

Auf dem Weg zur energieneutralen Fensterverglasung

Hans Joachim Gläser, Gummersbach; Email glasesrgm@arcor.de;

Zusammenfassung

Es wird über die Untersuchung an Fensterverglasungen bzgl. Energieneutralität in der Heizperiode berichtet, wobei energieneutral hier bedeutet, dass die Wärmeverluste durch die Verglasung bei Nacht tagsüber bei so gering wie möglicher solarer Einstrahlung, z. B. vornehmlich bei bedecktem Himmel, kompensiert werden. Hierzu bieten sich die 4-fach-Wärmedämmscheibe, das in der BRD prospektierte Vakuum-Isolierglas, VIG abgekürzt, sowie ein modifiziertes Kastenfenster an, bei dem die äußere und innere Scheibe mit einer 2-fach-Wärmedämmscheibe und dazwischen mit einer zu beiden Seiten niedrigemittierenden und nach außen hin solar hochreflektierenden Jalousie (z. B. mit Al-Oberfläche) bzw. einem funktions-gleichen Bauteil als variabler Wärme-/Sonnenschutz ausgerüstet ist. Energiebilanzberechnungen auf der Grundlage eines MS Excel-Programms ergaben, dass die Kastenfensterverglasung den beiden anderen bzgl. Energieneutralität überlegen ist. Sie ist darüber hinaus auch technisch, was Produktion, Anwendung und Verhalten an betrifft, am unproblematischsten; alle ihre Details sind Stand der Technik. Bei allen drei Verglasungen ist wegen der hohen Wärmedämmung schon bei bedecktem Himmel Reifbeschlag möglich, zu dessen Vermeidung/Häufigkeitsverminderung eine witterungsbeständige, niedrigemittierende Schicht auf der Verglasungsaußenseite unerlässlich ist. Außerdem ist bei allen drei Verglasungen wegen des hohen Sonnenkollektor-Effektes eine Sonnenschutzvorrichtung notwendig, die bei dem modifizierten Kastenfenster schon integriert ist.

1. Motivation

Die Notwendigkeit weiterer Heizenergieeinsparung bei Wohngebäuden, speziell bei deren Fensterverglasungen, ist trotz erheblicher Fortschritte in den letzten Jahrzehnten weiterhin eine Herausforderung. Im vorliegenden Beitrag wird durch Simulation der Energieflüsse bei Fensterverglasungen mit einem MS Excel-Programm untersucht, inwieweit es möglich ist, in der Heizperiode - und hier speziell für das gemäßigte, mitteleuropäische Klima - ‚energie-neutrale‘ Fensterverglasungen zu konzipieren. ‚Energie-neutral‘ soll hier bedeuten, dass die Wärmeverluste in der Nacht soweit wie möglich durch solare Einstrahlung – und hier wiederum möglichst schon bei bedecktem Himmel - tagsüber kompensiert wird, so dass die über die Heizperiode gemittelte Energiebilanz ausgeglichen ist. Dies ist mit den bisher markt-gängigen Fensterverglasungen auf der Basis der 2- und 3-fach-Wärmedämmscheiben nicht möglich.

2. Strategie der Energiebilanzberechnungen

Im gemäßigten, mitteleuropäischen Klima hat die Heizperiode (1.10. – 31.3.) ca. 4370 Std.. Davon entfallen auf Nachtstunden ca. 2600 Std., auf Sonnenscheinstunden ca. 490 Std. (langjähriger Mittelwert für München) und der Rest, d.h. ca. 1280 Std., auf Tagstunden mit bedecktem Himmel. Aus dieser Stundenaufteilung kann für die Konzeption von energieneutralen Verglasungen gefolgert werden: Priorität muss haben, den Wärmeverlust in der Nacht so niedrig wie möglich zu halten. An 2. Stelle folgt, bei bedecktem Himmel tagsüber soviel wie möglich solare Einstrahlung durchzulassen. Danach sollte an 3. Stelle bei Sonnenschein, d. h. bei klarem Himmel, zum Ausgleich der Wärmeverluste bei Nacht und ggf. tagsüber und zur Gewährleistung des Wohnkomforts soviel wie notwendig solare Energie durchgelassen, jedoch überschüssige solare Energie abgehalten werden. Da in gut gedämmten Gebäuden bei Sonnenschein in der Regel nur ein geringer Anteil der einstrahlenden solaren Energie wegen des Treibhauseffektes nutzbar ist, ist es gerechtfertigt in diesem Fall, wie bei bedecktem Himmel, nur diffuse Einstrahlung bei den Berechnungen zu berücksichtigen. Letzteres vereinfacht die Berechnungen sehr, da die Himmelsrichtung der solaren Einstrahlung nicht berücksichtigt werden muss.

3. Simulationsrechnungen

Grundlage der Simulationsrechnungen mit dem MS Excel-Programm sind, wie im Bild 1 beispielhaft für die 2-fach-Isolierscheibe dargestellt, Energieflussschemas von Mehrfach-Schalenanordnungen [1], wobei die Verglasung anstelle von Scheiben auch Jalousien oder funktions-gleiche Konstruktionselemente enthalten kann. Physikalisch gerechtfertigt und vorausgesetzt wird, dass die Wärmekapazität und der Wärmewiderstand aller Konstruktionselemente der Verglasungskonstruktion null sind, d. h. es herrscht zu jedem Zeitpunkt thermisches Gleichgewicht. Die Wärmeflüsse Q_i und $Q_{int.}$ wurden mit dem Formalismus gemäß DIN

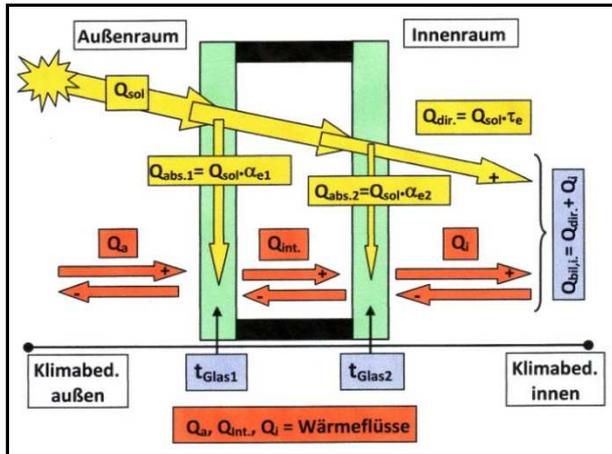


Bild 1: Energieflussschema eines Zweifach-Isolierglases

EN 673 bzw. 410 berechnet [2, 3]. Im Gegensatz zu DIN EN 673 wurden jedoch für die Berechnung des äußeren Wärmeflusses Q_a anstelle des Wärmeübergangskoeffizienten h_e der Strahlungsaustausch mit dem Himmel entsprechend den äquivalenten Himmelstemperaturen für klaren bzw. bedeckten Himmel t_H [4] und der konvektive Wärmeübergang bezogen auf die Außenlufttemperatur t_a angesetzt. Ebenso wurde der Strahlungsaustausch mit dem Erdboden berücksichtigt, wobei das thermische Emissionsvermögen des Erdbodens ϵ_E wird mit 1 und seine Temperatur t_E bei bedecktem Himmel gleich t_a und bei klarem Himmel gleich $t_a - 2 \text{ °C}$ angesetzt wurde. Auf diese

Weise können nicht nur die Verhältnisse auf der Verglasungsaußenseite, z. B. ihr Beschlagverhalten bei bedecktem und klarem Himmel als Grenzfälle, sondern in diesen Grenzen auch die Energieverlust/-gewinne durch die Fensterverglasung simuliert werden.

Für die vorliegende Themenstellung ist die Energiebilanz im Innenraum in Abhängigkeit von

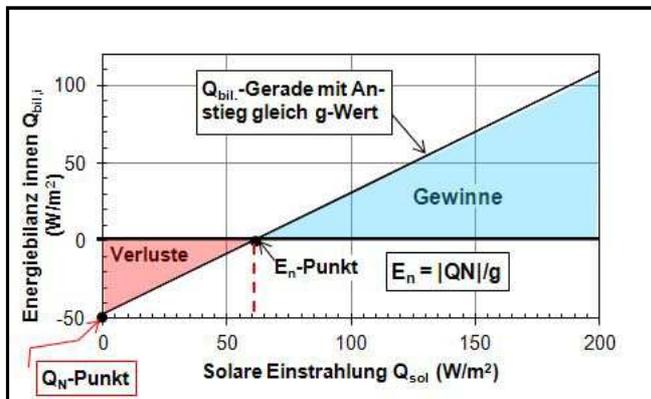


Bild 2: Beispiel der $Q_{bil,i}(Q_{sol})$ -Geraden einer Fensterverglasung für vorgegebene klimatische Bedingungen

der solaren Einstrahlung $Q_{bil,i}(Q_{sol})$ zu untersuchen. Die Berechnungen ergaben, dass diese Funktion für jede Verglasung und alle vorausgesetzten klimatischen Bedingungen im Innen- und Außenraum eine Gerade ergibt (s. Bild 2), die für $Q_{sol} = 0$, d.h. nachts, bei dem Wärmeverlust Q_N beginnt und deren Anstieg gleich dem Gesamtenergiegrad $\tau_e + Q_i/Q_{sol}$ ist, allgemein bekannt als Gesamtenergiegrad g [s. 3]. Weiter zeigte sich, dass $Q_{bil,i}$ im Wesentlichen von der Außenlufttemperatur t_a und der äquivalenten Himmelstemperatur t_H abhängt und eine

Erhöhung dieser beiden Temperaturen die $Q_{bil,i}$ -Gerade parallel zu höheren Werten verschiebt und umgekehrt [s. 1].

Auf dieser Grundlage können für die Energiebilanzen mit den im 2. Abschnitt unterschiedenen Tageszeitstunden folgende Gleichungen abgeleitet werden:

$$\text{Bil.}_{\text{Nacht}}/\text{ZR} = Q_N(t_{a,\text{Nacht}}) \cdot h_{\text{Nacht,ZR}} \quad (1)$$

$$\text{Bil.}_{\text{Tag}}/\text{ZR} = (Q_{\text{sol,Tag}} \cdot g - |Q_N(t_{a,\text{Tag}})|) \cdot h_{\text{Tag,ZR}} \quad (2)$$

$$\text{Bil.}/\text{ZR} = \text{Bil.}_{\text{Nacht}}/\text{ZR} + \text{Bil.}_{\text{Tag}}/\text{ZR} \quad (3)$$

wobei ZR der bilanzierte Zeitraum (Woche, Monat oder Heizperiode) ist. Für Q_{sol} sowie t_a sind die durchschnittlichen Werte für den bilanzierten Zeitraum anzusetzen. Als

g-Wert wurde sowohl bei bedecktem als auch bei klarem Himmel der $g_{\text{diff.}}$ -Wert eingesetzt, wie er sich für diffuse solarer Einstrahlung ergibt (Begründung s. 2. Abschnitt). Weiterhin wurden für die Wärmeverlustberechnungen nachts ($Q_{\text{N,Nacht}}$), wenn nicht anders vermerkt, bedeckter Himmel vorausgesetzt, was den klimatischen Verhältnissen im mitteleuropäischen Klima nahe kommt.

Mangels detaillierterer Daten wurden bei den Berechnungen mit Gleich. 1 bis 2 für Q_{sol} und t_a , wenn nicht anders vermerkt, die in Tabelle 1 dargestellten geschätzten durchschnittlichen klimatischen Daten für die Heizperiode (HP) sowie eine Innenraumtemperatur $t_i = 20 \text{ °C}$ unter Beibehaltung der Stundenaufteilung, wie im 2. Abschnitt beschrieben, sowie senkrechter Einbau der Fenster ($\beta = 90^\circ$) angesetzt.

Ø Klimadaten in der HP	Nacht	Tag bedeckter Hi.	Tag Sonnenschein
Ø Q_{sol} (W/m^2)		30	90
Ø t_a ($^\circ\text{C}$)	0	3	6
h (Std.)	2600	1280*	490

*Es gilt: $h_{\text{Tag,bed.Hi./ZR}} = h_{\text{ges./ZR}} - h_{\text{Nacht/ZR}} - h_{\text{Tag,Sonnen/ZR}}$

Tabelle 1: Bei den Berechnungen zugrunde gelegte Klimadaten

Da im Folgenden unterschiedliche Konstruktionen von Fensterverglasungen *vergleichend* untersucht werden, sind die obigen Berechnungsansätze vertretbar. Genaue Absolutwerte der Energiebilanz für die untersuchten Konstruktionen erhält man beim Einsatz monatlicher Durchschnittswerte, geliefert von meteorologischen Instituten, und aufsummiert über die Heizperiode.

4. Ergebnisse der Berechnungen

4.1 Mehrscheiben-Wärmedämmgläser

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Energiebilanzberechnungen an Wärmedämmscheiben, der Firma Interpane stellvertretend für typische 2- bis 4-fach-Wärmedämmscheiben vergleichend dargestellt, im Folgenden abgekürzt mit 2xWDS bis 4xWDS.

Bilanzberechnung	iplus E (2xWDS)	iplus 3E (3xWDS)	iplus 3LS (3xWDS)	iplus 4E (4xWDS)
Bil.-Nacht/HP (kWh/m^2)	-60,8	-31,3	-36,9	-21,5
Bil. Bed. Hi./HP (kWh/m^2)	-8,4	3,5	4,5	6,3
Bil.-klarer Hi./HP (kWh/m^2)	16,5	15,0	18,1	14,8
Bil./ HP (kWh/m^2)	-52,6	-12,8	-14,3	-0,5

Tabelle 2: Ergebnisse der Energiebilanzberechnungen an typischen Mehrfach-Wärmedämmscheiben

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

1. Unter gleichen klimatischen Bedingungen verbessert sich beim Übergang von der 2xWDS zur 3xWDS die Energiebilanz in der Heizperiode um etwa einen Faktor 4 und beim Übergang zur 4xWDS sogar um etwa einen Faktor 100.
2. Mit der 4xWDS kommt man in den Bereich der Energieneutralität im Sinne der Definition im 1. Abschnitt.
3. Der Vergleich der 3xWDS iplus 3E mit der iplus3LS mit den kennzeichnenden Größen gemäß DIN $U_g = 0,58$ bzw. $0,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $g = 50,3$ bzw. $60,9\%$ zeigt, dass eine g-Wert-Erhöhung um ca. 10% und gleichzeitig eine U_g -Wert-Erhöhung um $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ die Energiebilanz eher verschlechtert, sofern die solare Einstrahlung $Q_{\text{sol}} < 100 \text{ W/m}^2$ ist.

Entscheidend für das Alterungsverhalten der Mehrfach-WDS im eingebauten Zustand ist die Aufheizung der Einzelscheiben bei maximal möglicher Sonneneinstrahlung. Tabelle 3 zeigt die Berechnungen hierzu unter der Voraussetzung, dass auch bei erhöhten Scheibentemperaturen die Thermodynamik der Zwischenraumgase, wie in DIN EN 673 vorgegeben, gilt.

Produkt	Scheibentemperatur (°C) ; bei $Q_{sol} = 800 \text{ W/m}^2$, $t_i = 20 \text{ °C}$, $t_a = 30 \text{ °C}$				
	Scheiben-Nr.	1 (außen)	2	3	4
iplus E (2xWDS)		34	29		
iplus 3E (3xWDS)		39	48	28	
iplus 4E (4xWDS)		40	81	70	32

Tabelle 3: Scheibentemperaturen von Mehrfach-WS bei $Q_{sol} = 800 \text{ W/m}^2$

Man erkennt, dass sich bei der 4xWDS Temperaturen der mittleren Scheiben von 70 bis 80 °C einstellen können, die bei angepasster Thermodynamik der Zwischenraumgase sicher nicht wesentlich abweichen. Die hohen Temperaturen haben einen erheblichen Isolierglas-Effekt (Barometer-Effekt) mit erheblicher Belastung des Randverbundes zur Folge, was sich auf die Alterungsbeständigkeit nachteilig auswirkt. Als weitere gravierende Nachteile kommen bei der 4xWDS hinzu:

- Die erhebliche Verglasungsdicke sowie hohes Scheibengewicht (letzteres benachteiligt schon die 3xWDS) mit der Folge großer Montageprobleme
- Noch größerer Aufwand bei der Anpassung des Rahmen-U-Wertes U_f an den U_g -Wert der Verglasung (U_g) als bei der 3xWDS.

Angesichts dieser Nachteile kann sich der Autor nicht vorstellen, dass die 4xWDS ein marktgängiges Produkt wie die derzeitig vermarkteten WDS wird.

4.2 Kastenfenster als Alternative

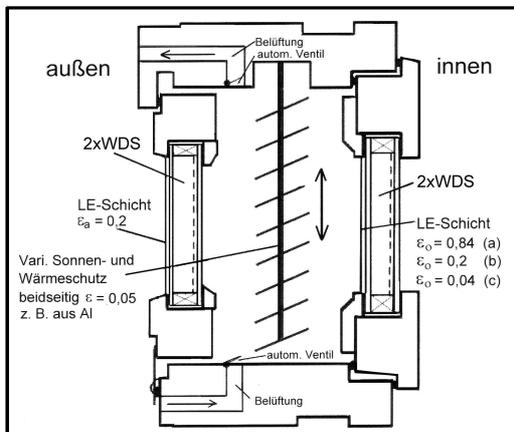


Bild 3: Modifiziertes Kastenfenster

Als Alternative wurde deshalb das in Bild 3 dargestellte modifizierte Kastenfenster bzgl. Energiebilanz untersucht, bestehend aus zwei 2xWDS und einer variablen Sonnen-/Wärm-Wärmeschutzvorrichtung, z. B. in der Form einer innenliegenden Jalousie, die mit niedrigemittierenden Oberflächen zu beiden Seiten und hoher solarer Reflexion nach außen hin versehen ist. Dieses Fenster hat die gleiche Scheibenzahl, jedoch nicht die Nachteile der 4xWDS. Kastenfensterkonstruktionen sind uralt und insbesondere heute in den nordeuropäischen Ländern in unterschiedlicher Ausführung marktgängig [5].

Die Funktionen der So.-/Wä.-Schutzvorrichtung sind wie folgt:

Nachts ist sie geschlossen, wodurch eine wärmedämmte Fünffach-Schalenanordnung mit zwei Luftzwischenräumen in der Mitte entsteht. **Tagsüber** ist sie für Sonneneinstrahlung so lange geöffnet bis Wohnkomfort erreicht ist; das Fenster ist dann eine 4xWDS-Anordnung mit Luftzwischenraum in der Mitte. Bei Überschreitung des Wohnkomforts durch übermäßige Sonneneinstrahlung wird die Vorrichtung (automatisch) geschlossen, sie wirkt dann hoch reflektierend sonnenschützend. Die Belüftungsvorrichtung sorgt dafür, dass sich bei Sonnenschutzfunktion die äußere Wärmedämmscheibe nicht überhitzt. Die Ventile können nachts zur Verhinderung des Luftaustausches geschlossen werden.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Energiebilanzberechnung an diesem Kastenfenster dargestellt, wobei auf der Außenscheibe der inneren 2xWDS das thermische Emissionsvermögen (ϵ_o) variiert wurde (s. Varianten a bis c). Auf der Außenscheibe der äußeren 2xWDS ist

bei allen Varianten eine für Außenanwendungen taugliche niedrigemittierende Schicht mit $\epsilon_a = 0.2$ zur Reduzierung der Reifbeschlaghäufigkeit (s.u.) aufgebracht.

Bilanzberechnung	K.-Fenster (Variante a)	K.-Fenster (Variante b)	K.-Fenster (Variante c)
Bil. _{Nacht} /HP (kWh/m ²)	-15,5	-15,5	-15,5
Bil. _{Bed. Hi.} /HP (kWh/m ²)	5,3	6,8	7,0
Bil. _{Sonne} /HP* (kWh/m ²)	10,3	10,9	10,6
Bil./HP (kWh/m²)	0,1	2,1	2,1

* In diesem Fall für eine solare Einstrahlung $\varnothing Q_{\text{sol,Sonne}} = 66 \text{ W/m}^2$

Tabelle 4: Ergebnisse der Energiebilanzberechnungen der Verglasungen von Bild 3

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Auch mit dem modifizierten Kastenfenster kommt man in den Bereich der Energieneutralität im Sinne der Definition im 1. Abschnitt.
- Eine niedrigemittierende Schicht auf der äußeren Scheibe der inneren 2xWDS bringt nur eine geringfügige Verbesserung der Energiebilanz.

4.3 Vergleich von energieneutralen Fensterglaskonstruktionen

In den Bereich der Energieneutralität im Sinne der Definition im 1. Abschnitt kommen die in Tabelle 5 aufgeführten Verglasungskonstruktionen, wobei das Vakuum-Isolierglas VIG mit einem prospektierten U_g -Wert von $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ schon seit Jahren in der BRD in Entwicklung ist, aber noch nicht industriell produziert werden kann. Seine thermischen Daten sowie sein g_{diff} -Wert wurden mit Hilfe der iplus-E-Schicht der Firma Interpane und sonst gleichen klimatischen Bedingungen wie bei den oben abgehandelten Verglasungen simuliert.

Bilanzberechnung	4xWDS ($\epsilon_a = 0,2$ außen)	K.-Fenster (Variante b)	VIG ($\epsilon_a = 0,2$ außen)
Bil. _{Nacht} /HP (kWh/m ²)	-20,6	-15,5	-26,3
Bil. _{bed. Hi.} /HP (kWh/m ²)	7,1	6,8	10,0
Bil.I/HP (kWh/m²)	-13,5	-8,7	-16,2
Bil. _{Sonne} /HP* (kWh/m ²)	8,5	8,8	11,5
Bil.II/HP (kWh/m²)	-5,0	0,0	-4,7

* In diesem Fall für eine solare Einstrahlung $\varnothing Q_{\text{sol,Sonne}} = 56 \text{ W/m}^2$

Tabelle 5: Ergebnis des Energiebilanzvergleichs an drei Verglasungen, die in den Bereich der Energieneutralität kommen.

Die Berechnungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Betrachtet man Bil.II/HP, so hat das modifizierte Kastenfenster von den drei untersuchten Verglasungen die beste Energiebilanz, obwohl es die niedrigsten solaren Gewinne bei bedecktem Himmel (s. Bil._{bed. Hi.}) und nur niedrige Gewinne bei Sonnenschein (s. Bil._{Sonne}) hat; Ursache hierfür ist der sehr niedrige Wärmeverlust bei Nacht (s. Bil._{Nacht}).
- Im Vergleich dazu hat das VIG den höchsten Verlust bei Nacht (s. Bil._{Nacht}), aber auch die höchsten Gewinne bei bedecktem Himmel (s. Bil._{bed.Hi.}) und Sonnenschein (s. Bil._{Sonne}); Bil.II/HP ist jedoch schlechter.
- Daraus kann geschlossen werden: Bei der Optimierung der Energiebilanz von Verglasungen bzgl. Energieneutralität unter Berücksichtigung insbesondere niedriger solarer Einstrahlung ($Q_{\text{sol}} < 100 \text{ W/m}^2$) kommt der Wärmedämmung eine wichtigere Rolle zu als

der solaren Energiegewinnung.

Betrachtet man Bil./HP, d. h. die Energiebilanz für den kritischsten Fall der Klimabedingungen, d. h. Nacht und bedeckter Himmel am Tage, so ist das modifizierte Kastenfenster mit Abstand überlegen; es kommt selbst bei dieser Bilanzierung der Energieneutralität am nächsten. Zur Erinnerung: 9 kWh entspricht einem Heizwert von ca. 0,9 l Heizöl.

Da Sonnenscheinstunden im mitteleuropäischen gemäßigten Klima schwankend und darüber hinaus gering (s. Tab. 1), d. h. unsicher sind, ist der Autor der Meinung, dass die Energiebilanz gemäß Bil./ZR die korrekteste Beschreibung der Qualität einer Verglasung bzgl. Energieneutralität ist.

5. Außenbeschlagverhalten der untersuchten Verglasungen

Tabelle 6 zeigt die Reifbeschlaguntersuchungen der untersuchten Fensterverglasungen mit unbeschichteter Außenoberfläche ($\epsilon_a = 0,84$) bei *bedecktem* Nachthimmel. t_{Glas_a} bedeutet die Temperatur der Außen- und t_{Glas_i} die der Innenraumscheibe.

Produkt $\beta = 90^\circ$; $\epsilon_a = 0.84$	t_a (°C)	t_{Glas_a} (°C)	t_{Glas_i} (°C)	t_i (°C)	Reifbeschlag?
iplus E (2xWDS)	0	1,0	17,2	20	nein
iplus 3E (3xWDS)	0	0,06	18,6	20	nein
iplus 4E (4xWDS)	0	-0,25	19,0	20	bei rLF > 85%
K.-Fenster (Vari. b)	0	-0,42	19,2	20	bei rLF > 84%
VIG	0	-0,63	19,6	20	bei rLF > 82%

Tabelle 6: Reifbeschlagverhalten der untersuchten Verglasungen bei bedecktem Nachthimmel

Man erkennt, dass bei den drei in den Bereich der Energieneutralität kommenden Verglasungen schon bei bedecktem Nachthimmel Reifbeschlag auf der Außenoberfläche auftreten kann. Ursache hierfür ist die hohe Wärmedämmung dieser Verglasungen, in U_g -Werten ausgedrückt: 0,5 W/m²K für das VIG, 0,4 W/m²K für die 4xWDS und ca. 0,3 W/m²K für das modifizierte Kastenfenster.

Viel gravierender ist wegen der niedrigeren äquivalenten Himmelstemperatur jedoch die Reifbeschlaghäufigkeit bei klarem Nachthimmel, der kritischsten Bedingung für Außenbeschlag. Reifbeschlag auf der Außenoberfläche macht die wesentliche Funktion einer Verglasung - die freie Durchsicht - zunichte. Zur Verhinderung des Reifbeschlags oder zumindest zur Verminderung dessen Häufigkeit sind niedrigemittierende Schichten auf der Verglasungsaußenoberfläche geeignet [6], die optisch möglichst niedrigabsorbierend und -reflektierend sein sollten, vor allen Dingen aber witterungsbeständig sein müssen. Auf dem Markt werden hierfür heute ITO-Schichten angeboten, die ein thermisches Emissionsvermögen von 0,2 haben. Sie wurden bei den Berechnungen der drei energieneutralen Verglasungen im Abschnitt 4.3. zugrunde gelegt.

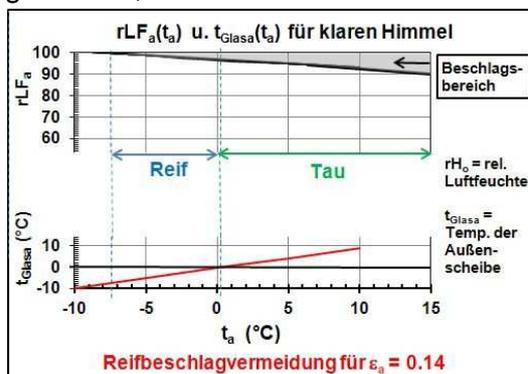


Bild 4: Reifbeschlagverhalten des modifizierten Kastenfensters (Vari. b) mit $\epsilon_a = 0,2$

Bild 4 zeigt das Beschlagverhalten des modifizierten Kastenfensters (Variante b) mit einer solchen Außenschicht bei klarem Nachthimmel. Man erkennt, dass Reifbeschlag mit dieser Schicht nicht ganz vermieden werden kann. Da dieser aber erst bei relativen Außenluftfeuchten $rLF_a > 95\%$ möglich ist, die bei tiefen Temperaturen bekanntlich nur sehr selten auftreten, ist die zu erwartende Reifbeschlaghäufigkeit sehr gering. Vermieden werden könnte Reifbeschlag mit einer Schicht, deren $\epsilon_a = 0.14$ ist, die jedoch in witterungsbeständiger Ausführung noch zu entwickeln [s. 7] ist.

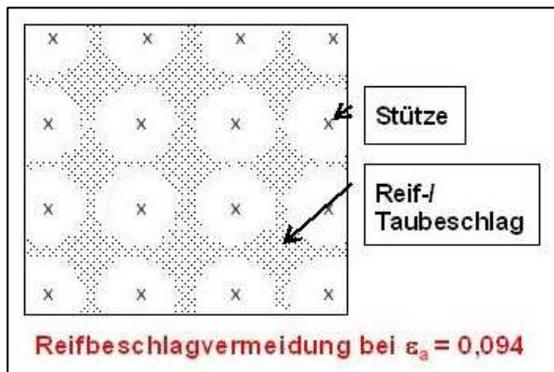


Bild 5: Mögliches Beschlagbild bei VIG

Interessant ist das Beschlagverhalten des VIG. Bild 5 zeigt ein mögliches Außenbeschlagbild einer solchen Verglasung. Seine Ursache ist die Ungleichmäßigkeit des Wärmeleitwerts über die Fläche infolge der wärmebrückenbildenden Stützen. Der lokale U_g -Wert an den Stützen beträgt ca. $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ und dazwischen in der Mitte ca. $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Zur Reifbeschlagvermeidung müsste die Außenschicht bei dieser Verglasung ein thermisches Emissionsvermögen von $\epsilon_a = 0,094$ haben. Die oben aufgeführten Anforderungen an eine solche Schicht machen deren Realisierung aber nach

den bisherigen Erfahrungen noch erheblich schwieriger.

6. Vergleichende Untersuchung bei bedecktem und klarem Himmel

Mit dem entwickelten MS Excel-Programm können auch die Energiebilanzunterschiede bei bedecktem und klarem Himmel und somit die Grenzen der Energieverluste bzw. -gewinne bei Vorgabe der durchschnittlichen Außenraumklimas in einem Ermittlungszeitraum ermittelt werden.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse einer solchen Berechnung für das modifizierte Kastenfenster (Variante b) für die Heizperiode dargestellt, wobei für das durchschnittliche Außenraumklima in dieser Periode als Beispiel die klimatischen Daten von Tab. 1 mit Ausnahme für $\overline{Q}_{\text{sol,Sonne}} = 56 \text{ W/m}^2$ angenommen wurden. Beim Bilanzwert für die Sonnenstunden $\text{Bil.}_{\text{Sonne}}/\text{HP}$ wurde im Falle von klarem Himmel mit dem g -Wert für senkrechten Strahleneinfall gemäß DIN EN 410 gerechnet, im Falle von bedecktem Himmel weiterhin mit g_{diff} . Die Bilanzwerte für die Tagstunden mit bedecktem Himmel $\text{Bil.}_{\text{Bed.Hi.}}/\text{HP}$ sind in beiden Fällen gleich anzusetzen.

Bilanzberechnung	Klarer Himmel	Bedeckter Himmel
$\text{Bil.}_{\text{Nacht}}/\text{HP} \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	-16,7	-15,5
$\text{Bil.}_{\text{Bed. Hi.}}/\text{HP} \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	6,8	6,8
$\text{Bil.}_{\text{Sonne}}/\text{HP}^* \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	10,6	8,8
$\text{Bil.}/\text{HP} \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	0,6	0,0

* In diesem Fall für eine solare Einstrahlung $\overline{Q}_{\text{sol,Sonne}} = 56 \text{ W/m}^2$

Tabelle 7: Ergebnis des Energiebilanzvergleichs an dem modifizierten Kastenfensterverglasung (Variante b)

Man erkennt, dass der Unterschied der Gesamtenergiebilanz $\text{Bil.}/\text{HP}$ zwischen bedecktem und klarem Himmel sehr gering ist. Die Ursache ist, dass mit ansteigender Wärmedämmung der Wärmeverlustunterschied bei Nacht zwischen bedecktem und klarem Himmel sich stetig verringert. Die sehr hohe Wärmedämmung des modifizierten Kastenfensters (U_g -Wert ca. $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ nachts) erklärt deshalb den geringen Unterschied der Gesamtenergiebilanz. Im Falle von klarem Himmel wird der höherer Wärmeverlust bei Nacht durch eine höheren Wärmegewinne bei Sonnenschein nahezu ausgeglichen.

7. Schlussfolgerungen

Von den drei untersuchten, der Energieneutralität im Sinne der Definition im 1. Abschnitt am nächsten kommenden Verglasungen – die 4xWDS, das modifizierte Kastenfenster und das in der BRD projektierte Vakuum-Isolierglas (VIG) –, alle drei zur Verminderung der Reifbe-

schlaghäufigkeit mit niedrigemittierender Schicht auf der Außenoberfläche ausgerüstet, hat sich das modifizierte Kastenfenster den beiden anderen überlegen erwiesen.

Alle drei Verglasungen haben einen hohen Sonnenkollektor-Effekt und müssen deshalb zur Begrenzung des Treibhauseffektes mit einer Sonnenschutzvorrichtung kombiniert werden, die bei dem modifizierten Kastenfenster als variabler Sonnen-/Wärmeschutz schon integriert ist. Das Kastenfenster hat darüber hinaus noch folgende wesentlichen Vorteile:

- Der variable Sonnen-/Wärmeschutz ist unwettersicher angebracht und vor allen Dingen zugänglich.
- Nur begrenzte Aufheizung der Verglasung bei Sonneneinstrahlung infolge der Belüftung zwischen den beiden 2xWDS
- Die Anpassung des Fensterrahmen-U-Wertes (U_f) an die Wärmedämmung der Verglasung (U_g) ist Stand der Technik.
Anmerkung: Ist bei 4-fach-Wärmedämmscheiben und auch VIG sehr problematisch!
- Schnelles Abtauen im Falle von Außenbeschlag am Morgen bei offenem variablem So./Wä.-Schutz, da die Wärmedämmung dann wegen der 4-fach-Scheibenanordnung reduziert ist.
- Vereinfachte Montage, da das Gewicht des Fensters aufteilbar ist.
- Alle Bauelemente des Fensters sind Stand der Technik

Danksagung

Der Autor dankt Firma Interpane E&B, Lauenförde, für die Überlassung der technischen Daten zu ihren Wärmedämmscheiben ‚iplus‘ und die Unterstützung bei der Abfassung des Berichtes.

Literaturverzeichnis

- [1] H. J. Gläser, K. Häuser, Das thermische Verhalten von Fensterverglasungen in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung, www.hvg-dgg.de/download/tagung.html
- [2] DIN EN 673, Glas im Bauwesen, Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), Juni 2003
- [3] DIN EN 410, Glas im Bauwesen, Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, Dezember 1998
- [4] W. Feist, Thermische Gebäudesimulation, Verlag C:F Müller, 1994, s. Seite 291, Tab. 9-3, Kondratyev
- [5] I. Heinmonen, K. Hemmilä, Experiences of triple pane IG-units during 40 years of use in Nordic Countries, GLASS PERFORMANCE DAYS 2011, www.gpd.fi, S. 557 – 560
- [6] H. J. Gläser, B. Szyszka, Condensation on the outside surface of window glazing – what are the key parameters and how to avoid with Low-E coatings? GLASS PERFORMANCE DAYS 2011, www.gpd.fi, S.212 – 217
- [7] Abschlussbericht zu EnOB Verbundprojekt ‘FirstGlass’: Multifunktionelle Position 1 Beschichtung, Oktober 2010, gefördert vom BMWi mit der Fördernummer 0329800G