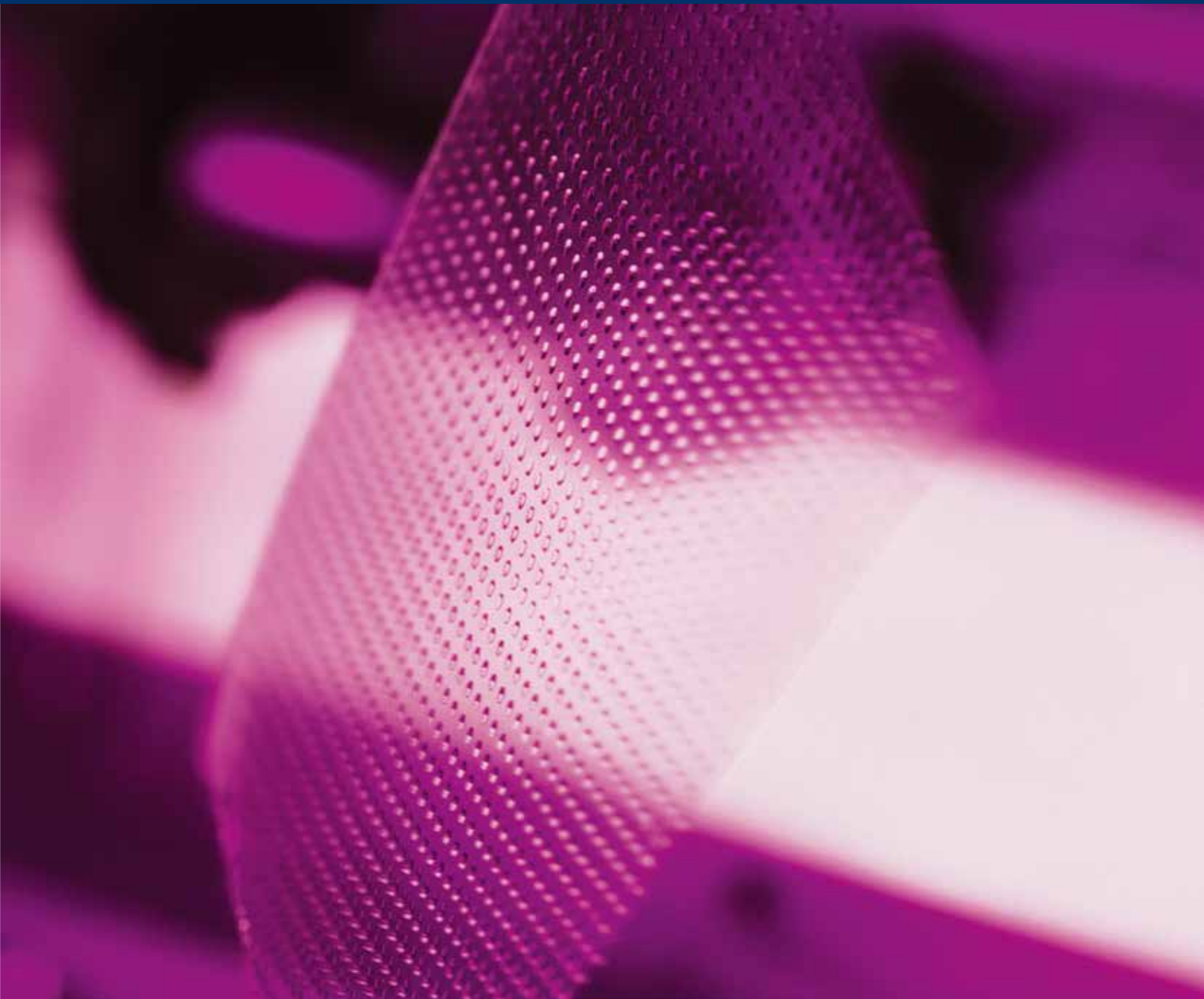


**PLASMATECHNIK**  
SCHLÜSSELTECHNOLOGIE ZUR HERSTELLUNG  
FUNKTIONELLER OBERFLÄCHEN



# PLASMATECHNIK

## SCHLÜSSELTECHNOLOGIE ZUR HERSTELLUNG FUNKTIONELLER OBERFLÄCHEN

### Produkte mit veredelten Oberflächen

Bei vielen technischen Produkten, mit denen wir im täglichen Leben zu tun haben, werden während der Herstellung dünne Schichten aufgetragen und die Oberflächen an das jeweilige Anforderungsprofil angepasst. Einige Techniken, wie etwa das Lackieren oder die galvanische Metallabscheidung, sind jedem geläufig, da sie verhältnismäßig einfach durchzuführen sind. Auch das Bedampfen mit Metallen wird häufig genutzt, wobei hier die Beschichtung mit Aluminium am weitesten verbreitet ist. Ein bekanntes Beispiel ist die Chipstüte, die innen mit einer dünnen Aluminiumschicht bedampft wurde, um die Chips haltbarer zu machen und knusprig zu halten.

Eine weitere wichtige Technik sind plasmaunterstützte Verfahren. Plasmaverfahren liefern neue und bessere Lösungen für viele werkstoffbezogene Fragestellungen. Neben Plasmaverfahren zum Ätzen, Reinigen, Aktivieren, chemischen Funktionalisieren und Beschichten sind auch zunehmend Anwendungen im Bereich der Nanotechnologie zu nennen, die mit Plasmatechnik bearbeitet werden.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat siebzehn Zukunftsfelder identifiziert, die forschungspolitisch besondere Beachtung verdienen. Allein in vierzehn dieser Felder wird die Plasmatechnologie als Schlüsseltechnologie einen Beitrag leisten. Dies zeigt, wie groß das Potenzial dieser Technologie für verschiedenste Anwendungsfelder ist.

### Funktionelle Oberflächen durch Plasmatechnik

Den Eigenschaften von Oberflächen kommt in nahezu allen Industriebereichen immer größere Bedeutung zu. Für die Oberflächen vieler Werkstoffe, z. B. industrieller Bauteile oder technischer Textilien, sind häufig andere Eigenschaften erwünscht, als sie das Material im Volumen besitzt. Das Material soll beispielsweise formbar, seine Oberfläche aber hart sein. Oder ein Gewebe soll so zugfest und anfärbbar wie Baumwolle, aber zugleich wasserabweisend sein. Polymere Werkstoffe sind ein weiteres Beispiel für den Nutzen von Oberflächentechnologien, denn sie sind einerseits chemisch beständig, hervorragend formbar und kostengünstig in Massen zu produzieren, besitzen jedoch oft hinsichtlich Benetzbarkeit, Verklebbarkeit oder Kratzfestigkeit suboptimale Eigenschaften.

Mit unterschiedlichen Zielstellungen lassen sich Oberflächen – unter Erhalt der Volumeneigenschaften des Materials – mit Plasmaverfahren bearbeiten:

- Oberflächen werden gereinigt und aktiviert, damit beispielsweise Lacke und Klebstoffe besser darauf haften.
- Oberflächen werden beschichtet, um neue Funktionen wie Kratzfestigkeit, Schmutzabweisung, Korrosionsschutz oder zusätzliche optische und elektrische Funktionen zu liefern.
- Oberflächen werden mit chemischen Funktionen versehen, die mit weiteren Substanzen chemisch reagieren können.

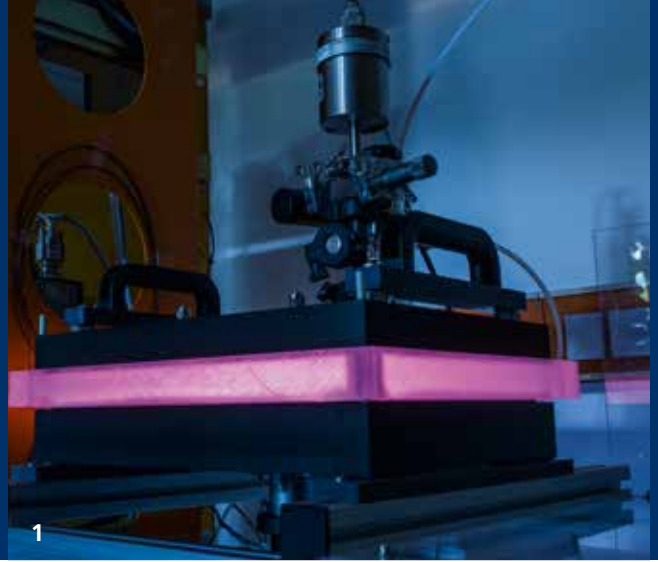
Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB werden Oberflächen zur gezielten Anpassung der Eigenschaften zunächst eingehend charakterisiert, um im zweiten Schritt mit verschiedenen Modifizierungs- und Beschichtungstechniken funktional ausgerüstet zu werden. Eine Vielzahl von Aufgabenstellungen bewältigen wir am Fraunhofer IGB durch den Einsatz der Niederdruckplasmatechnik, teilweise in Kombination mit nasschemischen Verfahren.

### **Know-how durch interdisziplinäre Zusammenarbeit**

Dank langjähriger fruchtbarer Zusammenarbeit mit Zell- und Mikrobiologen im Institut verfügen wir über spezielles Know-how für Oberflächenmodifizierungen in Biologie und Medizin (siehe Anwendungsbereiche, Seite 8). Kennzeichnend für unsere Arbeiten am Institut sind zudem jüngste Errungenschaften der Nanotechnologie, die von ultradünnen Schichten bis hin zur Nanobiotechnologie reichen, bei der Oberflächen auf molekularer oder atomarer Ebene charakterisiert und gestaltet werden. Auf Basis dieser unterschiedlichen Verfahren zur Grenzflächenmodifikation entwickeln wir am Fraunhofer IGB spezifische Lösungen für verschiedenste industrielle Aufgabenstellungen.

*Abscheidung von Barrierschichten in Kunststoffbehältern.*





1

### Was ist eine Grenzfläche?

Als Grenzfläche bezeichnet man die Zone zwischen zwei Phasen (Materialien), in der der Stoffkontakt stattfindet. An einer solchen Phasengrenze (Grenzfläche) ändern sich die stofflichen Eigenschaften abrupt. Die Phasen an sich können im selben oder aber in verschiedenen Aggregatzuständen (fest/flüssig/gasförmig) vorliegen. Beispiele für Phasengrenzen bei unterschiedlichen Aggregatzuständen sind Oberflächen von Feststoffen, die mit Flüssigkeiten oder Gasen in Kontakt sind. Doch finden sich auch vielerlei Beispiele für Phasengrenzen zwischen zwei flüssigen Phasen (z. B. Phasengrenze zwischen nicht mischbaren Flüssigkeiten) und zwischen zwei festen Phasen (z. B. Kontaktfläche zweier unterschiedlicher Feststoffe; Korngrenzen innerhalb eines Kristalls oder amorphe und kristalline Bereiche). Phasengrenzen bzw. Grenzflächen sind das, was den Unterschied ausmacht, und damit das, was wahrgenommen wird.

Die Atome oder Moleküle an der Oberfläche der aneinandergrenzenden Phasen nehmen aufgrund ihrer Randlage eine energetische Sonderstellung ein. Zudem beeinflussen sie sich untereinander. An Grenz- und Oberflächen herrscht demnach ein Ungleichgewicht der Kräfte. So finden dort Vorgänge statt, die sich in Oberflächenspannung (Grenzflächenenergie), spezifischer Adsorption, Stoffübergang oder in der Entstehung eines elektrischen Feldes äußern können. Häufig wird in diesen Zusammenhängen auch der Begriff »Oberfläche« verwendet. Streng genommen ist dieser Begriff nur auf eine der Phasen bezogen (beispielsweise »Glasoberfläche«), während sich der Begriff Grenzfläche auf den Übergangsbereich zwischen beiden Phasen bezieht.

### Wozu Grenzflächenverfahrenstechnik?

Ziel der Grenzflächenverfahrenstechnik ist es, die Wechselwirkungen an der Phasengrenze einzustellen. Dazu wird die Oberfläche der einen oder der anderen oder beider Phasen gezielt verändert. Man erzeugt so maßgeschneiderte Oberflächen (tailored surfaces).

### Was ist ein Plasma?

Plasmen sind teilweise oder vollständig ionisierte Gase und Dämpfe, die neben Ionen und Elektronen auch chemische Radikale und eine große Anzahl elektronisch angeregter Teilchen enthalten. Weit mehr als 99 Prozent des uns bekannten Universums befindet sich im Plasmazustand. Ein Plasma lässt sich durch ein elektromagnetisches Feld zünden und aufrecht erhalten. Charakteristisch für jedes Plasma ist sein Leuchten, das je nach Gas violett, blau, grün, gelb, orange oder rötlich scheint. Das Plasmaleuchten wird in Leuchtstoffröhren, z. B. als Leuchtkehlampe, genutzt. Argonröhren scheinen blau, Neonröhren erzeugen ein orange-rotes Licht. Als Leuchtgas können aber auch dampfförmige Flüssigkeiten zum Einsatz kommen, wie zum Beispiel in Leuchtstofflampen, die meist mit einem Quecksilber-Argon-Gemisch befüllt sind.

- 1 *Plasmareaktor zur künstlichen Schnellwitterung von Oberflächen.*
- 2 *Funktionalisierung von Bahnware von Rolle-zu-Rolle.*
- 3 *Plasmaentladungen in einer Hohlkugel.*



## ENTWICKLUNG EFFIZIENTER PLASMAPROZESSE

Energiereiche und reaktive Teilchen aus der Plasmagasphase bombardieren alle mit ihnen in Kontakt stehenden Werkstoffe. Dabei können sie je nach Prozessführung die Oberfläche abtragen, chemische Funktionen auf der Oberfläche erzeugen oder Schichten abscheiden. Abtrag, Funktionalisierung und Abscheidung finden bei jeder Plasmabehandlung als elementare Prozesse gleichzeitig statt. Welcher dieser Prozesse das Nettoergebnis der Behandlung bestimmt – ob schließlich eher geätzt oder beschichtet wird – hängt von verschiedenen Parametern bei der Prozessführung ab. Wir ermitteln für jede Aufgabenstellung die jeweils optimalen Parameter für die angestrebte Veränderung der Oberflächeneigenschaften.

### Plasmageeignete Materialien

In Niederdruckplasmen, die bei vermindertem Druck arbeiten, können sämtliche Feststoffe behandelt werden, soweit sie vakuumtauglich sind:

- Metalle
- die meisten Polymere
- Materialien biologischer Herkunft und viele weitere organische und anorganische Substanzen

Vorteile der Niederdrucktechnik sind die unübertroffene Schichthomogenität sowie der extrem geringe Chemikalieneinsatz. Mit Plasmaverfahren, aber insbesondere Niederdruckverfahren, lassen sich selbst chemisch inerte Materialien wie Teflon® modifizieren und für eine Weiterverarbeitung (z. B. Verklebung) zugänglich machen. Es gibt jedoch materialbedingte Grenzen, wenn Stoffe im Plasma zu stark angegriffen werden, sei es chemisch oder durch (UV-)Strahlung wie im Falle des Kunststoffes Polyoxymethylen (POM).

### Unterschiedlichste Geometrien

#### Formkörper

Die meisten Produkte sollen dreidimensional und flächendeckend beschichtet werden. Eine entscheidende Rolle für die Behandlungshomogenität spielt die Spaltgängigkeit des verwendeten Plasmas.

#### Flachmaterialien (Folien, Gewebe, Vliese, Membranen)

2D-Körper wie Folien lassen sich verhältnismäßig einfach bearbeiten. Gewebe, Vliese und Membranen sind in Plasmen ebenfalls bearbeitbar. Zusätzlich können wir hier je nach Anwendung auf die Tiefenwirkung des Plasmas gezielt Einfluss nehmen: Eine Funktionalität kann entweder nur an der Oberfläche gewünscht sein oder auch das Volumenmaterial soll dieselben Eigenschaften besitzen. Zur Bearbeitung von Bahnware steht am Fraunhofer IGB eine Anlage für halbkontinuierliche Behandlung zur Verfügung.

#### Rohre und Hohlkörper

Rohre und Schläuche behandeln wir ebenfalls in Plasmen – nicht nur außenseitig, sondern auch inwendig. Physikalisch stößt man an Grenzen, wenn die lichte Weite (Lumen) bei inwendiger Behandlung deutlich unter einem Millimeter liegt. Hier ergeben sich Verfahrens- und Materialabhängigkeiten, die einen entsprechenden Entwicklungsaufwand erfordern.

#### Fasern und Garne

Wir behandeln des Weiteren Fasern und Garne als quasi 1D-Körper: Hierzu verfügen wir über kontinuierliche Anlagen, die zwar mit Niederdruckplasmen arbeiten, bei denen es jedoch dank Schleusensystemen möglich ist, die Fasern »von-Luft-zu-Luft« zu führen. Dadurch kann das System beispielsweise





direkt hinter eine bestehende Faserproduktionsanlage geschaltet werden (Inline-Betrieb). Wir haben bereits Materialien mit Lumina unter  $200\ \mu\text{m}$  innenseitig behandelt.

### Granulate und Pulver

Je kleiner die Korngröße von Granulaten und Pulvern ist, umso schwieriger wird die Bearbeitung. Dies liegt an der Aufladung des Materials im Plasma, durch die sich die Teilchen deutlich schlechter kontrollieren und prozessieren lassen. Mithilfe gezielter Anpassungen ist jedoch auch hier eine Plasmabehandlung möglich.

### Optimale Prozessführung für Oberflächen nach Bedarf

Das Fraunhofer IGB verfügt über langjährige Erfahrungen in der Entwicklung und Optimierung von Plasmaprozessen für verschiedenste Aufgabenstellungen. Die Vorgänge innerhalb eines Plasmas kontrollieren wir über Gasfluss, Druck, Anregungsfrequenz und Leistung. Diese Plasmaparameter haben Einfluss auf die Dichte und Energie der geladenen Teilchen, auf die Dichte chemischer Radikale und elektronisch angeregter Teilchen sowie die vom Plasma erzeugte Strahlung. Zu berücksichtigen ist, dass sich die genannten Effekte innerhalb eines Plasmas räumlich unterscheiden können, insbesondere in der Nähe von Oberflächen. Eine wesentliche Schwierigkeit liegt zudem darin, dass sich die Prozesse innerhalb des Plasmas in der Regel nicht unabhängig voneinander steuern lassen, und die relativen Abhängigkeiten oft nicht leicht zu erkennen sind. Um in diese Einblick zu erhalten und den Plasmaprozess zu optimieren, nutzen wir unterschiedliche Methoden zur Plasmadiagnostik.

### Prozess- und Ergebniskontrolle

Während und nach der Behandlung werden die Prozessbedingungen kontrolliert und unterstützend plasmadiagnostische Methoden eingesetzt. Die Produktoberflächen werden nach der Behandlung je nach Bedarf mit unterschiedlichen Methoden untersucht. Hierzu verfügen wir über umfassende oberflächenanalytische Möglichkeiten. So versuchen wir, optimierte Prozessparameter zu finden und kontrollierte und reproduzierbare Prozesse zu etablieren.

- 1 *Behandlung von Schüttgut.*
- 2 *Anti-Eis-Beschichtung von Folien in einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Verfahren.*

## Vorteile von Plasmaverfahren

### Verfahrenstechnische Aspekte

- Feinreinigung, Aktivierung und Beschichtung in einem Verfahrensschritt
- auch 3D-Substrate sind behandelbar, selbst Fasern und die Innenseiten von Kapillaren

### Chemische Aspekte

- chemische Vielfalt der Ausgangssubstanzen zur Plasmapolymerisation
- keine Polymerisationshilfsmittel erforderlich
- hoher Vernetzungsgrad
- spezielle Funktionalisierung auch reaktionsträger Oberflächen möglich, z. B. Hydroxyl-, Amino-, Aldehyd-, Carboxylgruppen oder Pfropfung großer Moleküle

### Schichteigenschaften

- gute Haftung zum Substrat
- homogene Schichtdicke und Struktur
- Oberflächen- und Schichteigenschaften gezielt einstellbar
- Schichten pinhole-frei selbst bei geringer Dicke

### Wirtschaftliche und ökologische Aspekte

- geringe Kosten für Ausgangsmaterialien und laufenden Betrieb
- geringer Verbrauch von Chemikalien
- lösungsmittelfreier, trockener Prozess
- geschlossener Prozess: stabile und ungiftige Präkursoren werden erst im Plasma zu hochreaktiven Stoffen
- wenig bis nahezu keine Prozessabfälle

# ANWENDUNGSBEREICHE

Neue Anwendungsaspekte über alle Branchengrenzen hinweg ergeben sich durch Einsatz der Nanotechnologie. In diesem Bereich spielen unter anderem ultradünne Beschichtungen, einstellbare Benetzungseigenschaften, strukturierte funktionalisierte Oberflächen und dergleichen mehr eine tragende Rolle.

## Kunststoffverarbeitung

Einer der wesentlichsten Punkte in der Kunststoffverarbeitung ist die Einstellung der Benetzbarkeit. Zwar ist dies auch nasschemisch möglich, doch die entsprechenden Bearbeitungshilfsstoffe (Chromschwefelsäure) lassen sich nur unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen und mit umfassenden Entsorgungsmaßnahmen einsetzen (siehe Umweltaspekte, Seite 14). Hier bieten Plasmen unschlagbare Vorteile für beinahe alle Kunststoffe, selbst bei der Bearbeitung von Polymeren auf Fluorkohlenstoffbasis (z. B. Teflon®). Neben der Benetzbarkeit ist die Verklebbarkeit ein weiterer sehr wichtiger Punkt, und auch hier stellt die Plasmatechnik eine umweltfreundliche und kostengünstige Alternative zu nasschemischen Verfahren dar.

## Wasseraufbereitung

Im Themenbereich der Wasseraufbereitung stellen Plasmaprozesse als AOPs (advanced oxidation processes) einen sehr vielversprechenden Ansatz zur Beseitigung organischer Spurenstoffe dar: mit Plasma kann Organik zeitgleich über im Plasma erzeugte Radikale und ultraviolettes Licht abgebaut werden. Dies funktioniert mit Pharmarückständen, Zyaniden, Pestiziden usw. gleichermaßen. Auch können Mikroorganismen abgetötet werden. Die Plasmaverfahren können hierfür gezielt auf die Trinkwasseraufbereitung, die Prozesswasserreinigung, die Behandlung von Ballastwasser usw. angepasst werden.

## Anti-Eis-Schichten

Viele technische Anlagen können durch Schnee- und Eisanlagerung in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Dazu zählen neben Tragflächen oder Rotorblättern in der Luftfahrt auch die Energiegewinnung (z. B. Windenergieanlagen), die Telekommunikation sowie Geräte und Anlagen, die unterschiedlichste Außensensoren verwenden. Auf Rotorblättern von Windkraftanlagen kann es beispielsweise zu einer Unwucht kommen, welche die Aerodynamik stört. Die Rotorblätter müssen daher entweder aktiv beheizt oder die Anlage muss abgeschaltet werden. Auch im Sport- und Outdoorbereich können die Anhaftung von Schnee und Eis die Funktionalität von Materialien beeinträchtigen. Das Fraunhofer IGB liefert hier patentierte Lösungen auf Basis kombinierter Oberflächen- und Beschichtungstechnik.

## Metallverarbeitung

In der Metallverarbeitung kommt die Plasmatechnik beispielsweise bei der Metallhärtung zum Einsatz. Des Weiteren können Metalle durch Plasmen von öligen oder sonstigen Rückständen befreit werden. Wir nutzen plasmabasierte Sputterverfahren, mit denen sich je nach Anwendungszweck beispielsweise Platin, Gold, Titan oder Silber auf Oberflächen abscheiden lassen. Zusätzlich kommen Verfahren zum Einsatz, die die Haftung von Metallen auf den zu beschichtenden Oberflächen (z. B. Kunststoffen) deutlich verbessern. Auch der Korrosionsschutz durch Plasmaschichten ist ein weiteres wichtiges Betätigungsfeld.





1



2



3

## Verpackung

In der Verpackungstechnik spielen Barrierschichten, z. B. gegen Wasserdampf oder Sauerstoff, eine immer größere Rolle. Die Packmittel liegen hierbei häufig als Folien, Flaschen, Kanister und dergleichen vor. Je nach Anforderungsprofil reicht als Barrierschicht eine metallische (Aluminium-)Bedampfung aus, oder aber es werden transparente Einzelschichten (Monolagen) oder Mehrlagenschichtsysteme aufgebracht. Die Plasmatechnik liefert hierbei hochvernetzte organische und anorganische Schichten, die zudem stabil an die Oberflächen angebunden sind.

Ein Schwerpunkt des Fraunhofer IGB liegt auf der Entwicklung von Barrierschichten. Zudem befassen wir uns mit der Entwicklung von Oberflächen, von denen die Füllgüter leichter ablaufen, um so die Restentleerbarkeit zu erhöhen. Dies ist sowohl für die Lebensmittel-, die Kosmetik- wie auch für die chemische und pharmazeutische Industrie von Bedeutung. Eine weitere Anwendung ist die Abscheidung dekorativer Schichten oder aber die Verbesserung der Schichthaftung von aufgedampften metallischen Dekorationsschichten. Ebenso können Sicherheitsetiketten, die die Originalität der Verpackung gewährleisten und so vor Produktpiraterie schützen, mittels Plasmatechnik hergestellt werden. Ein Beispiel sind Fluorkohlenstoff-Nanoschichten auf Kunststofffolien, die mit einer farbgebenden maschinenlesbaren Metallschicht versehen werden.

## Automotive

Viele Komponenten in Kraftfahrzeugen verdanken ihre guten Leistungsmerkmale plasmatechnischen Modifizierungen, angefangen von Schutzschichten für Reflektoren in den Scheinwerfern über Karosserie- und Innenbauteile bis hin zu Motor- und Getriebeteilen.

Die Schutzschicht in Reflektoren sorgt dafür, dass das als Verspiegelung eingesetzte Aluminium nicht korrodiert und die Scheinwerfer nicht blind werden. Diese Schicht besteht aus einem sehr dünnen, transparenten siliziumorganischen Plasmapolymer. Im Karosseriebereich unterziehen einige Automobilhersteller Kunststoff-Stoßfänger (z. B. auf Polyolefinbasis) einer Plasmabehandlung, sodass diese im Anschluss leichter und homogener lackiert werden können. Ferner besteht der Wunsch, die Verglasung teilweise durch Kunststoff zu ersetzen (z. T. aus Gewichtsgründen). Wegen der allgemein recht geringen Kratzbeständigkeit von beispielsweise Polycarbonat leistet hier eine Kratzfestbeschichtung Abhilfe.

Im Außen- und Innenbereich ist die Verklebung von Kunststoffen sehr wichtig. Zudem wird aus hauptsächlich dekorativen Gründen gerne auf metallisierte Kunststoffe zurückgegriffen. In beiden Fällen ermöglichen Plasmavorbehandlungen eine deutlich verbesserte Haftung. Schließlich sind die Härtung von Metallen und Legierungen und das Aufbringen von harten, verschleißarmen Schichten Themenbereiche, die inzwischen weitgehend unter Zuhilfenahme von Plasmen bearbeitet werden. Im Bereich Automobil konzentrieren wir uns am Fraunhofer IGB vorwiegend auf Fragestellungen, die die Bearbeitung von Kunststoffen betreffen.

Oberflächen können in vielfältiger Weise für die Medizintechnik oder biotechnologische Anwendungen vorbereitet werden. Wie in der Tabelle auf der folgenden Seite dargestellt ist, kann die Wechselwirkung zwischen Oberflächen und biologischen Systemen auf molekularer und Zell-Ebene so beeinflusst bzw. gesteuert werden, dass eine verstärkte oder reduzierte Wechselwirkung stattfindet.

- 1 *Optimierung der Benetzung von tintenführenden Systemen.*
- 2 *Rotorblätter mit Anti-Eis-Folien.*
- 3 *Optimierung des Reibungsverhaltens von Keramiklagern.*



# MEDIZINTECHNIK UND BIOTECHNOLOGIE

Über Plasmaverfahren können chemisch inerte Materialien wie PTFE oder PE an der Oberfläche aktiviert und mit chemisch reaktiven Gruppen ausgestattet werden, unter anderem Amino-, Carboxy-, Hydroxy- oder Epoxy-Gruppen. Durch abscheidende Plasmaverfahren stellen wir verschiedene funktionelle Beschichtungen her.

## Biokompatibilität

Für viele Anwendungen in Medizin und Medizintechnik sind biokompatible Oberflächen essenziell. Am Fraunhofer IGB wurden bereits Kanülen und Stents bioverträglich ausgerüstet, sodass Nebenwirkungen vermieden und optimale Funktionalität erreicht werden konnten.

## Membranen für die Blutreinigung

Plasmapheresemembranen von Apheresemodulen wurden am Fraunhofer IGB so ausgerüstet, dass Endotoxinfänger regioselektiv angebunden werden konnten. (Endotoxine sind Entzündungen oder Sepsis auslösende Lipopolysaccharide bakteriellen Ursprungs.) Mit den plasmabehandelten Membranen ist es möglich, das Blut zu 100 Prozent von Endotoxinen zu befreien.

## Proteinadsorption

Mit Plasmatechnik rüsten wir Materialien so aus, dass die Proteinadsorption an der Oberfläche kontrolliert wird. Je nach Ausführung der Beschichtung wird eine erhöhte oder verringerte Adsorption oder auch die selektive Anlagerung bestimmter Proteine sowie deren Orientierung relativ zur Oberfläche erreicht. Dies ist unter anderem im Tissue Engineering für die Zelladhäsion von großer Bedeutung.

## Adhäsion von Zellen und Bakterien

Ob Oberflächen von Bakterien oder Säugerzellen besiedelt werden, hängt neben der Oberflächenchemie auch von Oberflächeneigenschaften wie topographischer Strukturierung oder Elastizität ab. Auch diese sind über Plasmaverfahren einstellbar. Zudem entwickeln wir Oberflächen, die eine Besiedlung durch Bakterien minimieren. Hier dient die Plasmatechnik dazu, Moleküle auf der Oberfläche anzubinden, die die Anlagerung von Bakterien verhindern. Auch Release-Schichten für die Freisetzung antimikrobieller Substanzen werden entwickelt.

## Plasmasterilisation und Pyrogenfreiheit





Ein Schwerpunkt am Fraunhofer IGB ist die Etablierung und Erweiterung von Verfahren zur Plasmasterilisation und Entpyrogenisierung thermolabiler Materialien (siehe auch Umweltaspekte, Seite 14). Hierbei wird die Tatsache genutzt, dass Niederdruckplasma Mikroorganismen abtöten, Sporen und Pyrogene – Fieber erzeugende Rückstände aus Mikroorganismen – inaktivieren. Wir konnten ein Plasmaverfahren etablieren, bei dem selbst hochresistente Endosporen verschiedener Bacillus-Arten vermehrungsunfähig werden. Zugleich wurden die Proben von Pyrogenen befreit. Ebenso werden Excimer-Plasma zur Erzeugung von Strahlung zwischen 172 nm und 308 nm eingesetzt, um Oberflächen zu sterilisieren und Pyrogene zu inaktivieren.



### Zellkulturtechnik

Ein Arbeitsschwerpunkt für die Entwicklung von Zellkultur-oberflächen, die eine selektive Proliferation fördern, liegt in der Kontrolle molekularer, mechanischer und topographischer Oberflächeneigenschaften. Im Gegensatz zu herkömmlichen Ansätzen wollen wir auf diese Weise die Produktion von Reinkulturen eines erwünschten, aber nur schwer isolierbaren Zelltyps ermöglichen. Auch die Differenzierung von Zellen steuern wir über Oberflächeneigenschaften des Trägermaterials. Hier verfolgen wir verschiedene Ansätze Oberflächen zu entwickeln, die das Wachstum von Zellen fördern, sich zur selektiven Anzucht spezieller Zelltypen eignen oder auch die Differenzierung von Zellen beeinflussen. Diese Arbeiten sind für die Vermehrung und Separation verschiedener Zelltypen von großer Bedeutung. Materialoberflächen werden mittels Plasmatechnik mit spezieller Chemie ausgestattet, aber auch die mechanischen und energetischen Oberflächeneigenschaften sind hier zu modulieren und werden mit diesen Verfahren optimiert.

- 1 *Plasmabeschichtung von Kontaktlinsen.*
- 2 *Funktionalisierung der Oberflächen von Koronarstents.*
- 3 *Beschichtung von Zahnimplantaten mittels Plasmaprozesse.*

 <b>Grenzflächen von Nanomaterialien, Membranen, Folien, Textilien, Medizingeräten etc.</b>	<b>Anwendungen mit verstärkter Wechselwirkung</b>	<b>Anwendungen mit verminderter Wechselwirkung</b>
 Proteine in Kontakt mit anderen biologisch aktiven Molekülen	spezifische Bindung von Biomolekülen für die Diagnostik, heterogene Biokatalyse, Anbindung von spezifischen Fängermolekülen	minimierte Proteinadsorption -> verringertes Fouling
 Mikroben	immobilisierte Mikroben	bakteriophob, bakteriostatisch, bakteriozide Oberflächen, Sterilisation, Desinfektion
 Säugerzellen	Wachstumsunterstützung und Differenzierung von Stammzellen und Test-Kits	verringerte Probleme mit temporären Implantaten, verringerte Restenose





1



2



3

## WEITERE ANWENDUNGSFELDER

### Pharmazeutische Diagnostik

In diesem Feld gilt es, Oberflächen mit biochemischen Funktionen in definierter Dichte auszurüsten. Damit handelt es sich um ähnliche Fragestellungen wie sie unter Medizintechnik und Biotechnologie schon erläutert wurden, z. B. der Proteinadhäsion. In der Diagnostik können jedoch zusätzlich Markermoleküle zum Einsatz kommen. Das Fraunhofer IGB ist hier an der Entwicklung unterschiedlicher Typen diagnostischer Biochips beteiligt, bei deren Herstellung u. a. auch die Plasmatechnik eingesetzt wird.

### Energietechnik

Im Bereich organische Photovoltaik werden Hochbarrierschichten gegen Sauerstoff benötigt, an denen wir derzeit Entwicklungsarbeit leisten. Zudem arbeiten wir daran, Membranen für die Energietechnik bereitzustellen, welche unter anderem für neuartige Brennstoffzellen von Bedeutung sein könnten. Doch nicht nur Anwendungen für die Energiegewinnung sind hier zu nennen: Auch die Energieeinsparung durch die Optimierung der Oberflächen von Kugellagern hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften liefert einen Beitrag in diesem Feld.

### Elektronikindustrie

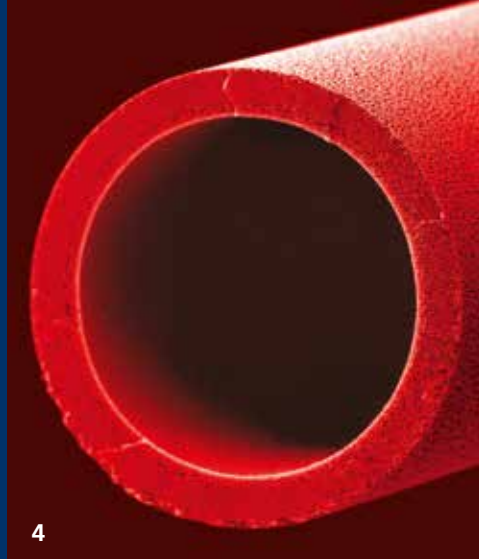
In der Halbleiterindustrie ist die Plasmatechnik zur Erzeugung von Strukturen die grundlegende Technologie. Mithilfe nanolithographischer Verfahren werden derzeit Strukturen < 100 nm kommerziell eingesetzt. Neue Verfahren haben Prozessorarchitekturen mit 32 nm (Nehalem-C, Intel) zum Ziel. Geplant sind 15-nm-Architekturen.

### Textilindustrie

Fragestellungen bei Anwendungen im textilen Bereich betreffen häufig hydrophile oder auch hydrophobe Ausrüstungen sowie die Anfärbbarkeit bei kunstfaser- und naturfaserbasierten Materialien. In der Textilindustrie sollen Einzelfasern wie auch fertige Gewebe behandelt werden. Bei Einzelfaserbehandlungen müssen sehr hohe Behandlungsgeschwindigkeiten erreicht werden, sodass die Prozesse in die Produktionsanlagen integriert werden können.

Im Falle der Gewebebehandlungen sind zwar die erforderlichen Behandlungsgeschwindigkeiten geringer, doch sind die Anforderungen an die Anlagentechnik deutlich größer. Zwar werden Niederdruckverfahren seit vielen Jahren für einfachere Problemstellungen wie etwa die Hydrophilierung von Polyestergeräten eingesetzt. Doch verfolgt man auch zunehmend den Ansatz, Vakuum durch Atmosphärendruckplasmen zu ersetzen, da man sich durch die einfacheren Anlagen eine Senkung der Kosten verspricht. Eine große Herausforderung speziell bei der Behandlung von Geweben in Atmosphärenplasmen ist die Homogenität der Behandlung. Ansonsten können aus den Textilien ausgasende Substanzen die Prozessführung beeinflussen, insbesondere bei Niederdruckverfahren.

Doch trotz dieser Herausforderungen bietet die Plasmatechnik sehr große Vorteile, vor allem die verringerten chemischen Abfälle betreffend. Bei nasschemischen Verfahren fallen zumeist große Mengen Sondermülls an, der entsprechend entsorgt werden muss. Die Anlagenkosten für Plasmaanlagen, die nasschemische Schritte ersetzen können, können sich daher mitunter schnell amortisieren.



## Optik

Für optische Elemente haben Plasmaverfahren eine Vielzahl von Ansätzen zu bieten. Plasmen werden mitunter als Beleuchtungsquellen eingesetzt, die je nach Zusammensetzung des Plasmagases ein bestimmtes Spektrum emittieren. Es gibt hierzu zahlreiche Entwicklungen, um Quecksilber in Leuchtmitteln zu ersetzen. Am Fraunhofer IGB beschäftigen wir uns mit der optischen Dünnschichttechnologie, mit der beispielsweise Schichten mit definiertem Brechungsindex und Antireflexschichten aus Metalloxiden oder Fluorkohlenstoffen hergestellt werden können. Auch Kratzschutzschichten für Linsen sind eine häufige Anwendung. Zudem liegt ein Schwerpunkt auf medizintechnischen Anwendungen wie der Oberflächenveredelung an Kontaktlinsen. Im Fokus des Fraunhofer IGB sind auch Hochbarriereschichten, wie sie für die Verkapselung von OLEDs (organic light emitting diodes) benötigt werden.

## Membrantechnik

Die Membrantechnik bildet einen Schwerpunkt am Fraunhofer IGB. Durch Bündelung dieser Kompetenz mit der Plasmatechnik werden neuartige Membranen entwickelt. Für medizinische Anwendungen sind Hohlfasermembranen unter dem Stichwort Medizintechnik und Biotechnologie aufgeführt. Doch bieten sich hier noch ganz andere Möglichkeiten: Standardmäßig trennen Separationsmembranen Stoffe primär nach der Größe der enthaltenen Partikel, aber auch über chemische Interaktion mit der Oberfläche. Hier lassen sich durch Plasmaverfahren chemisch funktionale Schichten aufbringen, die makroskopisch die Diffusions- und Löslichkeitseigenschaften der Membran beeinflussen. Dies geschieht einerseits über den Vernetzungsgrad und andererseits über die chemische Funktion der Schicht. Damit ergibt sich eine Vielzahl interessanter neuer Eigenschaften.

## Schutz des Kulturerbes und Restaurierung historischer Dokumente

Viele Kulturgüter sind schädlichen Einflüssen ausgesetzt, die zu Alterung und Zerfall beitragen können, oder sind bereits geschädigt. Geeignete Verfahren zur Reinigung und Konservierung sind ausschlaggebend für den langfristigen Erhalt des Kulturerbes. Mit Plasmen können Verunreinigungen ebenso wie schädliche, beispielsweise bakterielle Beläge vorsichtig abgetragen werden. Die Oberfläche kann anschließend dauerhaft oder auch vorübergehend mit einer Schutzschicht versehen werden. Selbst auf empfindlichen organischen Materialien wie alten Schriftstücken lassen sich Bakterien und Pilze abtöten, ohne die Oberfläche zu schädigen, und so lassen sich auch diese Materialien vor Verfall schützen.

- 1 *Anti-Eis- und Anti-Staub-Beschichtung von Solarpanelen.*
- 2 *Fluorfreie, wasserabweisende Textilveredelung.*
- 3 *Einstellbare Benetzung durch Plasmaprozesse.*
- 4 *Ausrüstung von Hohlfasern für verschiedene Anwendungen (Bild: © Gambro).*
- 5 *Entkeimung von historischem Papier.*





## UMWELTASPEKTE DER PLASMATECHNIK

Die Plasmatechnik bietet ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten. Sie kann zahlreiche nasschemische Verfahren ersetzen und kommt dabei ohne Lösemittel aus, welche einen großen Teil technologischen Sondermülls ausmachen. Speziell bei den Niederdruckplasmaverfahren ist der Chemikaliendurchsatz sehr niedrig.

### Feinreinigung von Metallen

Als Beispiel sei hier die ansonsten lösemittelintensive Feinreinigung von Metallen genannt, für die gelegentlich aber Wasserplasmen vorzuziehen sind. Bei der Reinigung in kleineren Anlagen (40 L Volumen) reicht ein Mol (18 g) Wasser für mehrere Reinigungszyklen. Dies ist dadurch möglich, dass während der Entladung hochreaktive Teilchen erzeugt werden, die Verunreinigungen entsprechend angreifen. Die Konzentration aggressiver Teilchen ist indes viel niedriger als in flüssigen Reinigungsmitteln. Dies tut der Reinigungsleistung keinen Abbruch, da bei Niederdruckgasentladungen die Mobilität der Teilchen um Größenordnungen höher ist als in Flüssigkeiten. Zudem fallen kaum gefährliche Abfallstoffe an: Beim Ausschalten der Entladung reagieren die aktiven Teilchen ab, indem sie beispielsweise rekombinieren. Somit kann die Plasmareinigung in Produktionsanlagen nasschemische Reinigungsverfahren ersetzen.

### Sterilisation von thermolabilen Kunststoffen

Diese sind für eine konventionelle Dampfsterilisation ungeeignet. Konventionelle Verfahren der Niedertemperatursterilisation arbeiten mit toxischen oder krebserregenden Stoffen wie Formaldehyd, Ethylenoxid oder Peroxyessigsäure. Mit Niederdruckplasmen kann schon bei Einsatz einer speziellen Mischung aus Sauerstoff und Stickstoff mit einigen mW/cm<sup>2</sup> Energieeintrag eine sterile Oberfläche erhalten werden.

### Chemische Aktivierung von Kunststoffen

Die chemische Aktivierung von Kunststoffen zwecks Überschichtung oder Verklebung benötigt im Allgemeinen harsche Bedingungen. So werden Chromschwefelsäure für ABS-Kunststoffe und Natriumnaphtalenid in Tetrahydrofuran für Fluorkohlenwasserstoffe als Aktivatoren eingesetzt. Diese Substanzen sind jedoch leichtentzündlich oder toxisch und dürfen nicht freigesetzt werden! Durch die Verwendung verschiedener Plasmaprozesse können diese Behandlungsmethoden ersetzt werden. Auch die auf chlorhaltigen Verbindungen basierende Antifilzausrüstung von Wolle lässt sich durch eine umweltschonendere Plasmabehandlung substituieren.

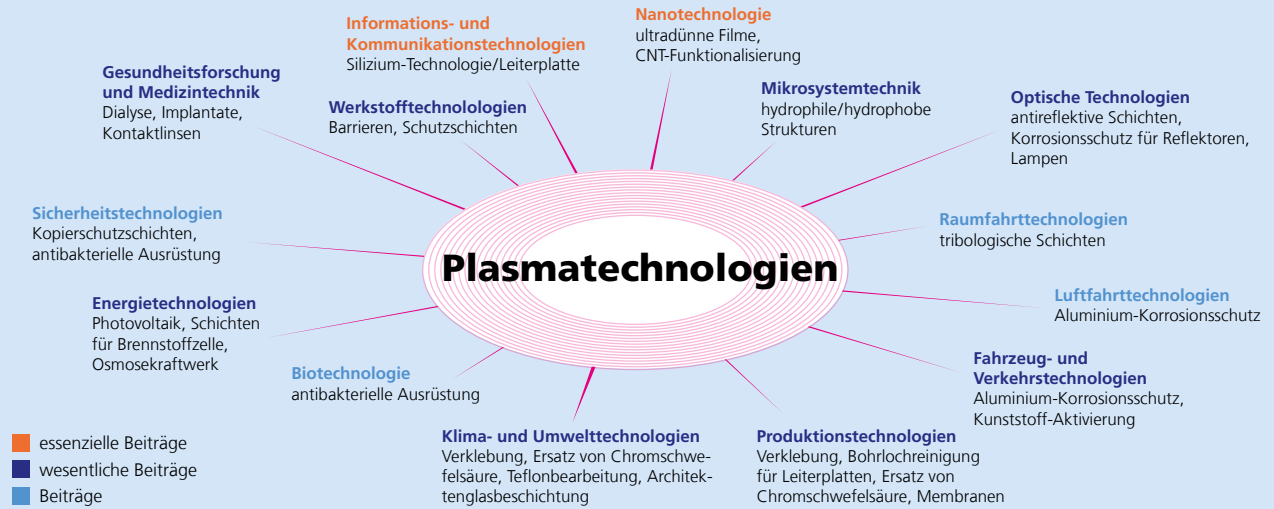
Des Weiteren kann die Plasmatechnik auch bei bestehenden Industrieprozessen die Umwelt entlasten, indem unerwünschte (z. B. schlecht riechende) oder schädliche Abgase durch eine entsprechende Plasma-Abgasreinigungsstufe zersetzt werden. Dies lässt sich auch auf Motorenabgase übertragen.

### **Atmosphären- oder Niederdruckplasma?**

Die Niederdruckplasmatechnik bietet für viele Aufgaben eine bessere Alternative zu bestehenden Verfahren. Sie eignet sich insbesondere für gegenüber Hitze und Chemikalien empfindliche Oberflächen, für Beschichtungen höchster Homogenität und Güte sowie für Beschichtungen, die umweltgefährdende Inhaltsstoffe erfordern, da hier der Chemikalieneinsatz gegenüber allen anderen Verfahren minimal ist.

Bei Atmosphärenplasmaverfahren reduziert sich der Aufwand für die Vakuumtechnik, da nur im Bereich der Absaugsysteme Unterdruck erzeugt wird. Bei beschichtenden Verfahren ist der Chemikaliendurchsatz jedoch höher, gegebenenfalls also auch der Anfall an Problemstoffen. Dennoch sind auch diese Verfahren vielen ihrer nasschemischen Pendanten umwelttechnisch überlegen. Sofern Atmosphärenplasmen sinnvoll eingesetzt werden können, wie zum Beispiel bei der Aktivierung von Fasern und Geweben vor deren Anfärbung, können diese in bestehende Anlagen integriert werden.





## WIRTSCHAFTLICHKEIT VON PLASMAPROZESSEN

Häufig werden vermeintlich hohe Anschaffungskosten als Gegenargument gegen die Plasmatechnik ins Feld geführt. Doch selbst Niederdruckprozesse sind bei weitem nicht so teuer, wie dies vor vielen Jahrzehnten einmal der Fall gewesen sein mag: Durch die vielseitige und zunehmende Verwendung der Vakuumtechnik nicht nur in der Halbleiterindustrie, sondern auch in vielen anderen industriellen Bereichen, ist der Preis zur Erzeugung eines Vakuums in den vergangenen Jahren nochmals deutlich gefallen. Dies betrifft sowohl die Beschaffung und Bereitstellung der Anlagen als auch – durch hohe technische Qualität und hohe Effizienz – die laufenden Kosten.

Dem finanziellen Aufwand durch Beschaffung, Installation und Betrieb einer Plasmaanlage stehen die hohen laufenden Kosten nasschemischer Verfahren entgegen. Allein schon der Verzicht auf Prozesse mit verschiedenen Bädern, bei denen neben regelmäßigem Medienaustausch und -entsorgung auch hohe Kosten für die Abfallentsorgung anfallen, führt zu Einsparungen. Hinzu kommt, dass auch nasschemische Verfahren hohe Anschaffungs- und Wartungskosten mit sich bringen können – denn oft müssen die chemischen Medien während des Gebrauchs permanent auf ihre Qualität hin überwacht werden, was eine entsprechende Wartung der Anlagentechnik und -sensorik erfordert. Dies alles führt dazu, dass die Plasmatechnik – trotz deutlich höherer anfänglicher Investitionskosten – aufgrund geringerer Betriebskosten (z. B. Entsorgungskosten für Bäder) und höherer Qualität beispielsweise bei der Beschichtung von Kontaktlinsen nasschemische Verfahren mittlerweile verdrängt hat.

Umweltaspekte und Wirtschaftlichkeit gehen Hand in Hand. Weniger Materialumsatz bei gleicher oder besserer Produktqualität bedeutet Materialersparnis und weniger Entsorgungsaufwand. Aus prozesstechnischem Blickwinkel stellen Plasmaverfahren somit Musterbeispiele für Ressourcen- und Kosteneffizienz dar. Hinzu kommt, dass ihr Anwendungspotenzial nicht auf wenige Materialsysteme beschränkt ist und für die meisten Fragestellungen zur Optimierung von Oberflächen genutzt werden kann. So stellen wir fest, dass Plasmatechnik zu fast allen Zukunftsfeldern einen Beitrag liefern wird.

<sup>1</sup> *Behandlung von Bahnware in Niederdruckplasmaprozessen.*



# ANLAGENTECHNIK

Wir verfügen über eine Reihe von Anlagen, um verschiedene plasmachemische und -physikalische Prozesse hauptsächlich in Nieder- und Subatmosphärendruckplasmen (0,01 bis 300 mbar) durchzuführen und weiterzuentwickeln. Vereinzelt arbeiten wir auch mit Plasmaverfahren bei Atmosphärendruck. Neben kommerziell erhältlichen Anlagen (z. T. modifiziert) sind eigene Konstruktionen vorhanden. Für besondere Probengeometrien und Prozessanforderungen können wir schnell geeignete Reaktoren bauen und sie mit vorhandenen Anlagenkomponenten (Prozessgas-, Fluss- und Druckreglern, Vakuumkomponenten, Hochfrequenz-Generatoren) zu Labor- oder Technikumsanlagen zusammenstellen.

## Plasmaanregung

- Frequenzbereiche: Gleichstrom, Niederfrequenz (kHz-Bereich), Radiofrequenz (13,6 MHz), Mikrowellen (2,45 GHz)
- Leistung: einige W bis 2 kW
- kontinuierliche und gepulste Anregung

## Prozessgase

- inerte Gase
- reaktive Gase für Oberflächenmodifizierung (z. B. sauerstoff-, wasserstoff-, halogenhaltige Gase)
- Schichtbildner (z. B. Silane/Siloxane, Alkane/Alkene, Fluoralkane/-alkene, Amino- und Acrylverbindungen)
- (Unter-)Wasser-Plasmen

## Anlagen

- Anlagen zur kontinuierlichen Behandlung von Bahnware und Fasern
- Parallelplattenreaktoren
- Reaktoren zur Schlauchbehandlung
- Anlage zur Plasma-Innenbeschichtung von Flaschen, Kanistern oder anderen größeren Hohlkörpern
- (reaktives) Magnetron-Sputtern
- Parylen®-Beschichtungsanlage in Kombination mit Plasmaverfahren

## Plasmadiagnostik: Einblick in das physikalisch-chemische Geschehen

Bei plasmadiagnostischen Methoden muss man zwischen nicht-invasiven und invasiven Methoden unterscheiden. Da invasive Methoden wie zum Beispiel Sonden das Plasma verändern können, wenden wir am Fraunhofer IGB hauptsächlich nicht-invasive optische Methoden an:

- Mikrowellen-Interferometrie zur Bestimmung der Elektronendichte
- laserinduzierte Fluoreszenz zur ortsaufgelösten Bestimmung von Teilchendichten im Plasma
- optische Emissionsspektroskopie zum Nachweis emittierender Spezies
- Oberflächentemperaturdetektion durch Messung der Fluoreszenzabklingzeit eines angeregten Kristalls

Als invasive Methoden nutzen wir

- Massenspektrometrie (wenig invasiv) zum Tracing chemischer Reaktionen im Plasma und
- Langmuir-Sonden zur Messung der Elektronenenergieverteilung, der Elektronen- und Ionendichte.

## UNSER ANGEBOT

- Prozessentwicklung zur Plasmamodifizierung von Oberflächen (Pulver, Fasern, Flächen und Formkörper)
- Schichtentwicklung
  - Kratzschutz-, Abriebschutzschichten, Schichten mit geringem Reibwert
  - Anti-Eis-Schichten zur Verminderung der Eisbildung auf Oberflächen und zur Reduzierung der Eisanhaftung
  - Erzeugung eines Haftvermittlers oder Haftverhinderers
  - Korrosionsschutzschichten
  - Barrierschichten (z. B. sauerstoff- und wasserdampfundurchlässig) und Schichten zur Verbesserung der Restentleerung von Verpackungen
- Funktionalisierung von Oberflächen
  - Biofunktionalisierung, chemische Funktionalisierung
- Entwicklung von Plasma-Reinigungsprozessen
- Entwicklung von Verfahren zur Wasseraufbereitung mittels AOP-Prozessen
- Entwicklung von Plasma-Sterilisationsprozessen und UV- und VUV-Lichtquellen
- Oberflächen- und Schichtcharakterisierung
  - Geometrie, Morphologie, Rauigkeit
  - chemische Zusammensetzung, biologische Eigenschaften
  - Grenzflächenenergie, Haftung
  - Farb- und Glanzwertbestimmung
- Verfahrens- und Anlagenentwicklung
- Upscaling von Laborprozessen
- Beratung, Beurteilung und Machbarkeitsstudien zur Etablierung von Plasmaverfahren als technologische Alternative
- Patent- und Literaturrecherchen zu Themen der Plasmatechnologie

## INTERNATIONALE GREMIEN

### Hon.-Prof. Dr. Christian Oehr

- PLASMA Germany – Vorsitzender, Mitglied im Koordinierungsausschuss und Mitglied im Fachausschuss »Plasmabehandlung von Polymeren«
- Vorstandsmitglied des Kompetenznetzes Industrielle Plasma-Oberflächentechnik INPLAS
- Editorial Board Conference on Plasma Surface Engineering PSE
- Co-Editor-in-chief Plasma Processes and Polymers (PPP)
- Editorial Board Vakuum in Forschung und Praxis (VIP)
- Stellvertretender Sprecher der Fraunhofer-Allianz Polymere Oberflächen POLO®

### Mitglied in verschiedenen Fraunhofer Allianzen

- Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung
- Fraunhofer-Allianz Photokatalyse
- Fraunhofer-Allianz Polymere Oberflächen POLO®
- Fraunhofer-Allianz Textil
- Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik



## Kontakt



**Hon.-Prof. Dr. Christian Oehr**  
Abteilungsleiter Grenzflächen-  
technologie und Materialwissenschaft  
Telefon +49 711 970-4137  
[christian.oehr@igb.fraunhofer.de](mailto:christian.oehr@igb.fraunhofer.de)



**Dr. Jakob Barz**  
Telefon +49 711 970-4114  
[jakob.barz@igb.fraunhofer.de](mailto:jakob.barz@igb.fraunhofer.de)

**Fraunhofer-Institut  
für Grenzflächen- und  
Bioverfahrenstechnik IGB**  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-4401  
Fax +49 711 970-4200  
info@igb.fraunhofer.de  
www.igb.fraunhofer.de

### **Fraunhofer IGB Kurzprofil**

Das Fraunhofer IGB entwickelt und optimiert Verfahren, Produkte und Technologien für die Geschäftsfelder Gesundheit, Chemie und Prozessindustrie sowie Umwelt und Energie. Wir verbinden höchste wissenschaftliche Qualität mit professionellem Know-how in unseren Kompetenzfeldern – stets mit Blick auf Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Komplettlösungen vom Labor- bis zum Pilotmaßstab gehören dabei zu den Stärken des Instituts. Kunden profitieren auch vom interdisziplinären Austausch zwischen den fünf FuE-Abteilungen in Stuttgart und den Institutsteilen an den Standorten Leuna und Straubing. Das konstruktive Zusammenspiel der verschiedenen Disziplinen am Fraunhofer IGB eröffnet neue Ansätze in Bereichen wie Medizintechnik, Nanotechnologie, industrieller Biotechnologie oder Umwelttechnologie. Das Fraunhofer IGB ist eines von 69 Instituten und Forschungseinrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft, Europas führender Organisation für angewandte Forschung.

[www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

Bleiben Sie mit uns in Verbindung:

