



## Antireflexglas für solare Anwendungen

Abb 1



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

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

**N**icht 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.

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 praxistauglichen 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.

Die neuentwickelte Antireflexschicht verbessert die Lichtdurchlässigkeit des entspiegelten Glases über nahezu das gesamte energetisch genutzte Spektrum des Sonnenlichts zwischen 400 und 2.500 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 Prozent gesteigert werden. Bei Photovoltaik-Modulen ist eine Erhöhung der Leistung um mehr als drei Prozent erzielbar.

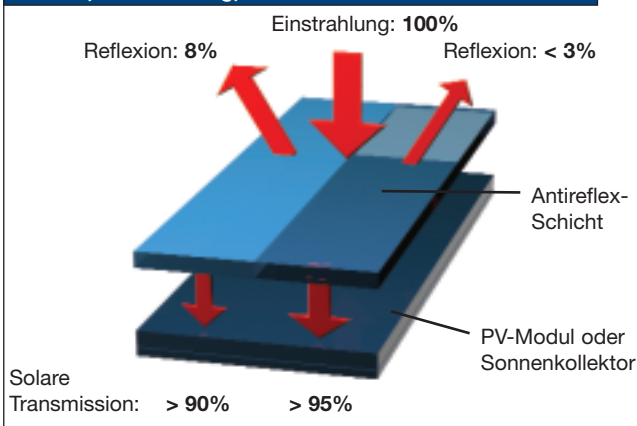
## ► Reflexion und Transmission

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 vier Prozent des Lichts verloren, insgesamt also acht Prozent. Weitere Verluste entstehen durch Streuung und Absorption innerhalb der Glasschicht (Abb 2).

Diese Verluste können mittlerweile zwar durch hochwertige Gläser und eisenarme Glasmischungen gegenüber konventionellem Flachglas auf nur noch rund zwei Prozent begrenzt werden. Insgesamt erreichen jedoch bislang bestenfalls 90 Prozent 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 Prozent und konnte damit um bis zu sechs Prozentpunkte gesteigert werden.

**Abb 2 Licht durchdringt Glas – Reflexion und Transmission (Quelle: Flabeg)**



## ► 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 sechs Prozent höher (Abb 3).

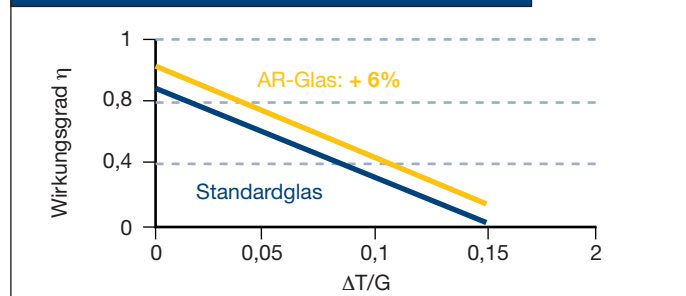
Ein zusätzlicher Vorteil des entspiegelten Glases besteht in der verminderten Winkelabhängigkeit der Licht- und Energiedurchlässigkeit. Bei flachem Lichteinfall verringert sich die Transmission bei normalem Glas recht deutlich. Sie fällt etwa auf unter 75 Prozent, wenn der Einfallswinkel 70 Grad beträgt. Die Antireflexschicht führt zu einem deutlich geringeren Nachlassen der

Lichtdurchlässigkeit unter diesen Bedingungen, im Beispiel bleibt immer noch eine Transmission von 85 Prozent erhalten (Abb 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 Prozent gesteigert werden – ohne sonstige Änderungen an Konstruktion und Einbau.

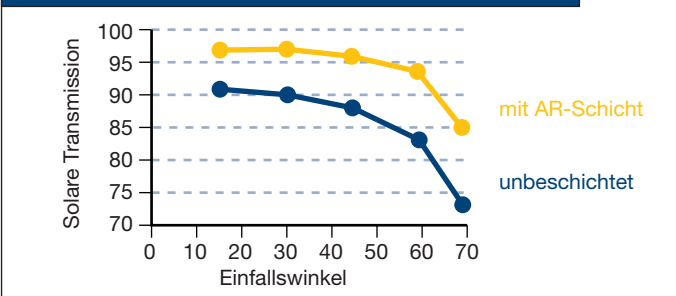
Die Verwendung von Antireflexglas ist aber

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 Prozent, was unmittelbar als Mehrleistung umgesetzt 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.

**Abb 3 Nutzen der Antireflexschicht bei Kollektoren**



**Abb 4 Transmission bei unterschiedlichen Einfallswinkeln**



## ► Wie wird das Glas entspiegelt?

Für die Entspiegelung von Glas über das solare Wellenlängenspektrum von 400 bis 2.500 nm mit einem Einschichtsystem 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 Siliziumdioxid-haltigen Beschichtungslösung können solche Schichten erzeugt werden. Am Fraunhofer-Institut für Silicatforschung wurden neuartige Beschichtungslösungen entwickelt, 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 Be-

**Abb 5 Herstellung von beschichtetem Antireflexglas - Beschichtungsanlage**



schichtungslösung, 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 (Abb 5).

Der gesamte Prozessablauf ist voll automatisiert, vom Glaszuschnitt über Kantenbearbeitung, Reinigung und Beschichtung bis zur thermischen Härtung. Die nur rund 140 Nanometer dicke Entspiegelungsschicht wird unter Reinraum-Bedingungen aufgebracht. Besonders die Vorreinigung der zu beschichtenden Glasscheiben hat sich als entscheidender Arbeitsschritt er-

wiesen. 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 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 (Abb 6).

Das Antireflexglas verschmutzt also nicht mehr als normales Glas, die Beschichtung macht die Scheiben nicht anfälliger für

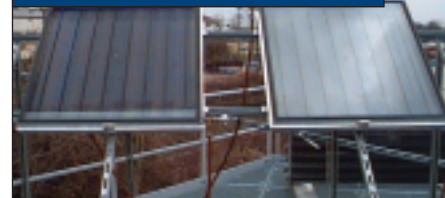
lichthemmende Ablagerungen. Dies wurde in einem besonderen Härtestest überprüft: Die Glasscheiben wurden mit einer dicken Schicht feinen Tonerstaubes bedeckt und anschließend mit Wasser gereinigt. Auch hier zeigte sich kein Unterschied in der Reinigungsfähigkeit von Antireflex- und Normalglas.

Zur Überprüfung der Langzeitstabilität wurden auch nach DIN normierte Tests eingesetzt, so zur Untersuchung der Feuchtebeständigkeit (KK-Test nach DIN 50017) und der Abriebbeständigkeit (Crockmeter-Test nach DIN EN 1096-2). Bei diesem Test wird ein Abriebfinger 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 10 mal 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.

Abb 6 Modellkollektoren – Teststand des Fraunhofer ISE



## ► Kosten

Die Kosten für die Antireflexschicht liegen im Bereich von etwa 10 bis 12 Euro pro Quadratmeter und entsprechen dem Kostenziel des Projektes. Fertigungskollektoren zum Selbsteinbau werden derzeit (Stand: Frühjahr 2002) für etwa 220 bis 250 Euro pro Quadratmeter angeboten. Für eine Solarthermie-Anlage für ein Ein- bis Zweifa-

milienhaus (4-6 Personen) zur Erzeugung von Warmwasser und zur Heizungsunterstützung werden typischerweise zwischen 10 und 25 Quadratmeter Kollektorfläche benötigt. Zu den Kollektoren kommt noch das solare Heißwasser-System hinzu, preislich üblicherweise etwa in der Größenordnung der Kollektoren; gegebenfalls alles zu-

züglich 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 Phenolharzbin-

der 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 Millimeter dicke Schicht unmittelbar unter dem Absorber für das Problem jeweils verantwortlich ist (Abb 7). In Zusammenarbeit mit einem Mineralwolle-Hersteller wurde ein Dämmmaterial entwickelt, das sich durch einen Bindemittelgradienten auszeichnet. In der Nähe des

Abb 7 Degradiertes Dämmmaterial



Absorbers ist der Bindemittelgehalt jeweils besonders gering. Diese Dämmwolle wird zur Vermeidung des „Foggings“ von Kollektorherstellern bereits in großem Umfang verwendet.

## ► Fazit

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 Vertriebs 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 Quadratmeter ausgelegt. Es ist geplant, die Kapazität in Kürze auf 500.000 Quadratmeter zu vervielfachen. 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 energetischen Verlustbringer mehr, ihre Energiebilanz ist bei Südorientierung mittlerweile sogar positiv. In unseren Klimazonen können so pro Fenster-Quadratmeter 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 Gewächshäuser oder die Nutzung von Tageslicht für die Gebäudebelichtung. Hier ist der Einsatz von Antireflexglas oftmals besonders interessant, weil hochwertige elektrische Energie eingespart werden kann.

## ► PROJEKTADRESSEN

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

Fraunhofer-Institut für  
Silicatiforschung ISC  
Walther Glaubitt  
Neunerplatz 2  
D-97082 Würzburg

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

Merck KGaA  
Dr. Monika Kursawe  
Mainzer Straße 41  
64574 Gernsheim

## ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

### Literatur

- T. Hofmann: Antireflexschichtete Kollektoren bringen mehr Ertrag. Erneuerbare Energien 8/2001.
- A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreiholz, C. Zanke, B. Bläsi, A. Heinzel, 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).
- A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreiholz, B. Bläsi, A. Heinzel, D. Sporn, W. Döll, V. Wittwer, "Antireflective transparent covers for solar devices", Solar Energy, Vol. 68, No. 4, 357 - 360 (2000).

### Service

- Ergänzende Informationen wie Adressen, Links und Literatur finden Sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info), „Service/InfoPlus“.

## PROJEKTORGANISATION

### ■ Förderung

Bundesministerium für Wirtschaft und  
Technologie (BMWi)  
11019 Berlin

Projektträger Jülich (PTJ) des BMWi  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Hans-Georg Bertram  
52425 Jülich

### ■ Förderkennzeichen

0329800A-B

## IMPRESSUM

### ■ ISSN

0937 - 8367

### ■ Herausgeber

Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

### ■ Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig bei  
vollständiger Quellenangabe und gegen  
Zusendung eines Belegexemplares;  
Nachdruck der Abbildungen nur mit  
Zustimmung der jeweils Berechtigten.

### ■ Autoren

Jürgen Maaß, Paul Feddeck

## BINE – INFORMATIONEN UND IDEEN ZU ENERGIE & UMWELT

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

BINE informiert über neue Energie-  
techniken und deren Anwendung in  
Wohnungsbau, Industrie, Gewerbe und  
Kommunen.

BINE bietet Ihnen folgende  
kostenfreie Informationsreihen

- Projekt-Infos
- Themen-Infos
- basisEnergie

**Nehmen Sie mit uns Kontakt auf,**  
wenn Sie vertiefende Informationen,  
spezielle Auskünfte, Adressen etc.  
benötigen, oder wenn Sie allgemeine  
Informationen über neue Energietechni-  
ken wünschen



**BINE**

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Büro Bonn  
Mechenstr. 57  
53129 Bonn

Fon: 0228 / 9 23 79-0  
Fax: 0228 / 9 23 79-29

eMail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: [www.bine.info](http://www.bine.info)