

JOT

Journal für
Oberflächentechnik

Pulverbeschichten

Rückschau aus der
Zukunft

Nasslackieren

Die Lackiertechnik
im Wandel

Teilereinigung

Acht Thesen zur Zukunft
der Teilereinigung



60 Jahre JOT
**Blick in die Zukunft
der Oberflächentechnik**

Blick in die Zukunft der Oberflächentechnik

In den sechzig Jahren seit dem ersten Erscheinen von Schleifen und Polieren, der Vorgängerzeitschrift von JOT, hat sich die Oberflächentechnik ganz erheblich verändert. Wie wird die Entwicklung in den kommenden Jahren aussehen? Die JOT-Redaktion hat Experten befragt.

Lackierroboter, wasserbasierte Lacke, Pulverbeschichtungen, automatisierte Lackierverfahren, neue Verfahren der Teilereinigung und des Korrosionsschutzes: In den vergangenen sechzig Jahren gab es zahlreiche Technologiesprünge in der Oberflächentechnik. Das Jubiläum der JOT gibt Anlass, die Zeit Revue passieren zu lassen. Schließlich hat das Magazin über alle relevanten Trends berichtet. Mindestens ebenso interessant aber ist es, einen Blick in die Zukunft zu werfen: Was werden (voraussichtlich) die nächs-

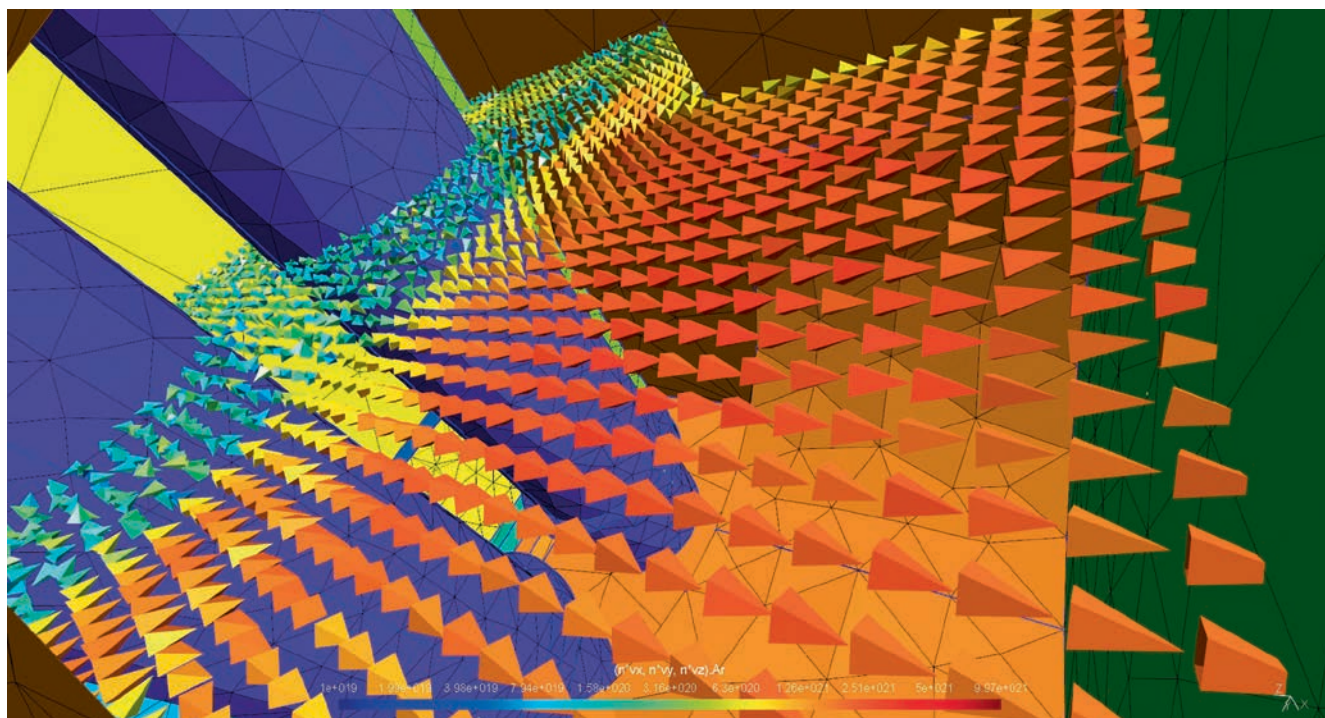
ten Entwicklungsschritte und Trends sein? Wie und wohin wird sich die Oberflächentechnik entwickeln?

Nachhaltigkeit und Individualisierung als Trends

Nach Einschätzung der Helios Group, zu der mit Rembrandt ein namhafter Spezialist für Pulverlacke gehört, stehen künftig weiterhin die Ressourceneffizienz sowie der Einsatz von klima- und umweltschonenden Farb- und Lacksystemen an obers-

ter Stelle bei der Auswahl von Verfahren und Produkten.

David Kubala, Chief Executive Officer der Helios Group: „Hier wird immer stärker der 'Cradle-to-grave'-Ansatz herangezogen werden, um die Auswirkungen auf die Umwelt entlang der gesamten Wertschöpfungskette bewerten zu können.“ Unter diesen Vorzeichen, so David Kubala, werden moderne Lacksysteme wie Wasserlacke, Ultra-High-Solids, UV-härtende Systeme und Niedrigtemperatur-Pulverlacke weiter stark an Bedeutung gewinnen.



Beispiel für Digitalisierung: Simulation des Teilchentransports in einer Sputteranlage für optische Hochpräzisionsfilter.

Und: Die Produktion wird stärker regionalisiert, um lange und umweltschädliche Transportwege zu vermeiden.

Außerdem gehen die Verantwortlichen von einer stärkeren Individualisierung der Produkte beziehungsweise der Oberflächen aus. David Kubala: „Die Kombination aus modernster Produktionstechnik – zum Bei-

spiel modulare Lackfabriken – und neuen Applikationsverfahren wie Digital Printing wird Individualisierung und Industrialisierung zunehmend stärker verbinden. Darüber hinaus werden technische und gesellschaftliche Megatrends wie Shared Economy, E-Mobility und nachhaltige Energiegewinnung neue Märkte für die Farben-

und Lackindustrie schaffen und auch traditionelle Märkte ablösen.“

Funktionen in die Oberfläche gebracht

Aus Sicht von BASF Coatings – dem nach eigenen Angaben weltweit größten Hersteller von Lacken und Bautenanstrichmitteln – steht das Thema „Funktionale Oberflächen“ im Fokus der künftigen Entwicklung. Dirk Bremm, Leiter des Unternehmensbereichs Coatings von BASF: „Funktionale Lösungen werden in den kommenden Jahren weiter an Bedeutung gewinnen – sowohl für die Mobilität der Zukunft als auch für andere industrielle Anwendungen. Die Oberfläche wird durch spezifische Beschichtungstechnik nicht nur geschützt, sondern für die jeweiligen Anwendungszwecke gezielt optimiert und wird so integraler Bestandteil des Gesamtprodukts.“

Das Unternehmen hat sich bereits auf diesen zu erwartenden Trend vorbereitet:

David Kubala, Chief Executive Officer der Helios Group:

„Megatrends wie Shared Economy, E-Mobility und nachhaltige Energiegewinnung werden neue Märkte für die Farben- und Lackindustrie schaffen und auch traditionelle Märkte ablösen.“



© Helios/Mariko Delbello Oceppek



ZUKUNFT BRAUCHT VISIONEN



OBERFLÄCHENTECHNIK

- » 2- und 3-Komponenten-Anlagen
- » Roboterapplikationstechnik
- » Lackier- und Pulveranlagen
- » Farbversorgungssysteme
- » Dosier- und Mischanlagen
- » Konventionelle Farbspritztechnik
- » Destilliergeräte
- » Airlessgeräte

www.ls-oberflaechentechnik.de

Dirk Bremm,
Leiter des Unternehmensbereichs
Coatings von BASF:

„Funktionale Lösungen werden in den kommenden Jahren weiter an Bedeutung gewinnen – sowohl für die Mobilität der Zukunft als auch für andere industrielle Anwendungen.“



© BASF

„Hier stellen wir uns gezielt mit innovativen Produkten und Prozessen auf, die ein vielfältiges Spektrum der Oberflächentechnik abdecken.“ Außerdem wird, so Dirk Bremm, die Digitalisierung die Vernetzung von Herstellern und Kunden fördern: „So können individuelle Lösungsansätze effizienter entwickelt und durch automatisierte Produktionsprozesse schneller umgesetzt werden.“

Automobillackierung: Nachhaltigkeit und Flexibilität im Fokus

Im Gründungsjahr von „Schleifen und Polieren“, der Vorläuferin von JOT, war in vielen Bereichen der Oberflächentechnik noch präzise Handarbeit gefragt, wo heute automatisierte Prozesse stattfinden. Dürr gehört zu den Unternehmen, die diese Entwicklung vor allem in der Automobillackierung vorangetrieben haben. Der Trend zur Automation wird auch in Zukunft anhalten, wobei aber zwei weitere Aspekte stärkere Bedeutung haben werden. Dr. Jochen Weyrauch, stellvertretender Vorstandsvorsitzender der Dürr Aktiengesellschaft und CEO der Dürr Systems AG: „Immer höhere Stückzahlen und größere Modellvielfalt erfordern weitere Fortschritte in Effizienz und Flexibilität.“

Die Effizienz wird nicht nur aus Gründen der Wirtschaftlichkeit gesteigert werden müssen, sondern auch, weil die Nachhaltigkeit und der Wunsch nach Ressourceneinsparung stärker in den Fokus rücken: „Für die Herausforderungen an eine nachhaltige Produktion mit immer weniger Ressourcenverbrauch werden innovative Lösungen gesucht.“ Stichworte sind hier, so Dr. Jochen Weyrauch, Anlagenkonzepte ohne starre Fertigungslinien sowie digitale Analysetools auf KI-Basis. Und was die Einsparung von Ressourcen betrifft, wird nach Einschätzung von Dürr das oversprayfreie Lackieren eine entscheidende Rolle spielen.

Dr. Jochen Weyrauch, Dürr AG:

„Die Lackieranlage der Zukunft ist ressourcenschonend, flexibel in der Fertigung und effizient im Prozess.“



© Dürr

Robert Wittmann,
Vorstand/COO der Nanogate SE:

„Basierend auf einer zukunftsweisenden Folientechnologie lassen sich Produkte zukünftig ganz anders konzipieren. Sie könnten effizienter produziert werden, sind kleiner und gewichtssparender als bislang.“



© Nanogate

Intelligente Oberflächen als Zukunftsmarkt

Nanogate sieht für die nahe Zukunft ein weiterhin erhebliches Potenzial für intelligente Oberflächen, die unter an-

derm neue Designs und innovative Bedienkonzepte von Gebrauchsgütern oder Fahrzeuge ermöglichen. Robert Wittmann, Vorstand/ COO der Nanogate SE: „Integrated Smart Surfaces umfasst für uns die Integration elektronischer Benutzerfunktionen in Kunststoffkomponenten, gepaart mit multifunktionalen Eigenschaften und hochwertigem Design. Basierend auf einer zukunftsweisenden Folientechnologie lassen sich Produkte ganz anders konzipieren. Sie könnten effizienter produziert werden, sind kleiner und gewichtssparender als bislang. Das Ergebnis: Kunden und Verbraucher erleben ein völlig neues User-Erlebnis.“

Zielformen für diese einzigartigen Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine sieht Nanogate vor allem in Märkten wie Mobility, Home Appliances und Consumer Electronics. Das Unternehmen erwartet, solche Komponenten im dritten Quartal am Standort Fohnsdorf in Österreich produzieren zu können. Die Zukunft ist also nicht mehr fern.

Selbstoptimierende Beschichtungsanlagen

Für die Messtechnik blickt Prof. Dr. Nils A. Reinke, Co-CEO der Coatmaster AG, in die Zukunft: „In der kommenden Dekade wird der Druck zur Digitalisierung und Automatisierung in der Oberflächentechnik weiter anwachsen. Mit einer Kombination aus bildgebender Schichtdickenmessung und Algorithmen für das maschinelle Lernen werden Beschichtungsanlagen sowohl sehend als auch intelligent. Dieser neue Anlagentyp wird in der Lage sein, aus seinen Fehlern zu lernen und sich selbst zu optimieren. Dadurch wird eine stets perfekte Schichtdickenverteilung bei einem hocheffizienten Materialeinsatz ermöglicht. Gleichzeitig werden Fehlerquoten und Betreuungsaufwand auf ein Minimum reduziert.“ Die zunehmende digitale Vernetzung wird es ermöglichen, dass ein Produktionsleiter mehrere Beschichtungsanlagen betreuen kann – und das weltweit.

Teilereinigung: Immer reiner

Die Zukunftsperspektiven und -trends der Teilereinigung beschreibt Andreas Fritz, Geschäftsführer der Hemo GmbH: „In einigen Bereichen wie Medizin- und Lebensmitteltechnik geht der Trend eindeutig in Richtung hochreine Oberflächen. Hier gelten immer strengere Rest-

**Prof. Dr. N. A. Reinke,
Co-CEO der Coatmaster AG:**
„Mit einer Kombination aus bildgebender Schichtdickenmessung und Algorithmen für das maschinelle Lernen werden die Beschichtungsanlagen der Zukunft sowohl sehend als auch intelligent.“



schmutzvorgaben mit Partikelgrößen im µm-Bereich, die aufgrund der nachgelagerten Produktionsprozesse notwendig sind.“ Für diese Anforderungen hat das Unternehmen eine Technologie entwickelt, die eine Verwendung von Lösemittel und wässrigen Medien innerhalb ei-

ner Reinigungsanlage ermöglicht. Solche komplexeren Verfahren setzen aber kundenspezifische (Vergleichs-)Tests mit unterschiedlichen Verfahrensschritten voraus, die im Labor qualifiziert werden. Deshalb hat Hemo in sein Technikum investiert: „Nur so können wir künftig ge-



Informieren Sie sich jetzt:
VACUDEST ZLD!
Für Ihren Weg in eine
abwasserfreie Produktion.

Effiziente Abwasseraufbereitung mit VACUDEST Vakuumverdampfern.

Schonen Sie unsere knappen Frischwasserressourcen und sparen Sie bares Geld.

Profitieren Sie von einer abwasserfreien Produktion mit VACUDEST Vakuumdestillationssystemen!

H2O GmbH | Germany | Telefon: +49 7627 9239-0
info@h2o-de.com | www.h2o-de.com

**Andreas Fritz,
Geschäftsführer der Hemo GmbH:**

„In einigen Bereichen der Teilereinigung wie Medizin- und Lebensmitteltechnik geht der Trend eindeutig in Richtung hochreine Oberflächen.“



© Hemo

meinsam mit den Anwendern maßgeschneiderte, hocheffiziente Lösungen entwickeln, die den steigenden Anforderungen gerecht werden.“

Nachholbedarf bei Digitalisierung aufholen

Die Wissenschaft beobachtet die Zukunftstrends nicht nur, sondern setzt sie auch. Dr. Stefan Dieckhoff, Abteilungsleiter Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer Institutes für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, weist jedoch darauf hin, dass die Trends in der Oberflächentechnik derzeit stark durch externe Impulse bestimmt werden: „Dazu zählen die Notwendigkeit zum effizienteren Umgang mit Ressourcen und neue Gesetzgebungen. Dem überlagert sind bereits laufende interne Prozesse wie etwa die fortschreitende Digitalisierung der Produktionsabläufe, die Verarbeitung additiv gefertigter Produkte oder auch neue Geschäftsmodelle.“

Bei der Digitalisierung registriert Dr. Stefan Dieckhoff noch großen Nachholbedarf. Zugleich sieht er hier vielversprechende neue Forschungsinitiativen. Sie haben unter anderem zum Ziel, Expertenwissen zum Kleben, Lackieren und zur Oberflächenbehandlung mit innovativen Algorithmen zur Datenauswertung zu verknüpfen.

Ein weiteres zukünftiges Handlungsfeld wird die Oberflächenbehandlung von additiv in großen Stückzahlen gefertigten Bauteilen sein: „Zur Nutzung von Wettbewerbsvorteilen kommt hier der Digitalisierung der gesamten Produktionskette – einschließlich aller oberflächentechnischen Vor- und Nacharbeiten sowie einer automatisierten Qualitätssicherung – eine Schlüsselrolle zu.“ Damit wird ein Handlungsfeld für innovative Hersteller und auch Dienstleister der Branche aufgezeigt.

Dr. Stefan Dieckhoff, Abteilungsleiter Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer IFAM:

„Die Trends in der Oberflächentechnik werden derzeit stark durch externe Impulse bestimmt. Dazu gehören die Notwendigkeit zum effizienteren Umgang mit Ressourcen und neue Gesetzgebungen.“



© Fraunhofer IFAM

**Prof. Herrmann,
Leiter des Fraunhofer IST:**

„Digitalisierung und Big Data-Konzepte werden als Innovationstreiber neue ökonomische und ökologische Potenziale eröffnen. Außerdem wird die Oberflächentechnik den Anforderungen einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft genügen müssen.“



© Fraunhofer IST

Big Data und Kreislaufwirtschaft als Innovationstreiber

Prof. Dr. Christoph Herrmann, Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik IST und des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig, sieht in der Digitali-

Glückwünsche zum Jubiläum

„Wir freuen uns darauf, dass die JOT die Entwicklungen auch in Zukunft mit fachlich fundierten Beiträgen begleiten wird. Dürr bedankt sich herzlich für 60 spannende Jahre und wünscht der JOT eine lange Fortsetzung ihrer Erfolgsgeschichte!“

Dr. Jochen Weyrauch, stellvertretender Vorstandsvorsitzender der Dürr Aktiengesellschaft und CEO der Dürr Systems AG

„Bei dieser Gelegenheit möchten wir dem gesamten Team der JOT zum 60. Geburtstag ihres wertvollen Branchenmagazins herzlich gratulieren.“

Andreas Fritz, Geschäftsführer, Hemo GmbH

sierung den größten „Hebel“ für künftigen Fortschritt: „Digitalisierung und Big Data-Konzepte werden auch in der Oberflächentechnik Innovationstreiber sein und neue ökonomische und ökologische Potenziale eröffnen, ebenso wie die Kombination oberflächentechnischer Verfahren und deren Integration in Prozessketten.“ Zudem werden – so Professor Herrmann – Modellierung, Simulation, KI und maschinelles Lernen Ent-

wicklungszyklen verkürzen und Ressourcen schonen, und digitale Zwillinge werden ein schnelles, effizientes und höchst präzises Design von Hochleistungsschichtsystemen und Oberflächen ermöglichen.

Neben der Digitalisierung ist die Nachhaltigkeit ein Faktor, in dem der Leiter des Fraunhofer IST großes Entwicklungspotenzial sieht: „Als integraler Bestandteil der jeweiligen Produktionskette wird die

Oberflächentechnik den Anforderungen einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft genügen müssen.“

Es gibt viel zu tun

Zieht man ein Resümee der Expertenmeinungen, kann man feststellen: Von der Digitalisierung wird das größte Entwicklungspotenzial erwartet, und auch die wachsende Bedeutung des Themenfelds Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft wird große Veränderungen nach sich ziehen und die Branche beschäftigen. Außerdem sind neue Entwicklungen bei funktionalen oder sogar intelligenten Oberflächen zu erwarten.

Es gibt also viel zu tun. Welcher der genannten Aspekte und Faktoren wie stark auf die Oberflächentechnik wirkt, wird sich zeigen. Die Zukunft kann man nicht voraussagen. Sicher aber ist eins: Welche Trends es auch sein werden – die JOT wird darüber berichten. //

Gerald Scheffels,

Fachjournalist, Wuppertal

multi-metal-coat.de

flexibel & multimetallfähig

- zur Vorbehandlung und Beschichtung von Stahl, verzinktem Stahl & Aluminium
- zur Nasslackierung und Pulverbeschichtung
- für Lohnbeschichter, Blechbe-/verarbeiter, Verzinkereien, Eigenproduktbeschichter

verzinkter
Stahl
Stahlblech /
Profilstahl

Aluminium
Bleche u.
Profile

noppel
Anlagen für die Oberflächentechnik

Noppel Maschinenbau GmbH
Am Leitzelbach 17
D - 74889 Sinsheim

Tel.: +49 (0) 7261 / 934 0
Fax: +49 (0) 7261 / 934 250
Mail: info@noppel.de

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

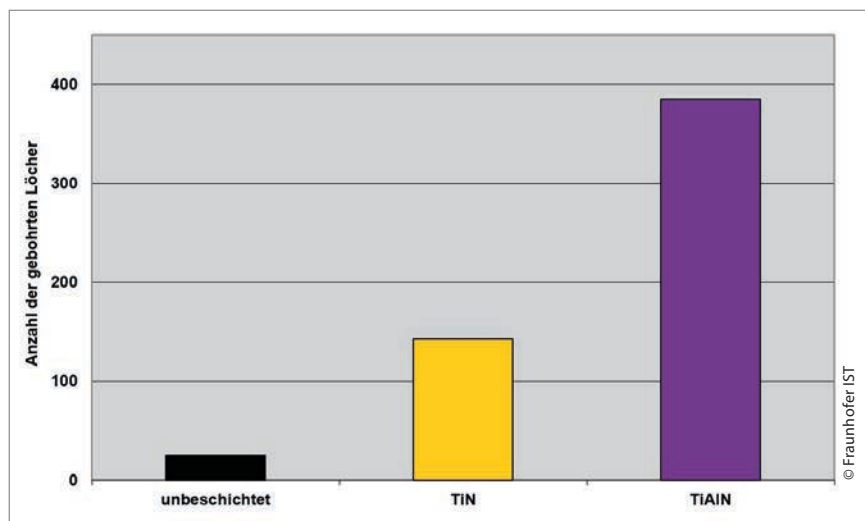


Bild 1 > Bohrtests zeigen deutlich die Überlegenheit von TiN- und TiAlN-Schichten gegenüber dem unbeschichteten Werkzeug.

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

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 Mikrohärtigkeit 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 Mikrohärtigkeit bis über 3000 HV und einer Erweiterung des Temperaturbereichs bis 800 °C. In einer Publikation

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

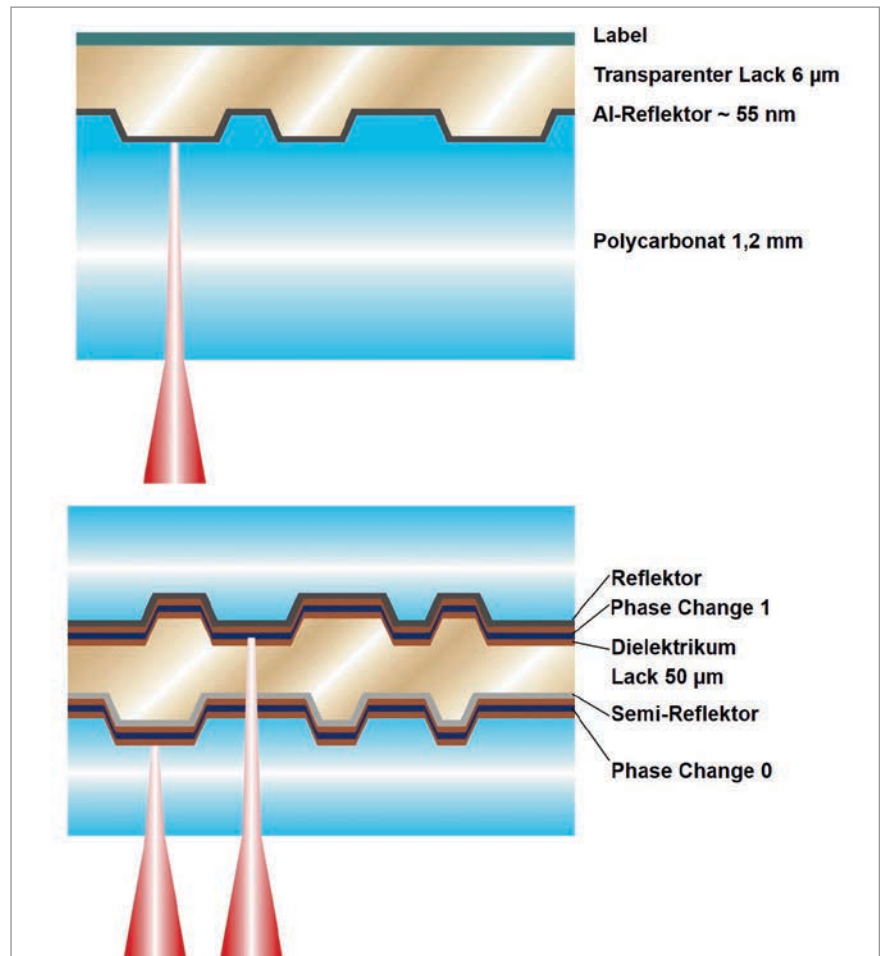
Reibung, Verschleiß und Korrosion sind Phänomene, die Lebensdauer, Belastbarkeit und Einsatzgrenzen von Bauteilen und Werkzeugen bestimmen. Der entsprechende volkswirtschaftliche Verlust wird in hochentwickelten Industrieländern auf 2 bis 3 % des Bruttosozialprodukts geschätzt – in Deutschland sind dies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



© Fraunhofer IST



WWW.LACKDOSENÖFFNER.DE

Made in Solingen / Germany



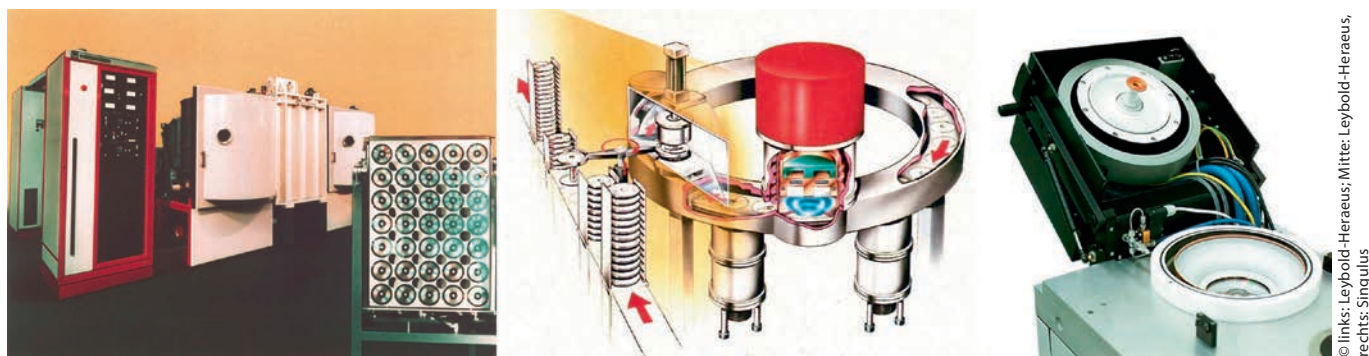


Bild 3 > Metallisierung von Compact Discs in Batch-Anlagen 1983 (links) sowie Kurztaktanlagen 1987 (Mitte) und 1998 (rechts).

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 Plattenspeicher 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 intensivierte sich Entwicklungsarbeiten im Bereich der Wärmedämm-(Low-E) und Sonnenschutzbeschichtungen (Solar Control) von Architekturglas. Modular aufgebaute 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 Biegebarkeit 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-

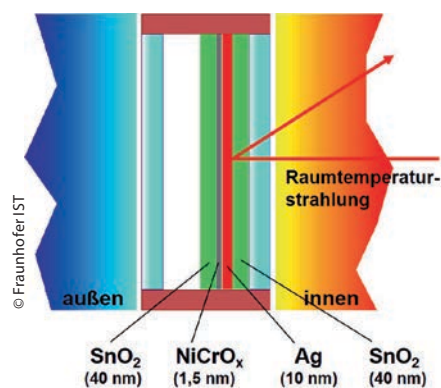


Bild 4 > Klassische Variante einer Wärmedämmbeschichtung (Low-E) in einer Doppelverglasung.

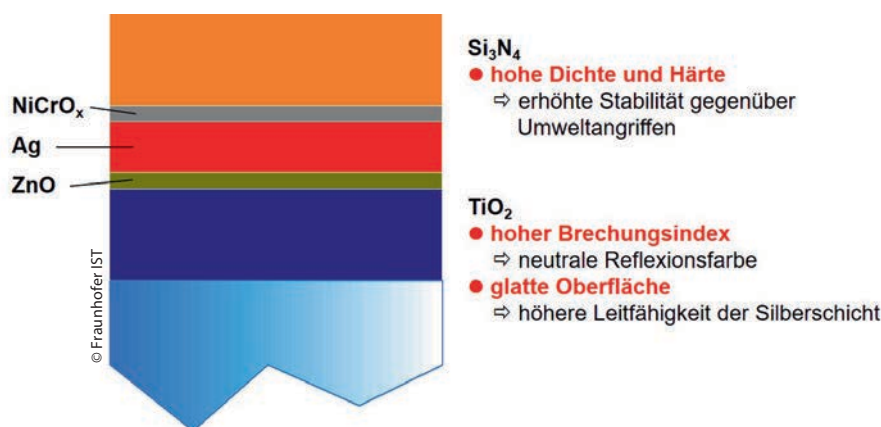


Bild 5 > Low-E-Beschichtung mit Si₃N₄ als Deckschicht.

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

Magnetronsputtertechnik erschloss neue Anwendungsbereiche

Die vielfältigen neuen Anwendungen vor allem im Bereich der Tribologie, der optischen Datenspeicher sowie der energiesparenden 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 langzeitstabile Deposition von hochhohmigen 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 hochhohmig. Bei Plasmaanregung durch Gleichspannung bilden sich Bogenentladungen (Arcing) sowie driften die 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 Magnetronsputtertechnik für dielektrische

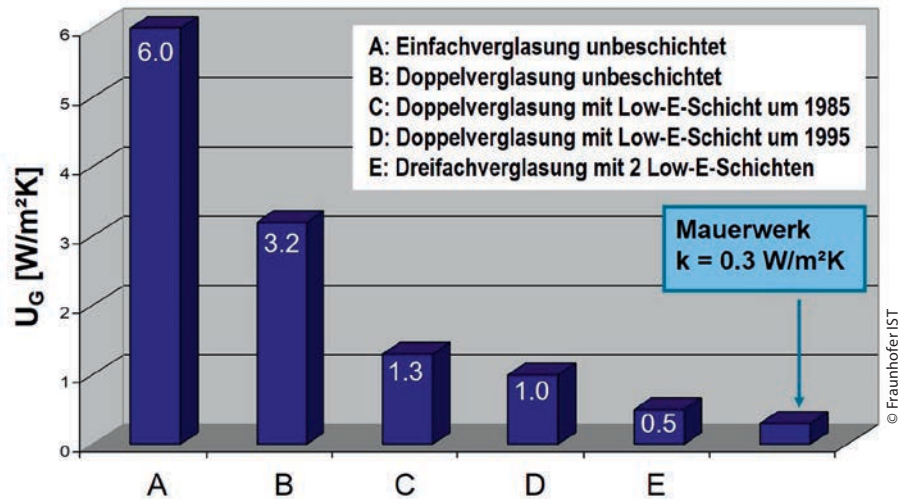


Bild 6 > Entwicklung des Wärmedämmwertes U_G für die verschiedenen Verglasungen.

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 Pulssputtertechnik 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 Dünnschicht-Solarzellen

In den Jahren zwischen 1990 und 2010 wurde intensiv an Schichtanwendungen gearbeitet, die man unter dem Begriff „Großflächenelektronik“ zusammenfassen kann. Flachbildschirme und Dünnschicht-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-

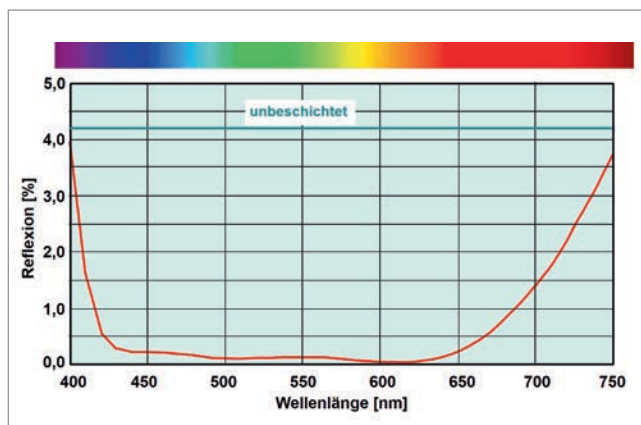


Bild 7 > Reflexionsverlauf einer gesputterten Breitbandentspiegelung auf Floatglas.

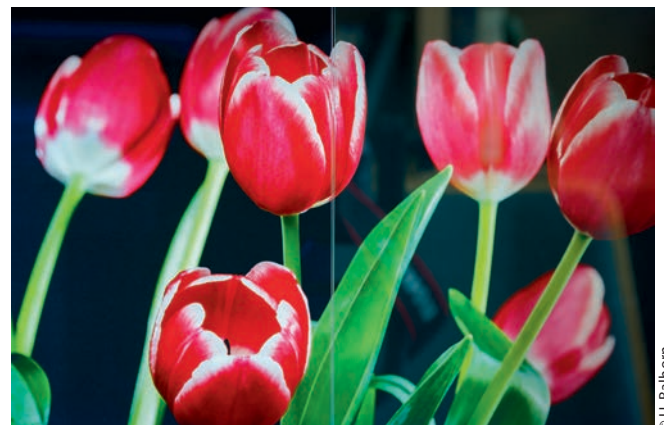


Bild 8 > Entspiegeltes Glas (links) weist eine besonders niedrige Lichtreflexion auf und bietet daher maximale Transparenz und Durchsicht.



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 boomte 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 zuprozessierenden 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-

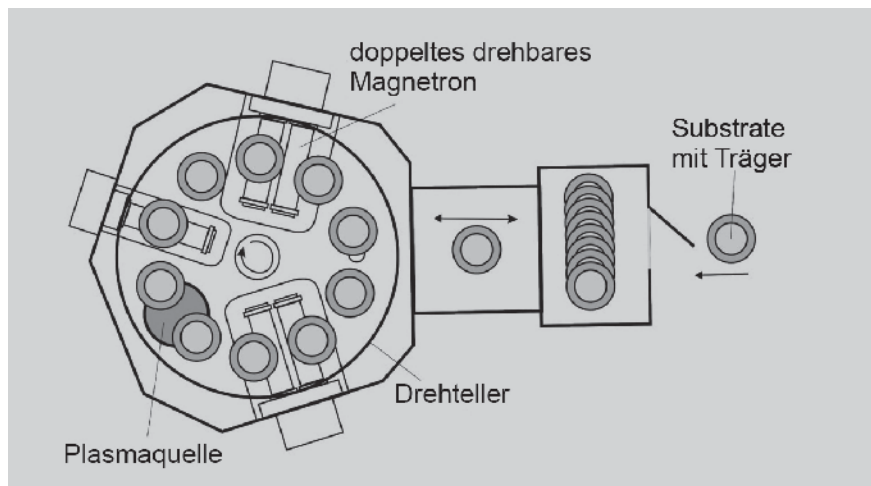


Bild 10 > Schema der Sputteranlage EOSS.

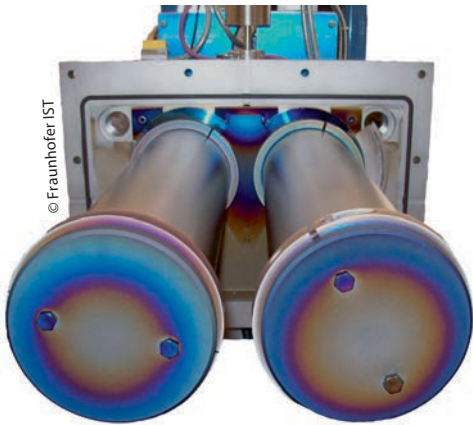


Bild 11 > Die Deposition der dielektrischen Materialien erfolgt von Doppelrohr-Magnetronkathoden.



Bild 12 > Strahlteiler für den Einsatz in Weltraumanwendungen.

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 Einschlusskammer 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 Doppelrohr-magnetrons (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 „Großflächenelektronik“ 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



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 anwenderorientiert 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