

## Verbindungen verbessern – Die vielfältigen Anwendungen von Atmosphärendruckplasma

Von Adhäsionsbrüchen bei Klebeverbindungen über das Versagen von Dichtraupen bis hin zu abplatzendem Lack - die Qualität von Bauteilen und Systemen hängt entscheidend von der Qualität der Verbindungen der Einzelkomponenten ab. Oftmals treffen die Bindungspartner in unterschiedlichen Aggregatzuständen aufeinander, wobei häufig ein flüssiger Bindungspartner und eine Festkörperoberfläche beteiligt sind. Schon beim ersten Zusammentreffen kann am Benetzungsverhalten der Flüssigkeit abgeschätzt werden, ob „die Chemie stimmt“. Bilden sich anstatt eines geschlossenen Films viele einzelne Tröpfchen, kann davon ausgegangen werden, dass beispielsweise eine Klebeverbindung nicht flächig und dadurch wenig effektiv sein wird. Dies ist ein Effekt, der häufig bei Kunststoffoberflächen zu beobachten ist. Durch die Behandlung solcher Flächen mit Atmosphärendruckplasma können diese chemisch derart modifiziert werden, dass die flüssigen Bindungspartner diese besser benetzen (Bild 1). Zusätzlich sorgt diese unsichtbare Veränderung der Oberfläche für eine optimierte Verbindung nach dem Aushärten der Flüssigkeit, sei es beim Kleben, Lackieren, Bedrucken oder Vergießen.

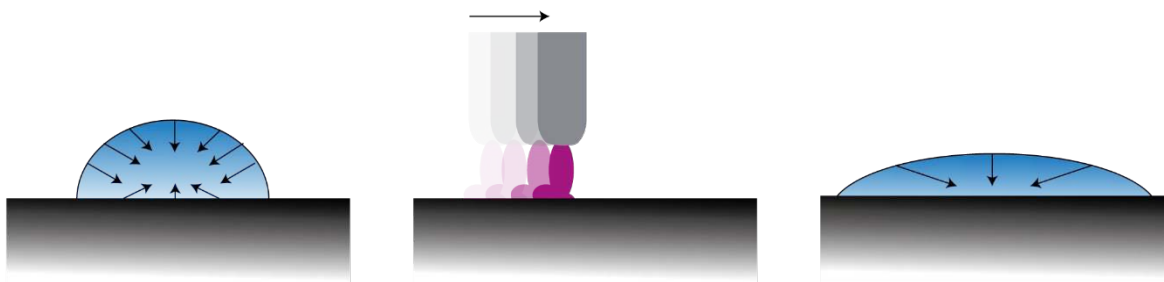


Bild 1. Im Ausgangszustand (links) lassen sich Kunststoffoberflächen typischerweise schlecht benetzen, was durch die runde Form abgelegter Flüssigkeitstropfen deutlich wird. Durch das Überstreichen dieser Oberflächen mit einer Plasmaflamme (mitte) kann diese in ihrer Molekülstruktur so verändert werden, dass sich aufgebraachte Tropfen nun aufspreiten (rechts) und es zu einem deutlich verbesserten Benetzungsverhalten kommt. Dieses ist eine entscheidende Voraussetzung für eine gute Adhäsion bei Prozessen wie Kleben, Beschichten, Lackieren und Drucken.

Grund für die Haftverbesserung ist das sogenannte Aktivieren, die Interaktion zwischen der Festkörperoberfläche und den hochreaktiven chemischen Spezies des Plasmas. Dieses wird dadurch erzeugt, dass einem Gas, z.B. der Umgebungsluft, Energie zugeführt wird bis sich die Elektronen von den Atomrümpfen der Gasmoleküle lösen und sich kurzlebige Ionen und Radikale bilden. Diese reagieren nun untereinander aber auch mit den Molekülen, die die Oberfläche eines Kunststoffkörpers bilden. Beispielsweise durch die Erzeugung polarer Molekülendgruppen kann die Oberfläche nun wesentlich besser benetzt werden.

Die Überführung eines Gases in den Plasmazustand kann unter Atmosphärendruck mithilfe elektrischer Energie erfolgen. So wird etwa in einem Jetplasma zwischen zwei Elektroden ein Lichtbogen gezündet und durch die Strömung des jeweiligen Plasmagases stabilisiert. Bei dieser sogenannten PAA© (Pulsed Atmospheric Arc) Technologie wird mit Gasflüssen von etwa 50 nlm gearbeitet, wobei die typischen Prozessgase Druckluft und Stickstoff aber auch Formiergas (95 % Stickstoff und 5 % Wasserstoff) sind. Systeme basierend auf dieser Technologie liegen im

Leistungsbereich von rund 1 kW und erzeugen in der Plasmaflame einen Temperaturbereich von einigen 100°C bis einigen 1000°C. Durch die Anpassung der Prozessparameter, vornehmlich Geschwindigkeit und Wahl der Plasmadüse und deren Abstand vom Substrat, kann der Energieeintrag optimal auf den jeweiligen Prozess angepasst werden. So wird etwa beim Aktivieren von Kunststoffen die Erhöhung der Oberflächentemperatur vermieden, um ein Anschmelzen zu verhindern, das zu einer schlechteren Aktivierungsleistung führen kann. Beim Feinreinigen von temperaturunempfindlichen Materialien wie Metall oder Glas kann eine gesteigerte Temperatur hingegen die Reinigungswirkung des Plasmas zusätzlich erheblich verbessern. Bei leitfähigen und geerdeten Substraten kann der Lichtbogen direkt auf die Oberfläche übertragen werden (Bild 2), was auch das Aufbrechen dickerer Schichten (im  $\mu\text{m}$ -Bereich) und eine sehr effektive Entfernung von Kontaminationen ermöglicht. Bei der Plasmareinigung ist die Wahl des Prozessgases entscheidend. Im Normalfall werden durch Druckluftplasma organische Verunreinigungen, wie beispielsweise Öl- oder Schmierstoffrückstände, oxidiert und in die Gasphase überführt. Aber auch oxidische Kontaminationen können mit demselben System durch die Zuführung eines wasserstoffhaltigen Gases effektiv entfernt werden, da bereits der geringe Wasserstoffanteil im Formiergasplasma die Oxide reduzieren und somit entfernen kann.

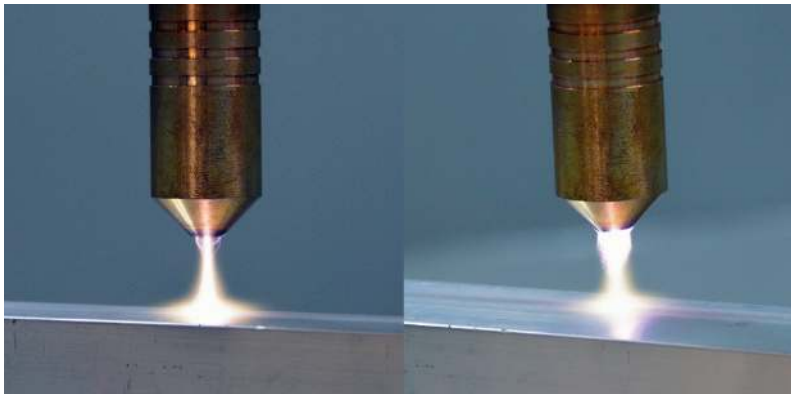


Bild 2. Zwei Betriebsmodi der PAA© (Pulsed Atmospheric Arc) Technologie im Jetplasma plasmabrush PB3. Links wird der Lichtbogen direkt auf ein geerdetes Aluminiumsubstrat übertragen für maximal effiziente Reinigung. Rechts ist der typische Modus einer diffusen Plasmaflamme zu sehen. Hier rotiert der Lichtbogen auf der Düse und das vorbeigeleitete Prozessgas bildet das sogenannte Sekundärplasma, welches zur Aktivierung von Kunststoffen und zur Feinstreinigung von Metall, Glas, Keramik, etc. eingesetzt wird.

Das Jetplasma eignet sich demnach besonders für automatisierte Prozesse, bei denen eine Vorbehandlung von Funktions- und Verbindungsflächen mit nasschemischen Primern oder Reinigern umständlich und unökonomisch wäre. Es ermöglicht jedoch nicht nur reproduzierbare Prozessqualität, sondern ist auch selbst auf eine gewisse Prozesskontrolle der Automatisierung und feste Parametersätze angewiesen. Eine weitaus flexiblere Anwendung von Atmosphärendruckplasma wird durch die sogenannte PDD© (Piezoelectric Direct Discharge) Technologie ermöglicht. Hier wird das Plasma durch eine piezoelektrische Entladung einfach an der Umgebungsluft gezündet. Bei einer Leistung von rund 15 W kommt es bei derartigen Systemen zu keiner nennenswerten Wärmeentwicklung aber zu einer höchsteffizienten Plasmaerzeugung. Zusammen mit der kompakten Bauart des plasmagenerierenden Piezotransformators ermöglicht dies den Einsatz dieser neuartigen Plasmatechnologie in ergonomischen Handgeräten ohne externe Gaszufuhr. Mittels verschiedener wechselbarer Aufsätze können auch leitfähige Substrate oder schwer zugängliche Nuten und Löcher behandelt oder auch andere Plasmagase eingespeist werden (Bild 3). Zudem ist durch die geringe Wärmeeinwirkung die handgeführte Aktivierung von

temperaturempfindlichen Materialien möglich, die beim Jetplasma nur durch genaue Parametereinstellung und Automatisierung realisierbar ist. Auch chemisch unterscheidet sich das Piezoplasma vom Lichtbogenplasma. Bei Ersterem entstehen bei niedrigen Temperaturen hochreaktive Sauerstoffverbindungen, die in der Lage sind, das Wachstum von Mikroorganismen zu hemmen. So können beispielsweise in der Dentalmedizin Implantate nicht nur optimal für das Verkleben oder den Kontakt mit umgebendem Gewebe vorbereitet werden, indem die Benetzbarkeit durch das Plasma verbessert wird, sondern gleichzeitig auch oberflächliche biologische Verunreinigungen reduziert werden.

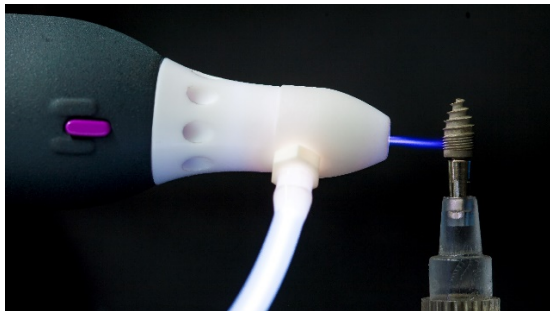


Bild 3. Behandlung eines dentalen Implantats mit kaltem Plasma aus dem piezobrush PZ2. Bei dieser Anwendung kommt die sogenannte Multigasdüse zum Einsatz, mit der bei Bedarf Stickstoff, Druckluft oder Edeltgase in die Plasmaentladung eingespeist werden können.

Atmosphärendruckplasma findet in den unterschiedlichsten Branchen und Arbeitsbereichen Anwendung. Neben der Verbesserung von Oberflächeneigenschaften und Sauberkeit an Implantaten (Bild 3) wird in der Medizintechnik beispielsweise kaum benetzbares FEP (Fluorethylen-Propylen) durch Atmosphärendruckplasma optimal für das Verkleben vorbereitet. Fügen und Verkleben ist auch für die moderne Automobilindustrie ein essentieller Bestandteil und wird automatisiert in Fertigungslinien durchgeführt. Hier ist Atmosphärendruckplasma bereits seit vielen Jahren im Einsatz, um die Adhäsion auf den Standardmaterialien wie ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) und Polyolefinen (Polyethylen, Polypropylen, etc.) aber auch auf CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff) zu verbessern. Ein relativ neuer Anwendungsbereich sowohl für die Automobil- als auch die Plasmaindustrie ist die additive Fertigung. Hier kann Plasma durch Haftverbesserung zwischen den einzelnen Schichten im 3D-Druck helfen, Anisotropie im Bauteil zu reduzieren oder auch Verbindungsflächen beispielsweise von Polyamid-Bauteilen für die Weiterverarbeitung zu optimieren. Weitere interessante Einsatzbereiche für Plasma finden sich in der Halbleiterindustrie in der Sauberkeit unabdingbar ist, zum Beispiel bei Prozessen auf Siliziumwafern, und ebenfalls in der Elektrobranche, in der durch Plasma Gehäuse und Bauteile besser verklebt, Lötstopplacke entfernt und Vergussprozesse optimiert werden. Aber auch auf anorganischen Materialien kann Atmosphärendruckplasma gewinnbringend eingesetzt werden. So werden etwa beim Walzplattieren von Metallen Oxide und Schmierfilme durch Plasma effektiv gereinigt oder in der Optik Verunreinigungen von Linsen und anderen Gläsern entfernt. Im Bereich der Mikrofluidik kann durch eine Plasmabehandlung eine deutliche Haftverbesserung zwischen PDMS und Glas erzielt werden (Bild 4) und auch in der Biomedizin werden Substrate zur besseren Benetzbarkeit vorbehandelt. Etabliert hat sich das Atmosphärendruckplasma auch in der Verpackungsindustrie, in der die Adhäsion bei Kompositmaterialien und zwischen verschiedenen Kunststoffen entscheidend ist, genauso wie die Haftung von Etiketten oder Aufdrucken.

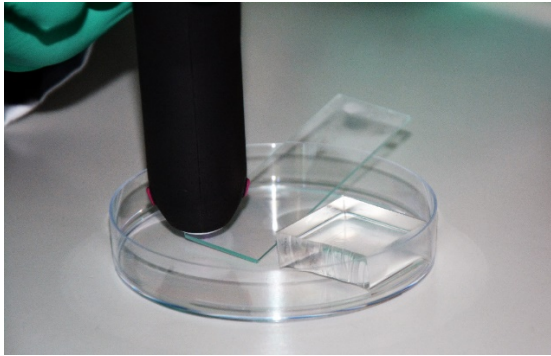


Bild 4. Laboranwendung des PDD© Plasmas mit dem piezobrush PZ2 an Umgebungsluft für die Verbesserung der Haftung zwischen PDMS und Glas.

Die Vielseitigkeit von Atmosphärendruckplasmen spiegelt sich in der Breite der Anwendungsbereiche wider und beruht auf den unterschiedlichen Effekten des Plasmas auf verschiedenen Oberflächen. Die einfache Integration in Produktionslinien sowie der flexible Einsatz von kompakten Handgeräten machen das Atmosphärendruckplasma zu einer attraktiven Alternative zu chemischen Haftvermittlern und Lösungsmitteln.