

**plasma technology GmbH**

Jörg Eisenlohr

# **Plasmawissen**

**Das kompetente Nachschlagewerk der  
Plasmatechnik**

1. Auflage

## Impressum

Herausgeber: plasma technology GmbH  
Marie-Curie-Straße 8  
71083 Herrenberg-Gültstein  
Tel. +49 (0) 7032 91 838-0  
info@plasmatechnology.de  
www.plasmatechnology.de

Redaktion: Dipl.-Ing. (FH) Jörg Eisenlohr

Bilder und Grafiken: Dirk Saßmannshausen

Design & Layout: Dirk Saßmannshausen

Druck: xalinoprint®.de

1. Auflage, 2016

© 2016, plasma technology GmbH, Marie-Curie-Straße 8, 71083 Herrenberg-Gültstein, Germany

Dieses Werk einschließlich aller Bestandteile, Einzelbeiträge und Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die

## Haftungsausschluss

Es wird darauf hingewiesen, dass in diesem Nachschlagewerk unter anderem Begriffe definiert sind, die sich auf plasma technology Anlagen oder Prozesse beziehen. Alle Angaben, Werte und Einsatzgebiete für die aufgeführten Anlagen und Prozesse sind ausnahmslos allgemeiner Natur. Weiterhin gibt der Autor nach bestem Wissen und Gewissen seine persönliche Auffassung wieder. Die entbindet den Leser nicht davon, durch eigene Nachforschungen und Versuche festzustellen, durch welche Prozesse die geforderten Prüfungen, Beständigkeiten, Anforderungen etc. am eigenen Produkt erfüllt werden können. Eine Haftung des Autors ist somit unter allen rechtlichen Gesichtspunkten ausgeschlossen.

## Auf ein Wort

Dem Unbekannten wohnt bekanntlich ein gewisser Zauber inne. Bezieht man diese Aussage auf die Plasmatechnologie, so kommt es für viele Menschen einem Zauber gleich, wenn nach einer kurzen Verweilzeit in einer leuchtenden Plasmaatmosphäre die Werkstückoberflächen beschichtbar oder verklebbar sind oder ganz neue Eigenschaften besitzen.

Der Wunsch, das universelle Werkzeug Plasma interessierten Personen näher zu bringen, hat seit langem in mir geschlummert. Mit der 1. Auflage von Plasmawissen - Das kompetente Nachschlagewerk der Plasmatechnik wurde der Wunsch nun war.

Über 20 Jahre Plasmaerfahrung meiner Mitarbeiter und mir sind in die nachfolgenden Seiten eingeflossen. Wir zeigen auf, welche Möglichkeiten in der Plasmatechnik stecken, so dass Sie Ansatzpunkte für Ihre tägliche Arbeit erhalten. So können mit dem richtigen Plasmaprozess lösemittelhaltige Primersysteme oder nasschemische Reinigungsverfahren ersetzt werden - in Zeiten immer strengerer Verordnungen ein Punkt, über den es nachzudenken gilt. Ebenso können über mehrstufige Plasmaprozesse Strukturen erzeugt oder Schichten abgeschieden werden, die sich sonst nur durch mehrere Arbeitsschritte herbeiführen lassen.

Die Anlagentechnik ist kein Hexenwerk und lässt sich auch noch nachträglich in bestehende Fertigungsabläufe integrieren. Dank einer benutzerfreundlichen Oberfläche der Steuerung ist sie einfach zu bedienen.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und neue Erkenntnisse bei der Lektüre unseres Plasmawissens.



Foto: Martin Wagenhan / L-Bank

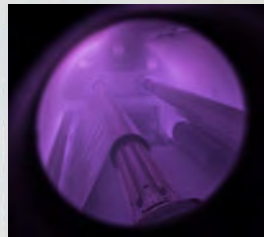
Dipl.-Ing. Jörg Eisenlohr  
Geschäftsführer

Jeanette Eisenlohr  
Mitglied der Geschäftsleitung



## plasma technology GmbH

Das Unternehmerehepaar Jeanette und Jörg Daniel Eisenlohr bietet eine zukunftsweisende High-Tech-Dienstleistung: Die Oberflächen von Objekten, die in der Metall-, Auto- und Textilindustrie oder in Medizingeräten zum Einsatz kommen, werden mit Plasma – einem ionisierten Gas – veredelt.



Von der mikrobakteriellen Reinigung bis zur Oberflächenstrukturierung: Mit ihren teilweise selbst entwickelten Maschinen stellt sich plasma technology immer wieder neu auf die spezifischen Anforderungen ihrer anspruchsvollen Kunden ein.



## Landespreisträger 2012

466 junge Firmen hatten sich 2012 um den Baden-Württembergischen Landespreis, der alle zwei Jahre vom Land und von der L-Bank ausgeschrieben wird, beworben. Die Top-10-Unternehmen setzten sich an die Spitze eines vielschichtigen Teilnehmerfeldes und wurden im Neuen Schloss Stuttgart geehrt. Zu ihnen gehört der in Herrenberg ansässige Niederdruckplasmaanlagenhersteller plasma technology GmbH, die die 11-köpfige Jury mit ihrer Leistungstärke und Kreativität, sowie durch ihr soziales und ökologisches Engagement überzeugte.

Christian Brand, Vorsitzender des Vorstandes der L-Bank, erklärte in seiner einführenden Ansprache, dass sich alle Preisträger durch ihren wirtschaftlichen Erfolg und durch ihre hohe soziale Kompetenz hervorheben. Ministerpräsident Winfried Kretschmann betonte in seiner Festrede: „Der Reichtum Baden-Württembergs liegt in den Köpfen der Menschen, da in BW keine Bodenschätze und Rohstoffe vorhanden sind. Die Vielzahl der eingereichten Geschäftsideen bestätigt dies.“

Die Preise wurden persönlich vom Schirmherrn des Landespreises für junge Unternehmen Winfried Kretschmann, sowie dem Vorstandsvorsitzenden und Jurymitglied Christian Brand übergeben. Auf dem Bild sind die Herren nach der Preisübergabe mit Jeanette und Jörg Eisenlohr, den Geschäftsführern von plasma technology, zu sehen.



Bild von links (© KD Busch / L-Bank): Ministerpräsident Winfried Kretschmann, Jörg Eisenlohr, Jeanette Eisenlohr, Christian Brand



## Inhaltsübersicht

<b>Die Spezialisten der Plasmatechnologie</b> .....	7
<b>Einführung in die Plasmatechnik</b> .....	11
<b>Überprüfung der Vorbehandlungseffekte</b> .....	13
<b>Plasma zur Vorbehandlung</b> .....	14
<b>Das Plasma</b> .....	14
<b>Physikalisch-chemische Aspekte</b> .....	16
<b>Gleichstrom-Plasma</b> .....	16
<b>Niederfrequenz/Hochfrequenz-Plasma</b> .....	17
<b>Mikrowellen-Plasma</b> .....	17
<b>Prozessgase</b> .....	18
<b>Plasmaquellen und Anlagentechnik</b> .....	19
<b>Die Substratoberfläche</b> .....	28
<b>Anwendungen der Plasmatechnik</b> .....	30
<b>Feinstreinigung von Oberflächen mit Hilfe von Plasma</b> .....	31
- Feinstreinigung von Metallen .....	32
- Feinstreinigung von Polymeren .....	35
- labs-Freiheit .....	35
- Abreinigung von partikulären Verschmutzungen .....	38
<b>Aktivierung von Polymeroberflächen</b> .....	39
<b>Strukturierung von Kunststoffoberflächen</b> .....	43
- Hochleistungskunststoffe .....	44
- PCB Ätzen .....	45
<b>Schichtabscheidung im Plasma</b> .....	48
- Plasma Primer .....	49
- Kohlenstoffschichten .....	51
- Magnetron Sputtern .....	52
- Gleitbeschichtung von Elastomeren .....	52
- Antimikrobielle Ausrüstung .....	53
<b>Plasma-UV zur Lackhärtung</b> .....	53
<b>Zusammenfassung</b> .....	55
<b>Glossar</b> .....	56
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	67

## Die Spezialisten der Plasmatechnologie

Die plasma technology GmbH besitzt im Bereich der Niederdruckplasmatechnik mehr als 20 Jahre Erfahrung. Die Experten planen und entwickeln Prozesse und Anlagen, die auf die Bedürfnisse der Kunden abgestimmt sind. Die Plasmaanlagen kommen nicht von der Stange, sondern sind in der Regel Unikate. Doch nicht nur die Anlagentechnik liegt dem Team am Herzen, sondern auch die Prozesse zur Vorbehandlung der Oberflächen. Am Ende der Projektphase erhält der Kunde seine maßgeschneiderte Plasmaanlage, die auf Knopfdruck die gewünschte Menge an Teilen mit dem erarbeiteten Prozess vorbehandelt.

## Partner für Neues

Die individuelle Prozessarbeit erfolgt mit dem Kunden in einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit. Um erzielte Effekte besser zu verstehen, werden diese analysiert und basierend auf den Ergebnissen die nächsten Entwicklungsschritte eingeleitet. Außerdem bringt das Team von plasma technology sein Wissen als Mitglied in projektbegleitende Ausschüsse bei staatlich geförderten Forschungsprojekten von namhaften Instituten ein. Eigeninitiierte Forschungsprojekte mit Industriepartnern werden ebenfalls durchgeführt.

## Zertifizierung

Seit 2009 ist plasma technology nach DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert. Prozesse punktgenau für die Anwendung beim Kunden zu entwickeln ist für das erfahrene Team selbstverständlich. Ebenso eine qualifizierte Beratung sowie die konsequente Weiterentwicklung der Anlagensteuerungen im Sinne der Bedienerfreundlichkeit und höchste Zuverlässigkeit beim Service vor Ort.

## Kundenspezifische Entwicklungen

Umfassende Gesamtkonzepte für den Kunden - keine Standalone-Anlagen, sondern in den Fertigungsablauf integrierte Vorbehandlungsanlagen. Diese sind im Kammer-volumen und der Taktzeit abgestimmt auf den Teiledurchsatz der bereits bestehenden oder geplanten Fertigungslinie. Die Beschickung der Anlagen erfolgt manuell, halbautomatisch oder vollautomatisch, ganz an den individuellen Materialfluss angepasst.

Ebenso handelt es sich bei den eingesetzten Vorbehandlungsprozessen meist um maßgeschneiderte, produktspezifische Abläufe. Denn jede Oberfläche, jedes Produkt, jedes Material, jede Anwendung besitzt eigene Anforderungen, die es zu berücksichtigen gilt. 08/15 Abläufe werden den hochentwickelten Materialien, sowohl den Beschichtungs- als auch den Grundwerkstoffen nicht gerecht.



## Zufriedene Kunden

Die Niederdruckplasmaanlagen der plasma technology GmbH werden in verschiedenen Industriezweigen betrieben. Dazu gehören Automobil- und Spielwarenhersteller ebenso wie Lackier- und Beschichtungsunternehmen, Hersteller von Gleitlagern, Elastomerteilen und Sensorsystemen, aber auch Zulieferer für die Medizin- und Dichtungstechnik sowie der Elektronik- und Textilindustrie.

## Lohnbehandlung

Die plasma technology GmbH betreibt die eigenen Anlagen zur Prozessentwicklung, zur stetigen Optimierung der Anlagen- und Steuerungstechnik sowie zur Lohnbehandlung. Mit dem vorhandenen Anlagenpark werden Aktivierungen, Strukturierungen, Feinstreinigungen und plasmapolymere Beschichtungen auf nahezu allen Materialoberflächen durchgeführt. Ob Kleinmenge, Großmenge, Schüttgut, Stapelware oder Rollenware - die verfügbaren Möglichkeiten sind vielfältig.

Das Angebot der Lohnbehandlung ist geeignet für Firmen, die aufgrund kleiner Losgrößen nur temporär eine Plasmabehandlung benötigen oder die Zeit bis zur Inbetriebnahme der eigenen Anlage überbrücken wollen.



## Bau von Anlagen

Die plasma technology GmbH hat neben den kundenspezifischen Anlagen auch eine Produktlinie mit Labor- und Kleinanlagen. Die Kammervolumina dieser Tischanlagen beginnen bei 2,4 Litern bis hin zu 32 Litern. Als Standanlagen sind die Maschinen einer weiteren Produktlinie ausgeführt. Diese besitzen Kammern mit Volumen von 55, 100 und 150 Litern.

Sollen Kleinteile als Schüttgut in den zuvor genannten Anlagentypen bearbeitet werden, dann wird die Plasmakammer mit einem rotierenden Korb ausgestattet, um eine gleichmäßige Rundumbehandlung aller Teile sicherzustellen. Bei der Behandlung von Bahnware wird über einen Einschubwagen der Wickel in die Kammer eingebracht und während der Behandlungsdauer in der Plasmaatmosphäre umgewickelt. Diese Produktlinie besitzt in der Regel Kammern mit einer Größe von mehreren Kubikmetern. Die Größe wird bestimmt durch die Wickellänge und dessen Durchmesser.

Bei vollautomatisierten Anlagen, Kurztaktanlagen und Schiebetischanlagen, sowie Großanlagen werden das Fassungsvermögen und die Pumpleistung der Vakuumpumpe immer an die Kundenbedürfnisse angepasst. Die größte von plasma technology gelieferte Niederdruckplasmaanlage besitzt einen Durchmesser von 3 m und eine Länge von 6 m, was einem Fassungsvermögen von 42.000 Litern entspricht.

## Seminare & Schulungen

Für interessierte Personen bietet plasma technology mehrfach im Jahr einen Praxistag Plasmatechnik an, der zum Ziel hat Plasma „greifbar“ zu machen. Im theoretischen Teil werden die Voraussetzungen für Haftfestigkeit sowie die Anlagen- und Prozesstechnik erläutert. Der zweite, praktische Teil findet an den Anlagen statt und es werden praktische Versuche durchgeführt.

Dass sich an eine Anlageninstallation beim Kunden eine intensive Mitarbeiterschulung des bedienenden Personals anschließt, ist für das plasma technology Team selbstverständlich.



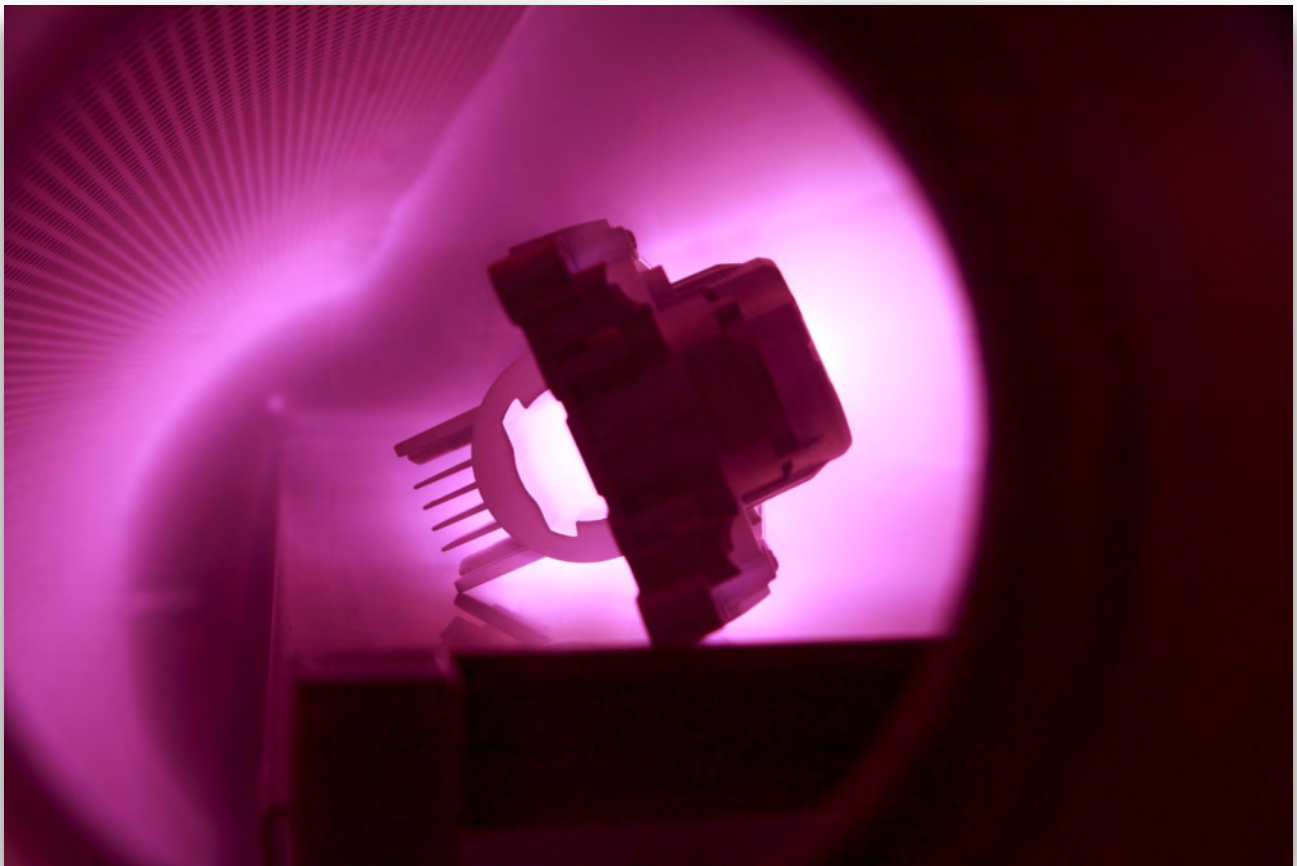
## 1. Einführung in die Plasmatechnik

Bei geringem Druck von  $<100$  Pa wird in einer Vakuumkammer ein kaltes Plasma erzeugt. Durch das Anlegen elektromagnetischer Felder werden die in der Kammer enthaltenen Gase oder Gasgemische ionisiert und somit in den hochreaktiven Plasmazustand überführt. Die Oberflächeneigenschaften der eingebrachten Bauteile werden durch die Wahl der Gaszusammensetzung (Luft, Stickstoff, Sauerstoff u. a.) und der Art der Energieeinkopplung [DC, kHz, MHz (Radiofrequenz) oder GHz (Mikrowellen)] gezielt verändert.

Im Niederdruckplasma können Oberflächen

- feinstgereinigt,
- aktiviert,
- beschichtet,
- strukturiert

werden.



## 1.1 Plasmaaktivierung

Aufgrund ihres unpolaren Charakters lassen sich viele Polymere nicht oder nur schwer bedrucken, lackieren und verkleben. Daher ist eine Aktivierung erforderlich, um die Oberflächenenergie zu erhöhen. Durch einen Niederdruckplasmaprozess wird die Oberfläche modifiziert, indem die Polymerketten z. B. durch Carbonyl- ( $>C=O$ ), Carboxyl- ( $-COOH$ ) oder Hydroxylgruppen ( $-OH$ ) funktionalisiert werden. Dadurch wird die Oberflächenenergie des Werkstücks erhöht und der Oberflächenspannung des zu applizierenden Stoffs angeglichen. Diese eingelagerten funktionellen Gruppen können mittels Elektronen-Spektroskopie zur chemischen Analyse (ESCA) charakterisiert und quantifiziert werden.

## 1.2 Plasmafeinstreinigung

Werden sehr saubere Oberflächen benötigt, so können diese im Niederdruckplasma erzeugt werden, wenn die Kontamination in geringer Schichtdicke vorliegt. Mit diesem Verfahren lassen sich nahezu alle organischen Verunreinigungen beseitigen, da diese im Plasma in die Gasphase überführt und durch den konstanten Gasfluss abgeführt werden.

## 1.3 Beschichtung im Niederdruckplasma (Plasmapolymerisation)

Bei dieser Verfahrensvariante werden niedermolekulare, organische Monomere als Prozessgas in ein Plasma eingebracht. Diese Monomere werden im Plasma angeregt, gespalten und als stark vernetzte, dauerhafte Polymerschicht auf beliebigen Substraten abgeschieden. Die Eigenschaften dieser Schicht werden vom Typ des eingesetzten Monomers, durch die verwendeten Zusatzgase und die gewählten Prozessparameter bestimmt.

## 1.4 Strukturierung im Niederdruckplasma

Bei der Strukturierung wird gezielt Material von der Oberfläche abgetragen und in die Gasphase überführt sowie aus der Kammer abgeleitet. Kontinuierlich wird neues Prozessgas hinzugefügt, um die Umsatzrate konstant zu halten. Durch den Materialabtrag wird die Oberfläche aufgeraut, vergrößert und somit benetzbar. Mit dieser Verfahrensvariante ist es möglich schwer lackier- und verklebbare Polymere, wie POM, PPS oder PTFE für einen Beschichtungsprozess vorzubehandeln.

## 2. Überprüfung der Vorbehandlungseffekte

Die Vorbehandlung von Oberflächen durch eine Plasmaatmosphäre ist in der Regel mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Testtinten zeigen lediglich, ob sich die Benetzbarkeit der Oberfläche verändert hat. Um die erzielten Effekte überprüfen zu können, stehen vor Ort im Technikum nachfolgende Messmöglichkeiten zur Verfügung.

### 2.1 Kontaktwinkelmessgerät

Wie in Abschnitt 3.4 eingehend erläutert, entscheidend der polare Anteil, der durch die Aktivierung einer Polymeroberfläche erzeugt wird, ob die nachfolgende Beschichtung eine haftfeste Verbindung mit der Oberfläche eingeht oder nicht. Daher steht ein Kontaktwinkelmessgerät zur Verfügung, mit dem die Veränderung der Oberflächenenergie, insbesondere des polaren Anteils, ermittelt werden kann. Basierend auf den erhaltenen Ergebnissen, können die Plasmaparameter optimiert werden.

### 2.2 Zugprüfmaschine

Im Vergleich zu Lackierungen können Verklebungen mit dem Originalklebstoff nahezu überall durchgeführt werden. Die beste Aussage, ob durch die Aktivierung nun die für den Klebstoff relevanten funktionellen Gruppen an der Oberfläche vorhanden sind oder nicht, trifft dieser selbst. Daher verfügen wir über eine Zugprüfmaschine mit einer Zugkraft von bis zu 2,5 kN, so dass die Prüfkörper nach der Aktivierung mit dem Originalklebstoff gefügt und nach dessen Aushärtung geprüft werden können.

### 2.3 Lichtmikroskop

Mit diesem Universalwerkzeug können die Bauteiloberflächen vor und nach der Vorbehandlung betrachtet werden, um je nach angestrebtem Effekt eine Veränderung feststellen zu können. Außerdem kann das Bruchbild der geprüften Verklebungen aussagekräftiger beurteilt werden.

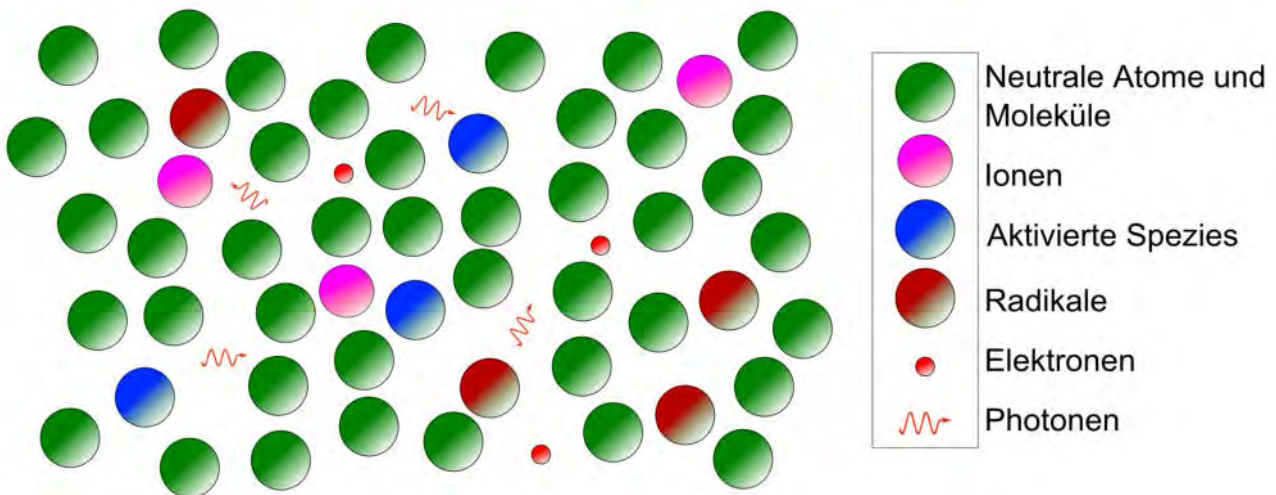
### 2.4. Reibwertreduzierung

In Abschnitt 3.5.4.4 wird beschrieben, dass durch gezielte Schichtabscheidung im Plasma der Reibkoeffizient von Elastomeren reduziert werden kann. Doch auch hier stellt sich wieder die Frage nach der Überprüfbarkeit des erzielten Effektes. Hierfür ist eine Prüfvorrichtung vorhanden, mit der das verbesserte Gleitverhalten und die Beständigkeit der Beschichtung ermittelt werden können. Zum einen wird die für einen Hub aufzuwendende Kraft ermittelt und zum anderen kann über die Anzahl der Hübe überprüft werden, ob die abgeschiedene Schicht einer Dauerbelastung und der geforderten Lebensdauer standhält.

### 3. Plasma zur Vorbehandlung

#### 3.1 Das Plasma

Ein Stoff befindet sich im festen Zustand, wenn alle Atome, Moleküle und Ionen im Feststoffgitter vorgegebene Plätze besitzen und miteinander wechselwirken. Wird dem System eine Energiemenge von  $> 0,4 \text{ eV}$  zugeführt, so wird die Gitterstruktur aufgelöst und der Stoff geht in die flüssige Phase über. Die festen Positionen der Partikel sind nun aufgehoben, es bestehen zwischen ihnen allerdings noch klare Wechselwirkungen. Durch weitere Energiezufuhr ( $> 0,6 \text{ eV}$ ) wird der gasförmige Zustand erreicht. Die Partikel bewegen sich nun frei und zufällig im Raum. Die Häufigkeit ihrer Kollisionen ist druck- und temperaturabhängig. Erfolgt ein weiterer Energieeintrag in diese Gasphase, so werden die Partikel selbst in den Prozess einbezogen und angeregt. Durch Zufuhr weiterer  $4 \text{ eV}$  werden einzelne Elektronen der Atomhülle auf höhere Schalen, das heißt Energieniveaus, gehoben. Liegt die zugeführte Energie zwischen  $4 - 18 \text{ eV}$ , dann ist der Bereich der Ionisation erreicht, da Elektronen aus den äußeren Energieschalen herausgeschlagen beziehungsweise Moleküle gespalten werden. Neben Ionen stehen nun reaktionsfreudige Radikale für Reaktionen mit der Oberfläche der vorzubehandelnden Teile zur Verfügung. Radikale sind Ionen oder Moleküle mit einem ungepaarten, „einsamen“ Elektron in der äußeren Schale. Der vierte Aggregatzustand, wie das Plasma auch bezeichnet wird, ist erreicht. Er setzt sich aus neutralen Atomen und Molekülen, aktivierten Spezies, Elektronen, Radikalen und Ionen zusammen (Bild 1).



**Bild 1:** Zusammensetzung des Plasmas; die Anzahl der neutralen Moleküle und/oder Atome ist sehr viel größer als es in diesem Schema dargestellt werden konnte.

Im Plasma ist die Zahl der positiven (Ionen) und negativen Ladungsträger (Elektronen) gleich, daher ist ein Plasma nach außen neutral. Die Zahl der neutralen von der Energiezufuhr unbeeinflussten Spezies überwiegt jedoch deutlich, so dass der Aktivierungsgrad (Summe der aktivierten Spezies, Radikale und Ionen) in der Regel im Bereich von wenigen Prozent liegt. Die für einen Plasmazustand charakteristische Farbe (Tabelle 1) hängt von dem angeregten Gas ab. Elektronen emittieren Licht, wenn sie aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand zurückkehren. Die Energiedifferenz zwischen diesem Grundzustand und angeregtem Zustand bestimmt die Farbe des Lichtes und ist element- bzw. molekulspezifisch.

Gasart	Plasmafärbung der negativen Glühzone	Plasmafärbung der positiven Glühzone
Wasserstoff	fahlblau	rosa
Stickstoff	rot	blau
Sauerstoff	gelblich	fahlblau
Helium	blaugrün	rotviolett
Neon	orange	ziegelrot
Argon	dunkelblau	dunkelrot

Tabelle 1: Leuchterscheinungen des Plasmas unterschiedlicher Gase

Die nachfolgend beschriebenen Plasmaprozesse finden alle in geschlossenen Kammern im Feinvakuum statt, um die mittlere freie Weglänge der erzeugten reaktiven Spezies zu erhöhen. Nach DIN 28400 Teil 1 (2) ist der Begriff Vakuum wie folgt definiert: „Vakuum heißt der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchendichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d.h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck“. Abhängig vom herrschenden Restdruck in der Vakuumkammer wird von Grob-, Fein-, Hoch- oder Ultrahochvakuum gesprochen. Die wissenschaftliche Maßeinheit für Druck ist Pascal [Pa]. 1 Pa entspricht  $10^{-2}$  mbar.

	Grobvakuum	Feinvakuum	Hochvakuum	Ultrahochvakuum
Druck p [Pa]	$10^5 - 100$	$100 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
Teilchendichte n [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
mittlere freie Weglänge $\lambda$ [mm]	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$10^2 - 10^6$	$> 10^6$
Stoßzahl $Z_V$ [ $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ]	$10^{29} - 10^{23}$	$10^{23} - 10^{17}$	$10^{17} - 10^9$	$< 10^9$
Gasfluss	viskos	Knudsen Strömung	molekulare Strömung	molekulare Strömung
Bemerkungen	-	signifikante Verringerung der Wärmeleitfähigkeit	signifikante Erniedrigung der Stoßzahl	signifikante Erhöhung der absorbierten Teilchenzahl an den Oberflächen im Vergleich zu den Teilchen im Volumen

Tabelle 2: Klassifizierung Vakuum

## 3.2 Physikalisch-chemische Aspekte

### 3.2.1 Gleichstrom-Plasma

Beim Anlegen einer Gleichstrom-Hochspannung (Direct Current DC) von ca. 10 kV an zwei Elektroden, die im Abstand von ca. 50 cm in eine Vakuumröhre eingeschmolzen sind, entsteht eine Glimmentladung (Bild 2). Im Druckbereich von  $10^3$  Pa bis 1 Pa ist eine typische Leuchterscheinung zu beobachten, wie sie von Glimmentladungslampen (Betriebsdruck 100-3000 Pa) oder Leuchtstofflampen (1-100 hPa Betriebsdruck) seit Langem technisch genutzt werden. Hier handelt es sich ebenfalls um ein Plasma, das jedoch auf die Lichtintensität optimiert wurde.

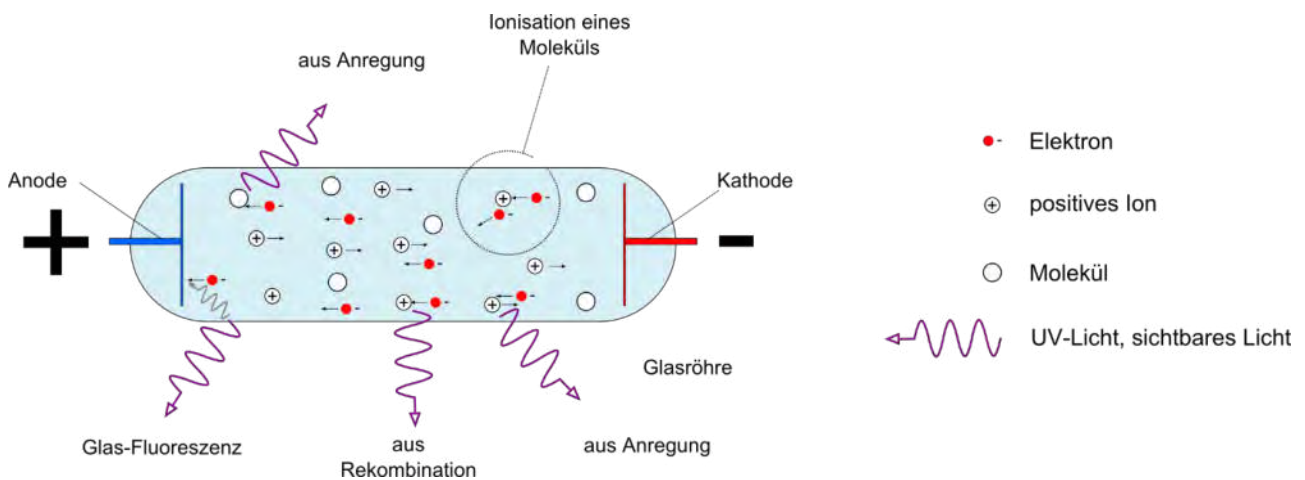


Bild 2: Regionen in einer DC-Glimmentladung

Die aus der Kathode austretenden Elektronen werden beschleunigt und ionisieren in der negativen Glimmzone die Atome und Moleküle des Prozessgases. Mit der Stoßionisation und der Rekombination wird gastypisches Licht emittiert, das nennenswerte Intensitäten im Vakuum-UV enthält. Die Elektronen besitzen eine höhere Beweglichkeit als die schweren Kationen, so dass sich vor der Kathode eine positive Raumladung ausbildet. Aus dieser werden Kationen mit hoher Energie (Kathoden-fallpotential) auf die Kathode zu beschleunigt. Beim Auftreffen der Kationen zerstäuben (Sputtern) diese das Kathodenmaterial und setzen andererseits Elektronen frei, die ihrerseits den Prozess der Glimmentladung aufrechterhalten.

Die Anzahl der positiven Ionen und der negativen Elektronen ist in der positiven Säule gleich und somit ist diese nahezu feldfrei. An der Anode bildet sich ebenfalls ein Potentialgefälle (Anodenfall). Die Masse der Elektronen ist jedoch viel zu gering, um das Anodenmaterial zu zerstäuben (1).

Die DC Glimmentladung ist nur aufrecht zu erhalten, wenn genügend Elektronen aus der Kathode erzeugt werden. Daraus folgt, dass sich die Elektroden zwingend im Plasma befinden müssen.

### 3.2.2 Niederfrequenz/Hochfrequenz-Plasma

Historisch bedingt, werden die Frequenzen 40 kHz (NF-Plasma) und 13,56 MHz (HF-Plasma) für technische Zwecke verwendet. Auf diesen Frequenzen fand kein Funkverkehr statt. Nach Einführung der EMV-Richtlinien (Elektro-Magnetische-Verträglichkeit) sind alle Frequenzen verfügbar, so dass dieser Parameter mehr und mehr genutzt wird.

Die Elektronen können einem angelegten elektrischen Feld diesen Frequenzen folgen und erreichen bei jeder Halbwelle die Elektroden bzw. eine Wand des Reaktors. Stoßen jedoch Elektronen auf dem Weg zur Anode mit Molekülen/Atomen des Gases zusammen, werden sie abgelenkt, was mehrere Konsequenzen zur Folge hat:

1. Bei genügend Energie ionisieren sie die Moleküle/Atome und erzeugen so im Gasraum Sekundärelektronen.
2. Die stoßenden Elektronen werden abgelenkt und sind somit nicht mehr in Phase mit dem elektrischen Wechselfeld. Sie nehmen zusätzlich Energie auf, wenn sie vom elektrischen Feld wieder in Phase gezwungen werden.
3. Es erreichen viel weniger Elektronen eine Wand oder die Anode, wo sie absorbiert werden. Sie verbleiben im Plasma und stehen weiter für die Energieübertragung auf andere Spezies zur Verfügung. NF/HF-Plasmen benötigen daher keine Elektroden im Plasma.

Je höher die Frequenz ist, desto weniger können Ionen aufgrund ihrer (trägen) Masse dem Feld folgen. Das Wasserstoff-Ion, als kleinstes Ion, ist rund 2000mal schwerer als ein Elektron!

### 3.2.3 Mikrowellen-Plasma

Auch hier ist die Frequenz 2,45 GHz historisch bedingt. Da mit zunehmender Frequenz der sogenannte Skin-Effekt zunimmt, ist es vorteilhafter, die Mikrowelle (MW) nicht über eine Elektrode in das Plasma einzukoppeln. Das von einem Magnetron erzeugte MW-Feld wird über ein meist aus Quarzglas oder Aluminiumoxid bestehendes Fenster in die Plasmakammer eingeleitet.

Die Wellenlänge ist mit ca. 130 mm im Bereich der Dimension der Plasmakammer. Dies hat zur Folge, dass die Elektronen bei der Feldumkehr nicht mehr die Kammerwand erreichen, womit die Zahl der Elektronen im Plasma stark zunimmt. Die Ladungsdichte wird so hoch, dass das Plasma die Mikrowelle reflektiert. Das Mikrowellenplasma ist daher einerseits sehr dicht und liefert eine sehr große Zahl an reaktiven Spezies, andererseits ist es im Volumen stark inhomogen und rund um das einkoppelnde Fenster begrenzt. Die reaktiven Spezies diffundieren aus der Plasmazone und reagieren mit der Oberfläche des zu behandelnden Substrates. Das Plasma selbst ist sehr heiß, daher müssen die Substrate außerhalb der Plasmazone gelagert werden, sofern sie temperaturempfindlich sind.

### 3.2.4 Prozessgase

Entscheidend für den Erfolg einer Plasmabehandlung ist auch das verwendete Prozessgas (Tabelle 3). Zum Aktivieren von Polymeren und zur schonenden Reinigung von Oberflächen wird Sauerstoff oder Luft, und zur Reduktion von Oxiden Wasserstoff verdünnt mit Argon oder Helium eingesetzt. Fluorhaltige Gase kommen in der Halbleitertechnik oder der Plasmapolymersation zum Einsatz. Metalloberflächen und Teflon können mit Wasserstoff-Plasmen reduziert bzw. aktiviert werden. Bei dieser Anwendung ist der Hauptbestandteil des zugeführten Reaktionsgases Argon, wodurch auch sicherheitsrelevanten Aspekten, die aufgrund der Reaktivität des Wasserstoffs eingehalten werden müssen, Rechnung getragen wird.

Prozess	mögliche Prozessgase	bevorzugte Anregungsfrequenz
Glimmnitrieren/Ionennitrieren, Plasmanitrieren	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , Ar	DC
Plasmareinigen, -aktivieren, -ätzen (allgemein)	CF <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , Ar, Luft	NF, HF, MW
Ionenätzen (IE), Plasma Etching (PE), Reactive Ion Etching (RIE)	CF <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Ar, He	DC, HF
Bohrlochreinigung („Desmearing“)	O <sub>2</sub> , CF <sub>4</sub>	NF, HF, MW
Ionenätzen vor der Beschichtung im Vakuum	O <sub>2</sub> , Ar, H <sub>2</sub>	NF, HF
Oberflächenaktivierung von Polymeren	Luft, O <sub>2</sub>	NF, HF, MW
Oberflächenaktivierung von PTFE	NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , Ar, O <sub>2</sub>	NF, HF, MW
Feinstreinigung von Oberflächen	Luft, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CF <sub>4</sub>	NF, HF, MW

**Tabelle 3:** Industriell eingesetzte Gase bei Niederdruckplasmaprozessen

### 3.3 Plasmaquellen und Anlagentechnik

Die Wahl der Anregungsfrequenz hängt von der Anwendung ab. Beim Plasmanitrieren wird vorwiegend DC eingesetzt, wobei die (elektrisch leitfähigen) Teile als Kathode geschaltet werden. Zum Plasmaaktivieren, Plasmareinigen und zur Plasmabeschichtung werden NF/HF- oder MW-Plasmen verwendet. NF- und MW-Plasmaanlagen sind im betrieblichen Alltag einfacher zu handhaben, da die Anforderung an die Anpassung der Generatoren nicht so kritisch ist wie bei der HF-Anregung.

Meist ist die Wand der Vakuumkammer als Anode geschaltet und liegt auf Erdpotential. Die Elektrode ist kapazitiv gekoppelt und die NF-/HF-Elektrode mit der Hochfrequenzquelle verbunden (Bild 3). Das Anpassungsnetzwerk verhindert, dass diese Elektrode (Kathode) DC geerdet ist, so dass sich dort gegebenenfalls eine DC-Spannung aufbauen kann (Kapazität in Reihe zum Generator und zur Erde).



**Bild 3:** Kapazitiv gekoppelte NF-/HF-Plasmaanlage, bei der die Kammerwand als Anode geschaltet ist

Das Flächenverhältnis zwischen Anode und Kathode hat einen wesentlichen Einfluss auf die elektrischen Potentiale. Aufgrund der höheren Beweglichkeit der Elektronen und damit der höheren Wahrscheinlichkeit, auf die Wand zu treffen, ist das Plasma gegenüber der Wand (Erde) und Kathode immer auf einem positiven Potential. Dieses Plasmapotential  $V_P$  oszilliert mit dem Potential des anregenden Feldes  $V_{rf}$ . Die Nulllinie des Potentials  $V_K$  der Kathode nimmt einen umso negativeren Wert an, je kleiner und umgekehrt wird er immer positiver, je größer die Fläche im Vergleich zur Anode wird. Das Potential  $V_K$  oszilliert also nicht um das Potential von 0 V, sondern um ein nach unten oder oben verschobenes DC Potential  $V_{DC}$ , das auch unter dem Namen "Self Bias" bekannt ist. Dies ist zu beachten, wenn Sputtereffekte auf der Kathode unerwünscht sind.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Plasmen ist die Anregungsfrequenz. Es werden folgende Frequenzbereiche mit ihren Eigenschaften unterschieden:

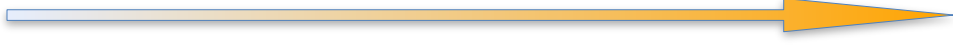
	DC	NF	HF	MW
<b>Frequenz</b>	0	40 kHz	13,56 MHz	2,45 GHz
<b>Energieeinkopplung</b>	Elektroden	kapazitiv, induktiv	kapazitiv, induktiv	direkter Hohlleiter
<b>Ionisationsgrad</b>				
<b>Arbeitsdruck</b>	> 1 Pa	> 1 Pa	10 <sup>-1</sup> Pa	10 <sup>2</sup> Pa
<b>Anregungselektrode in der Kammer</b>	ja	meist innen / auch außen	meist innen / auch außen	-
<b>Ionenbeschuss der Elektrode</b>	sehr hoch	sehr groß	geringer	nicht vorhanden
<b>Gleichmäßigkeit des Plasmas über Kammervolumen</b>	sehr gut	sehr gut	gut	weniger gut
<b>Kosten</b>	preiswert	preiswert	teuer	mittel

Tabelle 4: Plasmen und ihre Eigenschaften

Im NF-Bereich ist es sowohl den leichten Elektronen wie auch den schweren Gasionen möglich dem oszillierenden Wechselfeld zu folgen. Es ergeben sich die zuvor beschriebenen Effekte des Ionenbeschusses der NF-Elektrode und der geerdeten Kammerwand. Mit dieser Anregungsfrequenz bildet sich auch in großen Kammern ein relativ homogenes Plasma aus, so dass beispielsweise die Oberfläche von komplex geformten Kunststoffformteilen komplett erfasst wird.

Die schweren Ionen schaffen es im HF-Bereich nicht mehr dem Wechselfeld zu folgen. Sie folgen dem durch den Self-Bias erzeugten Potential  $V_{DC}$  vor dem Hintergrund des für sie diffusen Plasmapotentials  $V_p$ . Hochfrequenzplasmen ermöglichen einen genau definierten Ionenbeschuss mittlerer Energie.

Die Lagerung der Substrate im Planar-Reaktor (Platten- oder Parallel-Reaktor) hat ebenfalls einen großen Einfluss auf den Behandlungseffekt. Die nachfolgenden Ausführungen gelten für die kapazitive Einkopplung der Anregungsfrequenzen 40 kHz und 13,56 MHz.

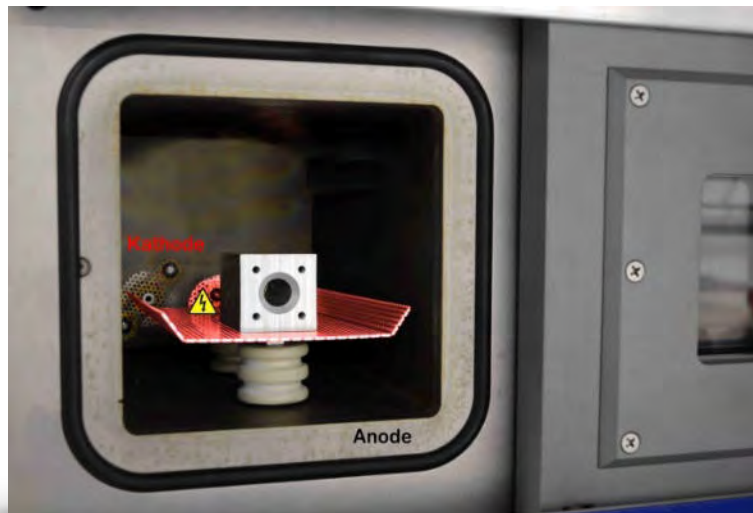


Bild 4: Lagerung des Substrats auf der Kathode

Das Substrat liegt direkt auf der Kathode und nimmt deren Potential an. Dies ist dann vorteilhaft, wenn die Anode (= geerdete Elektrode) größer als die Kathode ist. Nimmt dieses Verhältnis zu, dann vergrößert sich auch der negative „Self Bias“ auf der Kathode. Dies bewirkt, dass die positiv geladenen Ionen im DC Feld auf das Substrat beschleunigt werden und dieses sputtert. Wird als Prozessgas ein Edelgas verwendet, dann handelt es sich um einen rein mechanischen Effekt. Durch den Einsatz von anderen, z.B. sauerstoffhaltigen Gasen, kommt es zusätzlich zu chemischen Reaktionen an der Oberfläche. Der isotropen, physikalischen Komponente wird somit eine anisotrope, chemische Reaktion überlagert. Diese Reaktionsführung ist als Reactive Ion Etching RIE bekannt. Damit können bei geeigneter Reaktionsführung Strukturen ohne Unterätzung erzeugt werden. Für diesen Prozess muss das Substrat zwei Voraussetzungen erfüllen - es muss hitzestabil und elektrisch leitfähig sein.



Bild 5: Lagerung des Substrats auf der Anode

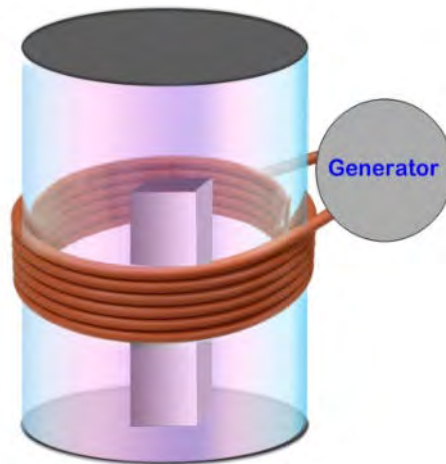
Die Anode besitzt immer das Potential „Null“ bzw. hat Erdpotential und elektrische Ladungsträger werden von ihr abgeleitet. Elektrisch leitfähige Substrate, die dort gelagert werden, bilden einen Teil der Anode. Durch den erzeugten Stromfluss heizen sich die Substrate auf. Auf Letzteres muss geachtet werden, wenn Materialien, wie beispielsweise Leiterplatten mit feinen Leiterbahnen, hitzeempfindlich sind. Der Sputtereffekt ist bei dieser Anordnung deutlich geringer. Elektrisch isolierende Substrate befinden sich nahezu auf „floating Potential“, da die Ladungsträger, die sich auf der Oberfläche ansammeln, nicht abfließen können.



Bild 6: Lagerung des Substrats auf „floating Potential“

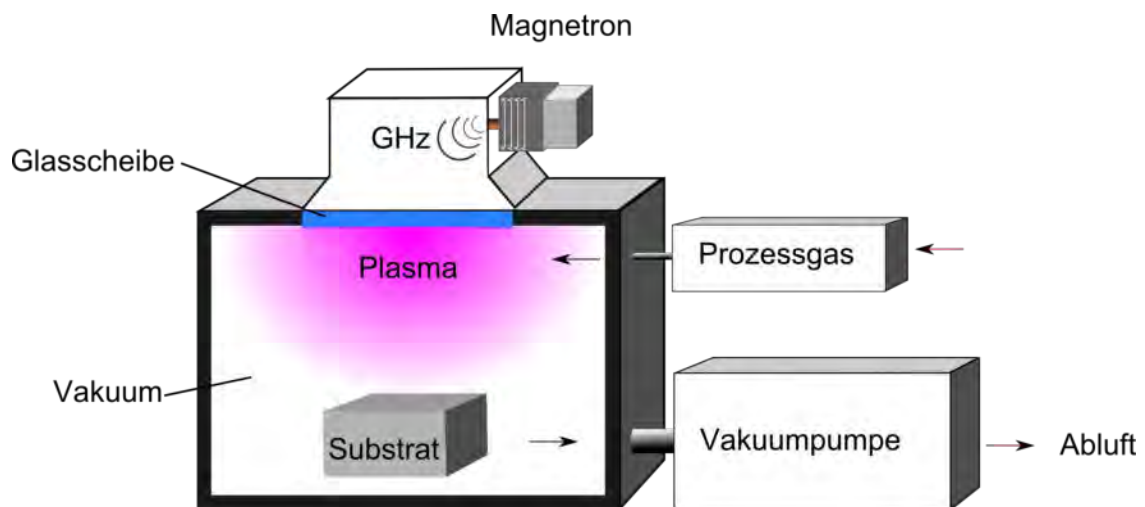
Das Substrat, unabhängig ob elektrisch leitend oder nicht, wird auf einem elektrisch isolierenden Material auf der Anode gelagert. Ladungsträger, aufgrund ihrer größeren Beweglichkeit meist Elektronen, treffen zufällig auf die Substratoberfläche und lagern sich dort solange an, bis sie sich aufgrund ihrer gleichnamigen Ladungen wieder abstoßen. Treffen entgegengesetzte Ladungen auf die Substratoberfläche, dann findet eine Entladung statt und es bildet sich ein dynamisches Gleichgewicht aus - das Potential „floated“. Bei diesem Prozess besteht die Potentialdifferenz nur zum Plasma und nicht zur Kathode bzw. Anode. Diese Anordnung, bei der keine Ströme fließen, wird bevorzugt für Substrate eingesetzt, die wärmeempfindlich sind. Sie hat auch den Vorteil, dass bei der Beladung der Plasmakammer nicht auf die wechselnden Flächenverhältnisse zwischen Kathode und Anode geachtet werden muss. Diese Plasmabehandlung ist sehr schonend und wird häufig bei der Plasmapolymersation angewandt, denn während des Beschichtungsprozesses bleiben die elektrischen Eigenschaften des Substrats konstant.

Eine induktive Einkopplung der Energie findet in einem Barrel-Reaktor (Tunnel- oder Rohrreaktor) bei 40 kHz bzw. 13,56 MHz statt. Das Material der Reaktorwand muss elektrisch isolierend, z.B. aus Quarzglas oder Aluminiumoxid, sein. Das Plasma wird durch ein induziertes elektrisches Feld innerhalb der Spule erzeugt, die sich außerhalb der Kammer befindet.



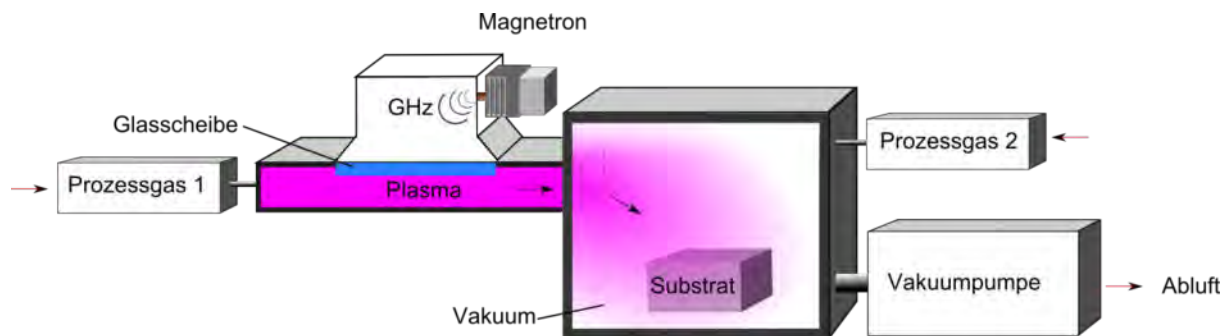
**Bild 7:** induktive Energieeinkopplung

Die Geometrie des Reaktors wird in diesem Fall maßgeblich von den mechanischen und physikalischen Eigenschaften der hierfür verwendeten keramischen Materialien bestimmt. Diese Art der Plasmaerzeugung wird bevorzugt dann eingesetzt, wenn Dotierungseffekte am Substrat vermieden werden sollen. Bei den zuvor beschriebenen Reaktoren mit metallischen Kammerwänden, werden diese und vor allen Dingen die Kathode gesputtert. Die abgetragenen Metallionen werden im weiteren Prozessverlauf teilweise auf dem Substrat angelagert. Diese Dotierung ist bei keramischen Kammerwänden ausgeschlossen.



**Bild 8:** Mikrowellenreaktor mit Hohlleiter = Downstream-Reaktor

Das Mikrowellen-Plasma konzentriert sich um das einkoppelnde Fenster und ist deshalb in der Kammer inhomogen verteilt. In dem Hohlleiter (= Magnetron mit „Hornstrahler“) wird eine stehende Welle erzeugt, die über das Quarzfenster in den Reaktor ausgekoppelt wird. Die Gasionisierung durch die Mikrowelle ist so effektiv, dass das Plasma einen Faraday'schen Käfig bildet und sich weitgehend vom Volumen des Reaktors abschirmt. Dennoch diffundiert eine große Anzahl von hochangeregten Molekülen aus dem Plasma heraus und diese wechselwirken mit der Oberfläche des Substrats.

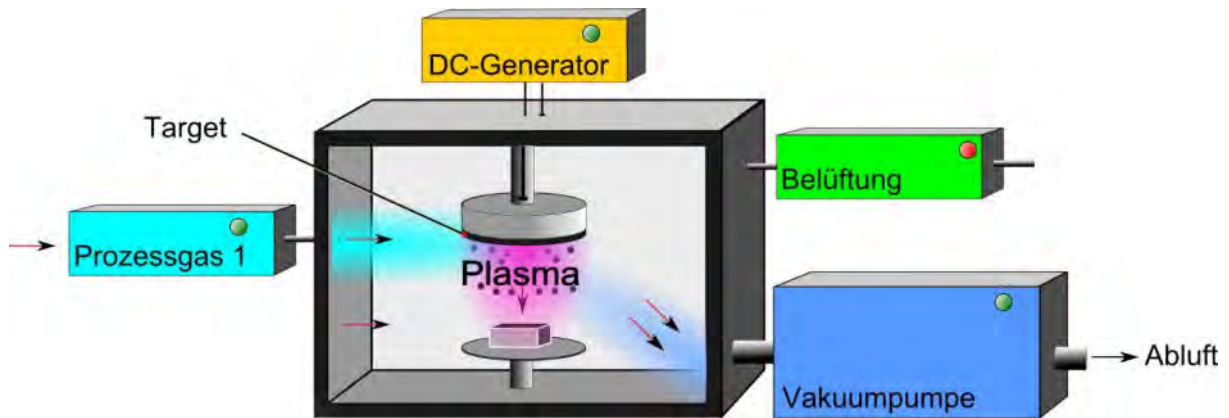


**Bild 9:** Remote-Aufbau eines Mikrowellen-Reaktors

Bei einem Remote-Aufbau brennt das Plasma in einer separaten Plasmakammer, aus der die hochreaktiven Spezies in die eigentliche Reaktionskammer geleitet werden. Um mit dieser Technik erfolgreich arbeiten zu können, muss sichergestellt sein, dass im Plasma eine hohe Anzahl von reaktiven Spezies erzeugt wird, damit trotz des langen Weges bis zur Substratoberfläche, noch eine ausreichende Zahl für die Reaktion zur Verfügung steht. Durch Zusammenstöße untereinander und mit nicht aktiven Spezies oder durch Absorption an den Wänden verringert sich die Zahl der aktiven Spezies deutlich. Deshalb ist die Mikrowellenanregung für diesen Aufbau die geeignetste Frequenz, da sie eine besonders große Menge an angeregten Spezies erzeugt.

Die Remote-Technik bietet in der Reaktionsführung mehr Freiheitsgrade. Verwendete Prozessgase können durch die Plasmaquelle geführt oder direkt in die Behandlungskammer eingespeist werden. Dies bringt Vorteile bei Polymerisationsprozessen, denn hierbei kann ein Reaktivgas, wie Sauerstoff oder Wasserstoff, durch die Plasmaquelle geführt und das Monomergas, beispielsweise Propan, direkt in die Beschichtungskammer eingeleitet werden. Dies bedeutet, dass das Monomergas nicht der hohen Energiedichte des Plasmas ausgesetzt ist, sondern lediglich mit den angeregten Spezies des Reaktivgases wechselwirkt. Durch die Möglichkeit der unterschiedlichen Einspeisung der Prozessgase, steht ein regelrechter Chemiebaukasten zur Einstellung von neuen Schichteigenschaften auf dem Substrat zur Verfügung.

Nachfolgend werden einige vakuumbasierte Beschichtungsverfahren kurz vorgestellt, da diese in den weiteren Ausführungen zur Sprache kommen. Der Überbegriff für diese Methoden ist die physikalische Gasphasenabscheidung oder **Physical Vapour Deposition PVD**. Bei diesen Technologien wird ein Targetmaterial in die Gasphase überführt und anschließend die Teilchen durch das elektrische Feld zum zu beschichtenden Substrat geführt, die dort die gewünschte bzw. benötigte Schicht ausbilden. PVD Prozesse werden im Hochvakuum (Tabelle 2) durchgeführt.



**Bild 10:** Block-Diagramm DC Sputtern

Das Sputtern oder auch Kathodenzerstäubung ist ein physikalischer Vorgang, bei dem durch Beschuss mit energiereichen Ionen, Atome aus einem Festkörper (= Target) herausgelöst werden und in die Gasphase übergehen. Das Target bildet die negative und das Substrat die positive Elektrode. Das zerstäubte Material schlägt sich auf dem eingebrachten Substrat nieder und bildet eine feste Schicht. Häufig wird der Substratträger drehbar ausgeführt, da sich das Target meist an einer Seitenfläche befindet und durch die Rotation die Bauteile gleichmäßig durch die Teilchenwolke bewegt und beschichtet werden.

Ein weiteres Beschichtungsverfahren im Vakuum ist das Lichtbogenverdampfen oder auch Arc-PVD. Bei dieser Technik brennt zwischen dem als Kathode fungierenden Target und der Kammerwand ein Lichtbogen, der das Targetmaterial verdampft. Die Energie des Lichtbogens sorgt dafür, dass das Material nicht nur verdampft sondern auch ionisiert wird. Die angelegte Gleichspannung beschleunigt die Teilchen hin zur Substratoberfläche, an der sie kondensieren.

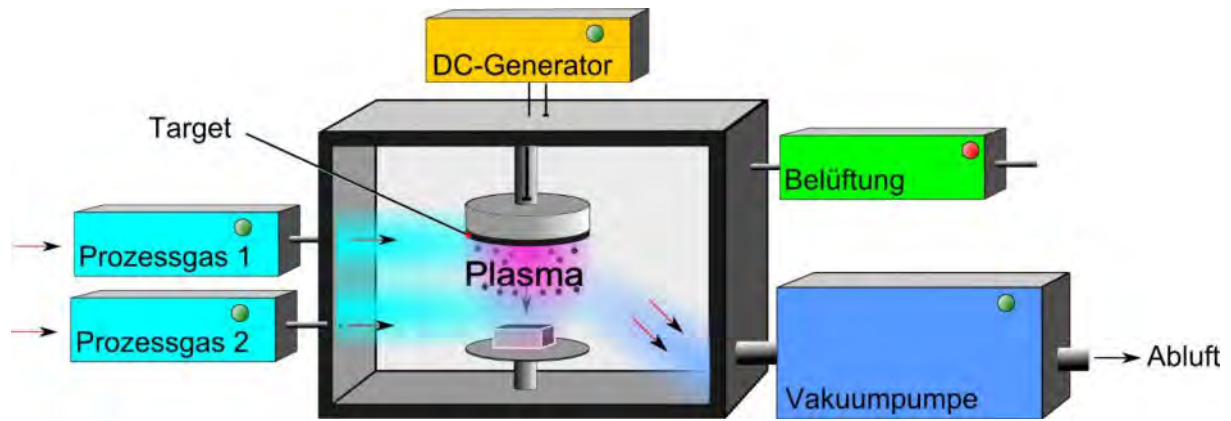


Bild 11: Block-Diagramm DC einer PECVD

Die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) ist eine Sonderform der chemischen Gasphasen-abscheidung CVD, bei der die chemische Abscheidung durch ein Plasma unterstützt wird. Das eingesetzte Plasma kann direkt beim zu beschichtenden Substrat (Direktplasma) oder in einer separaten Kammer (Remote-Plasma) erzeugt werden. Die beschleunigten Elektronen des Plasmas übernehmen das Aufbrechen der Moleküle des Reaktionsgases. Die erzeugten Radikale und Ionen bewirken gemeinsam die Schichtabscheidung auf dem Substrat. Der Wärmeeintrag in die Oberfläche durch das Plasma ist gering, so dass auch temperaturempfindliche Materialien beschichtet werden können.

Zwischen dem zu beschichteten Substrat und der Gegenelektrode wird ein elektrisches Feld angelegt, durch das das Plasma gezündet wird (Direktplasma-Methode). Die Remote-Technik besitzt auch bei der PECVD die bereits genannten Vor- und Nachteile.

Die für den Plasmaprozess erforderlichen Vakuumpumpen werden abhängig vom benötigten Unterdruck und dem durchgeführten Prozess individuell ausgewählt. Für Standardprozesse zur Reinigung und Aktivierung werden in der Regel Drehschieber-pumpen eingesetzt. Diese ölgeschmierten Pumpen sind in der Anschaffung kostengünstiger als trockenlaufende Vakuumpumpen. Der Arbeitsbereich beider Pumpentypen reicht von Atmosphärendruck bis ins Feinvakuum. Soll der gewünschte Unterdruck auch bei großen Kammervolumen schnell erzeugt werden, so wird zusätzlich eine Rootspumpe (Wälzkolbenpumpe) zugeschaltet. Erfordert die Prozessführung ein Hochvakuum, wie beispielsweise für eine PVD- oder ALD-Beschichtung, so tritt an die Stelle der Rootspumpe eine Turbomolekularpumpe. Trocken laufende Vakuumpumpen werden immer dann eingesetzt, wenn eine Kontamination durch Öl unter allen Umständen vermieden werden muss. Trockenläufer sind in der Regel wartungsärmer und haben auch bei „harten“ Prozessen lange Standzeiten. Der Arbeitsraum bei diesem Pumpentyp ist aus beständigem Metall gefertigt, das nicht mit den Medien reagiert und somit Querkontaminationen völlig ausgeschlossen sind. Die nachfolgende Übersicht zeigt mögliche Pumpenkombinationen auf.


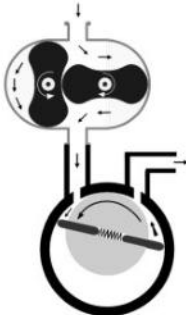
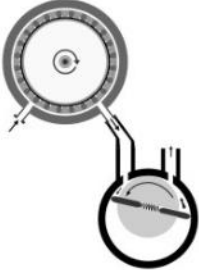
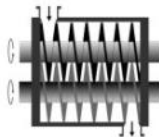
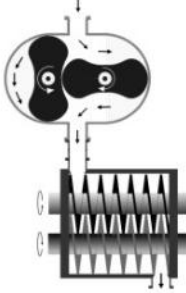
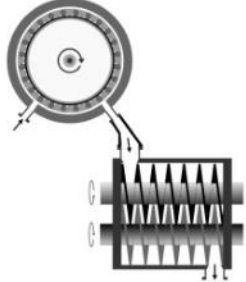
		Feinvakuum		Hochvakuum
		Kleinanlagen	Großanlagen	
nicht korrosive Prozessgase				
	Ölgeschmierte Drehschieberpumpe	Ölgeschmierte Drehschieberpumpe mit Wälzkolbenpumpe (Roots)	Ölgeschmierte Drehschieberpumpe mit Turbomolekularpumpe	
korrosive Prozessgase				
	Trockenlaufende Schraubenpumpe	Trockenlaufende Schraubenpumpe mit Wälzkolbenpumpe (Roots)	Trockenlaufende Schraubenpumpe mit Turbomolekularpumpe	

Tabelle 5: Übersicht der für Vorbehandlungsprozesse eingesetzten Vakuumpumpen

### 3.4 Die Substratoberfläche

Die notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung zur Erzielung einer guten Haftfestigkeit auf einer Substratoberfläche, ist deren ausreichende Benetzbarkeit durch den Beschichtungsstoff. Die Haftfestigkeit ist ein Maß für den Widerstand der Beschichtung gegen ihre mechanische Trennung vom Substrat.

Eine Größe für die Benetzbarkeit einer Substratoberfläche durch eine Flüssigkeit - Lack, Klebstoff, etc. - ist der Kontaktwinkel  $\Theta$  zwischen dem Festkörper und einem aufgetragenen Tropfen. Die Benetzbarkeit wird mit kleiner werdendem Kontaktwinkel  $\Theta$  besser. Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und die Oberflächenenergie des Substrats sind bestimmend für den Kontaktwinkel.

Die Young'sche Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang:

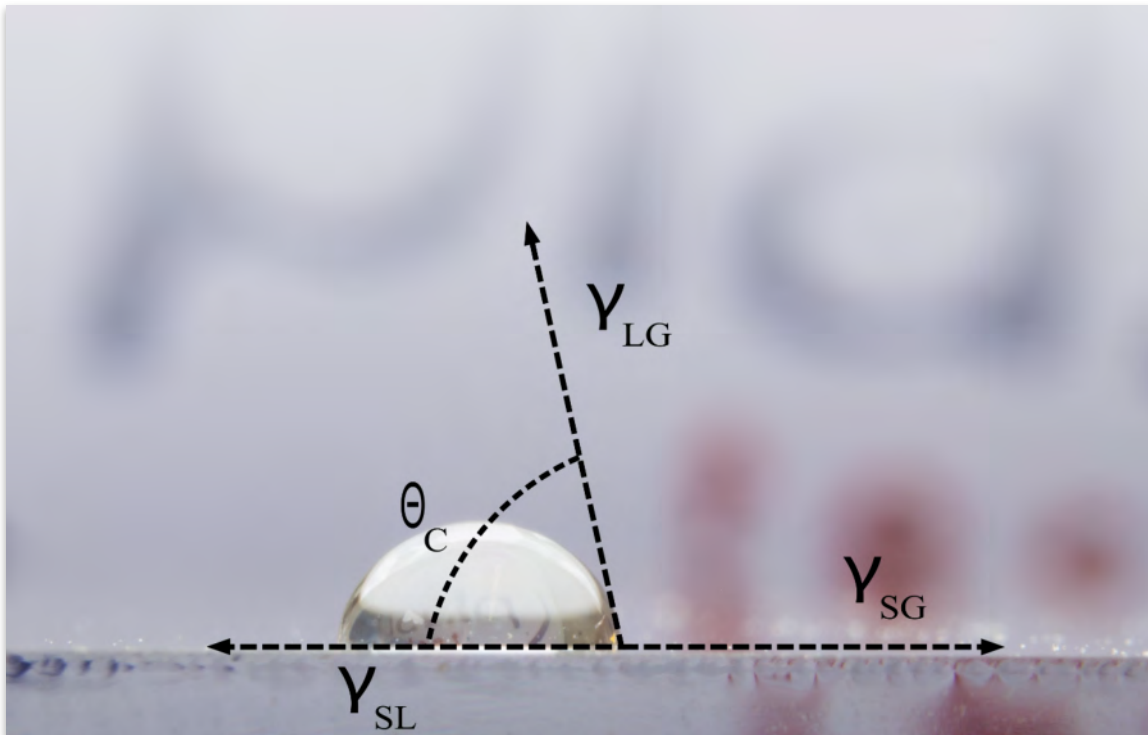


Bild 12: Kontaktwinkel

Substrate mit höherer Oberflächenenergie (Metalle) lassen sich leichter benetzen als solche mit geringer Oberflächenenergie (Polymere). Begründet wird dies durch das Materialgefüge und dadurch, dass die Gesamtenergie des Systems durch die Verkleinerung der Grenzfläche (Solid) zur umgebenden Luft (Gas) infolge der Benetzung verringert wird. Benetzt die Flüssigkeit das Substrat wird dieser Zustand als Spreitung bezeichnet. In diesem Fall geht der Kontaktwinkel  $\Theta$  gegen Null und  $\cos\Theta$  gegen 1, das heißt die Energie der zu benetzenden Oberfläche ist hoch und die Voraussetzung für Benetzung gegeben.

Exakt ermittelt wird der Kontaktwinkel  $\Theta$  durch eine Kontaktwinkelmessung, bei der verschiedene Flüssigkeiten mit bekannter Oberflächenspannung auf die Materialoberfläche abgesetzt und vermessen werden.

Die ermittelte Oberflächenspannung/-energie setzt sich aus einem polaren  $\gamma^p$  und einen dispersen  $\gamma^d$  Anteil zusammen.

$$\gamma = \gamma^p + \gamma^d$$

Der polare Anteil ist die Summe aus verschiedenartigen, molekulären Kräften, wie induzierter Dipole, van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen. Das zu beschichtende Substrat muss einen ähnlichen polaren Anteil besitzen wie der Lack oder der Klebstoff, damit sich zwischenmolekulare Kräfte von Substrat und Beschichtungsstoff ausbilden können. Nur dann sind eine Benetzung sowie eine ausreichende Haftfestigkeit erzielbar.

In der täglichen Praxis werden zur Ermittlung der Oberflächenenergie von Werkstückoberflächen in der Regel Testtinten eingesetzt. Hierbei handelt es sich um genormte Prüfflüssigkeiten, die mit Hilfe eines Pinsels oder eines Wattestäbchens auf die Oberfläche aufgetragen werden. Innerhalb von 2 Sekunden wird visuell beurteilt ob die Flüssigkeit die Oberfläche benetzt oder nicht. Zieht sich der Tintenfilm zusammen, so ist die Oberflächenspannung der Tinte größer als die Oberflächenenergie des Substrats. In diesem Fall wird mit Tinten kleinerer Oberflächenspannung weitergetestet bis eine Tinte für mindestens 2 Sekunden benetzt. Ist dieser Zustand erreicht, so ist die Oberflächenenergie des Werkstoffs bekannt. Ebenso wird mit Tinten höherer Oberflächenspannung verfahren, wenn die zuerst aufgetragene Flüssigkeit benetzt. Hier wird solange getestet, bis sich der Film wieder zusammenzieht. Die Tinte die gerade noch benetzt gibt den Wert der Oberflächenenergie des Substrats wieder.

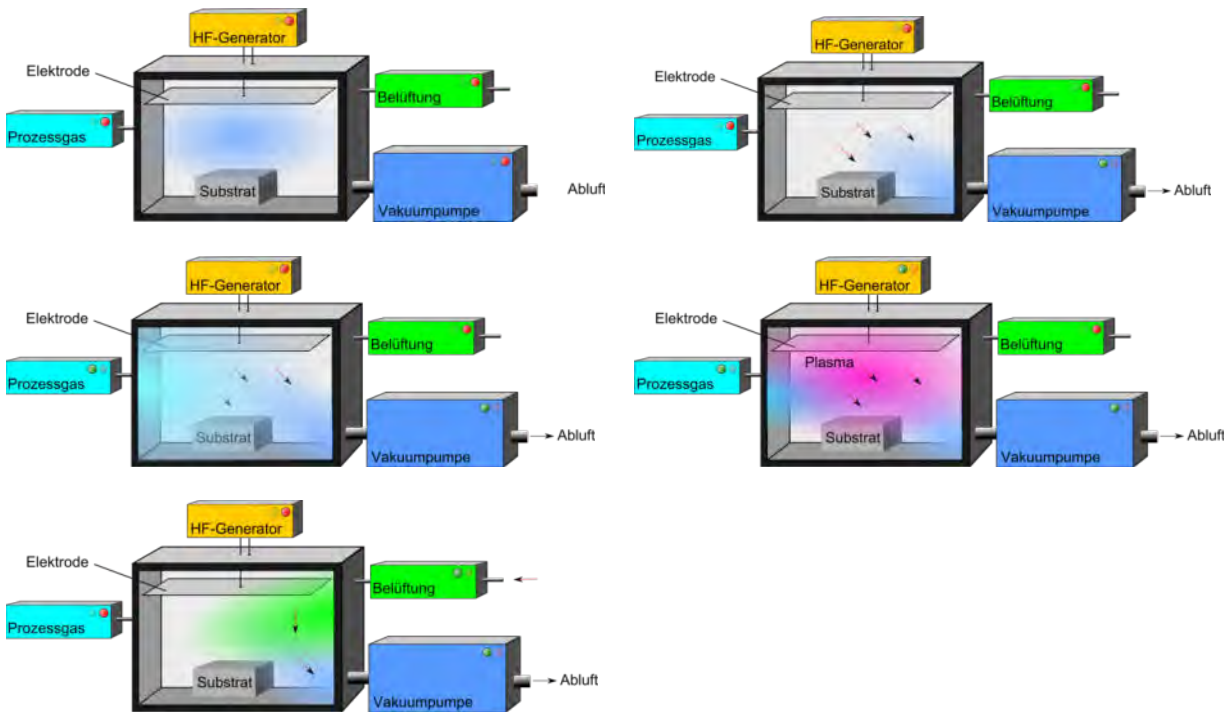
Mit Hilfe der Testtinten wird die Gesamtenergie ermittelt. Eine Aufteilung in polaren und dispersen Anteil ist mit diesem Verfahren nicht möglich. Weiterhin geben sie nur einen Anhaltspunkt zur Benetzbarkeit, ein Rückschluss auf die Haftfestigkeit der Beschichtung ist nicht möglich.

Die Testtinten werden in unterschiedlichen Serien von verschiedenen Herstellern am Markt angeboten. Sollen vergleichende Messungen bei Kunden und Lieferant oder unternehmensintern durchgeführt werden, so ist darauf zu achten, dass Tinten eines Herstellers der gleichen Serie eingesetzt werden.

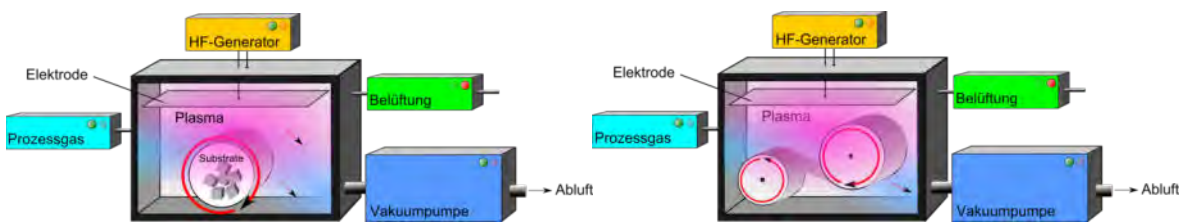
### 3.5 Anwendungen der Plasmatechnik

Die Plasmabehandlung gehört zu den kostengünstigsten und produktivsten Verfahren der Plasma-Oberflächentechnik (3). Die Prozessdrücke liegen im Feinvakuumbereich und erfordern keine aufwändige Pump- oder Hochvakuumtechnik. Die Zykluszeiten können sehr kurz sein und je nach Prozesskammervolumen und benötigtem Effekt zwischen 20 Sekunden und 15 Minuten betragen. Der Gesamtprozess gliedert sich in folgende Einzelschritte:

- Einbringen von Einzelteilen, Stapel-, Bahnen- oder Trommelware in die Kammer,
- Erzeugung des Vakuums und Prozessgaseinlass,
- Zuschaltung der Hochfrequenzquelle und Plasmabehandlung,
- belüften und entnehmen der Bauteile.



**Bild 13:** schematische Darstellung eines Anlagenbaus und der Behandlungsschritte



**Bild 14:** Behandlung von Schüttgut (links) und Bahnenware (rechts)

### 3.5.1 Feinstreinigung von Oberflächen mit Hilfe von Plasma

Durch die Fertigung sowie Lagerung und Transport sind alle Oberflächen (Glas, Keramik, Metall, Kunststoff) mehr oder weniger mit undefinierten Verunreinigungen belegt, so dass sie vor einem Beschichtungsprozess gereinigt werden müssen. Abhängig von Verschmutzungsgrad und -art sowie der chemischer Zusammensetzung sind mehrere Reinigungsschritte nötig. Zunächst werden die Oberflächen einem Grobreinigungsverfahren unterzogen. Selbst wenn sie optisch sauber und trocken erscheinen, sind sie mit einer natürlichen Adhäsivschicht aus organischen Verbindungen und Wasser belegt, die in einer Plasmaatmosphäre abgereinigt werden können.

Besonders geeignet ist die Plasmafeinstreinigung zur Entfernung von dünnen organischen Kontaminationsfilmen, wie Silikonen, Wachsen, Ölen etc., die als Trennschicht wirken und die Haftfestigkeit nachfolgender Beschichtungen oder Verbindungsprozesse negativ beeinflussen können. Die typischen gebildeten Reaktionsprodukte sind  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  und werden, da beide unter den Bedingungen des Vakuums leicht flüchtige Gase sind, mit dem durchlaufenden Arbeitsgasstrom aus der Vakuumkammer entfernt.

Die effektive Reinigungswirkung des Plasmas ist nachfolgend an einer berußten Glasplatte dargestellt. Die Platte wurde in die Vakuumkammer eingebracht und nach 120 s hatte das Sauerstoffplasma den Ruß oxidiert und die Oberfläche war rückstandslos gereinigt.



**Bild 15:** links oben: maskierte Glasplatte nach der Berußung; Blick in die Plasmakammer während der Glasplattenreinigung im Niederdruckplasma; rechts oben: Start, links unten: nach 60 Sekunden, rechts unten - gereinigte Glasoberfläche nach 120 Sekunden (Zeitangaben gelten für diese Reinigung)

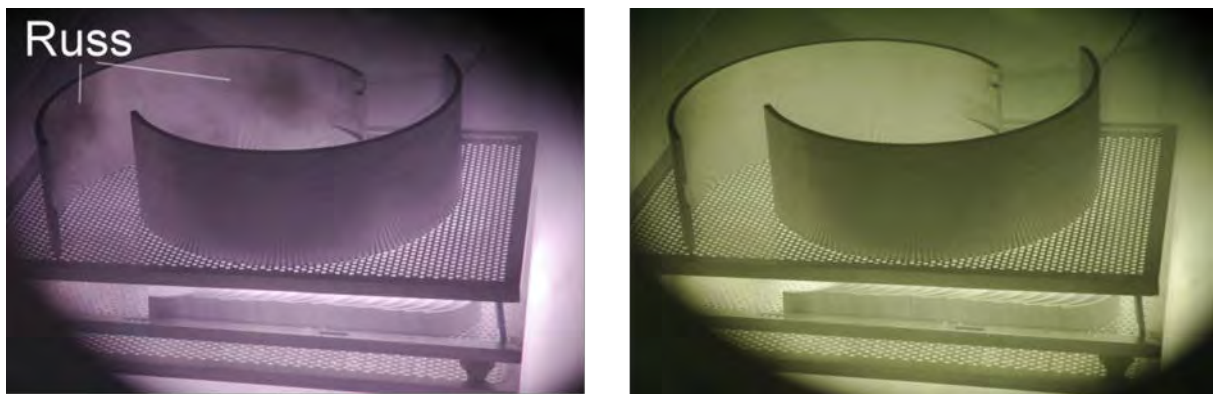
Es muss jedoch ausdrücklich betont werden, dass sich die Plasmareinigung nur für die Entfernung dünner Oberflächenkontaminationen (Schichtdicke im Bereich von Nanometern) eignet. Dickere organische Rückstände können unter dem Einfluss von Sauerstoff, Teilchenbeschuss und UV-Strahlung verharzen oder mit der Oberfläche Oxidationsprodukte bilden. Solche Crackprodukte beziehungsweise Oxidationsrückstände können oft selbst unter härtesten Reaktionsbedingungen nicht mehr entfernbar sein.

### 3.5.1.1 Feinstreinigung von Metallen

In einem industriellen Verbundprojekt (4) wurde die Plasmafeinstreinigung von Metalloberflächen untersucht. Dabei ergab sich, dass sich die Reinigungswirkung, gemessen am Gesamtkohlenstoffgehalt an der Oberfläche, von halogenhaltigen und halogenfreien Lösemitteln und auch von wässrigen Reinigern durch eine nachfolgende Plasmabehandlung weiter verbessern lässt.

In einem weiteren Forschungsprojekt (5) wurde der Einfluss der Temperatur der Probe und der Art des Öls auf die Abtragsrate von plasmabehandelten natürlichen und mineralischen Ölen untersucht. Bei mineralischen Ölen sinkt die Rate mit zunehmender Viskosität. Bei natürlichen Ölen mit ungesättigten Fettsäuren verringert sich der Abtrag mit zunehmendem Anteil an Doppelbindungen infolge einer Verharzung im Sauerstoffplasma. Bereits durch die Verdampfung im Vakuum wird ein beträchtlicher Abtrageffekt erzielt. Eine hohe Proben temperatur bewirkt auch ohne Sauerstoffplasma eine hohe Abtragsrate.

Bild 14 zeigt ein mit Ruß belegtes metallisches Werkstück im Plasma. Zu Beginn des Reinigungsprozesses ist die Farbe des Plasmas blass-lila und am Ende des Prozesses, wenn keine Rußmoleküle mehr abgereinigt und in die Gasphase überführt werden, leuchtet es gelbgrün.

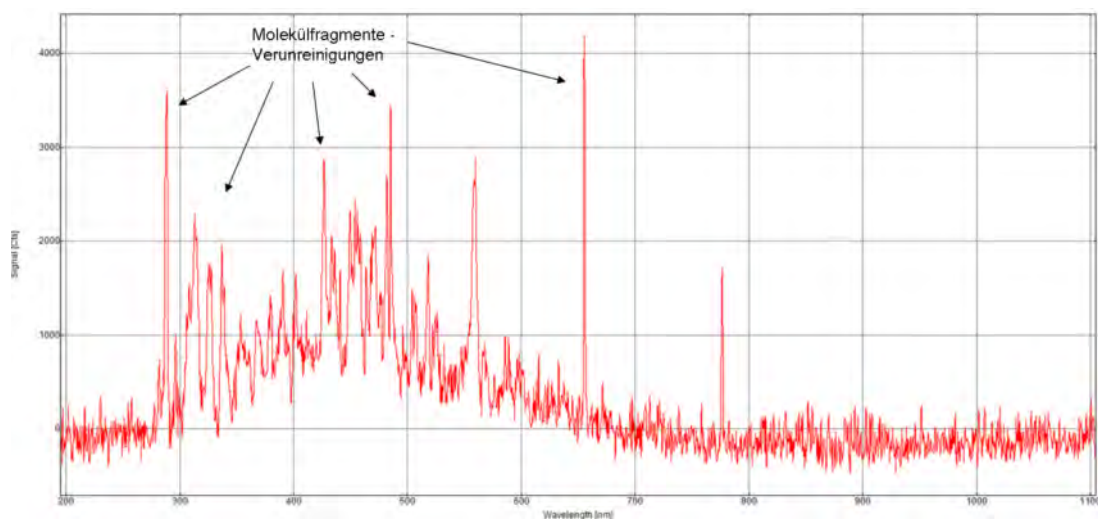


**Bild 16:** absichtlich eingerußtes Metallteil beim Reinigungsprozess in der Plasmakammer

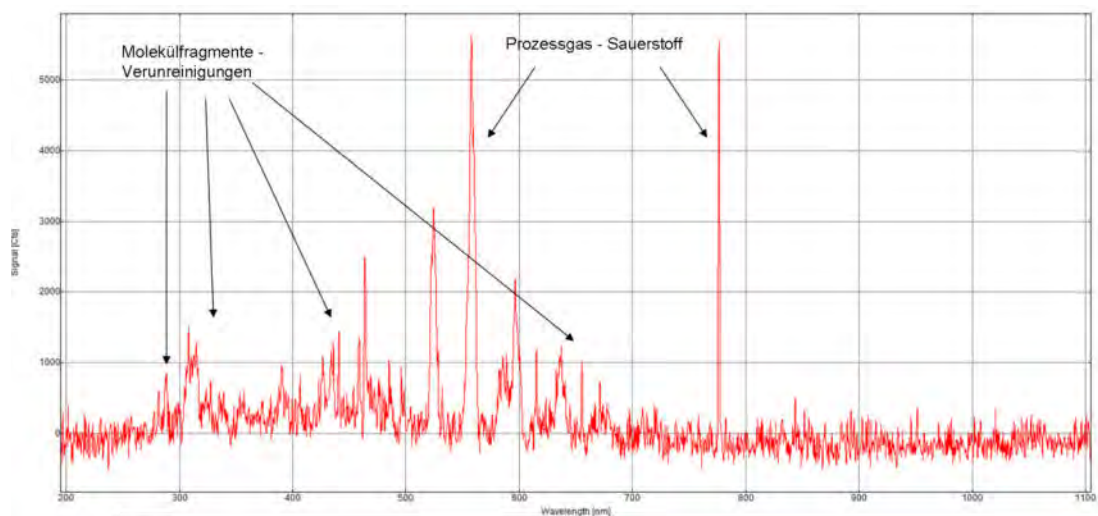
Ob die abzureinigende Schicht tatsächlich entfernt ist, lässt sich nicht nur über die Veränderung der Plasmafarbe erkennen, sondern auch messtechnisch erfassen. Dies ist möglich, wenn ein emissionsspektroskopisches Plasmamonitorsystem in die Anlage integriert ist. Die beim Plasmaprozess freiwerdende charakteristische Leuchterscheinung ist eine Mischung aus vielen einzelnen Lichtemissionen, die elementspezifisch sind. Das heißt jedes Element oder Molekül emittiert Licht einer charakteristischen Wellenlänge.

Ein Lichtwellenleiter detektiert in-situ die unterschiedlichen Wellenlängen und überträgt diese zum Spektroskop. Dort wird die Art der vorhandenen Gasmoleküle erfasst und über die Signalstärke kann ein Rückschluss auf deren Menge erfolgen. Das auf diese Weise erhaltene Spektrum ist zu jedem Zeitpunkt des Plasmaprozesses am PC einzusehen.

Nachfolgend werden die Emissionssignale der bei einer Plasmareinigung entstehenden Kohlenstoffverbindungen betrachtet. Bei Prozessstart ist deren Konzentration in der Kammer hoch, da die Abreinigung erst beginnt, (Spektrum 1), das heißt die Linien bei 289 nm und 655 nm sind deutlich zu erkennen. Über die Prozessdauer wird deren Höhe geringer, da die Verunreinigung umgesetzt und abgeführt wird. Ist die organische Schicht abgebaut, dann gehen die Signale der Kohlenstoffverbindungen im „Grundrauschen“ unter, die Oberfläche ist gereinigt (Spektrum 2) und der Prozess wird beendet. Im Spektrum 2 sind die Signale des angeregten Sauerstoffs bei 558 nm und 777 nm stärker ausgeprägt, als bei Prozessbeginn. Dies liegt darin begründet, dass dem eingeleiteten Sauerstoff keine Moleküle der Verunreinigung mehr als Reaktionspartner zur Verfügung stehen (6).



**Spektrum 1: Emissionsspektrum bei Prozessbeginn**



**Spektrum 2: Emissionsspektrum am Prozessende**

Durch diese Spektralanalyse erfolgt eine Echtzeitbeobachtung der Lichtemissionen in der Kammer und somit die Prozesskontrolle. Die spektroskopische Überwachung ermöglicht jeden einzelnen Ablauf hinsichtlich seiner Stabilität zu analysieren. Werden Ätzprozesse im Niederdruckplasma durchgeführt, so lässt sich mit dieser Spektralanalyse deren Endpunkt bestimmen. Die Echtzeitmessung der Plasmaatmosphäre ermöglicht bei reaktiven Plasma-Sputterprozessen durch nachregeln des Gasflusses die Umsetzungsrate konstant zu halten. Die spektroskopische Plasmaanalyse wird auch zur Qualitätskontrolle der einzelnen Durchgänge eingesetzt, indem sensible Prozesse inline kontrolliert, ggf. nachgeregelt und optimiert werden.

Weiterhin können mit reduzierenden Plasmen, Oxidschichten von Metallen abgereinigt werden.



**Bild 17:** zeigt eine 2 Cent Münze, die während der Plasmabehandlung halbseitig maskiert war.

In einer Plasmaatmosphäre lassen sich von beliebigen Materialoberflächen Mikroorganismen „abspüttern“, so dass hochreine Flächen generiert werden. Es wurde bereits wissenschaftlich nachgewiesen, dass durch Ionenbeschuss Oberflächen von Adsorbaten und anderen störenden Belägen auf atomarer Größenordnung gereinigt werden können (7). Bei diesem speziellen Reinigungsprozess kommen mehrere Mechanismen zum Tragen (8):

- das anliegende „Fein“-Vakuum und die Temperaturerhöhung beim Kontakt der Organismen mit den energiereichen Plasmaspezies trocknen diese aus;
- die in der Plasmaatmosphäre vorhandenen Oxide und die entstehende UV-Strahlung töten die Bakterien ab;
- der niedrige Druck erhöht die freie Weglänge der reaktiven Spezies, so dass diese mit hoher kinetischer Energie auf die Oberfläche treffen und Verunreinigungen in die Gasphase umsetzen, die durch den konstanten Gastransport aus der Kammer abgeführt werden.

Die Belüftung nach dem „Sterilisationsprozess“ darf ausschließlich mit Stickstoff erfolgen, um eine erneute Kontamination durch die Umgebungsluft zu vermeiden.

### 3.5.1.2 Feinstreinigung von Polymeren

Polymerwerkstoffe enthalten meist verschiedene Additive, um die Verarbeitung zu erleichtern und die Eigenschaften des Endprodukts zu erzielen. So kommen beispielsweise häufig interne Trennmittel, Fließhilfsmittel, Antistatika, Alterungsschutzmittel, UV-Stabilisatoren zum Einsatz. Alle Substanzen, die an der Oberfläche des Bauteils ihre Eigenschaften entfalten, in dem sie mehr oder weniger eine geschlossene Schicht bilden. Dieser Film wirkt als Trennschicht und verhindert in der Regel eine gute Haftfestigkeit der applizierten Beschichtung oder des Klebstoffs. Um dennoch die geforderten Prüfspezifikationen erfüllen zu können, wurden beziehungsweise werden Bauteile aufwändig mit Lösemitteln gereinigt und müssen anschließend getrocknet werden. Die Entfernung solcher Rückstände oder Verschmutzungen in einer Plasmaatmosphäre hat den besonderen Vorteil, dass es sich um einen trockenchemischen Prozess handelt. Es können sich im Vergleich zu einem nasschemischen Verfahren keinerlei Rückstände von den eingesetzten Reinigungsmitteln auf der Werkstückoberfläche ablagern.

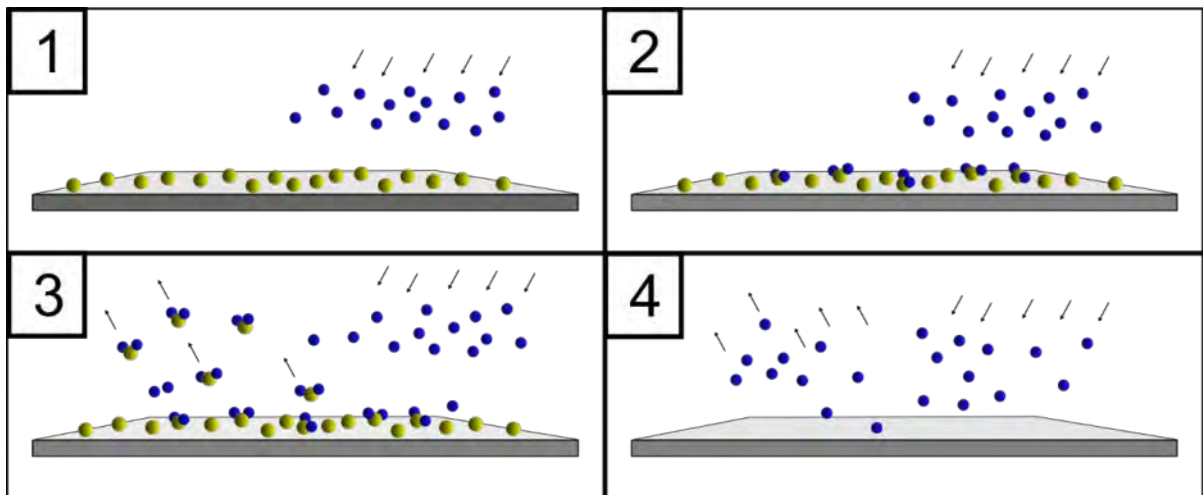


Bild 18: Prinzip der Plasmareinigung

Im Plasma werden organische Verbindungen gespalten, in die Gasphase überführt und hauptsächlich als  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  aus der Kammer abgeführt. Gleitmittel und Fettsäuren werden ebenso entfernt, wie Antioxidantien und niedermolekulare Bestandteile, so dass deren haftungsvermindernde Wirkung aufgehoben wird und der Beschichtung eine saubere Oberfläche zum Verankern zur Verfügung steht. Weiterhin hat der anliegende Unterdruck den Charme, dass die reaktiven Spezies des Plasmas die komplette Oberfläche des Werkstücks gleichmäßig erfassen, sei diese auch noch so klein, strukturiert oder komplex.

### 3.5.1.3 Silikonfreiheit

Eine gute Benetzung durch Lack oder Klebstoff wird nur auf sauberen, trockenen, öl- und silikonfreien Werkstoffoberflächen erzielt. Der Silikonfreiheit von Oberflächen kommt weiterhin eine besondere Bedeutung zu, wenn diese in Produkten zum Einsatz kommen, die das Kriterium Silikonfreiheit erfüllen müssen. Die Bauteileigenschaft „silikonfrei“ reicht

häufig für den Einsatz von z.B. Dichtringen in der Medizintechnik oder bei der Druckluftführung in der hochautomatisierten Lackiertechnik nicht aus. Die in solchen Anwendungen eingesetzten Komponenten müssen frei von allen lackbenetzungsstörenden Substanzen (labs-frei) sein, um Fehlstellen bzw. Verunreinigungen im, am oder durch das Endprodukt auszuschließen.

Für die Verunreinigung von Bauteilen mit silikonhaltigen Substanzen gibt es zahlreiche Ursachen. Interne und externe Trennmittel zur leichteren Entformung von Spritzgießteilen oder vulkanisierten Komponenten kommen ebenso in Frage, wie Gleitmittel bei der Extrusion von Elastomerprofilen. Auch Pigmente und Füllstoffe werden zur besseren Dispergierbarkeit in der Polymermatrix mit silikonhaltigen Emulsionen behandelt. Die Bauteilkontamination kann weiterhin im Produktionsprozess durch Schmiermittel von bewegten Werkzeugteilen oder Schläuchen erfolgen. Ungenügende Sorgfalt bei der Reinigung von Decken- und Bodenfiltern oder der Wasserabscheidung in Lackierkabinen kann zu Kratern in der applizierten Lackschicht führen, die oftmals durch Silikonreste unbekanntes Ursprungs hervorgerufen werden. Ebenso ist durch eine unsachgemäße Verpackung von labs-freien Bauteilen deren erneute Kontamination vorprogrammiert. In der Regel stellt der Mensch, der die Teile handhabt, unbewusst, durch imprägnierte Arbeitskleidung, das Tragen von Gummihandschuhen, die Anwendung von Kosmetika und Hautschutzsalben, Produkten zur Frisurstabilisierung oder von Duftstoffen, die „Verschmutzungsquelle“ dar (9).

Nicht alle dieser möglichen Verursacher können im Laufe der Herstellungskette ausgeschlossen werden. Deshalb benötigen die Teile, um die Anforderung labs-frei zu erfüllen, eine maßgeschneiderte Reinigung. Eine einfache Möglichkeit stellt die Reinigung mit Lösemitteln dar. Sie ist allerdings aus arbeitsmedizinischer Sicht und unter Berücksichtigung der aktuellen VOC-Richtlinie nicht zu favorisieren. Auch hier stellt das Niederdruckplasma ein alternatives Reinigungsverfahren dar (Bild 19).



**Bild 19:** Dichtringe während des Reinigungsprozesses in einer drehenden Plasmakammer

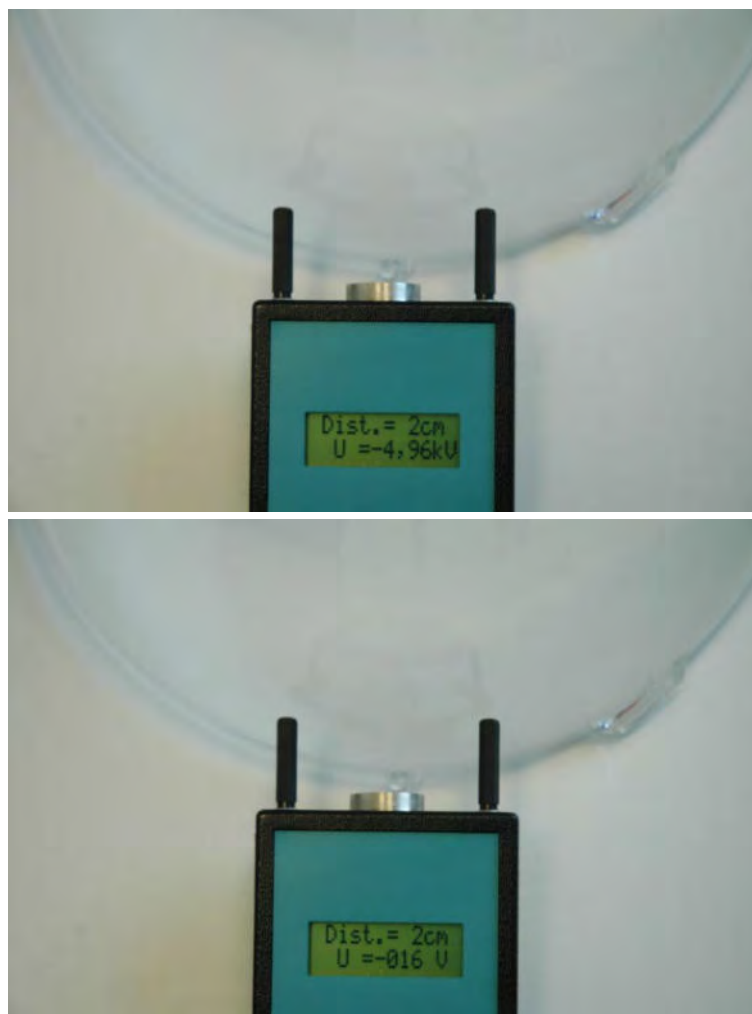
Das Zusammenspiel von UV-Strahlung, abgestimmtem Prozessgas, Gaszuführung und -absaugung sorgt dafür, dass silikonhaltige Substanzen in flüchtige und nicht flüchtige Bestandteile umgewandelt und abgeführt werden. Die Prozesszeit für die Reinigung der Oberfläche hängt vom Grad der Verschmutzung ab. Die Teilereinigung im Plasma ist ein trockener Prozess, d.h. es fallen keine Reaktionsprodukte an, die als Rückstände auf der Oberfläche zurück bleiben oder als Abfall entsorgt werden müssen. Die Prozessführung ist so ausgelegt, dass in der Kammer keinerlei silikonhaltige Substanzen verbleiben. Bei der anschließenden Teilehandhabung muss äußerste Sorgfalt gewährleistet sein. Es ist darauf zu achten, dass die Entnahme aus der Kammer mit labs-freien Handschuhen erfolgt, da die Produkte sonst erneut kontaminiert werden. Optimal ist der Prozessablauf gestaltet, wenn die Plasmaanlage als Schleuse zwischen dem Produktionsbereich und dem labs-freien Montage- oder Lackierbereich eingesetzt wird. Die Anlage wird dazu mit zwei Türen ausgeführt, die sich nur im Wechsel öffnen lassen - Beladen auf Produktionsseite, Reinigungsschritt, Freigabe der Tür auf Montageseite, Teileentnahme. Durch Schließen der Tür wird die Bestückung der Anlage erneut ermöglicht. Auf diese Weise wird jegliches Durchwandern von Silikonpartikeln ausgeschlossen.



**Bild 20:** Plasmastandanlage, die als Schleuse fungieren kann

### 3.5.1.4 Abreinigung von partikulären Verschmutzungen

Durch den Transport der Polymerbauteile von der Fertigung zur Beschichtung laden sich diese, durch die Reibung an der Verpackung beziehungsweise bei der Entnahme aus den Polybeuteln stark elektrostatisch auf. An diesen entstandenen Ladungsnestern lagern sich an der Werkstückoberfläche Staubpartikel an, die, wenn Sie auf der zu lackierenden Fläche bleiben, bei der Beschichtung zu Fehlstellen führen. Für die Entladung der Bauteile und zur Entfernung der Teilchen bietet sich ebenfalls sehr gut der Plasmaprozess an. Durch die im Plasma vorhandenen positiv geladenen Ionen erfolgt außer der Aktivierung der Oberfläche auch die Neutralisation der elektrostatischen Aufladung des Bauteils. Wird die Feldstärke vor und nach dem Prozess gemessen, so wird diese von durchaus mehreren Kilovolt pro Metern (Bild 21, links) auf nahezu Null (Bild 21, rechts) reduziert. Durch die erfolgte Entladung liegen die Stäube nun lose auf und lassen sich einfach entfernen (10), (11).



**Bild 21:** elektrostatisch aufgeladenes Bauteil vor dem Plasmaprozess (oben) und entladen nach dem Plasmaprozess (unten)



**Bild 22:** fahrbar ausgeführte Haubenanlage, die zur Entstaubung von Polymerbauteilen konzipiert wurde

Die aufgeladenen Bauteile werden auf das Gitter gelegt und die Haube geschlossen. Bei Kontakt des Deckels mit der Bodenplatte wird der Prozess gestartet. Die Kammer wird evakuiert, das Plasma wirkt ein und eine spezielle Luftführung sorgt beim Belüften der Kammer dafür, dass die losen Partikel von der Oberfläche abgeführt werden. Nach lediglich 40 Sekunden Zykluszeit steht bei dieser Anwendung ein staubfreies, aktiviertes Bauteil für den Beschichtungsprozess zur Verfügung.

### 3.5.2 Aktivierung von Polymeroberflächen

Flüssigkeiten verhalten sich auf festen Untergründen unterschiedlich. Wasser perlt von fettigen oder unpolaren Substraten ab, wohingegen es auf einer sauberen, fettfreien Metalloberfläche einen geschlossenen Film ausbildet. Zu den wasserabstoßenden (=hydrophoben) Materialien gehören alle Fette, Wachse und insbesondere auch Kunststoffe, aus denen mittlerweile unzählige Stückgüter produziert werden. Selbst lösemittelbasierte Beschichtungsstoffe spreiten auf unpolaren Kunststoffen nicht, da sie dort keine funktionellen Gruppen zum Wechselwirken finden. Wenn der Klebstoff oder der Lack bereits im flüssigen Zustand von der Unterlage abperlt, so ist auch für den getrockneten Klebstoff oder Lack keine Haftfestigkeit zu erwarten. Allerdings ist eine gute Benetzung der Oberfläche noch keine Garantie für eine gute Verankerung des Beschichtungsstoffes.

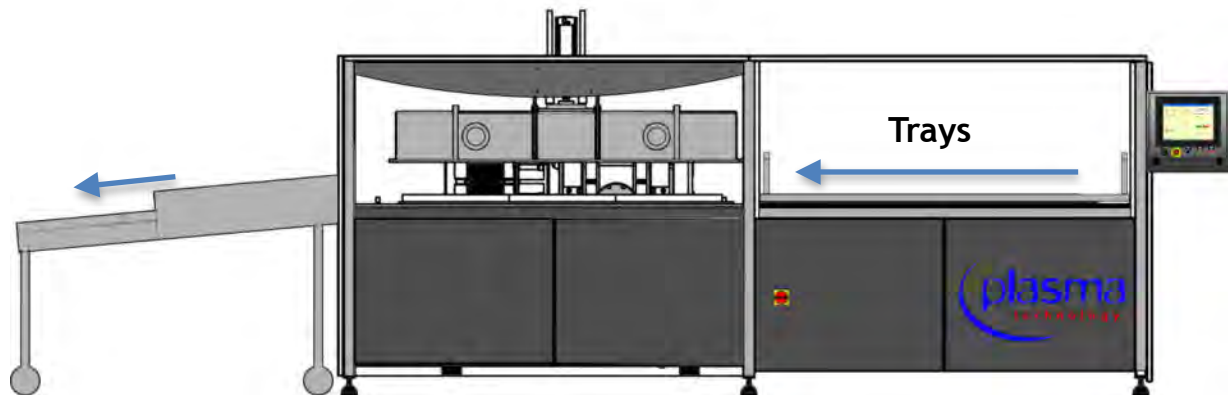
Physikalisch wird die Benetzbarkeit durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und die Oberflächenenergie des Substrats beschrieben. Beide müssen sich auf einem ähnlichen Niveau befinden, damit Benetzung möglich ist (12).



**Bild 23:** Polyolefinoberfläche durch Maskierung nach wie vor nicht benetzbar in der Mitte, der Flüssigkeitstropfen bleibt „sitzen“; Ecken links und rechts aktiviert und die Flüssigkeit benetzt flächig

Die Polyolefine besitzen eine Oberflächenenergie von rund  $30 \text{ mN/m}$  und der polare Anteil ist nahezu Null, so dass sie vor einer Beschichtung aktiviert werden müssen. Denn die Oberflächenenergie von Druckfarben beträgt rund  $38 \text{ mN/m}$ , die von Klebstoffen und wasserbasierten Farben liegt mit rund  $44 \text{ mN/m}$  etwas darüber. Die Modifikation der obersten Moleküllagen der Polymeroberfläche kann durch ein Luft- oder Sauerstoffplasma erfolgen. Auf der Oberfläche werden durch die energiereichen Spezies Bindungen gebrochen und so reaktive Stellen erzeugt. Polyolefinoberflächen enthalten nach der Behandlung Carbonyl- ( $>\text{C}=\text{O}$ ), Carboxyl- ( $-\text{COOH}$ ), Hydroxyl- ( $-\text{OH}$ ) und andere sauerstoffhaltige funktionelle Gruppen, die nun als Bindungspartner für den Beschichtungsstoff zur Verfügung stehen. Durch den Einsatz von stickstoffhaltigen Prozessgasen wie  $\text{N}_2$  oder  $\text{NH}_3$  können zusätzlich stickstoffhaltige funktionelle Gruppen eingebaut werden, die zu einer verbesserten Haftfestigkeit führen.

Die Bauteile werden als Schüttgut, Stapelware oder direkt auf den Lackieraufnahmen in die Plasmakammer eingebracht. Über die Größe der Kammer und Leistung der Vakuumpumpe wird der Durchsatz auf den Beschichtungsprozess angepasst. Mittlerweile sind auch vollautomatische Niederdruckplasmaanlagen, die auf den Takt der Beschichtungslinie abgestimmt sind, am Markt im Einsatz (13).



**Bild 24:** Aufbau einer vollautomatisierten Niederdruckplasmaanlage

<b>Kammervolumen</b>	<b>190 Liter</b>
<b>Nutzvolumen = Bauteilvolumen</b>	<b>150 Liter</b>
<b>Behandlungstakt</b>	<b>30 Sekunden</b>
<b>Volumen aktivierte Teile/Stunde</b>	<b>ca. 18 m<sup>3</sup></b>
<b>Volumen aktivierte Teile/24 h</b>	<b>ca. 430 m<sup>3</sup></b>
<b>Anschlussleistung</b>	<b>ca. 20 kW</b>
<b>Prozessgas</b>	<b>Luft</b>

**Tabelle 6:** Technische Details einer im Betrieb befindlichen Anlage (14)

Die Zufuhr der bestückten Trays erfolgt bei der in Bild 24 dargestellten Anlage von rechts auf die Grundplatte unter die Plasmahaube, die Wände und Deckel der Vakuumpumpe bildet. Die Haube fährt automatisch nach unten und der Prozess startet, sobald diese die Grundplatte aufsetzt. Lediglich 5 Sekunden befinden sich die Teile in der energiereichen Plasmaatmosphäre. Diese kurze Zeitspanne reicht aus, um funktionelle Gruppen in die Polymerketten einzubringen und dadurch die Oberflächenenergie auf ein einheitliches Level zu bringen. Anschließend wird die Kammer belüftet, die Haube hebt sich und die Trays werden auf das Förderband der Lackierlinie übergeben. Vom Beschicken bis zum Verlassen der Vorbehandlungseinheit sind lediglich 30 Sekunden vergangen (14).

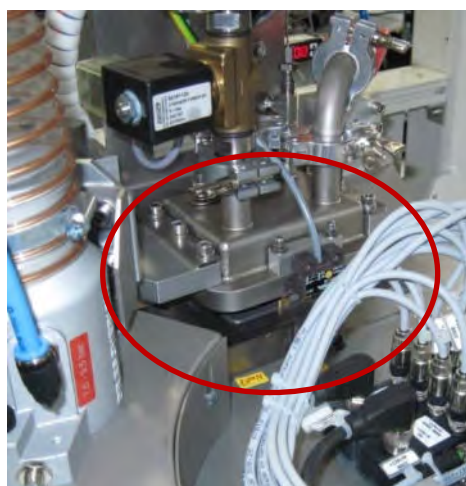
Mit einem ähnlichen Anlagenkonzept, werden flächige Interieurbauteile aktiviert, damit die aufkaschierte Dekorationsschicht eine ausreichende Haftfestigkeit erhält.



**Bild 25:** Aufbau einer automatisierten Niederdruckplasmaanlage mit Schiebetisch

Der ausfahrbare Schiebetisch bietet den Vorteil, dass auch große, flexible Bauteile oder Dichtungsrahmen einfach aufgelegt und wieder entnommen werden können.

Kleine Gehäuse, Stecker, Kondensatorbecher und andere Bauteile werden vor dem Vergießen in einer Miniplasmaanlage, die in den Drehtisch integriert ist, aktiviert.



**Bild 26:** Kurztakt-Miniplasmaanlage mit rund 400 cm<sup>3</sup> Kammervolumen in Rundtakttisch integriert

Auch hier handelt es sich um eine Kurztaktanlage, bei der der Plasmazyklus - Evakuieren, Plasma, Belüften - rund 20 Sekunden dauert. Die Teileaufnahme konnte so modifiziert werden, dass sie als Boden der Vakuumkammer dient.

### 3.5.3 Strukturierung von Kunststoffoberflächen

Durch eine gezielte Plasmabehandlung, dem sogenannten Plasmastrukturieren oder Plasmaätzen, können Oberflächen durch entsprechende Prozessführung und -gase so vorbehandelt werden, dass diese gut benetzbar werden. Bei diesen Prozessen wird gezielt Material von der Oberfläche abgetragen, in die Gasphase umgesetzt und kontinuierlich abgepumpt.

Das Hauptkriterium für die Auswahl des Ätzgases sollte seine Fähigkeit sein, mit dem abzutragenden Feststoff ein leicht flüchtiges Reaktionsprodukt zu bilden. Die zu erfüllende Aufgabe entscheidet, welche Prozessgase eingesetzt werden: beispielsweise Sauerstoff  $O_2$  oder  $O_2$ /Tetrafluormethan  $CF_4$  (oder alternativ  $O_2$ /Schwefelhexafluorid  $SF_6$ ) oder ein  $H_2$ /Edelgasgemisch. Die Zugabe von fluorhaltigen Prozessgasen beschleunigt den Ätzprozess enorm. Im Plasma wird in situ atomares, hochreaktives Fluor erzeugt, das mit dem Wasserstoff aus der Polymerkette reagiert und als HF (Fluorwasserstoff) desorbiert. Zurück bleibt eine „Wunde“ (= Radikalstelle) in der Polymerkette, mit der der im Plasma angeregte Sauerstoff reagiert. Wird die Oberfläche mit einem Foto Lack oder einer Maske abgedeckt, so können spezielle Strukturen erzeugt werden.



**Bild 27:** Mit einer Maske durchgeführter Plasmaprozess; am Schriftzug ist sehr gut zu erkennen, dass filigrane, scharf konturierte Strukturen erzeugt werden können

Die entstandenen Reaktionsprodukte und reaktiven Restgase werden über eine nachgeschaltete Neutralisationseinheit geführt und gebunden.

### 3.5.3.1 Hochleistungskunststoffe

Polyoxymethylen POM und Polytetrafluorethylen PTFE (=Teflon) direkt zu lackieren oder zu verkleben ist unmöglich.

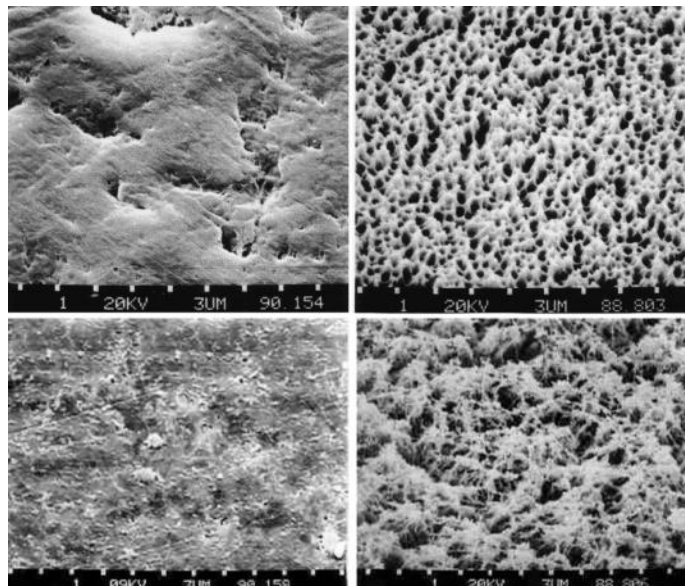
-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-  
Polyethylen

-CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>-  
Polytetrafluorethylen

-CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>-O-  
Polyoxymethylen

PTFE ist wesentlich reaktionsträger als das ihm verwandte Polyethylen. Die Fluoratome sind größer als die Wasserstoffatome. Sie umgeben die Kohlenstoffkette des Makromoleküls wie eine schützende Hülle. Die Bindung zum Kohlenstoff ist so fest, dass sie fast nicht gelöst werden kann. Daraus resultieren hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien sowie hohe physikalische und chemische Beständigkeit in der Wärme. Es weist wegen der hohen Bindungsenergie zwischen Kohlenstoff und Fluor und der geringen Polarisierbarkeit der Fluoratome wesentlich kleinere zwischenmolekulare Kräfte auf als andere Polymere. Darauf beruht das antiadhäsive Verhalten (15). PTFE wird mit H<sub>2</sub>/Edelgas Gemischen, N<sub>2</sub> oder NH<sub>3</sub> aktiviert. Bei hoch verdichteten Materialien ist nur eine Aktivierung möglich.

POM ist wie das Polyethylen und Polytetrafluorethylen linear aufgebaut. Im Vergleich zu PE (ca. 30 mN/m // 0,1 mN/m) und PTFE (ca. 19 mN/m // 0,5 mN/m) besitzt es mit ca. 42 mN/m die höchste Oberflächenenergie und einen polaren Anteil von rund 6 mN/m. Es liegt daher der Schluss nahe, dass POM gut beschichtbar ist. Dennoch ist die Haftfestigkeit von Lacken und Klebstoffen nicht befriedigend. Eine kurze Aktivierung in einem O<sub>2</sub> Plasma verbessert das Ergebnis wesentlich. Doch durch seinen molekularen Aufbau ist es gegen Lösemittel hochbeständig, so dass sich Lacke und Klebstoffe nicht verankern können. Durch eine Plasmabehandlung unter stark reaktiven Bedingungen können PTFE und POM soweit modifiziert - strukturiert und aktiviert - werden, dass sie beschicht- und verklebbar sind.



**Bild 28:** REM-Aufnahmen von PTFE (oben) und POM (unten) vor (links) und nach (rechts) der Strukturierung im Plasma.

Bild 29 zeigt schematisch, dass neben der Strukturierung der PTFE-Oberfläche auch eine Modifikation stattfindet, bei der Fluoratome durch Wasserstoffatome substituiert werden und sich Dipole ausbilden, die eine Wechselwirkung mit dem Beschichtungsstoff ermöglichen.

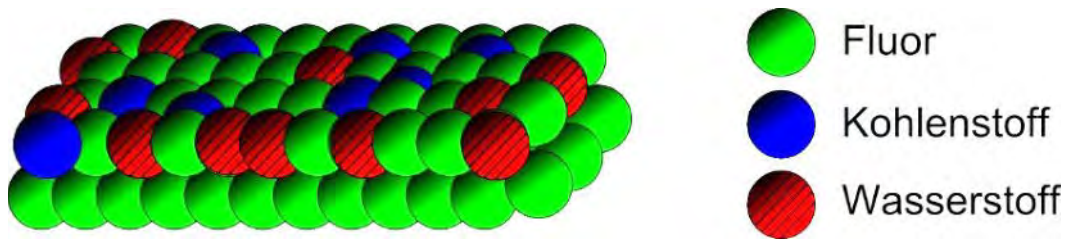


Bild 29: modifizierte PTFE-Oberfläche

### 3.5.3.2 PCB Ätzen (16)

Printed Circuit Boards PCB (=Leiterplatten) sind die Grundträger für elektronische Bauteile, die dort mechanisch befestigt und elektrisch durchkontaktiert werden. Die Leiterplatte besteht aus elektrisch isolierendem Material, meist eine glasfaserverstärkte Epoxidharzmatrix, auf das die Leiterbahnen aus Kupfer aufgebracht sind. Um die Packungsdichte zu erhöhen werden mittlerweile mehrlagige Leiterplatten (Mehrschichtleiterplatten oder Multi-Layer) eingesetzt. Diese Lagen werden je nach Einsatzzweck ausgewählt und können aus Prepreg (preimpragnated fibres = vorimprägnierte Endlosfasern), FR4 (flammbeständige, glasfaserverstärkte Epoxidharzmatrix), Polyimidfolie (PI) sowie Teflon bestehen.

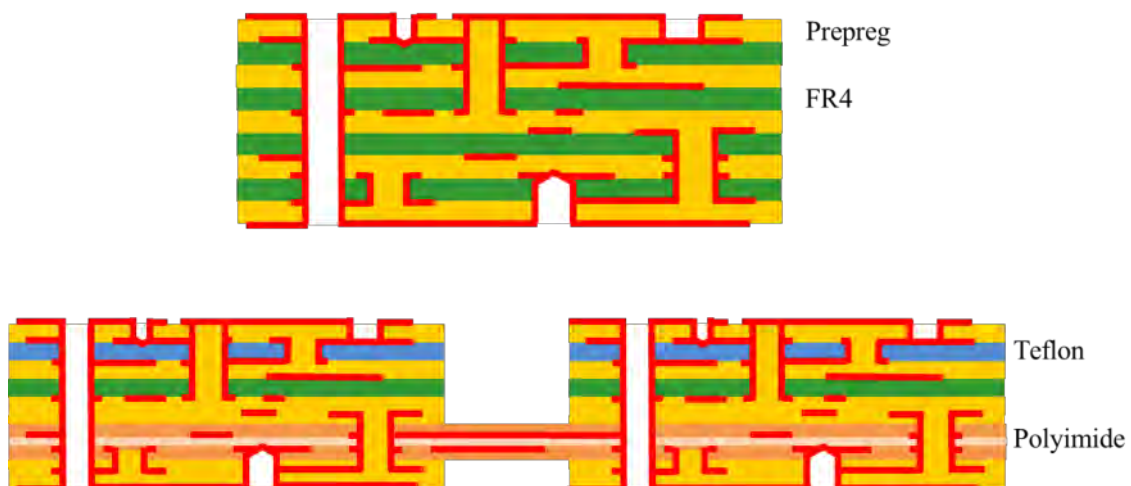
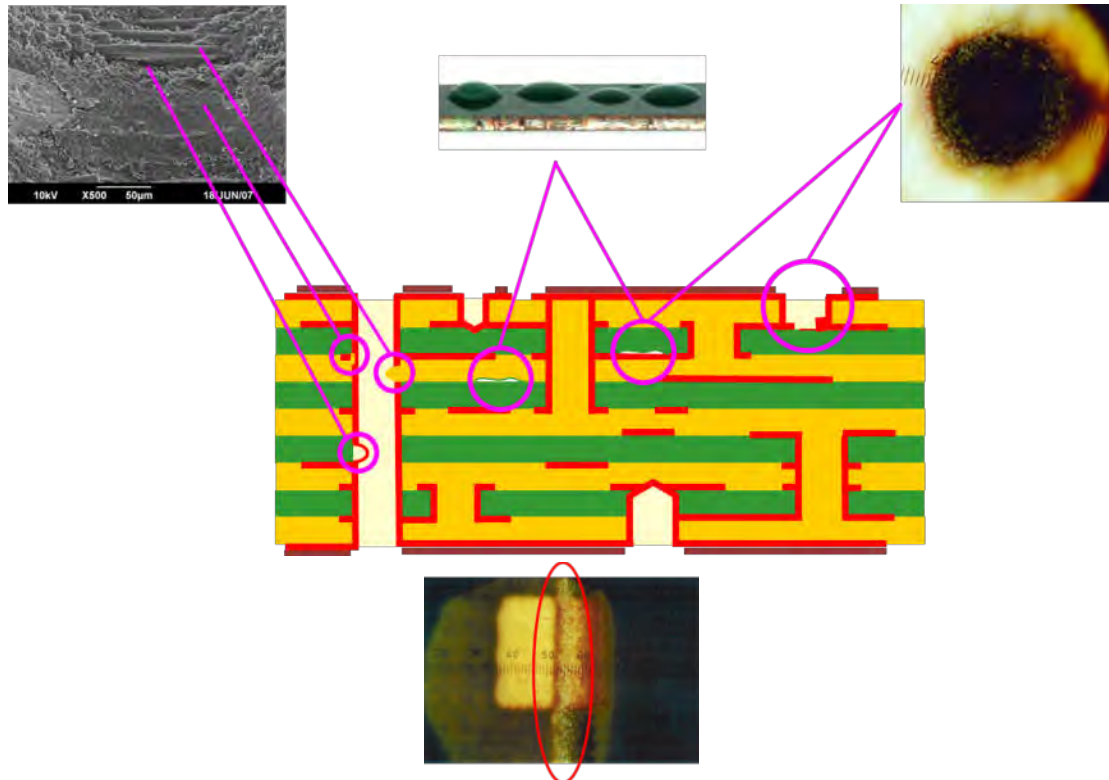


Bild 30: schematische Darstellung von unterschiedlich aufgebauten Mehrschichtleiterplatten (Aufbau oben: starr; unten: starr-flex; beim flexiblen Teil ist Polyimid das Basismaterial)

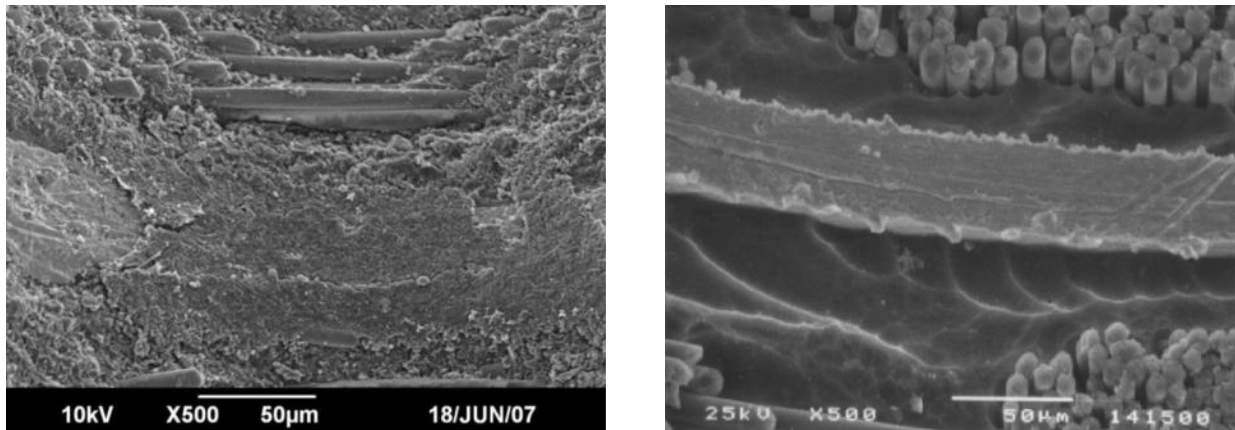
Um die verschiedenen Ebenen in der Leiterplatte elektrisch verbinden zu können, werden diese mechanisch oder mit Lasern gebohrt. Durch den Wärmeeintrag beim Bohren können sich aufgeschmolzene Harzpartikel an die Wand des Bohrlochs beziehungsweise an den Innenlagen anlagern und beim Laserbohren schlägt sich der Laserschmauch auf der Oberfläche nieder. In beiden Fällen müssen diese (Schmier-)Schichten abgetragen werden, um eine Durchkontaktierung sicherzustellen. Die Bohrlochreinigung wird auch als „Desmear“ oder Desmearing“ bezeichnet.



**Bild 31:** durch mechanische Bearbeitung erzeugte „Fehlstellen“ an Mehrschichtleiterplatten

Für die nasschemische Bohrlochreinigung sind seit Jahren mehrere Verfahren bekannt. Der Einsatz der bisher verwendeten Chemikalien ist aufgrund der REACH-Verordnung nicht mehr oder nur noch bedingt möglich. Verwendet werden Schwefelsäure, die nur für FR4 geeignet ist, Permanganat für FR4 und Polyimid. PTFE wird mit der in Verbindung mit Wasser hochentzündlichen Emulsion von Natrium-Naphthalid aktiviert. Chromschwefelsäure darf nicht mehr verwendet werden. Ein weiterer Nachteil der nasschemischen Bohrlochreinigung ist das Aufquellen des Harzes; im Falle des Polyimid muss dem Bad sogar zusätzlich ein Queller zugegeben werden, damit es (wirtschaftlich) ätzbar wird. Jedoch geht das aufgequollene Harz meist auch durch Tempern nicht mehr in seine Ursprungsdimension zurück. Die immer feiner werdenden Strukturen und ungünstige Durchmesser-Längen-Verhältnisse (= Aspect-Ratio) setzen der Nassreinigung daher Grenzen. Werden FR4/Polyimid einerseits und PTFE andererseits verarbeitet, so sind zwei völlig autarke Verarbeitungslinien notwendig. Die Badtemperatur liegt bei 80-85°C und bedingt einen Dauerbetrieb der Anlagen, da das Aufheizen der Bäder äußerst zeit- und energieintensiv ist. Die Qualität der Badflüssigkeiten muss gut überwacht und als Sondermüll entsorgt oder wieder aufbereitet werden.

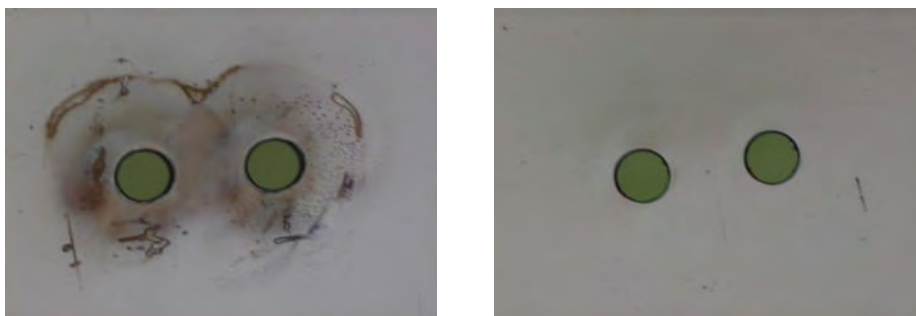
Im Gegensatz dazu belastet die trockenchemische Bohrlochreinigung im Niederdruckplasma die Umwelt nur wenig, ist effektiv und für alle in der Leiterplattenfertigung eingesetzten Materialien geeignet. Auch wenn für FR4, Polyimid und PTFE unterschiedliche Prozesse mit unterschiedlichen Gasen eingesetzt werden, so bleibt die Anlage immer dieselbe. Die Niederdruckplasmasysteme sind nach rund 30 Minuten betriebsbereit und benötigen nur im laufenden Prozess Energie.



**Bild 32:** Seitenwand eines Bohrlochs vor (links) und nach (rechts) dem Ätzen im Plasma

Die Bohrlochwand ist mit Harz verschmiert und die einzelnen Schichten sind nicht mehr zu erkennen (Bild 32, links). Durch eine Metallisierung des Bohrlochs soll eine elektrisch leitende Verbindung zur Innenlage hergestellt werden. Ohne Vorreinigung der Bohrlochwand wären dies und das Einbringen einer metallischen Hülse unmöglich. Nach dem Plasma-Desmear liegt die Innenlage völlig frei (Bild 32, rechts) und steht für den Nachfolgeprozess zur Verfügung.

Eine Möglichkeit flexible Schaltungen zu realisieren ist der Aufbau auf einer Polyimidfolie. Hierzu werden die Kontaktierungsöffnungen mit dem Laser gebohrt, danach wird metallisiert und strukturiert. Bei der Laserbearbeitung entsteht ein Schmauch, wie in Bild 33, links deutlich zu erkennen, der eine haftfeste Metallisierung verhindern würde. Diese Schmauchspuren können ebenfalls durch einen Plasma-Desmear-Prozess rückstandslos abgereinigt werden (Bild 33, rechts).



**Bild 33:** Laserschmauch bedeckt nach dem Laserbohren die Oberfläche (links), PI-Folie durch Plasma-Ätzen gereinigt (rechts)

### 3.5.4 Schichtabscheidung im Plasma (PECVD)

Die Schichtabscheidung im Plasma ist, wie in Abschnitt 3.3 bereits beschrieben, eine Sonderform der chemischen Gasphasenabscheidung, bei der schichtbildende Monomere als Prozessgas eingesetzt werden. Die ionisierten Moleküle und Fragmente kondensieren auf der Substratoberfläche als hochvernetztes Schicht mit Dicken von 20 nm bis 5 µm. Die Eigenschaften der Schichten werden durch die eingesetzten Monomere und entscheidend durch die gezielte Steuerung der Plasmaparameter (Druck, Frequenz, Leistung, Gasdurchfluss) bestimmt, so dass diese nahezu beliebig einstellbar sind. Plasmapolymere aus organischen und/oder Si-organischen Vorläufermonomeren (sogenannten Precusoren) unterscheiden sich grundlegend von den „klassischen“ Polymeren, bei denen sich die Monomereinheiten regelmäßig wiederholen (vgl. Abschnitt 3.5.3.1). Plasmapolymere bilden ein dreidimensionales Netzwerk mit unregelmäßigen Einheiten. Oft werden flüchtige metallorganische Verbindungen als Precursor eingesetzt. In diesem Zusammenhang wird dann von einer MO-(PE)CVD (Metal-Organic (Plasma Enhanced) Chemical Vapor Deposition) gesprochen.

**Hauptmerkmale im Plasma abgeschiedener Schichten sind (17):**

- amorphe, hochvernetztes Schichtstruktur,
- temperaturbeständig (150 °C bis 400 °C),
- lösemittelbeständig,
- Oberflächenspannung einstellbar von hydrophil bis hydrophob,
- hart (glasähnlich),
- dicht, porenfrei,
- korrosionsfest,
- gute Haftfestigkeit und
- glatte Schichtoberfläche.

**PECVD Schichten haben in vielen Bereichen der Beschichtungstechnik ihren festen Platz eingenommen. So werden beispielsweise**

- Verschleißschutzschichten auf Werkzeugen abgeschieden, um deren Standzeit zu erhöhen,
- PVD-Schichten auf dekorativen Bauteilen, um Galvanikschichten zu ersetzen,
- Haftvermittlerschichten, um neue Materialkombinationen zu ermöglichen,
- Brillengläser mit Kratzschutz, Easy-to-clean, Entspiegelung usw. versehen,
- Sperrschichten erzeugt, um Diffusions- und Migrationsprozesse zu unterbinden,
- Technische Textilien wasserabweisend (Bild 34) oder besonders saugfähig ausgerüstet.



Bild 34: hydrophobierte, nicht saugende Oberfläche

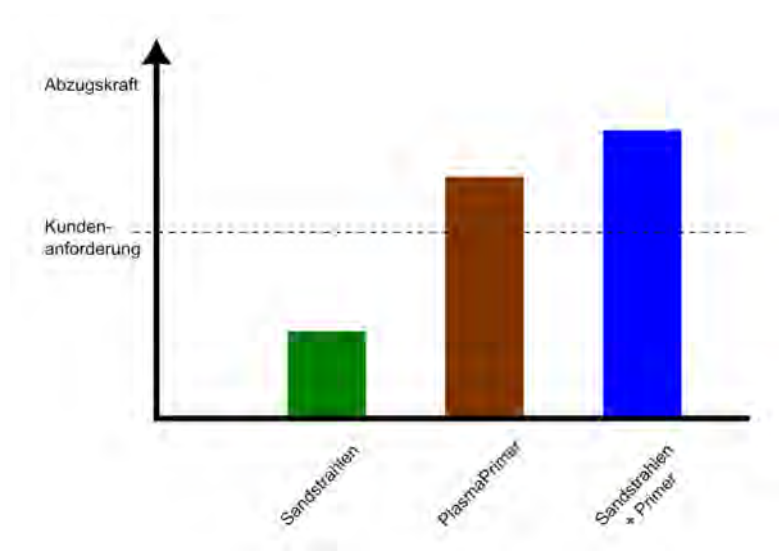
#### 3.5.4.1 Plasma Primer

Plasmaprozesse können mehrstufig erfolgen, d.h. an die Feinstreinigung der Oberfläche schließt sich beispielsweise ein Aktivierung und/oder die Abscheidung einer Schicht an. Der Übergang zum jeweils nächsten Schritt erfolgt ohne Zwischenbelüften, so dass unkontrollierte Reaktionen unterbunden werden. Der Plasma Primer ist ein reaktives Aerosol, das nach der Feinstreinigung in die Plasmaatmosphäre zu dosiert und von der eingekoppelten Energie in Molekülgruppen zerlegt wird. Diese lagern sich homogen auf dem gereinigten Substrat an und stehen an der Oberfläche bereit, um mit einer Beschichtung (Lack, Druckfarbe, Klebstoff, weiteres Polymer) eine dauerhafte Verbindung einzugehen. Die funktionellen Gruppen des Plasmaprimers werden physikalisch-chemisch auf diejenigen der Beschichtung angepasst. Die Schichtdicke des abgeschiedenen Primers liegt im Nanometerbereich, d.h. sie ist extrem dünn, aber dennoch äußerst gleichmäßig und effektiv.

Weiterhin kann diese, auf die beiden Partner maßgeschneiderte Schicht, mechanische und lösemittelhaltige Vorbehandlungen ersetzen. Für Gummi-Metall-Verbindungen wurden beziehungsweise werden bislang die Metallteile durch Sandstrahlen aufgeraut, um die Oberfläche zu vergrößern und von organischen Verunreinigungen zu befreien. Wird durch diesen Prozessschritt die geforderte Verbundhaftfestigkeit nicht erzielt, dann ist zusätzlich die Applikation eines in der Regel lösemittelhaltigen Primers erforderlich. Durch den mehrstufigen, trockenchemischen Plasmaprozess kann diese aufwändige Vorbehandlung ersetzt werden. In jedem Fall bleibt auch die Maßhaltigkeit der Bauteile unverändert und die Anforderungen in Bezug auf Haftfestigkeit werden erfüllt. Das zeigten Ergebnisse von Versuchen, die kundenseitig an einem Dichtring durchgeführt wurden. Das Elastomer wurde auf Ringoberflächen aufvulkanisiert, die wie folgt vorbereitet waren (18):

- sandgestrahlt
- sandgestrahlt und konventionell geprimer
- Plasmafeinstreinigung und Plasmaprimer

Die unterschiedlich modifizierten Metallringe wurden beim Endkunden in das Werkzeug eingelegt und die Dichtung angespritzt. Nach erfolgter Lagerung wurde mittels Zugprüfung (Abzugsgeschwindigkeit 25 mm/min) die Ablösekraft des Gummis ermittelt. Das Diagramm (Bild 35) verdeutlicht, dass die sandgestrahlten Dichtungen weit hinter den geforderten Haftwerten zurückbleiben. Die mittels Plasmareinigung und Plasmaprimer modifizierten Bauteile erfüllten die Spezifikation in vollem Umfang. Die ermittelten Werte lagen etwas niedriger, als die der Standardkombination Sandstrahlen und konventioneller Primerauftrag, aber deutlich über dem geforderten Wert.



**Bild 35:** Gegenüberstellung der geforderten und erzielten Haftkräfte des Gummi-Metall-Verbundes

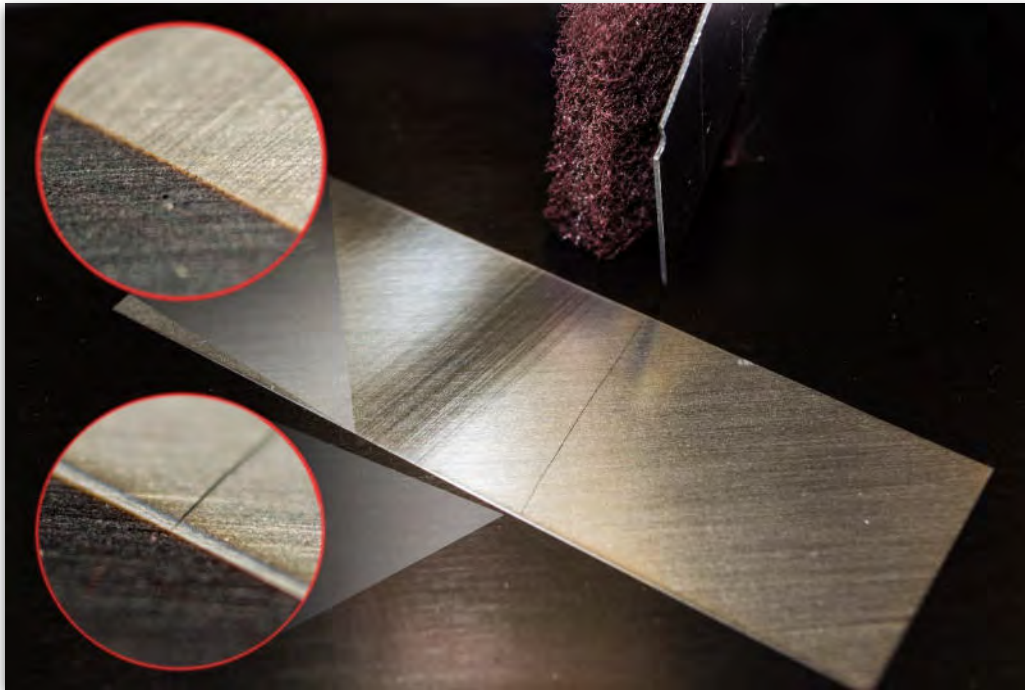
Bei der Vorbehandlung von Metallteilen im Plasma, muss bei der Konstruktion der Teileaufnahmen sowie der Beladung und Entnahme der Kammer, das im Vergleich zu Kunststoffwerkstücken deutlich höhere Gewicht berücksichtigt werden. Deshalb kommen bei solchen Vorbehandlungen meist Anlagen mit stirnseitigen Türen zum Einsatz (Bild 36). Dies ermöglicht, dass die Warenträger von einem Wagen mit Rollenbahn, direkt auf die im Kammerboden eingelassene Rollenbahn geschoben werden können und nach Prozessende auf der gegenüberliegenden Seite im Produktionsfluss weitergeführt werden.



**Bild 36:** Plasmaanlage mit automatisch betätigten, stirnseitigen Türen zur einfachen Warenträgerhandhabung

### 3.5.4.2 Kohlenstoffschichten

Ein weiteres großes Anwendungsfeld der Schichterzeugung im Plasma ist die Abscheidung von amorphen Kohlenstoffschichten (= Diamond-Like Carbon DLC), die in der Hauptsache aus dem chemischen Element Kohlenstoff bestehen. Mit ihnen lassen sich extrem verschleißarme Oberflächenschichten erzielen. Durch diese dünnen Funktionsschichten ist es nahezu möglich, Grundwerkstoff und Oberflächeneigenschaften getrennt voneinander zu betrachten und zu optimieren. Auf diese Weise können die ständig steigenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Produkten gezielter erfüllt werden. Die lediglich wenige Mikrometer dicken DLC Schichten verleihen einer Oberfläche größtmögliche Härte und maximalen Verschleißwiderstand. Auch bei der Herstellung der DLC Schichten kann über die Wahl der Plasmaparameter die Struktur der Schicht beeinflusst werden. Auf diese Weise lässt sich dieser mikro- oder nanokristalline Überzug texturieren und sein Reibwert deutlich reduzieren. Nockenwellen, Kolbenringe und Gleitringdichtungen werden beispielsweise auf diese Art beschichtet.



**Bild 37:** DLC beschichtete Edelstahlplatte. Mittig ohne Beschichtung; blankes Edelstahl (helle Oberfläche) verkratz; DLC Schicht (dunkle Oberfläche) bleibt unbeeinflusst.

### 3.5.4.3 Magnetron Sputtern

Eine weitere Variante um Schichten im Plasma abzuscheiden, ist das Magnetron Sputtern meist Sputtern genannt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, dünnste Metallschichten ein- oder mehrlagig auf den unterschiedlichsten Substraten abzuscheiden. In der Regel werden elektrisch leitende Targets aus beispielsweise Aluminium, Kupfer, Edelstahl, Rhodium oder Titan zerstäubt und die Metallatome kondensieren an den Bauteiloberflächen. Wie schon in den vorangegangenen Abschnitten ausgeführt, bestimmen die gewählten Prozessparameter und die -führung entscheidend die Eigenschaften der erzeugten Schicht. PVD-Schichten werden unter anderem als abschirmende Funktionsschichten oder zur Dekoration, beispielsweise als Ersatz von galvanisch erzeugten Überzügen, eingesetzt.

Bei der Verwendung als dekorative Schicht auf Kunststoffbauteilen ist zu beachten, dass die PVD-Abscheidung ein abbildendes Verfahren ist. Oberflächendefekte an Kunststoffformteilen, wie Fließnähte, Bindenähte, Einfallstellen, Kratzer oder Poren, werden nicht abgedeckt, sondern verstärkt hervorgehoben. Diese Oberflächenfehler werden in der Praxis durch einen dem PVD-Prozess vorgeschalteten Lackierschritt kaschiert, um die geforderten Qualitätsanforderungen an die dekorierte Oberfläche zu erfüllen. Der abgeschiedene Metallfilm muss, wenn er berührt werden kann oder mechanische Beanspruchung erfährt, in jedem Fall von einer Klarlackschicht geschützt werden. Er verfügt von Haus aus über keinerlei Beständigkeit hinsichtlich Handschweiß oder Abrieb.

**Die aufgetragenen Schichten besitzen folgende Dicken (19):**

- Vorlack: 10-15 µm
- PVD-Schicht: 0,1-0,2 µm
- Decklack: 25-35 µm

Der Glanzgrad, der mit einer PVD-Beschichtung erzeugt werden kann, ist enorm. Er kommt in jedem Fall an den von galvanisierten Bauteilen heran und es gibt viele Anwendungen in der Kosmetik-, Automobil-, Kommunikations- und Konsumgüterindustrie, die mit diesem Verfahren realisiert werden. Das ausgewählte Targetmaterial bestimmt die Eigenfarbe der abgeschiedenen Schicht, sobald diese dicker als 50 nm ist. Wird als Decklack beispielsweise eine Lasur eingesetzt, dann können dem Bauteil unzählige weitere Effekte hinsichtlich des optischen Erscheinungsbildes verliehen werden.

### 3.5.4.4 Gleitbeschichtung von Elastomeren

Gummioberflächen sind in der Regel von Hause aus stumpf und gleiten deshalb nicht. Doch zur Montage von Dichtringen oder bei bewegten Dichtflächen müssen diese gleitfähig sein. Auf den Elastomeroberflächen befinden sich organische Mischungsbestandteile, die diese „stumpf“ machen. Durch einen Plasmaprozess werden diese in die Gasphase überführt und entfernt. Auf den frisch gereinigten Oberflächen sind die Polymerketten nun für den nachfolgenden Aktivierungsschritt frei zugänglich, so dass funktionelle Gruppen eingelagert werden können. Sobald die Gruppen an der Oberfläche verfügbar sind, wird das Prozessgas in die Kammer zugeführt.

Jetzt wird die plasmapolymere Schicht abgeschieden, die für die späteren, verschleißbeständigen Schichteigenschaften verantwortlich ist. Wie bereits in Abschnitt 2.5.4 ausführlich erläutert, lassen sich maßgeschneiderte Oberflächeneigenschaften im Plasma erzeugen. Damit die abgeschiedene Schicht ihre Aufgabe dauerhaft erfüllen kann, werden zusätzlich keramische Komponenten eingelagert.

#### **3.5.4.5 Antimikrobielle Ausrüstung**

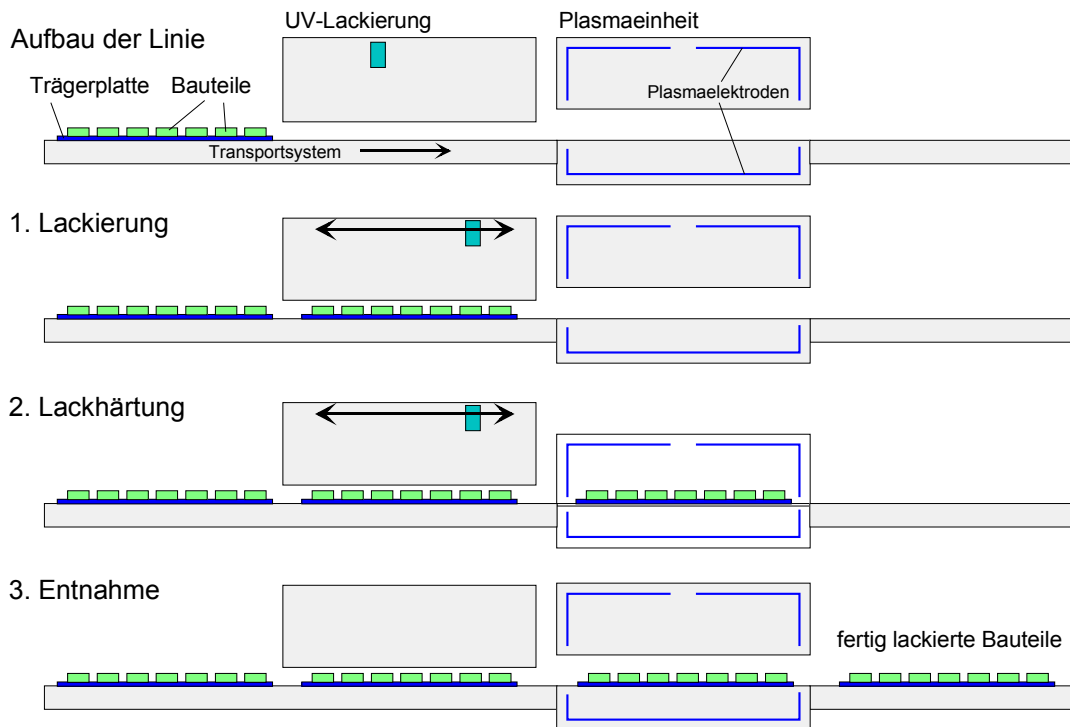
Auf nahezu allen Werkstoffen können durch eine Plasmabehandlung antimikrobielle Überzüge erzeugt werden. Der Prozessablauf ist nahezu identisch mit dem im Abschnitt zuvor beschriebenen. Das Prozessgas und -führung sind auch hier die entscheidenden Größen. Das zugeführte Prozessgas enthält keimhemmende Wirkstoffe, die in die abgeschiedene Schicht eingelagert sind. Dadurch, dass die wirksamen Partikel in die engmaschig vernetzte plasmapolymere Schicht eingebunden sind, ist der Effekt dauerhaft.

#### **3.5.5 Plasma-UV zur Lackhärtung**

Wie in Abschnitt 3.2.1 ausgeführt, emittieren Elektronen Licht, wenn sie aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand zurückkehren. Je nach eingesetztem Prozessgas besitzt das abgegebene Licht einen hohen UV-Anteil, der für die Härtung von UV-Lacken eingesetzt werden kann. Über die Anregungsfrequenz kann der Ionisationsgrad und somit die Menge des im Plasma befindlichen UV-Lichts sowie dessen Intensität gesteigert werden. Die im Vergleich zur UV-Strahlung in geringen Mengen vorhandene IR-Strahlung wirkt sich positiv auf die Lacktrocknung aus. Gerade bei Dual-Cure-Systemen, die einen gewissen Lösemittelanteil enthalten, trägt die Wärmeenergie zu einer schonenderen Lösemittelentfernung aus der Lackschicht bei. Die Durchhärtung wird verbessert (20). Die UV-Lackhärtung in einer Plasmaatmosphäre hat, verglichen mit konventionellen UV-Strahlern, den charmanten Vorteil, dass das UV-Licht das beschichtete Bauteil rundum erfasst und somit auch die mit Lack beaufschlagten Schattenbereiche aushärten. Dieser Aspekt ist bei der Verarbeitung von Mono-Cure-Systemen äußerst wichtig.

Für die Führung des Plasmaprozesses ist das eingesetzte Lacksystem „Dual-„ oder „Mono-Cure-„ mitentscheidend. Dual-Cure-Systeme enthalten noch einen gewissen Anteil an Lösemitteln, die aus der Plasmakammer abgeführt werden müssen. Über eine Kühlfalle können diese vollständig zurückgewonnen werden, so dass die VOC-Bilanz des Lackierbetriebes nicht belastet wird.

Die Prozessschritte gliedern sich wie folgt: Zuführung der Aufnahme mit den lackierten Teilen - bei DC-Lacken Evakuieren der Lösemittel - Zufuhr des Prozessgases - Zündung des Plasma = Trocknungssequenz - Belüftung der Kammer - Entnahme der Bauteile mit durchgehärteter UV-Lackschicht.



**Bild 38:** Inline-Konzept für eine plasmaunterstützte UV-Lacktrocknung

Ein weiterer Schwerpunkt des durchgeführten Forschungsprojektes PLASTRO-UV lag auf der energetischen Betrachtung der UV-Lacktrocknung im Plasma und der konventionellen Techniken.

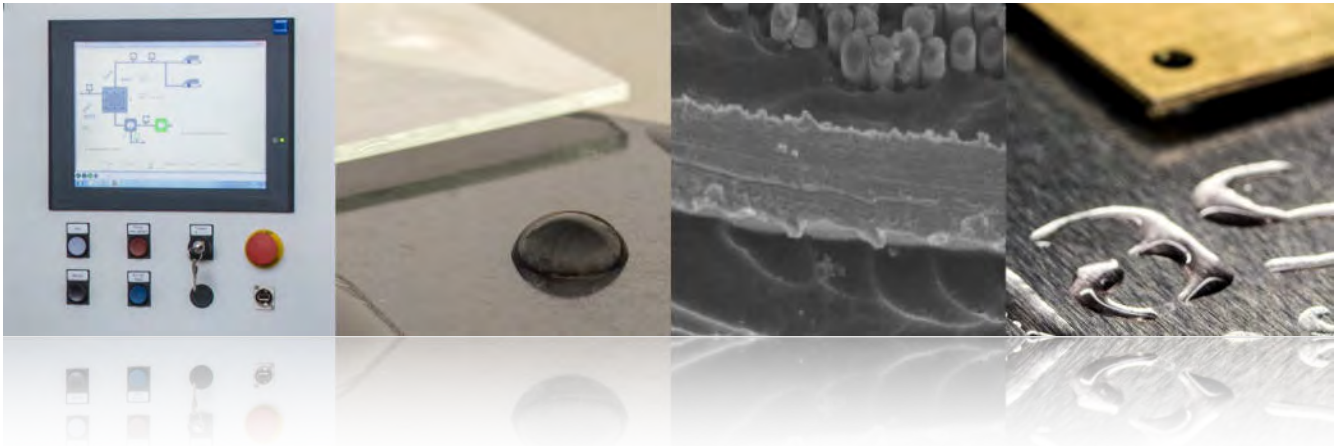
	Trocknungsart	Energieverbrauch [Wh/cm <sup>2</sup> ]
Durchlauflackieranlage	Konvektive Trocknung	0,71
Kleinteilelackieranlage	UV konventionell	0,33
Kleinteilelackieranlage	PLASTRO-UV	0,08

**Tabelle 7:** Energieverbrauch unterschiedlicher Lacktrocknungsverfahren für ein Hochglanzbauteil (20)

Die erhaltenen Werte und die weiteren aufgeführten Vorteile der PLASTRO-UV-Technik verglichen mit den meist eingesetzten Verfahren, sprechen klar für den Einsatz dieser innovativen Technologie.

## 4. Zusammenfassung

Die Niederdruckplasmatechnik ist ein universelles Werkzeug, um verschiedenste Grundmaterialien zu reinigen, zu beschichten, zu aktivieren, zu strukturieren und zu modifizieren. Sie bietet ein weites innovatives Feld im Bereich der Oberflächentechnik für unzählige Anwendungen und Werkstoffe. Der in jedem Fall trockenchemische Verfahrensablauf eröffnet der Technologie immer neue Einsatzgebiete, die bisher noch durch nasschemische oder lösemittelhaltige Prozessschritte bedient werden. REACH und die VOC-Verordnung bedingen, dass ein Umdenken in der Beschichtungstechnik stattfindet.



Die Vorbehandlung im Niederdruckplasma ist häufig der kostengünstigere Prozess, da Reinigung, Aktivierung und Beschichtung in einer Kammer nahtlos ineinander übergehen. Außerdem beschränken sich die laufenden Kosten des Systems auf Strom, wenn die Anlage im Betrieb ist, und falls notwendig auf das Prozessgas, das für jeden Durchgang neu zu dosiert wird und keinerlei Überwachung und Aufbereitung bedarf.

Der Vakuumprozess hat auch den großen Vorteil, dass die Bauteilgeometrie, ist sie auch noch so kompliziert, filigran, mit Hinterschnitten und Sacklöchern versehen, komplett erfasst wird. Werden unbehandelte Bereiche benötigt, so wird dies über eine entsprechende Maskierung realisiert.

Die Vorbehandlung im Niederdruckplasma hat etablierte Verfahren der Oberflächentechnik in einigen Anwendungsfeldern bereits verdrängt beziehungsweise ist mit diesen gleichgezogen und setzt sich aus genannten Gründen immer häufiger als gleichwertige Alternative durch.

## 5. Glossar und Abkürzungen

A	Ampere; Maß für die elektrische Stromstärke. Ein Strom von einem 1 [A] scheidet aus einer wässrigen Silbernitratlösung in einer Sekunde 1,118 mg Ag ab; 1 [A] = [C/s]
ABS	<u>A</u> crylnitril- <u>B</u> utadien- <u>S</u> tyrol Copolymer, hart bis zähelastischer Thermoplast mit guter Wärmebeständigkeit und hoher Schlagzähigkeit (21), (22)
AC	Wechselstrom (alternate current)
adhäsiv	Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen zwischen zwei Phasen; es handelt sich meistens um physikalische Wechselwirkungen.
Adhäsionsbruch	Ein Materialverbund bricht an der Phasengrenze; die Verbundpartner bleiben unbeschädigt.
Adhäsivschicht	Oberflächen sind immer mit einer natürlichen Adhäsivschicht belegt. Diese Schicht ist meist Wasser und andere organische Verbindungen, die sich in der Umgebungsluft befinden können. Auch sehr saubere und trockene Teile haben diese Adhäsivschicht, die nur von trockenen Reinigungsverfahren, wie z.B. der Plasmareinigung, entfernt werden kann.
Ag	chemisches Zeichen für Silber
Aktivierung	(polymere) Oberflächen haben in der Regel niedrige Oberflächenenergien, sind somit hydrophob und müssen aktiviert werden, um benetzt werden zu können. Bei der Aktivierung handelt es sich in den meisten Fällen um eine Oxidation. Die Aktivierung im Plasma ist ein Folgeprozess der Feinstreinigung und kann meist nicht scharf von letzterer abgegrenzt werden.
anisotrop	räumlich gerichtet (Gegensatz zu isotrop)
Anode	positiv geladener Pol einer elektrochemischen Zelle, einer Batterie, eines Kondensators oder einer Plasmabehandlungskammer. Bei letzterer ist "positiv" im Vergleich zur Kathode zu verstehen und hat oft das absolute Potential "0" oder Erde (ground).
anorganisch	Alle Verbindungen, die im wesentlichen Kohlenstoff frei sind, werden anorganisch genannt. Ausnahmen sind die Salze der Kohlensäure, die zu den anorganischen Verbindungen zählen.
Aspektverhältnis	Verhältnis von der Tiefe zum Durchmesser eines Loches. Ein Aspektverhältnis von 10 bedeutet, dass eine Bohrung 10 x tiefer ist als ihr Durchmesser. Hohe Aspektverhältnisse bereiten oft Probleme und erzwingen, bei immer niedrigeren Drücken zu arbeiten (s. auch (mittlere) freie Weglänge).
Au	chemisches Zeichen für Gold

bar	Druckeinheit ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )
Barrel-Reaktor	Zylindrischer Reaktor, der axial von den Prozessgasen durchströmt wird. Meist aus isolierendem Material, wie Quarzglas oder Aluminiumoxid, gefertigt. Die HF-Plasmaanregung geschieht vorteilhaft entweder induktiv oder über außenliegende Elektroden.
Benetzung	Dieser Begriff wird hier als "Benetzung einer Oberfläche mit Wasser" verstanden. Wasser kann auf der Oberfläche verfließen und bildet einen Flüssigkeitsfilm. Dies ist eine notwendige, aber oft nicht hinreichende Voraussetzung, damit sich Lack oder Klebstoff mit der Oberfläche haftfest verbinden kann.
Bias	s. Self-Bias
C	1. chemisches Zeichen für Kohlenstoff; 2. <u>C</u> oulomb; Maßeinheit für die elektrische Ladung $1 [\text{C}] = 1 [\text{A}\cdot\text{s}]$
Carboxyl-Gruppe	Gruppe in organischen Verbindungen (organische Säure) $\begin{array}{c} - \text{C} = \text{O} \\   \\ \text{OH} \end{array}$
CVD	<u>C</u> hemical <u>V</u> apor <u>D</u> eposition; Bezeichnung für die Abscheidung von Schichten aus der Gasphase, wobei meist ein organischer Precursor eingesetzt wird. Die Abscheidung kann thermisch oder durch ein Plasma induziert werden.
DC	Gleichstrom ( <u>d</u> irect <u>c</u> urrent)
Desmear	Entfernung einer Schmierschicht aus dem Bohrloch einer Leiterplatte, die durch den Bohrvorgang entstanden ist. In älterer Literatur wird synonym von Bohrlochreinigung gesprochen.
dispers	Dispers werden polarisierbare Anteile in der Oberfläche des Festkörpers genannt, die fluktuierend und nicht permanent sind.
DLC	<u>D</u> iamond <u>L</u> ike <u>C</u> arbon: Schicht aus diamantähnlichem Kohlenstoff. Es handelt sich um eine Mischung von Graphit (verantwortlich für die tiefschwarze Farbe der Schicht) und Diamant. Das Graphit sorgt für die selbstschmierenden Eigenschaften und der Diamant für die Härte der Schicht.
Dotierung	Einbringen von Spuren von Fremdatomen in einen hochreinen Festkörper, z.B. sind Silizium Solarzellen mit Bor oder Phosphor dotiert und werden dennoch als hochreines Si bezeichnet.
Drehschieberpumpe	s. Vakuumpumpe
Duroplast	Kunststoffe, die nach dem Aushärten nicht mehr verformt werden können. Diese Eigenschaft wird durch eine hohe Vernetzung der Polymere erreicht.

Elastomer	Elastisch verformbare Kunststoffe, die nach einer Druck- oder Zugbelastung wieder in ihre ursprüngliche Form zurückkehren. Kautschuk ist ein Beispiel für ein Elastomer (s. auch NBR)
emc	<u>e</u> lectrom <u>a</u> gnetic <u>c</u> ompatibility (s. EMV)
EMV	<u>E</u> lektro- <u>M</u> agnetische- <u>V</u> erträglichkeit: alle Anlagen dürfen oberhalb festgelegter Grenzwerte keine elektromagnetische Leckstrahlung abgeben und müssen gegen eine solche Strahlung abgeschirmt sein.
Elektron	negativ geladenes Teilchen mit einer Masse von ca. 1/2000 der Protonenmasse. Das Elektron umkreist nach dem Bohr'schen Atommodell den Atomkern. Elektronen sind wie Ionen in geringer Zahl mehr oder weniger frei vorhanden und sind wichtig, um ein Plasma zu zünden.
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk: Copolymer aus Ethylen und Propylen; mit Schwefel vulkanisierbar (21), (22)
ESCA	<u>E</u> lektronens <u>p</u> ektroskopie zur <u>c</u> hemischen <u>A</u> nalyse (s. XPS)
eV	<u>E</u> lektronen <u>v</u> olt: Energie, die eine Elementarladung beim Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 Volt erfährt; $1 \text{ [eV]} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ [J]}$ .
Feinstreinigung	Jede Oberfläche wird mit einer natürlichen Adhäsivschicht bedeckt, die bei der Lackierung oder Verklebung als Trennschicht wirken kann. Bei der Feinstreinigung wird diese Adhäsivschicht entfernt. Eine Feinstreinigung kann nur mit trocken arbeitenden Reinigungsmethoden wie der Plasmareinigung durchgeführt werden.
funktionelle Gruppe	Eine Molekülgruppe in einer (organischen) Verbindung, die deren Reaktionsverhalten maßgeblich beeinflusst. Funktionelle Gruppen sind z.B. Hydroxyl- oder Carboxylgruppen.
(mittlere) freie Weglänge $\lambda$	Gemittelte Wegstrecke, die ein Teilchen in der Gasphase zurücklegt, bevor es mit einem anderen kollidiert.
g	<u>G</u> ramm (Gewichtseinheit)
GHz	<u>G</u> iga <u>h</u> ertz (10 <sup>9</sup> Hz)
h	<u>h</u> ekto (10 <sup>2</sup> ), nur noch in der Meteorologie gebräuchlicher Vorsatz für Maßeinheiten (z.B. 1013.25 hPa = 1013.25 x 10 <sup>2</sup> Pa für den Luftdruck auf Meereshöhe)
H	Chemisches Zeichen für Wasserstoff. Wasserstoff kommt entweder gebunden oder als zweiatomiges Molekül (H <sub>2</sub> ) vor. Es ist das leichteste chemische Element und besteht aus nur einem Proton und einem Elektron. Protonen sind also H <sup>+</sup> - Ionen.
HF	<u>H</u> och <u>f</u> requenz

Hz	<u>Hertz</u> (Maßeinheit für Frequenz: Schwingungen pro Sekunde)
hydrophil	Wasser liebend, eine hydrophile Oberfläche ist mit Wasser benetzbar.
hydrophob	Wasser abweisend; eine hydrophobe Oberfläche wird von Wasser nicht benetzt, es perlt ab.
induktiv	Hier: Anregung von HF-Plasmen durch Induktion im Innern einer Spule.
Industriefrequenzen	Um den Funkverkehr nicht zu stören, wurden in der Vergangenheit nur bestimmte Frequenzen für die Industrie freigegeben. Seit Einführung von EMV Regeln ist dies aufgehoben, da die Hersteller von Anlagen verpflichtet sind, Geräte so herzustellen, dass sie weder Störsignale abgeben noch gegenüber solchen empfindlich sind. In der Regel werden Generatoren oder Magnetronen nach wie vor mit den Industriefrequenzen betrieben:  LF: 40 KHz HF: 13,56 MHz MW 2,45 GHz
Ionen	negativ oder im Niederdruckplasma meist einfach positiv geladene Atome oder Moleküle. Das einfachste Ion ist das positiv geladene Wasserstoff Atom (s. Proton). Ionen können auch mehrfach geladen sein.
isotrop	gleichförmig im Raum ausbreitend, nicht gerichtet (Gegensatz zu anisotrop)
J	<u>Joule</u> : Maßeinheit für Energie ( $1 \text{ [J]} = 1 \text{ [N/m]} = 1 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2] = 1 \text{ [Ws]}$ )
kapazitiv	Hier: Anregung eines HF-Plasmas über (zwei) Elektroden.
Kathode	Negativ geladener Pol einer elektrochemischen Zelle, einer Batterie, eines Kondensators oder einer Plasmabehandlungskammer. Handelt es sich um ein LF- oder HF-Plasma, dann ist die Kathode an die LF- oder HF-Spannung angeschlossen.
kg	<u>Kilogramm</u> (1000 g)
kHz	<u>Kilohertz</u> ( $10^3 \text{ Hz}$ )
Knudsen-Strömung	Übergangsbereich von viskoser in molekulare Strömung im Feinvakuumgebiet ( $p = 10^2 - 10^{-1} \text{ Pa}$ ). $\lambda$ liegt im Bereich der Dimensionen der Behandlungskammer.
Kohäsion	Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen innerhalb einer Phase; oft chemischer Natur.

Kohäsionsbruch	Ein Materialverbund bricht innerhalb einer Phase, so dass nach dem Bruch auf beiden Fügepartnern der Klebstoff ist oder auf dem Klebstoff Material aus einem der Fügepartner zu sehen ist.
Kontaktwinkel	Wenn ein Tropfen einer beliebigen Flüssigkeit auf eine Oberfläche aufgesetzt wird rollt er sich mehr oder weniger ein. Der Winkel, der zwischen Materialoberfläche und Oberfläche des Tropfens gebildet wird, heißt Kontaktwinkel. Der Kontaktwinkel wird durch die Young'sche Gleichung beschrieben und setzt sich aus einem polaren und dispersen Anteil zusammen. Je kleiner der Kontaktwinkel desto besser wird die Materialoberfläche durch die Flüssigkeit benetzt.
$\lambda$	s. (mittlere) freie Weglänge
labs	<u>L</u> ack <u>b</u> enetzungsstörende <u>S</u> ubstanzen: Es handelt sich meist um Trennmittel aller Art und auch um Verschmutzungen, die sich durch unsachgemäßem Umgang mit den Substraten auf der Oberfläche niederschlagen.
labs-frei	Eine Oberfläche, die frei von <u>l</u> ack <u>b</u> enetzungsstörenden <u>S</u> ubstanzen ist, wird als "labs-frei" bezeichnet.
Langmuirsonde	Eine Drahtsonde im Plasma, die die physikalisch, elektrischen Eigenschaften des Plasmas misst. Die Änderungen dieser Eigenschaften können Aufschluss über die augenblicklichen Vorgänge im Plasma geben.
Leiterplatte (LP)	Träger für elektronische Bauteile und deren Verschaltung. Einfache Leiterplatten sind ein- oder zweilagig. Komplexe Schaltungen müssen entflochten, d.h. Leiterbahnen auf mehrere Ebenen geführt werden. Letztere werden als Multilayer bezeichnet.
LF	Niederfrequenz ( <u>l</u> ow <u>f</u> requency)
m	<u>m</u> illi ( $10^{-3}$ ); Vorsatz vor Maßeinheiten
m	<u>M</u> eter
Magnetron	Generator zur Erzeugung von Mikrowellen
mbar	<u>m</u> ill <u>b</u> ar ( $10^{-3}$ bar)
metallorganisch	Grenzgebiet zwischen organischer und anorganischer Chemie. Es handelt sich um Verbindungen von Metallen mit organischen Molekülen. Solche Verbindungen spielen in der Natur eine wichtige Rolle (z.B. der Blutfarbstoff ist eine metallorganische Verbindung). Viele metallorganische Verbindungen sind flüchtig und werden als Precursor in (PE)CVD Beschichtungsprozessen eingesetzt.
MHz	<u>M</u> eg <u>ah</u> ertz ( $10^6$ Hz)

Molekularströmung	Die Teilchen im Medium haben annähernd keine Wechselwirkung untereinander. Die "Strömung" wird dadurch erzeugt, dass die Zahl der Stöße in einer Raumrichtung geringer ist als in andere Raumrichtungen. $\lambda$ ist deutlich größer als die Gefäßdimension. Im Hoch- und Ultrahochvakuum liegt eine Molekularströmung vor ( $p < 10^{-1}$ Pa).
MOCVD	<u>M</u> etal <u>O</u> rganic <u>C</u> hemical <u>V</u> apor <u>D</u> eposition: bei dieser Abscheidung werden flüchtige metallorganische Verbindungen als Precursor eingesetzt. Damit können Verschleißschutzschichten z.B. aus Titancarbonnitrid abgeschieden werden.
Multilayer	s. Leiterplatte
MW	<u>M</u> ikrow <u>e</u> lle (hier: 2,45 GHz)
N	<u>N</u> ewton (Maßeinheit für Kraft oder Gewicht; $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ )
NBR (HNBR)	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR) $[-\text{CH}(\text{CN})-(\text{CH}_2)_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-]_n$ , sowie hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (HNBR) $[-\text{CH}(\text{CN})-(\text{CH}_2)_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ sind wichtige Dichtwerkstoffe, da sie beständig gegen Öl und Treibstoffe sind. (21), (22)
O	chemisches Zeichen für Sauerstoff; liegt in der Natur immer als zweiatomiges Molekül vor ( $\text{O}_2$ )
Oberflächenenergie:	Die Arbeit die aufgewendet werden muss, um die Fläche einer (z.B. flüssigen) Phase zu vergrößern, wird (freie) Oberflächenenergie genannt. Dieser Begriff wird in der Regel für Festkörper benutzt. Bei flüssigen Phasen wird von Oberflächenspannung gesprochen. Die Oberflächenenergie wird als die Arbeit definiert, die notwendig ist, um eine gegebene Fläche zu benetzen. Maßeinheit: $1 [\text{Nm}/\text{m}^2] = 1 [\text{N}/\text{m}]$ ; da die gemessenen Kräfte um Größenordnungen kleiner sind, wird die Oberflächenspannung gewöhnlich in $[\text{mN}/\text{m}]$ angegeben. Oft wird auch die Maßeinheit $[\text{dyn}/\text{cm}]$ , die $1 [\text{mN}/\text{m}]$ entspricht, verwendet. Kunststoffe haben meist eine geringe Oberflächenenergie und sind unpolar, während Metalle eine hohe Oberflächenenergie besitzen, weil sie polar sind.  Die Oberflächenenergie eines Festkörpers kann über die Grenzflächenspannung einer Flüssigkeit definierter Oberflächenspannung bestimmt werden (siehe auch Oberflächenspannung, Kontaktwinkel, Young'sche Gleichung)
Oberflächen- spannung	Die Oberflächenspannung wird von Molekularkräften innerhalb von Flüssigkeiten erzeugt und führt zu der charakteristischen Tropfenform. Im Alltag wird der Begriff Oberflächenspannung im physikalischen Sinne unsauber benutzt, da er für die Phasengrenze Flüssigkeit/Gas definiert ist. Bei der Phasengrenze Flüssigkeit/Festkörper müsste korrekterweise von der Grenzflächenspannung gesprochen werden. Wird eine Flüssigkeit mit bestimmter Oberflächenspannung auf eine (Festkörper-)Oberfläche aufgesetzt,

deren Oberflächenenergie kleiner ist, dann bildet sich ein Tropfen oder bei großer Differenz gar eine Kugel. Im umgekehrten Fall verfließt die Flüssigkeit. Die Maßeinheit für die Oberflächenspannung ist ebenfalls [ $mN/m$ ]. Zur Orientierung: Wasser hat eine Oberflächenspannung von 72 [ $mN/m$ ].

organisch	Dieser Begriff wird hier in Zusammenhang mit "organischer Verbindung" gebraucht und ist eine allgemeine Bezeichnung vor chemische Verbindungen mit Kohlenstoff.
Oxid	Allgemein: Verbindungen mit Sauerstoff; hier wird unter Oxid ein Metalloxid verstanden.
Oxidation	allgemein: Reaktion von Verbindungen mit Sauerstoff. Polymere Oberflächen werden im Plasma nur sehr partiell oxidiert, während niedermolekularer, organischer Schmutz im Idealfall zu Kohlendioxid und Wasser "verbrannt" und von der Oberfläche entfernt wird. Bei der Oxidation von Metallen erhöht sich deren Ladungszahl um +2. Die Oxidationsreaktion ist die Umkehrreaktion der Reduktion.
p	Abkürzung für Druck ( <u>p</u> ressure)
Pa	<u>P</u> ascal (Maßeinheit für Druck; $N/m^2$ , 100 Pa = 1 mbar) Luftdruck auf Meereshöhe: 1013,25 mbar = 1013,25 hPa
PA	<u>P</u> oly <u>a</u> mid: harter Thermoplast mit guten Gleiteigenschaften, nimmt Wasser auf und vergrößert dadurch seine Dimension. Charakteristisch ist die Amid-Gruppe (-NH-CO-). Die verschiedenen Typen (PA6, PA12 etc.) unterscheiden sich durch die Segmente zwischen den (-NH-CO-) Gruppen (21), (22). Polyamid hat eine hohe Oberflächenspannung.
PCB	<u>P</u> rinted <u>C</u> ircuit <u>B</u> oard (s. Leiterplatte)
PE	Polyethylen [-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -] <sub>n</sub> : teilkristalliner Thermoplast; ist das Polymer stark verzweigt, so ist von PE-LD (LDPE) die Rede; PE-HD (HDPE) ist ein weniger stark verzweigtes Polymer. Alle PE-Typen sind unpolar und lassen sich ohne Vorbehandlung nicht lackieren oder verkleben (21), (22).
PECVD	<u>P</u> lasma <u>E</u> nhanced <u>C</u> hemical <u>V</u> apor <u>D</u> eposition: Sonderform der Abscheidung aus der Gasphase im Plasma.
Pinhole	Mikroskopisch kleine Fehlstelle in einer Schicht, die zum Versagen der Schicht führt.
Plasmamonitoring	Verfolgen des Plasmaprozesses mittels Spektralanalyse oder einer Langmuirsonde, um z.B. einen Endpunkt zu bestimmen.

Plasmapolymer	Wahllos, dreidimensional vernetzte, nicht einheitliche Struktureinheiten, die sich bei der Beschichtung im Plasma auf der Oberfläche abscheiden. Der Begriff "Plasmapolymer" ist missverständlich (vgl. Polymer), da keine Regelmäßigkeit vorhanden ist. Plasmapolymerische Schichten sind bereits bei sehr dünnen Schichtdicken Pinhole frei.
Plasmaprimer	Eine im Plasma erzeugte Schicht auf der Oberfläche, die an die Eigenschaften des Klebstoffes oder Lackes anpasst ist.
PMMA	"Plexiglas", Polymethylmethacrylat $[-CH_2-C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$ , spröder Werkstoff mit hoher Festigkeit (21), (22)
Polymer	Makromolekül, das aus sich wiederholenden Struktureinheiten aufgebaut ist. Die Struktureinheit wird in der chemischen Formel in eckigen Klammern gesetzt (s. auch POM, PE).
POM	Polyoxymethylen $[-O-CH_2-]_n$ hochfester, steifer Thermoplast mit guter Dimensionstabilität (21), (22)
polar	Polar werden die Anteile permanenter Dipole im Festkörper genannt, die mit permanenten Dipolen von Flüssigkeit bzw. Lack oder Klebstoff wechselwirken.
PP	<u>P</u> olypropylen $[-CH_2-CH(CH_3)-]_n$ , preiswerter Massenkunststoff für z.B. Verpackungen. PP findet immer mehr Verwendung auch im Konstruktions- und Hochleistungsbereich. (21), (22)
Precursor	Ausgangssubstanz
Proton	einfach positiv geladenes Teilchen mit der Atommasse 1; das Wasserstoff Ion $H^+$ ist das Proton.
PTFE	<u>P</u> olytetrafluorethylen $[-CF_2-CF_2-]_n$ wichtigster Fluorkunststoff; Fluorkohlenwasserstoffe sind gesintert und zeichnen sich durch hohe Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit aus. Sie lassen sich wegen ihrer äußerst geringen Oberflächenspannung (18 $[mN/m]$ ) ohne Vorbehandlung weder verkleben noch lackieren
PUR	<u>P</u> olyurethan; weitverbreiteter Elastomer und Duroplast (Klebstoff, Schaumstoff, Lack) (21), (22)
PVD	<u>P</u> hysical <u>V</u> apor <u>D</u> eposition: Abscheidung von Schichten unter Verwendung physikalischer Methoden (Sputtern; Verdampfen). Oft lässt sich dies nicht sauber von CVD abgrenzen, wenn die Atmosphäre, in der abgeschieden wird, mit der Schicht oder dem gasförmigen Material, reagieren kann.
Radikal	Chemische Verbindung mit einem einsamen Elektron in der äußeren Schale. Radikale sind in der Regel hochreaktiv, können elektrisch geladen sein und treten häufig in Plasmen auf. Mit den angeregten Spezies sind sie im Plasma für die Reaktionen auf der Festkörperoberfläche und in der Gasphase verantwortlich.

REACH	<u>R</u> egistration, <u>E</u> valuation, <u>A</u> uthorisation and Restriction of <u>C</u> hemicals: Verordnung EG 1907/2006. Diese Verordnung regelt die Bewertung und Zulassung von Chemikalien in allen Mitgliedstaaten der EU. Führt dazu, dass viele Chemikalien entweder nicht mehr zugelassen sind oder nach einer Übergangsfrist aus dem Verkehr gezogen werden.
Reduktion	hier: Reaktion von Metallverbindungen mit Wasserstoff. Bei der Reduktion erniedrigt sich die Ladungszahl des Metalls. Die Reduktion ist Umkehrreaktion der Oxidation.
RIE	<u>R</u> eactive <u>I</u> on <u>E</u> tching - Effektiver Ätzprozess, wobei ein isotroper (chemischer) Prozess von einem anisotropen (physikalischen) Prozess überlagert wird. Das elektrisch leitfähige und temperaturstabile Substrat wird auf der Kathode gelagert. Durch den negativen Self-Bias werden die positiv geladenen Ionen auf das Substrat beschleunigt und sputtern die Oberfläche (anisotroper physikalischer Effekt). Handelt es sich bei den Ionen um chemisch reaktive Teilchen (z.B. $O_2^+$ ) findet noch eine chemische isotrope Reaktion statt.
s	<u>S</u> ekunde
Si	Chemisches Zeichen für Silizium
Spektralanalyse	Jede im Plasma angeregte Spezies sendet bei der Rückkehr in den energetischen Grundzustand ein charakteristisches Licht aus. In der Spektralanalyse werden die Wellenlänge und die Intensität des Lichtes gemessen. Das Auftauchen oder Verschwinden dieses Lichtes gibt Auskunft über den augenblicklichen Reaktionsverlauf.
Spezies	Allgemeine Bezeichnung für Atome, Moleküle, ohne diese näher zu charakterisieren; angeregte Spezies sind Teilchen, die einen hohen Energieinhalt haben und deswegen hochreaktiv sind. Oft kehren solche angeregten Spezies spontan unter Aussendung von Licht in ihren energetischen Grundzustand zurück. Die Leuchterscheinung der Plasmen ist darauf zurückzuführen.
Self-Bias	In LF- und HF-Plasmen wird auf der Kathode, sofern sie DC isoliert ist (Kondensator zwischen Kathode und Generator bzw. Erde), eine DC-Spannung erzeugt, die je nach Größenverhältnis zur Anode (hohe) negative oder positive Werte annimmt. Ist die Kathodenfläche kleiner als die Anodenfläche wird ein negativer (DC)-Self-Bias erzeugt, der z.B. beim RIE zum gerichteten Ätzen ausgenutzt wird. Der Effekt wird durch die hohe Beweglichkeit der Elektronen erzeugt.

Sputterprozess	Positiv geladene Ionen werden mit hoher Energie auf die Kathode (negative Elektrode) beschleunigt. Durch Stoß werden aus der Elektrodenoberfläche Atome herausgeschlagen, die in die Gasphase übergehen (Kathodenzerstäubung). Der Sputterprozess tritt in gewissem Maße immer auf und ist oft ungewünscht. Er wird jedoch als effektiver Ätzprozess (s. auch RIE) und Beschichtungsprozess für hochreine Schichten eingesetzt. Die Kathode dient hier als Materiallieferant oder Target.
Substitution	hier: Austausch von Atomen oder Molekülgruppen durch andere Atome oder Molekülgruppen in einer chemischen Reaktion. Durch die Substitution werden funktionelle Gruppen in organische Moleküle eingefügt.
Target	hier: hochreine Metalle oder auch deren Verbindungen, die als Kathode geschaltet als Materialquelle bei der Beschichtung mittels Sputtern dienen.
Teflon	s. PTFE
Testtinte	Flüssigkeiten mit definierter Oberflächenspannung. Mit Hilfe dieser Testflüssigkeiten wird fertigungsnah die ungefähre Oberflächenenergie von Festkörpern bestimmt.
Thermoplast	Kunststoffe, die sich in einem definierten Temperaturbereich plastisch verformen lassen. Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden. Thermoplaste sind amorphe oder teilkristalline Polymere (21) (22).
Trockenläufer	s. Vakuumpumpe
unpolar	s. Oberflächenspannung
V	Volt: Maßeinheit für die elektrische Spannung; $1 [V] = 1 [W/A] = 1 [J/(A \cdot s)] = 1 [kg \cdot m^2 / (A \cdot s^3)]$
van der Waals-Kraft	Dipol Dipol Wechselwirkungen zwischen Atomen/Molekülen. Diese Wechselwirkungen sind physikalischer Natur und deutlich schwächer als chemische Wechselwirkungen.
Vakuum	Es wird von Vakuum gesprochen, wenn der Druck in einem Behälter $< 300 \text{ mbar}$ ( $= 30\,000 \text{ Pa}$ ) ist. Es wird zwischen Grob-, Fein-, Hoch- und Ultrahochvakuum unterschieden.
Vakuumpumpe	Je nach Einsatzbereich werden unterschiedliche Pumpentechniken verwendet. <u>Drehschieberpumpe</u> : ölgedichtete Vakuumpumpe einsetzbar bis $10^{-3} \text{ mbar}$ ( $= 10^{-1} \text{ Pa}$ ); Saugleistungen max. etwa $80 \text{ m}^3/\text{h}$ . <u>Rootspumpe</u> : wird zusammen mit einer Vorpumpe (z.B. Drehschieberpumpe) zur Erhöhung der Saugleistung kombiniert. Diese Pumpen können nicht gegen Atmosphärendruck pumpen.

Turbomolekularpumpe: Pumpen mit hoher Saugleistung und einem Endvakuum bis  $10^{-7}$  mbar (=  $10^{-5}$  Pa). Können nur ab einem Vakuum von  $10^{-2}$  mbar (= 1 Pa) angewendet werden.

trockenlaufende Vakuumpumpen: In diesen Pumpen wird kein Öl als Dichtmedium verwendet. Der Spalt zwischen Stator und Rotor ist so gering, dass er dichtend wirkt. Prinzip bedingt liegt das Endvakuum bei  $10^{-2}$  mbar (1 Pa). Die trockenlaufenden Vakuumpumpen arbeiten nach dem Schrauben- oder Rootsprinzip.

Pumpen für das Ultrahochvakuum: Diese Pumpen kommen ab einem Vakuum von  $10^{-7}$  mbar (=  $10^{-5}$  Pa) zum Einsatz. Bei diesen Vacua werden Gasmoleküle an (gekühlten) hochreinen Oberflächen absorbiert. Damit können Vacua bis  $10^{-13}$  mbar ( $10^{-11}$  Pa) erreicht werden.

viskose Strömung	(auch Kontinuumsströmung): Das Medium (Gas) wird als Kontinuum angenommen und die Strömung wird durch die makroskopischen Daten Druck, Temperatur und Dichte beschrieben. $\lambda$ ist wesentlich kleiner als die Gefäßdimension. Eine viskose Strömung liegt bis zum Grobvakuumbereich vor ( $p > 10^2$ Pa).
VOC-Richtlinie	<u>V</u> olatile <u>O</u> rganic <u>C</u> ompounds: Richtlinie zur Verwendung flüchtiger, organischer Verbindungen, wie z.B. Lösungsmittel (BGBI. I).
W	Watt; Maß für Leistung; $1 [W] = 1 [J/s] = 1 [kg \cdot m^2/s^3] = 1 [V \cdot A]$
XPS	<u>X</u> -ray <u>p</u> hotoelectron <u>s</u> pectroscopy (in der deutschen Literatur wird häufig die Abkürzung ESCA ( <u>E</u> lektronenspektroskopie zur <u>c</u> hemischen <u>A</u> nalyse) verwendet. Mit Röntgenstrahlung werden sog. innere Elektronen in Verbindungen der Oberfläche eines Festkörpers auf ein höheres Energieniveau angeregt. Die Lichtemission, die bei der Rückkehr der Elektronen in den Grundzustand ausgesandt wird, ist nicht nur charakteristisch für das chemische Element sondern auch für dessen Bindungszustand. Wasserstoff und Helium können mit dieser Methode nicht nachgewiesen werden.
Young'sche Gleichung	$\cos \Theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}}$ (s. Seite 29)

## 6. Literaturverzeichnis

1. Franz, Gerhard. *Oberflächentechnologie mit Niederdruckplasmen*. München: Springer Verlag, 1994.
2. DIN 28400 Teil 1. *Vakuumtechnik; Benennungen und Definitionen; Allgemeine Benennungen*. Berlin: Beuth Verlag, 1990 - 05.
3. Jörg Eisenlohr, J. Feßmann. *Industrieanzeiger*. 1995, 31/32.
4. Fraunhofer Institut IGB. *Abschlußbericht*. Oktober 1994.
5. J. Fessmann, H. Grünwald. *Surface Coatings Technology*. 1993, 59.
6. Fischer, Simone M., plasma technology. One-way-ticket für anspruchsvolle Bauteile. *mo Special Reinigen*. 2014, 6.
7. Gerhard Blasek, Günter Bräuer. *Vakuum - Plasma - Technologien*. Bad Salgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2010. Bd. 1.
8. Fischer, Simone M., plasma technology. Sauber, rein, hochrein. *mo Special Oberflächenreinigung*. 2013, 10.
9. Fischer, Simone M., plasma technology. Silikonfreiheit von Oberflächen. *Plasma + Oberfläche*. 2010, 2.
10. Fischer, Simone M., plasma technology. Nicht nur sauber, sondern rein. *mo Special Reinigen*. 2012, 10.
11. Fischer, Simone M., plasma technology. Partikelfrei Bauteile durch Vorbehandlung im Niederdruckplasma. *Oberflächen Polysurfaces*. 2013, 54-3, S. 6.
12. Messelhäuser, J. Hochreine und aktivierte Oberfläche durch Plasmareinigung. *Oberflächen Polysurfaces*. 2012, 53-3, S. 6.
13. Fischer, Simone M., plasma technology. Niederdruckplasma-Vorbehandlung vollautomatisiert. *Oberflächen Polysurfaces*. 2013, 54-6, S. 15.
14. Fischer, Simone M., plasma technology. Werkstücke im Niederdruckplasma vollautomatisiert vorbehandeln. *besserlackieren*. 2013, 4.
15. Domininghaus. *Kunststoffe*. Heidelberg: Springer Verlag, 2012. 978-3-642-16172-8.
16. Messelhäuser, J. Plasmaanwendung in der Leiterplattenfertigung. *Leiterplatten*. 2006, 4-5, S. 19.
17. A. Kruse, K. D. Vissing, A. Baalman, Bremen, und M. Hennecke, Berlin. Niederdruckplasmen - Eine Technologie und ihre Anwendungen. *Kunststoffe*. 1993, 83.
18. Fischer, Simone M., plasma technology. Gummi/Metall - Dank Niederdruckplasma ein starker Verbund. *Oberflächen Polysurfaces*. 2012, 6.
19. Fischer, Simone M., plasma technology. Nicht nur Glanz, sondern auch Schein. *Kunststoffe*. 2011, 12.
20. Fischer, Simone M. UV-Lacke energieeffizient verarbeiten. *Kunststoffe*. 2013, 1.
21. E. Baur, S. Brinkmann T. Osswald, E. Schmachtenberg (Hrsgs.). *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. München: Carl Hanser Verlag, 2007. 978-3-446-40352-9.
22. Franck, Adolf. *Kunststoffkompendium*. Würzburg: Vogel Verlag, 5. Auflage, 2000, 3-8023-1855-2.