

DIE WIRKUNG DER IN DEN GEBÄUDEN GESPEICHERTEN WÄRME AUF DIE INNENTEMPERATUR DER RÄUME IN DER HEIZUNGSPERIODE

Von

A. ZÖLD

Lehrstuhl für Heizung, Lüftung und Bauinstallation, Technische Universität,
Budapest

(Eingegangen am 12. Januar 1971)

Vorgelegt von Prof. Dr. Á. MACSKÁSY

Die Speicherwärme von Gebäuden hat offensichtlich in den Zeitabschnitten der Heizungsperiode eine Bedeutung, in denen über eine gewisse Zeitdauer die äußere Temperatur auf einen niedrigen Wert abfällt, der sogar unter dem Auslegungswert liegen kann. Weiter scheint es natürlich, daß die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäude — wobei sowohl die inneren als auch die äußeren Gebäudeteile gemeint sind — und der Anteil der verglasten Flächen den Verlauf der Innentemperatur bedeutend beeinflussen. Einige Vorschriften schreiben in den Wärmeverlustberechnungen auch die Anwendung eines in Abhängigkeit von den Gebäudekennziffern gegebenen Zusatzfaktors vor, um damit die Wirkung der geringen Wärmespeicherfähigkeit der modernen, leichten Baukonstruktionen auszugleichen (»Leichtbauzuschlag«). Im folgenden wird untersucht, ob die unterschiedliche Wärmespeicherfähigkeit der Gebäude die Anwendung eines solchen Zusatzfaktors erfordert.

Es sei vorausgesetzt, daß die Innentemperatur infolge der schwankenden Außentemperatur bei leicht gebauten Gebäuden mit großen Verglasungen und mit geringer Wärmespeicherfähigkeit derartige Schwankungen erreicht, die das Wärmeempfinden der sich dort aufhaltenden Personen bedeutend und unliebsam beeinflußt. Im Falle solcher Gebäude scheint es wichtig, mit der Anwendung des Leichtbauzuschlages einen Leistungsvorrat der Heizungsanlage zu sichern, welcher die Temperaturschwankungen der Räume kompensieren kann. Die Auslegung des Leichtbauzuschlages ist auf zwei Arten möglich:

Die erste Vorstellung geht von einer eventuell auftretenden »extrem großen Kältewelle« aus, wenn die Außentemperatur unter den veranschlagten niedrigsten Wert sinkt, wobei der erhöhte Wärmebedarf einesteils durch die Speicherwärme, andererseits durch erhöhte Heizungsleistung, erfaßt durch den Zuschlagsfaktor, gedeckt wird. Je leichter das Gebäude gebaut ist, desto weniger wird die gespeicherte Wärme den Mehrbedarf decken.

Die andere Vorstellung läuft darauf hinaus, daß der Leichtbauzuschlag dazu dient, die Tagesschwankungen im Wärmeverlust des Raumes durch ent-

sprechende Mehrleistung der Heizung abzufangen. Die Ursachen der Schwankungen im Wärmeverlust werden darin gesehen, daß die Schwankungen der Außentemperatur durch die leicht gebauten äußeren Begrenzungswände und großen Glasflächen weniger kompensiert werden als bei der bisher üblichen Bauweise.

Der Zuschlag ist, wenn man von der erstgenannten Vorstellung ausgeht, zahlenmäßig zu bestimmen. Als Grundlage der Rechnung dient folgende Überlegung:

Im stationären Zustand ist im Falle der Spitzenbelastung der Gebäudewärmeverlust

$$Q = \Sigma Fk(t_i - t_a) (1 + \Sigma z). \quad (1)$$

Σz bedeutet hier die Gesamtheit aller Zusatzfaktoren. Wenn die Außentemperatur eine gewisse Zeitlang um den Wert Δt_{ex} unter die Auslegungstemperatur sinkt, so wächst der Wärmeverlust um den Wert

$$\Delta Q_{ex} = \Sigma Fk \Delta t_{ex} (1 + \Sigma z). \quad (2)$$

Wenn die Zeitdauer dieser »extrem« kalten Außentemperatur τ_{ex} Stunden ist, so wird während dieser Zeit das Gebäude einen Wärmeverlust von insgesamt

$$Q_{ex} = \Sigma Fk \Delta t_{ex} \tau_{ex} (1 + \Sigma z) \quad (3)$$

erleiden, sofern die Temperatur im Gebäude während dieser Zeit den vorgeschriebenen Wert beibehält. Bei Gebäuden üblicher Bauart ist bei derartigen »Kältewellen«, die zwar selten vorkommen, aber doch real in Temperatur und Zeitdauer sind, der Einbau einer Leistungsreserve in die Heizungsanlage auf Grund der Erfahrung nicht notwendig, da die in der Masse des Gebäudes aufgespeicherte Wärmemenge ausreicht, um Q_{ex} im Falle einer geringfügigen Abkühlung der Gebäudeteile zu decken. Wenn man eine Abkühlung des Gebäudes um 1°C als zulässig erachtet, verlieren die Gebäudeteile während der »Kältewelle« eine Speicherwärmemenge

$$Q_s = \Sigma m_i c_i \cdot 1 \cdot \tau_{ex}. \quad (4)$$

Die genannte zulässige Abkühlung der Gebäudeteile um 1°C ist ein kleiner Wert, darum setzen wir voraus, daß sich die Innentemperatur im Falle der Abkühlung des Gebäudes praktisch konstant verhält. (In Anbetracht dessen, daß diese Vernachlässigung im Ergebnis nur Fehler von 2—3% verursacht.) Erfahrungsgemäß reicht bei herkömmlichen Gebäuden mit großer Masse dieser Wert aus, Q_{ex} zu kompensieren. Leichtbauten mit geringer Masse weisen einen zu kleinen Q_s auf, der nicht ausreicht, um Q_{ex} zu kompensieren. In diesem

Falle muß man zur Kompensation der Wärmemenge ($Q_{ex} - Q_s$) die Leistung der Heizanlage erhöhen. Die notwendige Mehrleistung ergibt in Prozenten des sogenannten »Grundwärmeverlustes« ausgedrückt einen Zuschlagswert. Auf Grund der obigen Zusammenhänge bestimmten wir den Leichtbauzuschlagswert in einer Vielzahl von Variationen. Bei den Berechnungen wurden die Werte $\Delta t_{ex} = 5^\circ\text{C}$ und $\tau_{ex} = 120\text{ h}$ (5 Tage) benutzt.

Von den mit dem elektronischen Rechenautomaten gewonnenen Ergebnissen wurden einige in der Tabelle I zusammengefaßt. In Verbindung mit der Rechnung ist zu erwähnen, daß bei der Bestimmung des Wertes von » m « sämtliche Umgrenzungsflächen in Betracht gezogen wurden (also auch die kleineren Umgrenzungsflächen der Gebäude), weil nämlich besonders sie im Gebäudeinneren den größten Teil der Speicherwärme enthalten.

Tabelle I

Mittlere Masse der Oberfläche in kg/m^2	100			200			300			
	0,91	1,31	1,67	0,91	1,31	1,67	0,91	1,31	1,67	
Mittlere Wärmedurchgangszahl in $\text{kcal/m}^2\text{ h }^\circ\text{C}$										
Verhältnis der äußeren Bau- konstruktionen in Anteilen der Gesamtoberflächen	0,2	12	12	13	9	10	11	6	9	10
	0,4	13	13	14	12	12	13	10	11	12
	0,6	13	14	14	12	13	13	12	12	13
	0,8	14	14	14	13	13	14	12	12	13

Aus den Ergebnissen wurde festgestellt, daß auch bei den sogenannten »schweren« Gebäuden eine Erhöhung der Heizleistung nötig wäre, d. h. die Anwendung des »Leichtbauzuschlages«. Die errechneten Zuschlagfaktoren für Normal- und Leichtbauten liegen sehr nah beieinander, es ergeben sich Abweichungen von 9—14% zwischen den Bauweisen, während bei verschiedenen anderen Gebäudeparametern (durchschnittliche Masse der Oberfläche, mittlere Wärmedurchgangszahl) sehr unterschiedliche Werte vorkommen. Das weist also darauf hin, daß die sogenannten Normal- und Leichtbauten bei einer einige Tage anhaltenden Kältewelle in ihrem Abkühlungsverhalten nicht wesentlich voneinander abweichen.

So ist also in diesem Falle die Anwendung des Zuschlages entweder als unangebracht aufzufassen, oder man müßte auch bei den Normalgebäuden — in Anbetracht der Kältewelle — an eine Leistungsreserve der Heizung denken. Das letztere ist jedoch dem Senken der äußeren Auslegungstemperatur gleichwertig.

Hinsichtlich der Tagesschwankungen der Innentemperatur sind die Kennwerte der äußeren Begrenzungswand und das Verglasungsverhältnis von ausschlaggebender Bedeutung.

Der Dämpfungsfaktor der Leichtbauten und der verglasten Flächen ist im allgemeinen kleiner als bei Normalgebäuden; es ist also zu erwarten, daß auf der inneren Oberfläche der äußeren Begrenzungswand der Leichtbauten infolge der Schwankungen der Außentemperatur bedeutende Temperaturschwankungen auftreten. Das bedeutet zugleich, daß auch die aus dem Raum austretende Wärmemenge schwankt, was im Laufe des Tages bei einer konstanten Heizleistung Schwankungen der Raumtemperatur — den Tagesperioden folgend — verursacht. Über gewissen Grenzen ist das vom Standpunkt des Wärmeempfindens unerwünscht.

Um zu entscheiden, in welchem Maße die Schwankungen der Außentemperatur, die den Perioden des Tages folgen, Innentemperaturschwankungen verursachen, wurden die kleinstmöglichen Dämpfungsfaktorwerte der Leichtbauten sowie die voraussichtlichen Tagesschwankungen der Außentemperatur untersucht. Über die Leichtbauten ist zu sagen, daß der Dämpfungsfaktor außerordentlich klein ist. Das ist damit zu erklären, daß das Produkt aus Dichte und spezifischer Wärme (ρc), »der Wasserwert«, der Konstruktion klein, und die zu ihrer Aufwärmung notwendige Wärme gering ist.

Hinsichtlich der Dämpfung soll angenommen werden, daß die Konstruktion derart leicht sei, daß sich in ihr sofort der stationäre Zustand einstellt. In dieser Konstruktion ist die Wärmestromdichte

$$\dot{q} = k(t_s - t_i)$$

und infolge der stationären Verhältnisse

$$\dot{q} = \alpha_i (t_{i,0} - t_i),$$

dabei bedeuten:

- k — Wärmedurchgangszahl [kcal/m² h °C],
- α_i — innere Wärmeübergangszahl [kcal/m² h °C],
- $t_{i,0}$ — Temperatur der Innenfläche [°C],
- t_i — Innentemperatur [°C],
- t_s — äußere Sonnenlufttemperatur [°C].

Erhöht sich die Temperatur der Innenfläche $t_{i,0}$ im Vergleich zur unveränderten Innentemperatur t_i um 1 °C, ist die Zunahme der Wärmestromdichte:

$$\Delta \dot{q} = \alpha_i \cdot 1.$$

Diese Zunahme der Wärmestromdichte ist eine Folge der Erhöhung der äußeren Sonnenlufttemperatur um den Wert Δt_s :

$$\Delta \dot{q} = k \cdot \Delta t_s.$$

Durch den Dämpfungsfaktor wird laut Definition ausgedrückt, um wievielfach (ν) vermindert die Temperaturschwankungen der äußeren Umgebung an der Innenfläche der Begrenzungswand auftreten. Damit ist im ungünstigsten Falle

$$\nu_{\min} = \frac{\Delta t_s}{1} = \frac{\dot{q}/k}{\dot{q}/\alpha_i} = \frac{\alpha_i}{k}. \quad (5)$$

Dieses Ergebnis ist auch mit der Analyse der genauen Gleichungen, die zur Errechnung des Dämpfungsfaktors führen, zu erreichen.

Der Dämpfungsfaktor der dichten Konstruktionsschicht ist:

$$\beta_d = ch \frac{\delta \cdot s}{\lambda} \sqrt{i} + \frac{\alpha_i}{s \sqrt{i}} sh \frac{\delta \cdot s}{\lambda} \sqrt{i}. \quad (6)$$

Die Dämpfung zwischen der äußeren Oberfläche und der äußeren Umgebung ist:

$$\beta_a = 1 + \frac{U_k}{\alpha_a}. \quad (7)$$

In dieser Formel ist β die komplexe Form des Dämpfungsfaktors, wobei $|\beta| = \nu$ dem Verhältnis der Temperaturamplituden entspricht, $\arg \beta = \varepsilon$ drückt die Phasenverschiebung aus.

- δ = Schichtdicke [m],
- λ = Wärmeleitfähigkeit [kcal/m h °C],
- s = Wärmeeindringungszahl des Materials [kcal/m² h °C],
- α_i = innere Wärmeübergangszahl [kcal/m² h °C],
- α_a = äußere Wärmeübergangszahl [kcal/m² h °C],
- i = Imaginäreinheit,
- U_k = die Wärmeeindringungszahl an der äußeren Oberfläche der Wand [kcal/m² h °C].

Im ungünstigsten, aber möglichen Falle ist $\varrho c \rightarrow 0$ und damit $s \rightarrow 0$. In der Gleichung (6) ist also die Berechnung eines 0/0 Grenzwertes nötig. Mit der L'Hospital-Regel ist:

$$\beta_d \rightarrow \left(1 + \frac{\alpha_i \delta}{\lambda} \right) \text{ wenn } \varrho c \rightarrow 0. \quad (8)$$

Die Wärmeeindringungszahl äußerer Oberflächen (U_k) ist für leichte Begrenzungswände mit dem gleichen Grenzwert zu berechnen:

$$U_k \approx \frac{1}{1/\alpha_i + \delta/\lambda} = z. \quad (9)$$

Damit ist die Dämpfung zwischen äußerer Fläche und Umgebung

$$\beta_a = 1 + \frac{\kappa}{\alpha_a}. \quad (10)$$

Der kleinstmögliche Wert des Dämpfungsfaktors ist

$$\nu_{\min} = |\beta_d| \cdot |\beta_a| = \alpha_i \frac{\delta}{\lambda} \left(1 + \frac{\kappa}{\alpha_a} \right) = \frac{\alpha_i}{k}. \quad (11)$$

In Anbetracht dessen, daß die Anwendung eines leichten Isoliermaterials mit geringer Wärmeleitfähigkeit eine niedrige Wärmedurchgangszahl ergibt, erreicht der Dämpfungsfaktor von Leichtbauten wider Erwarten auch Werte von 9—15, wenn das Gewicht der Konstruktion nahe bei 0 liegt. (Wenn $k = 0,7$ und der α_i -Wert bei »Konventionsheizung« 7 ist, so ist $\nu_{\min} = 7/0,7 = 10$.)

Die Masse der Türen- und Fensterkonstruktionen des Gebäudes ist ebenfalls gering, also ist die Gleichung (11) auch hierfür anwendbar. Bei diesen Flächen ist in die Gleichung (11) natürlich der Wert der Wärmedurchgangszahl ohne Berücksichtigung der Luftdurchlässigkeit der Flächen einzusetzen. Dementsprechend ergibt sich für die allgemein gebräuchlichen Verschlussflächen bei

$$k = 2,5 \quad \text{und} \quad \alpha_i = 7$$

der Dämpfungsfaktor zu

$$\nu = \frac{\alpha_i}{k} = \frac{7}{2,5} = 2,8.$$

Der Wasserwert der tatsächlich die Gebäude begrenzenden Konstruktionen ist, wenn auch klein, doch nicht gleich 0, und so ist der tatsächliche Dämpfungsfaktor größer als der hier dargestellte.

Die voraussichtlichen Schwankungen der Außentemperatur wurden auf Grund der über Budapest zur Verfügung stehenden Angaben untersucht. In der meteorologischen Datensammlung [1] sind die sogenannten täglichen aperiodischen Temperaturamplituden zu finden, die den Unterschied zwischen den maximalen und minimalen Temperaturen des Tages bedeuten. (Diese sind nicht mit dem Unterschied zwischen den maximalen und minimalen stündlichen Mitteltemperaturen zu verwechseln, deren aperiodische Schwankungen kleiner sind.) Wir stellten alle im Laufe einer Heizungsperiode vorkommenden Temperaturen zu Temperaturintervallen zusammen. In einem Hystogramm wurden die Werte der vorkommenden aperiodischen Amplituden neben der gegebenen Tagesmitteltemperatur aufgezeichnet [2]. Die Hystogramme waren im allgemeinen unimodal mit positiver Asymmetrie. Werden die Scheitelwerte der Hystogramme in Abhängigkeit von der Außentemperatur aufgezeichnet,

erhält man Abbildung 1. Danach beträgt der voraussichtliche Wert der aperiodischen Tagesamplitude bei einer Tagesmitteltemperatur von 0°C oder im Falle einer noch niedrigeren Temperatur $\sim 6^\circ\text{C}$, womit gesagt ist, daß die Schwankung der Außentemperatur ungefähr $\pm 3^\circ\text{C}$ beträgt.

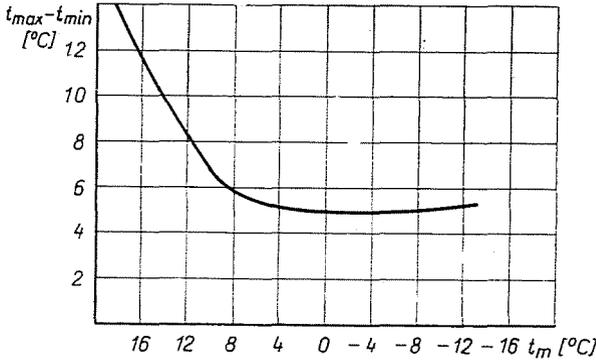


Abb. 1

Zieht man den kleinstmöglichen Wert des Dämpfungsfaktors sowie die voraussichtlichen Temperaturschwankungen in Betracht kann festgestellt werden, daß für die Innenflächen der Begrenzungswände von Leichtbauten Temperaturschwankungen von einigen Zehntelgraden, für die Innenflächen der Türen- und Fensterkonstruktionen von nahezu 1°C zu erwarten sind. Die durch geringe Temperaturschwankungen verursachte Wärmestromdichte schwankt ebenfalls:

$$\Delta \dot{q} = \frac{\Theta_a}{\nu} \alpha_i \quad (12)$$

Im ungünstigsten Falle, wenn der Dämpfungsfaktor (ν) am kleinsten ist, gilt:

$$\Delta \dot{q} = \Theta_a \frac{k}{\alpha_i} \alpha_i = \Theta_a \cdot k.$$

Der größtmögliche Wert der Schwankung der Wärmestromdichte wird in Prozenten der Wärmestromdichte \dot{q}_0 ausgedrückt, die zur Auslegungstemperatur gehört;

$$\frac{\Delta \dot{q}}{\dot{q}_0} = \frac{\Theta_a}{t_i - t_a} \cdot 100\% \quad (13)$$

In Anbetracht dessen, daß bei einer Außentemperatur von 2 bis -15°C der voraussichtliche Amplitudenwert ungefähr 3°C ist, die Temperaturdiffe-

renz im Auslegungsfall jedoch 35 °C beträgt, kann der Wärmeverlust aus dem Raum durch die äußere Begrenzungswand im ungünstigsten Falle um 8—9% schwanken. Diese harmonische Schwankung verursacht eine harmonische Innenraumtemperaturschwankung, deren Wert von der Wärmestabilität des betreffenden Raumes abhängt.

Die Wärmestabilität eines Raumes (H) ist die Kennziffer, die angibt, durch wieviel kcal/h (in 24 h Perioden) Wärmestromschwankung im Raum eine Temperaturschwankung mit einer Amplitude von 1 °C verursacht wird. Die Berechnung geschieht mit der unten angegebenen Formel:

$$H = \sum_{j=1}^p F_j \frac{1}{1/\alpha_i + U_j}, \quad (14)$$

wobei:

- F_j — Oberfläche der Begrenzungswände [in m²],
- α_i — Wärmeübergangszahl der Innenseite [in kcal/m² h °C],
- U_j — Wärmeindringungszahl an der inneren Oberfläche der mit »j« bezeichneten Begrenzungskonstruktion [in kcal/m² h °C],
- p — Anzahl der Begrenzungswände (äußere und innere) bedeuten.

Die voraussichtliche Raumtemperaturschwankung ist im allgemeinen auch in der Leichtbauweise auf 1 °C zu veranschlagen, weil der Zahlenwert der Wärmestabilität im allgemeinen den Zahlenwert des Wärmeverlustes von 8—10% erreicht, damit gilt:

$$\theta_i \approx \frac{0,08 \cdot Q_{tr}}{H} \approx 1.$$

Die sich im Falle von »ungünstigen« Gebäudekonstruktionen ergebenden Temperaturschwankungen von 1 °C erfordern nicht die Anwendung eines gesonderten Zuschlages. Wenn die Wärmestabilität eines Raumes so gering ist, daß eine Temperaturschwankung von mehr als 1 °C auftritt, so kann mit dem Einbau der nötigen Mehrleistung auch nur erreicht werden, daß sich die Temperaturschwankung mit unveränderter Amplitude, aber um einen höheren Mittelwert abspielt. Daraus ergibt sich also, daß die Vermeidung von Temperaturschwankungen eine Aufgabe der Regelung und nicht eine der Auslegung ist.

Zusammenfassung

Innerhalb der Heizungsperiode kann ein sich auf einen gewissen Zeitabschnitt erstreckender Abfall der Außentemperatur erfolgen.

In diesem Falle spielt bei der Gestaltung der Innentemperatur die Wärmespeicherungsfähigkeit der äußeren und inneren Begrenzungsschichten der Gebäude eine Rolle. In diesem Beitrag wurden die Wärmespeicherung, der Dämpfungsfaktor, die Wirkung des Anteils der

verglasten Flächen auf die Gestaltung der Innentemperatur untersucht, sowohl für den Zeitabschnitt einer »Kältewelle« (Kältefront, Kälteeinbruch) als auch hinsichtlich der 24h-Periode einer Außentemperaturschwankung, unter besonderer Berücksichtigung der modernen Leichtbauweise.

Es wurde nachgewiesen, daß sich auch im Falle der Leichtbauweise mit Rücksicht auf das Verhalten der Innentemperatur die Anwendung eines besonderen Zusatzfaktors bei der Wärmebedarfsrechnung erübrigt. In den selten vorkommenden, ungünstigen Fällen ist dieses Problem nicht bei der Auslegung, sondern mittels automatischer Regelung zu lösen.

Literatur

1. Klimaatlas von Ungarn. Akadémiai Kiadó, Budapest 1967.
2. ZÖLD, A.: Távfűtésre kapesolt lakóépületek tényleges hőigényének vizsgálata. Dissertation. Budapest 1967.

Dr. András ZÖLD, Budapest XI., Sztoczek u. 2—4. Ungarn.