Energieeffiziente Bauten: Grundlagen für intelligente Planer energiesparsamer Bauten

Autor(en): **Keller, Bruno / Magyari, Eugen**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 7

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-79877

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bruno Keller, Eugen Magyari, Zürich

Energieeffiziente Bauten

Grundlagen für intelligente Planer energiesparsamer Bauten

Jeder intelligente Planer würde es schätzen, wenn er die wesentlichsten Zusammenhänge für die Energie- und Leistungsbedürfnisse eines Gebäudes in einfacher Form möglichst bildhaft zur Verfügung hätte. Untersuchungen an der ETHZ haben zu solchen Grundlagen geführt und erlauben eine intelligente Planung bereits in der frühesten Planungsphase eines Objektes.

Die Planung von energie-effizienten Bauten blickt auf eine lange Geschichte zurück: hunderte von Publikationen, Konferenzen, Demonstrations- und Pilotgebäuden und inzwischen Simulationsprogrammen aber auch viele Dutzend fehlgeschlagene Bauten säumen den Weg. Trotz diesem grossen Aufwand bestehen bis heute keine klaren Aussagen darüber, was denn an einem Raum für seinen (thermischen) Energie- und Leistungsbedarf wesentlich sei und wie diese Grössen mit dem Klima zusammenhängen.

Einführung und Zielsetzung

In der Folge der vielen, meist einer physikalischen und damit verstehbaren Grundlage entbehrenden Versuche in der Praxis, haben sich einige mehr oder weniger akzeptierte Grundprinzipien herauskristallisiert (unter anderem das Minergie-Prinzip). Diese Grundprinzipien sind aber meist nur beschränkt oder überhaupt nicht auf andere Klimata oder Bautypen übertragbar.

Der intelligente Planer würde es eigentlich schätzen, wenn er statt einer Black-Box mit vielen Input-Parametern und einem Output mit schönen farbigen Darstellungen klare und verstehbare Zusammenhänge zur Verfügung hätte, an Hand derer er schon in der Frühphase des Entwurfs- und Planungsprozesses in die richtige Richtung steuern könnte.

Aus diesem Grunde wurden an der Professur für Bauphysik schon vor Jahren diese Zusammenhänge untersucht und zwar von den physikalischen Grundlagen ausgehend und damit allgemeingültig für jedes Klima und für jeden Bau. Als ein Resultat wurde vor einiger Zeit die Methode der Klimaflächen vorgestellt [1-3]. Diese ist inzwischen an verschiedenen Orten im In- und Ausland im Gebrauch.

Nach einer gewissen Reifezeit ist es nun möglich, die Quintessenz dieser Arbeiten in einigen wenigen, einfachen und damit für den Praktiker verwendbaren Grundsätzen und Regeln auszudrücken. Einige davon haben auch in der neuen Norm SIA 180 (Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau) Eingang gefunden [4].

Die Grundlagen

In einer ersten aber noch recht guten Näherung lässt sich die thermische «Qualität» eines Raumes durch seine mittlere Raumtemperatur beschreiben. Sie entspricht im allgemeinen der mittleren Strahlungstemperatur bedingt durch die raumbegrenzenden Oberflächen, korrigiert um den, meist geringen, Einfluss der Luftinfiltration. Solange diese Raumtemperatur sich im Komfortbereich zum Beispiel zwischen 20 und 26 °C befindet, ist es den Bewohnern wohl und keine haustechnischen Massnahmen wie heizen oder kühlen sind notwendig. Betrachtet man also die Temperaturentwicklung eines Raumes unter dem Einfluss des Klimas allein (und eventuell unter dem Einfluss seiner Bewohner) so lässt sich sofort sagen, wann haustechnischer Energiesatz nötig sein wird: nämlich genau dann, wenn die Raumtemperatur den Komfortbereich zu verlassen droht. Dieser Temperaturverlauf wird als die Leerlauftemperatur oder natürliche Temperaturententwicklung des Raumes bezeichnet. Sie ist in der Tat die aussschlaggebende Beurteilungsgrösse für den thermischen Energie- und Leistungsbedarf (Bild 1).

Der Verlauf der Leerlauftemperatur lässt sich mit Hilfe eines sehr allgemeingültigen Naturgesetzes, dem Energiesatz berechnen: In seiner Leistungsform bedeutet er nichts anderes, als dass die Differenz zwischen der zufliessenden und der wegfliessenden Leistung noch vorhanden sein muss:

$$G \cdot I(t) + P_{HK} + P_{int} - K \cdot (\vartheta_i(t) - \vartheta_a(t)) = \frac{dQ}{dt}$$

Herein - Hinaus = Zuwachs

$$K = \frac{1}{A_a} \cdot \left[\sum_k A_{ak} \cdot U_k + n \cdot V \cdot \frac{(c \cdot p)_{Luft}}{3600} \right]$$

= verallgemeinerter Verlustfaktor, [W/m²K]

$$G = \frac{1}{A_a} \cdot \sum_k A_{transp-k} \cdot g_k$$

= mittlere Gesamtenergietransmission [-]

Q: Wärmeeintrag in die inneren Speichermassen [J/m²]

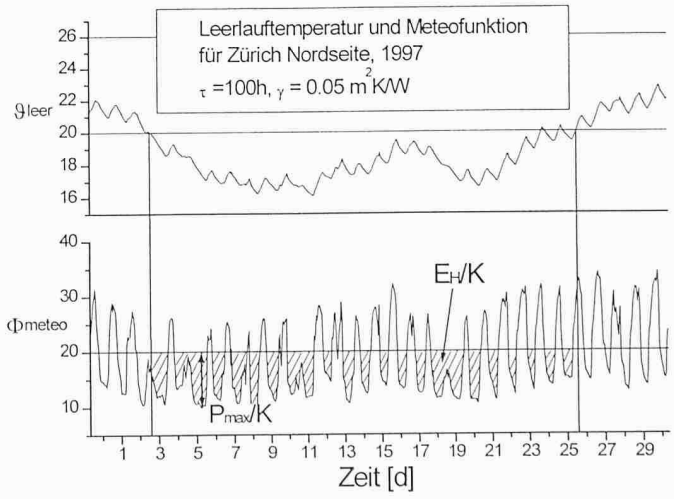
P_{HK}: Leistungsabgabe der haustechnischen Elemente [W/m²]:

$P_{HK} > 0$: heizen, $P_{HK} < 0$: kühlen

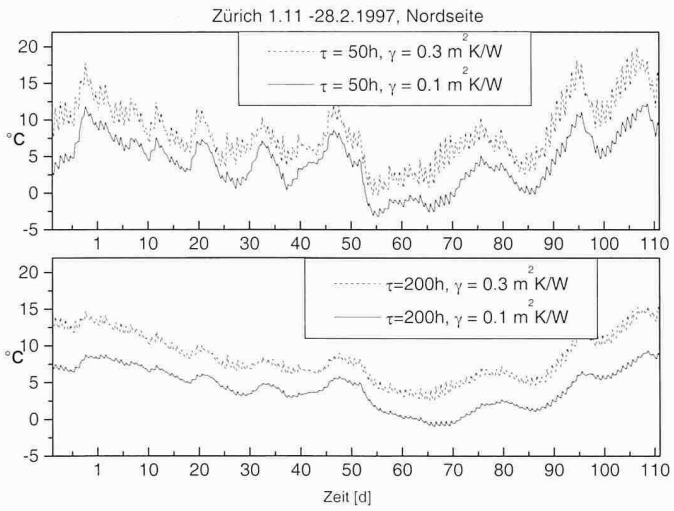
P_{int}: Beitrag der inneren Quellen [W/m²]

Alles bezogen auf die Aussenfläche A_a (=Energieaustauschoberfläche)

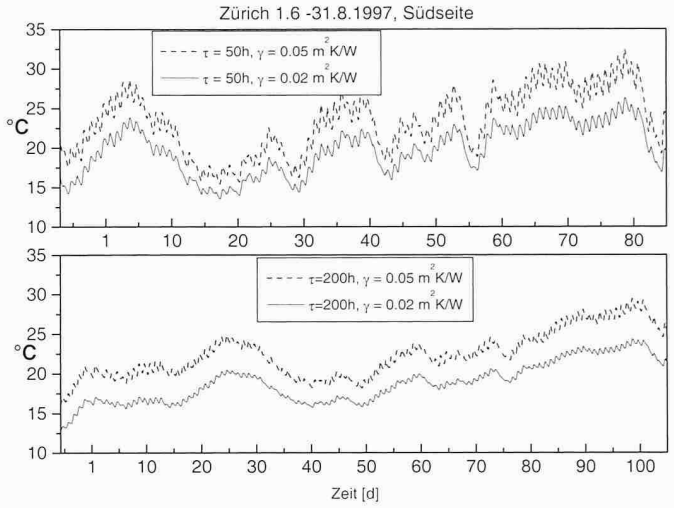
Jeder Raum lässt sich so behandeln, wenn man einige wenige und plausible Annahmen macht:



1
Der Zusammenhang zwischen Leerlauftemperatur und Energie- und Leistungsbedarf



2
Der Einfluss von γ und τ auf den Verlauf der Leerlauftemperatur im Winter



3
Der Einfluss von γ und τ auf den Verlauf der Leerlauftemperatur im Sommer

- Der thermische Zustand eines Raumes lässt sich durch eine mittlere Temperatur in guter Näherung beschreiben.
- Die instationäre Durchwirkung durch die opaken Aussenwände lässt sich vernachlässigen (was bei massiven Wänden bei heutigen U-Werten zutrifft, Leichtbauwände können als «pseudo-transparente» Elemente behandelt werden).

Massgebend für den Wärmeeintrag in die inneren Speichermassen ist deren Speichervermögen C (in J/m²K). Es konnte gezeigt werden [5, 6], dass dieses auch für den instationären dynamischen Fall durch das statische Speichervermögen

$$C = \frac{A_i}{A_a} \cdot c \cdot p \cdot d \quad \text{mit} \quad d \leq \frac{\sigma}{\sqrt{2}}$$

$$\text{und } \sigma = \sqrt{\frac{T}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot p}} \quad [m]$$

beschrieben werden kann, wenn man die Randbedingungen in einem Raum beachtet. Das einzige «dynamische» dabei ist die Wärmeeindringtiefe σ und die Tatsache, dass für $d \leq \sigma/\sqrt{2}$ die Speicherkapazität durch den Wert der Wärmeeindringzahl

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot p} \text{ auf } C = \frac{A_i}{A_a} \cdot \sqrt{\frac{T}{2\pi}} \cdot b$$

begrenzt ist. Dies lässt sich exakt aus der mathematisch-physikalischen Untersuchung des dynamischen Verhaltens ableiten [5, 6].

Formt man obige Gleichung etwas um, so erhält man eine informative Darstellung für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Rauminnentemperatur respektive der Leerlauftemperatur:

$P_{HK} = 0$, $P_{int} = 0$

$$\vartheta_i(t) + \tau \cdot \frac{d\,\vartheta_i(t)}{dt}$$

$$= \vartheta_a(t) + \gamma \cdot I(t) + \left\{\frac{P_{HK}}{K} + \frac{P_{int}}{K}\right\}$$

$$\tau = \frac{C}{K} \quad [s, h] = \text{Zeitkonstante des Raumes}$$

$$\gamma = \frac{G}{K} \quad [m^2K/W] = \text{Gewinn-zu-Verlustverhältnis, solarer Korrekturfaktor}$$

$$\vartheta_a(t) + \gamma \cdot I(t) \equiv \Phi(t)$$

= Meteofunktion («Sonnenlufttemperatur»)

Das heisst nichts anderes, als dass der zeitliche Verlauf der Leerlauftemperatur eines Raumes durch genau zwei wesentliche Grössen bestimmt wird: die Zeitkonstante und den solaren Korrekturfaktor, die wiederum durch die drei Grundgrössen: K, G und C bestimmt sind. Die entscheidende Rolle spielen aber weder K noch G noch C sondern die beiden Kombinationen τ und γ, was weiter unten in seinen Auswirkungen diskutiert werden wird.

Aus dieser Gleichung lässt sich, wenn die Werte von Aussentemperatur und solarer Einstrahlung bekannt sind, der Verlauf der Leerlauftemperatur exakt berechnen. Hier sei nur die vereinfachte Form für relativ dünne Speicherschichten angegeben, für dicke Schichten wird der Ausdruck komplizierter, aber am Prinzip ändert sich nichts [5, 6]:

$$\vartheta_i(t;\tau,\gamma) = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\infty}^{t} e^{-(t-t')/\tau} \cdot \left[\vartheta_a(t') + \gamma \cdot I(t')\right] \cdot dt'$$

Die Zeitkonstante spielt also die Rolle der Länge des thermischen Gedächtnisses des Raumes (je grösser τ, an desto weiter zurückliegende Zustände des Wetters «erinnert» sich der Raum noch) und der solare Korrekturfaktor γ berücksichtigt den Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die wirksame Aussentemperatur.

Die Rolle der Haustechnik ist also keine andere als die, den Einfluss des Wetters so zu korrigieren, dass die resultierende Innentemperatur im Komfortbereich liegt:

$$\vartheta_{min} - (\vartheta_a(t) + \gamma \cdot I(t)) = \frac{P_H}{K}$$

$$\vartheta_a(t) + \gamma \cdot I(t) - \vartheta_{max} = \frac{P_K}{K}$$

$$P_H = K \cdot \left[\vartheta_{min} - \vartheta_a(t)\right] - G \cdot I(t)$$

Berechnet man das Maximum des Abstandes von den Komfortgrenzen über ein Jahr, so erhält man die Leistungsmaxima, das heisst die Auslegungsleistungen. Die damit verbundenen maximalen Abweichungen der Meteofunktion von den Komfortgrenzen sind nichts anderes als die Auslegungstemperaturen (-differenzen) und da die Leerlauftemperatur von τ und γ abhängt, lassen sich diese Auslegungstemperaturdifferenzen als Flächen darstellen: *Leistungsflächen*

$$\Pi_H(\tau,\gamma) = \text{Max}\left\{\vartheta_{min} - \phi(t;\gamma,\tau)\right\} = \frac{P_{Hmax}(\tau,\gamma)}{K}$$

$$\Pi_H(\tau,\gamma) = \text{Max}\left\{\phi(t;\gamma,\tau) - \vartheta_{min}\right\} = \frac{P_{Kmax}(\tau,\gamma)}{K}$$

$[\Pi(\tau,\gamma) = \text{Kelvin (K)}]$

Die aufgewendete Energie ist nichts anderes als das Zeitintegral über die Leistung:

$$E_H = \int_{t_1}^{t_2} P_H(t;\tau,\gamma)\cdot dt$$

$$= K\cdot\int_{t_1}^{t_2} [\,\vartheta_{min} - \phi(t;\tau,\gamma)\,]\cdot dt$$

$$= K\cdot\Omega_H(\tau,\gamma)$$

Die Zeitintegrale über die Temperaturdifferenzen sind wiederum nur von τ und γ abhängig und damit als Flächen darstellbar: *Energie- oder Klimaflächen*. Dies wurde bereits früher dargestellt [1-3].

Das Interessante an diesen Folgerungen ist, dass sie alle durch die Leerlauftemperatur und ihre Abhängigkeit von τ und γ bestimmt sind. In der Tat stellt sich heraus, dass die Leerlauftemperatur für jeden denkbaren Raum in jedem denkbaren Klima die wesentlichste thermische Grösse ist und sie eindeutig durch das Klima einerseits und die beiden Raumparameter τ und γ andererseits bestimmt ist.

Damit lässt sich bereits eine universelle Optimierungsstrategie für Bauten mit niedrigem Energie- und Leistungsbedarf formulieren:

Man konstruiere einen Raum so, dass seine Leerlauftemperatur im Laufe des Jahres möglichst wenig häufig über die Komfortgrenzen hinaus läuft.

Das Planungsvorgehen

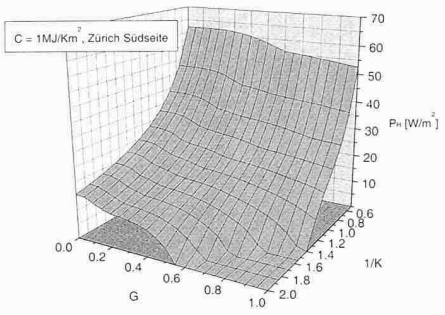
Um die obige Strategie auch umsetzen zu können, muss man wissen, welchen konkreten Einfluss die beiden Parameter τ und γ auf die Leerlauftemperatur haben. Es lässt sich leicht zeigen, dass sowohl die Aussentemperatur als auch die Einstrahlung sich in guter erster Näherung durch eine harmonische Funktion (sin/cos) darstellen lassen [5]. Zudem gilt nach Fourier, dass sich alle genügend «zahmen» Funktionen durch eine Fourierreihe darstellen lassen. Daraus folgt, dass auch die Leerlauftemperatur eine harmonische Funktion sein muss:

$$\vartheta_i(t) = \overline{\vartheta}_i + \Delta\vartheta_i\cdot\sin(\omega\cdot t) \qquad \omega = \frac{2\cdot\pi}{T} \qquad T = 24\,h$$

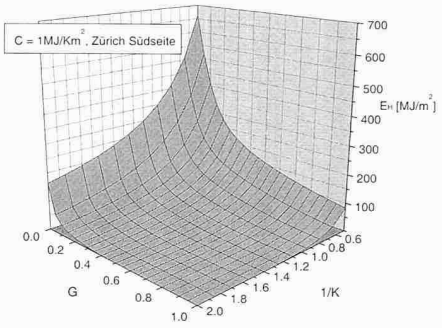
$$\overline{\vartheta}_i = \overline{\vartheta}_a + \gamma\cdot I \qquad \Delta\vartheta_i = \frac{T}{2\cdot\pi\cdot\tau}\cdot(\Delta\vartheta_a + \gamma\cdot\Delta I)$$

Daraus folgt unmittelbar bei einer Vergrösserung von γ:

- Verschiebung des Tagesmittelwertes $(\overline{\vartheta}_i)$ zu höheren Werten
- Vergrösserung der Tagesschwankungen $(\Delta\vartheta_i)$



4
Der Heizleistungsbedarf P_H bezogen auf die Aussenfläche (W/m²) (Südseite, 20°– 26 °C, Zürich), mittlerer Schwerbau C = 1 MJ/m²K



5
Der Heizenergie E_H bezogen auf die Aussenfläche (MJ/m²a) (Südseite, 20°– 26 °C, Zürich), mittlerer Schwerbau C = 1 MJ/m²K

Bei einer Vergrösserung von τ:

- Tagesmittelwert $(\overline{\vartheta}_i)$ unbeeinflusst
- Verringerung der Tagesschwankungen $(\overline{\vartheta}_i)$

Damit ist die Umsetzung der Strategie in jedem Klima klar (Bild 2, 3):

- Es gilt durch die Wahl von γ zuerst den Mittelwert so nahe wie möglich an die Komfortgrenzen heran und eventuell ins Komfortband hinein zu schieben. Sowohl für den Extremwinter als auch den Extremsommer.
- Dadurch können allfällig zu stark angewachsene Schwankungen durch die Wahl von τ wieder reduziert werden, damit die Abweichungen von den Komfortgrenzen möglichst klein gehalten werden können.

Was bedeutet nun konkret die Wahl von γ respektive τ ?

$\gamma = \frac{G}{K}$ vergrössern bedeutet:

- G gross machen: Fensterflächen gross, Gesamtenergiedurchlass g gross
- K klein machen: U-Wert klein, Luftinfiltration klein, letzteres kann auch durch die Benutzung einer Wärmerückgewinnung erreicht werden, da dadurch der energetisch relevante Luftwechsel reduziert wird.

$\gamma = \frac{G}{K}$ verkleinern bedeutet:

- G klein machen: Fensterflächen klein, Gesamtenergiedurchlassgrad g klein (Sonnenschutzverglasung), Sonnenschutz
- K gross machen: U-Wert gross, Luftinfiltration gross (zum Beispiel Nachtlüftung)

$\tau = \frac{C}{K}$ vergrössern bedeutet:

- C gross machen: grosse Innenoberflächen, Material mit grosser Wärmeeindringzahl

$b = \sqrt{\lambda\cdot c\cdot\rho}$, Schichtdicke $d = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}$

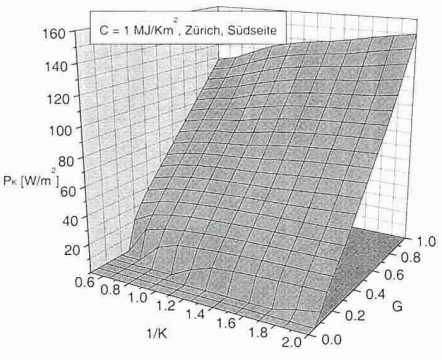
- K klein machen: U-Wert klein, Luftinfiltration klein, s. auch oben unter γ

Im Winter wird man γ genügend gross wählen müssen und im Sommer genügend klein. Der Widerspruch zwischen diesen beiden Anforderungen ist durch variable Elemente: Sonnenschutz, variabler Luftwechsel und ähnliches zu bewältigen.

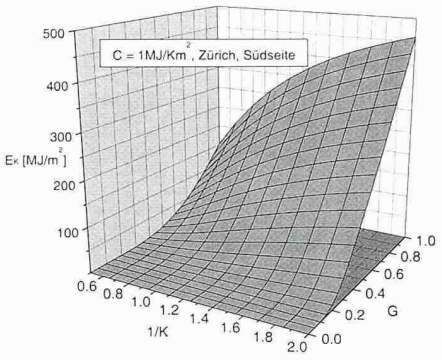
Aus Untersuchungen am schweizerischen Klima mit Hilfe der Leistungs- und der Energieflächen lässt sich ableiten, dass für die Vermeidung von Kühlbedarf bei durchschnittlich genutzten Bauten im schweizerischen Mittelland der solare Korrekturfaktor γ unterhalb von 0,2 m²K/W und die Zeitkonstante τ eher über 100 h gehalten werden sollte. Diese Werte haben deshalb Eingang in die Norm SIA 180 gefunden.

Zwei nützliche Werkzeuge

Die vorherigen Ausführungen haben die Zusammenhänge und die Bedeutung der beiden Schlüsselparameter für die Planung in Worten und in Gleichungen erläutert. Für die praktische Tätigkeit wird man gerne letztlich auf bildliche und leicht lesbare Darstellungen zurückgreifen.



6
Der Kühlleistungsbedarf P_K bezogen auf die Aussenfläche (W/m²) (Südseite, 20°– 26 °C, Zürich), mittlerer Schwerbau C = 1 MJ/m²K



7
Der Kühlenergiebedarf E_K bezogen auf die Aussenfläche (MJ/m²a) (Südseite, 20°– 26 °C, Zürich), mittlerer Schwerbau C = 1 MJ/m²K

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Darstellung mit Leistungs- und Energieflächen zwar physikalisch sehr elegant und richtig ist, aber häufig zu Fehlinterpretationen führt, weil nicht direkt die Leistung oder die Energie abgelesen werden kann, sondern der abgelesene Wert von $\Pi(\tau,\gamma)$ respektive $\Omega(\tau,\gamma)$ noch mit dem Faktor K multipliziert werden muss. Es wäre deshalb wünschenswert, direkt diese beiden Grössen: Leistung und Energie, ablesen zu können. Dazu hat der Raum aber zuwenig Dimensionen oder man hat zu viele Variable. Zudem machen dem Praktiker die beiden Grundgrössen γ und τ, weil ungewohnt, meist etwas Mühe.

In Anbetracht dessen, dass die Speicherkapazität von Räumen meist innerhalb derselben Bauweise nicht stark variiert (reiner Holzbau: $C \cong 0{,}3$ MJ/m²K, massiv gemischt BS/B: $C \cong 1{,}1$ MJ/m²K, massiv Beton: $C \cong 1{,}7$ MJ/m²K) wurde deshalb eine neue, dem Praktiker mehr entgegenkommende Darstellungsweise entwickelt: Der Energie- respektive Leistungsbedarf (in MJ/m²y respektive W/m²) wird für drei verschiedene «typische» Speicherkapazitäten direkt als Funktion von G und K dargestellt. Aus Gründen des Flächenverlaufs wird dabei anstatt K der Kehrwert 1/K (der Entladewiderstand des Raumes) verwendet (Bilder 4 bis 7). Wenn man für einen bestimmten Raum den mittleren Gesamtenergiedurchlassgrad G und den Verlustfaktor K berechnet und über die Bauweise etwa die Speicherkapazität abgeschätzt hat, bleibt nur noch das Herauslesen aus den Grafiken und letztlich die Umrechnung von den aussenflächenbezogenen Grössen auf grundflächenbezogene übrig, um konventionell gebräuchliche Werte für Energie- und Leistungsbedarf zu erhalten. Ein den Klimaflächen entprechendes, aber die neue Darstellung verwendendes Softwaretool zum eleganten «Herumturnen» auf diesen Darstellungen ist zur Zeit in Vorbereitung und wird an der Professur für Bauphysik zu beziehen sein.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Autoren hoffen, mit den obigen Ausführungen gezeigt zu haben, dass sich das dynamische Verhalten beliebiger Bauten in einem beliebigen Klima verstehen lässt und dass dazu nur ganze drei Parameter K, G und C nötig sind, wenn man geneigt und in der Lage ist den Überlegungen zu folgen. Das erstaunliche daran ist, dass dazu eigentlich nur zwei, mehr als 100 Jahre alte und universell gültige Gesetze notwendig sind: der Energiesatz (vor 1900) und der Satz von Fourier (vor 1800). Es hat sich allerdings gezeigt, dass die üblicherweise verwendeten Parameter wie U-Wert, Energietransmission und Speicherkapazität allein nicht genügen, sondern daraus die richtigen Kombinationen γ und τ gebildet werden müssen um eine problemadäquate und damit fruchtbare Beschreibung zuzulassen. Dies erklärt, weshalb auf der Basis der traditionellen Parameter derart viele widersprüchliche Untersuchungen und Behauptungen publiziert worden sind (siehe auch Norm SIA 382/2 und 384/2 und 380/1).

Eine Folgerung aus den obigen Überlegungen ist, dass es mit Hilfe der Leerlauftemperatur und den drei Schlüsselparametern K, γ und τ in jedem denkbaren Klima für jeden denkbaren Bau möglich ist, eine Lösung zu finden, welche unter den gegebenen Umständen den kleinsten Energie- und/oder Leistungsbedarf aufweist und zwar sowohl für das Heizen wie für das Kühlen und unabhängig von der Haustechnik. Alle Überlegungen und Untersuchungen betreffend sogenannter «passiver (Solar)-Häuser» sind damit ein für alle mal erledigt. Die erläuterte Methode berücksichtigt exakt alle solaren Beiträge in dem Masse, wie sie durch den Bau innerhalb der Komfortgrenzen aufgenommen werden können.

Eine weitere Folgerung besteht darin, dass es möglich ist, einen Bau auf einen geringen thermischen Energie- und Leistungsbedarf auszulegen und dass dann die Haustechnik aufgerufen ist, die so geschaffenen Bedingungen mit der notwendigen technischen Phantasie für eine entsprechend effiziente und kostengünstige Bedarfsdeckung zu nutzen. Darauf wird später genauer eingegangen.

Adresse der Verfasser:
Bruno Keller, Prof. Dr., Professor für Bauphysik, Institut für Hochbautechnik, ETHZ, *Eugen Magyari*, Dr., Oberassistent Professur für Bauphysik, Institut für Hochbautechnik, ETHZ

Literatur

[1]
Burmeister H., Keller B.: Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata. SI+A Nr. 21 und 23, 1995

[2]
Burmeister H., Keller B.: Climate surfaces: a quantitative building-specific representation of climates. Energy and Building 28, p. 167-177, Zürich 1998

[3]
Burmeister H., Keller B.: Analyse und Darstellung der Wechselwirkung zwischen Klima und Gebäude: Klimaflächen. Bauphysik 19, Hefte 1 und 2, 1997

[4]
Norm SIA 180: Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau. Ausgabe 1999

[5]
Keller B. : Klimagerechtes Bauen. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 1997

[6]
Keller B., Magyari E.: Eine allgemeingültige Strategie für die gleichzeitige Minimierung des Energie- und Leistungsbedarfes für Heizen und Kühlen. Forschungsbericht Nr. 5/1998 der Professur für Bauphysik ETHZ, Zürich 1998