

Verschmutzungen von Fensterverglasungen bei Außenbewitterung:

# Begrenzter Selbstreinigungseffekt

Dr. Hans Joachim Gläser

Die Außenoberfläche von Verglasungen verschmutzt durch Bewitterung. Davon leben die professionellen Fenster- und Fassadenreiniger. Die Hausfrauen hingegen wünschen sich von der Flachglasindustrie die Beendigung der Fensterputzplackerei. Diverse Forschungsinstitute und auch die Industrie haben in dieser Richtung seit geraumer Zeit geforscht, was auch z. T. zu vermarkteten Produkten geführt hat. Hierbei wird versucht, die Oberflächenenergie (siehe [1], Seite 249) der Verglasungsaußenoberfläche durch Beschichtung zu verändern.

Hydrophil, photokatalytisch hydrophil, hydrophob, super-hydrophob sind die Schlagworte dieser Entwicklungen, die im wesentlichen durch den Kontaktwinkel (siehe [1], Seite 251) charakterisiert werden, den definierte Flüssigkeitstropfen auf Oberflächen bilden. Der nachhaltige Erfolg zumindest der vermarkteten Produkte ist aber bisher noch mäßig. Dies hat m. E. den hauptsächlichsten Grund, daß man von den an Labormustern gewonnenen Kontaktwinkelmessungen nur bedingt auf das nachhaltige Verhalten der Oberflächen bei Außenbewitterung schließen kann. Zu beklagen ist auch, daß die bei diesen Entwicklungen oder Produkten benutzten Begriffe, wie z. B. „Self-Cleaning“, „Easy-to-Clean“, „Anti-Sticking“, „Low-Maintenance“ usw., alle nicht genormt sind, d. h., jeder benutzt diese Begriffe mehr oder weniger nach eigenem Gutdünken; die Vorteile der Produkte sind deshalb für den außenstehenden Anwender schwierig zu beurteilen. Dies führt zu Verunsicherung auf dem Markt, ins-

besondere auch deshalb, weil mit allen bisher vermarkteten Produkten nicht das hehre Ziel, die bei Außenbewitterung verschmutzungsfreie Oberfläche erreicht wird. Bei einigen diesbezüglichen Entwicklungen wird dies auch schon gar nicht mehr als Ziel herausgestellt. Nachfolgend soll über Untersuchungen des Verschmutzens von unbehandeltem Floatglas durch Außenbewitterung und die Folgerungen, die daraus gezogen werden können, berichtet werden.

## Versuchsanordnung und -ort

In Gummersbach wurden im Zeitraum von März 2000 bis September 2002 4 mm dicke Floatglasscheiben mit den Abmessungen  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  auf der Außenoberfläche einer Dachfensterscheibe mit einer Neigung von  $30^\circ$  exponiert, in dem sie am Rande mit 1K-Silikon verklebt wurden. Regen und Tauwasser konnten frei ablaufen. Die Proben wurden nach vorgegebener Expositionszeit bei trockener Witterung entfernt. Anschließend wurden mit Spektrometern im Bereich der Sonnenstrahlen (Wellenlänge  $\lambda = 300$  bis  $2500 \text{ nm}$ ; Fabrikat „Lambda 900“, Perkin-Elmer) mit Ulbrichtkugel

(15 cm  $\emptyset$ ) die Transmission und Reflexion sowie im Infraroten (Wellenlänge  $\lambda = 2,5$  bis  $22 \text{ nm}$ ; Fabrikat „ATI Mattson Genesis Series“) die Reflexion gemessen. Der Lichtstrahl am Ort der Probe hatte bei der Messung im Bereich der Sonnenstrahlen einen Durchmesser von ca. 1 cm. Jede Probe wurde nur einmal exponiert. Mit Hilfe solcher Messungen kann eine Aussage über den sich mit der Zeit durch die Außenbewitterung auf Flachglasscheiben ablagernden Schmutz und dessen Einfluß, insbesondere auf die solare Transmission und somit sowohl auf den solaren Energiegewinn von Hochbauverglasungen, als auch auf die nachhaltige Effizienz von Sonnenkollektoren oder Photovoltaikanlagen gewonnen werden. Denn sowohl bei den Sonnenkollektoren als auch bei den Photovoltaikanlagen sind Flachglasabdeckungen bzw. -verkapselungen – zumindest bisher noch – unumgänglich.

## Diskussion der Meßergebnisse

Im Bild 1 ist der spektrale Verlauf der totalen (gerichteten und diffusen) Transmission im Bereich der Sonnenstrahlen von Proben wiedergegeben,

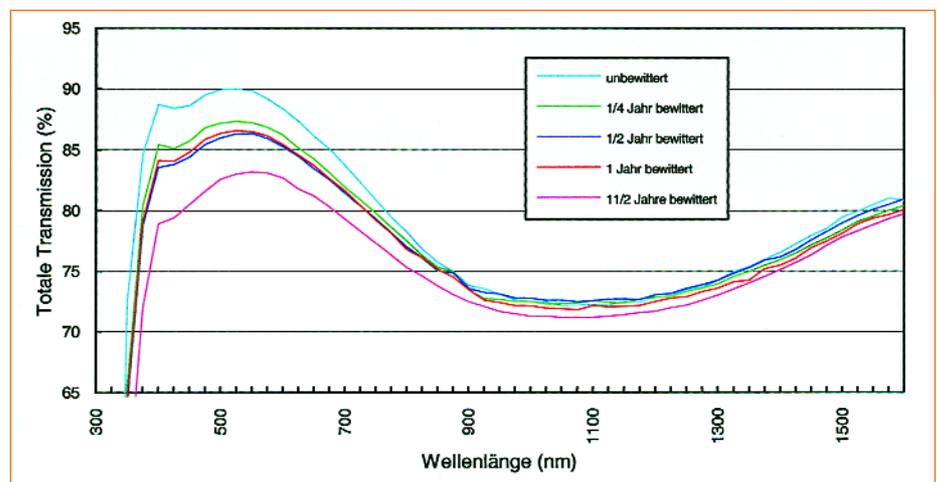


Bild 1: Spektraler Verlauf der totalen Transmission von Floatglasproben, die unter einer Neigung von  $30^\circ$  der Außenbewitterung ausgesetzt waren im Vergleich zu einer unbewitterten Probe

die im Zeitraum von März 2000 bis Oktober 2001 bei einer Neigung von 30° exponiert waren. Die Messung der totalen Transmission bzw. auch der totalen Reflexion – von der weiter unten die Rede sein wird – ist wichtig, da auf Scheiben abgelagerter Schmutz Licht stark streut, wie dies z. B. bei verschmutzten Windschutzscheiben besonders auffällt.

In Tabelle 1 ist die Auswertung der solaren Transmission der Messungen von Bild 1 bezogen auf unterschiedlich definierte globale Solarstrahlungen wiedergegeben, wie sie für die Hochbauverglasung gemäß EN 410 [2] (siehe 3. Spalte,  $\tau_e$ ) bzw. für Sonnenkollektoren und Photozellen gemäß AM 1,5 [3] im Wellenlängenabstand von 10 nm (siehe 4. Spalte  $\tau_e$ ) vorgeommen wird.

Man erkennt in Tabelle 1, daß der Unterschied der beiden Auswertungen unerheblich ist.

Sowohl aus Bild 1 als auch aus Tabelle 1 folgt, daß die solare Transmission infolge Verschmutzung der Außenoberfläche, wie zu erwarten, während der Exposition über 1 1/2 Jahre, d. h. langfristig abnimmt. Die Abnahme erfolgt zwar nicht gleichförmig, offensichtlich ist – langfristig betrachtet – die Schmutzablagerung von Frühjahr bis Herbst größer als von Herbst bis Frühjahr. Wie Gombert et al. [4] nachgewiesen haben, kann die Transmission bei außenbewitterten Glasproben kurzzeitig witterungsbedingt stärker schwanken; langfristig betrachtet finden aber auch diese Autoren eine kontinuierliche Abnahme der Transmission. Gemäß Tabelle 1 beträgt die prozentuale Abnahme der solaren Transmission über den Zeitraum von 1 1/2 Jahren ca. 6 %. Dies stimmt mit Erfahrungen der Wirkungsgradmessungen an außen installierten Photovoltaikmodulen am Institut für Photovoltaik (IPV) des Forschungszentrums Jülich überein [5]. Wir werden aber nachstehend sehen, daß der Einfluß der witterungsbedingten Verschmutzung auf die spektralen Eigenschaften einer Verglasung durchaus größer sein kann.

Proben-Nr.	Bewitterungszeitraum	Solare Transmission $\alpha_e$ (gemäß EN 410)	Solare Transmission $T_e$ (bezogen auf die Globalstrahlung gemäß AM 1,5)
		(%)	(%)
1	nicht bewittert	81,7	81,5
2	¼ Jahr	80,0	79,9
3	½ Jahr	79,3	79,4
4	1 Jahr	79,3	79,3
5	1½ Jahr	76,9	76,4

Tabelle 1: Auswertung der solaren Transmission von außenbewitterten Floatglasproben bezogen auf unterschiedliche Globalstrahlungen

Um die spektralen Eigenschaften und das Verhalten des in den Expositionszeiträumen abgelagerten Schmutzes auf den Proben eingehender zu untersuchen, wurde außerdem mit Hilfe der spektralen Messung der totalen Transmission  $t(\lambda)$  und Reflexion  $r(\lambda)$  und der bekannten Formel

$$\alpha(\lambda) = 1 - \tau(\lambda) - \rho(\lambda)$$

der spektrale Verlauf der Absorption des abgelagerten Schmutzes auf folgende Weise bestimmt: Es wurde die spektrale Absorption der verschmutzten Probe  $\alpha_{\text{bewittert}}(\lambda)$  sowie anschließend der wieder gereinigten Probe  $\alpha_{\text{bewittert + gereinigt}}(\lambda)$  ermittelt. Danach wurde die Differenz

$$\alpha_{\text{bewittert}}(\lambda) - \alpha_{\text{bewittert + gereinigt}}(\lambda)$$

berechnet, die die spektrale Absorption des abgelagerten Schmutzes  $\alpha_{\text{Schmutz}}(\lambda)$  ergibt.

$\alpha_{\text{Schmutz}}(\lambda)$  ist ein Maß für die witterungsbedingte Schmutzablagerung auf Oberflächen, die wiederum gleich der Differenz einerseits des witterungsbedingten Schmutzabtrags und andererseits des witterungsbedingten Schmutzabtrags, der so genannten Selbstreini-

gung, ist. Die Differenz von Befall und Abtrag ist das, was den Anwender von Verglasungen interessiert und was auch gemessen werden kann, z. B. spektrometrisch. Durch Ermittlung der Absorption des abgelagerten Schmutzes auf parallel bewitterten Proben kann deshalb im Gegensatz zu den Kontaktwinkelmessungen an Labor-mustern ein eindeutiger Vergleich der Verschmutzung unterschiedlicher Oberflächen bei Außenbewitterung sowie ggf. dessen Charakterisierung erzielt werden.

Im Bild 2 ist der spektrale Verlauf der so ermittelten Absorption des bei Außenbewitterung abgelagerten Schmutzes auf den Proben 3 und 5 (siehe Tabelle 1) sowie zusätzlich auf den Proben 6 und 7 wiedergegeben, die parallel (März bis Oktober 2001) bzw. im Anschluß an die erste Versuchsreihe (Februar bis September 2002) unter sonst gleichen Bedingungen exponiert waren.

Die solare Absorption des abgelagerten Schmutzes  $\alpha_{e,\text{Schmutz}}$  wurde anschließend mit Hilfe der spektralen Werte von Bild 2 gemäß EN 410 berechnet. Wegen der doppelten Differenzbildung beträgt der mittlere Fehler der ermittelten Werte  $\pm 1,6\%$  abs.

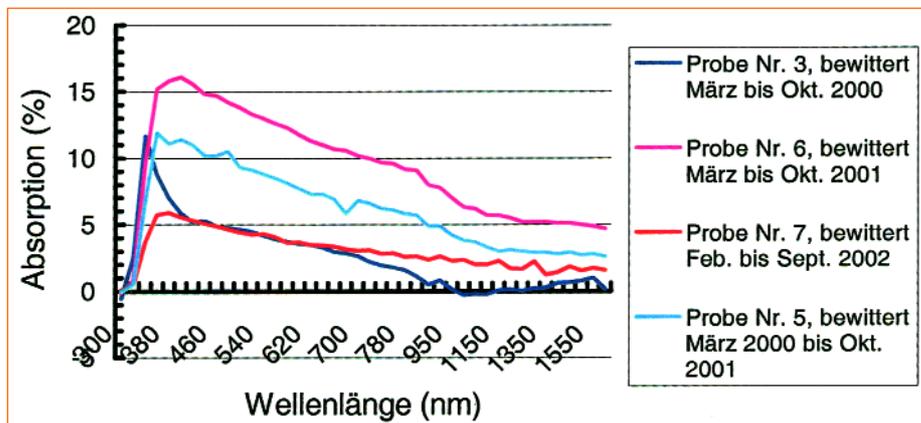


Bild 2: Spektrale Absorption des witterungsbedingt auf Floatglasproben abgelagerten Schmutzes

Bei der Probe 3 (siehe Bild 2) wurde jedoch eine Ausnahme gemacht. Hier wurde die Absorption der bewitterten Probe in bezug gesetzt zur unbewitterten Probe; es wurde also die Differenz

$$\alpha_{\text{bewittert}}(\lambda) - \alpha_{\text{unbewittert}}(\lambda)$$

gebildet. Außerdem wurde mit Hilfe der Reflexionsmessungen im Infrarotbereich und EN 637 das Emissionsvermögen der bewitterten Probe  $\epsilon_{n,\text{bewittert}}$  bzw. der anschließend gereinigten Probe  $\epsilon_{n,\text{bewittert+gereinigt}}$  ermittelt.

In Tabelle 2 ist die Auswertung der solaren Absorptionen  $\alpha_{e,\text{Schmutz}}$  des witterungsbedingt abgelagerten Schmutzes auf den Proben von Bild 2 sowie deren Emissionsvermögen nach der Bewitterung bzw. nach anschließender Reinigung wiedergegeben.

Im Bild 2 fällt auf, daß der Verlauf der spektralen Absorption der Probe 3 im UV-Bereich (Wellenlänge  $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) und im nahen Infrarot(NIR)-Bereich (Wellenlängenbereich um  $\lambda = 1050 \text{ nm}$ ) von dem der anderen Proben abweicht. Absorptionen  $\leq 0$  bei der Wellenlänge  $\lambda$  um  $1050 \text{ nm}$  traten auch bei anderen bewitterten Glasproben (z. B. „Activ-Glas“ oder „K-Glass“ s. a. Bild 3) immer dann auf, wenn die Berechnung der solaren Absorption des Schmutzes auf die unbewitterte Probe bezogen, d. h. wenn  $\alpha_{\text{Schmutz}}(\lambda)$  gemäß

$$\alpha_{\text{bewittert}}(\lambda) - \alpha_{\text{unbewittert}}(\lambda)$$

ermittelt wurde. Die Auswertung bezogen auf die bewittert und anschließend gereinigte Probe ergab im Gegensatz dazu im NIR-Bereich um  $\lambda = 1050 \text{ nm}$  stets 1–2 % höhere Werte. Dies kann m. E. nur dadurch erklärt werden, daß die Absorption der Glasscheibe selbst bei der Bewitterung

Proben-Nr.	Bewitterungszeitraum	Solare Absorption des abgelagerten Schmutzes $\alpha_{e,\text{Schmutz}}$ (%)	$\epsilon_{n,\text{bewittert}}$	$\epsilon_{n,\text{bewitt.+gerein.}}$
3	März 2000 - Okt. 2000 (1/2 Jahr)	2,9	-	-
6	März 2001 - Okt. 2001 (1/2 Jahr)	10,3	0,88	0,88
7	Feb. 2002 - Sept. 2002 (1/2 Jahr)	3,3	0,88	0,88
5	März 2000 - Okt. 2001 (11/2 Jahr)	6,5	0,88	0,88

Tabelle 2: Solare Absorption des witterungsbedingt abgelagerten Schmutzes auf Floatglasproben sowie dessen Einfluß auf das Emissionsvermögen der Proben

zunimmt. Die Ursache hierfür ist mir unbekannt. Die starke Erhöhung der Absorption von Probe 3 im UV führe ich in diesem Fall eher auf die Verschmutzung zurück. Bei anderen Proben kann eine Erhöhung der Absorption im UV-Bereich auch andere Ursachen haben, wie z. B. bei „Activ-Glas“ der photokatalytische Effekt (siehe Bild 3). Aus diesen Erfahrungen folgere ich: Bei spektralen Untersuchungen des auf Floatglas witterungsbedingt abgelagerten Schmutzes muß immer als Bezug eine bewitterte und anschließend gereinigte Stelle der untersuchten Probe herangezogen werden.

Auffallend im Bild 2 ist weiterhin, daß der auf den Scheiben abgelagerte Schmutz von einem Maximum im UV-Bereich zum IR-Bereich quasi kontinuierlich abnimmt. Aus den Absorptionsspektren sollte man auf die chemische Zusammensetzung des Schmutzes schließen können; das ist mir nicht gelungen. Auch die Reflexionsspektren im IR-Bereich lieferten hier keinen Aufschluß (siehe auch [6]).

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß es sich bei dem abgelagerten Schmutz um Bestandteile der Luftverschmutzung handelt, die lokal und ggf. auch zeitlich unterschiedlich sein können (siehe auch [6], Fig. 3).

Die bei allen Proben gemessene, quasi kontinuierliche Abnahme der Absorption zum NIR-Bereich hin ist ein weiterer Hinweis dafür, daß der bei Bewitterung abgelagerte Schmutz im Infraroten für Wärmestrahlen in hohem Maße transparent ist. Das gleiche Emissionsvermögen der Floatglasproben vor und nach der Bewitterung bestätigt dies (siehe Tabelle 2).

Wie aus den  $\alpha_{e,\text{Schmutz}}$ -Werten der Tabelle 2 zu schließen ist, hängt die Dicke des abgelagerten Schmutzbelages von der Witterung ab; sie kann nämlich bei gleichen Expositionszeiten in unterschiedlichen Jahren unterschiedlich sein (vergleiche die Werte der Proben 3, 6, 7). Dieses Ergebnis war zu erwarten.

Interessanter ist schon der  $\alpha_{e,\text{Schmutz}}$ -Vergleich der Proben 5 und 6. Probe 5,

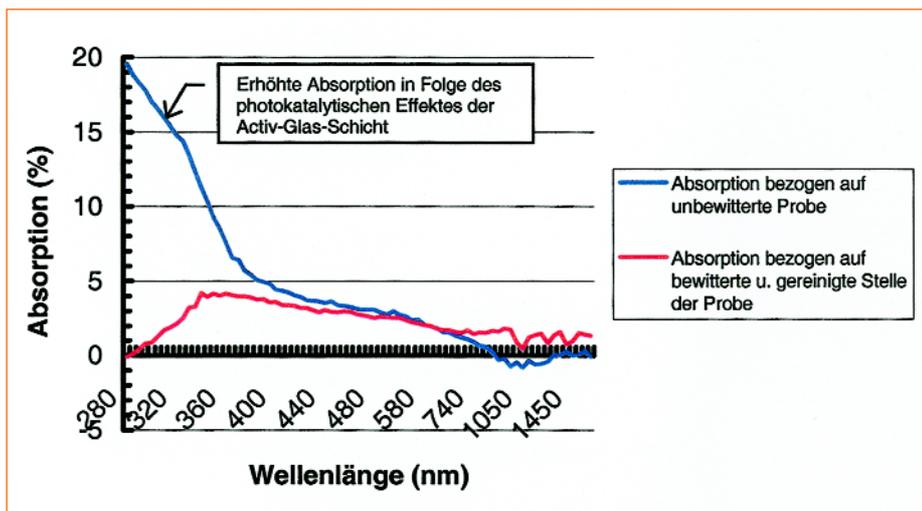


Bild 3: Spektrale Absorption des witterungsbedingt abgelagerten Schmutzes auf der Schicht einer „Activ-Glas“-Probe, die von Februar bis September 2002 parallel zur Probe 7 exponiert war (Messung in Probenmitte) Bilder: Dr. Gläser

1 1/2 Jahre exponiert, war im letzten Halbjahr parallel mit Probe 6 ausgelegt.  $\alpha_{e, \text{Schmutz}}$  ist bei Probe 6 trotz nur halbjähriger Exposition mit ca. 10 % höher als bei Probe 5 mit ca. 6,5 % bei 1 1/2-jähriger Exposition. Dieser Unterschied macht deutlich, daß sich bei der Probennahme trotz gleichen Schmutzbefalls im letzten Halbjahr unterschiedlich dicke Schmutzbeläge auf der vorbeladenen im Vergleich zur sauber ausgelegten Probe befanden. Daraus kann gefolgert werden: Die witterungsbedingt auf Floatglasoberflächen abgelagerte Schmutzmenge hängt von der Vorbeladung der Oberfläche mit Schmutz ab. Der Abtrag erfolgt bei dickem Schmutzbelag m. E. unberechenbar; man kann ihn vielleicht mit dem Abgang einer Mure vergleichen.

Aus den Erfahrungen bei der Reinigung von Verglasungen, die der Außenwitterung ausgesetzt waren, weiß man, daß Schmutz um so schwerer von Glasoberflächen zu entfernen ist, je länger die Scheiben nicht gereinigt wurden, d. h. je länger sich Schmutz abgelagert hat. Man kann daraus schließen, daß über einen längeren Zeitraum auf Glasoberflächen sich abla-

gernder Schmutz eine festere Bindung mit der Glasoberfläche eingeht und sich auch verfestigt. Floatglas reinigt sich deshalb bei Außenwitterung nur sehr bedingt selbst. Es wird, langfristig betrachtet, neu auftreffender Schmutz auf verbliebenem abgelagert (siehe [1], Seite 254).

**Folgerungen aus den Untersuchungen**

1. Um Aussagen über die Verschmutzung unterschiedlicher Oberflächen bei Außenwitterung machen zu können, sollten Proben parallel ausgelegt und bewittert werden, d. h. vergleichend untersucht werden. Der Schmutzbefall ist dann gleich. Als Bezugsoberfläche ist z. B. die des Floatglases geeignet. Der Abtrag des Schmutzes von der Oberfläche, der so genannte Selbstreinigungseffekt, hängt wie der Befall von der Witterung ab. Bei dicken Schmutzbelägen kann der Abtrag unberechenbar erfolgen.

2. Die Ermittlung der spektralen und solaren Absorption des Schmutzes ( $\alpha_{\text{Schmutz}}(\lambda)$  bzw.  $\alpha_{\text{ae, Schmutz}}$ ), abgelagert auf über einen definierten Zeitraum (z. B. 1/2 Jahr) außenbewitterten Oberflächen, ergibt über die Nachhaltigkeit des Selbstreinigungseffektes dieser Oberflächen z. B. mit unterschiedlichen Oberflächenenergien (hydrophil, photokatalytisch hydrophil hydrophob, superhydrophob) zuverlässigere Aussagen als die Messung von

Kontaktwinkeln an Labormustern dieser Oberflächen. Mit der Kontaktwinkelmessung an Labormustern kann m. E. nur die Oberfläche typisiert werden.

3. Bei Flachglas ist der sogenannte Selbstreinigungseffekt sehr begrenzt. Langfristig betrachtet wird neu auftreffender Schmutz auf verbliebenem angelagert.

4. Aufgrund der Messergebnisse an den bewitterten Floatglasproben unter 30° Neigung halte ich es für unerlässlich, daß die Außenoberfläche der heutigen, auf Dächern installierten Sonnenkollektoren und Photovoltaikanlagen zur Erhaltung des Wirkungsgrades regelmäßig gereinigt werden. Kurzfristig kann hier die durch Schmutzablagerung erfolgte solare Transmissionsabnahme bis zu 10 % betragen; langfristig muß m. E. mit über 5 % gerechnet werden. Bei senkrechten Verglasungen mag sie niedriger sein.

5. Die übliche Schmutzablagerung aus der Luft beeinträchtigt das Emissionsvermögen auf Außenoberflächen von Verglasungen über mehrere Jahre nur im Bereich von wenigen Hundertsteln (siehe [7]).

**Literatur:**

[1] Gläser, H. J.: Dünnfilmtechnologie auf Flachglas, Verlag Karl Hofmann, Schorn-dorf, 1999  
 [2] DIN EN 410 „Bestimmung des Lichttransmissionsgrades, direkter Sonnenenergie-transmissionsgrad, Gesamtenergiedurchlaß-grad, UV-Transmissionsgrad und damit zusammenhängende Glasdaten“, 1998  
 [3] Fahrenbruch, A. L., Bube, R. H.: Fundamentals of Solar Cells, Academic Press, New York, 1983  
 [4] Gombert, A. et al.: Subwavelength-structured antireflection surfaces on glass, Thin Solid Film, 351, (1999), Seite 371-378  
 [5] Private Mitteilung Dr. Joachim Müller, PIV Forschungszentrum Jülich  
 [6] Rädlein, E. et al.: Weathering of tin oxid coated glass with low IR emissivity, Glass Sci. Technol. 75 (2002), Seiten 125-131  
 [7] Gläser, H. J.: Low-emissive coatings on the outer surface of heat-insulating glasses – a challenge to the flat glass industry, Glass Sci. Technol. 75 (2002), Seiten 12-20