

Karl Petzold
Roland Martin

Raumklima bei freier Klimatisierung

In Europa wird während der warmen Jahreszeit nur selten Luftkühlung in Anspruch genommen; meistens begnügt man sich, falls die Gebäudefunktion nicht Konstantklima fordert, mit freier Klimatisierung. Das Raumklima stellt sich dann „von selbst“ (autogen, frei) ein: im Zusammenwirken des Außenklimas mit den Nutzungsparametern und den thermischen und hygri-schen Eigenschaften des Gebäudes. Einfluß darauf haben besonders der Wärmeschutz des Gebäudes, die Wärme- und Feuchtespeicherung in der Baukonstruktion sowie die Lüftung. Dieses Zusammenwirken wurde in [1] näher untersucht¹ und ein Verfahren zur Berechnung des Raumklimas formuliert, das außer der Wärme- auch die Feuchtespeicherung berücksichtigt. Dieses wird im folgenden erläutert und damit u. a. ein praktikables Verfahren zur Bemessung des sommerlichen Wärmeschutzes und der während der warmen Jahreszeit benötigten Lüftung begründet. Außerdem wird auf die veränderten Anforderungen an die Lüftung von Gebäuden hingewiesen, die nach dem gegenwärtigen Standard (Wärmeschutzverordnung) wärme-geschützt sind².

1 Wärmespeicherung in der Baukonstruktion

Eine harmonische Schwingung der Außenlufttemperatur $\bar{\Theta}_{e,p}$ verursacht bekanntlich im Raumin-nern eine harmonische Schwingung $\bar{\Theta}_{R,p}$ der Raumlufttemperatur [3, S. 50 ff.] Das Verhältnis, in dem diese zueinander stehen, wird von der thermischen Übertragungsfunktion

$$\bar{F}_{T,p} \equiv \frac{\bar{\Theta}_{R,p}}{\bar{\Theta}_{e,p}} = \frac{W_L + \frac{1}{\bar{\Theta}_{e,p}} \cdot \sum_i \bar{Q}_i}{W_L + \sum_j (\bar{B}_{p,j} \cdot A_j)} \quad (1)$$

beschrieben. Darin ist der Wärmewert (Wärmekapazitätsstrom) des als konstant vorausgesetzten Förderstromes \dot{V} der Lüftungseinrichtungen

$$W_L = \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_L \quad (2)$$

(ρ_L = Dichte, c_L = spezifische Wärmekapazität der Luft). Außerdem haben die i Komponenten der Wärmelast \bar{Q}_i sowie das Wärmeabsorptionsvermögen der Baukonstruktion, das durch die speichernden Flächen A_j der Raumschließungsflächenkonstruktion und deren Wärmeabsorptionskoeffizienten $\bar{B}_{p,j}$ gegeben ist, darauf Einfluß.

Der Wärmeabsorptionskoeffizient an der raumseitigen Oberfläche des Bauteiles j ist bekanntlich

$$\bar{B}_{p,j} = \frac{\alpha_{c,j} \cdot \bar{Y}_{p,j}}{\alpha_{c,j} + \bar{Y}_{p,j}} \quad (3)$$

$\alpha_{c,j}$ ist der Konvektions-Wärmeübergangskoeffizient an der raumseitigen Oberfläche des Bauteiles j und $\bar{Y}_{p,j} \equiv \bar{Y}_{p,k,j}$ die thermische Admittanz der an der raumseitigen Oberfläche liegenden Schicht $n = k$. Die besonders von Vlas-sow [4], Muromow [5] und Sklover [6] eingeführte thermische Admittanz (in der deutschsprachigen Literatur früher als „Schichtspeicher-koeffizient U“ bezeichnet) ist für eine Schicht n [1, S. 17] [7, S. 62 ff.] [8, S. 614 ff.]

$$\bar{Y}_{n,p,j} = S_{n,p,j} \sqrt{i} \cdot \frac{\tanh(R_{n,j} \cdot S_{n,p,j} \sqrt{i}) + \frac{\bar{Y}_{n-1,p,j}}{S_{n,p,j} \sqrt{i}}}{1 + \tanh(R_{n,j} \cdot S_{n,p,j} \sqrt{i}) \cdot \frac{\bar{Y}_{n-1,p,j}}{S_{n,p,j} \sqrt{i}}} \quad (4)$$

$$R_{n,j} = \frac{d_{n,j}}{\lambda_{n,j}} \quad (5)$$

Room climate by using free air conditioning

A procedure for the calculation of the room climate, which results from free air conditioning under consideration of the heat storage and the moisture storage in the material of the building. A practicable procedure for the calculation of the ventilation needed during extreme summer weather periods is delivered herewith. This is shown specially for buildings with large or moderate heat storage capacity (housings, office buildings and so on) in addition, it can be transferred to buildings with extremely large (e. g. huge building monuments) and with small heat storage capacity (e. g. intensively ventilated industrial buildings, extreme lightweight constructions). Buildings, which receive a more effective thermal insulation for the decrease of the heating requirement (in accordance with thermal insulation regulations), need, in order to be able to keep reasonable room air temperatures, while in the warm season a more intensive ventilation is necessary than in buildings without this thermal insulation. Frequently for ventilation systems are needed where in former times window or joint ventilation was sufficient. In buildings with light interior construction it can even be necessary to use air cooling or air conditioning systems.

Keywords: room climate, heat storage, moisture storage, free air conditioning, calculation method

ist der stationäre Wärmeleitwiderstand der Schicht n ($d_{n,j}$ = Dicke der Schicht n; $\lambda_{n,j}$ = Wärmeleitfähigkeit). Mit dem Wärmeeindringkoeffizienten

$$b_{n,j} = \frac{\lambda_{n,j}}{\sqrt{a_{n,j}}}$$

ist der Wärmespeicherkoeffizient

$$S_{n,p,j} = b_{n,j} \cdot \sqrt{\omega \cdot p} \quad (6)$$

(ω = Kreisfrequenz der Grundschiwingung; p = Ordnungszahl; $a_{n,j}$ = Temperaturleitfähigkeit der Schicht n).

Für eine mehrschichtige (k-schichtige) Wand j ist $\bar{Y}_{n,p,j}$ aus der Admittanz $\bar{Y}_{n-1,p,j}$ der Schicht (n-1), die in Wellen-transportrichtung hinter der Schicht n liegt, zu berechnen, und zwar schrittweise, beginnend mit der Schicht $n = 1$ an der umgebungsseitigen Oberfläche, für die $\bar{Y}_{n-1,p,j} = \alpha_{e,g,j}$ ist, bis hin zur Schicht $n = k$ an der raumseitigen Oberfläche

Prof. (em.) Dr. sc. techn. K. Petzold, Dipl.-Phys. R. Martin, Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden

1 Diese Arbeit [1] war Teil eines Schwerpunktprogrammes „Bauphysik der Außenwände“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

2 Erweiterte Fassung eines Vortrages auf dem Internationalen Bauphysikkongreß 1997 am 25. und 26. Sept. 1997 an der TU Berlin [2]

($\alpha_{e,g,j}$ = Gesamtwärmeübergangskoeffizient an der umgebungsseitigen Oberfläche der Wand j).

Bei symmetrisch belasteten Bauteilen (z. B. Innenwände, Raumausstattung) ist auf der Mittellinie $\dot{Y}_{n-1,p,j} = 0$, und folglich wird bei ihnen für die Schicht $n = 1$ mit Gl. (4)

$$\bar{Y}_{1,p,j} = S_{1,p,j} \sqrt{i} \cdot \tanh(R_{1,j} \cdot S_{1,p,j} \sqrt{i}).$$

Ist der Wärmeträgheitskoeffizient einer Schicht n

$$R_{n,j} \cdot S_{n,j} \geq 1, \quad (8a)$$

so wird mit Gl. (4)

$$\bar{Y}_{n,p,j} \approx S_{n,p,j} \sqrt{i}. \quad (9)$$

In diesem Falle ist die Admittanz der Schicht n in hinreichender Näherung unabhängig von der in Wellentransportrichtung dahinterliegenden Schicht ($n-1$). Die Schicht n verhält sich so, als wäre sie unendlich dick, und wird deswegen als „thermisch unendlich dick“ bezeichnet. Folglich nimmt – auch bei einer mehrschichtigen Wand – nur ein oberflächennaher Bereich der Dicke d_{Sp} Einfluß auf die Dämpfung der Raumlufttemperatur. Kriterium ist ein Wärmeträgheitskoeffizient

$$\sum_{n=m}^k (R_{n,j} \cdot S_{n,p=1,j}) = 1, \quad (8b)$$

der sich über die Schichten $m \dots k$ erstreckt, und zwar für die Grundschiwingung (Ordnungszahl $p=1$), die tiefer eindringt als die Oberschwingungen. Tiefer liegende Bereiche nehmen am Dämpfungsvorgang nicht teil; Einfluß hat nur die durch Gl. (8b) für die Grundschiwingung definierte „thermisch speicherwirksame Dicke“ d_{Sp} . Diese ist für eine k -schichtige Wand [7, S. 71 ff.]

$$d_{Spk} = \sqrt{\frac{a_k}{\omega}},$$

wenn $R_{k,j} \cdot S_{k,p=1,j} > 1$ (10a)

$$d_{Spk} = d_k + (1 - R_k \cdot S_{k,p=1,j}) \sqrt{\frac{a_{k-1}}{\omega}},$$

wenn $R_{k,j} \cdot S_{k,p=1,j} \geq 1$, (10b)

aber $R_{k,j} \cdot S_{k,p=1,j} + R_{k-1,j} \cdot S_{k-1,p=1,j} \geq 1$

ist, usf. bis zur Schicht m . Bei „schweren“ Baustoffen (Beton, Ziegelmauerwerk) beträgt die speicherwirksame Dicke im Tagesgang (Schwingungsdauer 24 h) etwa $d_{Sp} = 0,10$ m, im Jahresgang (Schwingungsdauer 8760 h) etwa $d_{Sp} = 1,6 \dots 2,0$ m und bei „schnellen“ Schwingungen (z. B. Regelschwingungen) nur wenige mm. Bei „leichten“ Baustoffen und Dämmstoffen ist die speicherwirksame Dicke etwas geringer als bei „schweren“.

Die Außenlufttemperatur $\vartheta_e(t)$ ist die Führungsgröße der Raumlufttempera-

tur $\vartheta_R(t)$. Entwickelt man den zeitlichen Gang der Außenlufttemperatur in eine Fourier-Reihe mit den Fourier-Koeffizienten a_p und b_p , so ist mit der termischen Übertragungsfunktion $\bar{F}T_p$ nach Gl. (1) der Jahresgang der Raumlufttemperatur

$$\vartheta_R(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{\dot{Q}_{S,a} + \dot{Q}_{N,a} + \dot{Q}_{TS,a}}{W_L + W_{T,a}} + \sum_{p=1}^N [\operatorname{Re}(\bar{F}T_p) \cdot \operatorname{Re}(\bar{\Theta}_{e,p}) - \operatorname{Im}(\bar{F}T_p) \cdot \operatorname{Im}(\bar{\Theta}_{e,p})] \quad (11)$$

Der Realteil der Außenlufttemperaturschwingungen

$$\operatorname{Re}(\bar{\Theta}_{e,p}) = a_p \cdot \cos(\omega \cdot p \cdot t) + b_p \cdot \sin(\omega \cdot p \cdot t)$$

gibt die gemessenen Werte wieder, der Imaginärteil

$$\operatorname{Im}(\bar{\Theta}_{e,p}) = a_p \cdot \sin(\omega \cdot p \cdot t) - b_p \cdot \cos(\omega \cdot p \cdot t)$$

ergänzt diesen zur komplexen Fourier-Reihe für die Außenlufttemperatur. U. U. kann es (z. B. zur Fixierung von Eckwerten) zweckmäßig sein, diese Beziehung zu vereinfachen, indem man sich auf den Realteil $\operatorname{Re}(\bar{\Theta}_{e,p})$ beschränkt; man vernachlässigt dann die – häufig geringe – Phasenverschiebung. ($\dot{Q}_{S,a}$ = Jahresmittel der Strahlungslast; $\dot{Q}_{N,a}$ = Jahresmittel der nutzungsbedingten [inneren] Wärmelast; $\dot{Q}_{TS,a}$ = Jahresmittel des Anteils der Transmissionswärmelast, der durch die außen an den Bauteilen absorbierte Sonnenenergie verursacht wird; $W_{T,a}$ = Jahresmittel des Wärmestromes des Transmissionswärmestromes; t = Zeit. Ist der Monatsgang oder auch der Tagesgang zu berechnen, sind dafür die entsprechenden Monatsmittel [Index m] bzw. Tagesmittel [Index d] zu setzen.) Ein Beispiel zeigt Bild 1a.

2 Feuchtespeicherung in der Baukonstruktion

Eine analoge Entwicklung ist für den Wasserdampfgehalt $x_R(t)$ der Raumluft möglich [9], [10], wenn man den Wasserdampfgehalt $x_e(t)$ der Außenluft in eine Fourier-Reihe mit den Fourier-Koeffizienten aH_p und bH_p entwickelt. Der Jahresgang des Wasserdampfgehaltes der Raumluft ist:

$$x_R(t) = \frac{aH_0}{2} + \frac{\dot{M}_{D,a}}{M_L} + \sum_{p=1}^N [\operatorname{Re}(\bar{F}H_p) \cdot \operatorname{Re}(\bar{x}_{e,p}) - \operatorname{Im}(\bar{F}H_p) \cdot \operatorname{Im}(\bar{x}_{e,p})]$$

mit dem Realteil der Schwingungen des Wasserdampfgehaltes der Außenluft

$$\operatorname{Re}(\bar{x}_{e,p}) = aH_p \cdot \cos(\omega \cdot p \cdot t) + bH_p \cdot \sin(\omega \cdot p \cdot t)$$

und dem Imaginärteil

$$\operatorname{Im}(\bar{x}_{e,p}) = aH_p \cdot \sin(\omega \cdot p \cdot t) - bH_p \cdot \cos(\omega \cdot p \cdot t)$$

($\dot{M}_{D,a}$ = Jahresmittel der Wasserdampfemission im Gebäude; $M_L = \dot{V} \cdot \rho_L$ = Massestrom der Lüftung). Für andere Zeiträume (z. B. Monat, Tag) ist wie in Gl. (11) zu verfahren. Die hygrische Übertragungsfunktion ist analog zu Gl. (1)

$$\bar{F}H_p = \frac{\bar{x}_{R,p}}{\bar{x}_{e,p}} = \frac{\dot{M}_L + \frac{\dot{M}_{D,p}}{\bar{x}_{e,p}}}{\dot{M}_L + \sum_j (\bar{B}H_p \cdot A_j)} \quad (13)$$

Die Speicherung von Wasserdampf in der Baukonstruktion wird durch den hygrischen Absorptionskoeffizienten

$$\bar{B}H_{p,j} = \frac{\sigma \cdot \bar{Y}H_{p,j}}{\sigma + \bar{Y}H_{p,j}} \quad (14)$$

beschrieben mit dem Stoffübergangskoeffizienten σ ($\approx 10 \dots 12 \text{ kg/m}^2\text{h}$) und der hygrischen Admittanz der Schicht n

$$\bar{Y}H_{n,p,j} = SH_{n,p,j} \sqrt{i} \cdot \frac{\tanh(RH_{n,j} \cdot SH_{n,p,j} \sqrt{i}) + \frac{\bar{Y}H_{n-1,p,j}}{SH_{n,p,j} \sqrt{i}}}{1 + \tanh(RH_{n,j} \cdot SH_{n,p,j} \sqrt{i}) \cdot \frac{\bar{Y}H_{n-1,p,j}}{SH_{n,p,j} \sqrt{i}}} \quad (15)$$

Unter der – in der Regel erfüllten – Voraussetzung, daß im oberflächennahen Bereich der Transport des Wasserdampfes vorwiegend oder sogar ausschließlich durch Diffusion erfolgt, daß Phasenübergänge (durch Verdampfung oder Kondensation) dort also zu vernachlässigen sind, können die bei der Wasserdampfspeicherung wirksamen Stoffeigenschaften der Raumschließungs-konstruktion durch die Dampfleitfähigkeit λ_D und die Dampfdruckleitfähigkeit a_D , die von Häupl [11] formuliert worden sind, beschrieben werden. Bei gleicher Temperatur nehmen die Baustoffe auf diese Parameter in guter Näherung spezifischen Einfluß nur durch ihre Diffusionswiderstandszahl μ [-] nach Kriecher und durch die Gleichgewichtsfeuchte des Stoffes bei Sättigung H [-]. Bei Temperaturen nahe der Raumlufttemperatur ergibt sich

$$\lambda_D = \frac{0,113}{\mu} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{h}} \right] \text{ und } a_D = \frac{1,40 \cdot 10^{-6}}{\mu \cdot H} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{h}} \right] \quad (16)$$

Damit sind in Gl. (15) der hygrische Speicherkoeffizient

$$SH_{n,p} = 95,0 \cdot \sqrt{\frac{H_n}{\mu_n} \cdot \omega \cdot p} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \quad (17a)$$

und der hygrische Widerstand der d_n [m] dicken Schicht n

$$RH_n = \frac{d_n}{\lambda_{D,n}} = \frac{d_n \cdot \mu_n}{0,113} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{h}}{\text{kg}} \right] \quad (17b)$$

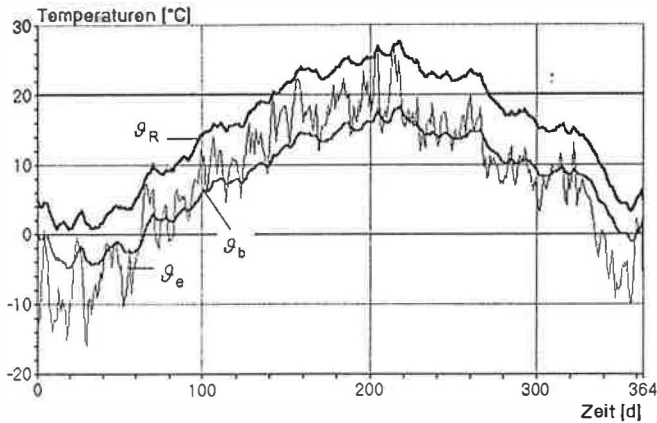


Bild 1a Jahresgang der Außenlufttemperatur ϑ_e , der Raumlufttemperatur ϑ_R und der Basistemperatur ϑ_b in einem freistehenden, 1geschossigen, nicht unterkellerten Wohngebäude bei ganzjährig konstantem Förderstrom ($\frac{\dot{V}}{A_B} = 1,0 \text{ m}^3/\text{h je m}^2$ Bruttogeschossfläche) und zeitlich konstanter innerer Wärmelast. (Zeit in Tagen [d] vom Jahresanfang an)

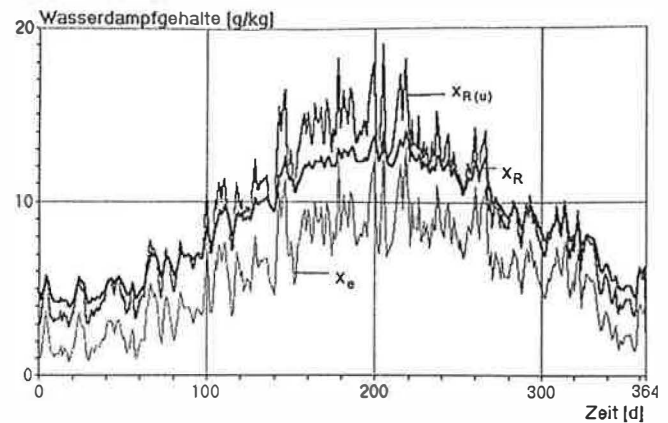


Bild 1b Jahresgang des Wasserdampfgehaltes der Außenluft x_e , der Raumluft x_R (gedämpft) und der Raumluft $x_{R(u)}$ (unge-dämpft) in einem freistehenden, 1geschossigen, nicht unterkellerten Wohngebäude bei ganzjährig konstantem Förderstrom ($\frac{\dot{V}}{A_B} = 1,0 \text{ m}^3/\text{h je m}^2$ Bruttogeschossfläche) und zeitlich konstanter Wasserdampfbelast. (Zeit in Tagen [d] vom Jahresanfang an)

Die Anwendbarkeit dieser Beziehungen und damit insbesondere auch die Zulässigkeit der hier vereinbarten Randbedingungen ist inzwischen u. a. durch Vergleiche mit Messungen im Meißner Dom [12] verifiziert worden.

Die hygrische Admittanz $\tilde{Y}_{H,n,p}$ der Schicht n wird auch von der hygrischen Admittanz $\tilde{Y}_{H,n-1,p}$ der Schicht $(n-1)$, die in Wellentransportrichtung hinter der Schicht n liegt, beeinflusst. Jedoch können die Wände hinsichtlich der Wasserdampfspeicherung meistens als 1schichtig betrachtet werden, weil die Eindringtiefe der Wasserdampfwelle gering ist und sich der Einfluß der Wasserdampfspeicherung auf die Dämpfung der Raumluftfeuchte (bei Vorgängen, die weniger als etwa 1 Monat andauern) auf den Innenputz beschränkt. Die hygrisch speicherwirksame Dicke ist analog zu Gl. (10a) für die Grundschwingung

$$dHS_{pk} = \sqrt{\frac{a_{D,k}}{\omega}} \approx \frac{1,18 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\omega \cdot \mu_k \cdot H_k}} [\text{m}]. \quad (18)$$

Sie beträgt bei Belastungen im Tagesgang (Schwingungsdauer 24 h) nur wenige mm, bei Belastungen im Jahresgang (Schwingungsdauer 8760 h) liegt sie bei 0.1 m, ist also wesentlich geringer als die thermisch speicherwirksame Dicke nach Gl. (10). An der Dämpfung der Schwingungen der Raumlufttemperatur ist also ein erheblich größerer Teil der Wanddicke beteiligt als an der Dämpfung der Schwingungen des Wasserdampfgehaltes. Aus diesem Grunde ist die thermische Speicherung wirksamer als die hygrische, wenn man sie mit dem jeweiligen Einfluß der Lüftung vergleicht; woraus wiederum resultiert, daß Veränderungen des Förderstromes den Wasser-

dampfgehalt stärker beeinflussen als die Temperatur der Raumluft [10].

Nicht nur die Änderungen der Raumlufttemperatur (Bild 1a), sondern auch die Änderungen des Wasserdampfgehaltes (Bild 1b) werden durch die Speicherung in der Baukonstruktion deutlich gedämpft. Während der warmen Jahreszeit wird durch Dämpfung des Jahresganges der Wasserdampfgehalt der Raumluft verringert, während der kalten Jahreszeit wird der gespeicherte Wasserdampf zusätzlich zur aktuellen Wasserdampfemission wieder freigesetzt. Die Wasserdampfspeicherung kann eine „Sommerkondensation“ verhindern, d.h. einen Tauwasserniederschlag, der während der warmen Jahreszeit in manchen „schweren“, nur mäßig gelüfteten Bauwerken auftritt. Während der kalten Jahreszeit hingegen ist der über längere Zeiträume gemittelte Wasserdampfgehalt x_R im Gebäude höher, als man ihn aus den Außenklimawerten errechnet, wenn man die Feuchtespeicherung nicht berücksichtigt (Bild 1b). Die Gefahr eines Tauwasserniederschlags ist also größer als meist angenommen.

Bei zeitlich veränderter Wasserdampfemission kann die Dämpfung des Wasserdampfgehaltes während der kalten Jahreszeit die Gefahr eines Tauwasserniederschlags aber auch verringern. Diese Gefahr ist bekanntlich am größten im Frühjahr, wenn der Wasserdampfgehalt x_e der Außenluft schon verhältnismäßig hoch ist. Zu dieser Zeit ist der während der kalten Jahreszeit dominierende Wasserdampf-Entladevorgang im wesentlichen schon abgeschlossen. Unter üblichen Nutzungsbedingungen ist die Wasserdampfbelastung meistens nicht konstant, sondern wird in sporadi-

schen, jeweils nur kurze Zeit andauernden Nutzungsphasen emittiert (Bild 2), und diese „schnellen“ Schwingungen werden wesentlich wirksamer gedämpft als der Jahresgang (vgl. Bild 1b, das für eine zeitlich konstante Wasserdampfbelastung gilt, und Bild 2, in dem eine im Tagesrhythmus schwankende Wasserdampfbelastung vorausgesetzt ist). Dadurch kann u. U. der Anstieg dieser Spitzenwerte des Wasserdampfgehaltes auf kritische Werte unterbunden werden.

Traditionell verfügen Wohnbauten über einen gut speichernden Innenputz sowie über eine große, an der Feuchtespeicherung beteiligte Raumumschließungsfläche je Einheit Geschossfläche. Diese sorgen, wenn nicht mehr gelüftet wird als erforderlich, dafür, daß während der kalten Jahreszeit die relative Feuchte kaum einmal unter etwa 50 % sinkt (Bild 2). In Bürobauten hingegen sind die Räume häufig sehr groß, die speicher-

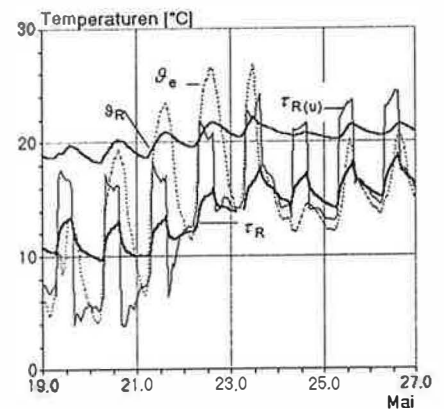


Bild 2 Einfluß der Feuchtespeicherung auf den Wasserdampfgehalt bzw. auf die Taupunkttemperatur ($\tau_{R(u)}$ ohne / τ_R mit Speicherung) im Mai

wirksame Oberfläche der Raumschließungsstruktur also klein, wenn man sie ebenfalls auf die Geschosfläche bezieht, und neuerdings werden dort auch Bauelemente (und Raumausstattungen) mit geringer Wasserdampf-Speicherfähigkeit eingesetzt. Da außerdem die Emission der Feuchtequellen in den Büroräumen – verglichen mit denen in einer Wohnung – gering, die Lüftung aber vergleichsweise intensiv ist, kann die relative Feuchte im Winter dort wesentlich niedriger liegen, als von der Wohnung her gewohnt. Die Luft in den Büroräumen wird bekanntermaßen zeitweilig als „trocken“ empfunden, und eine der Ursachen dieses dem Sick-Building-Syndrom zugeordneten Phänomens dürfte das geringe Feuchtespeichervermögen dieser Gebäude sein.

Die Speicherung des Wasserdampfes in der Raumluft, wie sie in Kirchen und anderen großen, mäßig gelüfteten Gebäuden durchaus relevant sein kann, ist erheblich weniger wirksam als die Speicherung in der Baukonstruktion und kann dieser gegenüber meistens vernachlässigt werden [10].

Auch wenn das Gebäude im Winter geheizt wird, stellt sich der Wasserdampfgehalt ganzjährig, also auch während der Heizphase, frei ein (Bild 1b) – falls nicht eine Klimaanlage für konstanten Wasserdampfgehalt sorgt. Erzwungene und freie Klimatisierung können also koexistieren: Erstere erstreckt sich auf die Raumlufttemperatur, letztere gilt für den Wasserdampfgehalt, der sich in Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt der Außenluft, der Wasserdampfemission im Innern des Gebäudes, der Feuchte-speicherung und der Lüftung einstellt.

3 Sommerlicher Wärmeschutz

3.1 Modell

Die Raumlufttemperatur wird bei freier Klimatisierung durch die Außenlufttemperatur geprägt, und durch die Außenlufttemperatur verursachte Änderungen des Raumklimas klingen wesentlich langsamer ab als die meist nur kurze Zeit andauernden Änderungen der Wärmelast. Deswegen ist es sinnvoll, den Einfluß der nutzungsbedingten (inneren) Wärmelast \dot{Q}_N , der Strahlungslast \dot{Q}_S sowie der Komponente \dot{Q}_{TS} von dem der Außenlufttemperatur ϑ_e zu trennen. Setzt man $\dot{Q}_N = \dot{Q}_S = \dot{Q}_{TS} = 0$, so ist nur noch die Außenlufttemperatur ϑ_e wirksam, und unter deren Einfluß stellt sich im Raum die sog. „Basistemperatur“

$$\vartheta_b(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{p=1}^N [\operatorname{Re}(\bar{F}T_{b,p})] \quad (19)$$

$$\operatorname{Re}(\bar{\Theta}_{e,p}) - \operatorname{Im}(\bar{F}T_{b,p}) \cdot \operatorname{Im}(\bar{\Theta}_{e,p})$$

ein mit dem Real- und dem Imaginärteil der Außentemperaturschwingungen nach Gl. (11). (Auch hier kann – u. a. zur Gewinnung von Eckwerten – eine Beschränkung auf den Realteil zweckmäßiger sein.) Die Außenlufttemperatur wirkt nur noch über die Lüftung (W_L) sowie über den Wärmewert (Wärmekapazitätsstrom) des Transmissionswärmestromes

$$\bar{W}_{T,p} = \sum_j \frac{\bar{\alpha}_{g,j,p}}{\beta_{j,p}} \cdot A_j \quad (20)$$

auf die Lufttemperatur im Raum ein. ($\bar{\alpha}_{g,j,p}$ = Wärmeübergangskoeffizient an der raumseitigen Oberfläche [1, S. 23]; $\beta_{j,p}$ = Temperaturamplitudendämpfung [7, S. 87 ff.], [10], für die ein von $\bar{\alpha}_{g,j,p}$ abweichender, die Wärmebelastung beschreibender Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}_{1,j,p}$ [1, S. 21 ff.] anzusetzen ist). Damit reduziert sich die thermische Übertragungsfunktion gemäß Gl. (1) auf:

$$\bar{F}T_{b,p} \equiv \frac{\bar{\Theta}_{b,p}}{\bar{\Theta}_{e,p}} = \frac{W_L + \bar{W}_{T,p}}{W_L + \sum_j (\bar{B}_p \cdot A_j)} \quad (21)$$

Die Raumlufttemperatur $\vartheta_R(t)$ liegt höher als die Basistemperatur $\vartheta_b(t)$, und zwar um den Beitrag, den die nutzungsbedingte (innere) Wärmelast \dot{Q}_N , die Strahlungslast \dot{Q}_S sowie die Komponente \dot{Q}_{TS} zur Temperaturerhöhung leisten (Bild 3). Um eine zulässige Raumlufttemperatur $\vartheta_{R,zul}$ nicht zu überschreiten, muß zur gleichen Zeit, zu der die Basistemperatur ihr „Sommermaximum“ $\vartheta_{b(So)}$ erreicht, die Summe der über den Tag gemittelten Wärmelasten

$$\dot{Q}_{N,d} + \dot{Q}_{S,d} + \dot{Q}_{TS,d} \leq (W_{L,d} + W_{T,d}) \cdot (\vartheta_{R,zul} - \vartheta_{b(So)}) \quad (22a)$$

sein. Das Tagesmittel der Strahlungslast $\dot{Q}_{S,d}$ ist durch Sonnenschutzmaßnahmen, die Komponente $\dot{Q}_{TS,d}$ ist durch Beschattung und durch Wärmedämmung, der Wärmewert des Lüftungsförderstromes $W_{L,d}$ ist u. a. durch den Nutzer zu beeinflussen und das Tagesmittel $W_{T,d}$ durch Wärmedämmung.

Es hat sich bewährt, ein zulässiges Tagesmittel $\vartheta_{R,zul}$ der Raumlufttemperatur vorzugeben und die Wärmelasten und Wärmekapazitätsströme als Tagesmittel einzuführen (Index d). Denn das Tagesmittel der Raumlufttemperatur wird bei der in Mitteleuropa üblichen Bauweise

stärker von den Parametern des Bauwerkes (Masse, Wärmeschutz) und den langfristig gemittelten Nutzungsbedingungen (Wärmelast, Lüftung) geprägt und ist folglich „typischer“ als das Tagesmaximum, das wechselnden Nutzungsbedingungen (Anwesenheit von Personen, Lüftung usw.) ausgesetzt ist und leichter beeinflusst werden kann, und das auch stärker lokalklimatischen Einflüssen unterliegt. Außerdem ist die tägliche Temperaturamplitude z. B. bei Wohnbauten gering (1 ... 3 K), wenn Sonnenschutz und Lüftungseinrichtungen vernünftig betätigt werden.

Um zu verhindern, daß die zulässige Raumlufttemperatur überschritten wird, ist Lüftung erforderlich, und zwar ein Förderstrom der Lüftungseinrichtungen von etwa

$$\dot{V} \geq \frac{1}{\rho_L \cdot c_L} \cdot \left[\frac{\dot{Q}_{N,d} + \dot{Q}_{S,d} + \dot{Q}_{TS,d}}{\vartheta_{R,zul} - \vartheta_{b(So)}} - \sum_j (k \cdot A_j) \right] \quad (22b)$$

Außer bei Industriebauten mit hoher innerer Wärmelast und ausgesprochenen Leichtbauten (z. B. Wohncontainern) kann man in der Regel von einem zulässigen und auch erreichbaren Tagesmittel der Raumlufttemperatur von $\vartheta_{R,zul} = 26^\circ\text{C}$ ausgehen. Bei Räumen bzw. Gebäuden mit „schwerer“ bis „mittelschwerer“ Innenkonstruktion (entspr. einem über die Flächen der Raumschließungsstruktur gemittelten Wärmeeindringkoeffizienten

$\bar{b} \geq 15 \frac{\text{W} \cdot \text{h}^{0,5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$) ist eine Basistemperatur in der Größenordnung von $\vartheta_{b(So)} = 21^\circ\text{C}$ zu erwarten. Für eine erste Vorplanung kann man für diese schweren Gebäude in Gl. (22b) also die Temperaturdifferenz $\vartheta_{R,zul} - \vartheta_{b(So)} = 5 \text{ K}$ setzen. Bei einer „leichten“ Innenkonstruktion sollte in Gl. (22b) die Temperaturdifferenz $\vartheta_{R,zul} - \vartheta_{b(So)} \approx 4 \text{ K}$ ersetzt werden. Ge-

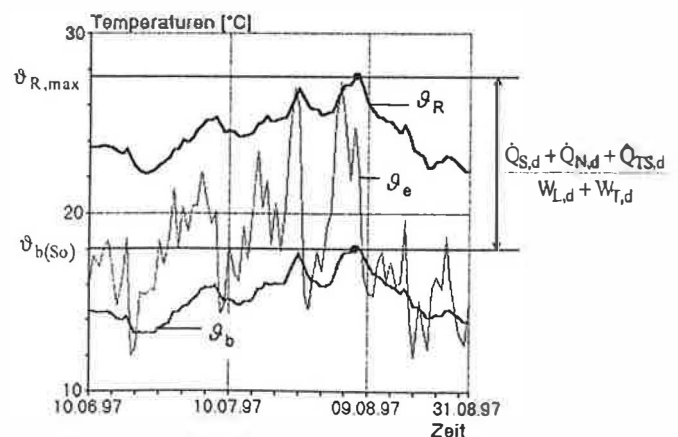


Bild 3 Raumlufttemperatur ϑ_R , Basistemperatur ϑ_b und Außenlufttemperatur ϑ_e in einem Wohngebäude im Sommer

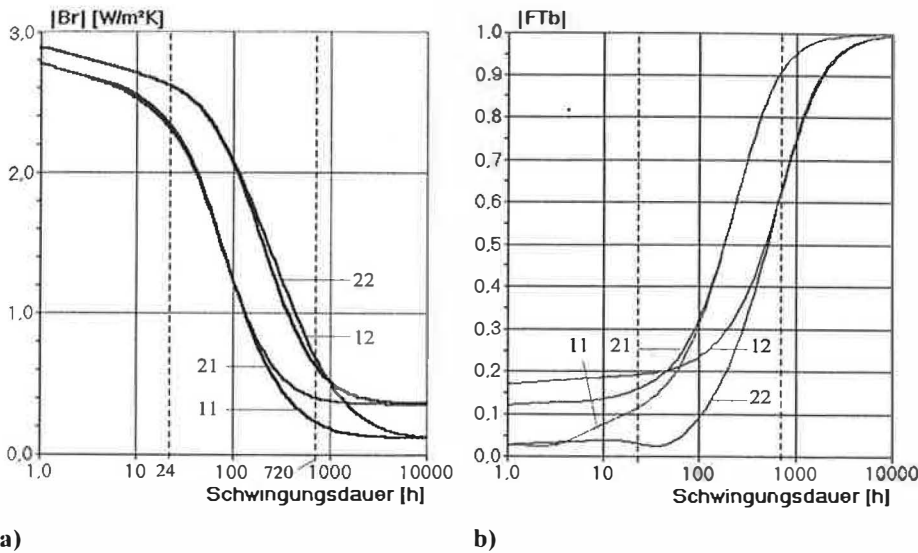


Bild 4 Einfluß des thermischen Speichervermögens ($\bar{B}_{p,j}$) nach Gl. (3), des Wärmewertes W_T des Transmissionswärmestromes nach Gl. (20) und des Förderstromes \dot{V} auf die thermische Übertragungsfunktion $|\bar{F}T_{b,p}|$ nach Gl. (21) in Abhängigkeit von der Schwingungsdauer τ_p , Bruttogeschosßfläche A_B , Transmissionsfläche A_j . Index a: Jahresgang ($\tau_j = 8760$ h); Index m: Monatsgang ($\tau_j = 720$ h); Index d: Tagesgang ($\tau_j = 24$ h)

- a) Betrag $|\bar{B}_{p,j}|$ des Wärmeabsorptionskoeffizienten
- 11 Außenwand wärmegeklämmt ($W_{T,j} \approx 0,48 \cdot A_j$), leichte Bauweise ($\bar{b} \approx 19 \text{ W} \cdot \text{h}^{0,5}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
 - 12 Außenwand wärmegeklämmt ($W_{T,j} \approx 0,46 \cdot A_j$), schwere Bauweise ($\bar{b} \approx 28 \text{ W} \cdot \text{h}^{0,5}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
 - 21 Außenwand nicht wärmegeklämmt ($W_{T,j} = 1,42 \cdot A_j$), leichte Bauweise ($\bar{b} \approx 19 \text{ W} \cdot \text{h}^{0,5}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
 - 22 Außenwand nicht wärmegeklämmt ($W_{T,j} \approx 1,46 \cdot A_j$), schwere Bauweise ($\bar{b} \approx 28 \text{ W} \cdot \text{h}^{0,5}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

- b) Thermische Übertragungsfunktion $|\bar{F}T_{b,p}|$ bei annähernd gleichem Wärmewert des Abstromes w nach Gl. (26) je Einheit Bruttogeschosßfläche A_B

- 11 wie a) mit $\frac{\dot{V}}{A_B} = 4,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ $w = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 12 wie a) mit $\frac{\dot{V}}{A_B} = 7,0 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ $w = 2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 21, 22 wie a) mit $\frac{\dot{V}}{A_B} = 1,0 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ $w = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

bäude mit „leichter“ Innenkonstruktion

($\bar{b} < 15 \frac{\text{W} \cdot \text{h}^{0,5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$) benötigen, besonders

wenn die Räume zudem noch sehr groß sind, die für die Wärmespeicherung verfügbare Fläche also gering ist, einen größeren Förderstrom. Denn bei ihnen ergibt sich für die thermische Übertragungsfunktion nach Gl. (21) ein höherer Wert als bei „schweren“ Gebäuden, so daß sich in diesen „leichten“ Gebäuden – unter sonst gleichen Bedingungen – eine um etwa 1 K höhere Basistemperatur (11 und 21 im Bild 4) einstellt.

3.2 Basistemperatur

Die Basistemperatur repräsentiert einen „Basisfall“. Auf der Grundlage der Basistemperatur ist eine bauklimatische Klassifizierung der Gebäude möglich; denn für Gebäude gleicher Bauweise und gleicher Lüftung stellt sich innerhalb plausibler Toleranzen die gleiche „ortstypische“ Basistemperatur ein, und bei etwa gleicher thermischer Übertragungsfunktion $\bar{F}T_{b,p}$ nach Gl. (21) ergeben sich auch die gleichen Maßnahmen zur Erfüllung der Raumklimaforderungen. Die Klassifizierung wird in 4 Stufen

nach dem „Wärmebeharrungsvermögen“ vorgenommen [1, S. 56 ff.], [13].

Wohn- und Geschäftsbauten haben ein großes oder ein mäßiges Wärmebeharrungsvermögen [1], [13]; dafür ergibt sich die Basistemperatur aus den Daten des wärmsten Monats. Für die Schwingungsdauer von 720 h, dem Monatsgang, ist mit den Monatsmitteln $W_{L,m}$ des Wärmewertes des Lüftungsförderstromes, $W_{T,m}$ des Transmissionswärmestromes und \bar{B}_m des Wärmeabsorptionsvermögens die thermische Übertragungsfunktion gemäß Gl. (21)

$$\bar{F}T_{b,m} = \frac{W_{L,m} + \bar{W}_{T,m}}{W_{L,m} + \sum_i (\bar{B}_m \cdot A_j)} \quad (23)$$

(Index m für „Monat“) (Bild 4).

In Mitteleuropa ist das Sommermaximum $\vartheta_{b(S0)}$ der Basistemperatur im Juli zu erwarten. Mit den Daten von Potsdam ergeben sich für ausgewählte Jahre die im Bild 5a angegebenen Verläufe des Sommermaximums der Basistemperatur über dem Monatsmittel der thermischen Übertragungsfunktion $|\bar{F}T_{b,p}|$ bzw. $|\bar{F}T_{b,m}|$ nach Gl. (23). Sie unterscheiden sich von Jahr zu Jahr z. T. erheblich, und es gibt auch Jahre mit ausgesprochen kühlem Sommer (z. B. 1962), in dem u. U. zeitweilig noch geheizt werden muß und es wohl kaum notwendig ist, durch Sonnenschutz und/oder intensive Lüftung für erträgliche Raumlufttemperaturen zu sorgen. Deswegen können die aus langfristigen Mittelwerten gewonnenen Häufigkeitsverteilungen der Außenlufttemperatur, in die auch kühle Sommer wie z. B. der von 1962 mit eingegangen sind, nicht unkorrigiert für die Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes herangezogen werden. Solche Jahre müssen unberücksichtigt bleiben, wenn für ein Berechnungsverfahren geeignete Mittelwerte gesucht werden. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich für das „mittlere Jahr“ in guter Näherung ein linearer Zusammenhang

$$\vartheta_{b(S0)} = 19 + 6 \cdot |\bar{F}T_{b,m}| \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (24)$$

Bei kleinen Förderströmen \dot{V} sind die Werte für $|\bar{F}T_{b,m}|$ klein, also sind auch die Werte für $\vartheta_{b(S0)}$ klein, und die Abweichungen zwischen den einzelnen Jahren sind gering ($< \pm 1$ K), wenn man die Jahre mit kühlem Sommer außer acht läßt. Bei größeren Förderströmen vergrößert sich die Streuung, bleibt aber immer noch tolerabel, u. a. auch deswegen, weil hohe Werte $|\bar{F}T_{b,m}|$ nur bei intensiver Lüftung erreicht werden und der Nutzer dann durch Eingriffe in die Lüftung Einfluß nehmen kann, oder wenn er, statt mit Dauerlüftung bei konstantem Förderstrom (KL) zu arbeiten, nachts intensiv lüftet (INL, s. Bild 5b).

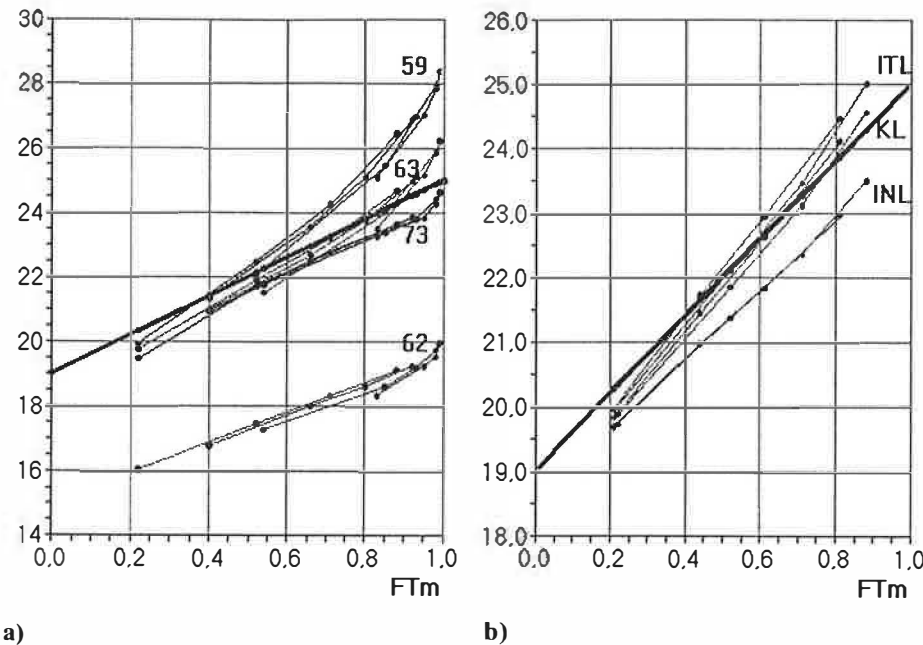


Bild 5 Tagesmittel des Sommermaximums der Basistemperatur $\vartheta_{b(So)}$ im Juli (Potsdam) in Abhängigkeit vom Monatsmittel der thermischen Übertragungsfunktion $|FT_{b,m}|$ nach Gl. (23) in den Jahren 1959, 1962, 1963 und 1973
 a) einzelne Jahre, Förderstrom konstant
 b) „mittleres Jahr“, für konstanten Förderstrom (KL), für intensive Nachtlüftung (INL) und für intensive Taglüftung (ITL)

Bei intensiver Nachtlüftung (INL) [3, S. 118 ff.], [14], [15] ist das Sommermaximum der Basistemperatur, wenn $|FT_{b,m}|$ mit dem über 24 h gemittelten Förderstrom berechnet wird,

$$\vartheta_{b(So)} = 19 + 5 \cdot |FT_{b,m}| \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (25)$$

Ihre Wirkung selbst auf das Tagesmittel ist also relevant. Dagegen ist die Abweichung zwischen intensiver Taglüftung (ITL, s. Bild 5b), die z. B. in Geschäftsbauten während der Arbeitszeit praktiziert wird, und Dauerlüftung mit konstantem Förderstrom (KL) gering.

Diese Beziehungen gelten nur für Gebäude mit großem oder mit mäßigem Wärmebeharrungsvermögen. Für sehr leichte und/oder intensiv gelüftete Gebäude, die ein kleines Wärmebeharrungsvermögen haben (z. B. manche Industriebauten), sowie für Gebäude mit einem extrem großen Wärmebeharrungsvermögen (z. B. monumentale Baudenkmale wie Kirchen) ergeben sich etwas andere Kriterien [1], [10], [13].

4 Lüftung von Gebäuden mit verbesserter Wärmedämmung während der warmen Jahreszeit

Für die Wärmedämmung der Gebäude hat in Mitteleuropa das Klima während der kalten Jahreszeit Priorität. Maßnahmen, die während der warmen Jahreszeit für ein erträgliches Raumklima sorgen sollen, müssen sich dem unterordnen und anpassen. Im Regelfall kann aber im Sommer die Wirkung der Wärmedäm-

mung durch eine intensivere Lüftung kompensiert werden, wie aus Gl. (22b) und Bild 4 zu ersehen ist.

Bild 6a zeigt den typischen Verlauf der Raumlufttemperatur während der wärmsten Woche in einem „thermisch kritischen Raum“, einem Raum im obersten Geschoss eines Wohngebäudes, und zwar in einem Altbau, dessen Dach und dessen Wände ohne Wärmedämmung sind. Es stellen sich dort zeitweilig sehr hohe Temperaturen ein, auch bei einer intensiven Lüftung mit einem für Wohnbauten schon ungewöhnlich hohen Förderstrom (Bild 6 a 2). Wegen des geringen Wärmewiderstandes der Außenkonstruktion sinkt die Raumlufttemperatur nach solchen Hitzeperioden aber auch schnell wieder ab. Die Andauer von „Schönwetterperioden“ ist in Mitteleuropa verhältnismäßig kurz, deswegen treten in Gebäuden dieser Art im Sommer neben sehr hohen auch häufig mäßige Temperaturen auf.

Die Wärmeschutzverordnung verlangt zur Verringerung des Heizenergiebedarfs eine wirksame Wärmedämmung. Diese verringert den Transmissionswärmestrom auch im Sommer erheblich. Die Temperaturspitzen werden dadurch gegenüber der ungedämmten Variante beträchtlich vermindert (Bild 6b), wenn große, stark besonnte Außenflächen gedämmt werden, also die Komponente $\dot{Q}_{TS,d}$ verringert wird. Aber die Wärmedämmung verhindert auch eine wirksame Auskühlung in den Pausen zwi-

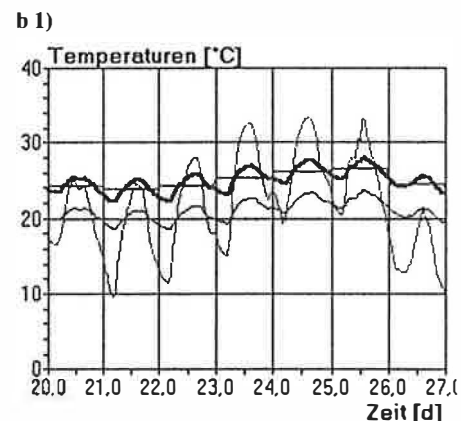
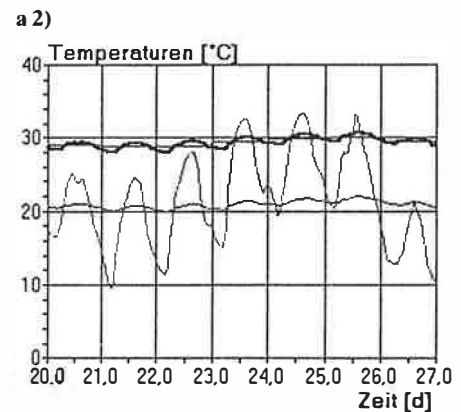
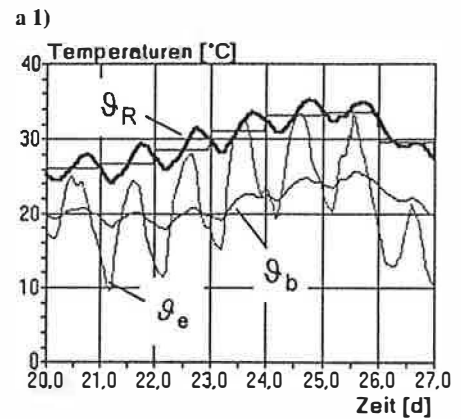
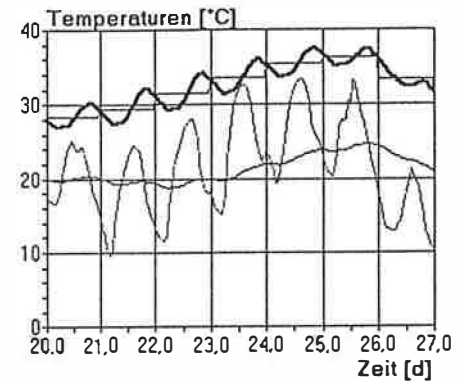


Bild 6 Temperaturverläufe während einer sehr warmen Witterungsperiode im obersten Geschoss eines Wohngebäudes mit verschiedenen Luftförderströmen:
 1: $\dot{V} = 1,0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$;
 2: $\dot{V} = 5,0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$
 a) Altbau ohne Wärmedämmung
 b) mit Wärmedämmung nach Wärmeschutzverordnung

schen den einzelnen Schönwetterabschnitten. Die Folge ist eine Vergleichsmäßigung des zeitlichen Verlaufs der Raumlufttemperatur (Bild 6 b 1), in der Regel aber immer noch auf einem ziemlich hohen Temperaturniveau. Denn durch die Wärmedämmung wird zwar die Lastkomponente $\dot{Q}_{TS,d}$ vermindert, aber es werden weder die innere Wärmelast $\dot{Q}_{N,d}$ noch die Strahlungslast $\dot{Q}_{S,d}$ beeinflusst. Es können sich über eine längere Zeit hohe Raumlufttemperaturen einstellen. Abhilfe kann nur durch Lüftung geschaffen werden, und diese Lüftung muß intensiver sein als in nicht-wärmedämmten Gebäuden; denn der wegen der verbesserten Wärmedämmung fehlende Abstrom muß lt. Gl. (22b) durch Lüftung ersetzt werden (Bild 4b). Parallel zur Verbesserung der Wärmedämmung, die benötigt wird, um den Heizenergiebedarf zu reduzieren, müssen folglich Möglichkeiten für eine intensive, flexible Lüftung geschaffen werden, bei der etwa der gleiche Wert der thermischen Übertragungsfunktion $|FT_{b,p}|$ nach Gl. (21) und damit auch etwa die gleiche Basistemperatur $\vartheta_{b(S_0)}$ erreicht wird. Bei Gebäuden mit einem großen oder mäßigen Wärmebeharrungsvermögen (z. B. Wohnbauten, Büro Bauten) ist das der Wert $|FT_{b,m}|$ nach Gl. (23) für eine Schwingungsdauer der Grundschwingung $\tau_1 = 720$ h, bei einem extrem großen Wärmebeharrungsvermögen (z. B. monumentale Baudenkmale) der Wert $|FT_{b,a}|$ für $\tau_1 = 8760$ h, bei einem kleinen Wärmebeharrungsvermögen (z. B. intensiv gelüftete Industriebauten, extreme Leichtbauten) der Wert $|FT_{b,d}|$ für $\tau_1 = 24$ h (Bild 4b).

Dieser komplexe Zusammenhang muß bei der Lösung praktischer Aufgaben nicht in jedem Fall nachvollzogen werden. Meistens reicht eine plausible Bemessungsregel aus:

Bei Räumen mit „leichter“ Innenkonstruktion ist es möglich, daß der nach Gl. (22b) benötigte Förderstrom unwirtschaftlich groß wird. Dann kann es notwendig sein, Luft- oder Deckenkühlung einzusetzen.

Literatur

- [1] Petzold, K.; Martin, R.: Die Wechselwirkung zwischen der Außenwand und einem sich frei einstellenden Raumklima. Dresdner Bauklimatische Hefte, Heft 2. Dresden: Eigenverlag der TU (1996).
- [2] Petzold, K.; Martin, R.: Wechselwirkung zwischen Außenwandkonstruktion und sich frei einstellendem Raumklima. Vortrag auf dem Internationalen Bauphysikkongreß 1997 am 25. und 26. Sept. 1997 an der TU Berlin, Tagungsband „Bauphysik der Außenwände“, S. 217–226.

Wenn sich der Wärmewert (Wärmekapazitätsstrom) des stationären Transmissionswärmestromes der Außenflächen des Raumes bzw. Gebäudes

$$W_T = \sum_j (k \cdot A)_j$$

gegenüber dem bisherigen Wärmewert (bei Gebäudesanierung) bzw. gegenüber den bisher für Gebäude der gleichen Art üblichen Wärmewerten (bei Neubauten) durch Wärmedämmung deutlich verringert, ist durch eine Erhöhung des Förderstromes der Wärmewert des Abstromes

$$W = W_T + W_L \quad (26)$$

wenigstens konstant zu halten (Bild 4b). Wenn die Lüftungsflächen der Fenster dafür nicht ausreichen, müssen Lüftungsanlagen eingesetzt werden.

- [3] Petzold, K.: Raumlufttemperatur. 2. Aufl. Berlin: Verlag Technik (1983); Wiesbaden: Bauverlag (1983).
- [4] Vlassov, ●. E.: Ploskie teplovyje volny (Ebene Temperaturwellen). Izvestija teplotnicheskogo Instituta (Mitteilungen aus dem Institut für Wärmetechnik) 1927 wxp. 3 (26).
- [5] Muromow, C. J.: Rascetnye temperatury naruznogo wosducha i teploustojcivost' sten (Berechnete Temperaturen der Außenluft und der Wärmewiderstand der Wände). Moskva: Strosjusdat Narkomstroja (1939).
- [6] Sklover, A. M.: Teploperedaca pri periodiceskich teplovyh vozdejstvijach (Wärmefluß bei periodischer Temperatureinwirkung). Moskva/Leningrad: Gosenergoisdat (1961).
- [7] Petzold, K.: Wärmelast. 2. Aufl. Berlin: Verlag Technik (1980).

- [8] Petzold, K.: Klima. In: Lutz u. a.: Lehrbuch der Bauphysik. 4. Aufl. Stuttgart: B. G. Teubner Verlag (1997).
- [9] Petzold, K.: Zu einigen bauklimatischen Fragestellungen beim Wiederaufbau der Frauenkirche in Dresden. Beitrag zum 9. Bauklimatischen Symposium der TU Dresden, 14. bis 16. Sept. 1994. Tagungsbeiträge Bd. 2. S. 504–513.
- [10] Petzold, K.: Bauklimatische Analyse der Frauenkirche in Dresden. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997) 5. S. 233–245; 6. S. 290–304; 119 (1998) 1. S. 11–16.
- [11] Häupl, P.: Feuchtetransport in Baustoffen und Bauwerksteilen. Diss. (B) TU Dresden (1986).
- [12] Roloff, J.; Martin, R.; Weier, H.: Klimatologische Berechnungen eines „überschweren“ Gebäudes am Beispiel des Meißner Domes. 2. Statuskolloquium des Deutsch-Französischen Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmälern. Bonn, 12.–13. 12. 1996, S. 143–152.
- [13] Petzold, K.; Hahn, H.: Ein allgemeines Verfahren zur Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes freier klimatisierter Gebäude. Luft- und Kältetechnik 24 (1988) 3. S. 146–154.
- [14] Petzold, K.: Intensive Nachtlüftung. Luft- und Kältetechnik 13 (1977) 5. S. 251–256.
- [15] Petzold, K.: Energetische Sanierung von Schulen. Ki Luft- und Kältetechnik 31 (1995) 6. S. 279–285.

Schlüsselwörter

Raumklima
Wärmespeicherung
Feuchtespeicherung
freie Klimatisierung
Berechnungsverfahren

Dokumentierte Qualität

Temperatur- und Luftfeuchteüberwachung in

- ★ Lägern
- ★ Fahrzeugen
- ★ Produktionsräumen

mit

MONI LOG® Datenloggern



SMT & Hybrid GmbH • An der Prießnitzau 22 • 01474 Weißig/Dresden
Tel.: 0351 266 13 0 • Fax.: 0351 266 13 10 • <http://www.smt-hybd.de>