

## **Stundenmodell nach prEN ISO 13790 zur Berechnung des Kälteenergiebedarfs SIA 380/4:**

### **Modellbeschreibung und Einbindung in die bestehende 380/4-Struktur**

3. Entwurf, Stand: 21. Juli 2005

## Impressum

Auftraggeber	BFE Herr Andreas Eckmanns Worblentalstr. 32 3003 Bern
Auftragnehmer	Lemon Consult GmbH Hofstrasse 1 8030 Zürich  HTA Luzern Technikumstrasse 21 6048 Horw
Projekt	„Umsetzung der Methodik zu SIA 380/4 im 2005 – Modul 3a: Integration CSTB-Modell in 380/4 Lüf- tung/Kühlung“ (Honorarofferte vom 12.04.2005)
Auftragsnummer	...
Verteiler	Reto Gadola, HTA Luzern  Martin Lenzlinger, SIA
Dateibezeichnung	Stundenmodell_380-4_2.doc
Stand	21. Juli 2005
Autor	Martin Ménard
Redaktionelle Beglei- tung	Martin Lenzlinger

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Ausgangslage und Zielsetzung .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Vereinfachtes Stundenmodell nach prEN 13790 .....</b>	<b>6</b>
2.1.	Übersicht .....	6
2.2.	Eingangsdaten .....	8
2.2.1.	Lüftungswärmestrom .....	8
2.2.2.	Transmissionwärmestrom .....	8
2.2.3.	Wärmeübergangswiderstände .....	8
2.2.4.	Wärmespeicherkapazität .....	9
2.3.	Berechnung von $Q_{ia}$ , $Q_{st}$ , $Q_m$ .....	9
2.4.	Bestimmung der Lufttemperatur und der operativen Temperatur .....	10
2.5.	Berechnung der Lufttemperatur und der erforderlichen Heiz- bzw. Kühlleistung .....	10
2.5.1.	Allgemeine Beschreibung .....	11
2.5.2.	Berechnungsverfahren .....	12
<b>3.</b>	<b>Erweiterung des Berechnungsverfahrens auf thermoaktive Bauteilsysteme, Befeuchtung und Entfeuchtung .....</b>	<b>13</b>
3.1.	Modellerweiterung zur Berücksichtigung von TABS .....	13
3.2.	Berechnung des Energiebedarfs für Befeuchtung .....	15
3.3.	Berechnung des Energiebedarfs für Entfeuchtung .....	16
<b>4.</b>	<b>Bestimmung der Eingabedaten .....</b>	<b>17</b>
4.1.	Klimadaten .....	17
4.2.	Raumtemperatur und relative Raumlufffeuchte Sollwerte .....	17
4.3.	Interne Wärmequellen $Q_i$ .....	17
4.3.1.	Personen und Geräte .....	17
4.3.2.	Beleuchtung .....	17
4.3.3.	Verfügbares Tageslicht .....	18
4.4.	Solare Wärmequellen und Sonnenschutz .....	18
4.4.	Lüftung .....	19
4.4.1.	Mechanische Lüftung .....	19
4.4.2.	Natürliche Lüftung .....	19
4.5.	Transmission .....	19
4.6.	Wärmespeicherkapazität der Baukonstruktion .....	20
4.7.	Thermoaktive Bauteilsysteme .....	20
4.8.	Feuchteproduktion und Raumlufffeuchte .....	20

<b>5.</b>	<b>Berechnung des Kälteenergiebedarfs .....</b>	<b>21</b>
5.1.	Raumkühlung .....	21
5.2.	Aussenluftkühlung .....	21
<b>6.</b>	<b>Anwendungsbeispiel.....</b>	<b>22</b>

## **1. Ausgangslage und Zielsetzung**

Im Rahmen der Überarbeitung der SIA Norm 380/4 soll für den Teil Lüftung/Klimatisierung ein neues Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Energiebedarfs für Kälte und Befeuchtung eingeführt werden.

Als neues Berechnungsverfahren wird das vereinfachte Stundenmodell nach prEN 13790 verwendet. Dieses Verfahren entspricht den Anforderungen der zukünftigen CEN Normen für die Berechnung des Energieaufwands für Heizung und Kühlung von Gebäuden.

Der vorliegende Bericht beschreibt das vereinfachte Stundenmodell sowie die für eine korrekte Anbindung an die bestehende Struktur von 380/4 zu verwendenden Randbedingungen.

Zusätzlich wird der Energiebedarf für Befeuchtung und Entfeuchtung mit einer stündlichen Feuchtebilanz berechnet und eine Möglichkeit zur Berücksichtigung von thermoaktiven Bauteilsystemen eingeführt.

## 2. Vereinfachtes Stundenmodell nach prEN 13790

### 2.1. Übersicht

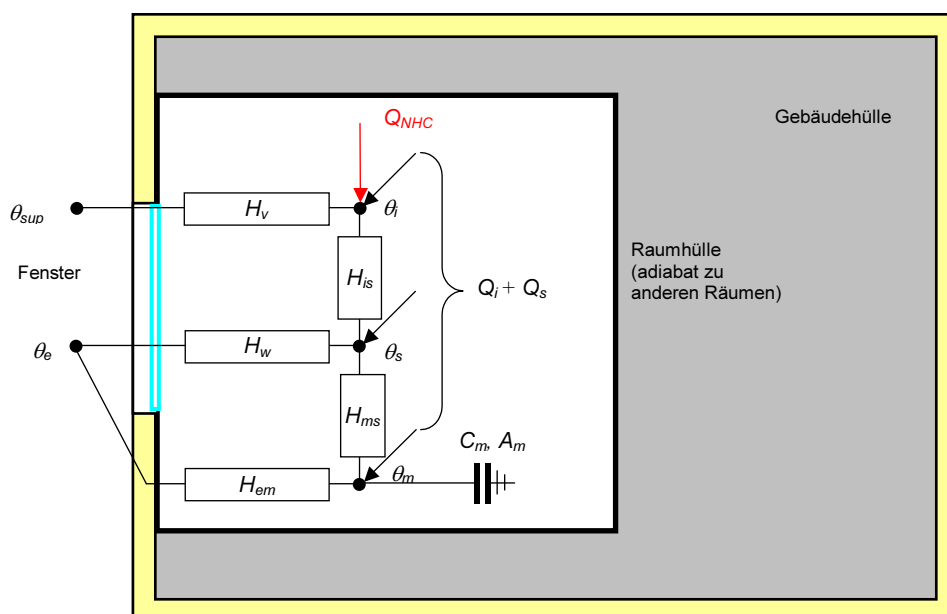
Das Modell stellt gegenüber den ausführlichen Simulationsverfahren eine Vereinfachung dar, mit der Folgendes erreicht werden soll:

- eine Verringerung der Eingangsdaten auf das Mindestmass;
- die Erleichterung neuer Entwicklungen durch direkte Anwendung des umzusetzenden physikalischen Verhaltens;
- die Beibehaltung eines guten Genauigkeitsgrades, insbesondere für Gebäude mit konditionierten Räumen, bei denen die Wärmedynamik des Raumverhaltens grossen Einfluss hat.

Das angewendete Modell beruht auf einem äquivalenten RC-Modell. Bei diesem Modell werden Zeitschritte von einer Stunde angesetzt, und alle Eingangsdaten für Gebäude und Anlagen können stündlich unter Anwendung von Nutzungsprofilen (üblicherweise Stundentabellen auf der Grundlage einer Woche) abgeändert werden.

Das Modell unterscheidet zwischen der Innenlufttemperatur und der mittleren Temperatur der innen liegenden Oberflächen (mittlere Strahlungstemperatur). Das erhöht die Genauigkeit bei der Berücksichtigung der strahlungs- und konvektionsbezogenen Anteile an den solaren und inneren Gewinnen. So kann es auch zur Überprüfung der thermischen Behaglichkeit eingesetzt werden.

Das Berechnungsverfahren beruht auf Vereinfachungen der Wärmeübertragung zwischen dem Innenraum und der Aussenumgebung nach Figur 1.



Figur 1 – Raummodell mit fünf Widerständen und einer Kapazität (5R1C)

$\theta_i$	Raumlufttemperatur (in °C)
$\theta_s$	Innentemperatur (in °C) (nicht gleich Raumtemperatur!)
$\theta_m$	mittlere Strahlungstemperatur des Raumes (in °C)
$\theta_e$	Aussentemperatur (in °C)
$\theta_{sup}$	äquivalente Temperatur der gemischten Volumenströme aus mechanischer Lüftung und Infiltration (in °C)
$H_V$	Lüftungswärmedurchgangskoeffizient (in W/K)
$H_w$	Transmissionswärmedurchgangskoeffizient über Fenster (in W/K)
$H_{em}$	effektiver Transmissionsdurchgangskoeffizient zwischen Aussen und Masse (in W/K)
$H_{ms}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Innen und Masse (in W/K)
$A_m$	strahlungswirksame Fläche der thermischen Masse (in m <sup>2</sup> )
$H_{is}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Innen und Luft (in W/K)
$C_m$	Wärmespeicherkapazität des Raumes (in J/K)
$Q_i$	interne Wärmequellen (Personen, Geräte, Beleuchtung) (in W)
$Q_s$	solare Wärmequellen (in W)
$Q_{NHC}$	Heizwärmebedarf (+), Kälteenergiebedarf (-) (in W)

Der Heizwärme- und der Kühlbedarf werden durch stündliche Berechnung der Wärme  $Q_{NHC}$  (für Heizen als positiver und für Kühlen als negativer Wert angesetzt), die in den Knoten für die Innenluft ( $\theta$ ) abgegeben oder aus diesem entzogen werden muss, um eine bestimmte Mindest- oder Höchsttemperatur der Luft (Sollwert) beizubehalten. Die Wärmeübertragung durch Lüftung ist direkt mit dem Knoten für die Lufttemperatur und dem Knoten verbunden, der die Zulufttemperatur  $\theta_{sup}$  darstellt. Die Transmissionswärmeübertragung wird in den fensterbezogenen Teil  $H_w$  und den massebezogenen Teil  $H_{op}$  unterteilt, welcher wiederum aus den beiden Teilen ( $H_{em}$ ) und ( $H_{ms}$ ) besteht. Die solaren ( $Q_s$ ) und inneren ( $Q_i$ ) Wärmequellen werden auf den Knoten für die Luft ( $\theta$ ), den mittleren Knoten ( $\theta_s$ ) (eine Mischung aus  $\theta$  und der mittleren Strahlungstemperatur  $\theta_m$ ) sowie den Knoten verteilt, der die Masse des Gebäudes bzw. Raumes darstellt. Die thermische Masse wird durch eine einzelne Wärmespeicherkapazität  $C_m$  repräsentiert, die am Knoten für die mittlere Strahlungstemperatur der Oberflächen  $\theta_m$  liegt. Zwischen dem Knoten für die Innenluft und dem Knoten für die Oberfläche wird ein thermischer Kopplungsleitwert definiert.

## 2.2. Eingangsdaten<sup>1</sup>

### 2.2.1. Lüftungswärmestrom

Der lüftungsbedingte Wärmestrom  $H_v$  ist definiert als die Summe der Wärmeströme durch mechanische Lüftung  $H_{v,sys}$  und jener durch Infiltration  $H_{v,inf}$ .

$$H_v = H_{v,sys} + H_{v,inf} = (V'_{sys} + V'_{inf}) \rho_a c_a \quad (1)$$

Dabei ist:

$V'_{sys}$	der Zuluft-Volumenstrom der mechanischen Lüftung, in $\text{m}^3/\text{s}$
$V'_{inf}$	der Volumenstrom durch Infiltration, in $\text{m}^3/\text{s}$
$\rho_a c_a$	die volumenbezogene Wärmespeicherkapazität von Luft $\approx 1200 - (0,14 \cdot h)$ in $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ vgl. SIA 380/1 Ziffer 3.4.2.2 ( $h$ = Höhe über Meer)

Die äquivalente Temperatur  $\theta_{sup}$  der gemischten Volumenströme aus mechanischer Lüftung und Infiltration kann berechnet werden mit:

$$\theta_{sup} = (\theta_{sys} H_{v,sys} + \theta_{inf} H_{v,inf}) / H_v \quad (2)$$

Wobei:

$\theta_{sys}$	Zulufttemperatur der mechanischen Lüftung, in $^{\circ}\text{C}$
$\theta_{inf}$	Temperatur der Infiltrationsluft, welche mit der Aussenlufttemperatur $\theta_e$ gleichgesetzt wird, in $^{\circ}\text{C}$

### 2.2.2. Transmissionwärmestrom

Der Wärmetransmissionskoeffizient  $H_w$  von Türen, Fenster und anderen verglasten Elementen ist nach prEN ISO 10077-1:2004 zu berechnen.:

Der Wärmetransmissionskoeffizient durch schwere, opake Bauteile  $H_{op}$  ist gemäss prEN ISO 6946:2005 zu berechnen.

### 2.2.3. Wärmeübergangswiderstände

Der thermische Kopplungswert  $H_{is}$  ist gegeben durch:

$$H_{is} = h_{is} A_t \quad (3)$$

Dabei ist:

$H_{is}$	der thermische Kopplungsleitwert zwischen den Knoten i und s, in $\text{W}/\text{K}$ ;
----------	--

---

<sup>1</sup> In Kapitel 4 wird im Detail dargelegt, wie die Eingabedaten bestimmt werden.



$A_t$  die Summe aller Flächen, die in den Raum weisen, in  $m^2$ ;  
 $h_{is}$  der Wärmeübergangskoeffizient zwischen den Knoten i und s,  
 $h_{is} = 3.45$ , in  $W/(m^2K)$ ;

Wenn keine Angaben über die Raumdimensionen (Höhe, Breite, Länge) vorhanden sind, kann für  $A_t$  die folgende vereinfachende Annahme getroffen werden:

$$A_t = 4.5 A_{NGF}$$

$A_{NGF}$  ist die Nutzfläche, in  $m^2$ ;

$$H_{ms} = h_{ms} \cdot A_m \quad (4)$$

Dabei ist:

$H_{ms}$  ist der thermische Kopplungsleitwert zwischen den Knoten m und s, in  $W/K$ ;

$h_{ms}$  ist der Wärmeübergangskoeffizient zwischen den Knoten m und s,  
 $h_{ms} = 9.1$ , in  $W/(m^2K)$ .

Die Aufteilung von  $H_{op}$  in  $H_{em}$  und  $H_{ms}$  ergibt sich wie folgt:

$$H_{em} = 1 / (1 / H_{op} - 1 / H_{ms}) \quad (5)$$

#### 2.2.4. Wärmespeicherkapazität

Die Wärmespeicherkapazität  $C_m$  wird aus der Summe der Wärmespeicherfähigkeit aller den Raum umschliessenden Bauteile berechnet:

$$C_m = \sum A_j \chi_j \quad (6)$$

$A_j$  die Fläche des Bauteils j, in  $m^2$

$\chi_j$  ist die flächenbezogene Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils j, in  $kJ/(m^2K)$   
 gemäss prEN ISO 13786.

Die wirksame Fläche der thermischen Masse  $A_m$  wird wie folgt berechnet:

$$A_m = C_m^2 / (\sum A_j \chi_j^2) = (\sum A_j \chi_j)^2 / (\sum A_j \chi_j^2) \quad (7)$$

### 2.3. Berechnung von $Q_{ia}$ , $Q_{st}$ , $Q_m$

Die solare und interne Wärmequellen  $Q_s$  bzw.  $Q_i$  werden wie folgt zwischen dem Luftknoten  $\theta_l$  und den inneren Knoten  $\theta_s$ ,  $\theta_m$  aufgeteilt:

$$Q_{ia} = 0.5 Q_i \quad (8)$$

$$Q_m = A_m / A_f (0.5 Q_i + 0.5 Q_s) \quad (9)$$

$$Q_{sf} = [1 - A_m / A_f - H_w / (9.1 A_f)] (0.5 Q_i + 0.5 Q_s) \quad (10)$$

## 2.4. Bestimmung der Lufttemperatur und der operativen Temperatur

Das Lösungsmodell beruht auf einem Crank-Nicholson-Schema, bei dem ein Zeitschritt von einer Stunde zugrunde gelegt wird. Bei den Temperaturen handelt es sich um den Mittelwert über eine Stunde; eine Ausnahmen bilden  $\theta_{m,t}$  und  $\theta_{m,t-1}$  bei denen es sich um Momentanwerte zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t - 1$  handelt.

Für einen gegebenen Zeitschritt wird  $\theta_{m,t}$  am Ende des Zeitschrittes wie folgt aus dem vorhergehenden Wert  $\theta_{m,t-1}$  berechnet:

$$\theta_{m,t} = [\theta_{m,t-1} (C_m / 3600 - 0.5 (H_3 + H_{em}) + Q_{mto})] / [C_m / 3600 + 0.5 (H_3 + H_{em})] \quad (11)$$

mit

$$Q_{mto} = Q_m + H_{em} \theta_e + H_3 [Q_{sf} + H_w \theta_e + (H_l (Q_{ia} + Q_{NHD}) / H_v) + \theta_{sup}] / H_2 \quad (12)$$

$$H_l = 1 / (1 / H_v + 1 / H_{is}) \quad (13)$$

$$H_2 = H_l + H_w \quad (14)$$

$$H_3 = 1 / (1 / H_2 + 1 / H_{ms}) \quad (15)$$

Für den betrachteten Zeitabschnitt ergeben sich die Mittelwerte der Temperaturen der Knoten nach:

$$\theta_m = (\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}) / 2 \quad (16)$$

$$\theta_s = [H_{ms} \theta_m + Q_{sf} + H_w \theta_e + H_l (\theta_{sup} + (Q_{ia} + Q_{NHD}) / H_v)] / (H_{ms} + H_w + H_l) \quad (17)$$

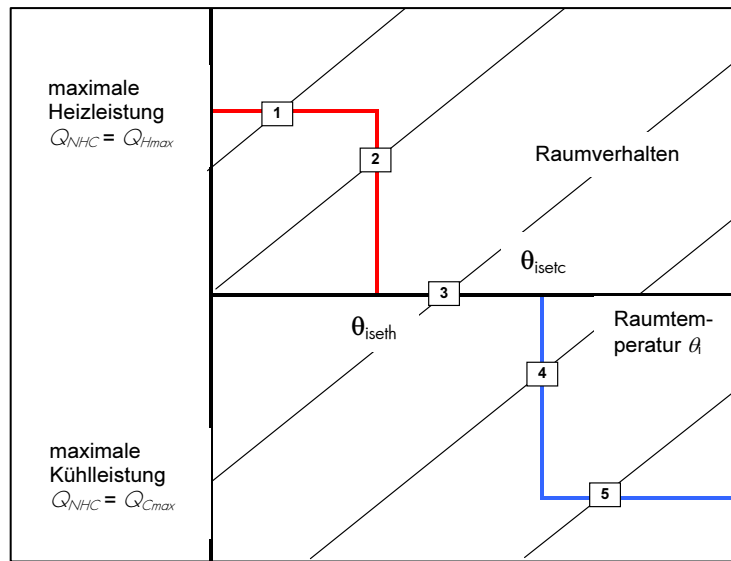
$$\theta_i = [H_{is} \theta_s + H_v \theta_{sup} + Q_{ia} + Q_{NHD}] / (H_{is} + H_v) \quad (18)$$

und die operative Temperatur (Mittelwert zwischen Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur) ergibt sich nach:

$$\theta_{op} = 0.5 \theta_i + 0.5 \theta_m \quad (19)$$

## 2.5. Berechnung der Lufttemperatur und der erforderlichen Heiz- bzw. Kühlleistung

### 2.5.1. Allgemeine Beschreibung



Figur 2 – Darstellung des Raumverhaltens gegen das Anlagenverhalten

Das RC-Netz ermöglicht für jede Stunde die Berechnung der Innentemperatur  $\theta$  für jeden Heizwärme- bzw. Kühlbedarf  $Q_{NHC}$ . Das Auflösungsschema ist so aufgebaut, dass  $\theta$  eine lineare Funktion von  $Q_{NHC}$  darstellt.

Für eine gegebene Stunde lässt sich die Gerade für das Raumverhalten durch Anwendung der in 2.1.3 beschriebenen Gleichungen für zwei Werte von  $Q_{NHC}$  bestimmen.

Die an den Raum gelieferte Heiz- und Kühlleistung kann im selben Diagramm durch die  $\theta_{set}$ -Temperaturen und die maximal mögliche Heiz- und Kühlleistung (die stündlich wechseln kann) dargestellt werden<sup>2</sup>.

Die sich ergebende Innenraumtemperatur sowie der Heizwärme- und der Kühlbedarf werden durch den Schnittpunkt der beiden Kurven dargestellt:

Fünf Situationen sind möglich

- 1) Der Raum erfordert Heizung, und die Heizleistung ist nicht ausreichend, um den Sollwert zu erreichen. Der Heizwärmebedarf ist auf die maximal mögliche Heizleistung begrenzt, und die berechnete Innenraumtemperatur liegt unter dem Sollwert für das Heizen  $\theta_{iseth}$ . Dies geschieht üblicherweise während der Aufheizperiode.
- 2) Der Raum erfordert Heizung, und die Heizleistung ist ausreichend. Die Innenraumtemperatur entspricht  $\theta_{iseth}$ , und der berechnete Heizwärmebedarf liegt unter dem Höchstwert.

<sup>2</sup> Das Schema kann so abgeändert werden, dass in Abhängigkeit von der Innentemperatur die maximale Heiz- oder Kühlleistung berücksichtigt wird.

- 3) Der Raum erfordert weder Heizung noch Kühlung (Gleichgewichtsbedingungen). Es wird weder geheizt noch gekühlt, und die Innenraumtemperatur wird berechnet.
- 4) Der Raum erfordert Kühlung, und die Kühlleistung ist ausreichend. Die Innenraumtemperatur entspricht  $\theta_{setc}$ , und der Kühlbedarf liegt unter dem Höchstwert.
- 5) Der Raum erfordert Kühlung, und die Kühlleistung ist nicht ausreichend. Der Kühlbedarf ist auf die maximal mögliche Kühlleistung begrenzt. Die berechnete Innenraumtemperatur liegt über der Solltemperatur für das Kühlen  $\theta_{setc}$ .

### 2.5.2. Berechnungsverfahren

Mit Hilfe dieses Verfahrens werden  $\theta_{ac}$ , die tatsächliche Innentemperatur, und  $Q_{NHC,ac}$ , der tatsächliche Heizwärme- bzw. Kühlbedarf, berechnet. In allen Fällen wird auch der Wert für  $\theta_{m,t}$  (siehe Gleichung 11) berechnet und gespeichert, da er für den folgenden Zeitschritt angewendet wird.

*Ein Flussdiagramm wäre hier hilfreich.*

#### Schritt 1:

Es ist zu prüfen, ob gekühlt oder geheizt werden muss (Fall 3 nach Figur 2).

$Q_{NHC}$  ist mit 0 anzusetzen, und die Gleichungen (9) bis (11) sind anzuwenden.

$\theta_i$  ist als  $\theta_0$  zu bezeichnen ( $\theta_0$  ist die Lufttemperatur unter Gleichgewichtsbedingungen).

Sofern  $\theta_{seth} \leq \theta_0 \leq \theta_{setc}$  ist weder Heizen noch Kühlen erforderlich, so dass  $Q_{NHC,ac} = 0$  und  $\theta_{i,ac} = \theta_0$  wird. Die Berechnung ist abgeschlossen.

Anderenfalls ist Schritt 2 durchzuführen.

#### Schritt 2:

Es sind der Sollwert auszuwählen und der Heizwärme- bzw. Kühlbedarf zu berechnen.

Wenn  $\theta_0 > \theta_{setc}$  ist  $\theta_{set} = \theta_{setc}$  zu setzen.

Wenn  $\theta_0 < \theta_{seth}$  ist  $\theta_{set} = \theta_{seth}$  zu setzen.

Es sind die Gleichungen (9) bis (11) sind anzuwenden, wobei  $Q_{NHC} = Q_{NHC10}$  mit  $Q_{NHC10} = 10 A_{NGF}$  gilt.

$\theta_i$  ist als  $\theta_{10}$  zu bezeichnen ( $\theta_{10}$  ist die Lufttemperatur, die man für eine Heizleistung von  $10 \text{ W/m}^2$  erhält).

Es ist  $Q_{NHC,un}$  zu berechnen (der unbegrenzte Heizwärme- bzw. Kühlbedarf, um die Anforderungen an den Sollwert zu erfüllen;  $Q_{NHC,un}$  ist im Heizfall positiv und im Kühlfall negativ).

$$Q_{NHC,un} = Q_{NHC10}(\theta_{set} - \theta_0) / (\theta_{10} - \theta_0) \quad (20)$$

#### Schritt 3:

Es ist zu prüfen, ob die verfügbare Kühl- bzw. Heizleistung ausreichend ist (Fall 2 oder Fall 4 nach Figur 2).

Wenn  $Q_{NHC,un}$  zwischen  $Q_{Hmax}$  (maximale Heizleistung) und  $Q_{Cmax}$  (maximale Kühlleistung) liegt, gilt:

$$Q_{NHC,ac} = Q_{NHC,un}$$

$$\theta_{i,ac} = \theta_{set}$$

und die Berechnung ist abgeschlossen.

Anderenfalls ist Schritt 4 durchzuführen.

#### Schritt 4:

Es ist die Innentemperatur zu berechnen (Fall 1 oder Fall 5 nach Figur 2).

Wenn  $Q_{NHC,un}$  positiv ist, ist  $Q_{NHC,ac} = Q_{Hmax}$  zu setzen. Wenn  $Q_{NHC,un}$  negativ ist, ist  $Q_{NHC,ac} = Q_{Cmax}$  zu setzen.

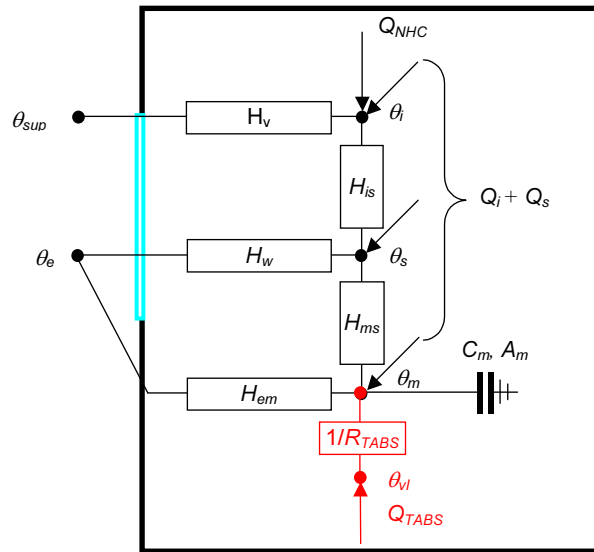
$\theta_{i,ac}$  ist unter Anwendung der Gleichungen (9) bis (11) zu berechnen.

In diesem Fall wird die Solltemperatur nicht eingehalten.

### **3. Erweiterung des Berechnungsverfahrens auf thermoaktive Bauteilsysteme, Befeuchtung und Entfeuchtung**

#### **3.1. Modellerweiterung zur Berücksichtigung von TABS**

Ein thermoaktives Bauteilsystem (TABS) soll näherungsweise berücksichtigt werden. Dazu wird das RC-Modell um einen Temperaturknoten erweitert, welcher die Vorlauftemperatur im TABS vorgibt (siehe Figur 3). Die Wassertemperatur ist über einen Widerstand mit dem raumseitigen Masseknoten verbunden.



Figur 3 – Ergänzung des RC-Modells mit einem TABS-Knoten

Das stark vereinfachte Modell beruht auf den folgenden Annahmen:

Die minimale (Kühlbetrieb) und maximale (Heizbetrieb) Vorlauftemperatur im TABS wird vom Benutzer vorgegeben. Die aktuelle Vorlauftemperatur wird im Verhältnis zur Aussenlufttemperatur gleitend zwischen Maximal- und Minimalwert angepasst.

$$\theta_{vl} = \theta_{vl,max} - (\theta_{vl,max} - \theta_{vl,min}) (\theta_e - \theta_{e,min}) / (\theta_{e,max} - \theta_{e,min}) \quad (21)$$

$\theta_{vl}$  Vorlauftemperatur im TABS, in °C

$\theta_{vl,max}$  maximale Vorlauftemperatur im TABS im Heizbetrieb, in °C

$\theta_{vl,min}$  minimale Vorlauftemperatur im TABS im Kühlbetrieb, in °C

$\theta_e$  Aussenlufttemperatur, in °C

$\theta_{e,min}$  minimale Aussenlufttemperatur im Winter, in °C

$\theta_{e,max}$  maximale Aussenlufttemperatur im Sommer, in °C

Die Rücklauftemperatur liegt um einen konstanten Faktor zwischen Vorlauftemperatur und Massetemperatur des Raumes. Um eine iterative Berechnung zu vermeiden, wird mit der Massetemperatur des vorangegangenen Stundenschrittes gerechnet.

$$\theta_{rl} = \alpha_{rl} (\theta_{vl} - \theta_{m-1}) \quad (22)$$

$\theta_{rl}$  Rücklauftemperatur im TABS, in °C

$\alpha_{rl}$  Rücklauftemperaturfaktor (Standardwert:  $\alpha_{rl} = 0.8$ )

$\theta_{m-1}$  Massetemperatur (= mittlere Strahlungstemperatur) der vorangegangenen Stunde, in °C

Die vom TABS an den Raum abgegebene Leistung entspricht der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf, geteilt durch den thermischen Widerstand zwischen Wasserkreislauf und Masseknoten und multipliziert mit dem Flächenverhältnis vom TABS zur Nutzfläche des Raumes.

$$Q_{TABS} = (\theta_{vl} - \theta_{rl}) \cdot 1/R_{TABS} \cdot A_{TABS}/A_{NGF} \quad (23)$$

$Q_{TABS}$  Leistungsabgabe vom TABS an den Raum, in  $W/m^2$   
heizen, falls  $Q_{TABS} > 0$ ; kühlen falls  $Q_{TABS} < 0$ .

$R_{TABS}$  thermischer Widerstand zwischen Wasserkreislauf und Masseknoten, in  $m^2K/W$  (typischer Wert:  $R_{TABS} = 0.2 \text{ m}^2K/W$ )

$A_{TABS}$  mit TABS belegte Decke- oder Bodenfläche, in  $m^2$   
(typischer Wert:  $A_{TABS} = 0.6 \dots 0.8 A_{NGF}$ )

Gleichung (12) muss nun noch mit der vom TABS auf den Masseknoten einwirkenden Wärmeleistung ergänzt werden.

$$Q_{mtot} = Q_m + H_{em} \theta_e + H_3 [Q_{st} + H_w \theta_e + (H_l (Q_{id} + Q_{NHC}) / H_v) + \theta_{sup}] / H_2 + Q_{TABS} \quad (24)$$

Die weitere Berechnung der Raumlufttemperatur erfolgt gemäss Abschnitt 2.5.2. Dabei ist zu beachten, dass die maximale Leistung der konventionellen Heiz- und Kühlsysteme gleich null zu setzen ist ( $Q_{Hmax} = Q_{Cmax} = 0$ ); anderenfalls könnte der Raum gleichzeitig vom TABS als auch vom konventionellen System Heiz. Bzw. Kühlenergie beziehen. Aufgrund der beschränkten Heiz- und Kühlleistung eines TABS können die Raumtemperaturen unter oder über den Sollwerten der Raumtemperatur liegen. Das Rechenprogramm warnt den Benutzer wenn in einem Raum mit TABS die Komfortbedingungen nicht eingehalten werden.

### 3.2. Berechnung des Energiebedarfs für Befeuchtung

Der spezifische Elektrizitätsbedarf Befeuchtung wird berechnet aufgrund des Minimalwerts der Raumluftfeuchte, der Feuchteproduktion im Raum, der Aussenluftfeuchte und des Aussenluftvolumenstroms. Die Berechnung erfolgt für jeden Raum im Stundenschritt parallel zur Berechnung des Kühlbedarfs.

Der Sollwert der Zuluftfeuchte  $v_z$  in  $g/m^3$  richtet sich nach dem Minimalwert der Raumluftfeuchte  $v_{i,min}$ , der mittleren flächenbezogenen Feuchteproduktion  $g_B$  in  $g/(m^2h)$  und dem Aussenluftvolumenstrom  $V'_e$  in  $m^3/(m^2h)$ :

$$v_z = v_{i,min} + (g_B / V'_e)$$

Die für die Befeuchtung notwendige spezifische Wassermenge  $W$  in  $g/m^2h$  ergibt sich aus dem Aussenluftvolumenstrom pro Lüftungsanlage multipliziert mit der Differenz zwischen dem Sollwert der Zuluftfeuchte  $v_z$  und der Aussenluftfeuchte  $v_e$

$$W = q_{sup} (v_{i,min} - v_e) - g_B; \quad \text{Befeuchtung wenn } W > 0 \quad (25)$$

Wenn die Anlage mit einer Wärmerückgewinnung mit Feuchterekuperation ausgerüstet ist, wird die Aussenluft mit  $\Delta v = \eta_{FR} \cdot (v_{i,min} - v_e)$  befeuchtet.

$\eta_{FR}$  = Feuchterekuperationsgrad der Wärmerückgewinnung

Die für die Befeuchtung notwendige Wassermenge  $w$  reduziert sich auf:

$$W = q_{sup} (v_{i,min} - v_e) (1 - \eta_{FR}) - g_B; \quad \text{Befeuchtung wenn } W > 0 \quad (26)$$

Die Wassermenge für das gesamte Gebäude ergibt sich aus der Summe über alle Stunden und alle Räume mit  $(v_{i,min} - v_e) \cdot (1 - \eta_{FR}) - g_B / V'_e > 0$ .

Der Elektrizitätsbedarf Befeuchtung  $E_{BF}$  ergibt sich aus dem Produkt der Wassermenge  $W$  mit dem Elektrizitätsbedarf für die Verdunstung pro g Wassermenge.

Tabelle 2 Spezifischer Elektrizitätsbedarf für die Verdunstung von Wasser in Wh/g

Befeuchtungstechnologie	Verdampfung	Wasseraufbereitung		Total	
		online	offline	online	offline
Dampfbefeuchtung	1,0	0,02	0,03	1,02	1,02
Adiabatische Befeuchtung	0,0	0,02	0,03	0,02	0,03

Die adiabatische Befeuchtung bewirkt eine Abkühlung der Zuluft. Das erfordert einen zusätzlichen thermischen Energiebedarf, der beim Elektrizitätsbedarf nicht zum Ausdruck kommt.

### 3.3. Berechnung des Energiebedarfs für Entfeuchtung

Zur Berücksichtigung der Entfeuchtung muss die Gleichungen (33) wie folgt umgeschrieben werden:

$$W = q_{sup} (v_{i,max} - v_e) (1 - \eta_{FR}) - g_B; \quad \text{Entfeuchtung wenn } W < 0 \quad (27)$$

Dabei entspricht  $v_{i,max}$  dem Maximalwert der einzuhaltenden Raumlufffeuchte.

Die auskondensierte Wassermenge für das gesamte Gebäude ergibt sich aus der Summe über alle Stunden und alle Räume mit  $(v_{i,max} - v_e) (1 - \eta_{FR}) - g_B / V'_e < 0$ .

Die Luftentfeuchtung erfolgt in der Regel durch Unterkühlung der Zuluft am Kühlregister der Lüftungsanlage. Der Kälteenergiebedarf für die Entfeuchtung entspricht der Verdampfungswärme der ausgeschiedenen Wassermenge:

$$Q_{DH} = W \cdot 0.71 \text{ Wh/g; wenn } W < 0 \quad (28)$$

Der Elektrizitätsbedarf Entfeuchtung  $E_{EF}$  ergibt sich aus dem Kälteenergiebedarf für die Entfeuchtung geteilt durch die Arbeitszahl der Kälteerzeugung.



## 4. Bestimmung der Eingabedaten

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Eingabedaten berechnet bzw. bestimmt werden können. Für die nutzungsabhängigen Eingabedaten sind bei der Berechnung der Projektwerte die besten zur Verfügung stehenden Daten zu verwenden. Beim Vergleich mit Ziel- und Grenzwerten sind Standardwerte zu verwenden. Diese können auch verwendet werden, wenn keine besseren Daten zur Verfügung stehen.

### 4.1. Klimadaten

Das Stundenmodell benötigt DRY-Wetterdatensätze für Aussenlufttemperatur, relative Aussenluftfeuchte und Globalstrahlung für vertikale, nach Norden, Osten, Süden und Westen orientierte Flächen mit jeweils 8760 Stundenwerten pro Jahr. Es sind die Daten der nächstgelegenen Klimastation aus dem Merkblatt Meteodaten zu verwenden. In diesem Merkblatt sind auch die Auslegungstemperaturen Sommer und Winter enthalten.

### 4.2. Raumtemperatur und relative Raumlufffeuchte Sollwerte

Die Sollwerte für die Raumtemperatur und relative Raumlufffeuchte (Maximalwerte für Kühlen und Minimalwerte für Heizen) können aus dem SIA Merkblatt „Harmonisierung der Nutzungsbedingungen“ übernommen werden.

### 4.3. Interne Wärmequellen $Q_i$

#### 4.3.1. Personen und Geräte

Die Daten zu den internen Wärmequellen (Personen, Beleuchtung, Geräte) inkl. Tages-, Wochen- und Jahresprofile können dem SIA Merkblatt 2024 „Harmonisierung der Nutzungsbedingungen“ entnommen werden. Bei den Tagesprofilen wird in der Regel zwischen Arbeits- und Ruhetagen unterschieden. Durch die Angabe der Ruhetage pro Woche werden Wochenprofile berechnet. Die Jahresprofile dienen der Berücksichtigung von zusätzlichen Feier- und Ferientagen. Sie werden als prozentuale Auslastung pro Monat angegeben mit der alle Tagesprofile des entsprechenden Monats multipliziert werden.

#### 4.3.2. Beleuchtung

Die Sollwerte (Wartungswert) der Beleuchtungsstärke  $E_{vm}$  sowie typische Werte für die spezifische elektrische Leistung der Beleuchtung  $\rho_{Bl}$  können aus dem SIA Merkblatt „Harmonisierung der Nutzungsbedingungen“ übernommen werden. Nicht automatisch gedimmte Leuchten werden eingeschaltet sobald die Tageslichtstärke unter dem Sollwert liegt.

Bei automatisch gedimmten Leuchten und ungenügenden Tageslichtverhältnissen wird die elektrische Leistung der Beleuchtung entsprechend dem Verhältnis

von verfügbarer Tageslichtstärke zum Sollwert für die Beleuchtungsstärke gewichtet.

$$E_{Bl} = p_{Bl} E_{dl} / E_{vm} ; \text{ wenn } E_{dl} < E_{vm} \quad (29)$$

Im Raumbereichen welche mehr als 5 m von der Fassade entfernt sind, bleiben die Leuchten eingeschaltet. Die Einschaltdauer wird entsprechend der Personenbelegung berechnet.

#### 4.3.3. Verfügbares Tageslicht

Tageslichtnutzung wird auf einem 5 m breiten Streifen entlang den mit Fenstern versehenen Fassaden berücksichtigt. Die mit Tageslicht versorgte Fläche wird als  $A_{NGF,dl}$  bezeichnet. Der stündliche, in den Raum eindringende Lichtstrom  $\Phi_{dl}$  wird näherungsweise anhand einer mittleren Lichtausbeute von 100 lm/W solarer Strahlungsenergie und unter Berücksichtigung des Lichttransmissionsgrades der Verglasung sowie des Sonnenschutzes berechnet.

$$\Phi_{dl} = 100 \text{ lm/W} * \sum_{i,ot}^{i,ot} I_{ot} A_{w,i,ot} \tau_i Z_i \quad (30)$$

Unter Berücksichtigung des Raumwirkungsgrades  $\eta_R$  wird aus dem Verhältnis von Tageslichtstrom  $\Phi_{dl}$  zu  $A_{NGF,dl}$  die durchschnittliche Beleuchtungsstärke  $E_{dl}$  berechnet.

$$E_{dl} = \eta_R \Phi_{dl} / A_{NGF,dl} \quad (31)$$

Der Raumwirkungsgrad wird dem Merkblatt Nutzungsbedingungen entnommen.

#### 4.4 Solare Wärmequellen und Sonnenschutz

Die auf den Raum wirkenden solaren Wärmequellen  $Q_s$  werden anhand der massgebenden Glasfläche  $A_{w,ot}$  und dem g-Wert der Verglasung, dem z-Wert des Sonnenschutzes sowie der spezifischen Globalstrahlung  $I_{ot}$  auf jeder vertikalen oder horizontalen Fensterfläche  $i$  berechnet.

$$Q_s = \sum_{i,ot}^{i,ot} I_{ot} A_{w,i,ot} g_i Z_i \quad (32)$$

Sobald die Globalstrahlung  $I_{ot}$  auf der Fensterebene über den Sollwert  $I_{ot,set}$  steigt, wird der z-Wert des Sonnenschutzes mitberücksichtigt, ansonsten gilt  $Z_i = 1$ . Der Sollwert  $I_{ot,set}$  ist auf 150 W/m<sup>2</sup> voreingestellt, kann aber vom Benutzer bei Bedarf geändert werden.

## 4.4. Lüftung

### 4.4.1. Mechanische Lüftung

Der Kühlenergiebedarf zur Aussenluftkonditionierung wird im Stundenmodell berücksichtigt. Der spezifische Aussenluftvolumenstrom  $V'_{sys}$  richtet sich nach SIA 382/1 Ziffer 2.2.5. Er kann für zahlreiche Nutzungen aus dem SIA Merkblatt „Harmonisierung der Nutzungsbedingungen“ übernommen werden. Zur Vermeidung einer Befeuchtung kann es zweckmässig sein, die Aussenluftstraten bei tiefen Aussentemperaturen um bis zu 50 % zu reduzieren.

Zur Berücksichtigung der Zulufttemperatur  $\theta_{sys}$  und der Lüftungsregelstrategie muss jedem Raum eine Lüftungsanlage zugeordnet werden.

Die Lüftungsanlagen können 1-stufig, 2-stufig oder stufenlos betrieben werden. Die Betriebsdauer richtet sich in der Regel nach der Personenbelegung. Bei stufenlosem Betrieb wird der Volumenstrom entsprechend dem Personenprofil raumseitig stündlich angepasst. Bei Bedarf kann der Betrieb der Lüftungsanlagen auch durch frei wählbare Nutzungsprofile festgelegt werden.

### 4.4.2. Natürliche Lüftung

Wärmegewinne und -verluste durch Infiltration von Aussenluft werden vereinfacht als pauschaler Infiltrationsvolumenstrom  $V'_{inf}$  berücksichtigt. Typische Werte können aus dem SIA Merkblatt „Harmonisierung der Nutzungsbedingungen“ übernommen werden. Die Temperatur der infiltrierten Luft  $\theta_{inf}$  wird mit der Aussenlufttemperatur  $\theta_e$  gleichgesetzt.

Fensterlüftung kann gegenwärtig nur als konstanter Volumenstrom berücksichtigt werden. Eine detaillierte Berechnung des natürlichen Luftwechsels durch Fensterlüftung unter Berücksichtigung der Windlast und anderer externer Einflussfaktoren wird zur Zeit vom Modell nicht unterstützt.

Nachts kann durch natürliche Lüftung dem Raum Wärme entzogen werden. Der sich einstellende Volumenstrom muss wie bei normaler Fensterlüftung vom Benutzer abgeschätzt und als konstanter Volumenstrom bei nichtbelegtem Raum eingegeben werden. Eine Nachtlüftung kann natürlich auch durch mechanische Lüftung erzwungen werden.

## 4.5. Transmission

Der Wärmestrom durch Transmission wird für jedes den Raum umschliessende Bauteil aus dem Produkt von Fläche und U-Wert des Bauteils berechnet. Zusätzlich sind die linearen und punktuellen Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmebrücken zu berücksichtigen. Die massgebende Bauteilfläche wird gemäss SIA 416 berücksichtigt. Das Programm berechnet die massgebenden Bauteilflächen automatisch aufgrund der lichten Raumabmessungen, der Geschosshöhe und - falls vorhanden - des Dach- oder Bodenanschlusses.

#### 4.6. Wärmespeicherkapazität der Baukonstruktion

Die Wärmespeicherkapazität eines Raumes oder Gebäudes wird entsprechend prEN 13786:2005 (siehe auch Abschnitt 2.2) berechnet. Für zahlreiche Nutzungen können typische Wärmespeicherkapazitäten für leichte, mittlere und schwere Konstruktionen aus dem SIA Merkblatt „Harmonisierung der Nutzungsbedingungen“ übernommen werden. Der Benutzer kann auch eine detaillierte Berechnung anhand des Schichtaufbaus der Bauteile vornehmen.

#### 4.7. Thermoaktive Bauteilsysteme

Folgende Angaben sind notwendig:

$\theta_{vl,max}$	maximale Vorlauftemperatur im Heizbetrieb
$\theta_{vl,min}$	minimale Vorlauftemperatur im Kühlbetrieb
$\alpha_{RL}$	Rücklauftemperaturfaktor Standardwert: 0,8
$R_{TABS}$	thermischer Widerstand zwischen Wasserkreislauf und Oberfläche
$A_{TABS}/A_{NGF}$	Verhältnis der Fläche des thermoaktiven Bauteils zur Nettogeschossfläche typischer Wert: 0,6 bis 0,8

#### 4.8. Feuchteproduktion und Raumlufffeuchte

Als Richtwerte für die mittlere Feuchteproduktion  $g_B$  können die Werte aus Tabelle 1 verwendet werden. Sie sind SIA 180 Tabelle 4 entnommen.

Tabelle 1 – Mittlere flächenbezogene Feuchteproduktion  $g_B$  in g/(hm<sup>2</sup>)

Feuchteklasse	Feuchteproduktion $g_B$	Nutzung
niedrig	2	Wohnen (geringe Belegung, wenig Pflanzen), Büro, Verwaltung, Läden, Lager
mittel	4	Wohnen (hohe Belegung, viele Pflanzen), Schule, Versammlungslokale
hoch	6	Restaurant, Küchen, Sporthallen, Spitäler
sehr hoch	> 10	Wäschereien, nasse Produktionsprozesse

Zur Berechnung des Elektrizitätsbedarfs Befeuchtung wird für die Nutzung Wohnen die Feuchteklasse niedrig eingesetzt.

Der Minimalwert der Raumlufffeuchte bei  $\theta_i = 20\text{ °C}$  beträgt 30 %. Unterschreiten die Aussenklimabedingungen die Dimensionierungswerte Winter, darf die Raumlufffeuchte unter diesen Wert fallen (vgl. SIA 382/1 Ziffer 2.2.6.)

Die maximale Raumlufffeuchte im Sommer bei  $\theta_i = 26,5\text{ °C}$  beträgt 60 %.

## 5. Berechnung des Kälteenergiebedarfs

Der Kälteenergiebedarf eines Gebäudes setzt sich zusammen aus der Summe des Kühlbedarfs aller Räume sowie dem Kälteenergiebedarf für die zentrale Aussenluftkühlung.

### 5.1. Raumkühlung

Der raumseitige Kühlbedarf wird für jeden Raum einzeln im Stundenschritt berechnet und als spezifischer Monats- und Jahresenergiebedarf in kWh/m<sup>2</sup> angegeben. Die Summe über alle Räume ergibt den Kühlbedarf für das gesamte Gebäude.

Das Stundenmodell unterscheidet raumseitig nicht zwischen Luft-, Wasser- oder hybrider Kühlung. Der Wirkungsgrad der Kälteerzeugung wird durch die Zuordnung einer Kälteerzeugungsanlage zu jedem Raum bzw. zu jeder Lüftungsanlage berücksichtigt.

### 5.2. Aussenluftkühlung

Die Aussenluftkühlung wird ebenfalls raumseitig und im Stundenschritt unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung der dem Raum zugeordneten Lüftungsanlage berechnet. Die Zulufttemperatur nach der Wärmerückgewinnung wird folgendermassen berechnet:

$$\theta_{sys} = \theta_e + (\theta_{ret} - \theta_e) \eta_{he} \quad (33)$$

wobei:

$\theta_{sys}$  Zulufttemperatur, in °C

$\theta_e$  Aussenlufttemperatur, in °C

$\theta_{ret}$  Ablufttemperatur vor der Wärmerückgewinnung, in °C

$\eta_{he}$  Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung

Die Ablufttemperatur vor der Wärmerückgewinnung entspricht der Raumlufftemperatur  $\theta_i$  in °C.

Die Zulufttemperatur kann zudem auf einen konstanten Wert  $\theta_{sys,set}$  festgelegt werden. Der Kälteenergiebedarf zur Aussenluftkühlung entspricht dann je Raum:

$$Q_{AC} = [(\theta_{sys,set} - \theta_{sys}) V'_{sys}] \rho_a c_a; \text{ Kühlung wenn: } Q_{AC} < 0 \quad (34)$$

Falls keine Zulufttemperatur vorgegeben wird, rechnet das Modell ohne Aussenluftkühlung.

Die Berechnung des Energieaufwands für Be- und Entfeuchtung wird in Abschnitt 3.2.3. behandelt. Eine unwillkürliche Entfeuchtung am Kühlregister wird nicht berücksichtigt.

## **6. Anwendungsbeispiel**

Das Anwendungsbeispiel wird zu gegebenem Zeitpunkt direkt aus der, durch die HTA entwickelte, SIA-380/4 Rechenhilfe übernommen.