

DK 691.615.1:666.157:666.163:536.24:536.35:699.86

## **Bauelemente mit Flachglas, ihre Bedeutung im Hinblick auf Energieeinsparung im Bauwesen**

Von Günter Ortmanns, Aachen

(Vortrag auf der 54. Glastechnischen Tagung am 14. Mai 1980 in Aachen)

(Mitteilung aus der Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen)

(Eingegangen am 2. Juni 1980)

Der Heizenergiebedarf von Gebäuden wird in zweierlei Hinsicht von den Bauteilen mit Verglasungen beeinflusst. Während der Heizperiode bilden die Verluste über die Verglasungen auf der einen Seite, aber gleichzeitig auch die Gewinne durch Strahlung auf der anderen Seite eine Energiebilanz. Demnach ist der Einfluß von Verglasungen auf den Heizenergiebedarf nicht nur durch den Wärmedurchgangskoeffizienten, sondern auch durch den Gesamtenergiedurchlaßgrad als Maß für den Strahlungsgewinn gekennzeichnet. Die Bedeutung und die technisch-physikalisch möglichen Beeinflussungen dieser beiden Glaskenngrößen werden dargestellt. Aus einer Energiebilanzbetrachtung ergibt sich die neue Kenngröße in Gestalt des äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten, in dem der Wärmedurchgangskoeffizient für ein verglastes Bauteil und sein Gesamtenergiedurchlaß-

grad mit dem sogenannten Strahlungsgewinnkoeffizienten in Korrelation gebracht sind. Auf diese Art und Weise werden glasspezifische Kenngrößen mit gebäude-, nutzungsspezifischen und meteorologischen Randbedingungen für eine für Deutschland typische Heizperiode miteinander verknüpft. Diese Betrachtungsweise gestattet eine anschauliche Bewertung aller vorhandenen und möglichen Verglasungskombinationen nach tatsächlichen energetischen Gesichtspunkten. Es wird gezeigt, daß die transparenten Bereiche der Gebäudeaußenhülle in wärmetechnischer Hinsicht schon beim heutigen Stand der Technik den opaken Flächen gegenüber gleichwertig sind. Weiterhin werden Zukunftsmöglichkeiten aufgezeigt, die das wärmetechnische Verhalten von Verglasungen noch wesentlich verbessern können.

### **Flat glass constructional components: their importance to energy conservation in building construction**

Thermal energy requirements in buildings are influenced by the glazing units in two ways; there may be a gain by radiation from the outside as well as heat losses to the exterior. The influence of the glazing on heat requirements thus depends on its total energy transmission factor, as an index of radiation gain, as well as the ordinary heat transfer coefficient. The significance of these two characteristic parameters and the technological possibilities of controlling them are considered. From an energy balance new parameters are obtained in the form of equivalent heat transfer coefficients in which the heat transfer coefficient for a glazed unit and its total energy transmission

are correlated with the radiation gain coefficient. In this way characteristic parameters are linked together with constructional, meteorological and specific use boundary conditions typical for the heating of buildings in Germany. The considerations allow realistic evaluation of all existing or possible types of glazing combinations from the point of view of energy. It is shown that the transparent outer glazing of a building can today be as good as the opaque area as far as the heat balance is concerned. Future improvements in this respect are shown to be possible.

### **Éléments de construction en verre plat, leur importance pour les économies d'énergie dans le bâtiment**

L'influence des vitrages sur la consommation de chauffage dans les bâtiments présente un double aspect. Au cours de la période de chauffage, le bilan d'énergie fait intervenir d'un côté les déperditions par les vitrages et de l'autre les gains dus au rayonnement. Il en résulte que l'influence des vitrages sur la consommation de chauffage n'est pas seulement indiquée par le coefficient d'échange thermique mais aussi par le coefficient de transmission énergétique globale comme mesure des gains dus au rayonnement. L'importance et les influences techniques et physiques de ces deux caractéristiques du verre sont présentées. A partir du bilan d'énergie, on peut déduire une nouvelle caractéristique, le coefficient d'échange thermique équi-

valent dans lequel le coefficient d'échange thermique d'un vitrage et son coefficient de transmission énergétique globale sont en corrélation avec le coefficient de gain par rayonnement. De cette manière, on relie les caractéristiques du verre aux conditions limites propres au bâtiment, à l'emploi et à la météorologie. Cette manière de voir permet une évaluation globale de toutes les combinaisons possibles et imaginables de vitrages à partir de points de vue purement énergétiques. On montre qu'en l'état actuel de la technique, les surfaces transparentes de l'enveloppe du bâtiment sont équivalentes du point de vue thermique aux surfaces opaques. On montre que dans l'avenir, les propriétés thermiques des vitrages pourront être améliorées considérablement.

## **1. Physikalische Grundlagen**

### **1.1. Transparenz von Glas**

Für die Betrachtungen an dieser Stelle spielt die Eigenschaft „Transparenz eines Glases für Strahlung“ neben den sonstigen Glaseigenschaften naturgemäß die beherrschende Rolle. Dabei kann Glas in seinen vielfälti-

gen Kombinationen, in denen es in beheizten Gebäuden zur Anwendung kommt, durchaus sehr verschiedene Durchlässigkeitsprofile aufweisen. Abhängig von der Glasart, der Glasdicke, der Oberflächenbeschaffenheit – wie Strukturen oder Beschichtungen – und natürlich auch von der Kombination einzelner Gläser weist eine Verglasung jeweils ihr ganz spezifisches spektrales Transmissionsvermögen auf.

In dem hier interessierenden Wellenlängenbereich muß man das Strahlungsverhalten beginnend von dem sehr kurzwelligen ultravioletten Bereich über das Sichtbare, das nahe Infrarot bis hin zu den langwelligen Infrarotstrahlen, der sogenannten Wärmestrahlung, in Betracht ziehen. Dieses große Spektrum, welches etwa den Bereich 0 bis 50  $\mu\text{m}$  überdeckt, ist dabei allerdings schwerpunktmäßig in zwei Bereiche zu unterteilen, zum ersten der Bereich 0 bis 2  $\mu\text{m}$ , in dem die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung liegt, und zum anderen der Wellenlängenbereich oberhalb 2 bis 50  $\mu\text{m}$ , der die Wärmestrahlung abdeckt. Hierbei sei daran erinnert, daß jeder Körper Strahlung entsprechend seiner Eigentemperatur nach dem Planckschen Strahlungsgesetz aussendet, daß die Strahlungsverteilung ein Kontinuum darstellt und daß das Intensitätsmaximum dieses Kontinuums hinsichtlich seiner Lage in den genannten Wellenlängenbereichen sich aus dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnen läßt. Demnach liegt bekanntlich das Maximum der Intensität der Sonnenstrahlung beim grünen Licht, während für Körper mit üblichen Umgebungstemperaturen das Strahlungsmaximum bei etwa 10  $\mu\text{m}$  liegt, wobei die Strahlungsintensität solch niedrigtemperierter Körper natürlich erheblich unter der Intensität der Sonne liegt.

Die Unterteilung in die beiden Strahlungsbereiche 0 bis 2 und 2 bis 50  $\mu\text{m}$ , wobei die Übergänge genau genommen natürlich fließend sind, muß vorgenommen werden, da die Vorgänge in diesen Wellenlängenbereichen Einfluß auf zwei unterschiedliche Kenngrößen von Verglasungen haben, die ihrerseits wiederum gemeinsamen Energiebilanz festlegen.

Hierbei soll eine Energiebilanz so aufgestellt werden, daß die Verluste über verglaste Bauelemente in der Gebäudeaußenhülle von beheizten Gebäuden bei Vorhandensein eines Temperaturgefälles von innen nach außen in Korrelation zu den Gewinnen gesetzt werden, die ganz allgemein aus dem Strahlungsdurchgang durch Verglasungen resultieren. Eine solche Betrachtungsweise ist grundsätzlich nicht neu, wurde allerdings bisher bei der Festlegung von Kenngrößen in wärmetechnischen Regelwerken, wie z. B. der Norm DIN 4108 [1] oder dem Energieeinsparungsgesetz noch nicht herangezogen. Bisher wurden immer nur die Verluste infolge eines Temperaturgefälles über das zu betrachtende Bauelement aufgeführt und in Rechnung gesetzt.

Die in Frage kommenden Kenngrößen sind entsprechend den beiden Wellenlängenbereichen und den hier zu berücksichtigenden Vorgängen: der Gesamtenergiedurchlaßgrad  $g$  und der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$ .

## 1.2. Strahlungsabhängige Energiegewinne von Verglasungen. Bedeutung des Gesamtenergiedurchlaßgrades $g$

Die diese Problematik festlegende Kenngröße ist der Gesamtenergiedurchlaßgrad  $g$ . Dieser ist nach einem

Entwurf zur Norm DIN 67 507 [2] folgendermaßen definiert:

$$g = \tau_e + q_i, \quad (1)$$

wobei  $\tau_e$  den Strahlungstransmissionsgrad und  $q_i$  die sekundäre Wärmeabgabe darstellen.  $\tau_e$  ist die Summe des direkt durchgelassenen Anteils des auftreffenden Strahlungsflusses, während  $q_i$  die sekundäre Wärmeabgabe der Verglasungen nach innen infolge langwelliger IR-Abstrahlung des absorbierten Anteils der auftreffenden Strahlung und infolge von Konvektion bedeutet. Hierbei sei betont, daß  $q_i$  unter der Bedingung der Temperaturgleichheit im Freien und im Raum ermittelt wird. Der Wärmefluß als Folge einer Temperaturungleichheit, d. h. im Sinne dieser Betrachtungen bei Vorhandensein eines Temperaturgefälles von innen nach außen und damit ganz allgemein gesprochen während der Heizperiode, wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  erfaßt. Die diesbezüglichen Zusammenhänge sind in Abschnitt 1.3. dargelegt.

Der Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  ist im wesentlichen das Integral über das Produkt aus spektraler Transmission der Verglasung und spektraler Verteilung der Globalstrahlung. Letztere entspricht der CIE-Publikation Nr. 20 [3]. Hierbei wird angenommen, daß die Spektralverteilung unabhängig vom Sonnenstand sowie atmosphärischen Bedingungen (Trübungsfaktoren) ist und die Strahlung senkrecht auf die Verglasung auftrifft. Die Globalstrahlung ist weiterhin die Summe von direkter Sonnenstrahlung, der diffusen Himmelsstrahlung und der reflektierten Strahlung.

In die Ermittlung der sekundären Wärmeabgabe einer Verglasung gehen im wesentlichen die Absorptionsgrade für Globalstrahlung der in einer Verglasung vorhandenen Einzelscheiben, das Wärmeübergangsvermögen an den die Verglasung begrenzenden Außenscheiben nach innen und außen sowie die Wärmedurchlaßwiderstände von Scheibe zu Scheibe ein.

Je nachdem, ob es sich um ein Zweischeiben-, Dreischeiben- oder Mehrscheibensystem handelt, werden die mathematischen Verknüpfungen zwischen den genannten Größen immer komplizierter. Sie führen letztendlich zu einem linearen Gleichungssystem, das die Strahlungsflüsse in den einzelnen Ebenen eines Verglasungssystems verbindet mit den charakteristischen Eigenschaften wie Transmissions-, Reflexions- sowie Absorptionsgrad in Einstrahlrichtung und umgekehrt. Aus diesem Gleichungssystem wird der Strahlungsfluß durch die Innenscheibe berechnet, dessen Quotient mit dem Globalstrahlungsangebot den Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  bildet. Ähnlich kann man auch für den Strahlungsreflexionsgrad verfahren, so daß sich hieraus der Strahlungsabsorptionsgrad jeder Einzelscheibe eines Mehrscheibensystems errechnen läßt. In Aufstellung eines neuen linearen Gleichungssystems für die Wärmedurchlaßkoeffizienten  $\Lambda_1$  zwischen den einzelnen Scheiben des

i-ten Zwischenraumes, den strahlungs- und absorptionsbedingten Erwärmungen der Einzelscheiben und effektiven Absorptionsvermögen der Einzelscheiben läßt sich wiederum der Temperaturanstieg der Innenraumscheibe ermitteln. Dieser Temperaturanstieg gestattet die Berechnung der Sekundärwärmeabgabe  $q_i$ . Die Berechnung des Gesamtenergiedurchlaßgrades  $g = \tau_e + q_i$  aus der Summe von  $\tau_e + q_i$  in der eben skizzierten Form gestaltet sich schon für Zwei- und Dreischeibensysteme recht kompliziert und dies erst recht für Mehrscheibensysteme. Ein solches liegt z. B. schon dann vor, wenn man ein Dreischeibenisoliervglas mit innenseitigem Vorhang und eventuell außenseitigem Sonnenschutz betrachtet. Demnach löst man am besten diese Aufgabenstellung mit einem dafür geeigneten Computerprogramm. Auf eine solche Art und Weise ist jedenfalls dann sehr einfach der Gesamtenergiedurchlaßgrad  $g$  für jedes beliebige Scheibensystem zu ermitteln.

1.3. Wärmeverluste durch Verglasungen als Folge eines Temperaturgefälles. Bedeutung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Ist ein Temperaturgefälle als treibende Kraft von der Raumseite über ein Verglasungssystem nach außen vorhanden, dann resultiert hieraus ein Wärmestrom nach draußen. Dieser Wärmestrom ist gleichbedeutend mit einem Wärmeverlust und wird üblicherweise mit dem Begriff Transmissionswärmeverlust im Gegensatz zu Lüftungswärmeverlusten über das Rahmensystem einer Verglasung belegt. Der Begriff Transmissionswärmeverlust ist in diesem Zusammenhang sehr unglücklich gewählt, da die Transmission im Sinne von Strahlungstransparenz hier überhaupt nicht angesprochen ist. Es wird deshalb der dem Temperaturgradienten entsprechende Wärmestrom mit dem Begriff Wärmeverlust gekennzeichnet, da es sich um eine durch interne Wärmequellen oder durch Wärmegewinne von außen zu kompensierende Größe handelt. Dieser Wärmeverlust ist proportional dem Temperaturgefälle und der Austauschfläche, d. h. hier der verglasten Öffnung. Der Proportionalitätsfaktor ist der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$ , der somit bei anzustrebendem möglichst geringem Wärmeverlust ebenfalls so niedrig wie möglich sein sollte.

Die Definition des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  ergibt sich aus folgender Beziehung zu

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i} \tag{2}$$

mit  $\alpha_i$  bzw.  $\alpha_a$  als Wärmeübergangskoeffizient innen bzw. außen und  $A_i$  als Wärmedurchlaßkoeffizient für den i-ten Zwischenraum zwischen zwei Ebenen (normalerweise Scheiben) eines Verglasungssystems. Da  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  keine direkten Glaskenngrößen sind und hierfür feste Annahmen getroffen sind, gilt das Interesse dem Wärmedurchlaßkoeffizienten  $A_i$ .

Der Wärmedurchlaßkoeffizient  $A_i$  bestimmt die Höhe des Wärmetransportes zwischen zwei Ebenen dergestalt, daß sowohl die infolge eines Strahlungsaustausches als auch die durch Konvektion von der einen Ebene zur anderen transportierte Wärmemenge erfaßt wird; demnach stellt  $A_i$  eine Summe dieser beiden, die entsprechenden Vorgänge abdeckenden Größen dar.

$$A_i = A_{iK} + A_{iS} \tag{3}$$

$A_{iK}$  steht somit für die konvektiv transportierte Wärmemenge und  $A_{iS}$  für die durch Strahlung im Bereich der Wellenlängen von 2 bis 50  $\mu\text{m}$  ausgetauschte Wärmemenge.

1.3.1. Strahlungsabhängiger Anteil des Wärmedurchlaßkoeffizienten

Für  $A_{iS}$  gilt nunmehr folgende Beziehung

$$A_{iS} = \epsilon_{1,1+1} \cdot \sigma \cdot \frac{T_1^4 - T_{1+1}^4}{T_1 - T_{1+1}} \tag{4}$$

zwischen der Ebene  $l$  und  $l + 1$ , wobei  $\sigma$  die Boltzmann-Konstante ( $\sigma = 5,67 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ) ist und  $\epsilon_{1,1+1}$  die Strahlungsaustauschzahl darstellt und wie folgt für engbenachbarte plane Ebenen definiert ist:

$$\epsilon_{1,1+1} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_{1+1}} - 1} \tag{5}$$

Darin bedeuten  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_{1+1}$  das Emissionsvermögen der Ebenen  $l$  und  $l + 1$ , die sich auf den Temperaturen  $T_1$  und  $T_{1+1}$  befinden. Je niedriger die Strahlungsaustauschzahl  $\epsilon_{1,1+1}$  ist, um so geringer ist auch  $A_{iS}$ , d. h. der Wärmetransport durch Strahlung. Da normale Glasflächen ein Emissionsvermögen von  $\epsilon_{\text{Glas}} = 0,87$  im Bereich 2 bis 50  $\mu\text{m}$  – entsprechend Temperaturen im Bereich der Raumtemperatur – aufweisen, müssen für  $\epsilon_1$  bzw.  $\epsilon_{1+1}$  jeweils einzeln oder gemeinsam Maßnahmen zur Erniedrigung des oberen Grenzwertes von  $\epsilon_{\text{Glas}}$  getroffen werden.

Hier stellt sich die Frage, welche Zusammenhänge zwischen dem Emissionsvermögen einer Oberfläche und deren sonstigen physikalischen Eigenschaften bestehen. Zur Beantwortung dieser Frage muß man die Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie betrachten. Insbesondere für längerwellige Infrarotstrahlung erfolgt eine Wechselwirkung mit einem Stoff durch Absorption der Strahlung bei ganz charakteristischen Schwingungsfrequenzen der Moleküle. So zeichnen sich besonders die Metalle oder Stoffe mit metallähnlichen Eigenschaften wie die Halbleiter Zinn- oder Indiumoxid dadurch aus, daß sie teilweise schon für kurzwellige Strahlung unterhalb 2  $\mu\text{m}$  ein kontinuierlich ansteigendes Absorptions-

vermögen aufweisen. Die Ursache hierfür ist in der elektrischen Leitfähigkeit zu sehen, die eine Folge der „freien“ oder „Leitungselektronen“ ist. Als Maß hierfür gilt der Absorptionskoeffizient  $n \cdot k'$ , für den der Zusammenhang

$$n \cdot k' = 5,47 \sqrt{\kappa \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\text{Ohm}} \quad (6)$$

besteht, wobei  $\kappa$  die elektrische Leitfähigkeit und  $\lambda$  die Wellenlänge bedeuten. Da  $n \cdot k'$  den Imaginäranteil des Brechungsindex eines Stoffes darstellt, gilt für das Reflexionsvermögen  $R$  einer Grenzfläche eines Stoffes die allgemeine Beziehung

$$R = \frac{(n - 1)^2 + (n \cdot k')^2}{(n + 1)^2 + (n \cdot k')^2}; \quad (7)$$

$n$  = optischer Brechungsindex.

Man sieht also, daß mit zunehmendem Absorptionskoeffizienten  $n \cdot k'$  das Reflexionsvermögen  $R$  ebenfalls zunimmt, was bekanntlich gleichbedeutend mit einer Abnahme des Emissionsvermögens einer Oberfläche des betrachteten Stoffes ist. Zur Erzielung eines hohen Reflexionsvermögens oberhalb der Wellenlängen  $\lambda > 2 \mu\text{m}$  wiederum mit Schwerpunkt bei  $10 \mu\text{m}$  kommt es gemäß Gleichung (6) darauf an, daß die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  des Stoffes ausreichend hoch ist. Dies ist wie gesagt bei den Metallen oder den Halbleitern der Fall. Für hohe elektrische Leitfähigkeit, was gleichbedeutend mit einer hohen Elektronenkonzentration ist, tendiert somit das Reflexionsvermögen auch für Wärmestrahlung gegen den Wert 1 bzw. das Emissionsvermögen gegen den Wert 0.

Da die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie durch Absorption erfolgt und das Absorptionsvermögen proportional der Schichtdicke der betrachteten Materie ist, ist für die Höhe der Infrarotreflexion einer Schicht insgesamt das Produkt ( $\kappa \cdot d$ ) aus elektrischer Leitfähigkeit  $\kappa$  und Schichtdicke  $d$  verantwortlich. Demnach läßt sich die Aufgabenstellung der Erzielung eines niedrigen Wärmedurchlaßkoeffizienten für Strahlung  $\Lambda_{1s}$  mit Schichten auf zwei Wegen erreichen:

- a) hohe elektrische Leitfähigkeit bei sehr dünnen Schichten,
- b) höhere Schichtdicken bei geringerer elektrischer Leitfähigkeit.

In diesem Spannungsfeld ist die Entwicklung von hochtransparenten Halbleiterschichten unter Berücksichtigung von Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten beheimatet.

### 1.3.2. Konvektionsabhängiger Anteil des Wärmedurchlaßkoeffizienten

Für den Anteil  $\Lambda_{1K}$  durch Konvektion (eingeschlossen ist die reine Wärmeleitung als Grenzfall) am Wärme-

durchlaßkoeffizienten  $\Lambda_1$  gilt nunmehr folgender Ansatz:

$$\Lambda_{1K} = \frac{\lambda_L}{s} \cdot \text{Nu} \quad (8)$$

Es bedeuten:  $\lambda_L$  = Wärmeleitfähigkeit des Mediums im Zwischenraum,  $s$  = Schichtdicke des Zwischenraums und  $\text{Nu}$  = Nusseltzahl.

Die Nusseltzahl ist eine Funktion der Grashofzahl  $\text{Gr}$  und der Prandtlzahl  $\text{Pr}$  und folgt folgendem funktionalen Zusammenhang [4]:

$$\text{Nu} = c \cdot \left( \text{Gr} \cdot \text{Pr} \cdot \left( \frac{s}{h} \right)^{1/3} \right)^m \quad (9)$$

mit  $m < 1$ , wobei  $h$  die Höhe der den Zwischenraum begrenzenden Ebenen bedeutet. Es gilt somit, durch gasförmige Medien die Nusseltzahl möglichst klein zu halten. Während die Prandtlzahl für fast alle Gase in der Größenordnung von 0,7 liegt, ist die Grashofzahl proportional dem Quotienten  $(\rho/\eta)^2$  aus Dichte  $\rho$  und Viskosität  $\eta$  des jeweiligen Gases.

$\Lambda_{1K}$  ist somit über die Wärmeleitfähigkeit, die Dichte und die Viskosität eines gasförmigen Mediums optimierbar in Richtung kleinerer Werte gegenüber dem Wert für Luft bei entsprechender Schichtdicke  $s$ . Insofern können gasförmige Medien bei höherer Nusseltzahl dank ihrer niedrigen Wärmeleitfähigkeit insgesamt zu einem niedrigeren konvektiv bedingten Wärmedurchlaß führen, als dies im Fall von Luft gegeben ist. Anders ausgedrückt können geringere Schichtdicken geeigneter Gase gemäß Gleichung (8) das gleiche Wärmedurchlaßvermögen aufweisen wie entsprechend dickere Luftschichten.

In diesem Sachverhalt liegen die Möglichkeiten kleiner gasgefüllter Spalten von Mehrscheibenisolierverglasungen mit erniedrigten Wärmedurchgangskoeffizienten begründet.

## 2. Energiebilanz von Verglasungen für die Heizperiode

Die Energiebilanz von Verglasungen einschließlich ihrer Rahmenanteile, d. h. die Energiebilanz von Fenstern ganz allgemein, wird nicht alleine von den Wärmeverlusten, sondern auch von der nutzbaren Sonneneinstrahlung bestimmt. Die Wärmestromdichte durch ein Fenster (ohne Lüftungsverluste) ergibt sich demnach zu:

$$q = k_F (T_i - T_a) - g \cdot I (1 - r) \cdot N \quad (10)$$

mit  $k_F$  = Wärmedurchgangskoeffizient für das Fenster einschließlich Rahmenanteil,  $T_i$ ,  $T_a$  = Innenraum- bzw. Außenlufttemperatur,  $I$  = Strahlungsintensität (Globalstrahlung),  $r$  = flächenmäßiger Rahmenanteil an der Gesamtfensteröffnung,  $N$  = Strahlungsausnutzungsfaktor.

Der Strahlungsausnutzungsfaktor  $N$  berücksichtigt den Umstand, daß bei starker Sonneneinstrahlung unter

Umständen auch schon während der Heizperiode die strahlungsbedingten Wärmegewinne zu einem allzu starken Ansteigen der Raumlufttemperatur führen können. In diesen Fällen, insbesondere in den Übergangsmontaten Oktober bzw. April/Mai einer Heizperiode, kann demnach  $N \leq 1$  sein, was gleichbedeutend mit dem Umstand ist, daß eine Überkompensation der Wärmeverluste durch Einstrahlungsgewinne stattfindet.

Da es sich in wärmetechnischen Regelwerken eingebürgert hat, bei der Beschreibung des Wärmeverlustes mit der Kenngröße Wärmedurchgangskoeffizient  $k_F$  zu arbeiten, empfiehlt es sich, Gleichung (10) für die Wärmestromdichte  $q$  durch Einführung eines „äquivalenten“ Wärmedurchgangskoeffizienten  $k_{eq}$  wie folgt umzuschreiben:

$$q = k_{eq} (T_i - T_a), \quad (11)$$

woraus sich durch Vergleich ergibt:

$$k_{eq} = k_F - S \cdot g \quad (12)$$

mit den Abkürzungen

$$S = N \frac{I}{\Delta T} (1 - r) \quad (13)$$

für den Strahlungsgewinnkoeffizienten  $S$  und  $\Delta T = T_i - T_a$ .

Man entnimmt dieser aus der Energiebilanz abgeleiteten Beziehung, daß die tatsächliche Fensterkenngröße  $k_{eq}$  sowohl durch den Wärmedurchgangskoeffizienten  $k_F$  als auch durch den Gesamtenergiedurchlaßgrad  $g$  beeinflusst ist.

Während die Bedeutung und die physikalischen Hintergründe für den Wärmedurchgangskoeffizienten eines Fensters (d. h. Verglasung und Rahmen)  $k_F$  und für den Gesamtenergiedurchlaßgrad  $g$  oben ausführlich erklärt sind, tritt deren Tragweite in der Beziehung für  $k_{eq}$  voll zutage. Die Problematik dieser Beziehung liegt nun darin, daß die beiden Materialkenngrößen  $k_F$  und  $g$  mit einer Größe  $S$  in Korrelation gebracht sind, die durch gebäudespezifische Einflußfaktoren ( $N$ ) und meteorologische Randbedingungen ( $I/\Delta T$ ) gekennzeichnet ist.

Will man eine Aussage im Sinne der Themenstellung machen, dann besteht die Aufgabe darin, den Strahlungsgewinnkoeffizienten  $S$  für eine Heizperiode zu ermitteln. Zu dieser Fragestellung liegt ein Sachverständigen-gutachten [5] vor, das auf Veranlassung der deutschen Flachglasindustrie mit finanzieller Unterstützung der Interessengemeinschaft der europäischen Flachglasproduzenten zustande gekommen ist.

Bei der Ermittlung des Strahlungsgewinnkoeffizienten  $S$  ist demnach eine ganze Reihe von Randbedingungen zu berücksichtigen, die sich in zwei Punkten

- a) meteorologische Randbedingungen und
- b) gebäudespezifische Randbedingungen zusammenfassen lassen.

Hinsichtlich der meteorologischen Einflußgrößen sind gemäß dem Quotienten  $I/\Delta T$  die Strahlungsangebote auf die verschiedenen Orientierungen sowie die Außenlufttemperaturen in den einzelnen Monaten der Heizperiode heranzuziehen. Diesbezüglich liegen Globalstrahlungswerte und Außenlufttemperaturen für elf nahezu gleichmäßig über Deutschland verteilte Orte vor. Daraus ergibt sich, daß in Deutschland von Süden nach Norden das Strahlungsangebot abnimmt, aber gleichzeitig das Monatsmittel der Außenlufttemperatur ansteigt, so daß aus dieser gegenläufigen Tendenz eine Angleichung der Heizenergieverbräuche eintritt. Geringeren Strahlungswerten steht also eine geringere Anzahl von Tagen, an denen geheizt werden muß, gegenüber. Um weiterhin die bezüglich der Strahlungswerte vorhandene Abhängigkeit von der Orientierung zu eliminieren, wird zur Ermittlung des Strahlungsgewinnkoeffizienten nur die diffuse Strahlung herangezogen. Dieses bedeutet neben der Orientierungsunabhängigkeit außerdem, daß tatsächlich nur die im langjährigen Monatsmittel ständig zu erwartende Einstrahlungsleistung Berücksichtigung findet. Für die Bewertung der Energiebilanz eines Fensters werden somit die ungünstigsten Verhältnisse berücksichtigt.

Die gebäudespezifischen Einflußgrößen sind im wesentlichen durch die Bauart, ob leichte oder schwere Bauart, ob hohes oder niedriges Wärmedämmvermögen, von der Art, Größe, Orientierung und Abschattung der Fenster, den Lüftungsgewohnheiten und eventuell vorhandenen inneren Wärmequellen gegeben.

Demnach sind relativ viele Parameter von Einfluß auf das wärmetechnische Verhalten von Fenstern. Während aber die meteorologische Größe  $I_m/\Delta T$  mit  $I_m$  als diffuse Einstrahlung aus den vorhandenen langjährigen Meßdaten sehr gut quantifizierbar ist, gehen die gebäude- und nutzungsspezifischen Kenngrößen nur in den Strahlungsausnutzungsfaktor  $N$  ein. Zu dessen Ermittlung gibt es aber heute ebenfalls ausreichende Hilfsmittel dergestalt, daß man Wärmebilanzrechnungen für Gebäude unter Variation der genannten Einflußgrößen durchgeführt und diese Berechnungen hinsichtlich der Ausnutzbarkeit der diffusen Sonneneinstrahlung analysiert hat. Das ist in dem Sachverständigen-gutachten [5] erfolgt, und man kommt zu dem Zahlenwert  $S_{diff} = 1,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Somit lautet die endgültige Bezeichnung für die relevante Kenngröße für Fenster

$$k_{eq} = k_F - 1,2 \cdot g. \quad (14)$$

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Größe  $S = 1,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ein Mittelwert für die Heizperiode ist und die monatlichen Einzelwerte selbstverständlich einen Verlauf zeigen, der mit den meteorologischen Randbedingungen konform geht. In den Übergangsmontaten erreicht  $S$  Werte zwischen 2 und 3  $\text{W/m}^2 \text{ K}$ , und es ist letztendlich von der effektiven Gebäudekonzeption wie Wärmedämmung, Wärmespeichervermögen, Verhältnis von Gebäudehülle zu Gebäudevolumen, Fenstergröße und Fensterorientierung abhängig, wie lange die Heizperiode für ein zu

betrachtendes Gebäude dauert. Hierauf haben die Fenster allerdings einen relativ großen Einfluß. So sollten Fenster nach Norden orientiert nur in kleinen Abmessungen und geringer Anzahl vorgesehen sein, während die Süd-Ost- bis Süd-West-Fassaden bevorzugt und nicht zu klein dimensioniert verglast sein sollten. Auf die Möglichkeiten der Überheizung in den Übergangs- und Sommermonaten sei hingewiesen, obschon diese Problematik einer vollständig getrennten Betrachtung zu unterziehen und im Rahmen der Themenstellung nicht zu diskutieren ist. Außerdem ist die Frage des sommerlichen Wärmeschutzes, der in starkem Maße von der Größe und der Durchlässigkeit der Verglasungen beeinflusst wird, weitestgehend eine Angelegenheit des Komforts und der Hygiene und somit in den Individualbereich des Menschen eingreifend. Es ist unbestritten, daß diesem Problem trotzdem Rechnung zu tragen ist, allerdings nur durch solche Maßnahmen, die keinen nachteiligen Einfluß auf den äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten haben.

Die energetische Betrachtung von Bauelementen mit Verglasungen über eine für Deutschland charakteristische Heizperiode gleich welcher Art hat somit zur größtmöglichen Senkung der Energieverluste zwei Ziele zu verfolgen:

- a)  $k_F$  zu minimieren und
- b)  $g$  zu maximieren.

Dabei ist ein ganz wesentlicher Gesichtspunkt klar zu erkennen, daß das eine nicht ohne das andere geht. Die berechnete Einführung der neuen Kenngröße eines äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten schafft hier eine Kopplung, die auf der einen Seite Zwänge, aber auf der anderen Seite auch Freiheiten hinsichtlich der für die Anwendung zu diskutierenden Produkte schafft. Auf diese Zusammenhänge soll in Abschnitt 3. in bezug auf die heute und in Zukunft in der Anwendung befindlichen Verglasungssysteme eingegangen werden.

### 3. Derzeitige und zukünftige Situation energetisch effektiver Wärmeschutzverglasungen

Eine Analyse der Eigenschaften von Verglasungen nach energetischen Gesichtspunkten unter Verwendung des äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten nach Gleichung (14) ist in Tabelle 1 vorgenommen worden. Hierin wurden zwei-, drei- und vierscheibige Isolierglas-aufbauten betrachtet, wobei die praktizierten und in der Zukunft denkbaren Möglichkeiten zur Reduzierung der Wärmedurchgangskoeffizienten für die einzelnen Scheibenzwischenräume Berücksichtigung gefunden haben. Neben dem Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e(i)$  und dem Strahlungsreflexionsgrad  $\rho_e(i)$  für jede Scheibe  $i$  sind die Angaben über das Füllgas, den Wärmedurchlaßkoeffizienten der von den Scheiben jeweils gebildeten Scheibenzwischenräume und den die Gesamtverglasung charakterisierenden Werten  $\tau_e$ ,  $g$ ,  $k_v$  und  $k_{eq}$  enthalten. Bei der Ermittlung von  $k_{eq}$  ist darauf hinzuweisen, daß die dem reinen Verglasungswert  $k_v$  zuzuordnende Fensterkenn-

Tabelle 1. Meteorologische Randbedingungen  $T_{a,m}$  und  $I_{diff,m}$  zur Ermittlung des Strahlungsgewinnkoeffizienten  $S$

Monat	$T_{a,m}$ in °C	$I_{diff,m}$ in $W/(m^2 K)$	$S_{diff}$ in $W/(m^2 K)$
Oktober	8,8	26,8	1,86
November	4,2	10,6	0,55
Dezember	1,6	8,1	0,37
Januar	0,3	10,8	0,46
Februar	1,0	21,8	0,95
März	3,5	37,8	1,87
April	7,5	56,5	3,22
Mittel über die Heizperiode	3,8	24,6	1,20

größe  $k_F$  entsprechend der Vorschrift nach Tabelle 3 der DIN 4108, Teil 4 [1] für die Rahmenmaterialgruppe 1 herangezogen worden ist. Diese Rahmenmaterialgruppe betrifft Fenster mit Rahmen aus Holz, Kunststoff (PVC) und Holzkombinationen (z. B. Holzrahmen mit Aluminiumbekleidung) und stellt nach wärmedämmmäßigen Kriterien ein Optimum dar. Alle anderen zur Anwendung kommenden Materialien wie wärmedämmte Aluminium- oder Stahlprofile und Mörtelfugen ziehen eine z. T. erhebliche Verschlechterung des  $k_F$ -Wertes nach sich.

Es ist deshalb mehr als gerechtfertigt, das Rahmenmaterial mit dem besten Wärmedämmverhalten dann heranzuziehen, wenn für Verglasungen mit optimierten  $k$ -Werten der beste effektive Wärmedurchgangskoeffizient gefunden werden soll. Da der Ermittlung der  $k_F$ -Werte im Mittel für den Rahmenanteil an der Gesamtfensteröffnung 25 % zugrunde liegen, macht sich ein schlechter, d. h. hoher Wert für das Rahmenmaterial bei der Ermittlung der  $k_{eq}$ -Werte äußerst nachteilig bemerkbar. Diese Feststellung geht so weit, daß eine an sich sehr gute Verglasung (z. B. Dreischiebenisolierverglasung) in einem wärmetechnisch weniger guten Rahmen nicht besser ist als ein gewöhnliches Zweischiebenisolierverglasung in einem wärmetechnisch guten Rahmen. Auch dieser Sachverhalt ist eine zwangsweise Folge der Betrachtung eines Fensters nach gesamtenergetischen Gesichtspunkten mittels eines über eine volle Heizperiode gemittelten äquivalenten  $k$ -Wertes.

Aus der letzten Spalte von Tabelle 2, in der die  $k_{eq}$ -Werte für insgesamt elf verschiedene Isolierglas-aufbauten aufgelistet sind, ergeben sich grob gesprochen drei Gruppen von Verglasungstypen mit den Schwerpunkten von  $k_{eq}$  bei Werten um 1,6, um 1,0 und um 0,6  $W/m^2 K$ .

Die Gruppe um 1,6  $W/m^2 K$  bilden die konventionellen Zweischiebenisolierverglasungen mit Luftfüllung, wobei die Verwendung von hochstrahlungstransparentem Floatglas (Kombination 2) keine wesentliche Verbesserung des  $k_{eq}$ -Wertes nach sich zieht.

Tabelle 2. Zusammenstellung strahlungsphysikalischer und wärmetechnischer Größen von elf verschiedenen Verglasungssystemen (Kombinationen 1, 3, 4 existent; 2, 5 bis 11 durch Weiterentwicklung denkbar)

Kombi- nation	Strahlungstransmissionsgrad, Strahlungsreflexionsgrad der Scheiben 1, 2, 3, 4				Füllgas im Scheiben- zwischenraum			Wärmedurchlaß- koeffizient $\Lambda$ des Scheibenzwischenraumes in $W/(m^2 K)$			Kenngrößen der Kombination				
	1	2	3	4	1-2	2-3	3-4	1-2	2-3	3-4	$\tau_v^1)$	$\tau_e$	g	$k_v$ in $W/(m^2 K)$	$k_{eq}$ in $W/(m^2 K)$
1	0,86 0,07	0,86 0,07	— —	— —	Luft	—	—	6,11	—	—	0,83	0,74	0,79	3,03	1,65
2	0,91 0,08	0,91 0,08	— —	— —	Luft	—	—	6,11	—	—	0,85	0,83	0,84	3,03	1,59
3	0,86 0,07	0,58 0,24	— —	— —	Gas	—	—	2,33	—	—	0,64	0,46	0,62	1,70	1,00
4	0,86 0,07	0,86 0,07	0,86 0,07	— —	Gas	Gas	—	5,40	5,40	—	0,75	0,64	0,72	1,86	1,00
5	0,91 0,08	0,86 0,07	0,86 0,07	— —	Gas	Gas	—	5,40	5,40	—	0,76	0,68	0,76	1,86	0,95
6	0,91 0,08	0,91 0,08	0,86 0,07	— —	Gas	Gas	—	5,40	5,40	—	0,77	0,72	0,77	1,86	0,94
7	0,91 0,08	0,91 0,08	0,91 0,08	— —	Gas	Gas	—	5,40	5,40	—	0,78	0,77	0,78	1,86	0,92
8	0,86 0,07	0,94 0,03	0,86 0,07	— —	Gas	Gas	—	5,40	5,40	—	0,78	0,70	0,76	1,86	0,95
9	0,86 0,07	0,80 0,07	0,80 0,07	— —	Gas	Gas	—	3,86	3,86	—	0,72	0,56	0,69	1,46	0,73
10	0,86 0,07	0,65 0,08	0,65 0,08	— —	Gas	Gas	—	2,43	2,43	—	0,70	0,37	0,62	1,01	0,56
11	0,86 0,07	0,86 0,07	0,86 0,07	0,86 0,07	Gas	Gas	Gas	5,40	5,40	5,40	0,69	0,56	0,66	1,39	0,61

1)  $\tau_v$ : Lichttransmission

Die Gruppe um  $1,0 W/m^2 K$  bilden die Dreischiebenisoliervgläser bzw. die Zweischiebenisoliervgläser mit einer zusätzlichen Wärmestrahlenreflexionsschicht (dünne Edelmetallschicht) unter Verwendung optimierter Gasfüllungen. Weiterhin fällt in dieser Gruppe auf, daß ein Ersetzen gewöhnlicher Floatglasscheiben durch entsprechende hochtransparente Gläser ebenfalls keine nennenswerte Erniedrigung (bestenfalls acht Hundertstel bei Kombination 7) bringt. Ebenfalls weisen der metallbeschichtete Zweischiebentyp (Kombination 3) und der gewöhnliche Dreischiebentyp (Kombination 4) die gleichen  $k_{eq}$ -Werte auf. Nach rein energietechnischen Gesichtspunkten betrachtet bieten somit beide Produkttypen die gleiche Funktion. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist ein geringfügiger Dickenunterschied und die um absolut 10 % höhere Lichttransmission des Dreischiebenisoliervglases. Es ist deshalb diesem Umstand in der Anwendung bei der Gewährleistung ausreichender Tageslichtverhältnisse durch entsprechende Fenstergrößenwahl Rechnung zu tragen, wobei der geringe Dickenunterschied bei Verwendung moderner Fenstersysteme keine Rolle mehr spielt, hingegen bei Renovationsmaßnahmen manchmal von Bedeutung sein kann. Die Ver-

wendung eines entspiegelten Flachglases als Mittelscheibe eines Dreischiebenisoliervglases (Kombination 8) bringt ebenfalls keine diskutierenswerte Senkung von  $k_{eq}$ .

Erst die Kombinationen 9 und 10, d. h. der Einsatz von mindestens zwei wärmestrahlenreflektierenden Schichten mit ausreichend hoher Transparenz im Sichtbaren, führen zu einer weiteren deutlichen Senkung von  $k_{eq}$  von 1,0 auf Werte um  $0,6 W/m^2 K$ . Solche Produktmaßnahmen deuten auf die Möglichkeiten hin, die Wärmebilanz von verglasten Bauelementen in Größenordnungen hineinzubringen, die jedem Vergleich mit hochwärmegedämmten Wänden standhalten, die als nichttransparente Bauteile in ihrem wärmetechnischen Verhalten nur von ihrem Wärmedurchgangskoeffizienten abhängen. In Zahlen ausgedrückt heißt das, daß beispielsweise ein Mauerwerk aus Gasbetonblocksteinen bei einer Dicke von etwa 25 cm den Wert  $k_w = 1,0 W/m^2 K$  ebenso erreicht, wie ein zweisechaliges Mauerwerk bei Verwendung eines Wärmedämmstoffes der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040 hierfür eine Dämmschichtdicke von  $d = 20$  mm aufweisen muß. Diese beiden Vergleiche mögen die Effizienz von hochwärmegedämmenden Isolierglasprodukten (Wärmeschutzgläser) mit

$k_{eq} = 1,0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ausreichend im Wettbewerb mit den nichttransparenten Bauteilen (Wänden) dokumentieren. Wärmeschutzgläser und erst recht die zukünftig zu erwartenden Neuentwicklungen lassen dem Architekten bei einer Bewertung mit der neuen Kenngröße  $k_{eq}$  für verglaste Bauelemente nach energetischen Gesichtspunkten entsprechend den wärmetechnischen Regelwerken und unter

Berücksichtigung des sommerlichen Wärmeschutzes jede nur gewünschte gestalterische Freiheit. Voraussetzung hierzu ist allerdings, daß die äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten für Verglasungen in der Norm DIN 4108 [1] und dem Energieeinsparungsgesetz Berücksichtigung finden.

#### 4. Literatur

- [1] Normentwurf DIN 4108, Teil 1 bis 5 (Oktober 1979): Wärmeschutz im Hochbau. Berlin: DIN 1979.
- [2] Normentwurf DIN 67 507 (Mai 1978): Lichttransmissionsgrade, Strahlungstransmissionsgrade und Gesamtenergiedurchlaßgrade von Verglasungen. Berlin: DIN 1978.
- [3] Empfehlung für die Gesamtbestrahlungsstärke und die spektrale Verteilung künstlicher Sonnenstrahlung für Prüfzwecke. CIE-Publ. Nr. 20 (TC-2.2). Paris: Internat. Beleuchtungskommission 1972.
- [4] Gläser, H. J.: Verbesserung der Wärmedämmung bei Isoliergläsern. Glastechn. Ber. **50** (1977) S. 248–256.
- [5] Künzel, H.; Werner, H.; Gertis, K. u. a.: Energetische Beurteilung von Fenstern während der Heizperiode. Glaswelt **33** (1980) Nr. 3, S. 158, 160, 162. [Ref. Glastechn. Ber. **53** (1980) Nr. 9, 80R1691.] 80R1594