Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 109 (1991)
Heft: 38

Artikel: Sonnenenergiegewinn durch opake Bauteile
Autor: Frank, Thomas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-86014

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

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

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

Download PDF: 10.07.2025

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

Sonnenenergiegewinn durch opake Bauteile

Bezüglich der Beurteilung der Sonnenenergiegewinne durch opake Wände besteht bei den Planern vielerorts eine Unsicherheit. Wie wirken sich k-Wert und Masse der Wand auf die Gewinnsituation aus? Wie sollen Wärmetransportvorgänge an der Gebäudehülle rechnerisch erfasst werden? Der in der Übergangszeit nicht mehr vernachlässigbare Strahlungsgewinn der opaken Gebäudehülle soll mittels eines stationären Rechenansatzes über den veränderten Transmissionswärmeverlust berücksichtigt werden.

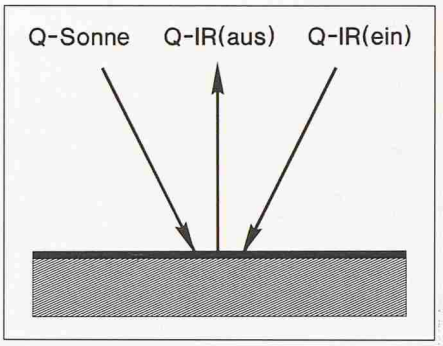

Bild 2. Strahlungsvorgänge an der Oberfläche

Abgrenzung der Problemstellung

Der Wärme- und Energiehaushalt eines ganzen Gebäudes wird von einer Vielzahl von Einflussgrössen bestimmt,

VON THOMAS FRANK, DÜBENDORF

welche untereinander eng verknüpft sind (vgl. Bild 1). Im folgenden Beitrag soll nur die Wechselwirkung der Gebäudehülle mit dem Aussenklima bei fest vorgegebenen Randbedingungen bezüglich Innenklima, Heizung, Benutzerverhalten und Betrieb genauer untersucht werden.

Die Ausführungen beschränken sich somit auf die Bestimmung der Transmissionswärmeverluste eines Einzelbauteiles (Stufe Nutzenergie) und können daher nicht Auskunft über den Energiebedarf des ganzen Gebäudes geben. Hierzu ist es notwendig, die Wärmebilanz für das Gebäude unter Einbezug aller Verluste und Gewinne zu erstellen und die Ausnutzbarkeit der Gewinne zu berücksichtigen. Dieses Rechenverfahren ist in der SIA-Empfehlung 380/1 «Wärmeschutz im Hochbau» enthalten, wobei dort jedoch keine Berücksichtigung der Sonnenenergiegewinne durch *opake Bauteile* vorgenommen wird.

Die Erfassung der Sonnenenergiegewinne bei opaken Bauteilen erfolgt im folgenden über die Ermittlung der Transmissionswärmeverluste; d.h. diese erfahren infolge der absorbierten Sonnenstrahlung eine Reduktion. Die verschiedenen Faktoren, welche die Wärmebilanz des Bauteiles beeinflussen, sollen nun genauer analysiert werden.

Strahlungsvorgänge

An einer horizontalen Oberfläche können folgende in Bild 2 dargestellte Strahlungsvorgänge beobachtet werden:

- kurzwellige Sonneneinstrahlung Q-Sonne
- langwellige Infrarotabstrahlung Q-IR(aus)
- langwellige Infraroteinstrahlung Q-IR(ein)

Diese drei Strahlungsarten unterscheiden sich vor allem bezüglich ihrer spektralen Intensitätsverteilung (Bild 3). Die Sonnenstrahlung weist wegen ihrer hohen Strahlungstemperatur (rund 6000 Kelvin) ein Intensitätsmaximum im kurzwelligen Bereich bei 0,5 µm auf. Die terrestrische Oberfläche strahlt wie ein grauer Körper mit einer Temperatur von rd. 300 Kelvin Infrarotstrahlung ab, deren Intensitätsmaximum bei 10 µm liegt. Aus der Atmosphäre und der Umgebung wird langwellige Infrarotstrahlung auf die Oberfläche eingestrahlt. Die Atmosphäre weist dabei eine Besonderheit auf: Bei klarem Himmel findet im Wellenlängenbereich von 8–14 µm ein markanter Einbruch der Strahlungsintensität statt; d.h. die Oberfläche strahlt in diesem Bereich

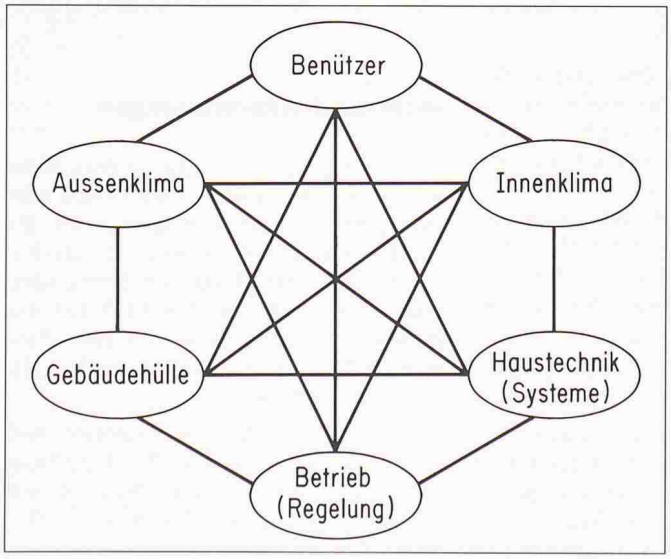

Bild 1. Einflussgrössen zum Energiehaushalt eines Gebäudes

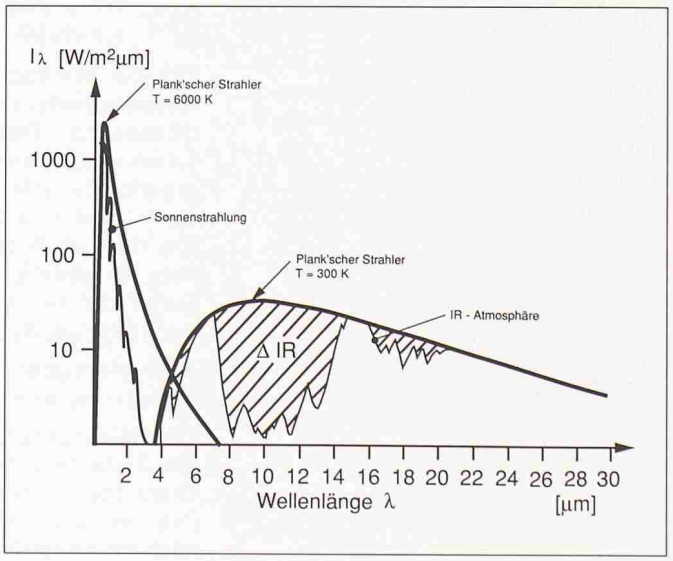

Bild 3. Spektrale Intensitätsverteilung der Sonnen- und Infrarotstrahlung

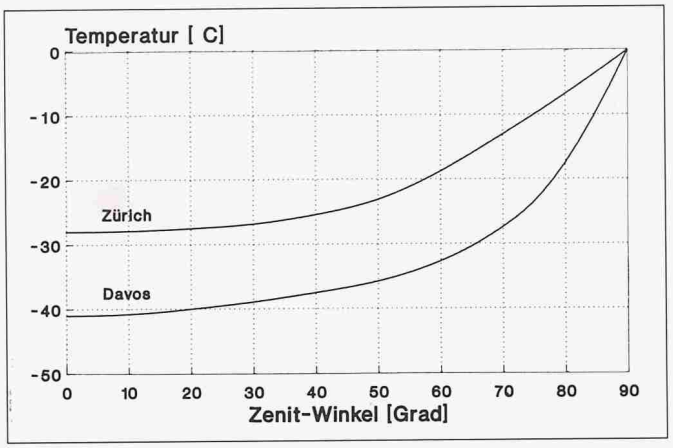

Bild 4. Strahlungstemperatur des klaren Himmels in Funktion des Zenit-Winkels, Aussenlufttemperatur $\vartheta_a = 0$ °C (Messungen EMPA, NF-Projekt «Strahlungsvorgänge», 1978)

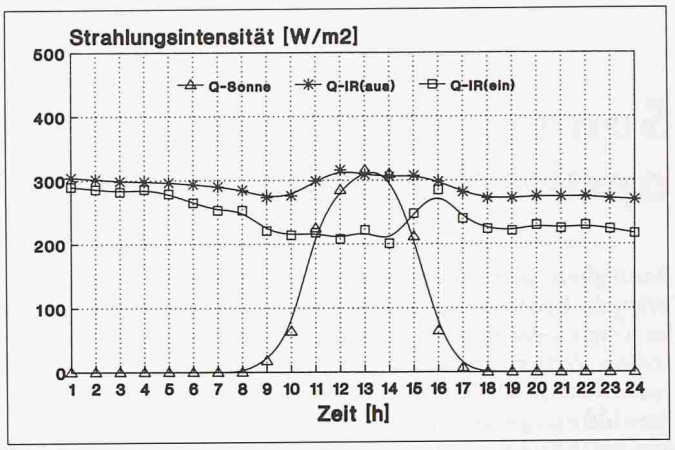

Bild 5. Strahlungseinflüsse an einem sonnigen Wintertag (Messungen EMPA; Maugwil 1.12.1980)

wesentlich mehr Infrarotstrahlung ab, als von der Atmosphäre eingestrahlt wird.

Dieses Infrarot-Strahlungsdefizit (schraffierte Fläche in Bild 3) stellt eine Wärmesenke dar, welche bei horizontalen Oberflächen 40–120 W/m² betragen und zu einer Unterkühlung der Oberfläche führen kann. Bei vertikalen Oberflächen kann diese Wärmesenke im Bereich von 20–60 W/m² liegen. Unterkühlte Oberflächen können deshalb in der Praxis bei klarem Himmel bei unbeheizten Bauteilen wie z.B. Scheiben von parkierten Autos oder bei hochwärmegedämmten Konstruktionen beobachtet werden, wo sich an den Oberflächen Kondensat- oder Eisschichten bilden.

Das Infrarotstrahlungsverhalten des klaren Himmels ist nicht homogen, sondern weist eine ausgeprägte Winkelabhängigkeit auf. Gegen den Zenit ist die Einstrahlung am geringsten, bedingt durch die geringere Luftschichtdicke. In Bild 4 ist die Strahlungstemperatur des Himmels in Funktion des Zenit-Winkels für zwei verschiedene Standorte dargestellt.

In Bild 5 ist ein typischer Tagesgang der drei Strahlungsgrössen, gemessen an einem sonnigen Wintertag für eine horizontale Oberfläche, dargestellt. Für den langwelligen Strahlungsaustausch ist dabei die Differenz zwischen der ein- und abgestrahlten Leistung von Bedeutung.

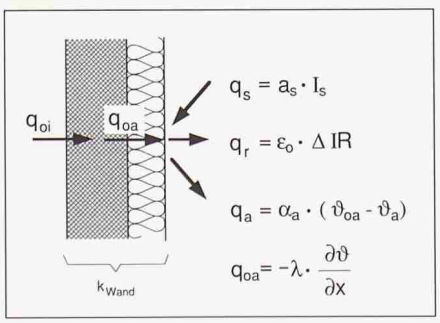

Bild 6. Wärmeströme an der Aussenoberfläche einer Fassade

Einflussfaktoren

Die Wärmestrombilanz einer opaken Fassade (Bild 6) wird an der Aussenoberfläche durch folgende Parameter beeinflusst:

- a_s Absorptionsgrad der Oberfläche für kurzwellige Strahlung (Sonnenenergiebereich 0,3–3µm)
- I_s Globalstrahlungsintensität [W/m²]
- ε_o Emissionsvermögen der Oberfläche für langwellige Strahlung (Infrarotbereich 3–50 µm)
- ΔIR Infrarotzusatzverlust an den klaren Himmel [W/m²]
- α_a Wärmeübergangskoeffizient aussen infolge Konvektion und Strahlung [W/m²K]
- ϑ_{oa}, ϑ_a Oberflächentemperatur, Aussenlufttemperatur [°C]
- λ Wärmeleitfähigkeit der Bauteilschicht [W/mK]

Für die Bestimmung des solaren Absorptionsgrades und des Emissionsvermögens im Infrarotbereich ist die Kenntnis der spektralen Oberflächeneigenschaften erforderlich. In den Bildern 7 und 8 ist das Reflexionsvermögen für verschiedene Baustoffoberflächen dargestellt. Für opake Bauteile gelten für den jeweiligen Spektralbereich folgende Beziehungen:

Absorptionsgrad bzw. Emissionsgrad + Reflexionsgrad = 100%

Der Wärmeübergangskoeffizient aussen kann in einen konvektiven und einen Infrarot-Strahlungsanteil aufgeteilt werden. Der Konvektionsanteil wird im wesentlichen von der Luftgeschwindigkeit bestimmt, der Strahlungsanteil von der Mitteltemperatur der Oberfläche und der Aussenluft (Bild 9).

Welchen Einfluss üben die in Bild 6 dargestellten Faktoren auf die Wärmeverluste eines Bauteiles aus? In den Bildern 10 bis 13 wird die prozentuale Reduktion der monatlichen Wärmeverluste infolge Berücksichtigung der Strahlungsvorgänge für folgende Einflüsse dargestellt:

- Absorptionsgrad der Wandoberfläche
- Exposition der Wand (Windeinfluss)
- Klimastandort (Temperatur und Sonneneinstrahlung)
- Orientierung des Bauteiles

Die Bilder zeigen deutlich, dass in den Übergangsmonaten Oktober, November und März, April die Transmissionswärmeverluste sehr stark durch die Sonneneinstrahlung reduziert werden; zudem kann jedoch auch die Situation auftreten, dass der Infrarot-Abstrahlungsverlust an den klaren Himmel die Sonnenenergiegewinne übertrifft und somit zu einer Erhöhung der Wärmeverluste führt (Flachdach, Nordwand).

Instationäre Berechnungen

Für die Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. An der EMPA wird unter anderem die Methode der Response-Faktoren verwendet, welche sich gut für den EDV-Einsatz eignet. Genauere Angaben und Programm-Listings hierzu sind in Lit. [1], [2] und [3] enthalten.

Anhand eines Rechenbeispieles soll aufgezeigt werden, wie die Transmissionswärmeverluste einer Wand durch die an der Aussenoberfläche absorbierte Sonnenstrahlung beeinflusst werden. Hierzu werden drei Wandkonstruktionen mit unterschiedlicher Masse, je-

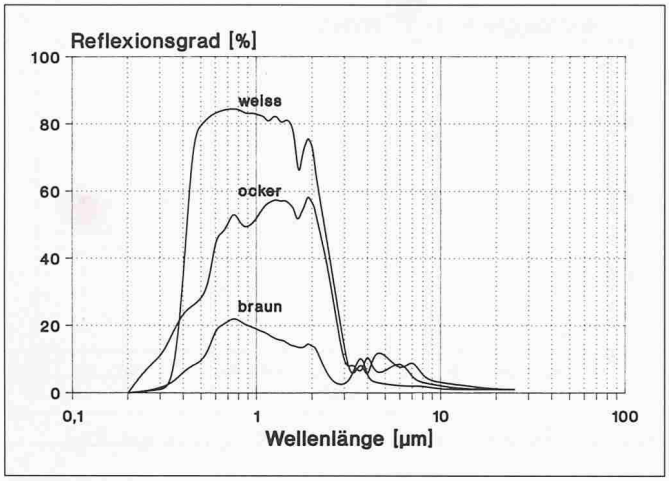

Bild 7. Reflexionsgrad von Verputzschichten

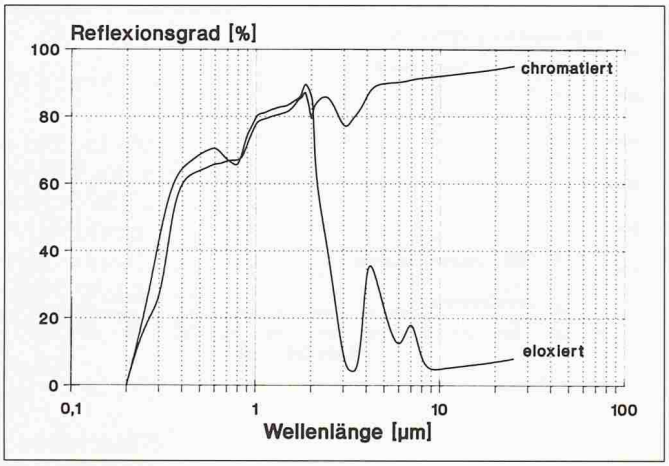

Bild 8. Reflexionsgrad von Aluminiumoberflächen

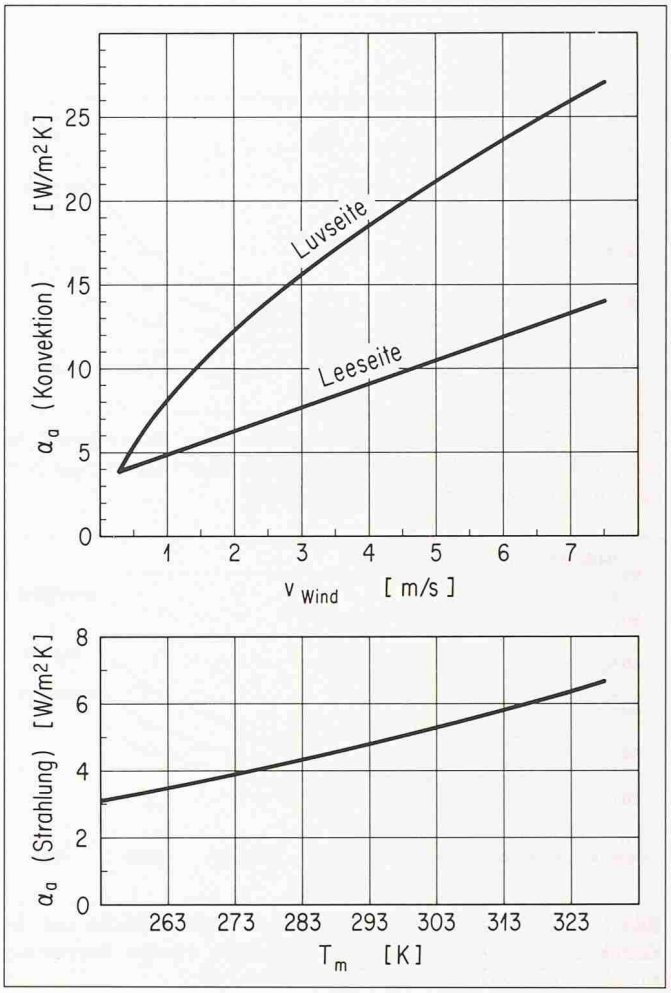

Bild 9. Wärmeübergangskoeffizient an Aussenoberflächen

doch mit demselben Wärmedämmvermögen (k-Wert = 0,39 W/m² K) und Absorptionsgrad (60%) betrachtet:

- Verbandmauerwerk (hohe Masse)
- Backsteinmauerwerk mit Aussenisolation (mittlere Masse)
- Isolationsplatte (keine Masse)

Bei einem konstanten Temperaturgefälle von $\Delta\vartheta$ = 20 °C wird der Einfluss eines sonnigen Tages auf den Verlauf der Wärmestromdichte an der Wandinnenoberfläche betrachtet (Bild 14). Mit Hilfe eines instationären Berechnungsmodelles wird untersucht, was mit der absorbierten Sonnenstrahlung an der opaken Wand geschieht, welche Wärmemenge in der Wandkonstruktion gespeichert werden kann und wie sich dies auf die Wärmestromdichte an der Innenoberfläche, d.h. auf den Transmissionswärmeverlust auswirkt.

Die Rechenresultate sind in Bild 15 zusammengestellt. Bezüglich des Wärmespeichervermögens weisen die drei Wandkonstruktionen sehr grossen Unterschiede auf. Im oberen Teil des Bildes ist der Wärmeinhalt, also die gespeicherte Solarwärme für die drei Wände dargestellt. Die Sonnenenergiegewinne werden beim Verbandmauerwerk über einen Zeitraum von 120 Std., bei der Backsteinwand mit der Aussenwärmedämmung über 50 Std. und bei der Isolationsplatte praktisch nicht gespeichert. Die Beeinflussung der Wärmestromdichte an der Innenwandoberfläche ist im mittleren Teil des Bildes dargestellt. Bei einer schweren, wärmeträgen Wand tritt die Wirkung stark verzögert auf, die Entlastungsspitze ist gering, und sie dauert über einen längeren Zeitraum an. Bei einer leichten Wand tritt die Wirkung rasch ein, weist eine starke Spitze auf, wodurch die Wärmestromdichte ohne weiteres auch ihre Richtung ändern kann. Die Wirkung klingt rasch wieder ab.

Die Energiebilanz der drei Wände ist im unteren Teil des Bildes als kumulative Summe der Wärmestromdichten dargestellt. Nach 120 Std. weisen alle drei Wände denselben Wärmeverlust auf. Bezogen auf die Systembilanzgrenze «Wand» kann somit kein Unterschied bei der Energiebilanz festgestellt werden. Bei einer Systembilanzgrenze «Raum» oder «Gebäude» kann sich dieses Bild unter Umständen ändern, muss doch die Frage einer unerwünschten Überwärmung des Raumes mitberücksichtigt werden. Die sofort wirksamen Sonnenenergiegewinne einer leichten Wand weisen eine schlechtere Ausnutzbarkeit auf im Vergleich zur massiven Wand. Dieser Problemkreis kann jedoch nicht bauteilorientiert beleuchtet werden, sondern muss den ganzen Raum bzw. das ganze Gebäude mit seinen Verlust- und Gewinnkomponenten einbeziehen.

Stationärer Lösungsansatz

Der stationäre Ansatz zur Berechnung des Transmissionswärmeverlustes eines Bauteiles, wie er z.B. in der SIA-Empfehlung 380/1 verwendet wird, vernachlässigt bislang den Einfluss der Sonneneinstrahlung. Für Mittelwertbetrachtungen über eine ganze Heizperiode mag dies gerechtfertigt sein, nicht jedoch für Bilanzbetrachtungen in monatlichen oder noch kürzeren Zeitschritten. Hier drängt sich eine Verfeinerung des Rechenansatzes auf. Dies kann erreicht werden, wenn anstelle der Aussenlufttemperatur eine sog. Strahlungslufttemperatur verwendet wird, welche sowohl die absorbierten Sonnenstrahlungsgewinne als auch die Infrarot-Strahlungsverluste an den klaren Himmel zu berücksichtigen vermag. Die Formel für die Bestimmung

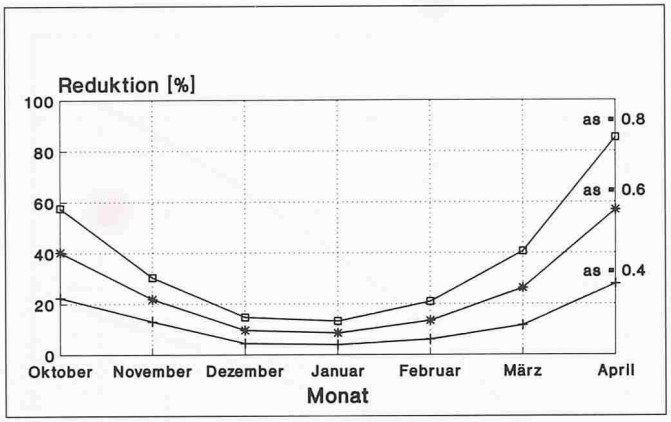

Bild 10. Einfluss des Absorptionsgrades der Wandoberfläche auf die Reduktion der Transmissionswärmeverluste infolge Sonneneinstrahlung (Südwand, Klima Genf)

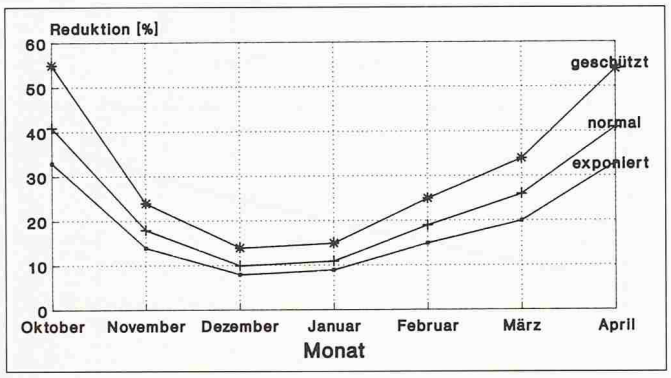

Bild 11. Einfluss der Exposition der Wandoberfläche auf die Reduktion der Transmissionswärmeverluste infolge Sonneneinstrahlung (Südwand, Klima Zürich, $a_s = 0,6$)

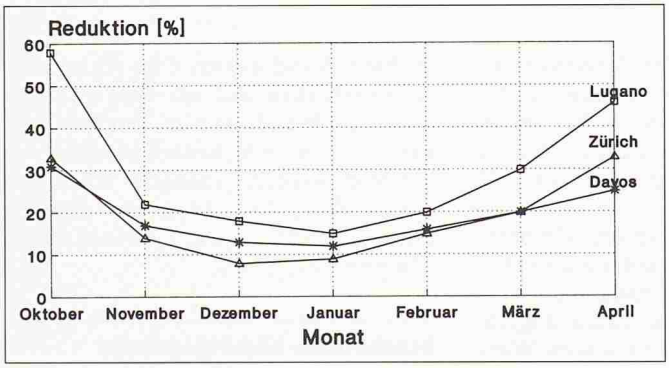

Bild 12. Einfluss des Klimastandortes auf die Reduktion der Transmissionswärmeverluste infolge Sonneneinstrahlung (Südwand, exponiert, $a_s = 0,6$)

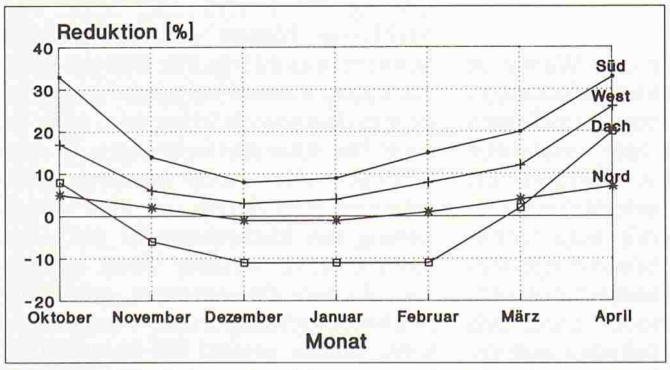

Bild 13. Einfluss der Orientierung auf die Reduktion der Transmissionswärmeverluste infolge Sonneneinstrahlung (Klima Zürich, exponiert, $a_s = 0,6$)

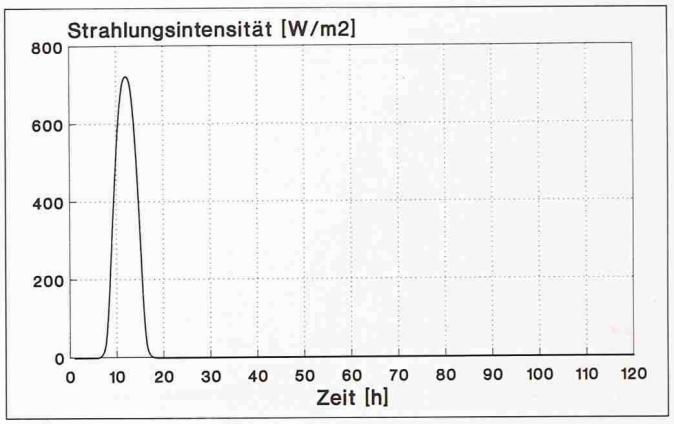

Bild 14. Randbedingung Globalstrahlung (sonniger Tag)

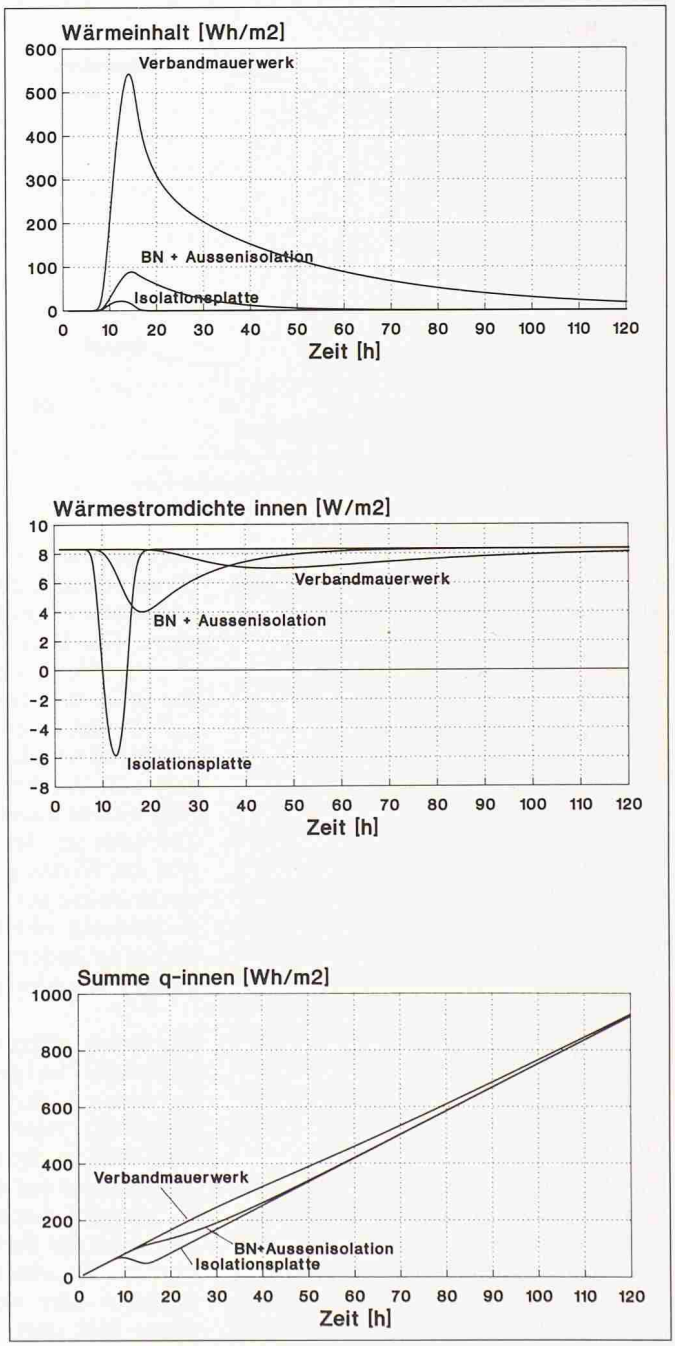

Bild 15. Speicherverhalten der Aussenwand infolge Solargewinn; oben: Wärmeinhalt der Wand (gespeicherte Solarwärme); Mitte: resultierende Wärmestromdichte innen q_i; unten: Gesamtwärmeverlust der Wand (Summe q_i)

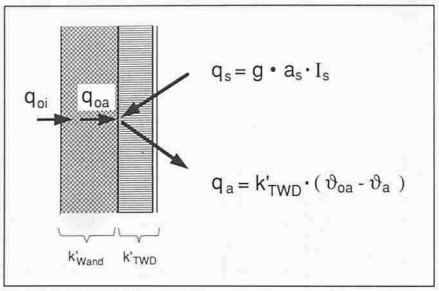

Bild 16. Wärmeströme an der Absorberoberfläche einer Wand mit transparenter Wärmedämmung (TWD)

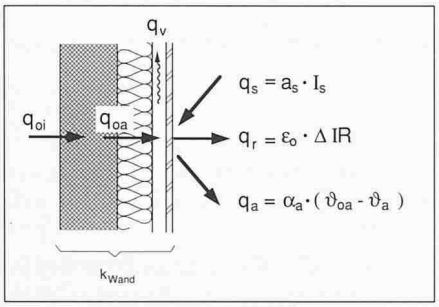

Bild 18. Wärmeströme an einer hinterlüfteten Fassade

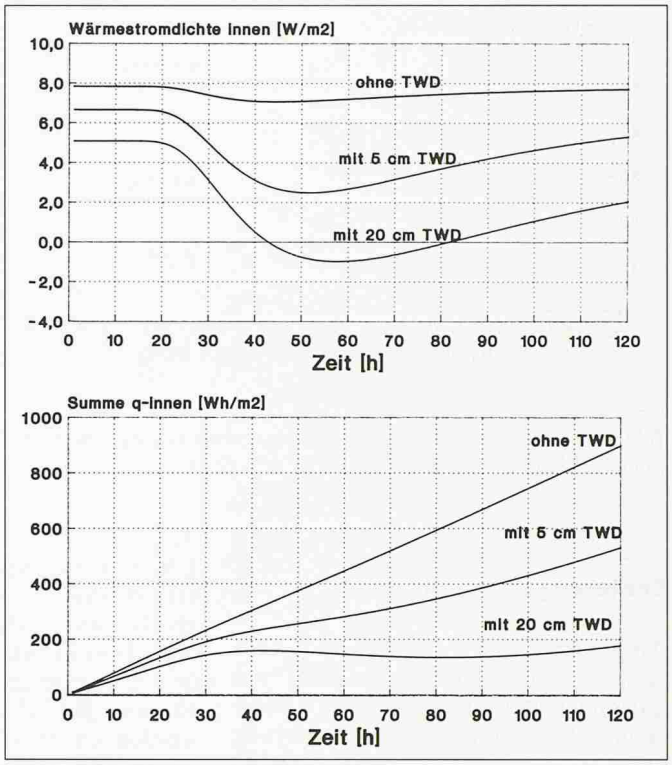

Bild 17. Speicherverhalten der TWD-Wand infolge Solargewinns; oben: resultierende Wärmestromdichte innen q_i; unten: Gesamtwärmeverlust der Wand (Summe q_i)

des Transmissionswärmeverlustes lautet somit:

$$Q_T = k \cdot A \cdot \left[(\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot \frac{h}{1000} - \frac{a \cdot I_s}{\alpha_a} + \frac{\varepsilon_o \cdot \Delta IR}{\alpha_a} \right]$$

wobei:

Q_T	Transmissionswärmeverlust	[kWh]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m²K]
A	Fläche des Bauteiles	[m²]
ϑ_i	mittlere Raumlufttemperatur	[°C]
ϑ_a	mittlere Aussenlufttemperatur	[°C]
h	Anzahl Stunden der Periode	[h]
a_s	Absorptionsgrad der Oberfläche	[–]
I_s	Globalstrahlung auf Bauteilebene	[kWh/m²]
ε_o	Emissionsgrad der Oberfläche	[–]
ΔIR	Infrarot-Zusatzverlust	[kWh/m²]
α_a	Wärmeübergang aussen	[W/m²K]

Der Rechenansatz macht deutlich, dass der Strahlungsgewinn nur von den Parametern innerhalb der eckigen Klammer abhängig ist, d.h. von den klimatischen Verhältnissen, den spektralen Oberflächeneigenschaften und den Wärmeübergangsbedingungen aussen.

Transparente Wärmedämmungen

Da der Sonnenenergiegewinn stark von den Wärmeübergangsbedingungen an der Aussenwandoberfläche abhängig ist, liegt es auf der Hand, diesbezüglich nach Verbesserungsmöglichkeiten zu suchen. Dies kann durch eine Abdekkung der Oberfläche mit einer transparenten, wärmedämmenden Schicht erreicht werden. Als Materialien stehen heute Verglasungen oder transparente Wärmedämmstoffe auf der Basis von Acrylwaben oder -kapillarstrukturen zur Verfügung. Die Wärmestrombilanz einer solchen Wand wird von folgenden, in Bild 16 dargestellten Grössen beeinflusst:

g	Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Wärmedämmschicht	[–]
k'_{TWD}	Wärmedurchgangskoeffizient der transparenten Wärmedämmschicht	[W/m²K]
k'_{Wand}	Wärmedurchgangskoeffizient der Wand	[W/m²K]

Die Formel zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste verändert sich dadurch wie folgt:

$$Q_T = k \cdot A \cdot \left[(\vartheta_i - \vartheta_a) \cdot \frac{h}{1000} - \frac{g \cdot r \cdot a_s \cdot I_s}{k'_{TWD}} \right]$$

wobei: r Reduktionsfaktor infolge Beschattung [–]

Durch das Anbringen einer transparenten Abdeckung wird die Wand zu einer Absorberwand ausgebildet. Die Wirkung eines sonnigen Tages auf den Wärmeverlust der Wand soll für die gleichen Randbedingungen wie für die normale Wand (Bild 14) rechnerisch für ein Verbandmauerwerk mit transparenter Wärmedämmung durchgeführt werden. Der Wärmeübergang aussen wird von anfänglich 20 W/m²K (ohne Abdeckung) auf 2 W/m²K (5 cm TWD) bzw. 0,7 W/m²K (20 cm TWD) reduziert. Die Rechenresultate sind in Bild 17 zusammengestellt.

Der Wärmeverlust der drei Wandtypen ist in diesem Fall nicht mehr gleich. Zudem wird ersichtlich, dass auch nach 120 Std. noch Restwärme des Sonnenenergiegewinnes in der Wand gespeichert ist.

Hinterlüftete Wandkonstruktionen

Bei hinterlüfteten Wandkonstruktionen wird ein Teil des Sonnenenergiegewinnes durch die Hinterlüftung nach aussen weggeführt (Bild 18). Wieweit dadurch der Sonnenenergiegewinn reduziert wird, soll wiederum ein Rechenbeispiel aufzeigen. Hierzu wurde eine Südwand, a_s = 0,6 für das Klima von St. Gallen betrachtet. In Bild 19 ist die Reduktion des Sonnenenergiegewinnes in Abhängigkeit der Luftströmungsgeschwindigkeit im Hinterlüftungshohlraum dargestellt (Mittelwert November bis und mit Februar).

Erfahrungswerte über gemessene Luftströmungsgeschwindigkeiten liegen nur spärlich vor. Einzelmessungen an der EMPA haben gezeigt, dass sich der Mittelwert über eine Heizperiode im Bereich von 20–30 cm/s bewegen dürfte. Die Gewinnreduktion liegt somit bei 10–30%, je nach Breite des Hinterlüftungsquerschnittes.

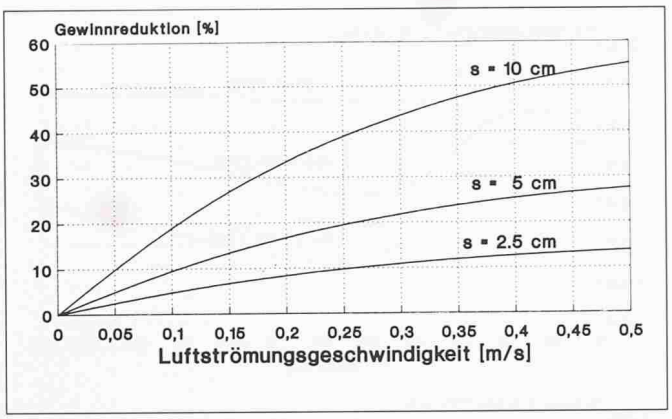

Bild 19. Reduktion des Sonnenenergiegewinnes infolge Hinterlüftung (Klima St. Gallen, Südwand, $a_s = 0,6$)

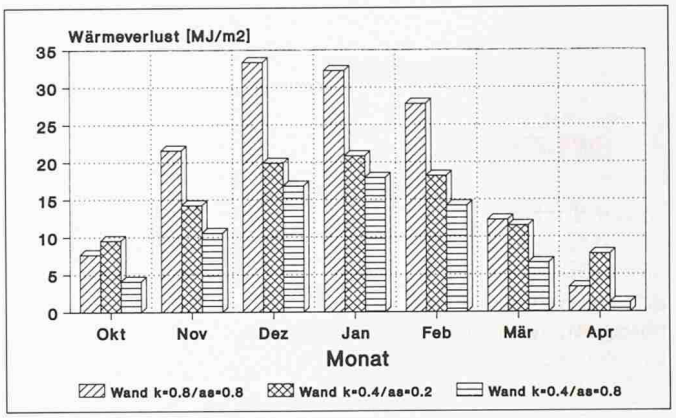

Bild 20. Vergleich der monatlichen Transmissionswärmeverluste

Sanierungsbeispiel

An einem fiktiven Beispiel einer Südfassade soll aufgezeigt werden, wie gross nach Durchführung einer wärmetechnischen Sanierung (Verbesserung der k-Wertes von 0,8 auf 0,4 W/m²K) die Reduktion des Transmissionswärmeverlustes ausfällt.

Ausgangssituation: Eine bestehende Südwand mit Klimastandort Genf weist einen dunkelbraunen Verputz (a_s = 0,8) und einen k-Wert von 0,8 W/m²K auf und wird mit einer Zusatzwärmedämmung aussen auf einen k-Wert von 0,4 W/m²K verbessert. Als Verputzfarben stehen 2 Varianten zur Diskussion, ein heller, weisser Anstrich (a_s = 0,2) und derselbe dunkle Anstrich wie bisher (a_s = 0,8).

Die Berechnung der monatlichen Wärmeverluste ergibt folgendes Ergebnis (Bild 20):

Die Sanierungsvariante mit dem hellen Anstrich weist trotz des besseren k-Wertes in den Übergangsmonaten Oktober und April höhere Verluste auf als die alte, bisherige Wandkonstruktion. Dies ist allein auf die Reduktion der Sonnenenergiegewinne zurückzuführen. Bei gleichen Verputzfarben werden die Wärmeverluste proportional zu den k-Werten ausfallen.

Schlussbemerkungen

Die Frage des Strahlungsgewinnes von opaken Bauteilen wurde im Rahmen eines umfangreichen Nationalfondsprojektes in den Jahren 1978–1982 durch die EMPA (Abteilung Bauphysik) und die ETH (Labor für Festkörperphysik) untersucht (Lit. [4]). Die Projektarbeiten umfassten sowohl messtechnische als auch rechnerische Untersuchungen. Die erstellten Rechenmodelle wurden experimentell an einer beschränkten Anzahl von Konstruktionen überprüft.

Im Rahmen von weiteren Forschungsprojekten in den Jahren 1982–1990 konnten Verbesserungen, Ergänzungen und zusätzliche messtechnische Überprüfungen an den Rechenmodellen durchgeführt werden (z.B. Wandmodell mit TWD-System).

Der hier vorgestellte Beitrag fasst die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten und den heutigen Stand der Kenntnisse zusammen und beschränkt sich auf die für die Praxis anwendbaren stationären Rechenmodelle. Diese zeigen, dass der Transmissionswärmeverlust nicht allein vom Parameter «k-Wert» abhängig ist, sondern es müssen im besondern die für den Strahlungshaushalt relevanten Einflussgrössen mitberücksichtigt werden. Je nach Klimasituation, Exposition und Ausbildung der Wand mit einer transparenten Abdeckung kann die Forderung nach einem möglichst niedrigen k-Wert die Wärmebilanz des Bauteiles unter Umständen sogar verschlechtern.

Die Frage der Masse eines Bauteiles ist für die Beurteilung der Ausnutzbarkeit der Gewinne im Winter und für den sommerlichen Wärmeschutz von grosser Bedeutung. Eine Bewertung kann jedoch nur für den ganzen Raum oder das ganze Gebäude erfolgen.

Bei den verwendeten instationären Modellen zur Bestimmung der Wärmebilanz opaker Bauteile sind immer noch eine Reihe von Annahmen und Vereinfachungen vorhanden, für deren genauere Behandlung weitere Arbeiten erforderlich sind. Dies betrifft insbesondere folgende Bereiche:

- Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte
- Feuchteabhängigkeit der Materialkennwerte
- Gleichzeitiger Wärme- und Feuchtetransport (Diffusion und kapillarer Transport)
- Infrarot-Strahlungsmodell des Himmels
- Windströmungsverteilung am Gebäude.

Adresse des Verfassers: *Th. Frank*, dipl. Bauing. ETH/SIA, EMPA, Abteilung Bauphysik, 8600 Dübendorf.

Literatur

[1] *Stephenson, D.G.* und *Mitalas, G.P.*: Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs, ASHRAE Transactions 1971

[2] *Frank, Th.*: Programmbeschrieb HELIOS 1, NF-Projekt Energie, EMPA Dübendorf, 1982

[3] *Frank, Th.*: Instationärer Wärmedurchgang nach der Response-Faktoren-Methode. EMPA Bericht 106 436, 1988

[4] *Finger, G., Frank, Th., Kneubühl, F., Thiébaud, F., Sagelsdorff, R.* und *Zürcher, C.*: Einfluss der Strahlungsvorgänge an der Gebäudehülle auf den Energieverbrauch, IVBH, Wien 1980

Leicht überarbeitete Fassung des Referates, gehalten am Schweizerischen Status-Seminar «Energieforschung im Hochbau», 5./6. September 1990 an der ETH, Zürich.