

Dünne Schichten für eine bessere Welt – Eine Zeitreise durch vier Jahrzehnte

In der Geschichte der Dünnschichttechnologie wurden zahlreiche Meilensteine erreicht, die in den letzten vier Jahrzehnten zu einer Revolution in der Informations- und Unterhaltungsbranche geführt haben. Zudem konnten mittels dünner Schichten viele Fertigungsprozesse optimiert sowie Arbeitsbedingungen verbessert werden.

Prof. Dr. Günter Bräuer

Zur Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer und ökologischer Ebene trat am 1. Januar 2016 die erste globale Entwicklungsagenda der Vereinten Nationen „Ziele für nachhaltige Entwicklung“ (Sustainable Development Goals) in Kraft. Sie hat eine Laufzeit von 15 Jahren und gilt für alle Staaten. Von den 17 dokumentierten Zielen sind mindestens 8 direkt oder indirekt mit Oberflächenfunktionalisierung beziehungsweise Beschichtungen verknüpft. Dies zeigt einmal mehr die enorme Bedeutung der Oberflächentechnik als Querschnitts- und Schlüsseldisziplin. Während der letzten vier Jahrzehnte wurden hier in fast jeder Branche Meilensteine erreicht und stetig neue Anwendungsfelder erschlossen. Dazu gehören aktuell Batterie- und Wasserstofftechnologie sowie die Lebenswissenschaften mit den Schwerpunkten Gesundheit, Ernährung und sauberes Trinkwasser.

Dünnschichttechnologie als Innovationstreiber

Als Mitte der 1970er die ersten Taschenrechner mit wissenschaftlichen Funktionen auf den Markt kamen, kosteten sie zwischen 1500 und 2000 DM. Heute

gibt es für etwa die Hälfte dieses Preises ein ähnlich großes Kästchen, mit dem man das Wissen der Welt abfragt, Nachrichten empfängt oder sendet, Videos schaut und sogar in hoher Qualität fotografiert. Nebenbei lässt sich damit auch telefonieren.

Mitgeholfen hat bei dieser und ähnlichen atemberaubenden Entwicklungen die Dünnschichttechnologie. Produkte,

die auf den Eigenschaften dünner Schichten beruhen, haben eine Revolution in der Welt der Information und Unterhaltung bewirkt. Sie haben weiterhin zur Optimierung vieler Fertigungsprozesse und der Schaffung besserer Arbeitsbedingungen in den Werkhallen beigetragen. Moderne Glasarchitektur ist durch dünne Schichten erst möglich geworden. Zudem leisten sie einen entscheidenden Beitrag

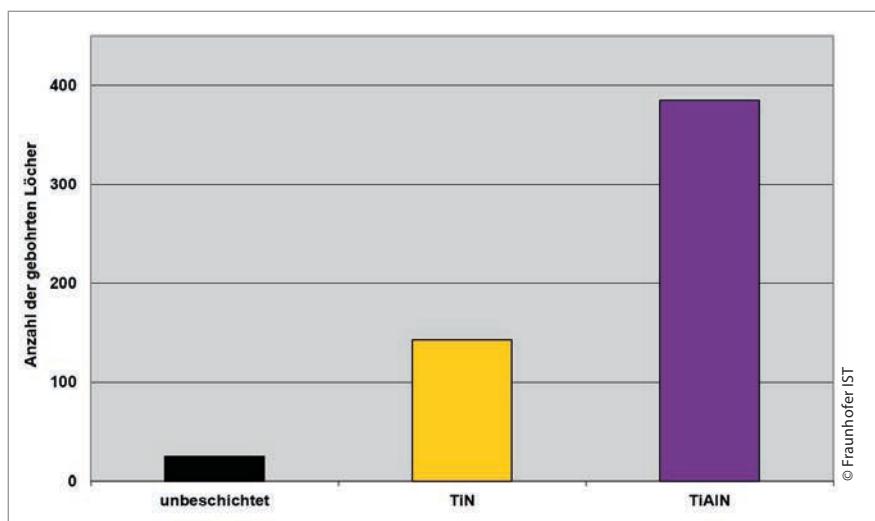
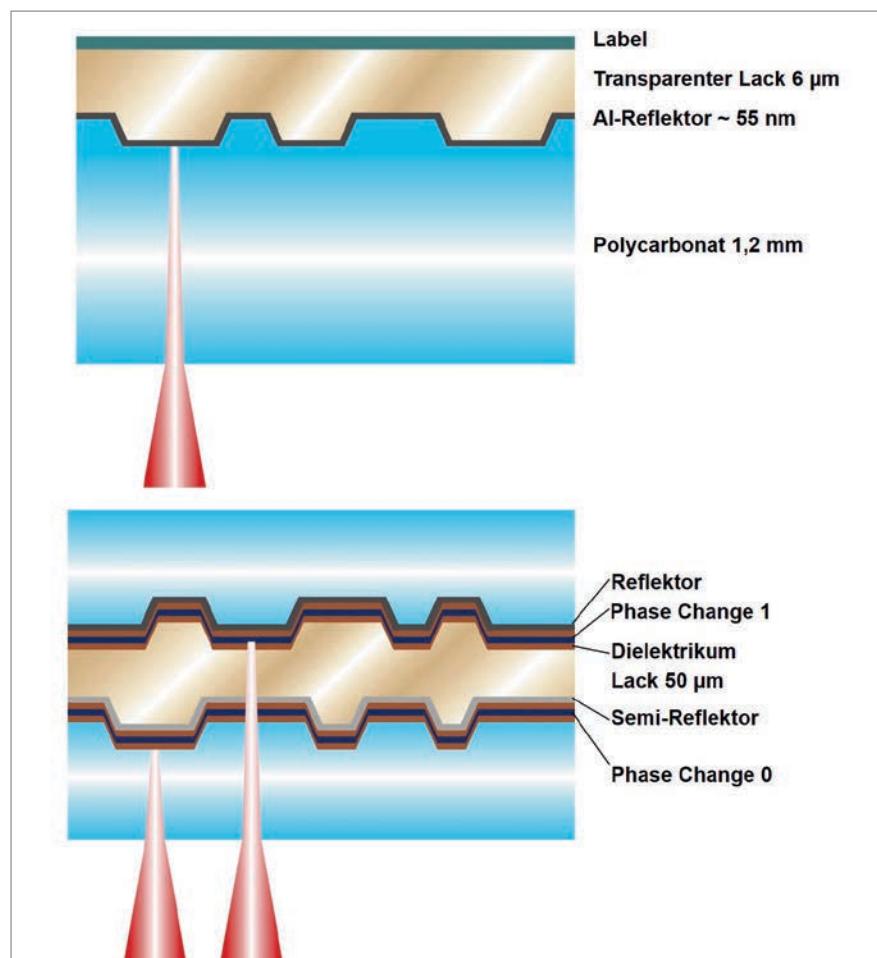


Bild 1 > Bohrtests zeigen deutlich die Überlegenheit von TiN- und TiAlN-Schichten gegenüber dem unbeschichteten Werkzeug.

Bild 2 > Aufbau von CD/CD-ROM (oben) und doppellagiger wiederbeschreibbarer DVD-8,5 RW (unten).



© Fraunhofer IST

bei dem Wechsel von fossiler zu regenerativer Energie.

Dünne Schichten überdecken einen Bereich zwischen etwa 10 nm und 10 µm, wobei die Grenzen fließend sind. Sie kommen in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen zum Einsatz und können vielfältige Funktionen übernehmen, zum Beispiel:

- Reibung und Verschleiß reduzieren
- Optik verbessern
- warmhalten oder kühlen
- Korrosion hemmen
- Sauberkeit sichern
- Bild und Ton erzeugen
- Informationen speichern
- Energie wandeln
- Störgeräusche reduzieren

Reib- und verschleißarme Kohlenstoffmodifikationen

Begeben wir uns auf eine Zeitreise durch die Welt der dünnen Schichten, gelangen wir an zahlreiche Stationen, die das heutige Leben und die industrielle Entwicklung entscheidend geprägt haben. Wir beginnen unsere Reise im Jahr 1980 mit einem Meilenstein in der Werkzeugbeschichtung: Das Unternehmen Gühring stellte die ersten TiN-beschichteten Bohrer vor. Mit einer Mikrohärte von 2000 bis 2500 HV (etwa viermal so hart wie gehärteter Stahl) und einer Arbeitstemperatur bis 500 °C ist TiN heute der „Klassiker“ unter den Hartstoffschichten. Die Goldfarbe macht es zudem attraktiv für dekorative Anwendungen.

Auf TiN folgte einige Jahre später TiAlN mit einer Mikrohärte bis über 3000 HV und einer Erweiterung des Arbeitstemperaturbereichs bis 800 °C. In einer Publika-

tion aus dem Jahr 1987 [1] wird die deutliche Überlegenheit von TiN- und TiAlN-Schichten gegenüber dem unbeschichteten Werkzeug demonstriert (Bild 1).

Reibung, Verschleiß und Korrosion sind Phänomene, die Lebensdauer, Belastbarkeit und Einsatzgrenzen von Bauteilen und Werkzeugen bestimmen. Der entsprechende volkswirtschaftliche Verlust wird in hochentwickelten Industrieländern auf 2 bis 3 % des Bruttosozialprodukts geschätzt – in Deutschland sind dies rund 50 Mrd. Euro jährlich.

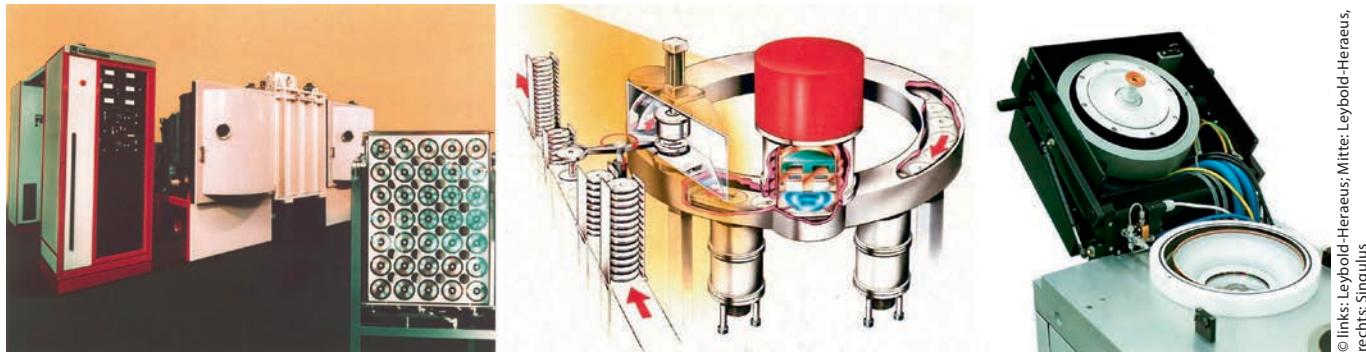
Die Entwicklung von reib- und verschleißarmen Kohlenstoffmodifikationen stellt seit Mitte der achtziger Jahre einen Schwerpunkt der Dünnschichttechnologie

dar. Diamantähnliche Kohlenstoffschichten (diamond-like carbon oder DLC), eine amorphe Mischung aus den beiden Basisallotropen Graphit und Diamant, erreichen Härten bis 4.000 HV bei Reibkoeffizienten um 0,1. Mitte der neunziger Jahre wurden DLC-Schichten erstmalig auf Automobilkomponenten für die Diesehochdruckeinspritzung eingesetzt, sie haben damit wesentlich zur Leistungsfähigkeit heutiger Dieselmotoren beigetragen.

Optische Datenträger – Von der Schallplatte zur Blu-ray

Auch im Bereich der Datenspeicherung spielt die Dünnschichttechnologie eine





© links: Leybold-Heraeus; Mitte: Leybold-Heraeus,
rechts: Singulus

Bild 3 > Metallisierung von Compact Discs in Batch-Anlagen 1983 (links) sowie Kurztaktanlagen 1987 (Mitte) und 1998 (rechts).

bedeutsame Rolle. Die Schallplatte hatte gerade ihren 100. Geburtstag gefeiert, als die Musikbranche eine neue Revolution erlebte: die Digital Audio Compact Disc. Sie verdrängte innerhalb weniger Jahre die schwarze Vinylscheibe vom Markt. Zum Auslesen benötigt die CD eine etwa 55 nm dicke Aluminiumschicht (Bild 2). Der „Audio-Revolution“ folgte ein Paradigmenwechsel in der Beschichtungstechnik: Zwischen 1983 und 1987 lösten Einzelplattenanlagen („Ringläufer“) die etablierten Batchanlagen ab, wobei Platz- und Personalbedarf dramatisch reduziert werden konnten (Bild 3). Seit 1997 gibt es die DVD, wobei ihre Vorläufer schon in den siebziger Jahren zu finden sind, denn die Firma Bosch stellte bereits 1977 einen 30 cm Plattspeicher vor, der 25.000 Farbbilder speichern oder 17 Minuten Bild und Ton aufzeichnen konnte.

Wie bei allen späteren optischen Datenträgern ist zum Lesen eine dünne Metallschicht als Reflektor für den Laser notwendig. Seit 2008 ist die Blu-ray Disc (BD) im Handel erhältlich, die hinsicht-

lich der Datendichte auf optischen Speicherplatten einen weiteren Meilenstein darstellt.

Effiziente Wärmedämmverglasung durch eingebettete Silberschicht

In den frühen achtziger Jahren intensivierten sich Entwicklungsarbeiten im Bereich der Wärmedämm-(Low-E) und Sonnenschutzbeschichtungen (Solar Control) von Architekturglas. Modular aufgebauten Durchlauf-Sputteranlagen für die Prozessierung der 3,21 m × 6,00 m „Jumbo-Scheiben“ erlangten technologische Reife. Allein der Vakuumteil einer solchen Anlage ist heute 70 bis 80 Meter lang und enthält 25 bis 30 Magnetronkathoden. Pro Stunde können bis zu 1500 Quadratmeter Floatglas beschichtet werden.

Herzstück einer effizienten Wärmedämmverglasung ist, neben der Doppel- oder Dreifachscheibenarchitektur, eine etwa 10 bis 12 nm dicke Silberschicht, die als Spiegel für die Temperaturstrahlung im Fernen Infrarot (Raumtemperaturstrahlung)

wirkt, die hohe Transmission im sichtbaren Spektrum aber nur unwesentlich beeinflusst. Die Silberschicht wird dabei in weitere Schutz- und Funktionsschichten „eingepackt“ (Bild 4).

Heute gibt es vielfältige Ausprägungen von Low-E-Schichten (Bild 5), wobei neben den optischen und thermischen Eigenschaften die Temper- und Biegsbarkeit des beschichteten Glases im Vordergrund steht. Sonnenschutzschichten verbinden auf ideale Weise Funktion mit Ästhetik. Hier werden dünne metallische Absorber zwischen hochbrechenden Schutzschichten eingesetzt; angepasste Schichtdicken führen über Interferenzeffekte zu einer breiten Palette von Farben.

Am 1. Januar 1995 trat die dritte Wärmeschutzverordnung in Kraft, die Neubauten oder Renovierungen ohne den Einsatz beschichteter Fenster praktisch unmöglich machte. Erwartungsgemäß folgte ein Boom bei der Produktion von Wärmedämmglas und der Installation entsprechender Anlagen. Der Wärmedämmwert U_G richtet sich dabei nach den verschiede-

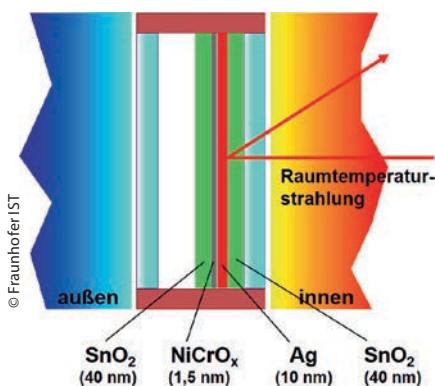
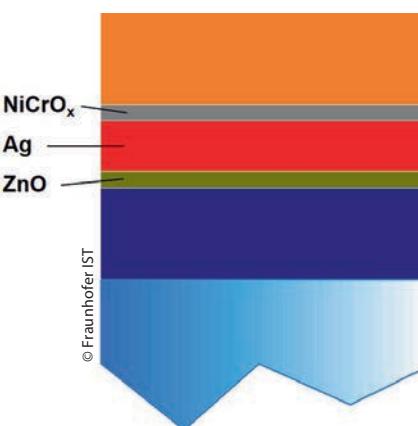


Bild 4 > Klassische Variante einer Wärmedämmbeschichtung (Low-E) in einer Doppelverglasung.



Si₃N₄

- **hohe Dichte und Härte**
⇒ erhöhte Stabilität gegenüber Umweltangriffen

TiO₂

- **hoher Brechungsindex**
⇒ neutrale Reflexionsfarbe
- **glatte Oberfläche**
⇒ höhere Leitfähigkeit der Silberschicht

Bild 5 > Low-E-Beschichtung mit Si₃N₄ als Deckschicht.

nen Verglasungen – von der Einzelscheibe bis zur heute weit verbreiteten Dreifachverglasung mit zwei beschichteten Scheiben (Bild 6).

Magnetronputtertechnik erschloss neue Anwendungsbereiche

Die vielfältigen neuen Anwendungen vor allem im Bereich der Tribologie, der optischen Datenspeicher sowie der energie sparenden Verglasung stellten die entsprechenden Beschichtungsprozesse vor enorme Herausforderungen. Die Entwicklung der Magnetronkathode bis hin zur industriellen Reife, die vor allem gegen Ende der siebziger Jahre stattfand, hatte die wirtschaftliche Applikation von Schichten auf großen Substratflächen und für hohe Stückzahlen erst möglich gemacht.

Ein Problem blieb weiterhin die langzeit stabile Deposition von hochohmigen oder isolierenden Verbindungsschichten wie SiO_2 , Al_2O_3 oder Si_3N_4 . Bei den auf Niederdruckplasmen gestützten Beschichtungstechnologien ist das Plasma Teil eines Strompfads, wobei die Elektroden in industriellen Anlagen beim Sputtern einerseits vom Sputtertarget (Kathode) und andererseits von den Kammerwänden gebildet werden. Wachsen auf den Elektroden isolierende Schichten auf, so wird der Strompfad hochohmig. Bei Plasmaanregung durch Gleichspannung bilden sich Bogenentladungen (Arcing) sowie driften Potenziale (verschwindende Anode). In mehreren Entwicklungsgruppen gleichzeitig wurde in den neunziger Jahren an einer Lösung gearbeitet, die noch im gleichen Jahrzehnt industrielle Verbreitung fand und heute den Standard in der Magnetronputtertechnik für dielektrische

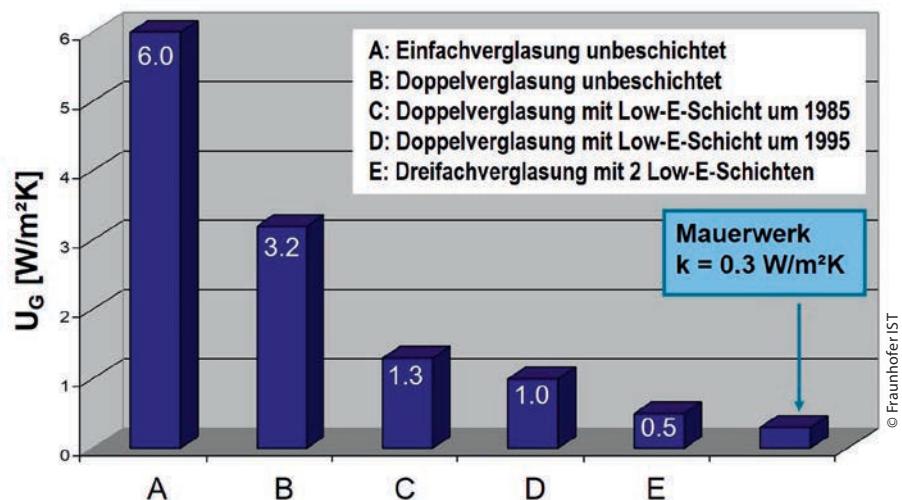


Bild 6 > Entwicklung des Wärmedämmwertes U_G für die verschiedenen Verglasungen.

Oxide und Nitride darstellt. Das Puls-Magnetron-Sputtern nutzt zwei identische Sputterkathoden, zwischen denen das Plasma im Mittelfrequenzbereich (10 kHz bis 100 kHz) geschaltet wird. In jeder Halbwelle wirkt eine der beiden Plasmaquellen als Anode, so dass ein stabiler Strompfad aufrechterhalten werden kann [2].

Neuen Beschichtungstechnologien folgen neue Produkte und neue Anwendungen. So wurde die Wärmedämmbeschichtung auf der Basis von TiO_2 und Si_3N_4 erst mit der Pulsspattertechnik möglich. Die Entspiegelung großer Glasflächen, zum Beispiel für Vitrinen oder Schaufenster, war bis zur Einführung des Puls-Magnetron-Sputterns der von Schott entwickelten Sol-Gel-Tauchtechnik vorbehalten.

Bild 7 zeigt die spektrale Reflexion eines sogenannten Breitband-Antireflexsystems

aus SiO_2 und TiO_2 , ein ähnliches System wird heute von dem Unternehmen Glas Trösch unter der Marke Luxar [3] vertrieben. Die Wirkung von entspiegeltem und damit „unsichtbarem“ Glas demonstriert Bild 8.

Flachbildschirme und Dünnenschicht-Solarzellen

In den Jahren zwischen 1990 und 2010 wurde intensiv an Schichtanwendungen gearbeitet, die man unter dem Begriff „Großflächenelektronik“ zusammenfassen kann. Flachbildschirme und Dünnenschicht-Solarzellen sind die herausragenden Produkte aus dieser Kategorie. Eine Schlüsselrolle für die Großflächenelektronik spielen transparente Leiter, unter denen das Indium-Zinn-Oxid ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) wegen seines niedrigen elektrischen Wi

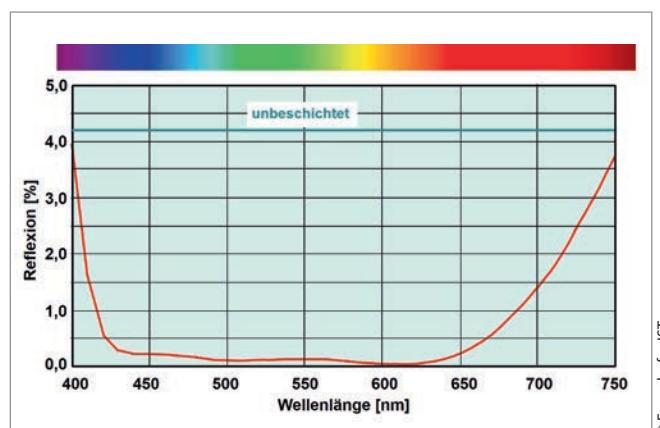


Bild 7 > Reflexionsverlauf einer gesputterten Breitbandentspiegelung auf Floatglas.



Bild 8 > Entspiegeltes Glas (links) weist eine besonders niedrige Lichtreflexion auf und bietet daher maximale Transparenz und Durchsicht.



Bild 9 > Das OLED-Display erlaubt die Realisierung von flexiblen Großbildschirmen.

ganic Light Emitting Diode) als Nachfolger des LCD erlaubt die Realisierung von flexiblen Großbildschirmen (*Bild 9*) und wird vermutlich die zukünftigen Märkte dominieren.

Die Dünnschicht-Photovoltaik boomed vor allem zwischen 2000 und 2010. In Deutschland entstanden erhebliche Produktionskapazitäten für die verschiedenen Zellvarianten mit den Absorberschichten aus a-Si, CdTe und CIS. Mit dem Zusammenbruch der Märkte in der zweiten Hälfte des ausgehenden Jahrzehnts erstarben jedoch auch die Entwicklungsaktivitäten. Heute wird an neuen Konzepten, beispielsweise auf Basis von Perovskiten, gearbeitet.

Magnetronzerstäubung schließt Lücke zwischen Dampfen und Ionenstrahlzerstäubung

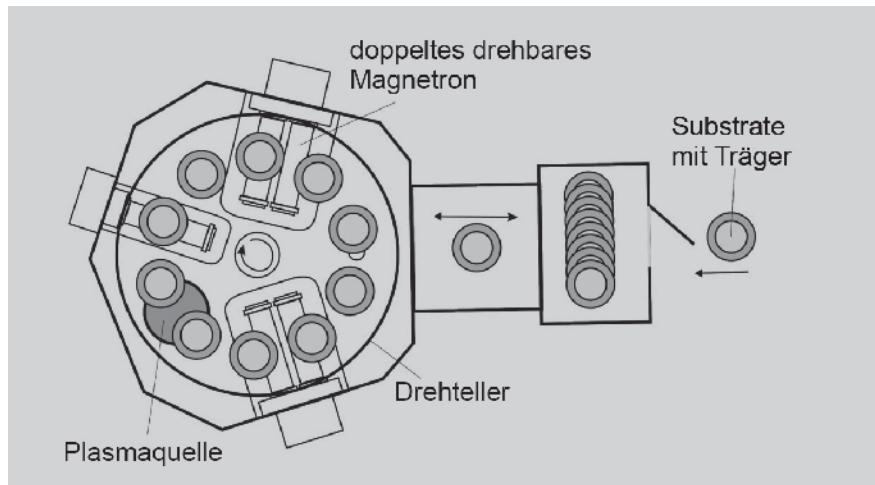
Präzisionsoptische Schichten gehören bereits seit etwa 60 Jahren zum Alltag der optischen Industrie und zählen somit zum „Urgestein“ der Dünnschichtanwendungen. Sie gehen zurück auf Pionierarbeiten von Alexander Smakula (Patent zur Entspiegelung optischer Flächen bei Zeiss Jena um 1935) sowie Walter Geffcken und Marga Faulstich (diverse Patente zur Interferenzoptik bei Schott in Mainz zwischen 1939 und 1942).

Interferenzsysteme bestehen aus niedrigbrechenden Oxiden wie MgF_2 , SiO_2 und hochbrechenden Oxiden wie Ta_2O_5 oder TiO_2 . Traditionell wird die Welt der Präzisionsoptik durch das Vakuumverdampfen dominiert. Die Depositionsraten sind hoch und die Prozesse seit Jahrzehnten industriell ausgereift. Verdampfte Atome besitzen allerdings nur etwa 10 Prozent der Energie eines zerstäubten Atoms, wodurch Dichte und Haftfestigkeit der erzeugten Schichten negativ beeinflusst werden können. Am anderen Ende der Skala steht die Ionenstrahlzerstäubung (Ion Beam Sputtering oder IBS) mit herausragenden Schichteigenschaften, aber niedriger Produktivität.

Die Bedeutung des Begriffs „Präzision“ in der Präzisionsoptik hat in den vergangenen Jahren eine starke Wandlung erfahren. Um 1980 war „Präzisionsoptik“ verbunden mit Schichtdickentoleranzen von 2 bis 3 % bei typischerweise 50 Einzel-

derstands (beste Werte des spezifischen Widerstands liegen um $100 \mu\Omega\text{cm}$) das begehrteste Material ist. Heute finden sich etwa drei Viertel des geförderten Indiums in Schichten für Flachbildschirme. In der Displaytechnologie gab es eine kontinuierliche Weiterentwicklung hinsichtlich der zu prozessierenden Glasformate („mo-

ther glass“). Die Substratabmessungen lagen 1990 bei $300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ und betragen heute $3200 \text{ mm} \times 3600 \text{ mm}$. Unter den verschiedenen Displaytypen hat sich das Liquid Crystal Display (LCD) durchgesetzt; die Anzahl der produzierten LCD-Fernseher stieg von 50.000 in 2006 auf 250.000 in 2015. Das OLED-Display (Or-



© Fraunhofer IZT

Bild 10 > Schema der Sputteranlage EOSS.

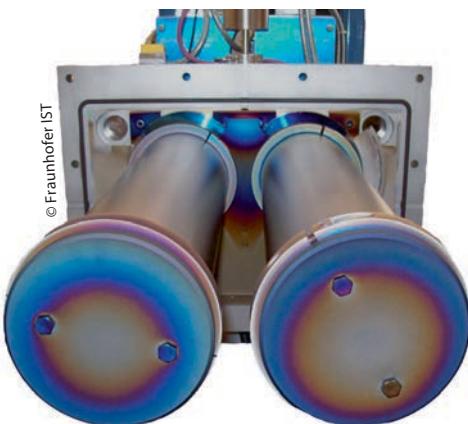


Bild 11 > Die Deposition der dielektrischen Materialien erfolgt von Doppelrohr-Magnetronkathoden.



Bild 12 > Strahlteiler für den Einsatz in Weltraumanwendungen.

© Fraunhofer IST

schichten, heute versteht die Fachwelt darunter Schichtdickentoleranzen von weniger als 0,5 % bei 100 bis 1000 Einzelschichten.

Mit den ständig steigenden Anforderungen stößt das etablierte Aufdampfen zunehmend an seine Grenzen. Magnetronzerstäubung mit wirtschaftlichen Depositionsraten und Schichten hoher Qualität wird in Zukunft die Lücke zwischen Dampfen und Ionenstrahlzerstäubung schließen.

Comeback der Präzisionsoptik

Derzeit erlebt die Präzisionsoptik eine Renaissance, da ein hoher Bedarf an Ersatz bestehender Aufdampfanlagen durch Sputteranlagen erkannt wird. Bei der am Fraunhofer IST betriebenen EOSS-Plattform (EOSS = Enhanced Optical Sputter System) werden zehn Substrate mit Durchmessern von bis zu 200 mm aus einer Einschleuskammer auf einen Drehteller geladen, der sich mit präzise einstellbarer Geschwindigkeit bis 250 Umdrehungen pro Minute über den Zerstäubungs- beziehungsweise Plasmaquellen dreht (Bild 10). Diese „sputter-up“-Konfiguration soll die Partikelkontaminationen der Schicht mi-

nimieren. Die Deposition der dielektrischen Materialien erfolgt von Doppelrohrmagnetrons (Bild 11). Es sind verschiedene Prozessvarianten von metallisch bis vollreaktiv möglich.

Die Entwicklungsaufgaben auf dem Gebiet präzisionsoptischer Beschichtungen sind vielfältig und komplex. So weist beispielsweise ein Strahlteiler mit 120 mm Durchmesser, wie er für spektroskopische Untersuchungen bei Weltraummissionen zum Einsatz kommt (Bild 12), im Spektralbereich von 400 nm bis 900 nm unter einem Einfallswinkel von 30° eine Reflexion von mehr als 98 % und gleichzeitig im NIR-Bereich von 920 nm bis 3200 nm eine Transmission von mehr als 92 % auf. Das System besteht aus insgesamt etwa 150 Einzelschichten auf beiden Seiten der Komponente.

Zusammenfassung und Ausblick

Harte und superharte Schichten, Wärmedämmung und Sonnenschutz für Architekturglas sowie optische Plattenspeicher prägten die Dünnschichtentwicklung in den achtziger und neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Mit der Displaytechnologie und der Photovoltaik hat-

ten sich die Entwickler in den vergangenen dreißig Jahren weiteren Herausforderungen zu stellen.

In Zukunft werden die Themen Energiespeicher und Wasserstofftechnologie die Oberflächentechnik besonders stark beschäftigen. Auch unter dem Aspekt der ambitionierten Wünsche zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen könnte der „Großflächenoptik“ eine „Großflächenoptik“ folgen. So wird die Wärmebelastung der Fahrgastzelle eines Pkw zu zwei Dritteln durch die Verglasung verursacht. Die Dünnschichttechnologie hält entsprechende Lösungen schon bereit, doch bis zur Markteinführung sind noch einige Hürden zu nehmen – insbesondere hinsichtlich der Kosten. //

Literaturhinweise

- [1] W.-D. Münz et al.: Industrieanzeiger 13/1987
- [2] G. Bräuer et al.: Vacuum 84 (2010) 1354-1359
- [3] www.glastroesch/de/glas/470-luxar.html



© Florian Klinschmidt

Autor

Prof. Dr. Günter Bräuer

Institutsleiter

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig
guenter.braeuer@ist.fraunhofer.de
www.ist.fraunhofer.de

Glückwunsch zum Jubiläum

Das Journal für Oberflächentechnik berichtet seit 60 Jahren praxisnah und anwendungsorientiert neben vielen verwandten Themen auch über dünne Schichten. Die in diesem Beitrag angesprochenen Themen hat es über Jahrzehnte begleitet. Gratulation zum Jubiläum und alles Gute für die nächsten Jahrzehnte!

Fraunhofer IST – Bräuer