

Optische Beschichtungen für Solarkollektoren – Technologien und Qualitätssicherung

Dr. Andreas Gombert
Fraunhofer ISE

jetzt:

andreas.gombert@
concentrix-solar.de

Dr. Rolf Reineke-Koch
ISFH

r.reineke-koch@isfh.de

Dr. Karsten Fenske
Alanod-Sunselect

karsten.fenske@alanod.de

Dr. Thomas Hofmann
CentroSolar Glas

thomas.hofmann@
centrosolarglas.com

1. Einführung

Thermische Solarkollektoren wandeln die auf die Erde einfallende Strahlungsenergie der Sonne in Wärme um. Als Maß für den Wirkungsgrad eines verglasten Solarkollektors gilt das Produkt aus der Transmission τ der Glasscheibe und der Absorption α des Absorbers. Beide Werte sollten für Wellenlängen von 0,3 – 2,5 μm der Solarstrahlung möglichst groß sein. Die optische Beschichtung von Hochleistungs-Absorbern wurde zusätzlich mit wellenlängen-selektiven optischen Eigenschaften [1] ausgestattet, um Verluste durch thermische Abstrahlung am erhitzten Absorber zu vermeiden. Das Emissionsvermögen ϵ der Absorberbeschichtung sollte daher klein sein für den Wellenlängenbereich des thermischen Strahlers, den der Absorber bei Betriebstemperatur (z. B. bei 373 K) darstellt. Die Produktionstechniken und die Qualitätssicherungsmaßnahmen für hochtransmissive Solargläser und für selektive Absorber von typischen Flachkollektoren sind etabliert. Aber es gibt eine Reihe von Entwicklungszielen zur weiteren Verbesserung der optischen Eigenschaften und zur Kostensenkung der Anlagen.

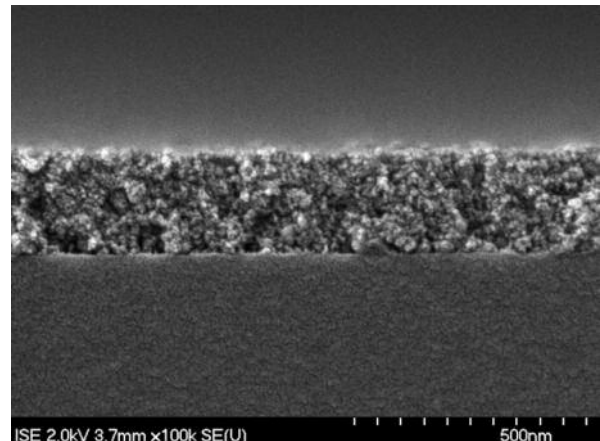
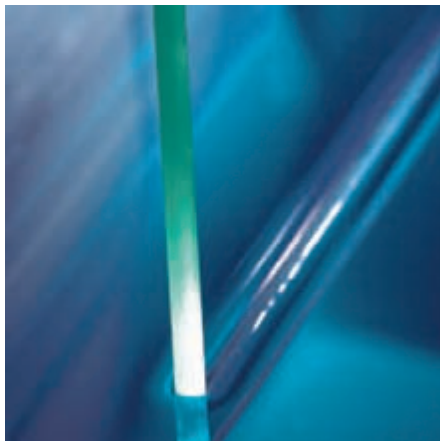
2. Antireflexschichten für transparente Abdeckungen

Flachkollektoren sind in der Regel durch eine Glasscheibe transparent abgedeckt. An der Abdeckung wird ein Teil der einfallenden Solarstrahlung reflektiert. Die Verluste durch Reflexion betragen typischerweise 4 % pro Grenzfläche „Glas-Luft“ bei senkrechtem Einfall der Strahlung. Bei größeren Einfallswinkeln nehmen diese Verluste noch zu. Ihre Reduktion ist daher erstrebenswert.

Da sich das solare Strahlungsspektrum von 0,3 – 2,5 μm erstreckt, können nur Interferenzschichtsysteme eingesetzt werden, deren Brechungsindizes zwischen denen von Glas und Luft liegen. Für eine Einfach-Antireflexschicht auf Flachglas wären Beschichtungsmaterialien mit einem Brechungsindex von ca. 1,23 ideal. Diese kommen in der Natur aber nicht vor. Einen Ausweg bieten nanoskalig poröse bzw. nanostrukturierte Materialien, bei denen – vereinfacht gesagt – ein Festkörper mit Luft gemischt wird, um niedrige effektive Brechungsindizes der Mischschicht zu erhalten.

Abbildung 1
Foto einer Sol-Gel-Tauchbeschichtung (links)

REM-Aufnahme einer porösen Sol-Gel-Schicht (rechts)



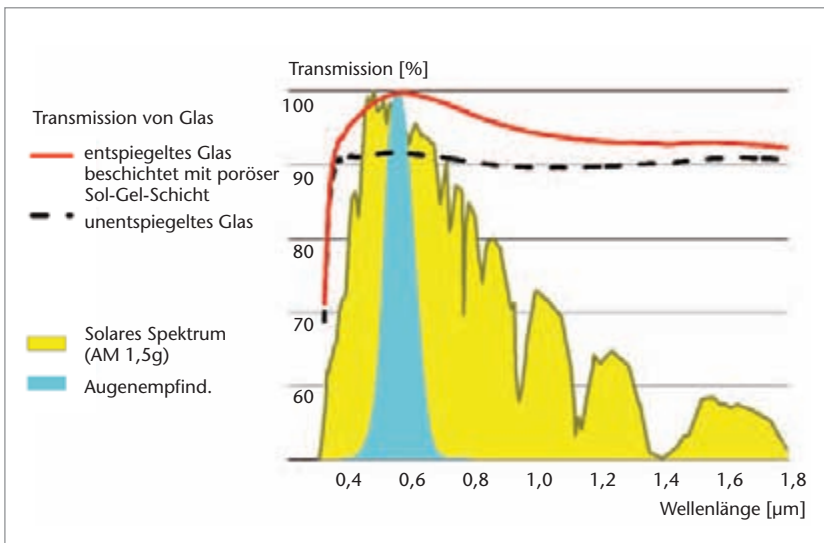


Abbildung 2
Transmissionsspektren
einer entspiegelten
und einer
unentspiegelten
Weißglasscheibe

Verfahren zur Herstellung von porösen, anorganischen Filmen auf Glas sind in der Literatur vielfach beschrieben. Kommerzielle Umsetzung fanden Ätzverfahren (z. B. mit HF und $H_2SiF_6 \cdot SiF_4$) [2], poröse Sol-Gel-Schichten [3], die im Tauchverfahren aufgebracht werden (Abb. 1), und kürzlich gesputterte poröse Antireflexschichten [4]. Neuere Entwicklungen haben zu mechanisch und chemisch stabilen porösen Beschichtungen geführt. Auf beiden Seiten beschichtete Solargläser erreichen solare Transmissionswerte von $\tau (AM1.5g^1) > 95\%$ (Abb. 2), d. h., die solare Transmission des unbeschichteten Glases wird um mindestens 4 % erhöht – gegenüber 91 % des unbeschichteten Glases. Bei größeren Einfallswinkeln nimmt die Erhöhung der Transmission noch weiter zu.

Poröse Schichten sind auf eisenarmen Floatglas und auf verschiedenen Strukturgläsern erhältlich. Sie werden industriell im Maßstab von Millionen Quadratmetern gefertigt und auf ihre Beständigkeit geprüft. Die Prüfungsmethoden sind überwiegend den Normen zu Beständigkeitsprüfung für optische Schichten und für

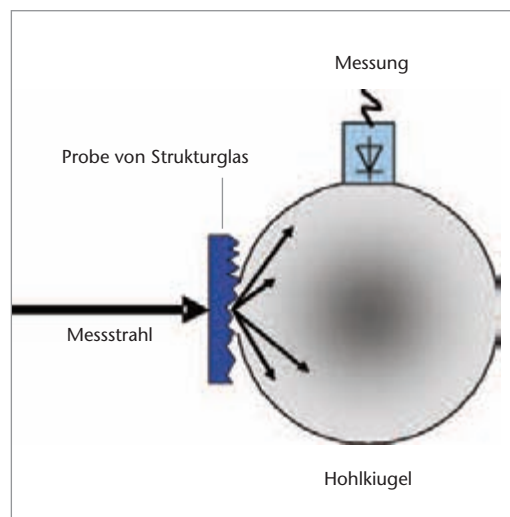


Abbildung 3
Skizze der Transmissionsmessung von Strukturglas mit Hilfe einer integrierenden Kugel. Der gerichtete Messstrahl wird an der Probe gestreut. Mit einer Hohlkugel hinter der Probe, deren Oberfläche bei sehr hohem Reflexionsgrad diffus streuend ist, kann das in den gesamten Halbraum transmittierte Licht gemessen werden.

Photovoltaikmodule entlehnt. Eine eigene Norm für die Beständigkeitsprüfung von Antireflexgläsern in Solarkollektoren gibt es derzeit noch nicht. Eine korrekte Bestimmung der Transmission von Strukturgläsern ist mit Hilfe von integrierenden Kugeln zwar prinzipiell möglich, Fehler bei der Messung sind aber nur mit viel Erfahrung vermeidbar (Abb. 3). Deshalb gibt es hierfür noch keine einfachen Handmessgeräte auf dem Markt, die für eine Eingangskontrolle sehr hilfreich wären.

1 AM 1,5g bezeichnet die Luftmasse (air mass), die das Sonnenlicht durchqueren muss, bevor es auf die Solarzellen fällt.
g = Globalstrahlung, d. h. die gesamte auf eine horizontale Fläche einfallende Solarstrahlung, die direkte Strahlung und die aufgrund von Streuung an Wolken, Wasser- und Staubteilchen diffuse Strahlung.

3. Solar-selektive Absorberschichten

In thermischen Solarkollektoren sollte die absorbierende Oberfläche idealer Weise für alle Wellenlängen der Solarstrahlung ($0,3 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$) einen Absorptionsgrad von 1 aufweisen. Durch die Erwärmung des Solar-Absorbers steigen aber auch die Verluste durch Wärmeleitung, Konvektion oder Abstrahlung. Die Abstrahlung findet nach dem Planckschen Gesetz bei Wellenlängen statt, die durch die Temperatur des Körpers bestimmt werden. Da die Betriebstemperatur des Solarabsorbers mit typischerweise 100°C erheblich niedriger ist als diejenige der Sonneneroberfläche, überlappen sich das Sonnenspektrum und das thermische Emissionsspektrum des Solar-Absorbers praktisch nicht. Es ist deshalb möglich, die thermische Abstrahlung des Solar-Absorbers deutlich zu verringern: Die Zusammensetzung des Solar-Absorbers muss so eingestellt werden, dass im Wellenlängenbereich der thermischen Abstrahlung, d. h. von $2,5 \mu\text{m}$ bis ca. $50 \mu\text{m}$, so wenig wie möglich absorbiert wird. Dann emittiert er nach dem Kirchhoffschen Gesetz auch wenig.

Die erforderliche Stufenfunktion im spektralen Absorptionsgrad kann mit Kompositschichten, in denen Metallpartikel von $< 10 \text{ nm}$ Größe und vom Substrat her abnehmendem Anteil in eine dielektrische Matrix eingebettet sind, auf einem metallischen Substrat realisiert werden. Im Wellenlängenbereich der Solarstrahlung

absorbiert die Kompositschicht sehr gut, im Wellenlängenbereich der thermischen Strahlung des erwärmten Absorbers ist die Kompositschicht transparent und die Emissionseigenschaften werden vorrangig durch das metallische Substrat oder durch eine Spiegelschicht bestimmt. Geeignete Kompositschichten können mit sehr unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden [1]. Bekannt sind galvanisch erzeugtes Schwarzchrom oder die heute sehr verbreiteten, durch Vakuum-Bandbeschichtungsverfahren wie Sputtern [5] (Abb. 4) oder Elektronenstrahlverdampfung [6] hergestellten, selektiven Solar-Absorberschichten auf den Substraten Kupfer und Aluminium. Es können solare Absorptionsgrade von $\alpha(\text{AM1.5g}) = 95\%$ und thermische Emissionsgrade von $\epsilon(373\text{K}) = 5\%$ erzielt werden.

Die Messung der solaren Absorption von solar-selektiven Absorberschichten erfolgt ebenfalls mit Hilfe von integrierenden Kugeln. Die thermische Emission wird meist über eine Reflexions-

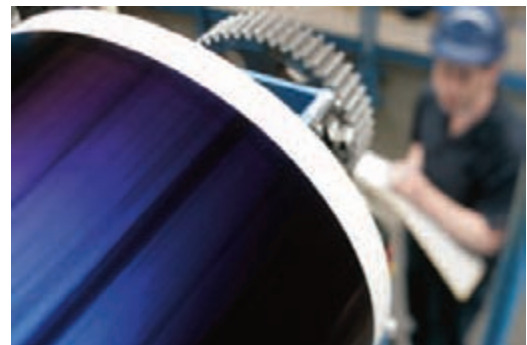


Abbildung 4
Fotos der Bandbeschichtung zur Herstellung von solar-selektiven Absorberschichten mittels Sputtern



messung bestimmt (Abb. 5). Für die Vermessung von solarer Absorption und thermischer Emission sind auch einfachere Handmessgeräte erhältlich. Die Beständigkeitsprüfung von solar-selektiven Absorberschichten mit besonderer Berücksichtigung des Mikroklimas in Solarkollektoren war Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einer internationalen Arbeitsgruppe im Rahmen der IEA Task X. Die Arbeiten mündeten in der Prüfprozedur ISO/CD 12952.2, die wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung geworden ist, aber bisher nicht zur Norm wurde. Neuere Arbeiten [7] erlauben eine noch genauere Vorhersage der Lebensdauer von solar-selektiven Absorberschichten und sollen nach derzeitiger Planung in einer CEN-Norm münden.

Es gibt eine Reihe von Entwicklungstrends, die einerseits das Schichtsystem selbst und andererseits selektive Absorberschichten in Verbindung mit neuen Substratmaterialien oder in unverglasten Anwendungen betreffen. Eine Verbesserung der solaren Absorption von solar-selektiven Absorberschichten ist durch Deckschichten erreichbar, deren Brechungsindex weiter verringert wird. Von großer Bedeutung ist die Frage, welche Auswirkungen die steigenden Preise der Metallsubstrate auf die Entwicklung neuer Solarkollektoren haben. Daher gibt es einen Entwicklungstrend, sich stärker mit polymeren Materialien für Solarkollektoren zu befassen. Damit einher gehen auch Entwicklungen zu unverglasten Kollektoren (Abb. 6) für die Dach- und Fassadenintegration.

4. Zusammenfassung

Die Produktionstechniken und die Qualitätssicherung für optische Beschichtungen, die in Solarkollektoren Anwendung finden, sind etabliert. Eine leichte Verbesserung der Absorptionswerte von solar-selektiven Absorberschichten ohne Verschlechterung der Emissionswerte ist durch Deckschichten mit niedrigerem Brechungsindex möglich.

Es besteht noch Bedarf nach einfachen Messsystemen, die dem Kollektorhersteller erlauben, die Transmission von Strukturgläsern korrekt zu messen.

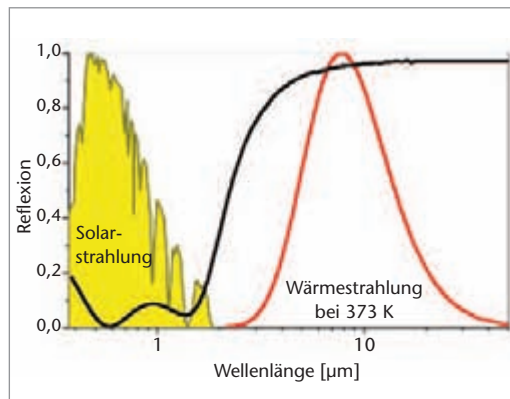


Abbildung 5
Reflexionsspektrum
einer solar-selektiven
Absorberschicht



Abbildung 6
Unverglaster
Metalldachkollektor
(Entwicklung des ISFH)

Aufgrund der steigenden Preise für Kupfer und Aluminium sind Stahl und vor allem polymere Materialien in Solarkollektoren von verstärktem Interesse. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt liegt bei unverglasten Kollektoren für die Dach- und Fassadenintegration.

Literatur

- [1] Granqvist, C.G. (Ed.): Materials science for solar energy conversion systems, Pergamon Press (1991).
- [2] Chinyama, G.K.; Roos, A.; Karlsson, B. Solar Energy 50, 105–111 (1993).
- [3] Gombert, A. et al.: Solar Energy 62, 177–188 (1998).
- [4] Weis, H. et al., Proceedings of the Glass Performance Days 15–18 June 2007, Tampere, Finland, 411–412 (2007).
- [5] www.alanod-sunselect.de, www.bluetec.de
- [6] www.tinox.de, www.alanod-sunselect.de
- [7] Köhl, M. et al.: Sol. Eng. Mat. Sol. Cells 84, 275–289 (2004)