

Antireflexglas für solare Anwendungen:

Verbesserter Wirkungsgrad macht Solarenergie rentabler

Nicht immer ist der Nutzen einer technischen Neuentwicklung so klar zu erkennen: Antireflexschichten vermindern die Reflexion von Sonnenlicht, ein derart entspiegeltes Glas als Abdeckung von Kollektoren und Photovoltaikmodulen verbessert die Effizienz der solaren Energienutzung. Nur – bislang gab es weder geeignete Antireflexbeschichtungen noch geeignete Produktionsverfahren.



Bild 1: Mehr Durchblick durch Antireflexbeschichtung. Der untere Teil der Glasscheibe ist mit dem neuen Verfahren entspiegelt, dem oberen Streifen fehlt die Beschichtung (Bild: ISC)

Entspiegelte Gläser sind besonders Brillenträgern seit langem bekannt, sie finden sich aber auch vielfach bei optischen Instrumenten, der Abdeckung von Armaturen, bei höherwertigen Bilderrahmen, Schaufenstern und ähnlichen Anwendungen. Diese Entspiegelungen sind allerdings nur für den sichtbaren Teil des Sonnenlichts wirksam – das Spektrum zwischen 380 und 780 nm. Außerhalb dieses Wellenlängenbereichs reflektieren diese Gläser dagegen sogar deutlich mehr Licht als Glas ohne Antireflexschicht. Deshalb sind diese Beschichtungen für Solarmodule ungeeignet.

Für solare Anwendungen geeignete Beschichtungsverfahren waren bislang nicht bekannt. Ein derartiges Verfahren zu entwickeln war Ziel eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützten Verbundprojektes der Firmen Merck und Flabeg, zusammen mit den Fraunhofer-Instituten für Silicatiforschung und für Solare Energiesysteme. Mit Erfolg: Innerhalb von vier Jahren gelang es, eine neuartige Beschichtung zur Herstellung eines pra-

xistauglichen Antireflexglases für solare Anwendungen bis zur Marktreife zu entwickeln. Seit Beginn des Jahres 2002 wird das neue Antireflexglas von der Firma Flabeg, einem Glasveredelungsbetrieb aus Fürth, produziert und vertrieben.

Fakten:

- ⇒ Herkömmliche Entspiegelungen für solare Anwendungen ungeeignet
- ⇒ Neuartiges Verfahren zur Herstellung von entspiegelten Gläsern für solare Anwendungen entwickelt
- ⇒ Steigerung der Energieausbeute um bis zu 15 % bei thermischer Solarenergienutzung
- ⇒ Markteinführung im Jahr 2002

Die neuentwickelte Antireflexschicht verbessert die Lichtdurchlässigkeit des entspiegelten Glases über nahezu das gesamte energetisch genutzte Spektrum des Sonnenlichts zwischen 400 und 2500 nm Wellenlänge. Bei solaren Anwendungen führt dies unmittelbar zu einer deutlichen Steigerung der Ausbeute: Der Wärmeertrag einer

solaren Warmwasser- und Heizungsanlage kann etwa allein durch die Verwendung des neuen Antireflexglases um bis zu 15 % gesteigert werden. Bei Photovoltaik-Modulen ist eine Erhöhung der Leistung um mehr als drei Prozent erzielbar.

Reflexion und Transmission

Wenn Licht eine Glasscheibe durchdringt, wird ein Teil der Strahlung an beiden Grenzflächen der Scheibe reflektiert. An jeder dieser Grenzflächen gehen bei senkrechtem Lichteinfall auf diese Weise etwa 4 % des Lichts verloren, insgesamt also 8 %. Weitere Verluste entstehen durch Streuung und Absorption innerhalb der Glasschicht (Bild 2).

Diese Verluste können mittlerweile zwar durch hochwertige Gläser und eisenarme Glasmischungen gegenüber konventionellem Flachglas auf nur noch rund 2 % begrenzt werden. Insgesamt erreichen jedoch bislang bestenfalls 90 % des Lichts die andere Seite.

Die neuentwickelte Antireflexschicht auf beiden Seiten des Glases verringert bei Solarkollektoren die Reflexion des Sonnenlichtes deutlich: Der Anteil des Lichts, der in das Solarmodul gelangt, die solare Transmission, liegt bei mehr als 95 % und konnte damit um bis zu 6-%-Punkte gesteigert werden.

Mehr Licht – mehr Ertrag

Bei Kollektoren, also Modulen zur Nutzung solarer Wärme, erhöht sich der absolute Wirkungsgrad nahezu linear zur Verbesserung der Transmission. Die Wirkungsgrad-Kennlinie eines Kollektors mit Antireflexglas liegt also über den gesamten Bereich der Betriebszustände ebenfalls rund 6 % höher (Bild 3).

Ein zusätzlicher Vorteil des entspiegelten Glases besteht in der verminderten Winkelabhängigkeit der Licht- und Energiedurchlässigkeit. Bei flachem Lichteinfall verringert sich die Transmission bei normalem Glas recht deutlich. Sie fällt etwa auf unter 75 %, wenn der Einfallswinkel 70° beträgt. Die Antireflexschicht führt zu einem deutlich geringeren Nachlassen der Lichtdurchlässigkeit unter diesen Bedingungen, im Beispiel bleibt immer noch eine Transmission von 85 % erhalten (Bild 4).

Als Folge dieses Effektes kann eine Solaranlage mit Antireflexglas auch unter ungünstigen Bedingungen effizienter arbeiten, etwa bei niedrigerem Stand der Sonne in den Morgen- und Abendstunden oder in den Übergangsmonaten. Im praktischen Einsatz kann durch die Antireflexbeschichtung in Kombination mit einem strukturoptimierten Solarglas der Wärmeertrag einer solaren Warmwasser- und Heizungsanlage unter Nutzung aller Effekte um bis zu 15 % gesteigert werden – ohne sonstige Änderungen an Konstruktion und Einbau.

Die Verwendung von Antireflexglas ist aber auch als Abdeckung für Photovoltaik-Module zur Erzeugung von Solarstrom von Interesse. Bei diesen Modulen ist die Entspiegelung nur auf der Außenseite wirksam. Auf der Innenseite der Glasscheibe ist durch den Gießharz- oder Laminatverbund eine Entspiegelung nicht notwendig. Die Verbesserung der Lichtdurchlässigkeit liegt bei etwa 3 bis 3,5 %, was unmittelbar als Mehrleistung umgesetzt

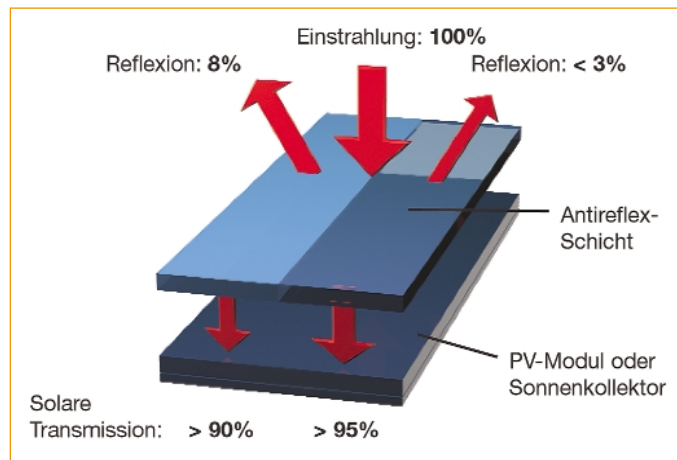


Bild 2: Licht durchdringt Glas – Reflexion und Transmission (Bild: Flabeg)

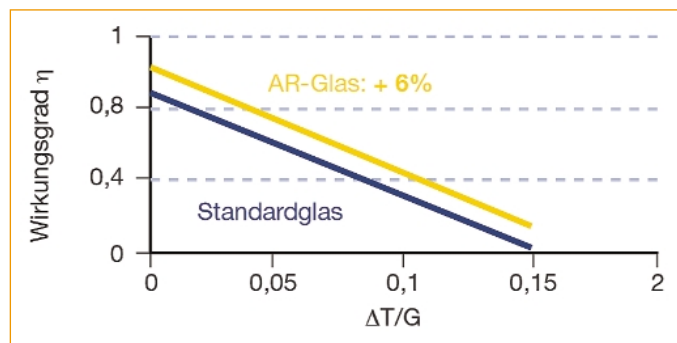


Bild 3: Nutzen der Antireflexschicht bei Kollektoren

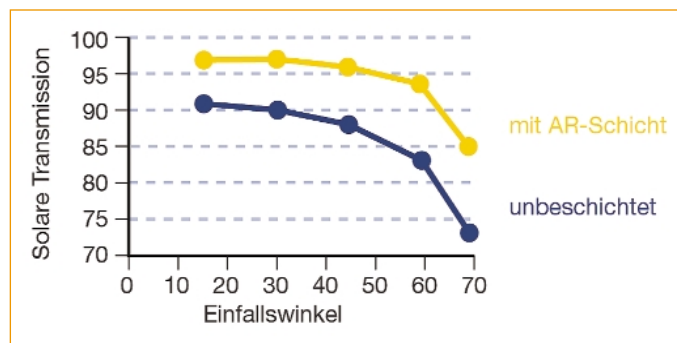


Bild 4: Transmission bei unterschiedlichen Einfallswinkeln

werden kann. Auch bei Photovoltaik-Modulen kommt die geringere Winkelabhängigkeit der Transmission zum Tragen. Praxisergebnisse unter Freilandbedingungen werden derzeit im Rahmen einer Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ermittelt.

Wie wird das Glas entspiegelt?

Für die Entspiegelung von Glas über das solare Wellenlängenspektrum von 400 bis 2500 nm mit einem Ein-

schichtsystem sind Materialien mit sehr niedrigen Brechungsindizes notwendig, die bislang nicht hergestellt werden konnten. Mischungen von hoch- und niedrigbrechenden Substanzen, wie Siliziumdioxid und Luft, können die geforderten Eigenschaften erreichen und sind daher für die Herstellung von reflexionsvermindernden Schichten geeignet. Durch chemisches Ätzen des Substratglases mit Flußsäure oder über eine Beschichtung der Glasoberfläche mit einer Siliziumdioxidhaltigen Beschichtungslösung können solche Schichten erzeugt werden. Am Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung wurden neuartige Beschichtungslösungen entwickelt,

Bild 5: Herstellung von beschichtetem Antireflexglas-Beschichtungsanlage



deren Fertigung und Applikation von den Firmen Merck und Flabeg in industrielle Prozesse übertragen wurden.

Für das im Rahmen des Projektes entwickelte Sol-Gel-Beschichtungsverfahren wird die Glasscheibe in eine mit der Beschichtungslösung, dem Siliziumdioxid-Sol, gefüllte Wanne getaucht und wieder herausgezogen. Durch anschließendes Antrocknen entsteht eine festere Schicht, das Gel. Diese wird in einem anschließenden thermischen Prozeß bei etwa 650 °C gehärtet. Im gleichen Arbeitsschritt erfolgt auch die Härtung des Glases, das sogenannte Vorspannen (Bild 5).

Der gesamte Prozeßablauf ist voll automatisiert, vom Glaszuschnitt über Kantenbearbeitung, Reinigung und Beschichtung bis zur thermischen Härtung. Die nur rund 140 nm dicke Entspiegelungsschicht wird unter Reinraum-Bedingungen aufgebracht. Besonders die Vorreinigung der zu beschichtenden Glasscheiben hat sich als entscheidender Arbeitsschritt erwiesen. Aber auch Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftführung und Ziehgeschwindigkeit während des Beschichtungsvorgangs und der anschließenden Antrocknung bedingen die Qualität und Gleichmäßigkeit der Antireflexschicht. Es können sowohl glatte Floatgläser als auch Strukturgläser mit unterschiedlicher Strukturierung beschichtet werden.

Wind, Wetter und ein Filzfinger

Die Produkt- und Alltagstauglichkeit des Antireflexglases wurde in einem umfangreichen Test- und Prüfungsprogramm untersucht. So wurden etwa am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme beschichtete Glasscheiben der Witterung ausgesetzt

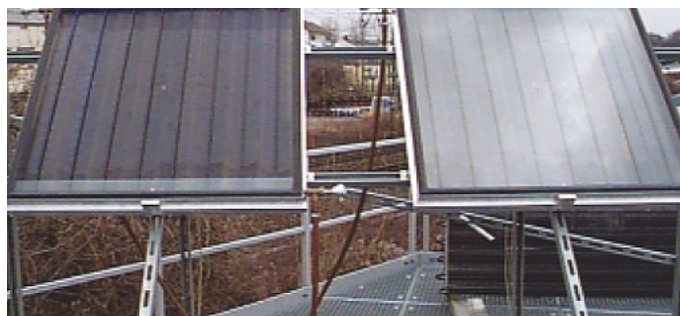


Bild 6: Modellkollektoren-Teststand des Fraunhofer ISE

und regelmäßig die solare Transmission gemessen. Die Ergebnisse lassen eine ausreichende Stabilität bei normalen Witterungsbedingungen erwarten. Vergleichende Messungen beschichteter und unbeschichteter Glasscheiben zeigten zwar jahreszeitliche und wetterbedingte Schwankungen der Lichtdurchlässigkeit, etwa durch Pollen, Staub und andere Verschmutzungen. Der Unterschied in der Transmission beschichteter und unbeschichteter Scheiben blieb aber stets erhalten (Bild 6).

Das Antireflexglas verschmutzt also nicht mehr als normales Glas, die Beschichtung macht die Scheiben nicht anfälliger für lichthemmende Ablagerungen. Dies wurde in einem besonderen Härtestest überprüft: Die Glasscheiben wurden mit einer dicken

Schicht feinen Tonerstaubes bedeckt und anschließend mit Wasser gereinigt. Auch hier zeigte sich kein Unterschied in der Reinigungsfähigkeit von Antireflex- und Normalglas. Zur Überprüfung der Langzeitstabilität wurden auch nach DIN normierte Tests eingesetzt, so zur Untersuchung der Feuchtebeständigkeit (KK-Test nach DIN 50 017) und der Abriebbeständigkeit (Crockmeter-Test nach DIN EN 1096-2). Bei diesem Test wird ein Abrieffinger aus Filz mit einem Gewicht von einem Kilogramm belastet und trocken über die Probe gerieben. Während zu Beginn des Projektes der Testfinger nicht mehr als zehnmal hin und her rubbeln konnte, ohne die Schicht schwer zu beschädigen, konnten am Projektende auch 1000 dieser sogenannten „Zyklen“ die Beschichtung nicht nennenswert beschädigen. Die Abriebbeständigkeit dieser neuentwickelten Beschichtung liegt somit weit über dem bislang bekannten technischen Stand. Für die Praxis heißt dies: Das

Antireflexglas dürfte für den Alltag robust genug sein und es behält seinen Vorsprung bei der Lichtdurchlässigkeit gegenüber normalem Solarglas auch unter widrigen Umständen.

Kosten

Die Kosten für die Antireflexschicht liegen im Bereich von etwa 10 bis 12 Euro/m² und entsprechen dem Kostenziel des Projektes. Fertigkollektoren zum Selbsteinbau werden (Stand: Frühjahr 2002) für etwa 220 bis 250 Euro/m² angeboten. Für eine Solarthermie-Anlage für ein Ein- bis Zweifamilienhaus (4–6 Personen) zur Erzeugung von Warmwasser

und zur Heizungsunterstützung werden typischerweise zwischen 10 und 25 m² Kollektorfläche benötigt. Zu den Kollektoren kommt noch das solare Heißwasser-System hinzu, preislich üblicherweise etwa in der Größenordnung der Kollektoren; gegebenenfalls alles zuzüglich des fachgerechten Einbaus. Der Hersteller der Antireflex-Beschichtung ist zuversichtlich, entspiegeltes Glas als Standard im Markt zu etablieren und bisherige Solarglas-Qualitäten komplett zu ersetzen.

Kratz- und wetterfest – aber geruchsempfindlich

Bei Untersuchungen an Modellkollektoren zeigte sich frühzeitig eine Wechselwirkung der porösen Antireflexbeschichtung mit den verwendeten Materialien im Kollektor. Deren Ausgasen führte zu einer Verringerung der Entspiegelungswirkung, die auf der Innenseite der Scheibe nahezu aufgehoben wurde. Auch bei Modulen mit unbeschichteten Glasscheiben ist dieses Problem als „Fogging“ bereits bekannt, die Bedeutung ist bei Antireflex-Scheiben allerdings ungleich gravierender. Als Hauptquelle der Ausgasungsprodukte konnte das Wärmedämm-Material identifiziert werden. Als eine Ursache erwies sich der Phenolharzbinder von Mineralwolle, der ausgasen, in einem Fall war es sogar der Steppfaden einer ansonsten bindemittelfreien Wolle. Bei umfangreichen Tests zeigte sich, daß eine nur 10 bis 15 mm dicke Schicht unmittelbar unter dem Absorber für das Problem jeweils verantwortlich ist (Bild 7).

In Zusammenarbeit mit einem Mineralwolle-Hersteller wurde ein Dämm-Material entwickelt, das sich durch einen Bindemittelgradienten auszeichnet. In der Nähe des Absorbers ist der Bindemittelgehalt jeweils besonders gering. Diese Dämmwolle wird zur Vermeidung des „Foggings“ von Kollektorherstellern bereits in großem Umfang verwendet.

Bedeutende technische Verbesserung

Die Aufgabenstellung des Projektes war, eine Beschichtung und ein Beschichtungsverfahren zur Herstellung eines Antireflexglases zu entwickeln.

Es sollten deutlich bessere optische Eigenschaften erzielt werden als mit den bisher auf dem Markt vertretenen Verfahren. Am Ende sollte ein praxistaugliches Produkt zu marktfähigen Preisen stehen. Nach vier Jahren Projektlaufzeit ist das Ziel, ein Verfahren zur Herstellung von Antireflexgläsern zu entwickeln, mit dem Beginn der technischen Produktion und des Ver-



Bild 7: Degradiertes Dämm-Material

triebs erreicht worden. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht noch in der Optimierung und Anpassung einzelner Prozessschritte. Die Verwendung von Antireflexglas zur Abdeckung von Solarmodulen ist eine bedeutende technische Verbesserung zur effektiveren Nutzung der Sonne als Energiequelle. Mit entspiegelten Abdeckgläsern verbessert sich der Wirkungsgrad der eingesetzten Solarmodule unmittelbar – Solarenergie wird rentabler.

Die Produktion des Antireflexglases ist derzeit noch für etwa jährlich

100 000 m² ausgelegt. Es ist geplant, die Kapazität in kürze auf 500 000 m² zu verfünffachen. Die damit bestückten Solarkollektoren werden zusammen jährlich rund 30 Megawattstunden an zusätzlicher Energie erzielen.

Antireflexgläser könnten aber auch bei der Gebäudeverglasung überaus sinnvoll eingesetzt werden. Moderne Fenster sind heutzutage keine energie-

tischen Verlustbringer mehr, ihre Energiebilanz ist bei Südorientierung mittlerweile sogar positiv. In unseren Klimazonen können so pro m² Fenster und Jahr etwa 100 Kilowattstunden erzielt werden. Durch die Erhöhung der solaren Transmission eines Fensters durch Antireflexglas kann zusätzlich ein beträchtliches Energieeinsparpotential erschlossen werden.

Weitere Anwendungsfelder für Antireflexglas sind etwa die Nutzung von Tageslicht für die Gebäudebelichtung oder Gewächshäuser. Hier ist der Einsatz von Antireflexglas oftmals besonders interessant, weil hochwertige elektrische Energie eingespart werden kann. □

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst. Er informiert über



Energietechniken und deren Anwendung in Wohnungs-

bau, Industrie, Gewerbe und Kommunen. Der vorliegende Artikel basiert auf der Projektinfo 03/02.

Weitere Broschüren bzw. Projektinfos Informationsdienst BINE

Fachinformationszentrum Karlsruhe Büro Bonn

Mechenstraße 57
53129 Bonn

Tel. (02 28) 92 37 90

Fax (02 28) 9 23 79 29

bine@fiz-karlsruhe.de

www.binde.info

Literatur:

[1] T. Hofmann: „Antireflexbeschichtete Kollektoren bringen mehr Ertrag“; Erneuerbare Energien 8/2001.

[2] A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreibholz, C. Zanke, B. Bläsi, A. Heinzl, W. Horbelt, D. Sporn, W. Döll, V. Wittwer, J. Luther: „Glazing with very high solar transmittance“; Solar Energy, Vol. 62, No.3, 177–188 (1998).

[3] A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreibholz, B. Bläsi, A. Heinzl, D. Sporn, W. Döll, V. Wittwer: „Antireflective transparent covers for solar devices“; Solar Energy, Vol. 68, No. 4, 357–360 (2000).

Projektadressen:

Flabeg GmbH & Co. KG, Dr. Thomas Hofmann, Siemensstraße 3, 90766 Fürth.

Fraunhofer-Institut für Silicathforschung ISC, Walther Glaubitt, Neunerplatz 2, 97082 Würzburg.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Dr. Andreas Gombert, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg.

Merck KGaA, Dr. Monika Kursawe, Mainzer Straße 41, 64574 Gernsheim.