

## HVG-Mitteilung Nr. 2002

Bericht über das HVG-Kolloquium "Beschichtung und Oberflächenveredelung von Glas"  
am 13. November 2001 in Frankfurt/Main

Am 13. November 2001 fand in Frankfurt ein HVG-Kolloquium zum Thema Beschichtung und Oberflächenveredelung von Glas statt. Im folgenden sind die Kurzfassungen der Vorträge zusammengestellt.

### **Innovative Architekturglasbeschichtung im Spannungsfeld von Funktionalität, Ästhetik und Wirtschaftlichkeit**

L. Herlitze, Lauenförde

Die Verwendung beschichteter Halbzeuge für die Herstellung von Isolierglas hat sich in Deutschland weitgehend durchgesetzt. Mehr als 90 % der hergestellten Verglasungen enthalten mindestens eine beschichtete Scheibe, die auf der Basis silberhaltiger Schichten veredelt wurde. Der Einsatz von Softcoatings befindet sich auch europaweit auf dem Vormarsch. Deutliche Zuwächse werden in den nächsten Jahren insbesondere auf Märkten wie Großbritannien, Frankreich, Polen, Ungarn und in den Baltischen Republiken erwartet. In Deutschland befindet sich die Baukonjunktur seit einigen Jahren auf Talfahrt, was sich insbesondere in Niedrigstpreisen - auch für beschichtete Basisprodukte - äußert. Die Einführung neuer optimierter Beschichtungssysteme auf Floatglas vollzieht sich demzufolge vor dem Hintergrund eines extrem harten Wettbewerbs.

Der Einsatz von mehr als 30 Mio. m<sup>2</sup> Low-E in Deutschland bedingt die Notwendigkeit, die Vermarktung (Service, Markenpolitik) sowie die Einseigenschaften der Gläser einem Massenmarkt anzupassen. Als Halbzeug hat sich die Verwendung silberbasierter Schichtsysteme durchgesetzt. Zu traditionellen Entspiegelungsschichten auf der Basis von SnO<sub>2</sub> und BiO<sub>x</sub> sind neue Materialien wie TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, NbO<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und ZnO für die Anwendung im Architekturglasbereich hinzugekommen. Der deutlich erhöhte Herstellungsaufwand für diese Schichtsysteme soll durch verbesserte Schichteigenschaften in Bezug auf technische Werte (Gesamtenergiedurchlassgrad (g), Lichtdurchlässigkeit (T<sub>L</sub>), Farbe, Emissionsvermögen (ε)) wettgemacht werden. Typische technische Werte für Wärmeschutzisoliergläser sind eine T<sub>L</sub> von 75 bis 78 %, ein g-Wert der Verglasung von 58 bis 62 % nach DIN sowie ein ε von 4 bis 5 %. Ein Wärmedurchgangskoeffizient U<sub>Glas</sub> nach DIN von 1,1 W/m<sup>2</sup>K ist heute Standard. Die technischen Eigenschaften der verwendeten Schichtsysteme sind an den physikalischen Grenzen, weitere Verbesserungen erscheinen schwierig. Zunehmende Bedeutung kommt der Verwendung von Sonnenschutzschichten auf Low-E-Basis zu. Neben ausgezeichneten U<sub>Glas</sub>-Werten zeigen diese Verglasungen die Fähigkeit, das Sonnenlicht selektiv durchzulassen, d. h. trotz einer hohen Transmission im sichtbaren Bereich (T<sub>L</sub> bis 70 %) wird die Durchlässigkeit für die Wärmestrahlung der Sonne auf ein Minimum herabgesetzt (g = 25 bis 35 %).

Immer stärker steht im Mittelpunkt des Glaseinsatzes im Gebäude ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Funktionalität (U-Wert, T<sub>L</sub>, g-Wert, Sicherheit, Schallschutz etc.) und Ästhetik (Farbe, Transparenz, Geometrie). Die Herstellverfahren für Low-E-Beschichtungen unterliegen derzeit einem technischen Wandel. Neben der in den vergangenen Jahrzehnten dominanten DC-Magnetron-Technologie finden zunehmend MF-Techniken sowie Doppel- und Rohrkathoden Einsatz. Das verursacht bei schwierigen wirtschaftlichen Bedingungen eine Gradwanderung zwischen Kosten für Investitionen, Material, Energie und verbesserten Eigenschaften (technische Werte, Handlingeigenschaften, chemische und mechanische Stabilität der Schichten). Höchste Anforderungen an Schichthomogenität und Konstanz der technischen Eigenschaften erfordern verstärkten Aufwand für Qualitätssicherung und Überwachung. Eine gemeinsame europäische Vorgehensweise, minimaler Überwachungsaufwand und De-regulierung sind hier anzustreben.

Für die Zukunft erwarten wir den verstärkten Einsatz von Sonnenschutzprodukten, auch im Wohnungsbau und der Renovierung. Als Basisinnovation soll in den nächsten Jahren der Durchbruch gaschrom schaltender Verglasungen gelingen.

### **Elektrochrome Beschichtungen für Bauglas, Fahrzeugglas und Rückblickspiegel**

H. Wittkopf, Furth im Wald

Basierend auf dem elektrochromen Effekt des  $\text{WO}_3$  werden verschiedene Aufbauten in Dünnschicht und Dünnschicht/Verbundkombinationstechnik vorgestellt und diskutiert. Es wird versucht, die Machbarkeit eigener Entwicklungsarbeiten und die Ergebnisse anderer Forschungsgruppen an Universitäten, Instituten und der Industrie zu beurteilen.

Das Kernstück der technischen Realisierung elektrochromer Systeme in den genannten Produktbereichen ist die Qualität der Beschichtung und die Beherrschung entsprechender Dünnschichttechnologien. Dabei kommt es neben der Gleichmäßigkeit der Schichtdicke und der optischen Eigenschaften (bis 3 m Breite für Bauglasanwendungen) auch auf die Reinheit der Materialien, den Ausschluss von Schichtstörungen und auf die elektrochemische Stabilität der Schichtsysteme an. Die sogenannte "all solid state" Technologie erfordert aufgrund der im System herrschenden Feldstärken ein noch höheres Maß an Konstanz in den Schichteigenschaften.

Die Flabeg verfolgt im Bereich der Bauglasanwendungen mit dem Produkt EControl das Konzept der Kombination von Dünnschicht und Verbundtechnologie. Es wird über die technischen Daten und erste Anwendungserfahrungen dieses modernen Sonnenschutzglases mit variablen Eigenschaften berichtet.

### **Mikrostrukturierte Glasoberflächen**

P. Manns, Freiburg

Die grundlegenden Eigenschaften von Glasoberflächen werden durch ihre chemische Zusammensetzung und ihre Struktur bestimmt. Durch Modifizierung der topologischen oder chemischen Struktur können zusätzliche funktionale Eigenschaften von Glasoberflächen erzielt werden. In diesem Beitrag wird über aktuelle Forschungsergebnisse zur Funktionalisierung von Glasoberflächen durch Mikrostrukturierung berichtet.

Die Entspiegelung von Glasoberflächen durch Einprägen von Strukturierungen im Submikrometer-Maßstab ist ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten. Ziel dabei ist es, geeignete Strukturierungen mittels direkter oder indirekter Prägung in die Glasoberflächen einzubringen, mit denen eine spektral breitbandige Reflexionsminderung und eine signifikante Erhöhung der Lichttransmission erreicht werden können. Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten ist es, solche reflexionsmindernden "Mottenaugenstrukturen" und andere optisch funktionale Mikrostrukturen mit entsprechenden Formwerkzeugen in einem Arbeitsschritt direkt bei der Heißformgebung der Komponenten in die Glasoberfläche einzuprägen. Für die Oberflächenstrukturierung der dazu erforderlichen Formwerkzeuge werden nanoskalig konditionierte Schichtwerkstoffe erforscht, die in Form von temperatur- und verschleißbeständigen Hartstoffschichten mit stochastisch wachsenden Kristalliten in den erforderlichen Dimensionen auf Formwerkzeugsubstraten abgeschieden werden können. Diese Entwicklungslinie eröffnet neue Möglichkeiten für die kostengünstige Entspiegelung von Glaskomponenten durch Heißformtechniken, insbesondere auch solchen mit nicht-ebenen Oberflächenkonturen und mit Freiformoberflächen.

Für das Heißprägen von periodischen Strukturierungen im Mikrometer-Maßstab in Glasoberflächen zur kostengünstigen Herstellung diffraktiver und refraktiver mikrooptischer Komponenten werden hochbelastbare Composit-Schichtwerkstoffe für spanabhebend bearbeitete Präzisionsprägwerkzeuge entwickelt. Damit sollen diffraktive optische Elemente wie optische

Beugungsgitter für integriert-optische Komponenten und optische Sensoren aus anorganischen optischen Gläsern für breite Wellenlängenbereiche vom nahen UV zum mittleren IR hergestellt werden.

Das Heißprägen von stochastischen Strukturierungen im Mikrometer-Maßstab eröffnet das Potential für die Erzeugung von leicht zu reinigenden Glasoberflächen (Lotusblüten-Effekt). Zusätzlich können durch geeignete chemische Modifikationen die Benetzungseigenschaften von Glasoberflächen von hydrophil (für die Anti-Beschlag-Ausrüstung von Sichtfenstern) bis hydrophob (für schmutzabweisende Glasoberflächen) eingestellt werden.

Neue Entwicklungen zielen darauf ab, Glaskomponenten mit verbesserten Gebrauchseigenschaften, z. B. für optische Anwendungen wie Displayabdeckungen, Flachbildschirme, Autoverglasungen und -spiegel, Glasschalter, optische Sensoren, mikrooptische Komponenten usw., durch Kombination der funktionalen Eigenschaften von Submikron-Strukturierungen und chemischen Oberflächenmodifikationen der Gläser herzustellen. Die gewünschten Eigenschaftsprofile für die jeweiligen Anwendungsfälle müssen im Hinblick auf hohe Entspiegelung, verbesserte Reinigungsfähigkeit und hohe Kratzfestigkeit durch geeignete Kombination von Oberflächentopologie und -chemie optimiert werden.

Anhand aktueller Entwicklungsbeispiele werden Verfahren zur Herstellung von submikronstrukturierten und chemisch modifizierten Glasoberflächen vorgestellt sowie Eigenschaften und Anwendungen von solchen funktionalisierten Glasoberflächen aufgezeigt.

### **Lasersintern von Beschichtungen auf Glas**

F. Raether, K.H. Lochner, Würzburg

Laser liefern Energie mit hoher Leistungsdichte in einer prozesstechnisch wohlkontrollierbaren Form. Ihr Einfluss in der Materialbearbeitung z. B. beim Trennen und Verbinden nimmt deshalb stark zu. Die lokale Erwärmung durch einen Laser wird auch zum Einbrennen von Beschichtungen auf Gläsern genutzt. Wenn das zu erwärmende Volumen wesentlich kleiner als das Bauteil ist z. B. bei Produktbezeichnungen, ist der Laser wirtschaftlicher als ein herkömmlicher Ofen. Darüber hinaus besitzen Laser besondere Vorteile, wenn die zum Einbrennen der Beschichtung benötigten Temperaturen höher sind, als die Transformationstemperaturen der beteiligten Gläser.

Beispielsweise müssen Emailfarben auf volumetrischen Messgeräten (Messzylinder, Messkolben, Pipetten oder Büretten) aus Borosilicatglas ca. 50 bis 70 K oberhalb der Transformationstemperatur eingebrannt werden. In einem herkömmlichen Ofen kann sich das Messgerät dabei verformen, was zu Messfehlern führt. Die lokale Erwärmung durch einen Laser erlaubt dagegen ein rasches und verzugsfreies Einbrennen der Emailfarben auf dem Glas. Vorgestellt wird eine neuartige Anlage mit Hybridheizung (Nd-YAG-Laser plus IR-Heizung), mit der ein kontinuierlicher Einbrennprozess möglich wird.

Ein anderes Beispiel stellen Korundbeschichtungen auf Borosilicat- oder Kieselgläsern dar. Solche Schichten bewirken einen hervorragenden Verschleißschutz. Allerdings liegen die Sintertemperaturen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  um mehrere 100 K höher als die Transformationstemperaturen von Gläsern. Neben der Verformung der Gläser tritt beim herkömmlichen Sintern außerdem eine starke Diffusion zwischen der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung und dem Glas auf. Korundschichten können deshalb nur eingebrannt werden, wenn die lokale Erwärmung nur wenige Mikrosekunden andauert. Derart extreme Anforderungen werden durch eine Lasersinteranlage erfüllt, die den Strahl eines  $\text{CO}_2$ -Lasers sehr rasch - mit Hilfe von beweglichen Spiegeln - über das Bauteil führt. Auf diese Weise werden optische homogene nanokristalline Korundschichten auf den Gläsern erzeugt. Das Verfahren eignet sich auch für großflächige oder zylindrische Bauteile und kann auf andere Beschichtungs- und Substratmaterialien übertragen werden.

**Untersuchungen zur Festigkeit von Glas: Festigkeitserhaltende und festigkeitserhöhende Beschichtungen auf Glas**

M. Mennig, Saarbrücken

Die aus dem Stand der Technik bekannten festigkeitserhaltenden Beschichtungen auf Glas zeigen große Nachteile im Recycling. So muss z. B. bei einer Wiederaufbereitung der Scherben von beschichteten Glasflaschen die Beschichtung abgetrennt werden, um ein Verschleppen von zu hohen Kohlenstoffanteilen in die Glasschmelze sicher zu verhindern. Es wurde daher das Ziel verfolgt, festigkeitserhaltende Schichten zu entwickeln, die in der Lage sind, Glasoberflächen wirksam vor mechanischen Schäden zu schützen und dabei keinen negativen Einfluss auf die Recyclingeigenschaften des Glases haben. Ausgangspunkt für die Untersuchungen war Floatglas der Dimension  $100 \text{ mm}^2 \times 4 \text{ mm}$ . Die Bruchfestigkeit wurde mittels Doppelringbiegeversuch nach DIN 52292 bestimmt. Dabei wurde eine Ausgangsbruchfestigkeit von 174 MPa (Vertrauensbereich 163 - 186) mit einem Weibull-Parameter ( $m$ ) von 4,9 (3,7 - 6,0) gefunden. Um die Gläser einer praxisnahen Schädigung zu unterziehen, wurde ein Sandrieseltest mit 500 g Korund durchgeführt. Die geschädigten Scheiben zeigten einen Abfall der Bruchfestigkeit auf 60 MPa (59 - 61) mit einem hohen Weibull-Koeffizienten  $m$  von 33,4 (25 - 40,7). Es wurde eine Nanomer-Beschichtung auf der Basis eines Epoxy- und Aminosilans entwickelt, die über einen Tauchprozess aufgetragen und bei  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  für 10 min verdichtet wurde. Durch systematische Variation der Synthese- und Prozessparameter gelang es, die Beschichtung so zu optimieren, dass die Gläser vor der Sandrieselschädigung perfekt geschützt wurden. Die beschichteten Gläser (Schichtdicke  $25 \text{ }\mu\text{m}$ ) zeigten nach Schädigung eine Bruchfestigkeit  $\sigma_0$  von 170 MPa (159 - 181) und einen Weibull-Parameter von 5,2 (3,9 - 6,3). Die Schutzwirkung konnte auch für Borofloatglas ( $100 \text{ mm}^2 \times 2 \text{ mm}$ ) gezeigt werden.

In einem Praxisversuch wurden heißendvergütete 1 l-Softdrinkflaschen einer Formnummer untersucht. Die Flaschen wurden am Kühllofen entnommen, über dipcoating beschichtet, für 10 min bei  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  wärmebehandelt und anschließend in einem Liniensimulator getestet. Während Flaschen mit herkömmlicher Kaltendvergütung bereits nach 7 Minuten einen inakzeptablen Verlust der Berstdruckfestigkeit zeigen, ist im Fall der Nanomerschicht auch nach 15-minütiger Liniensimulation keine signifikante Abnahme der Berstdruckfestigkeit zu verzeichnen. Auch bei wässriger Liniensimulation ist die Nanomerschicht der traditionellen Kaltendvergütung deutlich überlegen. Die mit Nanomer® beschichteten Flaschen zeigten untereinander Haftreibung (Abgleitwinkel  $80^\circ$  gegenüber  $20^\circ$  bei herkömmlicher Kaltendvergütung), was erfahrungsgemäß zu Stau in Abfüllanlagen führt. Mit  $^{29}\text{Si}$  bzw.  $^{13}\text{C}$  Festkörper NMR Analysen konnte gezeigt werden, dass die zu hohe Haftreibung auf unzureichende organische Vernetzung der Beschichtung zurückzuführen war. Durch Zugabe von ca. 2,5 % (MA)  $\text{ZrO}_2$ -Nanopartikel bzw. 0,5 % (MA) Aluminiumalkoxid zum Sol konnte der organische Vernetzungsgrad von 60 % auf 90 % erhöht werden, wodurch sich der Abgleitwinkel auf  $20^\circ$  verringerte, was dem praxistauglichen Wert der herkömmlichen Kaltendvergütung entspricht. Die untersuchten Modifizierungen zeigten keine Verschlechterung der Schutzwirkung der Beschichtungen im Sandrieseltest. Im Hinblick auf eine mögliche industrielle Anwendung gelang es, das Beschichtungsverfahren auf spray-coating umzustellen. Das Beschichtungssol wurde sowohl auf kalte, als auch auf ca.  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  warme Substrate aufgebracht. In einem weiteren Praxisversuch konnte das optimierte Solsystem auch beim spray-coating auf warme Flaschen erneut seine Überlegenheit gegenüber der herkömmlichen Kaltendvergütung unter Beweis stellen. Fallen bei der Kaltendvergütung vom Typ II fast alle Probenspezies unter die Ausschlussgrenze von 16 bar, kann eine nur  $7 \text{ }\mu\text{m}$  dicke Schicht der entwickelten Beschichtung alle Flaschen einer Probenserie sicher vor den Schädigungen einer 2-minütigen nassen Liniensimulation schützen. Durch den, ohne Beeinträchtigung der Schutzwirkung, geglückten Einbau von zusätzlichen Faktoren wie Farbe oder UV-Schutz konnte eine zusätzliche Aufwertung der Beschichtung erzielt werden. Der hohe  $\text{SiO}_2$ -Gehalt (ca. 55 Gew.-%) der Beschichtung lässt ein Recycling so beschichteter Flaschen als unkritisch erscheinen.

## **Dekorative und funktionelle Veredelung von Glasoberflächen mit hybriden Sol-Gel-Schichten**

G. Schottner, K. Rose, J. Krone, K.-J. Deichmann, Würzburg

Herausragende Eigenschaften von Gläsern sind die hohe Lichtdurchlässigkeit, mechanische Festigkeit und Bewitterungsbeständigkeit. Diese Vorteile ermöglichen den großtechnischen Einsatz in der Architekturverglasung sowie im Fahrzeugsektor. Die hohe chemische Beständigkeit und Inertheit der Glasoberfläche ermöglicht weiterhin ihre Verwendung im Lebensmittelverpackungs- oder im Laborausstattungsgebiet. Besonders eindrucksvoll sind Farbgläser in Kathedralen und sie sind unverzichtbare Hilfsmittel in der Verkehrstechnik in Form von Signalgläsern.

Eine einfache Methode zur Veredelung von Glasoberflächen ist das Sol-Gel Verfahren. Damit können rein anorganische oder hybride (anorganisch-organische) Schichten erzeugt werden, die eine Veränderung der Transmissionseigenschaften, der Oberflächenpolarität oder eine breite Farbgebung ermöglichen. Die Verwandtschaft der Strukturen, die beim Sol-Gel Prozess aufgebaut werden, mit der Struktur des Glases, führt in der Regel zu einer sehr guten Haftung und Abriebfestigkeit der Schichten; die Verträglichkeit der hybriden Sol-Gel Matrices mit organischen Farbstoffen zu einer sehr breiten Farbpalette. Die Kombination dieser Eigenschaften mit Antihalt- oder Antireflexwirkungen ermöglicht die Herstellung neuer multifunktionaler Schichten mit breitem Anwendungspotential.

Es wird berichtet über die Synthese hybrider Schichtwerkstoffe, die Charakterisierung der erzeugten Netzwerkstrukturen mittels moderner spektroskopischer Methoden sowie die zugehörige Beschichtungstechnologie einschließlich anwendungsrelevanter Prüfmethode für die damit hergestellten Schichten. Ausgewählte Anwendungsbeispiele beleuchten den derzeitigen Stand der Technik und zeigen den weiteren Entwicklungsbedarf auf.

## **Anwendungen des PICVD - Verfahren zur Oberflächenveredelung von Glas und Kunststoff**

M. Kuhr, Mainz

Die Entwicklung alternativer sowie die Modifikation bereits vorhandener Beschichtungstechnologien sind notwendige Voraussetzungen für die Erarbeitung neuer Anwendungsfelder für optische Funktionsschichten.

Als Beispiel hierfür kann die von Schott Glas entwickelte PICVD - Technologie betrachtet werden. Plasma Impulse Chemical Vapor Deposition wurde vor 10 Jahren entwickelt und als erste CVD - basierte Technologie zur Massenproduktion beschichteter optischer Glaskomponenten eingesetzt (Kaltlichtspiegel, Infrarot reflektierende Beschichtung, Filter,...). Die Besonderheit dieser Technologie gegenüber Standardverfahren liegt in einer Kombination aus verfahrenstechnischen und fertigungstechnischen Vorteilen.

Mit Hilfe eines gepulsten Plasmaverfahrens lassen sich besonders effizient dreidimensional geformte Substrate mit extrem kurzen Prozesszeiten beschichten. Das verwendete Einzelplatz-Konzept zur Massenproduktion führt zu neuen kostengünstigen Fertigungsmöglichkeiten und einer bisher nicht vorhandenen in-line-Tauglichkeit bei der Produktion von einzelnen optischen Artikeln in großer Stückzahl.

Neben den bekannten Glaskomponenten halten Kunststoffe seit Jahren Einzug in den Bereich optischer Technologien. Deren Veredelung stellt eine große Herausforderung für jede Beschichtungstechnologie dar, da neben den üblichen optischen Funktionsschichten z. B. auch Kratzschutzschichten in ein Schichtsystem integriert werden müssen.

Bei Untersuchungen zur Beschichtung von Kunststoff-Brillengläsern mittels PICVD wurde deutlich, dass diese Technologie besonders für thermolabile Substrate geeignet ist. Das ge-

pulste Plasma erlaubt eine kontrollierte Einstellung der Prozesstemperatur und darüber hinaus die Abscheidung komplexer Schichtsysteme bei niedrigsten Temperaturen ( $< 50\text{ °C}$ ). Es hat sich gezeigt, dass ein breiter Bereich sehr unterschiedlicher Polymere auf diese Art kostengünstig und mit unterschiedlichen Schichtfunktionen veredelt werden kann.

### **Antiadhäsive Nanomer<sup>®</sup>-Beschichtungen: Maßgeschneiderte Werkstoffe**

S. Pilotek, H. K. Schmidt, Saarbrücken

Nassbeschichtungen in optischer Qualität haben für Glas immer ein interessantes Potential, besonders dann, wenn damit Werkstoffe auf die Oberfläche aufgetragen werden können, die über Gasphasenprozesse schwer oder überhaupt nicht zugänglich sind.

Zu diesen Werkstoffen gehören Nanokomposit-Materialien mit einer polymerartigen Matrix und anorganischen Partikeln (Nanomere). Solche Komposite erlauben aufgrund ihres variablen Aufbaus die zielgerichtete Optimierung des Werkstoffes für spezielle Anwendungen bei gleichzeitiger hoher Transparenz, da Nanopartikel, wenn sie klein genug und in einer transparenten Matrix gut dispergiert vorliegen, eine vernachlässigbare Licht-Streuung aufweisen. Über die Verwendung der Partikel ist es möglich, Eigenschaften eines anorganischen Festkörpers wie z. B. eine hervorragende Härte in das Nanomer im Sinne eines Baukastensystems einzubringen.

Eine besonders interessante Technologieplattform ergibt sich aus der Verwendung von fluoralkylhaltigen Alkoxysilanen. Bei geeigneter Reaktionsführung lassen sich flüssige Mischungen erhalten, die zur hydrophoben und oleophoben Beschichtung von Glas verwendet werden können. Die antiadhäsiven Eigenschaften der fluoralkylhaltigen Nanomere sind denen von perfluorierten Kunststoffen vergleichbar. Gegen Wasser werden statische Kontaktwinkel bis zu  $110\text{ °}$  und gegen Hexadekan (Öl) von bis zu  $50\text{ °}$  gemessen.

Die Anwendungsmöglichkeiten von antiadhäsiven Nanomer-Beschichtungen sind vielfältig. Sie können in Formgebungsprozessen die Entformung erleichtern, Graffiti-Angriffen entgegenwirken oder auch als leicht reinigbare Oberflächen verwendet werden. Darüber hinaus kann der Antihafteffekt auch als antiadsorptive Beschichtung genutzt werden, wie Thermodesorptions-(TD)-GCMS-Untersuchungen mit aggressiven Substanzen gezeigt haben. Die Beschichtungen sind dabei transparent, was sie zur Anwendung auf Glasoberflächen prädestiniert.

Für die Anwendung auf Glas ergibt sich dabei eine deutlich leichtere Reinigbarkeit, jedoch kein, wie oft propagiert, selbst reinigender Effekt. Im Unterschied zu den anfänglich entwickelten Systemen zeichnen sich die jetzt entwickelten oder sich im Entwicklungsstadium befindenden Werkstoffe durch höhere Abriebs- und Haltbarkeitsdaten aus und können zudem auch über Spray-Coating-Verfahren aufgetragen werden. Neben der thermischen Härtung bei  $T \geq 250\text{ °C}$  lassen sich über die Verwendung polymerisierbarer organischer Gruppen niedrigere Temperaturen anwenden, z. B. kann die Härtung dann photochemisch erfolgen. Im Extremfall lassen sich die Beschichtungen bei Zimmertemperatur aushärten. Dies ist z. B. durch den Einsatz von Kondensationskatalysatoren möglich.

Das Grundprinzip aller dieser Schichten ist die Ausbildung einer Gradientenschicht nach dem Auftragen, wobei sich eine Haftschrift zum Glas und eine Antihaftschicht an der Oberfläche ausbildet. Treibende Kraft für dieses Verhalten ist die Grenzflächenthermodynamik, die durch die Zusammensetzung der Schicht eingestellt wird. Dies ist gerade über die Nanotechnologie gut realisierbar, namentlich über die Kombinierbarkeit von Schlüsselfunktionen. Die vorgestellten Beschichtungen verbinden bereits interessante Eigenschaften wie Haftung auf unterschiedlichen Substraten, Transparenz und Härte mit der Antihafffunktion. Darüber hinaus sind in Nanomere zusätzliche Eigenschaften integrierbar. So lässt sich das polymerartige Netzwerk durch eine gezielte Einstellung der Partikelgrößenverteilung mit einer gezielten Oberflächenrauigkeit ausstatten, über die die Kontaktwinkel gegenüber Wasser und Öl deutlich erhöht

werden können (150 bis 160 °, bzw. 110 bis 120 °). Solche superantihäsiv wirkende Oberflächen haben einen extremen Easy-to-Clean Effekt und können trotzdem noch transparent sein. Damit sind solche Beschichtungen besonders für Anwendungen interessant, bei denen die Reinigung schwer zugänglicher transparenter Flächen erleichtert werden soll, wie z. B. im Architekturbereich bei Glasbedachungen oder schwer zugänglichen Sichtfenstern.

Das Potential von Nanomaterialsystemen ist jedoch mit antiadhäsiven Schichten mit optischer Qualität nicht erschöpft. Gerade die Kombination von Matrix mit funktionellen Nanopartikeln ermöglicht weitere interessante Eigenschaften, wie photokatalytische Eigenschaften, prägbare (photochrome Holographie, Datenspeicherung) Schichten oder v.a.m.

### **Oberflächenbeschriftung mit Lasern**

A. Lenhart, Nürnberg

Keramikfarben werden in der Regel zur Kennzeichnung und zu dekorativen Zwecken auf Glassubstrate aufgebracht. Die Farben bestehen aus einer Glasfritte und keramischen Farbkörpern, die durch Drucktechniken, wie dem Tampondruckverfahren, oder dem Abziehbildverfahren aufgebracht werden. Da die Einbrenntemperaturen begrenzt sind ist die chemische Beständigkeit solcher Schichten oft nicht befriedigend. Des Weiteren zeichnen sich die etablierten Verfahren durch eine geringe Flexibilität und hohe Kosten aus, wodurch deren Anwendung begrenzt ist.

Bei dem hier vorgestellten Verfahren, der Lasertechnik, werden die Farben auf kalte Substrate aufgeschmolzen. Dieses Verfahren zeichnet sich durch ein hohes Maß an Flexibilität aus, so dass selbst komplexe Bauteile, wie z. B. Verbundwerkstoffe, beschichtet werden können. Da der Laserstrahl rechnergesteuert über das Substrat geführt wird, können beliebige Bilder erzeugt werden. Deshalb erlaubt dieses Verfahren auch eine Produktkennzeichnung durch Barcodes.

Das Beschichtungsverfahren selbst umfasst drei Verfahrensschritte. Im ersten Schritt wird mit Hilfe geeigneter Verfahren das Beschichtungsmaterial, welches in wässriger Lösung dispergiert ist, auf das Substrat aufgebracht. Nach einer kurzen Trockenperiode erfolgt das Einbrennen mit dem Laserstrahl. Zum Schluss wird das überschüssige Material durch Bürsten oder Waschen entfernt und recycelt.

Die Eigenschaften der so erzeugten Schichten hängen von verschiedenen Faktoren ab. Großen Einfluss haben die verwendeten Glasfritten, Keramikpigmente und das Absorptionsmaterial. Aber auch die Laserparameter haben erheblichen Einfluss auf das Beschichtungsergebnis. Die Einwirkzeit des Lasers auf den jeweiligen Partikel liegt im Submillisekundenbereich, wobei die erzielten Temperaturen im Bereich von etwa 1400 °C liegen.

Beim Laserbeschichtungsverfahren lassen sich zahlreiche Beschichtungseigenschaften einstellen. Schichteigenschaften, wie Struktur, Glanz, Glätte und chemische Beständigkeit können gezielt optimiert werden. Es können prinzipiell alle Farben erzeugt werden.

Festigkeitsuntersuchungen an beschichteten Proben zeigten, dass die mittlere Festigkeit der Proben durch eine sehr geringe, aber gleichmäßige Schädigung um etwa 20 % fällt. Der Weibullmodul selbst steigt jedoch erheblich an, so dass sich für die Bauteile keine Einschränkung der Gebrauchsfestigkeit ergibt.

