

AR-hard® – Beschichtung mit einstellbarer spektraler Bandbreite für Kunststoffoptik

Ulrike Schulz, Uwe B. Schallenberg*, Norbert Kaiser

* mso mikroschichtoptik jena GmbH



Ulrike Schulz

Multifunktionale Beschichtungen

Transparente Kunststoffe ersetzen heute an vielen Stellen die traditionell für optische Bauteile verwendeten anorganischen Gläser (Abb. 1). Von Vorteil sind dabei das geringe Gewicht, die hohe Bruchfestigkeit und die flexiblen Möglichkeiten zur Formgebung. Für Kunststofflinsen werden, wie für Glasoptiken, Antireflexbeschichtungen (AR) benötigt. Daneben werden oft auch Kratzschutzbeschichtungen mit einer Mindestdicke im Mikrometerbereich gefordert. Die meisten Erfahrungen mit kratzfesten Antireflexschichten existieren im Bereich der Brillenglasfertigung. Beschichtungen für Brillengläser müssen besonders hohe Ansprüche bezüglich Härte und Klimastabilität erfüllen. Bisher werden dabei Antireflexschichtsysteme aus vier bis sechs Einzelschichten oberhalb einer zuvor aufgetragenen zwei bis vier Mikrometer dicken Hartschicht abgeschieden.

Neuartiges Schichtdesign

Ziel der Forschungsarbeiten im IOF war die Integration der optischen Funktion für die Entspiegelung in die Hartschicht. Im Ergebnis entstand ein neuer Typ von Schichtdesign: „AR-hard®“ /1/. Die neue multifunktionale Beschichtung kann in einem einzigen Vakuumprozess hergestellt werden. Dabei hängt die Kratzfestigkeit der Beschichtung maßgeblich von der Gesamtschichtdicke ab. Beschichtungen mit einer Dicke von drei Mikrometern bestehen sogar einen Stahlwolle-Abriebtest /2/.

Antireflexschichten vom Typ AR-hard® können als Aufeinanderfolge von symmetrischen Schichtfolgen aus je drei Schichten beschrieben werden, wobei in jeder dieser „Perioden“ eine sehr dünne hochbrechende Schicht von zwei wesentlich dickeren niedrigbrechenden Schichten umgeben ist. In Abb. 2 ist dieses Prinzip schematisch dargestellt. Typische Schichtmaterialien für den Aufbau sind SiO_2 , ein hartes Oxid mit niedriger Brechzahl, und TiO_2 als Material mit hohem Brechungsindex.

Theorie

Die drei Einzelschichten in den Perioden müssen so gewählt werden, dass eine mathematische Äquivalenz zu einer Einzelschicht gegeben ist. Die besondere Entdeckung bestand darin, dass Schichtfolgen gefunden wurden, die zur Entspiegelung geeignet sind. Es wurden mathematische Beziehungen abgeleitet, mit denen die Einzelschichtdicken für den Aufbau von Perioden so berechnet werden können, dass die äquivalenten Brechzahlen der daraus gebildeten Perioden zwischen 1,5 und 1,09 betragen. Solche Perioden werden dann mit abnehmender äquivalenter Brechzahl vom Substrat zur Luft aufeinander angeordnet. Eine Voraussetzung für die Eigenschaft der sehr kleinen äquivalenten Brechzahl ist, dass die optische Dicke einer solchen Periode mindestens das Dreifache der optischen $\lambda/4$ -Schichtdicke bei der Schwerpunktwellenlänge für die Entspiegelung (3 QWOT) beträgt /3/.

Abb. 1: Kunststofflinsen für optische Anwendungen.

Fig. 1: Plastic lenses for optical applications.



AR-hard® – coating with adjustable spectral bandwidth for plastic optics

Ulrike Schulz, Uwe B. Schallenberg*, Norbert Kaiser
*mso mikroschichtoptik jena GmbH

Multifunctional coatings

Highly transparent thermoplastic polymers offer significant weight reduction, cost saving and manufacturing advantages for optical components (Fig. 1). Antireflection (AR) coatings and hard coatings with a physical thickness of at least one micron are required for plastic optics and plastic display windows. Requirements in respect of hardness and scratch resistance are strongly dependent on the kind of application. Most experience with scratch resistant antireflection coatings is in the field of ophthalmics. Coatings for eyeglasses must fulfill stringent requirements regarding their susceptibility to abrasion and environmental conditions. Antireflection layers, which consist of four to six single layers (already established from classical theory), are typically arranged on top of a 2–4 micron thick hard coating.

New coating design

Our efforts were aimed at developing an AR coating for plastic substrates, which is itself scratch-resistant. As a result, a special type of AR design „AR-hard®“ with a quasi-periodic structure has been developed /1/. The complete coating can be deposited in a single physical vapor deposition process. The scratch resistance depends mainly on the total physical thickness. Coatings with thicknesses of 3 microns can be rubbed with steel wool without scratches /2/.

Antireflection coatings of the AR-hard® type can be visualized as an arrangement of symmetrical three-layer periods, each consisting of a very thin high refractive index layer H in the middle of two thick low refractive index layers L. Fig. 2 shows this principle schematically.

Typical layer materials are SiO₂ as a hard oxide with a low refractive index and TiO₂ as a high refractive index material.

Theory

Each of the symmetrical periods can be interpreted as an equivalent layer with three times the quarter wave optical thickness (3 QWOT). Any symmetrical combination of thin films (that is one in which the sequence of layers is unchanged when they are listed in reverse order) can be represented mathematically by a single equivalent film having an equivalent index n and an equivalent phase thickness. It has been demonstrated that symmetrical LHL periods of three QWOT's can be applied to replace layers with unobtainable refractive indices that are lower than the index of the low index material L used for the coating. The design concept of AR-hard® uses equivalent layers to build up a layer stack matching the refractive index of the substrate to that of air. The mathematical relation between the 3 QWOT periods and the respective thicknesses of the single layers H and L used to build up such periods, has been deduced as a condition for design synthesis /3/.



Uwe B. Schallenberg



Norbert Kaiser

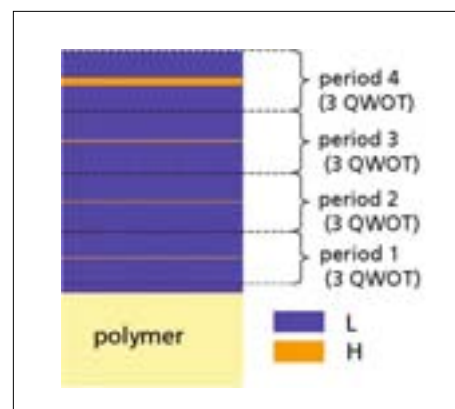


Abb. 2: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus von AR-hard® als Abfolge von symmetrischen 3-Schicht-Perioden.

Fig. 2: Schematic of coating design AR-hard®; arrangement of 3-layer periods.

Eine charakteristische Größe jedes Entspiegelungsbelages ist seine spektrale Bandbreite (BW). Sie ist definiert als der Quotient der Wellenlängen am langwelligeren und kurzwelligen Ende des entspiegelten Spektralbereiches. Die Bandbreite einer AR-hard®-Beschichtung, die aus den zuvor beschriebenen 3-Schicht-Perioden besteht, erreicht typisch einen Wert von ca. 1,5. Damit kann man zum Beispiel die Restreflexion im sichtbaren Spektralbereich von 420 nm bis 670 nm von 4 % auf < 0,1 % absenken (Abb. 3a). Für kleinere Bandbreiten kann die Restreflexion sogar auf einen Wert < 0,001 % reduziert werden (Abb. 3b).

Breitbandentspiegelung

Manche Anwendungen erfordern jedoch eine breitbandigere Entspiegelung. Beispiele dafür sind Linsen mit großem Krümmungsradius. Vorteilhaft sind breitere Entspiegelungsbeläge auch für Brillengläser, da der verbleibende Farbreflex dann sehr konstant für verschiedene Einfallswinkel des

Lichtes ist. Neue theoretische Untersuchungen des Designtyps AR-hard® haben gezeigt, dass die Bandbreite verbreitert werden kann, wenn man anstatt der 3-Schicht-Perioden andere Schichtaufbauten aus vier oder fünf Schichten verwendet, die insgesamt deutlich dicker sind (z. B. 4 QWOT oder 5 QWOT). In Abb. 4 ist ein solches Design schematisch dargestellt. Es besteht aus drei übereinander gestapelten Schichtfolgen, welche jeweils eine optische Dicke von 4 QWOT aufweisen. Mit diesem Designtyp kann zum Beispiel die Restreflexion eines Brillenglases aus CR 39 im Spektralbereich von 400 nm bis 800 nm auf 0,3 % gesenkt werden (Abb. 3c). Ein solches Brillenglas zeigt einen nur sehr schwachen Farbeindruck, der auch bei schräger Betrachtung unverändert bleibt (Abb. 5). Bemerkenswert ist, dass solche Designs nicht länger das Produkt von Optimierungsverfahren unter Verwendung von Dünnschichtsoftware sind, sondern mit Hilfe der neu abgeleiteten Algorithmen und Formeln berechnet werden können /4/.

Für die Entwicklung dieses Beschichtungsverfahrens erhielten die Wissenschaftler 2003 den Joseph-von-Fraunhofer-Preis.

Literatur:

- /1/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating“ PCT/DE 01/02501 (2000).
- /2/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating design for plastic optics“, Applied Optics 41, (2002) 3107–3110.
- /3/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Symmetrical periods in antireflective coatings for plastic optics“, Appl. Opt. 42, 1346–1351 (2003).
- /4/ Schallenberg, U. B.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Multicycle AR coatings: a theoretical approach“, SPIE 5250 (in print).

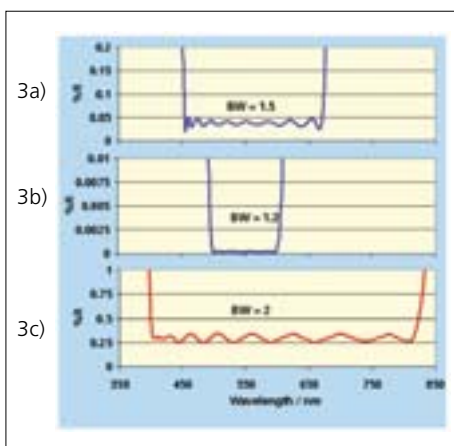


Abb. 3:
 Restreflexion von AR-hard®-Beschichtungen unterschiedlicher spektraler Bandbreite auf einem Polymersubstrat ($n = 1,53$)
 a), b) Anordnungen von 3-Schicht-Perioden mit 3 QWOT;
 c) Anordnung von Schichtstapeln mit 4 QWOT, die aus jeweils fünf Einzelschichten bestehen.

Fig. 3:
 Residual reflectance of AR-hard® coatings with different spectral bandwidth on polymer substrate ($n = 1.53$)
 a), b) arrangements of 3-layer periods with 3 QWOT;
 c) arrangement of layer stacks with 4 QWOT.

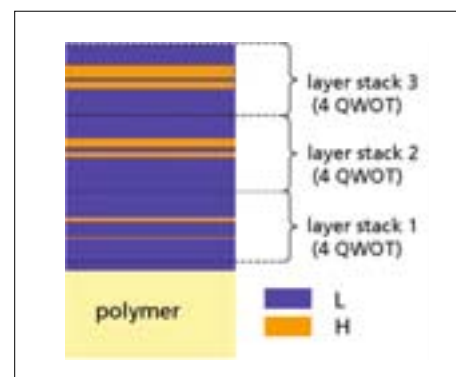


Abb. 4:
 Schematische Darstellung eines breitbandigen AR-hard®-Schichtsystems als Abfolge von jeweils aus fünf Schichten aufgebauten Schichtstapeln.

Fig. 4:
 Schematic of coating design AR-hard®: arrangement of layer stacks with thickness of 4 QWOT each.

A characteristic value for an AR design is its spectral bandwidth (BW) which is defined by the wavelength at the long wavelength end divided by the wavelength at the short wavelength end. The bandwidth of AR-hard®-coatings consisting of three layer LHL periods as described above is limited to about 1.5. This bandwidth covers, for example, the spectral range of visible light from 450 nm to 670 nm for a target residual reflection of 0.1 % as shown in Fig. 3a. Besides, for a bandwidth of 1.2 the residual reflectance can be decreased to less than 0.001 % (Fig. 3b).

Broadband antireflection coating

AR-hard® designs for broader bandwidth are required for optical parts with a high curvature radius and for applications which require a wide range for the angle of light incidence. In addition, broader designs are useful for eyeglass coatings with uniform color impression for different viewing angles. Our new investigations show,

that the bandwidth of AR-hard® can be broadened if layer stacks with greater total phase thickness are used in the step-down arrangement instead of the three layer periods LHL. As before, each of the layer stacks must meet the condition of mathematical equivalence to a single layer with very low refractive index. Such stacks with phase thickness of 4 QWOT and 5 QWOT are suitable to build up a design with an antireflection bandwidth up to 2 and 3 respectively. An AR-hard, design consisting of 3 layer stacks with 4 QWOT is shown schematically in Fig. 4. Using a design of this type, the residual reflectance of a CR39 polymer lens can be decreased to about 0.3% in a spectral region from 400 nm to 800 nm (Fig. 3c). For example, an eyeglass with such coating shows only a marginal color impression, which does not change with the viewing angle (Fig. 5). A notable fact is that designs of this type are not the result of optimization procedures with suitable thin-film software, they are analytical solutions using an algorithm and a set of formulas /4/.

For the development of this coating process the scientists 2003 received the Joseph of Fraunhofer price.

References:

- /1/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating“ PCT/DE 01/02501 (2000).
- /2/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Antireflective coating design for plastic optics,“ Applied Optics 41, (2002) 3107–3110.
- /3/ Schulz, U.; Schallenberg, U. B.; Kaiser, N.: „Symmetrical periods in antireflective coatings for plastic optics“, Appl. Opt. 42, 1346–1351 (2003).
- /4/ Schallenberg, U.B.; Schulz, U.; Kaiser, N.: „Multicycle AR coatings: a theoretical approach“, SPIE 5250 (in print).

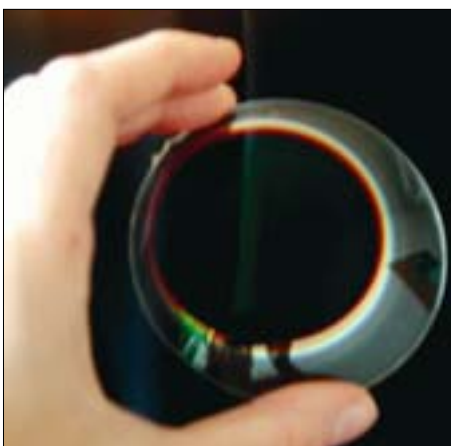


Abb. 5:
AR-hard®-Breitbandbeschichtung auf einer Teilfläche eines CR39-Brillenglases.

Fig. 5:
AR-hard® broadband coating on CR39 eyeglass.