Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 113 (1995)

Heft: 21

Artikel: Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata: ein neuartiges Planungs- und Dimensionierungsinstrument. Teil 1: Grundlagen, Berechnungsbeispiele

Autor: Burmeister, Harald / Keller, Bruno

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78720

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Harald Burmeister und Bruno Keller, Zürich

Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata

Ein neuartiges Planungs- und Dimensionierungsinstrument, Teil 1: Grundlagen, Berechnungsbeispiele

Die heute gebräuchlichen einfachen Berechnungsmethoden des Energieverbrauchs (wie beispielsweise SIA 380/1) berücksichtigen die thermische Speicherfähigkeit des Gebäudes nur unzulänglich. Die komplexen Simulationsprogramme sind für die wesentlichsten Entscheide in den frühen Planungsphasen nicht anwendbar. Mit der «Klimafläche» wurde ein Instrument geschaffen, um diese Lücke zu füllen und um bereits in der Frühphase energetisch wichtige Entscheide zu unterstützen.

Einführung

Für die Suche nach einer gebäuderelevanten, quantitativen Darstellung eines Klimas gibt es sowohl einen theoretischen wie auch einen sehr praxisorientierten Beweggrund.

Der theoretische Ansatz resultiert aus der Erkenntnis, dass die heute gebräuchlichen Angaben über ein Klima (Auslegungstemperatur, Heizgradtage, monatliche Summen der Einstrahlungsenergie) nur ungenügend auf die Dynamik des Gebäudes eingehen. Diese wird allenfalls durch zwei Werte für «Schwer-» respektive «Leichtbau» oder durch sehr summarische «Ausnützungskurven» für die freie Wärme (SIA 380/1) berücksichtigt. Der zeitlichen Korrelation zwischen Aussentemperatur und Sonneneinstrahlung und ihrer Umsetzung durch das thermische «Gedächtnis» des Gebäudes wird damit nur ungenügend Rechnung getragen.

Der praxisorientierte Ansatz bezieht sich auf den Planungsablauf. Es ist bekannt, dass die wesentlichsten Entscheidungen den Energiebedarf betreffend eigentlich in einer sehr frühen Planungsphase vom Architekten gefällt werden, wie beispielsweise Oberflächen-Volumenverhältnis, Orientierung, Fensterflächen. Zu diesem Zeitpunkt stehen ihm aber noch keine geeigneten, strategischen Hilfsmittel zur Verfügung, um die energetischen Auswirkungen seines Tuns abzuschätzen. Es fehlt ihm eine genügend einfache und übersichtliche Darstellung des Energiebedarfs in Funktion von Grössen, welche zu diesem Zeitpunkt bereits bestimmbar sind. Komplexe Simulationsprogramme wie DOE, HELIOS, oder TRNSYS verlangen eine sehr detaillierte Spezifikation des Gebäudes und der einzelnen Räume, zudem unterscheiden sie nicht zwischen wichtigeren und weniger wichtigen Parametern. Diese Detailinformationen sind erst nach Abschluss der Projektierung verfügbar. Zu diesem Zeitpunkt sind aber kaum mehr grundsätzliche Änderungen am Bau möglich, da dann infolge des Zeitdruckes bereits die Ausschreibungen laufen.

Wir haben uns deshalb die Frage gestellt, ob es nicht möglich wäre, das thermodynamische Verhalten eines Raumes oder eines Gebäudes auf genügend wenige Parameter zu reduzieren, so dass sich der Energiebedarf für Heizung oder Kühlung als einfache «Landkarte» darstellen und bereits in einer frühen Planungsphase ablesen lässt. Mit der «Klimafläche» oder der verallgemeinerten Heizgradtag-Funktion glauben wir ein solches Mittel gefunden zu haben.

Wir legen in diesem ersten Artikel dar, wie diese Klimaflächendarstellungen aus den Klimadaten abgeleitet und wie damit in der Praxis gearbeitet werden kann. In einem späteren Artikel werden wir einige allgemeingültige strategische Regeln aus der Form und dem Vergleich von Klimaflächen ziehen und diskutieren.

Die Grundlagen

Wir legen nachfolgend die Problemformulierung und -lösung in einer mathematisch vereinfachten Form dar und gehen erst am Schluss auf die Konsequenzen einer vollständigeren Behandlung ein [1].

Wir betrachten die Aussentemperatur $\vartheta_a(t)$ und die auf eine Fassade einstrahlende Sonnenintensität $I(t)$ als die wichtigsten meteorologischen Parameter. Damit lässt sich folgende allgemeingültige Leistungsbilanzgleichung eines Raumes aufstellen:

$$(1)\quad [\vartheta_i(t)-\vartheta_a(t)]\cdot K = G\cdot I(t) + \frac{dQ(t)}{dt} + P_{int}(t) + P_{heiz/kühl}(t)$$

Der Wert K steht hier für alle auf den m² der Aussenwandfläche bezogenen Verluste, also Wärmeleitungsverluste durch Wände und Fenster und aber auch Wärmeverluste durch Lüftung und Luftinfiltration:

$$(2)\quad K = \frac{1}{A_{Aussen}}\cdot\left[\sum_{\substack{j \text{ über alle}\\ \text{Aussenflächen}}} A_j\cdot k_j + \frac{n\cdot V\cdot(c\cdot\rho)_{Luft}}{3600}\right]$$

A: Flächen [m²] V: inneres Volumen [m³]
k: k-Werte [W/m²K] n: Luftwechsel [h⁻¹]

und der Wert G steht hier für die auf den m² der Aussenwandfläche bezogene Gesamtenergietransmission:

$$(3)\quad G = \frac{1}{A_{Aussen}}\cdot\sum_{\substack{j \text{ über alle}\\ \text{Aussenflächen}}} A_j\cdot g_j$$

g: Gesamtenergietransmissionswerte [–]

Der Ansatz (1) bedeutet, dass wir in erster Näherung den Beitrag der Einstrahlung auf die opaken Teile der Aussenwand vernachlässigen, was sich im Vergleich zur Auswirkung durch die transparenten Teile rechtfertigen lässt.

Für den Moment lassen wir die inneren Quellen P_{int} und $P_{heiz/kühl}$ beiseite und beschreiben den Speicherterm als Erstes vereinfachend als Punktkapazität:

$$(4)\quad \frac{dQ(t)}{dt} = C\cdot\frac{d\vartheta_i(t)}{dt},\qquad C = c\cdot\rho\cdot d\cdot\frac{A_{Innen}}{A_{Aussen}}$$

C beschreibt das auf den m² der Aussenwandfläche bezogene Wärmespeichervermögen des Raumes (als Beispiel für nur eine Speicherstruktur der Dicke d, wir werden darauf zurückkommen). Somit erhält die Differentialgleichung, welche die innere Leerlauftemperatur des Innenraumes mit den meteorologischen Grössen verbindet, folgende Form:

$$(5)\quad \vartheta_i(t) = \vartheta_a(t) + \frac{G}{K}\cdot I(t) + \frac{C}{K}\cdot\frac{d\vartheta_i(t)}{dt} = \Phi(t) + \frac{C}{K}\cdot\frac{d\vartheta_i(t)}{dt}$$

Die meteorologischen Grössen fassen wir in einer gebäudespezifischen Wetterfunktion $\Phi(t)$ zusammen, welche die Aussentemperatur $\vartheta_a(t)$ mit der Sonnenintensität $I(t)$ mittels dem gebäudespezifischen Parameter γ kombiniert:

$$(6)\quad \Phi(t) = \vartheta_a(t) + \gamma\cdot I(t)$$

wobei wir

(7) $\gamma = G/K$ als das Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis und weiterhin

(8) $\tau = C/K$ als die Zeitkonstante des Raumes bezeichnen.

Eine Lösung dieser Differentialgleichung (5) mit den stochastischen Grössen $\vartheta_a(t)$ und $I(t)$ ist durch eine Faltung mit einer erzeugenden Funktion möglich, welche daraus die Leerlauftemperatur $\vartheta_i(t)$ erzeugt:

$$(9)\quad \vartheta_i(t) = \frac{1}{\tau}\int_0^\infty e^{-t'/\tau}\cdot \Phi(t-t')\cdot dt'$$

Unter der Leerlauftemperatur verstehen wir dabei den Temperaturverlauf im Inneren, welchem ein Raum ohne Einfluss von Heiz- oder Kühlelementen nur unter dem Einfluss der meteorologischen Grössen folgen würde.

Das Integral (9) muss mit den meteorologischen Stundenwerten für die Aussentemperatur und die Sonneneinstrahlung über ein ganzes Jahr, also 8760 Stunden, numerisch ausgeführt werden. Der grosse Vorteil einer analytischen expliziten Darstellung wie (9) liegt darin, dass man damit auch «synthetische» Klimata via Testfunktionen untersuchen und damit ein besseres Verständnis der Zusammenhänge gewinnen kann.

Der Übergang von einer Punktkapazität zu endlich ausgedehnten Materialschichten kann analytisch exakt durch eine entsprechende Reihenentwicklung gelöst werden. Wenn diese Schichten durch eine Wärmeleitfähigkeit λ, eine spezifische Wärme c und eine Dichte ρ und eine Dicke d charakterisiert sind, erhalten wir eine verallgemeinerte erzeugende Funktion als Lösung:

$$(10)\quad \vartheta_i(t) = \sum_{j=0}^{\infty}\frac{a_j}{\tau_j}\int_0^\infty e^{-t'/\tau_j}\cdot \Phi(t-t')\cdot dt'$$

$$(11a),(11b)\quad \text{wobei } a_j = \frac{2\cdot\beta}{1+\beta+(\beta\cdot\mu_j)^2} \text{ und } \tau_j = \frac{\tau}{\beta\cdot\mu_j^2}$$

$$(12a)\quad \text{mit}\quad \beta = \frac{\lambda}{d\cdot K}\,\frac{A_{\text{Innen}}}{A_{\text{Aussen}}} \text{ und}$$

$$(12b)\quad \mu_j \text{ Lösungen von } \beta\cdot\mu_j = \operatorname{ctg}(\mu_j)$$

Tatsächlich besteht der Unterschied zwischen der ersten (9) und der zweiten (10) erzeugenden Funktion nur aus einem Korrekturfaktor, welcher auf das Speichervermögen oder die Zeitkonstante τ wirkt. Diese Korrektur hängt von einem dritten Parameter β ab, welcher die Randbedingung an der Oberfläche der Wände beschreibt:

$$(13)\quad \vartheta_i(x=0,t) + \beta\cdot d\cdot\left|\frac{d\vartheta_i(x,t)}{dx}\right|_{x=0} = \Phi(t)$$

Der Parameter β hat insofern eine spezielle Bedeutung, als er das Verhältnis des Wärmewiderstandes vom Raum nach aussen zum Widerstand vom Raum in die Speicherschicht hinein darstellt. Ist $\beta \gg 1$, so bedeutet das, dass während dem Aufladeprozess der Speicherschicht fast keine Leistung nach aussen abfliesst, dass also beinahe die ganze eingestrahlte Energie auch wirklich in den Speicher gelangt, hingegen umgekehrt für Werte $\beta \ll 1$ der grössere Teil der Energie schon während dem Aufladevorgang nach aussen entweicht [2].

Mit Hilfe der Gleichung (10) lässt sich die Leerlauftemperatur eines Raumes berechnen. Wenn man Komfortgrenzen definiert:

$$(14)\quad \text{z.B. } 20\,°\text{C} \le \vartheta_i \le 26\,°\text{C}$$

so lässt sich numerisch zu jedem Zeitpunkt die Leistung ausrechnen, welche dem Raum zugeführt (Heizen) oder vom Raum abgeführt (Kühlen) werden muss, damit die Innentemperatur innerhalb der Komfortgrenzen (14) verläuft. Integriert man diese Heiz- respektive Kühlleistungen über das Jahr, so erhält man Grössen, welche den Heiz- respektive Kühlenergiebedarf eindeutig beschreiben:

$$(15)\quad \Omega_{H,K}(\tau,\gamma) = \int_0^{8760\,h}\frac{1}{K}\cdot P_{\text{heiz,kühl}}(\tau,\gamma)\cdot dt$$

Da die Leistungen in der Differentialgleichung in der Form $P_{\text{heiz,kühl}}/K$ also mit der Dimension einer Temperaturdifferenz (Kelvin) auftreten, ergibt ihr Integral über die Zeit die Dimension Ks (Kelvinsekunden, Megakelvinsekunden) oder analog Heizgradtage (1 HGT = 86 400 Ks = 0,0864 MKs).

Die $\Omega_H(\tau,\gamma)$ oder $\Omega_K(\tau,\gamma)$ stellen eindeutige Funktionen der beiden relevanten Raumparameter τ und γ dar und lassen sich damit als dreidimensionale Flächen, sogenannte Klimaflächen, darstellen: Bilder 1, 2 und 3. Da in der Gleichung (1) die Sonnenintensität $I(t)$ vorkommt, ergeben sich verschiedene Klimaflächen für die vier Himmelsrichtungen. Jedem Raum eines Gebäudes kann nach (2), (3), (4) sowie (7), (8) ein Wertepaar (τ,γ) zugeordnet werden. Damit ist bei gegebenem Klima der zugehörige Wert der verallgemeinerten Heizgradtagfunktion $\Omega_H(\tau,\gamma)$ eindeutig bestimmt, und durch Multiplikation mit dem Faktor K kann der Energiebedarf für Heizung oder Kühlung berechnet werden:

$$(16)\quad E_{H,K}(\tau,\gamma,K) = K\cdot\Omega_{H,K}(\tau,\gamma)$$

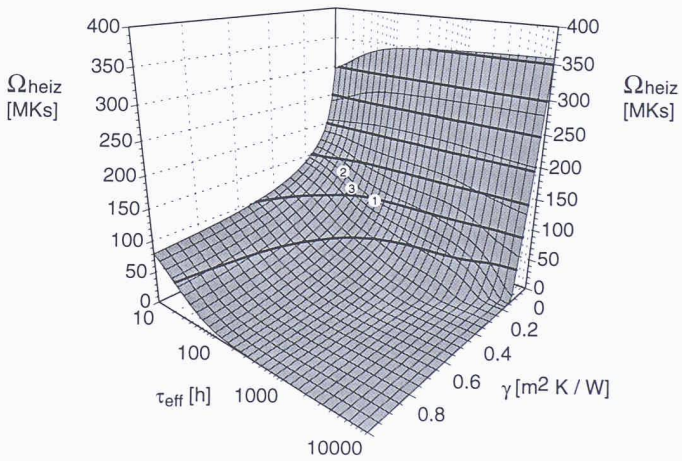

Bild 1.
Heiz-Klimafläche Ω_H als Funktion von τ und γ, mit ϑ_{min} = 20 °C und ϑ_{max} = 26 °C, mit Nachtabsenkung bis auf minimal 12°C, mit optimaler Sonnenschutzregelung, für Zürich 1986, Südfassade

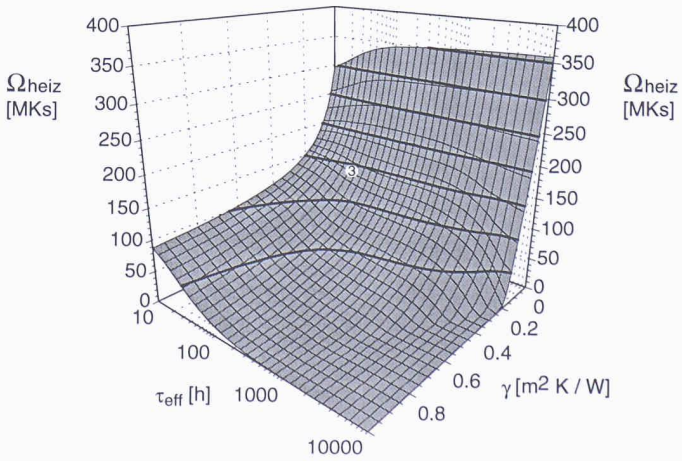

Bild 2.
Heiz-Klimafläche Ω_H als Funktion von τ und γ, mit ϑ_{min} = 20 °C und ϑ_{max} = 26 °C, mit Nachtabsenkung bis auf minimal 12°C, mit optimaler Sonnenschutzregelung, für Zürich 1986, West-/Ostfassade

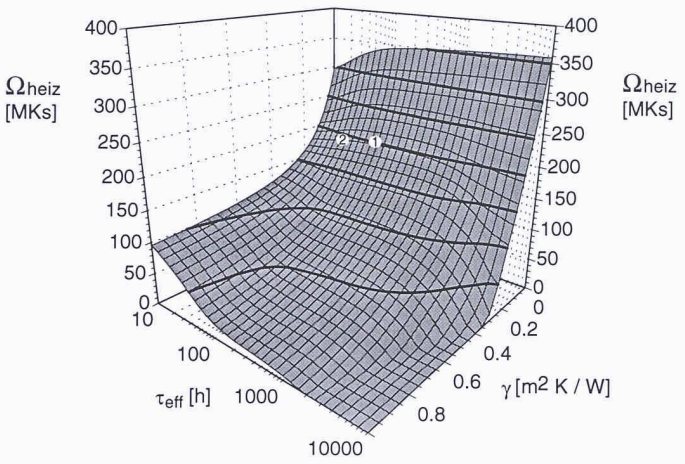

Bild 3.
Heiz-Klimafläche Ω_H als Funktion von τ und γ, mit ϑ_{min} = 20 °C und ϑ_{max} = 26 °C, mit Nachtabsenkung bis auf minimal 12 °C, mit optimaler Sonnenschutzregelung, für Zürich1986, Nordfassade

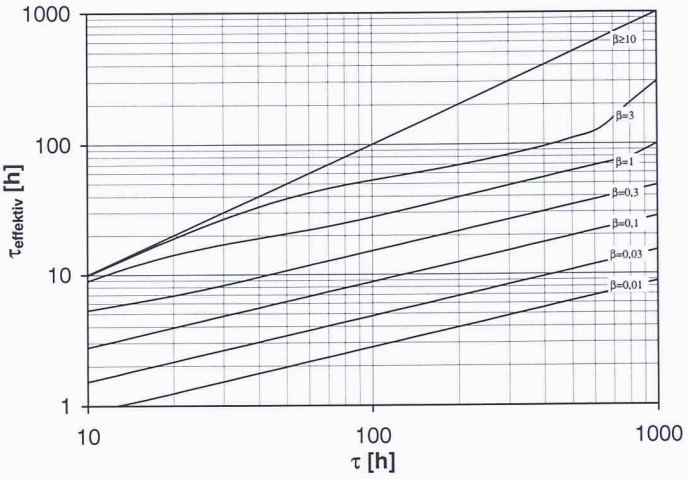

Bild 4.
Nomogramm zur Bestimmung der effektiven Zeitkonstante τ_{eff} mittels τ und β

Der bisher etwas versteckt mitgeschleppte zusätzliche Parameter β kann (und muss!) dadurch berücksichtigt werden, dass anstatt des nach (2), (4) und (8) berechnetem τ ein τ_{eff} verwendet wird, welches man wie folgt erhält:

Für $\beta \geq 10$ gilt: $\tau_{eff} = \tau$
Für $\beta \leq 10$: wird τ_{eff} mittels des Nomogramms (Bild 4) bestimmt:

(17) $\tau_{eff} = f(\tau, \beta)$

Das heisst nichts anderes, als dass bei kleinen Werten von β nur Teile der verfügbaren Speichermassen ausgenützt und damit die Skala auf der τ-Achse geändert wird.

Berechnungsbeispiele

Um in die rechnerische Benützung solcher Klimaflächen einzuführen, zeigen wir an drei Fällen, einem Modulbüro mit zwei verschiedenen Innenaufbauten und einem Eckraum, wie mit Hilfe grober Raumdaten, einem Taschenrechner und den Klimaflächen auf einfache Weise der Energiebedarf für Heizen und Kühlen bestimmt werden kann. Auf die Berücksichtigung der allfälligen inneren Quellen werden wir später eingehen.

Fall 1:

Gegeben sei ein Raum mit den Abmessungen (Innenmasse) gemäss Bild 5. Die Fassade ist eine Aussenfläche, und die übrigen Flächen sind adiabatische Innenflächen (Flächen gegen Räume mit gleichem Raumklima). Es sei ein Massivbau mit teilverglaster Fassade, mit 2fach-Isolierverglasung. Die Kenngrössen des gewählten Raumes sind:

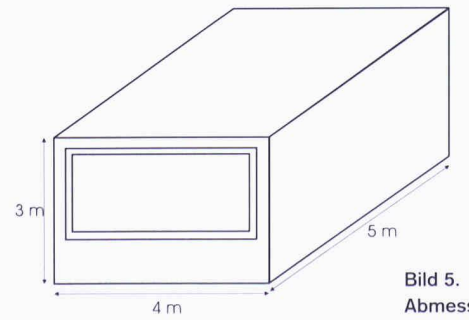

Bild 5.
Abmessungen des Modulbüros

Fassadefläche: $A_{Aussen} = 12\ m^2$
Innenoberfläche (ohne Fassade): $A_{Innen} = 82\ m^2$
Raumvolumen: $V = 60\ m^3$
Decke und Boden: 20 cm Beton, speicherwirksame Dicke $d = 0{,}1$ m (nur die halbe Dicke ist für den Speichervorgang des Raumes zuständig, da die andere Hälfte schon zum Nachbarraum gehört)
$A_{Beton\ Innen} = 40\ m^2$, $\lambda = 1{,}8$ W/mK, $c = 1100$ J/kg K, $\rho = 2400$ kg/m³
Wände: Backstein, $d = 0{,}075$ m (= 0,15 m/2)
$A_{BS\ Innen} = 42\ m^2$, $\lambda = 0{,}44$ W/mK, $c = 900$ J/kg K, $\rho = 1100$ kg/m³
Fenster: Gesamtfensterfläche = 7,5 m²
Rahmen: $A_{Rahmen} = 1{,}5\ m^2$, $k_{Rahmen} = 2{,}9\ W/m^2K$
Glas: 2-IV, $A_{Glas} = 6\ m^2$, $k_{Glas} = 2{,}9\ W/m^2K$, $g_{Glas} = 0{,}78$
Aussenwand: $A_{AW} = 4{,}5\ m^2$, $k_{AW} = 0{,}4\ W/m^2K$
Lüftungsverluste: Luftwechselrate $n = 0{,}5\ h^{-1}$

K-Wert:

$$K = \frac{1}{12\,m^2} \cdot \left[\begin{array}{c} 4{,}5\,m^2 \cdot 0{,}4\,\frac{W}{m^2K} + 1{,}5\,m^2 \cdot 2{,}9\,\frac{W}{m^2K} \\ + 6\,m^2 \cdot 2{,}9\,\frac{W}{m^2K} + \frac{0{,}5\,h^{-1} \cdot 60\,m^3 \cdot 1200\,\frac{J}{m^3K}}{3600\ s/h} \end{array} \right] = 2{,}8\,\frac{W}{m^2K}$$

G-Wert:

$$G = \frac{1}{12\,m^2} \cdot 6\,m^2 \cdot 0{,}78 = 0{,}39$$

γ-Wert:

$$\boxed{\gamma = \frac{G}{K} = \frac{0{,}39}{2{,}8\,W/m^2K} = 0{,}14\,m^2K/W}$$

Effektiver τ-Wert:

$$\tau_{Beton} = \frac{A_{Beton\ Innen}}{A_{Aussen}} \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot d}{K} = \frac{40\,m^2}{12\,m^2} \cdot \frac{1100\,J/kgK \cdot 2400\,kg/m^3 \cdot 0{,}1\,m}{2{,}8\,W/m^2K}$$
$$= 314 \cdot 10^3 s = 87\,h$$

$$\beta_{Beton} = \frac{\lambda}{d \cdot K} \cdot \frac{A_{Innen}}{A_{Aussen}} = \frac{1{,}8\,W/mK}{0{,}1\,m \cdot 2{,}8\,W/m^2K} \cdot \frac{40\,m^2}{12\,m^2} = 21{,}3$$

$$\tau_{Beton\ eff} = f(\tau = 87\,h, \beta = 21{,}3) \cong 87\,h$$

$$\tau_{BS} = 93 \cdot 10^3 s = 26\,h, \quad \beta_{BS} = 7{,}4$$

$$\tau_{BS\ eff} = f(\tau = 26\,h, \beta = 7{,}4) \cong 25\,h$$

$$\boxed{\tau_{eff} = \tau_{Beton\ eff} + \tau_{BS\ eff} \cong 112\,h}$$

Der Raum ist durch die Parameter $\tau_{eff} = 112$ h und $\gamma = 0{,}14$ m²K/W bestimmt. Falls der Raum nach Süden ausgerichtet ist, bekommt man für Zürich:

$\Omega_H(\tau_{eff} = 112\text{ h}, \gamma = 0{,}14) = 95$ MKs,

$E_H = K \cdot \Omega_H = 2{,}8\ \text{W/m}^2\text{K} \cdot 95\ \text{MKs} = 266\ \text{MJ/m}^2_{\text{Fassadefläche}}$

Die heizenergiebezogene Energiekennzahl (Nutzenergie) ist dann:

$E_{heiz} = 266\ \text{MJ/m}^2 \cdot 12\ \text{m}^2 / 20\ \text{m}^2 = \boxed{160\ \text{MJ/m}^2\ \text{a}}$

Falls nach Norden ausgerichtet:

$E_{heiz} = 200\ \text{MKs} \cdot 2{,}8\ \text{W/m}^2\text{K} \cdot 12\ \text{m}^2 / 20\ \text{m}^2 = 336\ \text{MJ/m}^2\ \text{a}$

Fall 2:

Gleicher Raum wie bei Fall 1, bis auf die Innenwände und Böden:

Holz, $d = 0{,}05\ \text{m}, \lambda = 0{,}14 \frac{\text{W}}{\text{m K}}, c = 2160 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}, \rho = 470 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Es ändert sich nur τ_{eff}:

$\tau = 124 \cdot 10^3\ \text{s} = 34\ \text{h}, \beta = 6{,}8,$

$\boxed{\tau_{eff} \cong 33\ \text{h}}$

Der Raum ist durch die Parameter $\tau_{eff} = 33$ h und $\gamma = 0{,}14$ m² K/W bestimmt.

Südausrichtung:

$E_{heiz} = 130\ \text{MKs} \cdot 2{,}8\ \text{W/m}^2\ \text{K} \cdot 12\ \text{m}^2 / 20\ \text{m}^2 = \boxed{218\ \text{MJ/m}^2\ \text{a}}$

Nordausrichtung:

$E_{heiz} = 190\ \text{MKs} \cdot 2{,}8\ \text{W/m}^2\ \text{K} \cdot 12\ \text{m}^2 / 20\ \text{m}^2 = 319\ \text{MJ/m}^2\ \text{a}$

Fall 3:

Eckraum mit den gleichen Dimensionen wie im Fall 1, wobei eine seitliche Wand jetzt auch zur Fassade gehört und auch ein Fenster besitzt.

Fassadefläche:	A_{Aussen}	$= 27\ \text{m}^2$
Innenoberfläche (ohne Fassade):	A_{Innen}	$= 67\ \text{m}^2$
Wände:	$A_{BS\ Innen}$	$= 27\ \text{m}^2$
Fenster:	A_{Rahmen}	$= 3{,}4\ \text{m}^2, A_{Glas\ 1} = 6\ \text{m}^2, A_{Glas\ 2} = 7{,}5\ \text{m}^2$
Aussenwand:	A_{AW}	$= 10{,}1\ \text{m}^2$

Die restlichen Grössen wie im Fall 1.

K-Wert:

$K = 2{,}34\ \text{W/m}^2\text{K}$

G-Werte:

$G_1 = 6\ \text{m}^2/27\ \text{m}^2 \cdot 0{,}78 = 0{,}17,\ G_2 = 7{,}5\ \text{m}^2/27\ \text{m}^2 \cdot 0{,}78 = 0{,}22$

γ-Wert:

$\boxed{\gamma = (G_1 + G_2)/K = 0{,}17\ \text{m}^2\text{K/W}}$

Effektiver τ-Wert:

$\tau_{Beton} = 167 \cdot 10^3\ \text{s} = 46\ \text{h}, \quad \beta_{Beton} = 11{,}4, \quad \tau_{Beton\ eff} \cong 46\ \text{h}$

$\tau_{BS} = 32 \cdot 10^3\ \text{s} = 9\ \text{h}, \quad \beta_{BS} = 2{,}51, \quad \tau_{BS\ eff} \cong 9\ \text{h}$

$\boxed{\tau_{eff} = \tau_{Beton\ eff} + \tau_{BS\ eff} \cong 55\ \text{h}}$

Der Raum ist durch die Parameter $\tau_{eff} = 55$ h und $\gamma = 0{,}17$ m²K/W bestimmt. Falls die kleinere Fassade nach Süden und die grössere nach Westen ausgerichtet ist, bekommt man für Zürich:

$\Omega_H = G_1/(G_1+G_2) \cdot \Omega_H(\tau = 55\ \text{h}, \gamma = 0{,}17, \text{süd})$

$+ G_2/(G_1+G_2) \cdot \Omega_H(\tau = 55\ \text{h}, \gamma = 0{,}17, \text{west})$

$= 0{,}44 \cdot 110\ \text{MKs} + 0{,}56 \cdot 140\ \text{MKs} = 127\ \text{MKs}$

$E_H = K \cdot \Omega_H = 2{,}34\ \text{W/m}^2\text{K} \cdot 127\ \text{MKs} = 297\ \text{MJ/m}^2_{\text{Fassadefläche}}$

$E_{heiz} = 297\ \text{MJ/m}^2 \cdot 27\ \text{m}^2 / 20\ \text{m}^2 = \boxed{401\ \text{MJ/m}^2\ \text{a}}$

Klimaflächen

Die Werte der verallgemeinerten Heizgradtagfunktion für $\gamma = 0\ \text{m}^2\text{K/W}$ ergeben die Heizgradtage früherer Zeiten, allerdings unter Berücksichtigung der Wetterdaten des betrachteten Jahres und der Trägheit des Raumes.

Der Verlauf der Klimaflächen zeigt generell, dass die ausschlaggebende Bedeutung für den Heizenergiebedarf beim Faktor *K* liegt, sowohl als Multiplikator wie auch als Divisor in τ und γ. Eine Erhöhung der Entladezeitkonstante τ und/oder des Gewinn-zu-Verlust-Verhältnisses γ führt fast immer zu einer Reduktion des Heizenergiebedarfes. In beinahe jedem Klima existieren Parameterbereiche für τ und γ, für welche durch rein passive Massnahmen der Heizenergiebedarf annähernd Null wird.

Völlig analog wie der Heizbedarf lässt sich auch der Kühlbedarf bestimmen (Bild 6). Für diese Kühlflächen gehen wir davon aus, dass ein Sonnenschutz optimal (nach der Innentemperatur gesteuert) eingesetzt wird und dass seine Auswirkung in einer Reduktion der Gesamtenergietransmission der transparenten Flächen bis auf 20% des ursprünglichen Wertes bestehe. Wie man aus Bild 6 ersieht, existiert ein Bereich ($\tau \geq \tau_{min}, \gamma \leq \gamma_{max}$) für den der Kühlenergiebedarf den Wert Null hat.

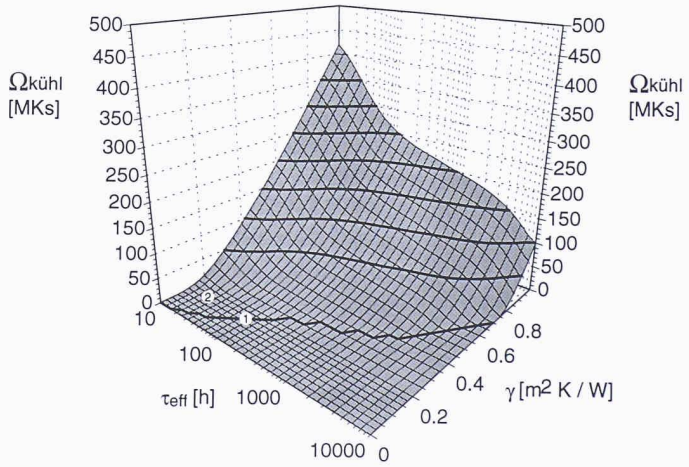

Bild 6.
Kühl-Klimafläche Ω_K als Funktion von τ und γ, mit $\vartheta_{min} = 20$ °C und $\vartheta_{max} = 26$ °C, mit Nachtabsenkung bis auf minimal 12°C, mit optimaler Sonnenschutzregelung, für Zürich1986, Südfassade

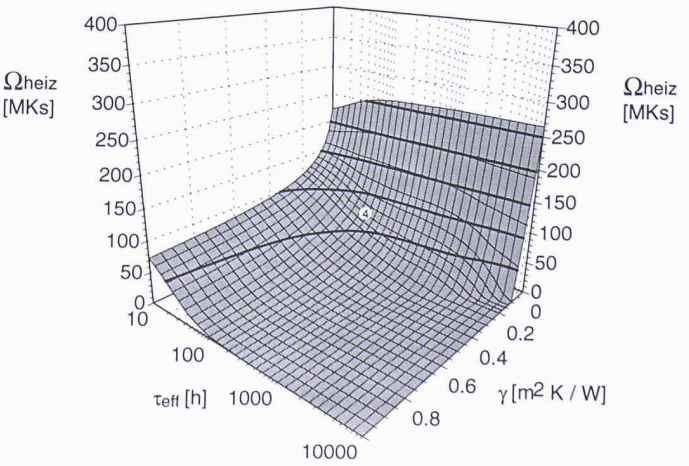

Bild 7.
Heiz-Klimafläche Ω_H als Funktion von τ und γ, mit $\vartheta_{min} = 20$ °C und $\vartheta_{max} = 26$ °C, mit Nachtabsenkung bis auf minimal 12°C, mit optimaler Sonnenschutzregelung, mit internen Quellen: $P_{int}/K = 10$K, für Zürich 1986, Südfassade

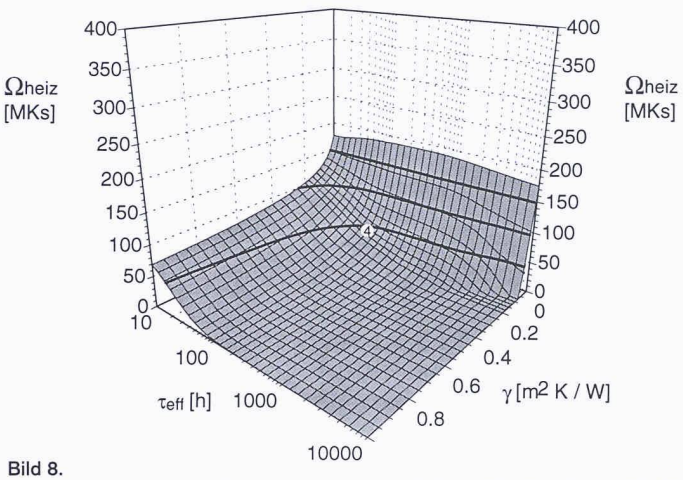

Bild 8.
Heiz-Klimafläche Ω_H als Funktion von τ und γ, mit ϑ_{min} = 20 °C und ϑ_{max} = 26 °C, mit Nachtabsenkung bis auf minimal 12 °C, mit optimaler Sonnenschutzregelung, mit internen Quellen: P_{int}/K = 20 K, für Zürich 1986, Südfassade

Die Berücksichtigung interner Quellen P_{int} stellt insofern ein Problem dar, als sie mit dem Faktor $1/K$ (also Dimension einer Temperatur anstatt einer Leistung) in der Gleichung vorkommen. Man kann dieser Tatsache wie folgt Rechnung tragen. Man berechnet mehrere Klimaflächen mit unterschiedlichen P_{int}/K, beispielsweise 10 K oder 20 K (Bilder 7, 8). Die inneren Quellen werden entsprechend dem zu erwartenden Einsatz über eine bestimmte Zeit, beispielsweise 8 bis 18 Uhr, eingesetzt. Für jeden Wert von P_{int}/K erhält man eine eigene Klimafläche. Hat man nun einen Raum, bei dem eine innere Leistung von P_{int} installiert ist, so kann man durch Division durch den Wert K dieses Raumes den zutreffenden Wert von P_{int}/K und damit die zugehörige Klimafläche finden. Für Werte zwischen den Klimaflächen ist es einfach zu interpolieren. Als Beispiel greifen wir den Fall 1 aus den Berechnungsbeispielen wieder auf.

Fall 4:

Gleiche Situation wie im Fall 1, wobei zusätzlich eine innere Quellenleistung von 30 W/m² pro Bodenfläche angenommen wird, d.h. 50 W/m² pro Fassadenfläche. So ergibt sich:

$P_{int}/K = 50/2{,}8 = 18\,\mathrm{K}$,

$\Omega_H(\tau_{eff} = 112\,\mathrm{h},\ \gamma = 0{,}14,\ P_{int}/K = 18\,\mathrm{K}) \cong 50$ MKs (Bilder 7, 8),

$E_{heiz} = 50\ \mathrm{MKs} \cdot 2{,}8\,\mathrm{W/m^2\,K} \cdot 12\,\mathrm{m^2}/20\,\mathrm{m^2} = \boxed{84\ \mathrm{MJ/m^2\,a}}$ (Süd)

$E_{heiz} = 100\ \mathrm{MKs} \cdot 2{,}8\,\mathrm{W/m^2\,K} \cdot 12\,\mathrm{m^2}/20\,\mathrm{m^2} = \boxed{168\ \mathrm{MJ/m^2\,a}}$ (Nord)

Erste Folgerungen

Durch den sehr allgemeingültigen Ansatz (1) ist es gelungen, die Beziehung zwischen Gebäude (Raum) und Klima auf einige wenige Parameter zu reduzieren:

- den verallgemeinerten Verlustfaktor oder k-Wert: K,
- die Entladezeitkonstante τ als Mass für die thermische Trägheit,
- das Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis γ als Mass für die Berücksichtigung des solaren Beitrages,
- den Parameter β als Widerstandsverhältnis zwischen dem thermischen Widerstand vom Raum nach aussen zu demjenigen vom Raum in die Speicherschichten hinein als Mass für die Speicherausnützung.

Die allgemeingültige Formulierung und die exakte mathematische Lösung der Gleichungen erlauben sehr generelle Schlussfolgerungen und verschiedene vertiefte Einsichten in den Zusammenhang zwischen Gebäude und Klima. Insbesondere lassen sich beispielsweise klare Aussagen über die gebäudedynamische Nutzung der solaren Beiträge oder über Regelstrategien machen. Darauf werden wir in einem weiteren Artikel näher eingehen.

Obwohl wir es eigentlich mit vier Parametern zu tun haben, erlaubt die Form der Differentialgleichung, diese so zu ordnen, dass wir eine anschauliche Darstellung als dreidimensionale Fläche $\Omega_{H,K}(\tau(\beta),\gamma)$ erhalten. Der Verlustfaktor K kann als separater Faktor bei der Umrechnung auf die Energie behandelt werden. Der Parameter β überträgt sich als Massstabsänderung auf die τ-Achse. Aus der Position eines Raumes auf der Klimafläche lässt sich unmittelbar ablesen, was beispielsweise getan werden muss, um den Heiz- oder Kühlenergiebedarf zu verringern:

- den Faktor K verkleinern,
- auf der Fläche in Richtung des steilsten Abstieges fortschreiten.

Die Form der Fläche zeigt sofort, wo man mit Vorteil vor allem die Entladezeitkonstante τ oder wo man besser das Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis γ vergrössert.

Da die nötigen Parameter aus sehr einfachen und frühzeitig verfügbaren Grössen eines Raumes schon mit Hilfe eines Taschenrechners bestimmt werden können, hoffen wir damit für den praktischen Gebrauch in der Frühphase der Planung ein geeignetes Planungsinstrument geschaffen zu haben. Eine Implementierung als geeignetes, visuell orientiertes und interaktives PC-Programm ist mittelfristig vorgesehen.

Adresse der Verfasser:
Harald Burmeister, dipl. Phys. ETH, und *Bruno Keller*, Prof. Dr. sc. nat., Institut für Hochbautechnik, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich.

Literatur:

[1]
Burmeister H., Dissertation ETHZ 1995.
[2]
Keller B., Spezialfragen der Bauphysik, Vorlesungen Nr.4 und 5, ETH Zürich 1994/95.