

Thermische Belastung durch Sonneneinstrahlung in Glasbauten

aus

Bauphysik 28 (2006), Heft 6, S. 356-359

CSE Nadler

Dipl.-Ing. Norbert Nadler

Arnstädter Str. 7, 16515 Oranienburg

Tel. : (03301) 579 39-0

Fax : (03301) 579 39-1

E-Mail: n.nadler@cse-nadler.de

Website: www.cse-nadler.de

Oranienburg, den 6. November 2006

Zur Ermittlung der Kühllast nach VDI 2078 [1] oder zur Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 [2] werden die Gesamtenergien, welche durch die einzelnen Glasflächen in einen Raum eindringen, aufsummiert. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass ein Teil der kurzwelligeren Strahlung den Raum durch andere transparente Flächen wieder verlässt. Die insgesamt thermisch wirksam werdende Strahlung im Raum wird durch diese Vernachlässigung überbewertet und führt zu überdimensionierten Kühlanlagen. Im folgenden Beitrag soll beispielhaft eine Quantifizierung der tatsächlich entstehenden Kühllast durch Sonneneinstrahlung erfolgen.

Einführung

Bild 1 zeigt den Energietransport durch eine Zweifachverglasung. Neben dem Transmissionswärmestrom durch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen treten noch weitere Effekte auf, die durch die Absorption der Sonnenstrahlung in den Glasscheiben hervorgerufen werden. Die Absorptionen bewirken durch die Erwärmung der Scheiben eine konvektive und eine langwellige Strahlungswärmeabgabe an die Umgebung. Der Teil dieses Wärmestromes, der an den Raum abgegeben wird, bezeichnet man als sekundäre Wärmeabgabe.

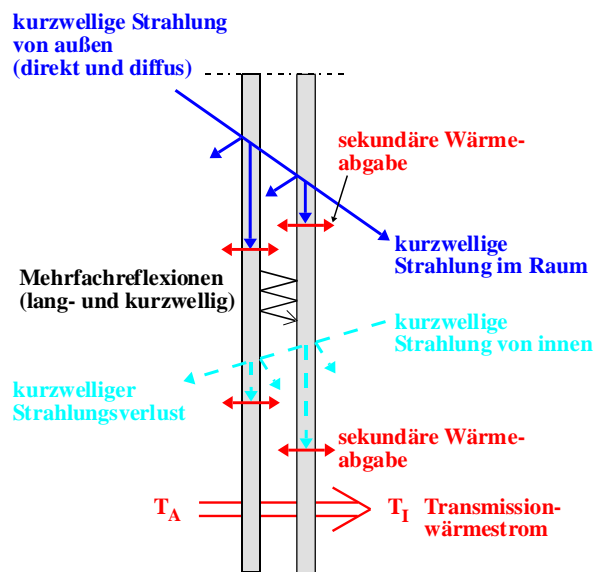


Bild 1: *Energietransport durch eine Zweifachverglasung*

Die Erwärmung der äußeren Scheibe wirkt sich ebenfalls auf die sekundäre Wärmeabgabe aus, jedoch wird sie durch die in Raumrichtung nachfolgenden Wärmewiderstände für den Scheibenzwischenraum und der inneren Scheibe gemindert. Der Transport im Scheibenzwischenraum erfolgt hier über langwellige Strahlung mit mehrfachen Reflexionen und über Wärmeleitung bzw. Konvektion bei genügend großem Scheibenabstand. Mehrfache Reflexionen im Scheibenzwischenraum sind auch beim kurzwelligeren Strahlungstransport vorhanden.

Die sekundäre Wärmeabgabe an den Raum teilt sich in einen konvektiven Anteil und einen Anteil für die langwellige Strahlung auf. Maßgeblich für den konvektiven Anteil ist die Raumlufttemperatur, für die langwellige Strahlung dagegen die Oberflächentemperatur der anderen Raumumschließungsflächen. Sind

noch weitere transparente Flächen im Raum vorhanden, wird sich die langwellige Strahlungswärmeabgabe aufgrund der warmen Oberflächen verringern. Desgleichen wird im Fall einer frei schwingender Raumlufitemperatur (d.h. Kühlanlage nicht vorhanden) die konvektive Wärmeabgabe an die Raumluf abnehmen, wenn sich z.B. durch weitere Fenster im Raum die Raumluf erwärmt hat. Diese Erscheinungen können nur korrekt berücksichtigt werden, wenn der Raum als Ganzes betrachtet wird.

Den i.a. größten Anteil des Energietransportes durch die Verglasung bildet die durchgelassene kurzwellige Strahlung. Sekundäre Wärmeabgabe und durchgelassene kurzwellige Strahlung werden mit dem Gesamtenergiedurchlassgrad g berechnet (s. Bild 2). Er stellt das Verhältnis der Gesamtenergie hinter der Verglasung zur ankommenden unter dem Winkel η einfallenden kurzwelligen Strahlung E_S dar.

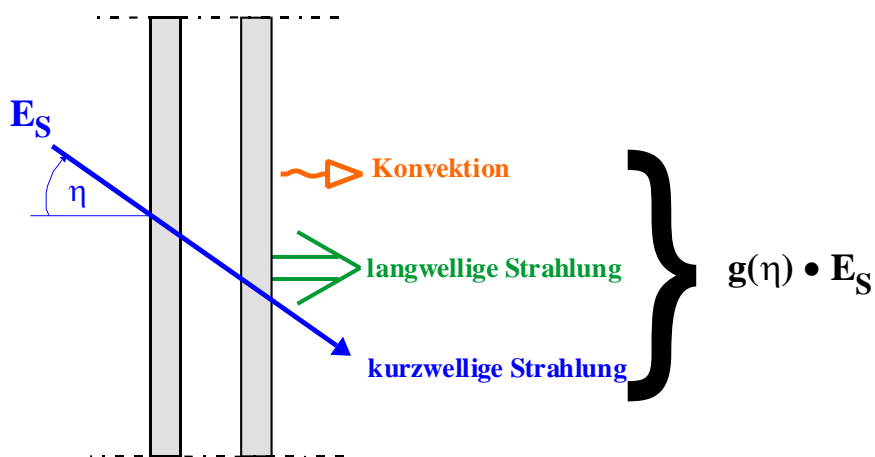


Bild 2: Definition des Gesamtenergiedurchlassgrades g

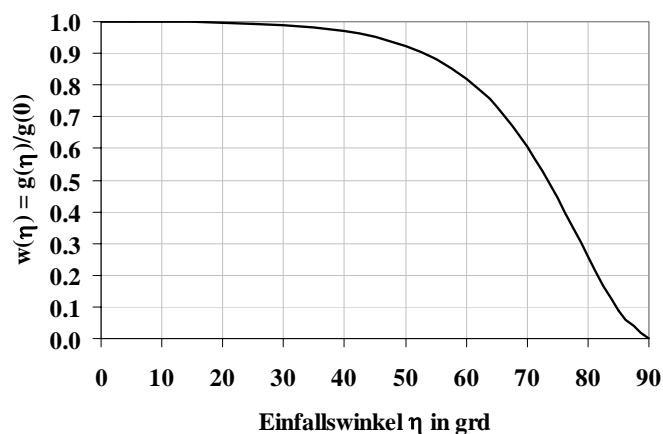


Bild 3: Winkelabhängigkeit des Gesamtenergiedurchlassgrades für Zweifachverglasung aus normalem Fensterglas

Einfallswinkel	0°	dif
Transmissionsgrad τ	0,676	0,554
Gesamtenergiedurchlassgrad g	0,752	0,631

Die Abhängigkeit des Gesamtenergiedurchlassgrades g vom Einfallswinkel η ist für normales klares Fensterglas in *Bild 3* dargestellt. Sondergläser können hiervon abweichen. Bei einem Strahlungseinfall senkrecht zur Flächennormalen gilt jedoch immer $g(90^\circ) = 0$.

Die Berechnung des g -Wertes erfolgt unter der Bedingung der Temperaturgleichheit zwischen innen und außen, unabhängig von den anderen Bauteilen im Raum sowie für stationäre Verhältnisse. Temperaturunterschiede werden in der Berechnung der Transmission berücksichtigt. Der gesamte stationäre Wärmestrom durch die Verglasung ergibt sich somit durch

$$\dot{Q}_G = U_G A_G (T_A - T_I) + w(\eta) g(0) A_G E_{\text{dir}} + w(\text{dif}) g(0) A_G E_{\text{dif}} \quad (1)$$

\dot{Q}_G stationärer Wärmestrom durch die Verglasung in W

U_G Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung in W/(m² K)

A_G Glasfläche in m²

T_A Außentemperatur in °C

T_I Innentemperatur in °C

$w(\eta)$ Winkelabhängigkeit des Gesamtenergiedurchlassgrades

$w(\text{dif}) := \frac{g_{\text{dif}}}{g(0)}$ Winkelfaktor für diffusen Gesamtenergiedurchlassgrad

Für normales Fensterglas nach *Bild 3* beträgt $w(\text{dif}) = 0,842$.

$g(0)$ Gesamtenergiedurchlassgrad bei senkrechtem Strahlungseinfall

g_{dif} Gesamtenergiedurchlassgrad für diffusen Strahlungseinfall

E_{dir} Direktstrahlung in W/m²

E_{dif} Diffusstrahlung in W/m²

In den gängigen Rechenverfahren zur Ermittlung von Energieverbräuchen, thermischen Lasten oder zur Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes wird \dot{Q}_G für alle Fenster im Raum aufsummiert. Dies setzt voraus, dass der Anteil für die durchgelassene kurzwellige Strahlung im g -Wert im Raum verbleibt und dort in eine konvektive und langwellige Last umgewandelt wird. Tatsächlich sind die Glasscheiben aber von beiden Seiten für kurzwellige Strahlung durchlässig. D.h., die vom Raum reflektierte oder die von anderen Fenstern durchgelassene Strahlung trifft von innen auf die Verglasung und geht zum Teil nach außen verloren. Hinsichtlich der sekundären Wärmeabgabe liegen hier die gleichen Mechanismen vor, wie bei der Strahlung von außen (s. *Bild 1*).

Die sekundäre Wärmeabgabe durch die Strahlung von innen erhöht zwar die konvektive und langwellige Strahlungswärmeabgabe an der Verglasung, jedoch führt der durchgelassene Strahlungsverlust zu einer geringeren Raumbelastung. Es ist einleuchtend, dass der Strahlungsverlust umso höher ist, je mehr Fenster im Raum vorhanden sind.

Bild 4 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf in den Glasscheiben, aufgesplittet für jede Belastungsart. Durch Direkt- und Diffusstrahlung gelangen kurzwellig 467 W/m² in den Raum. Durch Reflexionen an

den nicht-transparenten Raumumschließungsflächen werden hiervon 32 % reflektiert. Diese Strahlung von innen bewirkt einen zusätzlichen Temperaturanstieg von ca. 2 K in der inneren Scheibe und ca. 1 K in der äußeren Scheibe, der durchgelassene Anteil von 85 W/m^2 ist aber für den Raum nicht mehr wirksam. Durch gegenüberliegende Fenster würde die Strahlung von innen und damit der Strahlungsverlust erheblich erhöht werden.

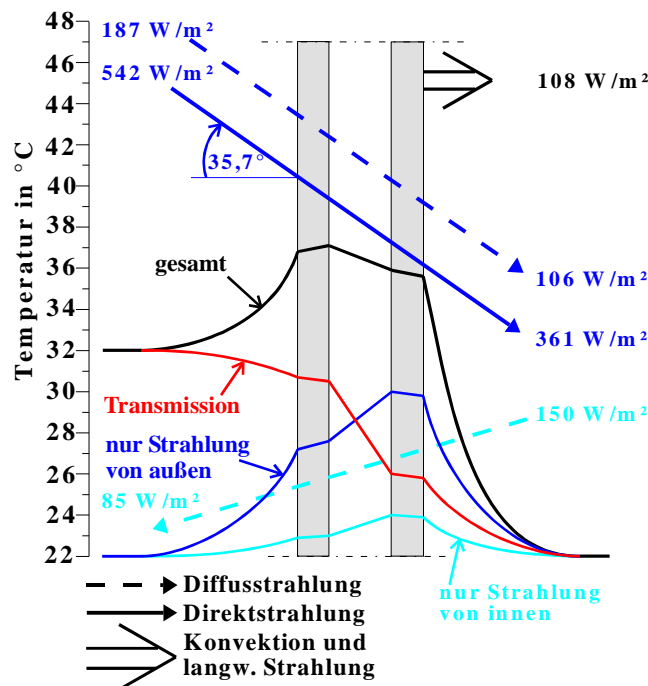


Bild 4: Temperaturverlauf in einer Zweifachverglasung

Untersuchung

Unter der Annahme diffuser Reflexionen sowohl im Scheibenzwischenraum als auch im Raum wurde bereits im Forschungsprojekt [4] ein Strahlungsmodell entwickelt und anhand der berechneten freischwingenden Raumlufthtemperatur im Wintergarten messtechnisch verifiziert. Der Unterschied zwischen Messung und Rechnung betrug 1 bis 2 K und lag im Rahmen der örtlichen Abweichungen von der mittleren Raumlufthtemperatur. Das Strahlungsmodell ist im dynamischen Gebäudesimulationsprogramm TGASim implementiert (vgl. Nadler [3]).

Um eine Quantifizierung über die Höhe der tatsächlich im Raum wirksam werdenden Strahlung anzugeben, wird der in Bild 5 dargestellte Raum verwendet.

Zur Vereinfachung werden die einzelnen Flächen nacheinander zu 100 % mit Glas ($U = 2,11 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) beaufschlagt. Für die jeweils nicht-transparenten Bauteile wird angenommen, dass sie adiabatisch zum angrenzenden Raum sind und einen kurzwelligen Reflexionsfaktor für Strahlung von innen von 0,3 aufweisen. Aus Tabelle 1 geht hervor, welche Fläche in den einzelnen Varianten eine Glasfläche ist. In Variante 6 FE wird als theoretischer Grenzfall angenommen, dass alle Raumumschließungsflächen aus Glas bestehen. Die ankommende Strahlung auf der Fußbodenunterseite besteht hier nur aus der Bodenreflexion der Globalstrahlung.

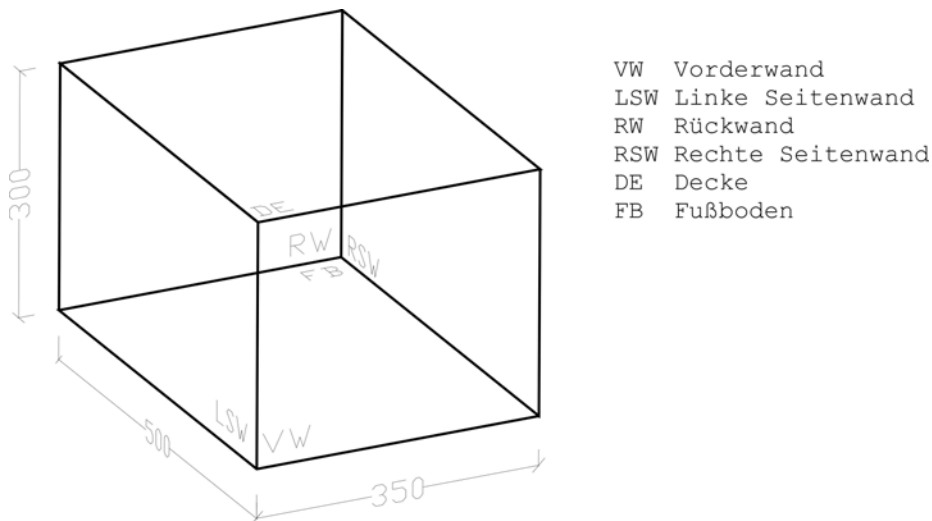


Bild 5: Raumabmessungen (Maße in cm). Raumumschließungsfläche 86 m².

Für jede Variante werden jeweils zwei Berechnungen durchgeführt. In der ersten Berechnung wird mit dem Strahlungsmodell die absorbierte Strahlung in bzw. auf sämtlichen Bauteilschichten (Glasscheiben bzw. Wandoberflächen) ermittelt. TGASim berechnet daraus unter Berücksichtigung der thermischen Lage der Schicht zum Raum sowie der langwelligen Strahlungs- und Luftankopplung der Oberflächen untereinander die erforderliche Kühllast KL für eine vorgegebene Soll-Raumlufttemperatur von 22 °C. Es wird bis zum stationären Zustand bei einer konstanten Außentemperatur von 22 °C und einem konstanten Sonnenstand mit einer konstanten Sonnenstrahlung gerechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Spalte 10 der *Tabelle 1* eingetragen.

In der zweiten Berechnung für den gleichen Raum und bei gleichem Außenklima wird die Summe der durch die Glasflächen eindringenden Gesamtenergie ($\Sigma \dot{Q}_G$ bei $T_A = T_I$ nach *Glg. 1*, s. Spalte 9 in *Tabelle 1*) auf die Raumumschließungsflächen flächenproportional verteilt. TGASim betrachtet nun alle Bauteile im Raum als nicht-transparent und geht von einer Absorption nur auf der inneren Oberfläche aus. Die Ergebnisse sind in Spalte 11 der *Tabelle 1* eingetragen. Diese Vorgehensweise entspricht der Aktion QS in [3] bzw. der Aktionsgröße E(6) in der VDI 2078 [1].

Die Kühllast ist eine rein konvektive Last. D.h., die Abfuhr der Wärme zur Aufrechterhaltung einer Soll-Raumlufttemperatur erfolgt mittels RLT-Anlage. Bei einer Flächenkühlung –z.B. mittels Kühldecken– spielt noch die Anordnung im Raum und die Größe der Kühlfläche eine Rolle. Es wird daher diskutiert, ob die konvektive Kühllast auch als Gebäudeeigenschaft interpretierbar ist.

Die Wahl der Raumlufttemperatur als Sollwert resultiert aus den in der Praxis üblichen Raumtemperaturreglern. Wird als Sollwert die Operativtemperatur gewählt, so hat dies zwar rechnerische Vorteile, jedoch wird diese Größe nicht von der technischen Anlage erfasst und ist somit nicht direkt beeinflussbar.

Tabelle 1: Ergebnisse der Variantenrechnungen

Variante	Transparente Flächen						Glasflächen- anteil -	$\Sigma g A E_s$ W	KL tats. W	KL bei Aktion QS W	Mind- Faktor -
	FB	VW	LSW	RW	RSW	DE					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 FE		x					0.122	1047	932	940	0.991
2 FE		x	x				0.297	7267	4981	5619	0.887
3 FE		x	x		x		0.471	8564	4269	5732	0.745
4 FE		x	x		x	x	0.674	20662	7201	12125	0.594
5 FE		x	x	x	x	x	0.797	21709	5748	11627	0.494
6 FE	x	x	x	x	x	x	1.000	23807	3677	11476	0.320

Aus den beiden Kühllastergebnissen lässt sich ein Minderungsfaktor ermitteln, der sowohl den Strahlungsverlust, als auch die verminderte Wirkung der Absorption in der äußeren Scheibe bei Strahlung von innen berücksichtigt. Er ist mit der Summe der Gesamtenergien hinter der Verglasung zu multiplizieren, damit die Kühllast den tatsächlichen Werten entspricht. Der Minderungsfaktor ist in *Tabelle 1* Spalte 12 angegeben und in *Bild 6* grafisch in Abhängigkeit der Glasfläche an der Raumschließungsfläche (vgl. Spalte 8 in *Tabelle 1*) dargestellt.

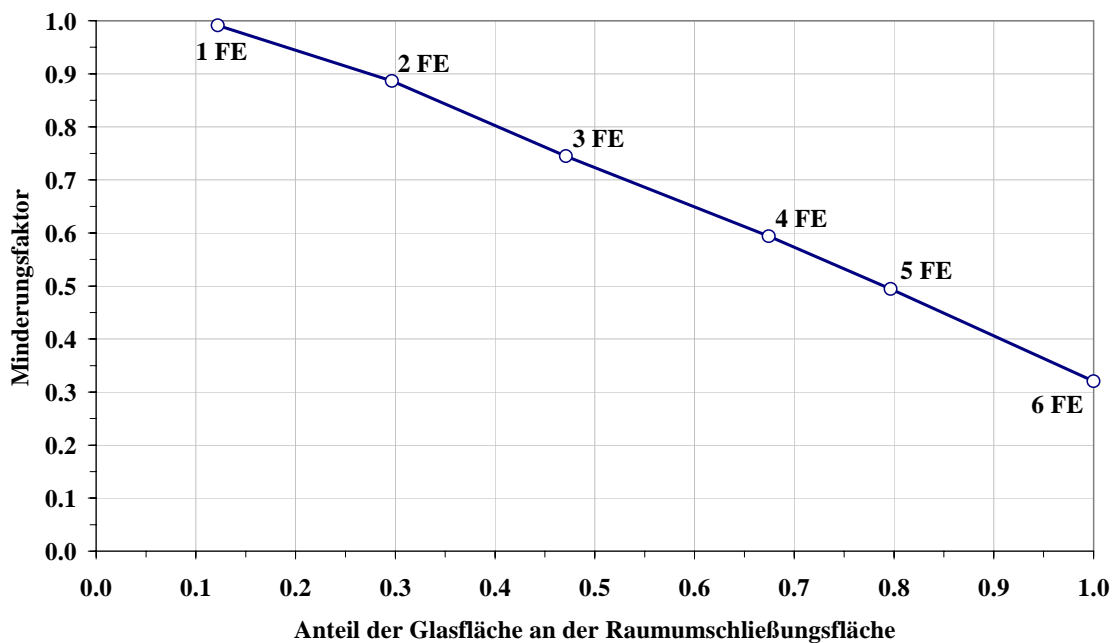


Bild 6: Minderungsfaktor für Gesamtenergie hinter der Verglasung in Räumen mit mehreren Fenstern unterschiedlicher Orientierung

Für die Variante 1 FE kann eine Minderung vernachlässigt werden. Bei mehreren Fenstern in einem Raum mit unterschiedlicher Ausrichtung kann die erforderliche Minderung erheblich sein, theoretisch bis zu 68 % in der Variante 6 FE.

Der hier angegebene Minderungsfaktor wurde für stationäre Verhältnisse ermittelt. Unter instationären Verhältnissen werden noch Wärmespeichereffekte wirksam, die zu anderen Ergebnissen für die rechnerische Minderung führen können. Es wurde daher überprüft, ob der zeitlich konstante

Minderungsfaktor nach *Bild 6* auf die Ergebnisse einer dynamischen Simulation mit Strahlungsdaten für die Mitte Deutschlands übertragbar ist. Um Einflüsse der Transmission aufgrund von Temperaturunterschieden zu eliminieren, wurde die Außentemperatur bei der Simulation auf konstant 22 °C gesetzt. Der Simulationszeitraum geht vom 23. Juni bis zum 23. Juli.

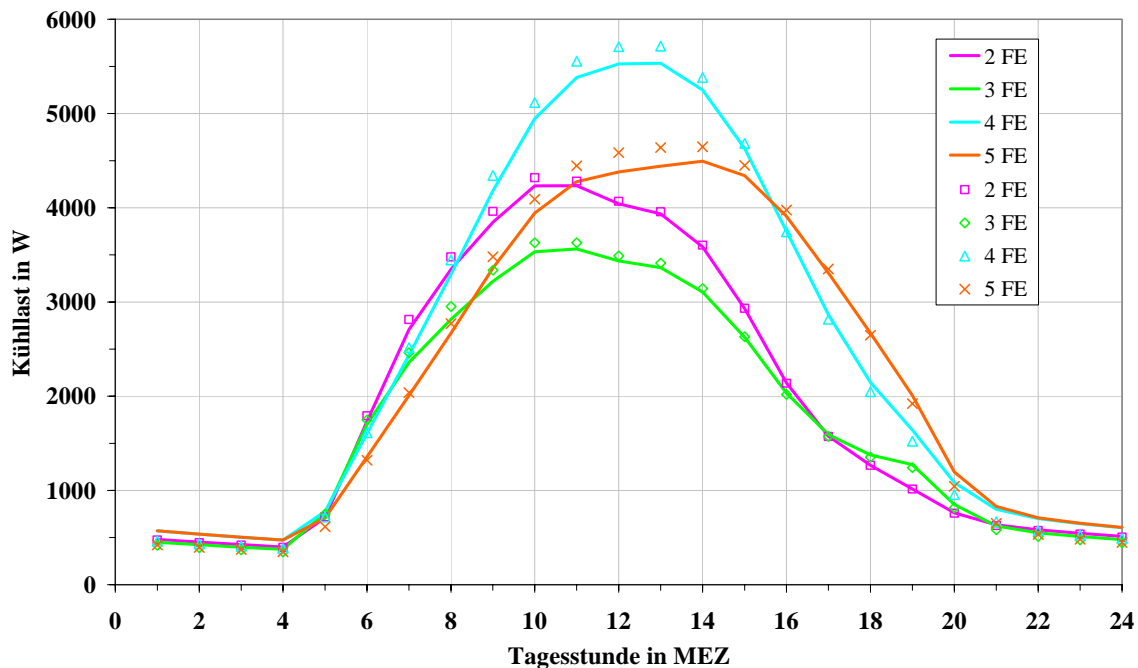


Bild 7: Kühllast am 23. Juli für Räume mit mehreren Fenstern unterschiedlicher Orientierung im Vergleich mit der Berechnungsmethode „Aktion QS mit zeitlich konstantem Minderungsfaktor“

Bild 7 vergleicht die tatsächliche Kühllast (durchgezogene Linien) mit den Ergebnissen der Berechnungsmethode mit Minderungsfaktor (Symbole). Zu Zeiten hoher Energieeinträge liegen die relativen Fehler bei unter 5 %. In den Nachtstunden können sich jedoch größere relative Fehler ergeben, da der Minderungsfaktor bei ausbleibender Sonnenstrahlung keinen Einfluss nehmen kann (Multiplikation mit Null). Die absoluten Fehler sind aber zu diesen Zeiten vernachlässigbar. Gemessen an der Größenordnung des Minderungsfaktors sind 5 % Fehler akzeptabel.

Die Kurven sind nicht aufsteigend nach der Fensteranzahl geordnet, da mit abnehmender Wärmedämmung durch den höheren Glasflächenanteil die Kühllast aufgrund erhöhter Transmission nach außen wieder sinkt. Es muss demnach ein Optimum existieren zwischen Sonnenenergieeintrag und Wärmedämmwert des Raumes.

Zusammenfassung

In den gängigen Berechnungsmethoden, in denen der Gesamtenergiedurchlassgrad g eingesetzt wird, geht man davon aus, dass auch der kurzwellige Anteil in der Gesamtenergie im Raum verbleibt und an den inneren Oberflächen absorbiert wird. Trifft diese kurzwellige Strahlung auf direktem Weg oder über Reflexionen von innen auf eine transparente Fläche, so wird jedoch ein Teil der Strahlung den Raum wieder verlassen. Dies führt zu einer Wirkungsminderung der in den Raum eintretenden Gesamtenergie.

Im vorliegenden Beitrag wird ohne den Anspruch auf Allgemeingültigkeit ein Minderungsfaktor

beispielhaft dargestellt, der im Sinne einer Korrektur auf die Berechnung mit dem Gesamtenergiedurchlassgrad anzuwenden wäre. Es wird gezeigt, dass die Minderung erheblich sein kann und bei mehr als einer Fensterorientierung im Raum nicht mehr zu vernachlässigen ist.

Der Minderungsfaktor ist auch bei dynamischen Berechnungen, z.B. nach VDI 2078 [1], mit einem geringen Fehler von max. 5 % anwendbar.

Literatur

- [1] VDI 2078 Ausgabe Juli 1996 : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] DIN 4108-2 Ausgabe Juli 2003: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [3] *Nadler, Norbert:*
Korrekturvorschläge zum EDV-Verfahren der VDI 2078.
Teil 1a: Algorithmen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 8, S. 59-66
Teil 1b: Algorithmen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 9, S. 62-66
Teil 2a: Vergleichsrechnungen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 10, S. 83-90
Teil 2b: Vergleichsrechnungen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 11, S. 75-78
- [4] *Schreck, H., Hillmann, G., Zöllner, G., Nadler, N.:*
Passive Sonnenenergienutzung Wintergarten-Solarwand.
Interdisziplinäres Forschungsprojekt IFP 21/5, Technische Universität Berlin, Forschungsbericht 1986.