Die Beeinflussung von Energiebilanzen durch Sonnenstrahlung auf nichttransparente Bauteile

insbesondere auf Aussenwände während der Heizsaison

R. Weiersmüller, Schlieren

Für die Dimensionierung der Heiz- oder Klimaanlagen sind die kurzfristig auftretenden Bedarfsspitzen von ausschlaggebender Bedeutung, wie am Beispiel Fenster besonders anschaulich dargestellt werden kann: Unabhängig davon, ob nun die Wärmebilanz während der Heizsaison positiv oder negativ ist, muss bei der Festlegung des Heizleistungsbedarfs vom ungünstigsten Fall - grosse Temperaturdifferenzen und kein Strahlungsgewinn von der Sonne - ausgegangen werden. Die nur beschränkt anwendbaren Möglichkeiten zur Dämpfung der Wärmestromschwankungen und somit eine Wärmeabgabe mit hohen Spitzenwerten (Bild 1) erfordert Heizanlagen, deren volle Heizleistung (vielleicht) nur während einiger Stunden im Jahr gebraucht wird.

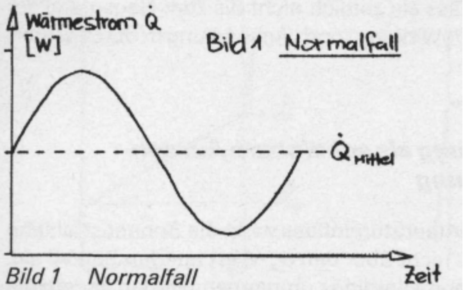


Bild 1 Normalfall

Abgesehen von dem grösseren Anschaffungspreis verursacht eine für einen hohen Spitzenbezug ausgelegte Heizung dauernd zusätzliche Kosten, da der Anlagenwirkungsgrad bei kleinerer Auslastung absinkt.

Beim Fenster können Verbrauchsspitzen in der Nacht beispielsweise durch Isolierläden oder -storen verkleinert werden. Diese Massnahmen bewirken eine Reduktion des Spitzenwärmeverlustes (Bild 2) während der Nacht und führen im Mittel zu einer Verminderung des Energieverbrauchs. Eine Dämpfung (Bild 3) führt dagegen bei gleichem mittleren Verbrauch lediglich zu stärker abgeflachten Extremwerten.

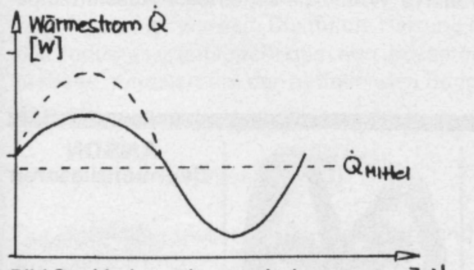


Bild 2 Verbrauchsverminderung

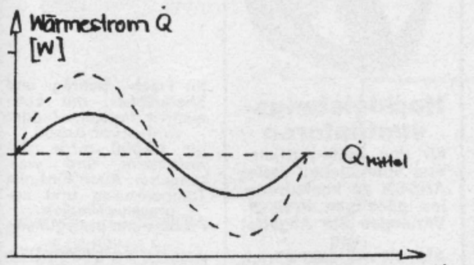


Bild 3 Symmetrische Dämpfung

Bei Aussenwänden können die maximalen und minimalen Verluste je nach Grösse der Wärmespeicherkapazität verschieden stark ausgemittelt oder gedämpft werden. Der mittlere Wärmeverlust kann durch Anwendung eines Bauteils mit beispielsweise dem halben k-Wert gesenkt werden (Bild 4); bei zugleich halber Wärmekapazität bleibt aber die Variation der Verluste im gleichen Rahmen.

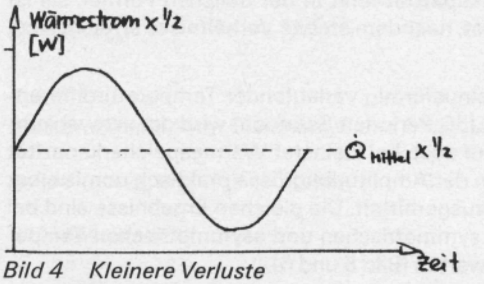


Bild 4 Kleinere Verluste

Bei Massivmauern gibt der Einfluss der Wärmespeicherkapazität auf den nutzbaren Anteil Sonnenstrahlung immer wieder Anlass zu Diskussionen.

Die folgenden Betrachtungen basieren auf einigen vereinfachenden Annahmen und beschreiben weder die extremsten Verhältnisse, noch erheben sie Anspruch darauf, wirklich alle möglichen Einflüsse am gesamten Gebäude umfassend darzustellen. Es ist sicher sinnvoller, wenn gewisse bauphysikalische Probleme zuerst einmal ohne Komplikationen einzeln abgehandelt werden.

Die andere Möglichkeit, die sogenannte integrale Betrachtungsweise des ganzen Gebäudes mit sämtlichen - teilweise sich überlagernden - Einflüssen ist wissenschaftlich sicher interessant, dürfte aber den Normalverbraucher eindeutig überfordern und für jedes Gebäude einzeln auch näherungsweise nur mit Computermodellen zu berechnen sein.

Diese Vereinfachungen betreffen die folgenden Punkte:

- Die nichttransparenten Bauteile werden für sich allein betrachtet; Einflüsse, z.B. zusammen mit Fenstern, bleiben unberücksichtigt.
- Die Wärmespeicherkapazität ist in jedem Falle so gross, dass die Raumlufttemperatur auch bei grossem Strahlungsangebot gleichbleibend ist und somit zu einer entsprechenden Verminderung der Heizwärmeabgabe führt.
- Die Wärmeübergangszahl α_a ist konstant und beinhaltet auch die mittlere Rückstrahlung bei einem durchschnittlichen Emissionskoeffizienten; der Konvektionsanteil ist auf eine übliche Oberfläche bei ausgemittelten Windgeschwindigkeiten bezogen (Durchschnitt von gemessenen Werten während der Heizsaison).
- Mauern und Dächer mit Hinterlüftungen sind von den Betrachtungen ausgeschlossen.
- Die untersuchten Zeitsequenzen umfassen mindestens eine Periode; die Anfangs- und Endzustände müssen entsprechend gleich sein (Phasendifferenz zwischen Einfluss und Wirkung berücksichtigt).
- Die Wärmewiderstände der festen Materialien sind richtungsunabhängig (von innen nach aussen bzw. umgekehrt).

Mittlere Wärmeverluste bei instationären Temperaturverläufen

Bei konstanten Temperaturdifferenzen ist der Wärmeverlust pro Quadratmeter proportional dem k-Wert und der Temperaturdifferenz: $q = k \, . \, \Delta T \; [W/m^2]$

Die Wärmespeicherkapazität fehlt in der üblichen Formel; sie ist für den Wärmeverlust, nachdem stabile Verhältnisse erreicht sind, ohne Bedeutung.

Bei beispielsweise sinusförmig verlaufenden Temperaturdifferenzen hoher Frequenz (50 Perioden/Sekunde) wird der schwankende Temperaturverlauf auch bei kleinster Wärmespeicherkapazität und unabhängig von der Amplitudengrösse praktisch unmittelbar auf der Oberfläche ausgemittelt. Die gleichen Ergebnisse sind bei nichtsinusförmigen symmetrischen und asymmetrischen Temperaturverläufen zu erwarten (Bild 5 und 6).

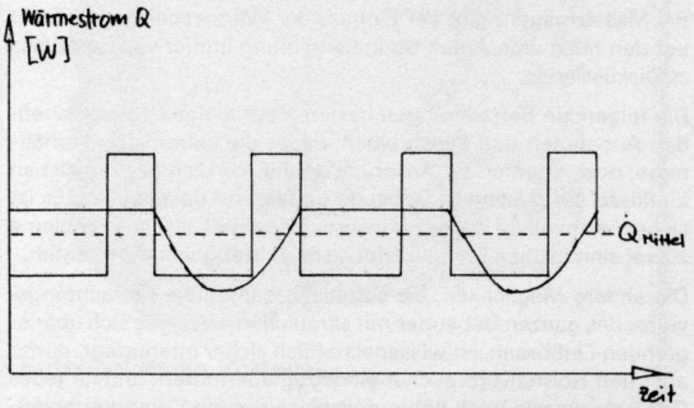


Bild 5 Mittlerer Wärmestrom bei verschiedenen symmetrischen Temperaturverläufen

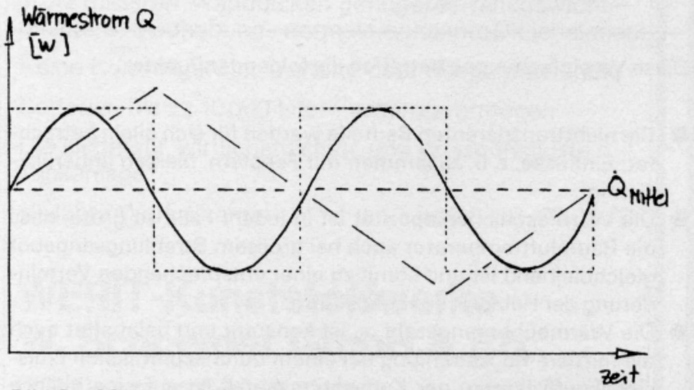


Bild 6 Mittlerer Wärmestrom bei verschiedenen asymmetrischen Temperaturverläufen

Bei einer sehr grossen Periodendauer (z.B. eine Periode/Jahr) ist der Wärmeverlust ebenfalls proportional der mittleren Temperaturdifferenz und auch unabhängig von der Wärmespeicherkapazität.

Wenn nun die Wärmeverluste entsprechend der mittleren Temperaturdifferenz und unabhängig von der Kurvenform sowohl bei sehr grossen als auch bei sehr kleinen Frequenzen gleich sind, dürfte dies auch bei mittlerer Frequenz wie beim Tagesgang der Fall sein. Die Wärmespeicherkapazität hat auf die durchschnittlichen Wärmeverluste wiederum keinen Einfluss; die Kapazität bewirkt lediglich eine Amplitudendämpfung sowie eine Phasenverschiebung zwischen Einfluss und Wirkung.

Analog den Verhältnissen bei der RC-Filterkette aus der Elektrizitätslehre nimmt die Amplitudendämpfung zu bei

– grösserer Speicherkapazität
– grösserem Wärmewiderstand
– höherer Frequenz
– grösserem Wärmeübergangs-Widerstand aussen $\left(\frac{1}{\alpha_a}\right)$
– kleinerer Wärmeübergangs-Widerstand innen $\left(\frac{1}{\alpha_i}\right)$

Überlegungen, bei denen die Wärmespeicherkapazität zu einer Verminderung der Wärmeverluste führt, zeichnen sich normalerweise dadurch aus, dass sie zeitlich nicht bis zum Neuanfang der nächsten Periode (Einwirkung und Auswirkung!) durchgeführt werden.

Die Sonnenstrahlung als scheinbare Aussentemperaturerhöhung

Im Gegensatz zum Temperatureinfluss wirkt die Sonnenstrahlung - zumindest primär - nicht über den α_a-Wert auf den Bauteil ein. Dieser Unterschied kann allerdings umgangen werden, indem die Sonnenstrahlung als scheinbare Temperaturerhöhung ausgedrückt und so angesetzt wird, dass bei Berücksichtigung des α_a-Wertes gerade wieder die entsprechende Globalstrahlung G erhalten wird.

Beispiel:

$\vartheta_a = 5\,°C$ $\qquad \alpha_a = 23\, W/m^2\,K$
$G = 165\, W/m^2$ $\qquad$ Absorptionskoeffizient $a = 0{,}7$
$\vartheta_{a\ scheinbar} = ?$

Pro K «wirken» 23 W auf den Quadratmeter Bauteil (α_a = 23 W/m² K). Eine scheinbare Erhöhung von 5 K entspricht einer «Wärmeübergabe» von 115 W/m²; die scheinbare Aussentemperatur ist somit 10 °C.

Die Wärmespeicherkapazität spielt auch hier im Rahmen der geäusserten Vorbehalte keine Rolle. Wenn die Globalstrahlung *G* als scheinbare Aussentemperaturerhöhung beschrieben werden kann und bei letzterer die Mittelwertbildung zulässig ist, kann der Globalstrahlungsverlauf ohne Genauigkeitseinbussen ebenfalls ausgemittelt werden.

Die Herleitung des mittleren Energiegewinnes aus der Sonnenstrahlung

Der Temperaturverlauf an einer Aussenmauer bei konstanten Temperaturen ohne Strahlungseinfall zeigt Bild 7, Fall A:

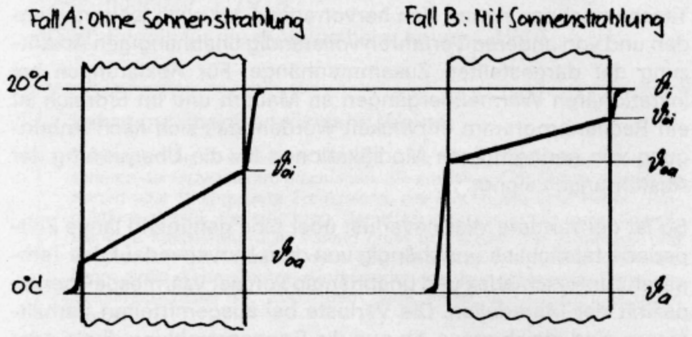


Bild 7 Verschiedene Temperaturverhältnisse bei Aussenmauern

Die Wärmestromdichte q_i ist auf der Innenseite

$$q_i = (\vartheta_i - \vartheta_{oi})\,\alpha_i \qquad [W/m^2] \qquad 1)$$

oder auf der Aussenseite

$$q_a = (\vartheta_{oa} - \vartheta_a)\,\alpha_a \qquad [W/m^2] \qquad 2)$$

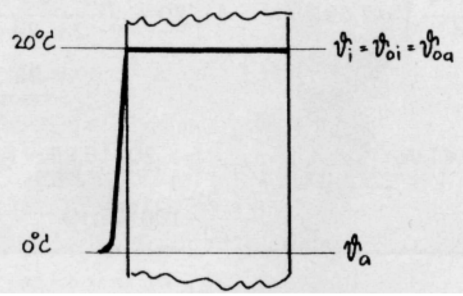
Beim Auftreten von Sonnenstrahlung auf das Bauteil ist - konstante Verhältnisse vorausgesetzt — q_i nicht mehr gleich gross wie q_a. Die äussere Oberflächentemperatur ϑ_{oa} ist angestiegen, die äusseren Verluste werden somit grösser, während die Verluste auf der Innenseite aufgrund der höheren inneren Oberflächentemperatur ϑ_{oi} kleiner werden. Die für die Heizung massgebende Grösse des Verlustes q_i entspricht dem nun grösseren Verlust auf der Aussenseite, reduziert um den auffallenden Sonnenenergieanteil (Bild 7, Fall B).

$$q_i = q_a - G \cdot a \qquad [W/m^2] \qquad 3)$$

Die Richtigkeit dieser Beziehung ist anhand von Bild 8 überprüfbar, ist doch bei $q_i = 0$

$$q_a = G \cdot a \qquad [W/m^2]$$

Bild 8 Temperaturverhältnisse bei Aussenmauern



Die innere Oberflächentemperatur ist (Bild 7, Fall B)

$$\vartheta_{oi} = \vartheta_i - \frac{(\vartheta_i - \vartheta_{oa})\,\frac{1}{\alpha_i}}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} \qquad [°C] \qquad 4)$$

und die Wärmestromdichte auf der Innenseite

$$q_i = (\vartheta_i - \vartheta_{oa})\,\frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda}} \quad [W/m^2] \qquad 5)$$

Die Kombination von Gleichung 2 und Gleichung 3 ergibt

$$G \cdot a + q_i = \alpha_a\,(\vartheta_{oa} - \vartheta_a) \qquad [W/m^2] \qquad 6)$$

und umgewandelt

$$\vartheta_{oa} = \frac{G \cdot a + q_i + \vartheta_a \cdot \alpha_a}{\alpha_a} \quad [°C] \qquad 7)$$

Gleichung 7 in Gleichung 5:

$$q_i = \left[\vartheta_i - \frac{G \cdot a + q_i + \vartheta_a \cdot \alpha_a}{\alpha_a}\right] \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda}} \qquad [W/m^2] \qquad 8)$$

oder umgeformt

$$q_i = k\left[\vartheta_i - \left(\vartheta_a + \frac{G \cdot a}{\alpha_a}\right)\right] \qquad [W/m^2] \qquad 9)$$

Der Quotient der Sonnenstrahlung und der Wärmeübergangszahl α_a führt - wie schon weiter vorn angedeutet - zu einer scheinbaren Aussentemperaturerhöhung und somit zu einer Verminderung der Wärmeverluste. Das Glied ($\vartheta_a + G \cdot a/\alpha_a$) entspricht - siehe VSHL-Kühllastregeln - der Sonnenlufttemperatur. Ein schwankender Verlauf ist ebenfalls durch den Mittelwert ersetzbar.

Praktischer Nutzen der Ausführungen

Bei Betrachtung eines genügend langen Zeitabschnittes ist der absolute mittlere Strahlungsgewinn in Wattstunden pro Zeiteinheit direkt proportional dem k-Wert (Gleichung 10). Der relative Strahlungsgewinn (z.B. in Prozent) ist unabhängig vom k-Wert (Gleichung 11). Unter den eingangs aufgelisteten Vorbehalten sind auch die Schichtfolgen (Aussen- oder Innenisolation) sowie deren Wärmekapazitäten auf den Wärmegewinn bedeutungslos.

$$q_{Nutz} = \frac{G \cdot a}{\alpha_a}\,k \qquad [W/m^2] \qquad 10)$$

$$\frac{q_{Nutz}}{q_i + q_{Nutz}} = \frac{\frac{G \cdot a}{\alpha_a}}{\vartheta_i - \vartheta_a} \qquad [-] \qquad 11)$$

Die maximale Verwertbarkeit der Sonnenstrahlung ist gegeben, wenn der Gewinn aus der Sonnenstrahlung nahezu der Globalstrahlung, reduziert durch den Absorptionskoeffizienten, entspricht. Dieser Fall (Gleichung 12) kann, da der α_a-Wert ein Bestandteil des k-Wertes und somit nicht kleiner als der k-Wert werden kann, lediglich annähernd erreicht werden (z. B. bei Niedertemperatur-Sonnenkollektoren ohne transparente Abdeckung!)

$$\eta_{\max} = \frac{q_{\mathrm{Nutz}}}{G \cdot a} = \frac{k}{\alpha_a} \, [-] \qquad 12)$$

Beispiel

Zwei Mauern (k_1 = 0,4 W/m^{2}K, k_2 = 1 W/m^2 K) werden pro Tag während vier Stunden mit 200 W/m^2 (entspricht 800 Wh/Tag und m^2 oder durchschnittlich 33,3 W/m^2) besonnt. Wie gross sind die mittleren Wärmeverluste bei ΔT = 20 K; um wieviel werden sie wegen der Sonnenstrahlung vermindert? Absorptionskoeffizient a = 0,7. (Siehe Tabelle unten.)

Beispiel 2

Die Globalstrahlung G auf eine senkrechte, nach Süden gerichtete Fläche dürfte im Dezember maximal etwa 800 W/m^2, im Sommer etwa 500 W/m^2 betragen. Wie gross ist die maximal mögliche scheinbare Temperaturerhöhung bei einem Absorptionskoeffizienten von 0,6, wenn die Wärmedurchgangszahl und die Wärmespeicherkapazität nahezu Null sind («ideale» Aussenisolation)?

$$\Delta T_{\mathrm{Dez}} = \frac{800\,\mathrm{W} \cdot 0{,}6\,\mathrm{m^2\,K}}{\mathrm{m^2} \cdot 23\,\mathrm{W}} = 20{,}9\,°\mathrm{K}$$

$$\Delta T_{\mathrm{Juli}} = \frac{500\,\mathrm{W} \cdot 0{,}6\,\mathrm{m^2\,K}}{\mathrm{m^2} \cdot 23\,\mathrm{W}} = 13{,}0\,°\mathrm{K}$$

Achtung! Die Genauigkeit dieser Ergebnisse hängt sehr stark von α_a ab. Der eingesetzte Wert 23 W/m^2 K ist ein über die Heizperiode gemittelter Wert bei durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten. Er besteht bekanntlich aus einem Konvektions- und einem Strahlungsanteil. Die Konvektion wird sehr stark durch die Luftgeschwindigkeit beeinflusst, während die Strahlung von der vierten Potenz der Temperatur abhängig ist. Bei k = 0 ist auch q_i = 0; die Oberflächentemperatur ϑ_{oa} ist somit praktisch identisch mit der scheinbaren Aussentemperatur. Ein Temperaturunterschied zwischen der Oberflächentemperatur ϑ_{oa} und der scheinbaren Aussentemperatur stellt sich erst ein, wenn die Wärmedurchgangszahl einen endlichen Wert annimmt. Dieser Temperatursprung ist also nicht abhängig von der Materialbeschaffenheit der äusseren Schicht, sondern vom k-Wert der ganzen Wand, mit anderen Worten, einmal konstante Zustände erreicht, hat eine aussenisolierte Wand die gleiche Oberflächentemperatur wie eine unisolierte Massivmauer mit gleichem k-Wert. Bei instationärem Temperaturablauf wird allerdings die Oberflächentemperatur der unisolierten Massivmauer wegen der kapazitätsbedingten Maxima-Verzögerung kaum dieselben Spitzentemperaturen ereichen; die Wärmebilanz wird aber theoretisch nahezu gleich sein. Praktisch ergibt die aussenisolierte Wand wegen der temperaturabhängigen Rückstrahlung einen etwas geringeren Gesamtgewinn. Eine Verminderung des Gesamtgewinnes ist also nicht auf eine Abnahme der Strahlungsabsorption bei höheren Temperaturen zurückzuführen, sondern auf eine Zunahme der Rückstrahlungs- und Konvektionsverluste!

Überprüfungsmöglichkeiten

Die heute auf dem Markt erhältlichen programmierbaren Taschenrechner eignen sich hervorragend zur noch weitergehenden und von anderen Verfahren vollständig unabhängigen Abstützung der dargestellten Zusammenhänge. Für Abklärungen bei instationären Wärmeübergängen an Mauern und im Erdreich ist ein Rechenprogramm entwickelt worden, das sich nach Anbringung von geringfügigen Modifikationen für die Überprüfung der Ausführungen eignet.

So ist der mittlere Wärmeverlust über eine genügend lange Zeitperiode tatsächlich unabhängig von dem Kurvenverlauf des Temperaturunterschiedes und unabhängig von der Wärmespeicherkapazität der Materialien. Die Verluste bei ausgemittelten Verhältnissen sind gleich gross, ob nun die Sonnenstrahlung direkt oder über eine scheinbare Aussentemperaturerhöhung auf die Bauteiloberfläche einwirkt.

Wie schon erwähnt, wird eine Bilanz stark durch die Grösse der Wärmeübergangszahl α_a beeinflusst. Es würde der Sache sehr dienen, wenn genauere Zahlen, die ebenfalls die Rückstrahlung enthalten und auf Messungen beruhen, für die ganze Heizperiode als gewichtetes Mittel zur Verfügung stehen würden.

Literaturverzeichnis

C. Kupke: «Kenngrössen des sommerlichen Wärmeschutzes von Aussenwänden und Dächern». Gesundheitsingenieur, 9,1978.

G. Nehring: «Über den Wärmefluss durch Aussenwände und Dächer in klimatisierte Räume infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden meteorologischen Elemente.» Dissertation an der TU Berlin, 1961.

R. Weiersmüller: «Dimensionierungsprobleme bei Heizanlagen in der Stadt Zürich.» Schweiz. Bauzeitung, 26,1978.

Zu Beispiel 1	*Wand 1*	*Wand 2*
Verluste ohne Sonnenstrahlung	$0{,}4 \times 20 = 8\,\mathrm{W/m^2}$	$1 \times 20 = 20\,\mathrm{W/m^2}$
Verluste mit Sonnenbestrahlung [nach (9)]	$0{,}4 \left[20 - \frac{200 \cdot 0{,}7{-}4}{23 \cdot 24}\right] = 7{,}59\,\mathrm{W/m^2}$	$1 \left[20 - \frac{200 \cdot 0{,}7 \cdot 4}{23 \cdot 24}\right] = 18{,}99\,\mathrm{W/m^2}$
Scheinbare mittlere Temperaturerhöhung	$\frac{33{,}3 \cdot 0{,}7}{23} = 1{,}01\,\mathrm{K}$	$\frac{33{,}3 \cdot 0{,}7}{23} = 1{,}01\,\mathrm{K}$
Mittlerer Strahlungsgewinn	$8 - 7{,}59 = 0{,}41\,\mathrm{W/m^2}$	$20 - 18{,}99 = 1{,}01\,\mathrm{W/m^2}$
Verlustverminderung in %	$\frac{0{,}41}{8} 100 = 5{,}1\,\%$	$\frac{1{,}01}{20} 100 = 5{,}1\,\%$

R. Sagelsdorff und *U. Stähli:* «Grundlagen zur Beurteilung von Aussenwänden für den sommerlichen Wärmeschutz.» Schweiz. Bauzeitung ,10,1977.

U. Stähli: «Einfluss des Wärmespeichervermögens von Bauteilen auf Heizenergiebedarf und Behaglichkeit.» Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie, 1978.

H.H. Hauri: «Praktische Berechnung des instationären Wärmeflusses durch ein- und mehrschichtige Wände.» Institut für Hochbautechnik ETH Zürich, Bericht Nr. 2,1977.

G. Kieper: «Ein neues Verfahren zur Berechnung der für den sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden wichtigen Grössen Temperaturamplitudenverhältnis und Phasenverschiebung.» Gesundheits-ingenieur, 3,1978.

VSHL-Regeln für die «Kühllastberechnung», 1975.