ANHANG 2

Thermische Behaglichkeitskomponenten im heißen Klima

ANHANG 2: Thermische Behaglichkeitskomponenten im heißen Klima

Der Mensch ist ein gleichwarmes Lebewesen und ein ausgeglichener Wärmehaushalt mit praktisch konstanter Körpertemperatur um 37°C ist Voraussetzung dafür, dass sich der Mensch thermisch wohl fühlt [A. Rosenthal und L. Terhaag 34]. D.h. es muss ein Gleichgewicht zwischen der Wärmebildung (im Körper erzeugte Wärme) und der Wärmeabgabe des Körpers befinden. Die im Körper gebildete Wärme wird durch die allgemeinen physikalischen Wärmeübertragungsvorgänge abgeführt [33]:

- Wärmeleitung zwischen Körperoberfläche und berührenden Flächen,
- Konvektion zwischen Körperoberfläche und Luft (ca. 33% für Leitung und Konvektion),
- Wärmestrahlung zwischen Körperoberfläche und umgebenden Flächen (ca. 46%),
- Verdunstung von Wasser an der Körperoberfläche und durch Atmung (ca. 21%).

Die Wärmebilanz lässt sich durch folgende Gleichung darstellen:

$$R + C = H - Ers - Erl - Ediff - Esw \qquad \text{(Ah2.1)}$$

Hierin bedeuten:

- R : die radiativen Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche,
- C : die konvektiven Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche.
- H : die innere Wärmeproduktion des Körpers,
- Ers : die sensiblen Wärmeverluste infolge Atmung,
- Erl : die latenten Wärmeverluste infolge Atmung,
- $Ediff$: die latente Wärmeabgabe infolge Dampfdiffusion durch die Haut,
- Erw : die Wärmeverluste durch Schweißverdunstung.

Die folgenden Gleichungen und Aussagen sind aus [3], [5], [8], [22] genommen.

➲ Die Radiative Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche

$$R = Hr \cdot Adu \cdot Facl \cdot (Tclo - Tmr) \quad \text{in W} \qquad \text{(Ah2.2)}$$

➲ Konvektive Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche

$$C = Hc \cdot Adu \cdot Facl \cdot (Tclo - Ti) \quad \text{in W} \qquad \text{(Ah2.3)}$$

Hierin bedeuten:

- Hr: der radiative Wärmeübertragungskoeffizient in W/m².K,
- Hc: der konvektive Wärmeübertragungskoeffizient in W/m².K,
- Adu: die körperliche Hautoberfläche des Menschen in m²

- Facl: das Verhältnis zwischen der Oberfläche des bekleideten Körpers und der Oberfläche des unbekleideten Körpers,
- Tclo: die Oberflächentemperatur der Kleidung in °C,
- Tmr: die mittlere Temperatur der Raumumschließungsflächen in °C,
- Ti : die Lufttemperatur im Raum in °C

Es gilt weiter:

$$Hc = \max\begin{bmatrix} (2.38 \cdot |Tclo - Ti|)^{0.25} \\ 12.1 \cdot \sqrt{Vir} \\ 5.66 \cdot (ACT - 0.85)^{0.39} \end{bmatrix}$$ in W/m².K

$$Hr = Feff \cdot \varepsilon cl \cdot \sigma \cdot \left(\frac{Tclo^4 - Tmr^4}{Tclo - Tmr} \right)$$ in W/m².K (Ah2.4 und Ah2.5)

(Tclo und Tmr in K hier)

$$Vir = Vi + 0.0052 \cdot (ACT - 1)$$ (Ah2.6)

$$Facl = \begin{cases} (1 + 0.2 \cdot Iclo) & \text{if } Iclo \le 0.5 \\ (1.05 + 0.1 \cdot Iclo) & \text{otherwise} \end{cases}$$ (Ah2.7)

$$Hclo = \frac{1}{Rclo \cdot Facl}$$ in W/m².K (Ah2.8)

$$Rclo = 0.155 \cdot Iclo$$ in m².K/W (Ah2.9)

$$Tclo = \frac{Hclo \cdot Tsk + Hr \cdot Tmr + Hc \cdot Ti}{Hclo + Hc + Hr}$$ (Ah2.10)

Hierin bedeuten:

- Vir: die relative Luftgeschwindigkeit (relativ zum menschlichen Körper) in m/s,
- Vi: die mittlere Luftgeschwindigkeit im Raum in m/s,
- ACT: der körperliche Tätigkeitsparameter in Met (1 Met = 58,15 W/m²),
- Feff: der entsprechende Faktor der effektiven radiativen Körperoberfläche,
  Feff = 0,696 für einen sitzenden Zustand
  Feff = 0,725 für einen stehenden Zustand
- εcl: das mittlere Emissionsverhältnis der Bekleidung (εcl = 0.97),
- σ: Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5.67051 \cdot 10^{-8}$ W/m².K^4),

- Iclo: der Isolationswert der Bekleidung in clo (1 clo = 0,155 m².K/W),
- Tsk: die Hauttemperatur in °C

Tmr ergibt sich näherungsweise aus folgender Gleichung:

$$Tmr = \sum_{i=1}^{N} Toi^4 \cdot F_{p-i} \qquad \text{(Ah2.11)}$$

Hierin bedeuten:

- i = 1..N (N: die zahle der Raumoberflächen),
- Toi: die Umschließungsflächentemperatur der Oberfläche i,
- F_{p-i}: der Ansicht-Faktor (View Factor) zwischen einer Person und der Oberfläche i.

Wenn es kleine Temperaturunterschiede zwischen den Innenoberflächen der raumumschließenden Bauteile gibt, dann kann die oben genannte Gleichung durch seine lineare Forme berechnet werden:

$$Tmr = \sum_{i=1}^{N} Toi \cdot F_{p-i} \qquad \text{(Ah2.12)}$$

➲ Innere Wärmeproduktion des Körpers

$$H = M - W \qquad \text{(Ah2.13)}$$

Wobei W der abgegebenen mechanischen Leistung des Körpers in W entspricht.
Für Büroarbeiten ist W null.

➲ Sensible Wärmeverluste durch Atmung

$$Ers = 0.0014 \cdot M \cdot (34 - Ti) \quad \text{in W} \qquad \text{(Ah2.14)}$$

➲ Latente Wärmeverluste durch Atmung

$$Erl = 1.73 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5870 - Pva) \quad \text{in W} \qquad \text{(Ah2.15)}$$

Hierin bedeuten:

- M: der Energieumsatz des Körpers in W,
- Pva: der Wasserdampfpartialdruck der Luft in Pa,

Es gilt weiter:

$$M = 58.15 \cdot ACT \cdot Adu \qquad \text{(Ah2.16)}$$

$$Pva = Pvs \cdot \Phi i \qquad \text{(Ah2.17)}$$

Wobei Pvs dem Wasserdampfsättigungsdruck der Luft und

Φi die relative Luftfeuchtigkeit im Raum entsprechen.

Pva errechnet sich bei:

$$a = 7.257 \cdot 10^{-2} \qquad b = -2.937 \cdot 10^{-4}$$

$$c = 9.810 \cdot 10^{-7} \qquad d = -1.901 \cdot 10^{-9}$$

$$Pvs = 611 \cdot \exp\left(a \cdot Ti + b \cdot Ti^2 + c \cdot Ti^3 + d \cdot Ti^4\right) \quad \text{in Pa}$$

$$Pva = Pvs \cdot \frac{\Phi i}{100}$$

(Ah2.18 und Ah2.19)

➲ **Die latente Wärmeabgabe infolge Dampfdiffusion durch die Haut**

$$Ediff = 0.305 \cdot 10^{-2} \cdot Adu \cdot (Psk - Pva) \quad \text{in W} \qquad \text{(Ah2.20)}$$

Darin ist Psk der Wasserdampfsättigungsdruck für eine Temperatur gleich die Hauttemperatur

$$Psk = Pvs(Tsk) \quad \text{in Pa} \qquad \text{(Ah2.21)}$$

Wobei Tsk der Hauttemperatur entspricht.

Tsk ist abhängig von der empfundenen Raumtemperatur (Top) und dem Wasserdampfpartialdruck der Luft (Pva) und lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$Tsk = \left| \begin{array}{l} 27.5 + 0.166 \cdot Top + 0.0008 \cdot Pva \quad \text{if } Top \le 28 \\ 25.2 + 0.249 \cdot Top + 0.01 \cdot (0.1825 - 0.003525 \cdot Top) \cdot Pva \quad \text{if } 28 < Top \le 36 \\ 31.4 + 0.076 \cdot Top + 0.00051 \cdot Pva \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \qquad \text{(Ah2.22)}$$

mit

$$Top = \frac{Hc \cdot Ti + Hr \cdot Tmr}{Hc + Hr} \quad \text{in °C} \qquad \text{(Ah2.23)}$$

➲ Die Wärmeverluste durch Schweißverdunstung (Esw) und das maximale Schweißverdunstungsvermögen der Haut (Emax)

$$Esw = M - R - C - Ers - Erl - Ediff = Mcut \cdot Emax \qquad \text{(Ah2.24)}$$

mit

$$Emax = 16.7 \cdot 10^{-3} \cdot Hc \cdot \frac{1}{1 + 0.92 \cdot Hc \cdot Rclo} \cdot Adu \cdot (Psk - Pva) \qquad \text{(Ah2.25)}$$

$$DS = \frac{Esw}{0.68 \cdot e} \quad \text{(Ah2.26)} \quad \text{mit} \quad e = 1 - 0.42 \cdot e^{-6 \cdot (1 - Mcut)} \qquad \text{(Ah2.27)}$$

Hierin bedeuten:

- Mcut: der feuchte Hautoberflächenanteil,
- DS: die Feuchtigkeitsbildungsrate auf der Haut in g/h.

➲ Die Analyse

Wir berücksichtigen:

- ***ein leicht bekleideter Mensch mit einer sitzenden Tätigkeit (Büroarbeiten)***

  Das bedeutet:

  $$Iclo = 0.5 \text{ clo} \quad \text{und} \quad ACT = 1.12 \text{ Met}$$

- ***ein Büroraum mit den folgenden Kennzeichen***

  Ti : die Lufttemperatur im Raum in °C ist variable

  Φi: die relative Luftfeuchtigkeit im Raum ist variable

Die folgenden Parameter werden so mit Hilfe von MATHCAD berechnet.

<u>Berechnung von Mcut</u>: Ti, Vi, Φi et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt

$$w(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Tclo \leftarrow wurzel(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo) \\ Mcut(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) \end{array} \right.$$

***Berechnung von DS*: Ti, Vi, Φi et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt**

$$\mathrm{ts}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Tclo \leftarrow \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo) \\ DS(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) \end{array} \right.$$

***Berechnung von Top*: Ti, Vi, Φi et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt**

$$\mathrm{top}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Tclo \leftarrow \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo) \\ Top(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) \end{array} \right.$$

***Berechnung von Tclo*: Ti, Vi, Φi et ACT sind bekannt**

$$\mathrm{tclo}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Tclo \leftarrow \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo) \\ Tclo \end{array} \right.$$

***Berechnung von DISC*: Ti, Vi, Φi et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt**

$$\mathrm{DISC}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Tclo \leftarrow \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo) \\ 3.9338 \cdot Mcut(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) + 0.0158 \cdot DS(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) - 0.3348 \end{array} \right.$$

***Bestimmung von Vi für Mcut =25%*:Ti, Φ et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt**

$$\mathrm{va}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Vi \leftarrow \mathrm{wurzel}(h(Ti, Vi, \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo), \Phi i, ACT), Vi) \\ Vi \end{array} \right.$$

***Bestimmung von Ti für Mcut =25%*: Vi, Φi et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt**

$$\mathrm{ti}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} Ti \leftarrow \mathrm{wurzel}(h(Ti, Vi, \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo), \Phi i, ACT), Ti) \\ Ti \end{array} \right.$$

***Bestimmung von Φi für Mcut =25%*: Ti, Vi et ACT sind bekannt, Tclo unbekannt**

$$\mathrm{phi}(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT) := \left| \begin{array}{l} \Phi i \leftarrow \mathrm{wurzel}(h(Ti, Vi, \mathrm{wurzel}(g(Ti, Vi, Tclo, \Phi i, ACT), Tclo), \Phi i, ACT), \Phi i) \\ \Phi i \end{array} \right.$$

➲ Die Ergebnisse