

Mehr Durchblick

Mit speziellen dünnen oder mikrostrukturierten Beschichtungen von Kunststoffen und Glasoberflächen lassen sich unerwünschte Blendeffekte durch reflektiertes Licht vermeiden.

Lichtreflexe stören besonders, wenn man z. B. ein Display ablesen möchte, denn sie blenden den Betrachter, verringern durch Lichtschleier den Kontrast und führen zudem zu Falschlichteffekten.

Fällt Licht auf eine Oberfläche, so kommt es zu einer Reflexion, weil sich an der Grenzfläche, z. B. zwischen Luft und Glas, der Brechungsindex sprunghaft ändert. Dies wird durch die Fresnelschen Gleichungen beschrieben. Für unpolarisiertes Licht, das senkrecht auf die Grenzfläche auftrifft, gilt für den Reflexionsgrad R

$$R = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2,$$

mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 vor und hinter der Grenzfläche.

Für gewöhnliches Fensterglas mit $n_2 = 1,55$ und Luft mit $n_1 = 1$ ergibt sich ein Reflexionsgrad von 0,0465, d. h. 4,65 % des einfallenden Lichtes werden reflektiert. Da bei transparenten Objekten sowohl die vordere als auch die rückseitige Grenzfläche das Licht reflektiert, vermindert sich die Transmission um mindestens 9 %. Weitere 2 % gehen durch Streuung und Absorption in der transparenten Schicht verloren. Je größer der Einfallswinkel, desto größer ist der Strahlungsverlust durch Reflexionen: Bei 60 Grad verdoppeln sich die Werte.

Dünne Schichten

Um die störenden Reflexionen an den Grenzflächen zu unterdrücken, werden z. B. Brillengläser und kleinflächige Display-Abdeckungen oft beidseitig mit einer dünnen Schicht bedampft. In der Regel handelt es sich um Leichtmetallfluoride oder Siliziummonoxide. Durch diese Beschichtung wird das einfallende Licht nun nicht mehr nur an einer, sondern an zwei Grenzflächen reflektiert: Luft/Zwischenschicht und Zwischenschicht/Glas. Damit sich die an diesen Grenzflächen reflektierten Wellen auslöschen (destruktive Interferenz), müssen ihre Amplituden gleich groß sein und zusätzlich der Gangunterschied zwischen ihnen eine halbe Wellenlänge ($\lambda/2$) betragen. Gleiche Amplituden ergeben sich, wenn der



Spezielle Antireflexbeschichtungen ermöglichen einen ungeblendeten Blick auf Autoarmaturen oder Handydisplays. (Foto: Audi AG)

Reflexionsgrad an beiden Grenzflächen übereinstimmt. Aus dieser Bedingung ergibt sich der Brechungsindex der Zwischenschicht rechnerisch zu $n_s = \sqrt{n_1 n_2}$, d. h. für Luft/Glas ist $n_s = \sqrt{n_2} = 1,24$.

Damit der Gangunterschied $\lambda/2$ beträgt, muss die Dicke d der Zwischenschicht an eine Phasenbedingung angepasst werden: Da bei senkrechtem Einfall die an der Grenzfläche Zwischenschicht/Glas reflektierte Welle zweimal die Zwischenschicht durchläuft, muss im Fall der Auslöschung die optische Schichtdicke $d \cdot n_s$ gleich $\lambda/4$ sein. Da diese Phasenbedingung streng nur für eine bestimmte Wellenlänge gilt und oft Zwischenschichten mit geeigneten Brechzahlen fehlen, lässt sich in der Praxis mit dieser sog. $\lambda/4$ -Entspiegelung eine Reflexion zwar nicht gänzlich unterbinden, aber immerhin deutlich verringern.

Mit antireflektierenden Mehrschichtsystemen gelingt es jedoch, Reflexionen in einem weiteren Spektralbereich zu unterdrücken. Die verschiedenen Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes werden ebenfalls auf die Kunststoff- oder Glasoberflächen aufgedampft. Dieses Verfahren ist sehr kostspielig und kommt daher eher bei hochwertigen Brillengläsern oder Linsen, Spiegeln und Strahlteilern in der Laserspektroskopie zum Einsatz. Außerhalb des ausgezeichneten Spektralbereiches kann der Reflexionsgrad allerdings sehr stark zunehmen und eventuell sogar den der unentspiegelten Oberfläche übersteigen.

Solche Beschichtungen eignen sich daher nicht für Anwendungen, bei denen es darum geht, die Reflexionen kostengünstig und großflächig in einem noch breiteren Spektralbereich zu unterdrücken. Damit z. B. Solarzellen effizient ar-



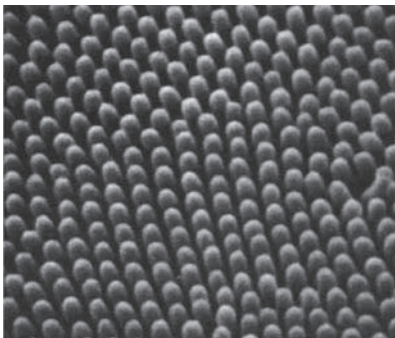
beiten, müssen sie einen möglichst großen Teil des Sonnenlichtes nutzen. Wenn sich der Reflexionsgrad im ultravioletten und im sichtbaren Spektralbereich der Abdeckgläser verringert, dann bedeutet das eine verbesserte Transmission und damit einen höheren Energiegewinn für die Solaranlage. Für die Entspiegelung der transparenten Schutzabdeckungen von Solarzellen wurden in den letzten Jahren insbesondere poröse und mikrostrukturierte Schichten untersucht.

Vorbild Mottenaugen

Mikrostrukturierte Antireflex-Beschichtungen verdanken wir einer Anregung von Mutter Natur. So besitzen Motten Augen, die sich nachts nicht durch verräterische Reflexionen verraten. Die Erklärung dafür liefert ein Blick durch das Elektronenmikroskop: In den Facettenaugen von nachtaktiven Insekten erkennt man nämlich eine regelmäßige Noppenstruktur. Aufgrund der winzigen Abmessungen der Noppen wird die Struktur vom einfallenden Licht nicht aufgelöst. Die antireflektierende Wirkung der periodisch angeordneten Mikrostrukturen erklärt sich durch die Mischung von Material und Luft im Sub-Mikrometerbereich: Betrachtet man die Strukturen im Querschnitt, so ändert sich der Brechungsindex nicht mehr sprunghaft, sondern kontinuierlich, und die Reflexion wird durch eine allmähliche Zunahme der optischen Dichte vermieden. Damit diese Strukturen durch das einfal-

lenden Licht nicht aufgelöst, aber Reflexionen unterbunden werden, muss deren Gitterperiode zwischen 200 und 300 nm und ihre Tiefe in der gleichen Größenordnung liegen. Wie bei einem Beugungsgitter wird das einfallende Licht in eine bestimmte Anzahl von gebeugten Ordnungen zerlegt. Je kleiner das Verhältnis Gitterperiode zu Wellenlänge, desto größer wird der Beugungswinkel und desto weniger gebeugte Ordnungen breiten sich aus, d. h. das Beugungsgitter hat eine reflexionsmindernde Wirkung.

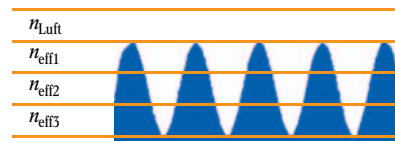
Mikrostrukturen dieser Art sind als Antireflex-Beschichtungen besonders attraktiv, da sich die Originalstrukturen durch Prägeprozesse kostengünstig vervielfältigen lassen. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE hat eine Technik entwickelt, mit der eine mikroskopische Noppenstruktur auf Kunststoffgläser und Folien aufgebracht wird. Der geeignete Prägestempel wird mit Hilfe von holographischen Strukturen hergestellt. Dazu werden zunächst zwei aufgeweitete Laserstrahlen unter



einem bestimmten Winkel überlagert und mit dem resultierenden Interferenzbild ein Photolack (Photoresist) belichtet. Kreuzgitter, wie sie bei den Mottenaugenstrukturen benötigt werden, realisiert man mit Hilfe zweier aufeinander folgenden Belichtungen und einer 90 Grad-Drehung des Substrates. Über eine galvanische Abformung lassen sich die Prägestempel, z. B. aus Nickel, direkt von der so strukturierten Photoresistoberfläche gewinnen. Während diese Mikrostrukturen z. B. im Heißprägeverfahren direkt auf Kunststoffe aufgebracht werden können, müssen Gläser zunächst mit einem organischen Copolymer beschichtet werden, welches anschließend geprägt wird.

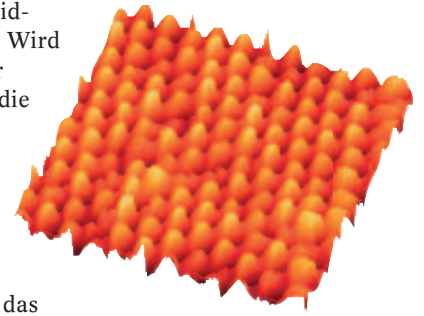
Poröse Beschichtungen

Poröse Schichten als Antireflexbeschichtungen für Solarzellen in einem breiten Spektralbereich sind bereits seit Anfang der 1980er-Jahre bekannt und werden u. a. vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC auf ihre Tauglichkeit im Alltag untersucht. Herstellen lassen



Bei der Mottenaugenstruktur (links) sorgt die Mischung von Material und Luft für kleine Brechungsindexänderungen (oben), die nötig sind, um eine gute Entspiegelung zu erzielen. (Foto: LTA/C. G. Bernhard)

sich diese Schichten mit dem so genannten Sol-Gel-Verfahren. Zur Beschichtung wird eine transparente Oberfläche in eine Lösung (Sol) getaucht, die neben einem Lösungsmittel bis zu 50 Nanometer große Siliziumdioxid-Kügelchen enthält. Wird das Glas aus dieser Lösung gezogen – die Geschwindigkeit dieses Vorganges bestimmt die Schichtdicke – so bleibt sie gleichmäßig auf ihm haften. Durch das



Abdampfen des Lösungsmittels und das Trocknen vernetzen sich die Teilchen im Sol: Auf der Oberfläche bildet sich eine festere, poröse Schicht (Gel), die bei Temperaturen um 500 Grad Celsius gehärtet wird. Im Gel haben sich zwischen den Siliziumdioxid-Kügelchen nur wenige Nanometer große, mit Luft gefüllte Zwischenräume gebildet. Wie schon bei den Mottenaugen-Strukturen, so ist auch bei den porösen Schichten die Mischung eines Festkörpers mit Luft im Sub-Mikrometerbereich für die reflexmindernde Wirkung verantwortlich: Ihr Brechungsindex ist mit $n < 1,3$ optimal an den Übergang Luft/Glas angepasst. In Pilotprojekten zeigte sich, dass porös entspiegelte Solaranlagen pro Jahr immerhin bis zu 10 % mehr Sonnenenergie in Wärme umwandeln.

KATJA BAMMEL

Rasterkraftmikroskop-Aufnahme einer Antireflexionsschicht aus porösem Siliziumdioxid. (Quelle: G. Helsch, TU Clausthal-Zellerfeld)

Dr. Katja Bammel, science & more redaktionsbüro, E-Mail: kb@science-and-more.de