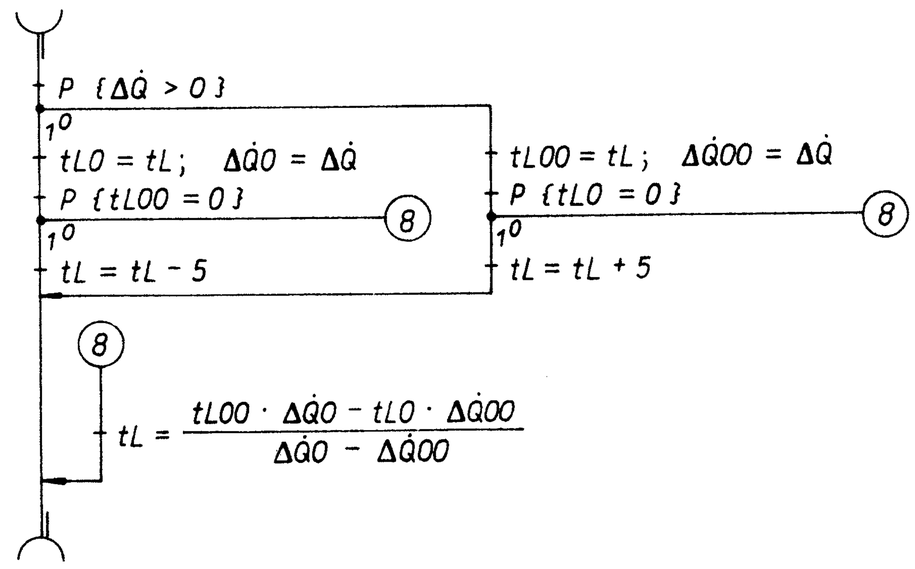
Zur Auswertung der Gl. (7) dient das Unterprogramm [ETEMP] (Bild 11), wobei für die Temperatur der Umgebung unter der Bedingung, daß alle Emissionskoeffizienten gleich sind,

$$t_U = \left[\sum_{j=1}^{n} (t_j + 273\,\text{K})^4\,\varphi^{\circ}_{P,j}\right]^{0,25} - 273\,\text{K} \quad \text{in °C} \tag{39}$$

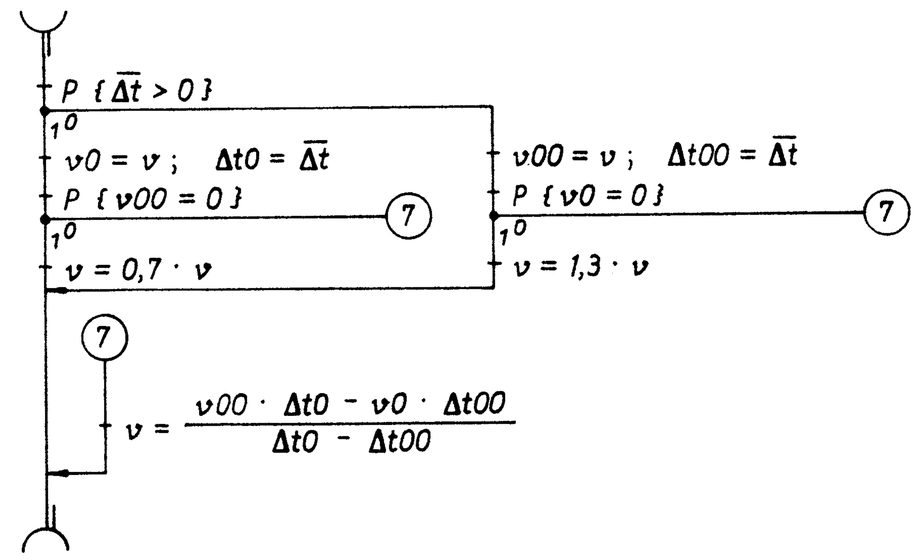
gilt (t_j in °C). Gl. (39) kann aus dem bilateralen Strahlungsmodell und auch aus Gl. (20) abgeleitet werden.
Die Differenz $\overline{\Delta t} = t_E - t_i$ dient als Maß für die Anpassung der thermischen Verhältnisse an die geforderte Norm-Innentemperatur.

4. 6. Vergleichswerte

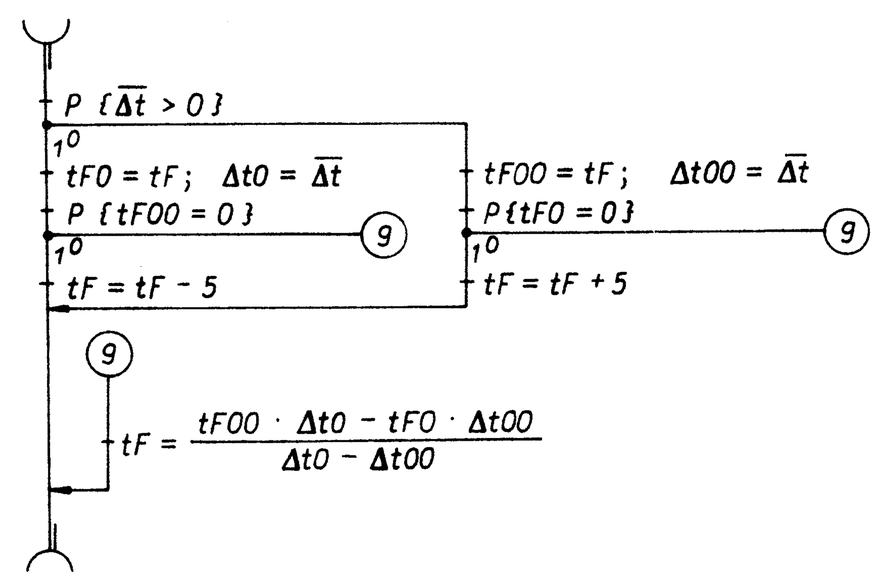
Um die systemabhängigen Energieaufwendungen beurteilen zu können, werden der **Norm-Transmissionswärmebedarf**



15 Unterprogramm [LTANPASS] zur iterativen Anpassung der Lufttemperatur



16 Unterprogramm [HFANPASS] zur iterativen Anpassung der Heizflächengröße bei Strahlplattenheizungen



17 Unterprogramm [HTANPASS] zur iterativen Anpassung der Estrichtemperatur bei Fußbodenheizungen

$$\dot{Q}_{T,norm} = \sum_{j=1}^{5} \left(\frac{1}{\kappa_j} + R_j\right)^{-1} A_j \Delta t_j \tag{40}$$

mit

$\Delta t_{j=1\ldots4} = t_i + 3\,\text{K} - t_a$; $\quad R_{1\ldots4} = 0{,}13\ \text{m}^2\,\text{K/W}$

$\Delta t_{j=5} = t_i + 3\,\text{K} - t_{EB}$; $\quad R_5 = 0{,}17\ \text{m}^2\,\text{K/W}$ bzw.

$R_5 = 0{,}17\ \text{m}^2\,\text{K/W} + \kappa_F^{-1}$

sowie der ***Norm-Lüftungswärmebedarf***

$$\dot{Q}_{L,norm} = \dot{Q}_L\,(t_i + 3\,\text{K} - t_a) \tag{41}$$

bestimmt und die ***energetische Kennzahl***

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_T + \dot{Q}_L}{\dot{Q}_{T,norm} + \dot{Q}_{L,norm}} \tag{42}$$

gebildet.
Zu dieser Ermittlung dient das Unterprogramm [AUSW] (Bild 12). Die Auswertung wird ergänzt um die Berechnung der spezifischen Konvektionswärmeströme $\dot{q}_{K,j} = \dot{q}'_{K,j} + \alpha_j\,(t_j - t_{L,j})$, die Addition aller von den Umfassungen und Heizflächen abgegebenen Konvektions- und Strahlungswärmeströme ($\dot{Q}_K$ und $\dot{Q}_S$) sowie um die Bestimmung des Strahlungsanteils der Heizflächen:

Strahlplattenheizung

$$s = \frac{\dot{q}_{S,6}}{\dot{q}_{S,6} + \dot{q}_{S,7} + \dot{q}_{K,6} + \dot{q}_{K,7}} \tag{43}$$

Fußbodenheizung

$$s = \frac{\dot{q}_{S,5}}{\dot{q}_{S,5} + \dot{q}_{K,5}} \cdot \tag{44}$$

Die im Unterprogramm [AUS] (Bild 13) verzeichneten Größen sind auszugeben.

5. Hauptprogramm

Das Hauptprogramm [WBHALLE] (Bild 14) folgt dem im Abschnitt 2.3. beschriebenen Grobalgorithmus.

Bei Strahlplatten- und Fußbodenheizungen muß vor der Heizflächen- bzw. Heiztemperaturanpassung zum Abgleich der Wärmebilanz das Unterprogramm zur Lufttemperaturanpassung [LTANPASS] (Bild 15) eingeschaltet werden. Dies ist bei Luftheizungen nicht erforderlich, da die Heizfläche zur Lufterwärmung unbeachtet bleibt. Zur Anpassung der Empfindungstemperatur t_E an den geforderten Wert t_i dient bei einer Strahlplattenheizung das Unterprogramm [HFANPASS] (Bild 16), bei einer Fußbodenheizung das Unterprogramm [HTANPASS] (Bild 17) und bei einer Luftheizung das Unterprogramm [LTANPASS], allerdings mit der veränderten Eingangsgröße $\overline{\Delta t}$. Alle genannten Algorithmen arbeiten nach dem Prinzip der „regula falsi".