

HVG-Mitteilung Nr. 2016

Niedrigemittierende Schichten auf der Außenoberfläche von Wärmeschutzgläsern
- eine Herausforderung für die Flachglasindustrie

Hans Joachim Gläser

Deutsche Übersetzung einer Veröffentlichung in Glass Science and Technology 1/2002

1. Einleitung

Niedrigemittierende Schichten, auf Oberflächen zu Zwischenräumen von Mehrscheiben-Isoliergläsern (s. Bild 1) angeordnet, gehören heute zum Stand der Technik bei Wärmeschutz- und Sonnenschutzgläsern. Sie unterdrücken den Strahlungsaustausch mit den Gegenscheiben, so dass sich mit ihnen z. B. bei einem Zweifach-Isolierglas die Wärmedämmung um etwa einen Faktor 2, bei einem Dreifach-Isolierglas um etwa einen Faktor 4 verbessert; d. h., der Wärmeverlust durch die Verglasungen, in der Bauphysik als U-Wert ausgedrückt, reduziert sich in gleichem Maße.

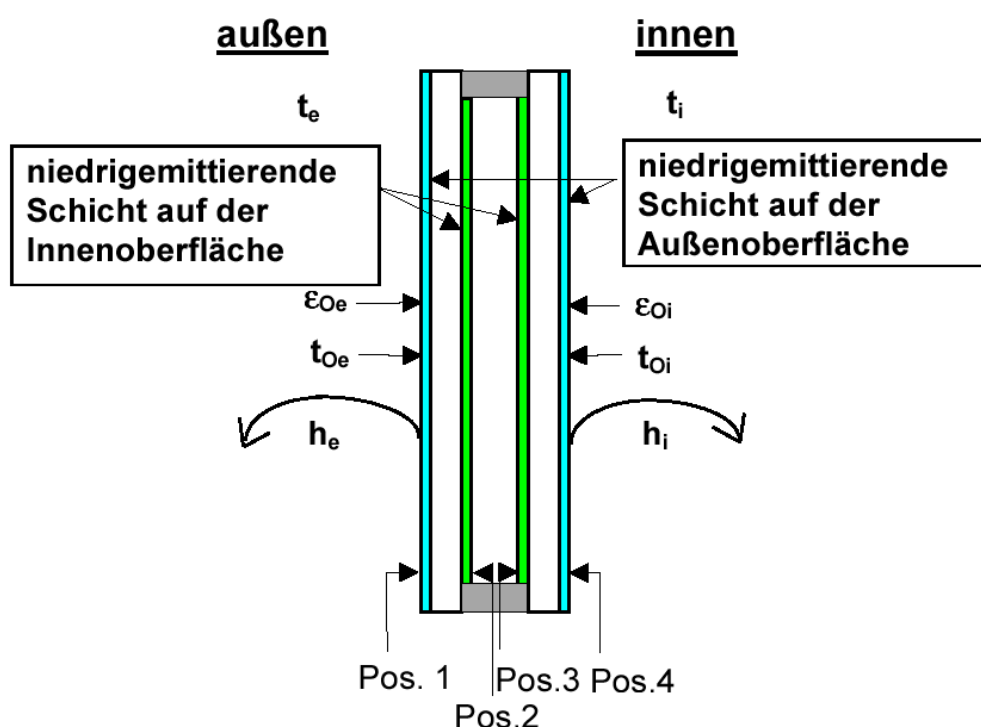


Bild 1: Doppelisolierverglasung mit den möglichen Positionen für niedrigemittierende Schichten
Pos.1 und 4: niedrigemittierende Schichten
Pos. 2: Sonnenschutzschichten mit Emissivitäten $\epsilon < 0,10$ und solarer Transmission an die Gebäudeklimatisierung angepasst.
Pos. 3: Wärmeisolierschicht mit Emissivität $\epsilon < 0,10$ und hoher solarer Transmission.

Durchgesetzt haben sich weltweit Schichtsysteme auf der Basis von Silber, von denen heute mit rasant steigender Tendenz mehrere 100 Millionen m^2/a mit PVD-Anlagen beschichtet werden [1]. Sie werden als die wirksamste Maßnahme zur Heizenergieeinsparung im Fenster angesehen. Die Frage stellt sich, ob weitere Verbesserungen durch niedrigemittierende Schichten auf den Außenoberflächen von Verglasungen zu erzielen sind (s. ebenfalls Bild 1).

2. Niedrigemittierende Schichten auf der Oberfläche zum Innenraum

Eine solche Schicht ist, soweit ich informiert bin, in den 60er Jahren erstmalig diskutiert worden. Damals wurde bei der DETAG, einer Vorgängerin von Pilkington Deutschland, erwogen, ob eine Einscheiben-Verglasung mit einer niedrigemittierenden Schicht auf der Innenoberfläche eine Alternative zu den damals in der Markteinführung begriffenen Zweifach-Isoliergläsern, „Cudo“ und „Thermopane“, wäre. Eine solche Schicht könnte wegen der Reduzierung des Strahlungsaustausches den Wärmeübergang vom Innenraum zur Glasoberfläche (siehe h_i in Bild 1) und somit den U-Wert der Verglasung verringern, so dass dieser nahezu mit dem von konventionellem Zweifach-Isolierglas vergleichbar wäre. Man hat aber damals recht bald bemerkt, dass diese Lösung einen Haken hat. Die Entwicklung wurde nicht weiterverfolgt. Dennoch ist in der Folgezeit in den DIN EN 410, 673, 674 und 675 [2] eine Formel für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_i bei unterschiedlichen Emissionsvermögen der Glasoberfläche zum Innenraum ε_{oi} festgeschrieben worden.

In Spalte 2 der Tabelle 1 ist die Verbesserung des U-Wertes gemäß DIN EN 674 durch eine niedrigemittierende Schicht mit dem Emissionsvermögen $\varepsilon_{oi} = 0,17$ auf der Glasoberfläche zum Innenraum gegenüber einer unbeschichteten Glasoberfläche ($\varepsilon_{oi} = 0,84$) bei unterschiedlichen Fensterverglasungen dargestellt.

1 Verglasungsart	2 U-Wert (W/m ² K) entsprechend DIN EN 410			3 t_{oi}^* (°C)		4 Luftfeuchte (in %) des Innenraums bei der sich bei $t_i=20^\circ\text{C}$ Taubeschlag an der Innenoberfläche bildet	
	$\varepsilon_{oi} =$ 0,84	$\varepsilon_{oi} =$ 0,17	Verbes- serung (%)	$\varepsilon_{oi} =$ 0,84	$\varepsilon_{oi} =$ 0,17	$\varepsilon_{oi} =$ 0,84	$\varepsilon_{oi} =$ 0,17
Einfachverglasung	5,8	3,7	36	-1,8	-5,3	~20	< 20
Konventionelles Isolierglas	3,0	2,3	23	+8,7	+4,1	48	35
Zweifach-Wärme- isoliergläser	1,1	1,0	9	+15,9	+13,2	77	65
Dreifach-Wärme- isoliergläser	0,7	0,66	5,7	+17,4	+15,5	85	76

* bei $t_i = 20^\circ\text{C}$ und $t_e = -10^\circ\text{C}$

Tabelle 1: Einfluss niedrigemittierender Schichten auf der Innenraumseite der Verglasung.

Man erkennt, dass die größte U-Wert-Verbesserung von etwa 36 % bei der Einscheiben-Verglasung zu erzielen ist. Mit fallendem U-Wert der Ausgangsscheibe sinkt jedoch der Prozentsatz der Verbesserung stetig, so dass er bei den heutigen Zweifach-Wärmeschutzgläsern nur noch ca. 9 % und bei einem modernen Dreifach-Wärmeschutzglas nur noch ca. 5,7 % beträgt.

Das niedrige Emissionsvermögen ist auch die Ursache dafür, dass die Temperatur der Glasoberfläche zum Innenraum t_{oi} *abgesenkt* wird (s. Spalte 3). Das hat zur Folge, dass das Taubeschlagrisiko auf dieser Glasoberfläche erhöht wird (s. Spalte 4). Bei einer Einscheiben-Verglasung verringert sich so bei einer Außentemperatur t_e von -10°C und einer Raumtemperatur t_i von 20°C die relative Luftfeuchtigkeit des Innenraums, bei der Taubeschlag auf der Scheibeninnenoberfläche auftritt, auf unter 20 %. (Eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % ist gemäß DIN aus Komfortgründen erforderlich.) Nach einer Faustregel tritt Taubeschlag mit solch einer niedrigemittierenden Schicht auf der Innenoberfläche auf, wenn die Außentemperatur unter $+5^\circ\text{C}$ fällt. Das heißt, die DETAG hat in den 60er Jahren recht bald den Haken einer solchen Schicht bemerkt: Die durch die niedrigemittierende Schicht erzielte U-Wert-Verbesserung ist mit einem wesentlich erhöhtem

Taubeschlagrisiko auf der Scheibeninnenoberfläche verbunden. Taubeschlag hebt jedoch die U-Wert-Verbesserung wieder auf, da Wasserschichten ein Emissionsvermögen ε von ca. 1 haben. Nach diesen Erfahrungen ist es unverständlich, dass neuerdings in USA für den Sunbelt eine Einscheiben-Verglasungen mit niedrigemittierender Sonnenschutzschicht auf der Innenoberfläche (Pos. 2), deren Emissionsvermögen $\varepsilon_{O_i} = 0,17$ beträgt, zur Heizenergieeinsparung angeboten wird [3].

Tabelle 1 zeigt aber auch, dass bei den Wärmeschutzgläsern die Erhöhung des Taubeschlagrisikos weniger ins Gewicht fällt; die U-Wertverbesserung ist aber hier auch geringer. Ich bin deshalb der Meinung, dass niedrigemittierende Schichten auf der Oberfläche zum Innenraum bei Wärmeschutzgläsern wirtschaftlich nicht sinnvoll sind. Niedrigemittierende Schichten werden jedoch seit langem mit Erfolg auf Innenoberflächen von Brandschutzverglasungen und Verglasungen in Heißräumen eingesetzt. Hier machen sie auch Sinn, denn Taubeschlag kann bei dieser Anwendung die Funktion der Schicht nicht aufheben, und die Abstrahlung von Hitze von Scheibenoberflächen kann im Verhältnis des Emissionsvermögens ε_{O_i} der Schicht zur unbeschichteten Scheibe, z. B. um 0,17:0,84 reduziert werden.

3. Niedrigemittierende Schichten auf der Oberfläche zum Außenraum

Niedrigemittierende Schichten auf der Außenoberfläche einer Einscheiben-Verglasung, d. h. auf Position 1, wurden vor einigen Jahren erstmals bei Gewächshäusern eingesetzt. Gemäß des Prospektes des Herstellers wurde mit dieser Verglasung eine Heizenergieeinsparung von 25 % bei Gewächshäusern im Norden Europas erreicht [4].

Niedrigemittierende Schichten auf Position 1 von Verglasungen reduzieren den Strahlungsaustausch mit dem Himmel und der Umgebung; sie verringern den Wärmeübergang von der Oberfläche zum Außenraum und *erhöhen* somit die Außenoberflächentemperatur t_{O_e} der Verglasung. Dies hat ebenso Auswirkungen sowohl auf das Taubeschlagrisiko der Außenoberfläche als auch auf den Wärmeverlust durch die Verglasung [5]. Ohne niedrigemittierende Außenschicht steigt bekanntlich bei Wärmeschutzgläsern das Taubeschlagrisiko mit fallendem U-Wert an, weil die Außenoberflächentemperaturen t_{O_a} sinken. Dieser Mangel ist für Wärmeschutzverglasungen typisch und wird beklagt.

Im Bild 2 sind die gemessenen Temperaturen t_{O_e} einer Wärmeschutzscheibe mit $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gemäß DIN), eingesetzt in einem Dachfenster mit ca. 30° Neigung, mit einer niedrigemittierenden Schicht auf der Außenoberfläche ($\varepsilon_{O_e} = 0,17$, K-Glass) bzw. einer unbeschichteten Außenoberfläche ($\varepsilon_{O_e} = 0,84$) wiedergegeben.

Bedeckter und klarer Himmel bilden in Abhängigkeit von der Außentemperatur t_e den oberen bzw. unteren Grenzfall für die Außenoberflächentemperaturen t_{O_e} , dargestellt durch die t_{O_e} -Geraden, die sich mit Hilfe der Temperatur des klaren Himmels $t_{cs} = t_e - 15^\circ\text{C}$ bzw. des bedeckten Himmels $t_{cs} = t_e - 5^\circ\text{C}$ berechnen lassen. Der gemessene t_{O_e} -Bereich für die Verglasung mit unbeschichteter Außenoberfläche ($\varepsilon_{O_e} = 0,84$) geht bei niedrigemittierender Außenschicht ($\varepsilon_{O_e} = 0,17$) in den t_{O_e} -Bereich über, der erheblich schmaler und zu höheren Temperaturen t_{O_e} verschoben ist. Bei *bedecktem* Himmel ist wegen der geringen Temperaturdifferenz zu den Wolken der Strahlungsaustausch a priori gering, so dass in diesem Fall mit der niedrigemittierenden Außenschicht gegenüber der unbeschichteten Außenoberfläche nur eine Temperaturerhöhung Δt_{O_e} in Abhängigkeit von der Außentemperatur von 0,5 bis $3,1^\circ\text{C}$ zu messen ist (Bild 2, dunkler senkrechter Pfeil). Bei *klarem* Himmel beträgt die Temperaturerhöhung Δt_{O_e} in Abhängigkeit von der Außentemperatur mit der niedrigemittierenden Außenoberflächen jedoch 5 bis $8,2^\circ\text{C}$ (Bild 2, heller senkrechter Pfeil). Ursache hierfür ist der wesentlich geringere Strahlungsaustausch mit dem klaren Himmel, wenn die Außenoberfläche niedrigemittierend ist. Würde das Emissionsvermögen ε_{O_e} der Außenoberfläche 0 betragen, so würde der t_{O_e} -Bereich zu einer Geraden schrumpfen und zu höchstmöglichen Temperaturen t_{O_e} verschoben sein (s. Bild 2). Der Strahlungsaustausch hat im Vergleich zur Konvektion den mit Abstand größten Einfluss auf den Wärmetransport von der Verglasung zum Außenraum [1].

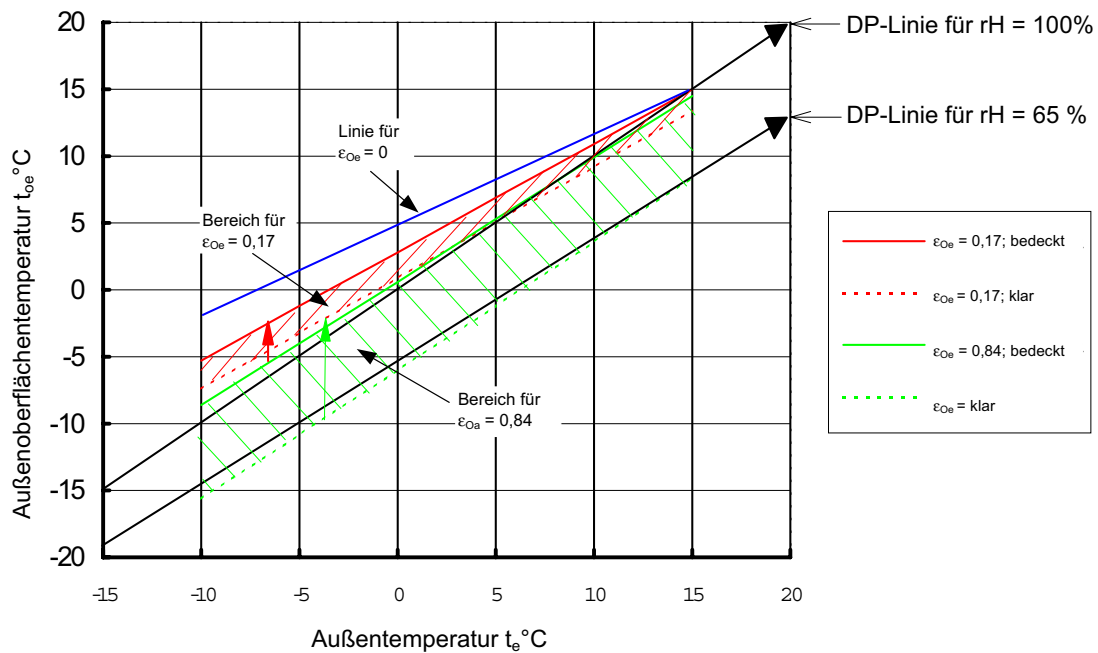


Bild 2: Einfluss der Emissivität der Außenoberfläche eines Wärmeschutzglases mit $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ eines Dachfensters mit 30° Neigung.

Zu Taubeschlag kommt es, wenn die Außenoberflächentemperatur t_{Oe} unter die Taupunkttemperatur fällt. Die Taupunkttemperaturen für eine vorgegebene relative Luftfeuchtigkeit ergeben in Abhängigkeit von der Außentemperatur t_e Geraden, die sogenannten Taupunktgeraden (DP-Geraden). In Bild 2 ist zu erkennen, dass es im Fall der Dachfensterverglasung ohne niedrigemittierende Schicht zu Taubeschlag kommt, wenn die relative Luftfeuchtigkeit bei klarem Himmel über 65 % ansteigt; bei bedecktem Himmel kommt es hierzu nur bei Außentemperaturen t_e über $+5^\circ\text{C}$ und relativen Luftfeuchtigkeiten um 100 %. Auf einer Außenschicht, deren Emissionsvermögen $\epsilon_{Oe} = 0,17$ beträgt, kann es nur noch bei klarem Himmel, Außentemperaturen t_e über $+5^\circ\text{C}$ und relativen Luftfeuchtigkeiten um 100 % kommen. Auf Außenschichten mit $\epsilon_{Oe} = 0,1$ kann nur noch Taubeschlag bei Außentemperaturen t_e über 15°C stattfinden, d. h., Taubeschlag kann dann praktisch nicht mehr auftreten. Eine weitere Absenkung des Emissionsvermögens brächte nur noch eine marginale Verbesserung [5].

Die durch die niedrigemittierende Schicht bewirkte Erhöhung der Außenoberflächentemperaturen t_{Oe} hat auch Einfluss auf die Wärmeverluste durch die Verglasung, die durch den Wärmefluss vom Innenraum zur Außenoberfläche der Verglasung beschrieben werden, dargestellt durch den k_{real} -Wert [6]. In Tabelle 2 sind die k_{real} -Werte für ein Wärmeschutzglas mit $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gemäß DIN) in Abhängigkeit vom Emissionsvermögen ϵ_{Oe} , dem Bedeckungsgrad des Himmels, der Außentemperatur t_e und der Einbaulage, d. h. der Neigung der Verglasung wiedergegeben.

Man erkennt in dieser Tabelle folgendes:

- In allen Fällen steigen die k_{real} -Werte mit steigender Außentemperatur t_e an. Der Grund hierfür ist, dass die Temperaturdifferenz zwischen Scheibenaußenoberfläche und Himmel, verantwortlich für den Strahlungsaustausch, mit der Außentemperatur ansteigt. Die Toleranzen der k_{real} -Werte steigen aus gleichem Grund mit der Außentemperatur (s. die Spalten 3 und 5).
- Für die gleiche Außentemperatur und gleiche Einbaulage (Neigung) der Scheiben sind die k_{real} -Werte für klaren Himmel höher als für bedeckten Himmel (vergleiche die Spalten 3 und 4 mit 5 und 6). Bei klarem Himmel sind die k_{real} -Werte bei unbeschichteter Außenoberflä-

che ($\epsilon_{Oe} = 0,84$) erheblich höher als bei niedrigemittierender Außenoberfläche ($\epsilon_{Oe} = 0,17$) (vergleiche die Spalten 3 und 5). Bei *bedecktem Himmel* sind die Unterschiede der k_{real} -Werte nur noch unbedeutend (vergleiche die Spalten 4 und 6). In allen diesen Fällen ist der Grund für die kleineren k_{real} -Werte die geringere Wärmeabstrahlung von der Außenoberfläche der Verglasung entweder durch eine niedrigemittierende Schicht und/oder durch den bedeckten Himmel. Anzumerken ist: Die gültige DIN-Norm für die Berechnung des U-Wertes einer Verglasung berücksichtigt den unterschiedlichen Strahlungsaustausch bei klarem bzw. bedecktem Himmel nicht.

- Die k_{real} -Werte steigen bei klarem Himmel von vertikaler zu horizontaler Einbaulage der Verglasung an. Der Grund hierfür ist, dass der Himmelsausschnitt, den die Verglasung sieht, von vertikaler zu horizontaler Einbaulage zunimmt. Jedoch sind bei niedrigemittierender Außenoberfläche die Anstiege erheblich geringer als bei unbeschichteter Außenoberfläche (vergleiche die Spalten 3 und 5). Bei *bedecktem Himmel* sind die k_{real} -Werte nahezu unabhängig von der Einbaulage und dem Emissionsvermögen der Außenoberfläche (s. die Spalten 4 und 6). Auch hier ist anzumerken: Die gültige DIN-Norm für die U-Wert Berechnung berücksichtigt nur die vertikale Einbaulage von Verglasungen.
- Nur bei unbeschichteter Außenoberfläche und bedecktem Himmel sind die Wärmeverluste vergleichbar mit dem gemäß DIN EN 674 berechneten U-Wert von $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (s. Spalte 4). Der Grund hierfür ist, dass eine der Voraussetzungen dieser DIN-Norm bedeckter Himmel ist. In Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Einbaulage der Verglasung können deshalb die k_{real} -Werte, d. h. die wirklichen Wärmeverluste durch die Verglasung, bei unbeschichteter Außenoberfläche bis nahezu einen Faktor 2 höher sein als mit der gültigen DIN-Norm berechnet.

Es ist deshalb festzustellen, dass eine Wärmeschutzverglasung mit niedrigemittierender Schicht zum Außenraum folgende Vorteile hat:

- Taubeschlag auf der Außenoberfläche der Verglasung kann quasi nicht mehr auftreten,
- die Wärmeverluste durch die Verglasung werden in hohem Maße von der Einbaulage und der Außentemperatur unabhängig werden,
- bei klarem Himmel werden die Wärmeverluste erheblich abgesenkt, bei bedecktem Himmel jedoch nur ein wenig und
- Schichten mit einem Emissionsvermögen $\epsilon_{Oe} = 0,1$ wären optimal.

1	2	3	4	5	6
t_e (°C)	Neigung der Verglasung	unbehandelte Außenoberfläche ($\epsilon_{Oe} = 0,84$)		Außenoberfläche mit low-E-Beschichtung ($\epsilon_{Oe} = 0,17$)	
		k_{real} (W/m ² K)		k_{real} (W/m ² K)	
		klarer Himmel	bedeckter Himmel	klarer Himmel	bedeckter Himmel
-10	vertikal	1,16 +0,04	1,06	0,97+ 0,01	0,98
-10	45°	1,22 +0,05	1,06	0,99+ 0,01	0,98
-10	horizontal	1,28 +0,06	1,06	1,01 + 0,01	0,98
0	vertikal	1,27 ±0,06	1,08	1,02 ± 0,04	0,99
0	45°	1,36 ±0,08	1,08	1,05 ± 0,04	0,99
0	horizontal	1,46 ±0,11	1,08	1,08 ± 0,04	0,99
+10	vertikal	1,58 ±0,11	1,16	1,14 ± 0,05	1,02
+10	45°	1,78 ±0,18	1,16	1,21 ± 0,07	1,02
+10	horizontal	2,01 ±0,24	1,16	1,29 ± 0,09	1,02

Tabelle2: Wärmeverlust durch ein Wärmeisoliervglas mit $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gemäß DIN) mit unbehauelter ($\epsilon_{Oe} = 0,84$) bzw. niedrigemittierender ($\epsilon_{Oe} = 0,17$) Außenoberfläche

Es ist festzustellen, dass mit der gültigen DIN-Norm die wirklichen Wärmeverluste von Gebäuden nicht korrekt beschrieben werden. Ebenso dürfte gemäß dieser DIN-Norm der oft beklagte Taubeschlag auf der Außenoberfläche von Wärmeschutzverglasungen nicht auftreten. Dass er dennoch zu beobachten ist, beweist, dass bei der U-Wert-Berechnung mit der gültigen DIN-Norm die Außenraumbedingungen nicht richtig berücksichtigt werden.

Es bleibt zu klären, wie einerseits Regen und witterungsbedingter Schmutzbelag die Eigenschaften der niedrigemittierenden Schichten auf Außenoberflächen beeinflussen. Zu unterscheiden ist hier zwischen witterungsbedingten Belägen auf der Schicht und der Alterungsbeständigkeit der Schichten bei Außenwitterung.

4. Das spektrale Verhalten von niedrigemittierenden Schichten mit witterungsbedingten Belägen

Hier muss unterschieden werden zwischen Wasserfilmen, die von Taubeschlag oder Regen herühren, oder von Schmutz, der von der Erdoberfläche durch Wind und/oder Regen abgelagert wird.

4.1 Der Einfluss von Wasserfilmen

Ein Wassermolekül besitzt einen elektrischen Dipol, weshalb Wasser elektromagnetische Strahlen im Infrarotbereich, d. h. im Bereich von Wärmestrahlen absorbiert. Bedecken Wasserfilme niedrigemittierende Schichten, so wird deren Emissionsvermögen mit steigender Schichtdicke des Wasserfilms kontinuierlich zu dem des Wasserfilms verschoben, so dass es schließlich nahezu 1 beträgt. Nach Abtrocknen des Wasserfilms wird jedoch das ursprüngliche Emissionsvermögen der Schicht wieder sichtbar. Wasserfilme camouflieren somit das niedrige Emissionsvermögen von Schichten.

Es wurde oben dargestellt, dass Taubeschlag praktisch nicht mehr auftreten kann, wenn das Emissionsvermögen ε_{Oe} auf der Außenoberfläche von Wärmeschutzgläsern hinreichend niedrig ist. Deshalb können Wasserfilme durch Taubeschlag außer Acht gelassen werden. Bei Benetzung der Schichtoberfläche durch Regen steigt das Emissionsvermögen ε_{Oe} auch auf nahezu 1 an. In diesem Fall ist der Himmel aber auch bedeckt, so dass die Wärmeverluste in etwa denen der außen unbehandelten Verglasung entsprechen. Die k_{real} -Werte von Spalte 6 in Tabelle 2 sind in diesem Fall durch die in Spalte 4 zu ersetzen, d. h. sie sind bei Benetzung infolge Regen nur unwesentlich höher. Wasserfilme infolge Regen beeinträchtigen die Funktion von Wärmeschutzgläsern mit niedrigemittierender Schicht zum Außenraum quasi nicht. Nach dem Abtrocknen hat die Außenoberfläche wieder das ursprüngliche Emissionsvermögen, so dass die Wärmeverluste wieder die alten sind (s. Spalte 6).

4.2 Der Einfluss von Schmutzbelägen

Das spektrale Verhalten von witterungsbedingten Schmutzbelägen wurde intensiv untersucht. Hier ist zu unterscheiden zwischen dem Verhalten dieser Schichten einerseits im solaren Bereich und andererseits im fernen Infrarotbereich, d. h. im Bereich der Wärmestrahlung, der das Emissionsvermögen von Oberflächen bestimmt.

Im solaren Bereich beeinflussen witterungsbedingte Schmutzbeläge das spektrale Verhalten erheblich. Man denke nur an Pkw-Windschutzscheiben, bei denen die diffuse Transmission und Reflexion im sichtbaren Bereich durch Schmutzschichten erheblich zunimmt. Für die Anwendung der niedrigemittierenden Schichten auf der Außenoberfläche von Wärmeschutzgläsern ist die Abnahme der totalen Transmission (ΔT_{tot}) im Bereich der Solarstrahlung von Interesse. Im Bild 3 sind die spektralen totalen solare Transmissionen im sichtbaren Bereich einer Scheibe mit niedrigemittierender Schicht (wiederum K-Glass), die 2 Jahre mit einer Neigung von 30 °C außengelagert wurde, und einem sauberen Rückstellmuster des gleichen Glases dargestellt.

Es zeigt sich, dass der Abfall ΔT_{tot} infolge witterungsbedingter Schmutzablagerung vom UV-Gebiet zum Infraroten abnimmt, deren Ursache Absorption ist [5]. Bei einer Wellenlänge $\lambda = 400$ nm beträgt ΔT_{tot} 7,7%, bei $\lambda = 500$ nm beträgt er 7,4%, bei 600 nm beträgt er 5,8 %, bei $\lambda = 700$ nm beträgt er 3,5% und bei 850 nm ist er nur noch 2,7 %.

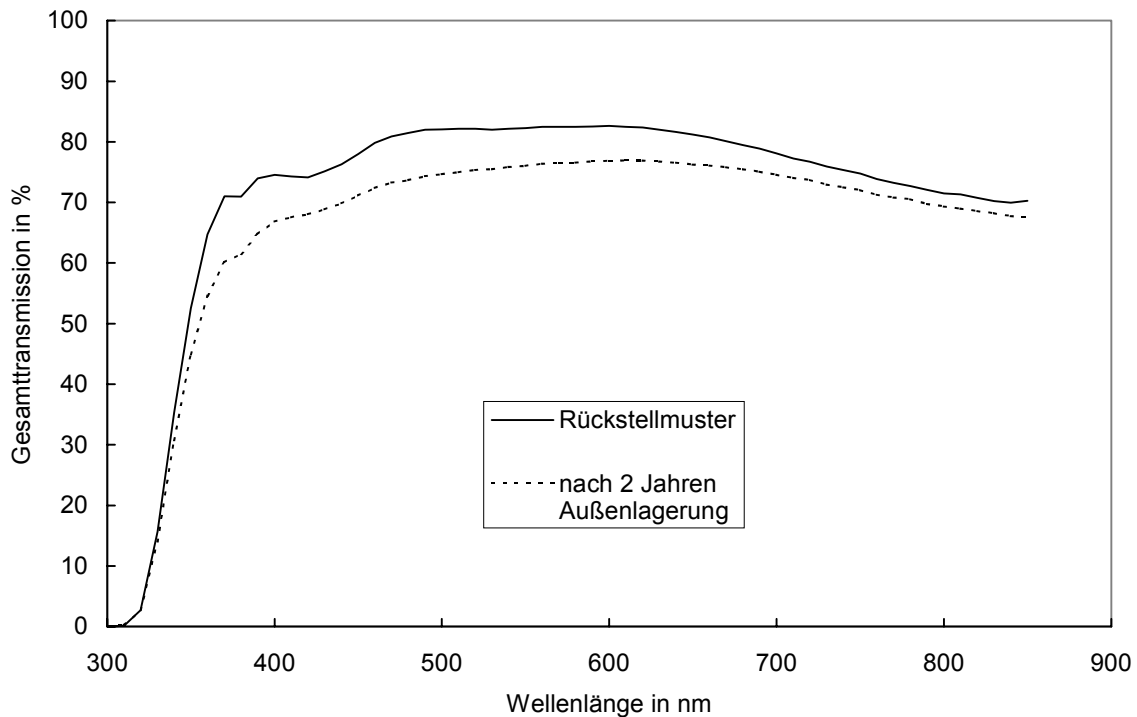


Bild 3: Gesamttransmission im sichtbaren Bereich mit und ohne Außenlagerung gemessen mit einem Spektrometer (Lambda 19 von Perkin-Elmer).

Der Einfluss von witterungsbedingten Schmutzablagerungen auf der untersuchten niedrigemittierenden K-Glass-Schicht auf das Emissionsvermögen, d. h. das spektrale Verhalten im fernen Infrarotbereich, ist in Tabelle 3 dargestellt.

Die Tabelle zeigt, dass nach der Reinigung der außengelagerten K-Glas-Schicht der Unterschied des Emissionsvermögens ($\Delta \epsilon$) absolut nur 0,01 beträgt. (Die ursprüngliche K-Glas-Schicht hat ein Emissionsvermögen $\epsilon = 0,17 \pm 0,01$.) Es ist deshalb festzustellen, dass im Gegensatz zu den Wasserfilmen ein witterungsbedingter Schmutzbelag durch 2-jähriger Außenlagerung auf niedrigemittierenden Schichten deren Emissionsvermögen nur unerheblich erhöht. D. h., der geringe Einfluss der Schmutzschicht auf die spektrale Transmission im nahen Infrarotbereich (s. Bild 3) setzt sich zum fernen Infrarot fort, oder mit anderen Worten ausgedrückt: Witterungsbedingte Schmutzablagerungen sind im Bereich der Wärmestrahlen in hohem Maße transparent.

Deshalb kann aus den spektralen Messungen vom UV- bis zum fernen Infrarotbereich geschlossen werden: Witterungsbedingte Schmutzablagerungen auf Oberflächen beeinträchtigen die solare Transmission wesentlich mehr als das Emissionsvermögen. Dieses Ergebnis ist überraschend und zukünftig von großem Interesse für die Bau- und Fahrzeugindustrie, wenn es um die Verbesserung der Wärmeisolation von Produkten geht.

Probe	Emissivität (ϵ)		
	Originaloberfläche	bewittert	bewittert und gereinigt
K-Glas	-	0,171 ¹⁾	0,161
Aluminiumblech	0,033	0,041 ²⁾	0,033
verzinktes Eisenblech	0,064	0,274 ²⁾	0,268
verzinnertes Kupferblech	0,026	0,552 ²⁾	0,546

1) 2 Jahre Außenlagerung 2) 1 Jahr Außenlagerung

Tabelle 3: Einfluss der Außenlagerung auf die Emissivität verschiedener niedrigemittierender Oberflächen. Die Messungen wurden mit einem Emissiometer Inglas TIR 100 durchgeführt.

5. Die Alterungsbeständigkeit von niedrigemittierenden Schichten gegenüber Außenbewitterung

In Tabelle 3 ist auch ersichtlich, dass die niedrigemittierende Schicht des untersuchten K-Glas gegenüber Angriff aus der Umwelt beständig ist. Die Schicht dieser Verglasung besteht aus einem hochleitfähigen SnO₂-Zweifachschichtsystem. In dieser Tabelle ist weiterhin das Alterungsverhalten bei Außenbewitterung weiterer niedrigemittierender Oberflächen festgehalten, die als Fassadenbaustoffe ebenfalls gebräuchlich sind. Während das Aluminiumblech das gleiche Verhalten des Emissionsvermögens bei Außenbewitterung zeigt wie die K-Glass-Schicht, verhalten sich das verzinkte Eisenblech und das verzinnerte Kupferblech unterschiedlich. Die SnO₂-Schicht des K-Glases und das Aluminiumblech sind gegenüber Außenbewitterung chemisch beständig, was jedoch nicht für die beiden anderen Bleche gilt. Die Messung des Emissionsvermögens nach der Reinigung ergab, dass beim verzinkten Eisenblech und verzinnerten Kupferblech bei der Außenbewitterung an der Oberfläche eine chemische Reaktion stattgefunden hat, die das niedrige Emissionsvermögen zerstörte.

Festzustellen ist jedoch: Es gibt niedrigemittierende Oberflächen, die gegenüber Umwelteinflüssen alterungsbeständig sind. Es ist bekannt, dass die bei der vorliegenden Untersuchung eingesetzte K-Glas-Schicht chemisch beständiger ist als eine unbeschichtete Floatglasoberfläche [7]. Eine DIN-Norm für die Bestimmung der Alterungsbeständigkeit von Schichten, die Außenlagerung ausgesetzt sind, gibt es leider noch nicht. Die Erfahrungen, die bezüglich Alterungsbeständigkeit mit Floatglasoberflächen gewonnen wurden, können aber eine Richtschnur bei der Entwicklung von Schichten sein, die der Außenbewitterung ausgesetzt werden sollen.

6. Heute vermarktete niedrigemittierende Schichten auf Flachglas für eine neue Isolierglasgeneration und Entwicklungsbedarf hierfür

Das Anforderungsprofil von niedrigemittierenden Schichten auf Außenoberflächen von Verglasungen sollte deshalb lauten:

- Spektrale Transmission so hoch wie möglich für Wärmeschutzgläser und, an die Klimatisierung des Gebäudes angepasst, bei Sonnenschutzgläsern,
- Emissionsvermögen optimal 0,1, jedoch mindestens $\leq 0,2$,
- chemische und mechanische Beständigkeit mindestens wie unbeschichtetes Floatglas,
- großflächig gleichmäßige, ggf. neutrale Farbe in Außenansicht und
- wirtschaftliche Herstellung auf Flachglas mit Bandmaßen (3,2 x 6 m).

Einen wesentlichen Teil dieser Anforderungen erfüllen heute die Produkte K-Glas und SolarE der Firma Pilkington auf der Basis von leitfähigen SnO₂-Schichten, die wirtschaftlich online mit dem Floatprozess mit CVD-Verfahren hergestellt werden [1]. Beide Produkte haben die gleiche Schichtstruktur und ein Emissionsvermögen ε von 0,17. Dieser Wert ist nicht optimal, jedoch ist er eine erste Annäherung an den optimalen Wert. Während das K-Glas eine solare Transmission hat, die nur unerheblich unter der des unbeschichteten Floatglases liegt, ist die des SolarE durch Absorption an die Gebäudeklimatisierung angepasst. Das K-Glas wurde für den Einsatz in Wärmeschutzgläsern mit Schicht auf Position 3 entwickelt; das Produkt SolarE ist als Sonnenschutzglas mit Schicht auf Position 2 vorgesehen. Wie oben schon dargelegt wurde, ist die chemische und mechanische Beständigkeit von online mit dem CVD-Verfahren hergestellten Schichten auf der Basis von SnO₂ größer als die des unbeschichteten Floatglases. Während jedoch die Farbgleichmäßigkeit bei dem Produkt SolarE wegen des vorgesehenen Einsatzes auf Position 2 auch bei dem Einsatz auf Position 1 ausreichend sein mag, muss dies bei dem Produkt K-Glas geklärt werden. (Für den Einsatz in Wärmeschutzgläsern auf Position 3 ist die Farbgleichmäßigkeit dieses Produktes ausreichend). Ein Nachteil beider Schichten ist ihre raue Oberfläche, die die Reinigung erschwert.

Bezüglich der technischen Werte wären ITO-Schichten die bessere Lösung als leitfähige SnO₂-Schichten. Jedoch sind hochleitfähige ITO-Schichten für diesen Anwendungsfall nicht wirtschaftlich herzustellen. Meiner Meinung nach wären eine wirtschaftlich bessere Alternative hochleitfähige ZnO-Schichten, die heute auch industriell herstellbar sind. Jedoch haben diese Schichten bis heute nicht die für den Außeneinsatz notwendige chemische Beständigkeit, da sie hygroskopisch sind. Dieses Problem kann m. E. aber durch eine geeignete Dotierung der Schicht gelöst werden. Schichten auf der Basis von ZnO können auch mit PVD-Anlagen, d. h. offline zur Floatglasherstellung aufgebracht werden.

7. **Schlußfolgerungen**

Während niedrigemittierende Schichten auf Oberflächen von Wärmeschutzgläsern zum Innenraum nur wenige Vorteile bringen, verbessern sie die Funktionen dieser Gläser auf Außenoberflächen (Pos. 1) erheblich.

Es hat sich gezeigt, dass Außenbewitterung das Emissionsvermögen dieser Schichten nahezu nicht beeinflusst, Voraussetzung ist jedoch, dass die Schichten die notwendige Alterungsbeständigkeit haben. Sowohl Benetzung durch Regen als auch Schmutzablagerungen durch Außenbewitterung stören die Funktion der so ausgerüsteten Wärmeschutzgläser nur unbedeutend.

Es sind heute niedrigemittierende Schichten auf der Basis von SnO₂ auf dem Markt (K-Glas und SolarE) die teilweise die oben aufgeführten Anforderungen für diesen Anwendungsfall erfüllen. Die Entwicklung besserer Schichten sollte eine Herausforderung für die Zukunft sein.

Auf der Basis der dargelegten Vorteile von niedrigemittierenden Schichten auf der Außenoberfläche von Verglasungen kann die in Bild 4 dargestellte neue Generation von Isoliergläsern geschaffen werden.

Sowohl bei dem Zweifach- als auch bei Dreifach- Isolierglas ist die Grundkonstruktion die gleiche wie bei den heute vermarkteten Wärmeschutzgläsern, d. h., sowohl die Anordnung der Scheiben, als auch die Scheibenzwischenräume und deren Gasfüllung, als auch die Art und Anordnung der niedrigemittierenden Schichten zu den Zwischenräumen (auf Pos. 3 bzw. auf Pos. 2 und 5) ist identisch. Lediglich die niedrigemittierende Schicht auf der Außenoberfläche (Pos. 1) ist neu.

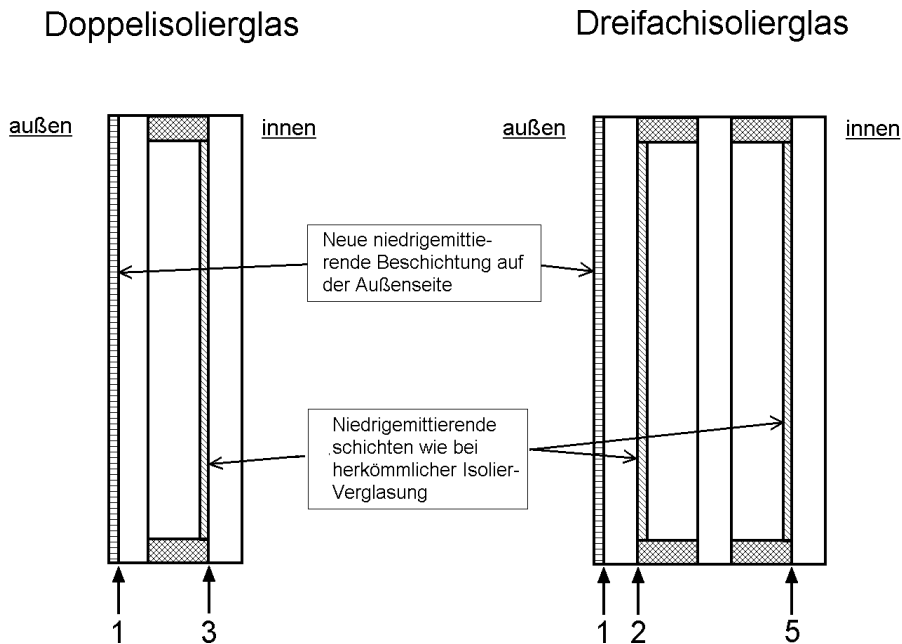


Bild 4: Konstruktion einer neuen Generation von Isolierverglasung.

Diese weiterführende Entwicklung der Wärmeschutz- und Sonnenschutzgläser hat folgende Vorteile:

- Taubeschlag auf der Außenoberfläche kann nahezu vollständig unterbunden werden,
- der Wärmeverlust durch die Verglasung ist in hohem Maße unabhängig von der Einbaulage (Neigung) der Verglasung in der Fassade,
- bei klarem Himmel wird Wärmeverlust erheblich reduziert; bei bedecktem Himmel jedoch nur mäßig,
- mit niedrigemittierenden Schichten, die gleichzeitig eine hohe solare Transmission haben, können verbesserte Wärmeschutzgläser, mit Schichten, die eine angepasste solare Transmission haben, können Sonnenschutzgläser realisiert werden.

Der bevorzugte Einsatz dieser Verglasungen ist in Structural-Glazing-Fassaden, d. h. bei Ganzglasfassaden, in Wintergärten und Dachfenstern. Die Markteinführung dieser neuen Isolierglasgeneration sollte eine Herausforderung der Glasindustrie sein.

8. Literatur

- [1] Gläser, H. J.: Dünnschichttechnologie auf Flachglas, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf 1999, S. 174 ff.
- [2] DIN EN 410, 673, 674 und 675
- [3] "SolarE", Pilkington plc, siehe: www.Pilkington.com
- [4] „Hortiplus“, Prospekt der Firma Glaverbel
- [5] Gläser, H. J.: Condensation on the outer surface of window glazings - Causes, effect on heat loss and method for prevention, Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 70 (1997), p. 146 -154.
- [6] Gläser, H. J.: Entspricht die DIN den aktuellen Anforderungen? Glaswelt 10/2000, S. 82 - 89
- [7] Rädlein, E., Buksak, A., Heide, G., Gläser, H. J., Frischat, H. G.: Untersuchungen zur Beständigkeit von K-Glass bei direkter Bewitterung, Veröffentlichung in Glass Sci. Technol. in Vorbereitung.