

Plasma statt Primer

Atmosphärendruckplasma: Der effiziente Problemlöser für alle Oberflächen

BRANCHENÜBERGREIFEND – Der Erfolg von Kleb- und Dichtungsprozessen hängt maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit des Substrats ab. Für haftungsstarke und mediendichte Verbindungen ist eine entsprechende Vorbehandlung meist unerlässlich. Die atmosphärische Plasmatechnologie kommt nahezu ohne Chemie aus, reduziert Aufwand, Taktzeiten sowie Kosten und ermöglicht langzeitbeständige Klebeverbindungen.

„Gott schuf das Volumen, der Teufel die Oberfläche“, so lautet ein Zitat des österreichischen Physikers und Nobelpreisträgers Wolfgang Pauli. Zur Beherrschung der Oberflächeneigenschaften muss trotzdem niemand einen faustischen Pakt eingehen. Vielmehr ist es der Blick gen Himmel, der Aufschluss gibt. Denn dort findet sich in Form von Polarlichtern, Gewitterblitzen, Sternen und Galaxien einer der effizientesten Oberflächen-Problemlöser: Plasma. Aufgrund seines hoch angeregten Zustandes eignet es sich zur Modifizierung unterschiedlichster Oberflächen – von Kunststoff über Metall sowie Glas und Edelstahl bis hin zu Keramik. Selbst temperaturempfindliche Oberflächen können zuverlässig gereinigt, aktiviert und zusätzlich beschichtet werden.

Eine Frage der Oberflächenenergie

In der Industrie geht es oft darum, unterschiedliche Werkstoffe und Komponenten dauerhaft zu verbinden und vor Umwelteinflüssen zu schützen. Dies kann durch eine Funktionalisierung der Oberfläche erreicht werden. Bei der Funktionalisierung wird die Oberfläche physikalisch und chemisch verändert, sodass die gewünschten Eigenschaften erreicht werden (Bild 1). Entscheidend sind hier einerseits die Werkstoffe und Komponenten selbst, andererseits aber auch die Materialien, aus denen Substrate sowie Kleb- und Dichtstoffe bestehen. Ob die angestrebte Haftung erzielt wird, ist dabei häufig eine Frage der Oberflächenenergie der Oberfläche. Prinzipiell sollte die Oberflächenenergie [J/m^2] bzw. die gemessene Oberflächenspannung [mN/m] des zu benetzenden Materials höher sein als die des benetzenden Mediums. Genauer betrachtet, setzt sich die Oberflächenenergie aus dispersen und polaren Anteilen zu-

Von Erhard Krampe, Leiter Akademie
Plasmateat GmbH | www.plasmateat.de

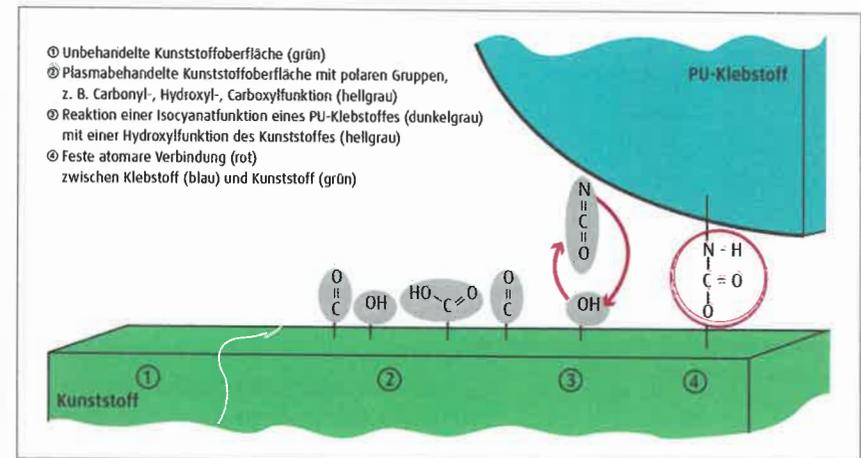


Bild 1: Zur Aktivierung einer Oberfläche kommt es durch die chemische und physikalische Wechselwirkung des Plasmas mit dem Substrat. Trifft das Plasma auf eine Kunststoffoberfläche, so werden dabei sauerstoff- und stickstoffhaltige Gruppierungen in die meist unpolare Polymermatrix eingebaut (Bild: Plasmateat)

sammen. Idealerweise befinden sich an der Phasengrenze zweier Materialien jeweils gleich geartete Anteile an dispersen und polaren Anteilen. Damit ist eine optimale Benetzung der Oberfläche gewährleistet.

Primer noch immer das Mittel der Wahl?

Während Materialien wie Metall und Glas bereits von Natur aus eine hohe Oberflächenenergie mitbringen, sind unpolare Kunststoffe aufgrund ihrer geringen Oberflächenenergie nur schwer benetzbar. Auch Recyclingprozesse können sich auf die Benetzbarkeit von Kunststoffen auswirken, denn Aufbereitungsschritte können chemische Abbauprozesse oder Verunreinigungen zur Folge haben. Infolgedessen weist der recycelte Kunststoff dann gegenüber der Rohware veränderte Materialeigenschaften auf, die zudem eine größere Schwankungsbreite haben.

Ist die Oberflächenspannung des zu benetzenden Materials nicht ausreichend hoch, werden i.d.R. Haftvermittler eingesetzt. Doch diese Praxis ist mit erheblichen Nachteilen verbunden. Primerapplikationen bedeuten immer einen zusätzlichen Arbeitsschritt zu Reinigung und Kleb- bzw. Dichtstoffauftrag. Zudem stellen lösemittelhaltige Primer eine Herausforderung an Arbeitsschutz und Lagerhaltung dar. Darüber hinaus verschärfen sich durch Neueinstufung von Rohstoffen (z.B. REACH) oft die

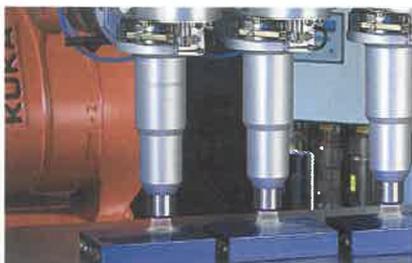


Bild 2: Die Reinigung und Aktivierung von prismatischen Zellen schafft die Voraussetzungen für eine präzise Klebeverbindung mit optimalen Haftungseigenschaften

(Bild: Plasmareat)



Bild 3: Die Reinigung mit Openair-Plasma® vor dem Abdichten des Batteriepacks gewährleistet eine deutliche Steigerung der Dichtwirkung

(Bild: Plasmareat)

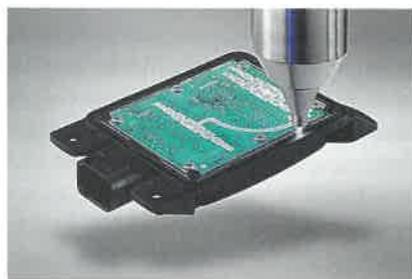


Bild 4: Die Plasmabehandlung von elektronischen Kontrolleinheiten und Sensoren garantiert langzeitstabile Klebeverbindungen sowie zuverlässigen Korrosionsschutz (Bild: Plasmareat)

Kennzeichnungsvorschriften und damit die Aufwendung für den Umgang mit den Primern. Selbst wenn die organischen Lösungsmittel durch Wasser in den Haftvermittlern ersetzt werden, ist dies keine optimale Lösung. So haben wässrige Primer aufgrund längerer Trocknungszeiten und schlechterer Benetzungseigenschaften bedeutende Nachteile im Prozess.

Atmosphärendruckplasma: Eine effiziente und umweltfreundliche Alternative

Zwar sind Primer noch immer das Mittel der Wahl zum Herstellen langzeitstabiler Verbindungen bei herausfordernden Materialkombinationen, doch aus Produktivitäts-, Kosten- und Umweltgründen verzichten Unternehmen zunehmend auf die konventionellen Haftvermittler. Eine effiziente, prozesssichere und kostengünstige Alternative ist die Behandlung mit Atmosphärendruckplasma (AD-Plasma). Die Vorbehandlung mit Openair-Plasma® bewirkt eine Steigerung der Adhäsionsfähigkeit und Benetzbarkeit von Oberflächen und ermöglicht so den Einsatz kostengünstigerer Materialalternativen sowie Materialverbunde bei gleichbleibender Qualität der Endprodukte – ein Wettbewerbsvorteil.

Der Plasmaprozess ist trocken, berührungslos, ortsselektiv und sehr schnell. In nur einem Arbeitsschritt wird die Oberfläche mikrofein gereinigt und gleichzeitig auf Molekularebene aktiviert (Bild 2).

Die Technik ist uneingeschränkt robotertauglich und inlinefähig. Die Produktionsgeschwindigkeit wird oft um ein Vielfaches erhöht, der Einsatz von Manpower wird reduziert und die Fehlerrate sinkt. Das wirkt sich positiv auf die Kosten aus. Ob strukturelle Klebeverbindungen im Automobil (Bild 3), Abdichtungen in der Elektronik (Bild 4) oder eine schnelle, blasenfreie Nassetikettierung mit hoher Anfangsfestigkeit – dank Openair-Plasma® und moderner lösungsmittelfreier Klebstoffe sind Fertigungsprozesse komplett ohne chemische Abfallstoffe möglich. Bedruckung und Lackierung verhalten sich analog. Die durch Openair-Plasma® erzeugte hohe Oberflächenenergie dient einem gleichmäßigen Lackverlauf und einer optimalen Haftung.

Materialeigenschaften gezielt modifizieren

Bei höheren oder spezifischeren Anforderungen werden die Oberflächen der Werkstoffe im PlasmaPlus®-Verfahren beschichtet. Diese Nanobeschichtungen umfassen u.a. Korrosionsbarrieren und können giftige Cr^{VI}-Primersowie Klebe- und Dichtungsschichten, die die direkte Haftung von ungleichen Materialien ohne Primer und Klebstoffe fördern, ersetzen. Dabei wird ein Beschichtungsstoff, auch Präkusor genannt, direkt in die Openair-Plasma®-Düse eingebracht. Das PlasmaPlus®-Verfahren ermöglicht Inlineprozesse in einer Geschwindigkeit wie sie mit herkömmlichen Haftvermittler-Prozessen nicht erreichbar wären, erst recht nicht mit einem so geringen Chemikalieneinsatz. Zwei Vorteile sind dabei entscheidend: Der Verbrauch beschränkt sich i.d.R. auf wenige Gramm pro Stunde und pro Plasmadüse. Zum anderen können weitere Bearbeitungsschritte wie Lackieren, Verklebung, Spritzgießen usw. direkt im Anschluss an die Plasmabehandlung erfolgen. Wartezeiten für ein Ablüften oder Trocknen des Haftvermittlers entfallen.

Jede Oberfläche ist eine Plasmaoberfläche

Egal auf welcher stofflichen Basis die Substrate beruhen: Für eine Haftvermittlung zu Kleb- und Dichtstoffen mittels Plasma wird immer nur die Grenzfläche vom Substrat modifiziert. Dies kann – im Gegensatz zu Primern – punktgenau und in der Intensität gezielt gesteuert werden. So lassen sich auf einer Anlage allein durch die Auswahl der Parameter die unterschiedlichsten Werkstoffe vorbehandeln: von Metallen, für die hohe Plasmaintensitäten mit hohen Energien genutzt werden können, bis hin zu temperaturempfindlichen Kunststoffen, die weniger Energie erfordern. Darüber hinaus sind im PlasmaPlus®-Verfahren gezielt geeignete chemische Haftvermittler für die jeweiligen Substrate wählbar. Für alle Plasmabehandlungen gilt: Die Erfahrungen bei der Funktionalisierung von Kunststoffen, Metallen oder Glas können schnell auf die verschiedensten Anwendungen übertragen und genutzt werden. Ebenso können bereits bekannte Funktionalisierungen wie Hydrophobie, Hydrophilie oder Haftvermittlung auf neue Materialien von



Bild 5: Optical Bonding: Dank der Plasmabehandlung verteilt sich der transparente Flüssigklebstoff perfekt auf der Glasoberfläche. Das garantiert eine luftblasenfreie Verklebung (Bild: Plasmatreat)

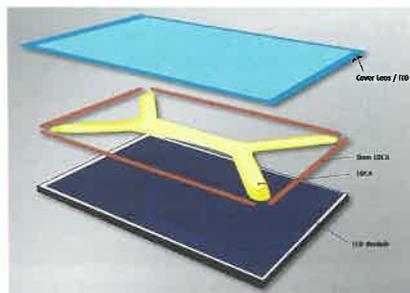


Bild 6: Beim Optical Bonding wird ein transparenter 2K-Silikon-Kleber (RTV) durch ein spezielles Dosiersystem in einem definierten Muster auf das Display aus Polymethylmethacrylat (PMMA) aufgebracht (Bild: Plasmatreat)

Plasmatechnologie nennenswerte Vorteile. Verbliebene oder im Produktionsprozess entstandene Verunreinigungen werden vollständig entfernt. Gleichzeitig findet eine Aktivierung statt, bei der freie Radikale an die Materialoberfläche gebunden werden. So wird der Bubble-Effekt (Bläschenbildung) unterbunden, denn durch die erhöhte Oberflächenspannung verteilt sich der transparente Flüssigklebstoff perfekt auf der Glasoberfläche. Eine luftblasenfreie Verklebung ist garantiert. Vor dem Hintergrund des vermehrten Einsatzes von Touch-Monitoren – von der Automobilbranche über die Bahnindustrie, Medizintechnik und Maschinenbau bis hin zu Luft- und Raumfahrt – wird der Plasmaeinsatz beim Optical Bonding künftig noch stärker zunehmen.

bestehenden Anwendungen adaptiert werden. Dies macht die Effizienz von Atmosphärendruckplasma aus. Wie groß die Bandbreite an Plasmaanwendungen und -verfahren ist, veranschaulichen die nachfolgenden Beispiele.

Elektronikfertigung: Besser kleben und dichten mit Plasma

Aufgrund des wachsenden Segments E-Mobilität und der damit einhergehenden Integration von Touch-Displays, Sicherheits- und Sensoriksystemen sowie Kameras nehmen Kleb- und Dichtungsapplikationen in der Elektronikindustrie deutlich zu. Damit die sensible Hightech-Elektronik zuverlässig funktioniert, muss sie vor schädlichen Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit geschützt werden. Umwelt- und EMV-Dichtungen sind hier das Mittel der Wahl. Für eine stabile Verbindung zwischen dem Metall- oder Kunststoffgehäuse sowie der Dichtung sorgt die Behandlung mit Openair-Plasma®.

Auch beim reinen Verkleben von Displays und HMIs (Human-Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle) mittels Optical Bonding (Bild 5, 6) bietet die

Ein weiteres, wichtiges Anwendungsfeld in der Elektronikfertigung ist das Conformal Coating, die flächendeckende Abdichtung einzelner Bauteile oder auch kompletter Baugruppen. Allerdings ist der Prozess nicht ganz unproblematisch, da er viele Variablen aufweist, die sich negativ auf die Endqualität des Coatings auswirken können. Dazu zählen Blasenbildung, Entstehung von Orangenhaut, ungleichmäßige Beschichtungen und Delamination. Die Vorbehandlung mit Plasma sorgt für feinstgereinigte, hochaktive Oberflächen und ermöglicht so eine stabile Verbindung zwischen Oberfläche und Coating-Material.



Bild 7: Durchgängiges kohäsives Versagen vermeiden: Durch den Einsatz des InMould-Plasma®-Verfahrens wird eine extrem haftungsstarke Verbindung zwischen verschiedenen polymeren Materialien hergestellt (Bild: Plasmatreat)

 Weitere Infos zu InMould-Plasma®

InMould-Plasma®: Die Lösung für Hart-Weich-Verbunde im 2K-Spritzguss

Um die steigenden Funktionalitätsanforderungen der Industrie zu erfüllen, werden technische Kunststoffbauteile oft aus mehreren Werkstoffen gefertigt. Insbesondere Hart-Weich-Verbunde sind gefragt, z.B. bei Griffschalen von Werkzeugen oder Abdeckungen im Pkw-Innenraum. Werden die Kunststoffkombinationen im Mehrkomponentenspritzguss hergestellt, ist eine thermische Kompatibilität der verarbeiteten Werkstoffe Voraussetzung für eine haftfeste Verbindung. Dies schränkt die Auswahl an Materialien ein. Kompromisse hinsichtlich des Eigenschaftsprofils der Weichkomponente sind die Folge.

Durch die in der Kunststoffverarbeitung längst etablierte Oberflächenaktivierung mit Atmosphärendruckplasma konnte das Werkstoffspektrum bereits erweitert werden, sodass auch bislang inkompatible Materialien langzeitstabil aneinanderhaften. Das neue InMould-Plasma®-Verfahren (Bild 7) geht noch einen Schritt weiter, denn es integriert die Plasmabehandlung direkt in das Spritzgusswerkzeug. Aufwändige und fehleranfällige Assembling- und Logistikprozesse entfallen. Wie das Verfahren in der Praxis funktioniert, lässt sich beispielhaft anhand der Fertigung eines Deckels (PP) mit Dichtfunktion (TPU) in einem 3-Stationen-Drehtellerwerkzeug zeigen. In der ersten Station wird der thermoplastische Deckel gespritzt, der nach der Öffnung des Werkzeugs auf dem Drehteller verbleibt und in die zweite Station schwenkt. Dort ist eine Plasmadüse angedockt. Beim Schließen des Werkzeugs drückt die düsenseitige

Thermoplast	Elastomer	Veränderung der Haftfestigkeit
PP	TPU	Adhäsion erst durch InMould-Plasma® > 5-fache Schälfestigkeit
PP40talc	TPU	Adhäsion erst durch InMould-Plasma® – Kohäsionsbruch
PBT	TPU	bessere Adhäsion > 3-fache Schälfestigkeit
PBT/ASA	TPU	bessere Adhäsion > 5-fache Schälfestigkeit
POM	TPU / TPE-S	bessere Adhäsion
PBT	TPE-S	bessere Adhäsion > 3-fache Schälfestigkeit
PC	TPE-S	bessere Adhäsion > 3-fache Schälfestigkeit

Thermoplaste: Polypropylen (PP), Polybutylenterephthalat (PBT), Acrylnitril/Styrol/Acrylester (ASA), Polyoxymethylen (POM), Polycarbonat (PC), Thermoplastisches Polyurethan (TPU), Styrol-Blockcopolymer (TPE-S)

Bild 8: Übersicht der Materialkombinationen mit InMould-Plasma® (Bild: Plasmareat)

Kavität auf den Deckel und dichtet einen Kanal oberhalb der Fläche ab, auf der später die Weichkomponente aufgespritzt wird. Die Plasmadüse wird gezündet, das Plasma strömt durch den Kanal und aktiviert dabei nur den relevanten Bereich des Deckels. Als Prozessgas wird Stickstoff eingesetzt, der eine sehr effektive Aktivierung der Kunststoffoberfläche sicherstellt. Der Prozess dauert nur wenige Sekunden und ist i.d.R. nicht zykluszeitbestimmend. In der dritten Station wird schlussendlich die elastomere Komponente aufgespritzt. Mit jeder Öffnung des Werkzeugs wird ein fertig hergestelltes 2K-Bauteil entformt.

Ohne die Vorbehandlung mit Plasma können PP-TPU-Verbunde keine industrie-relevante Haftfestigkeit ausbilden, die selbst nach einer Alterung der Bauteile weiter besteht. Auch andere thermoplastische Elastomere (u.a. TPE-S und TPE-V) wurden bereits haftfest mit technischen Thermoplasten wie PC, PBT und PBT/ASA verbunden (**Bild 8**). Neben neuen Materialkombinationen profitiert die kunststoffverarbeitende Industrie von den verkürzten Produktionszeiten, den reduzierten Herstellungskosten sowie der vollständigen Prozesskontrolle der InMould-Plasma®-Technologie.

Haftungsstarke mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

Elektrische Steckverbinder müssen absolut zuverlässig funktionieren, denn Ausfälle können schwerwiegende Folgen haben. So musste ein Autobauer über 8.000 SUV zurückrufen, weil ein defekter Kabelbaum-Steckverbinder einen übermäßigen elektrischen Widerstand erzeugte. Andere Steckverbinder ausfälle haben zu größeren Stromausfällen und Flugzeugabstürzen geführt. Auch das letzte Mir-Raumstationsmodul wäre beinahe an einem fehlerhaften Steckverbinder gescheitert. Die häu-

figsten Gründe für technische Defekte sind mechanisches Versagen und die Korrosion der Metallkontakte. Insbesondere die Metall-Kunststoff-Schnittstelle zwischen den Metallkontaktstiften und dem spritzgegossenen Gehäuse ist anfällig für das Eindringen von Feuchtigkeit.

Mit Plasma-SealTight® wurde ein Plasma-Versiegelungsverfahren entwickelt, das haftungsstarke und mediendichte Kunststoff-Metall-Verbunde im Spritzgussprozess ermöglicht und so dazu beiträgt, Ausfälle elektrischer Steckverbinder zu verhindern (**Bild 9**). Nach der Reinigung und Aktivierung der Metallkontakte wird mit der Plasma-Plus®-Technologie eine Nanobeschichtung als Haftvermittler aufgetragen (**Bild 10**). Diese Plasma-SealTight®-Schicht sorgt für die Anhaftung des Polymers und unterbindet eine Korrosion der Kontakte durch Unterwanderung von Feuchtigkeit.

In einem weiteren Projekt wurde gemeinsam mit anderen Unternehmen der Prototyp eines mehrpoligen Steckers entwickelt. Das Ergebnis zeigt, wie Plasma die Qualität und Zuverlässigkeit elektrischer Steckverbinder steigert. Die Oberflächenbehandlung erzeugt eine Baugruppe mit hoher Integrität und Zuverlässigkeit gegenüber dem Eindringen von Feuchtigkeit. Sie widersteht einem Wasserdruck von bis zu 5 bar. Auch die mechanische Verbundfestigkeit zwischen Metall und Kunststoff überzeugt. Während Standardverfahren Zugscherfestigkeiten von maximal 20 MPa aufweisen, erreicht Plasma-SealTight® über 50 MPa.

Langzeitstabile Haftung in der Klebfuge

PT-Bond (**Bild 11**) ist eine PlasmaPlus®-Anwendung speziell für den Bereich Kleb- und Dichtungstechnik. Dem Plasma wird eine Organo-Siliziumverbindung als Präkursor



Bild 9: Zweireihiger Stecker: Die Kombination von Openair-Plasma®-Reinigung und Plasma-SealTight®-Beschichtung ermöglicht mediendichte Metall-Kunststoffverbindungen (Bild: Plasmareat)



Bild 10: Vor dem Abschneiden der Plasma-SealTight®-Beschichtung wird die Edelstahloberfläche gereinigt (Bild: Plasmareat)

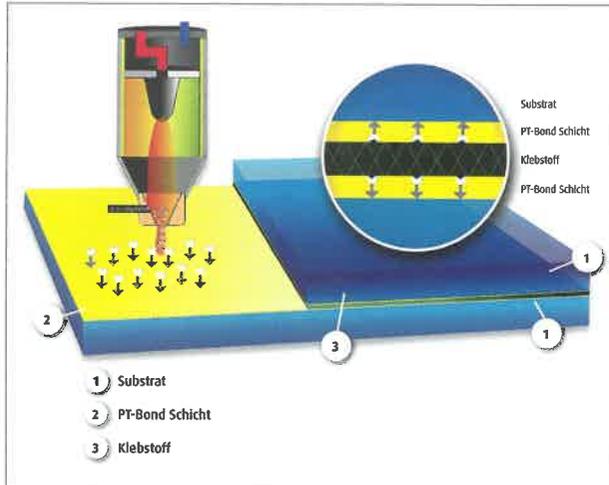


Bild 11: PT-Bond-Beschichtungen sorgen für langzeitstabile Haftung in der Klebefuge
(Bild: Plasmatreat)

beigemischt, wobei die chemische Zusammensetzung je nach Material und Anwendung variiert. PT-Bond-Beschichtungen erhöhen die Bindungskräfte und verbessern die Dichteitseigenschaften auch bei hybriden Materialkombinationen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten signifikant (**Bild 12**).

Für die Türbaugruppe eines namhaften Wäschetrocknerherstellers bestand die Herausforderung darin, eine Werkstoffkombination aus Glas und dem Kunststoff PP miteinander zu verbinden. Verwendet wurde ein 1K-PU-Schaumdichtstoff. Die Vorteile der PT-Bond-Beschichtung (**Bild 13**) liegen in der verbesserten Langzeitstabilität der realisierten Oberflächenfunktionalisierung sowie der Schaffung einer gezielten Funktionalität für kovalente Bindungen. Bei der Haftung des Klebstoffs ohne kovalente Bindungen kommt es unter Feuchte/Wärmebelastung rasch zu einer Auflösung der angreifbaren Dipol-Dipol-Wechselwirkungen zwischen den Wasserstoffmolekülen des Substrates und den Urethan-/Ureasegmenten des Klebstoffes. Insbesondere bei einem Trockner, dessen Bauteile über viele Jahre hohen Temperaturen und Feuchtigkeit ausgesetzt sind, wäre dies fatal. Die Plasmabehandlung schafft kovalente, alterungsbeständige Bindungen und ermöglicht darüber hinaus den Verzicht auf lösemittelhaltige Primer, die klassischerweise zum Einsatz kommen.

Plasma ersetzt fast alle Primer in der industriellen Fertigung

Nahezu jeder Herstellungsprozess, der eine Oberflächenvorbereitung erfordert, kann der Schwenk zur Plasma-Oberflächenbehandlung eine bessere, günstigere und sicherere Lösung finden. Die Vorteile:

- Nahezu vollständiger Verzicht auf toxische Lösungsmittel und Primer möglich

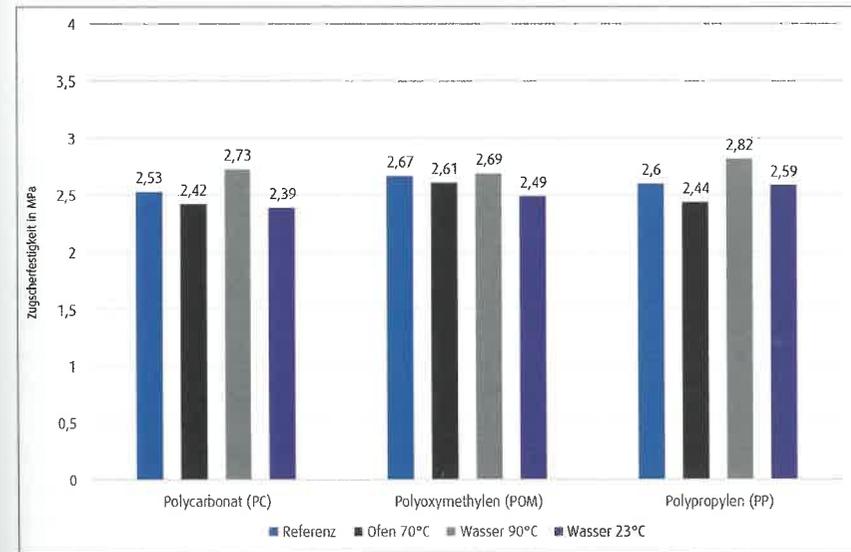


Bild 12: Durch den PT-Bond-Prekursor PTP 1300.1 können auf allen Kunststoffen auch nach Alterung die maximalen Haftkräfte des Klebstoffes erreicht werden. Das Bruchbild ist dabei immer kohäsiv (Bild: Plasmatreat)

- Oberflächenreinigung und Aufbringen funktioneller Nanobeschichtungen in einem Schritt
- Oberflächenbehandlung für langzeitstabile Klebeverbindungen und Funktionsbeschichtungen
- Nanobeschichtungen (PlasmaPlus®) zur Erzeugung spezifischer Oberflächeneigenschaften, wie z.B. hydrophob, anti-korrosiv oder adhäsionsfördernd



Bild 13: Zum Abdichten eines Kunststoffgehäuses wird eine PT-Bond-Beschichtung appliziert (Bild: Plasmatreat)

Auf die Lösungsmittel der Primer reagieren Kunststoffe oftmals mit Spannungsrissen. Auf der anderen Seite findet aber ohne Anlösen des Kunststoffs kein alterungsbeständiger Haftungsaufbau statt. Dieses Dilemma der Primer wird durch Plasma gelöst, da hier keine Lösungsmittel eingesetzt werden. Vor allem sehr unpolare Kunststoffe wie PP, EPDM oder solche, die sich nur sehr schwer anlösen lassen, profitieren von einer Plasmabehandlung. Das gilt besonders für Kunststoffe, deren Oberflächen sich durch radikalische Pfropfung modifizieren lassen. Die Präzisionsprozesse und die Zertifizierung nach ISO 9001:2015 gewährleisten eine hohe Qualität und zuverlässige Reproduzierbarkeit.