

Titel



© Michael Cohn / stock.adobe.com

Wenn Kleben schneller wird als Schweißen

Moderne Fertigungslinien verlangen Fügeverfahren, die kurze Taktzeiten bei der Herstellung und hohe Dauerfestigkeiten von Bauteilen unter einen Hut bringen. Schnell härtende Polyurea-Klebstoffe lösen das Taktzeitproblem, stellen jedoch hohe Anforderungen an die Anbindung zum Substrat. Für die industrielle Umsetzung ist deshalb eine definierte, reproduzierbare Haftvermittlung unerlässlich. Die atmosphärische Plasmapolymersation bietet hierfür einen trockenen, in situ einsetzbaren Weg, mit dem sich aminfunktionalisierte Zwischenschichten direkt auf Metalloberflächen erzeugen lassen.

Heiko Jung, Thomas D. Michl, Marcel Fischer, Bruno Traber, Sonja Neuhaus, Raphael Schaller

Für die Haftvermittlung auf Aluminium EN AW-6063 (Al-6063) wird 3-Aminopropyltriethoxysilan (APTES) mittels atmosphärischer Plasmapolymersation aufgetragen, das anschließend mit einem schnell härtenden Polyurea-Klebstoff verklebt wird. Das Mischen und der Klebstoffauftrag erfolgen mit auf 60 °C temperiertem Klebstoff, wodurch sich eine offene Zeit von 1,5 s ergibt. Die erzielten initialen Zugscherfestigkeiten von über 17 MPa reihen sich neben ressourcen- und logistikintensiven Vorbehandlungen wie Lackierungen oder kathodischen Tauchlackierungen ein. Das ist ein Indiz dafür, dass APTES-Plasmapolymere eine technisch belastbare, prozessintegrierbare Haftvermittlung für schnelle Aluminiumverklebungen darstellen.

Kleben mit kurzen Taktzeiten

Kleben und Schweißen konkurrieren seit Jahrzehnten um dieselben Anwendungen, wobei lange Zeit das Schweißen als die schnellere Füge-technologie galt. Kleben bietet gegenüber dem Schweißen mehrere Vorteile: Es ist toleranter gegenüber Fertigungstoleranzen und Spaltmassen, vermeidet thermische Schädigungen der Bauteiloberfläche und erlaubt es, die Eigenschaften des Gesamtsystems über die Wahl des Klebstoffs gezielt an die

Anwendung anzupassen [1]. Zudem ermöglicht Kleben die prozesssichere Herstellung hybrider Bauteile, beispielsweise Aluminium-Faserverbundkunststoff-Verbunde, die sich durch Schweißen nicht herstellen lassen und für Leichtbau und Effizienz im Fahrzeugbau von zentraler

Bedeutung sind. In hochgetakteten und hochautomatisierten Prozessen blieb die Prozessgeschwindigkeit des Klebens jedoch lange der wesentliche limitierende Faktor. Wer im Sekundentakt fügen muss, konnte sich klassische Klebstoffsysteme lange nicht leisten. Schnell härtende Poly-

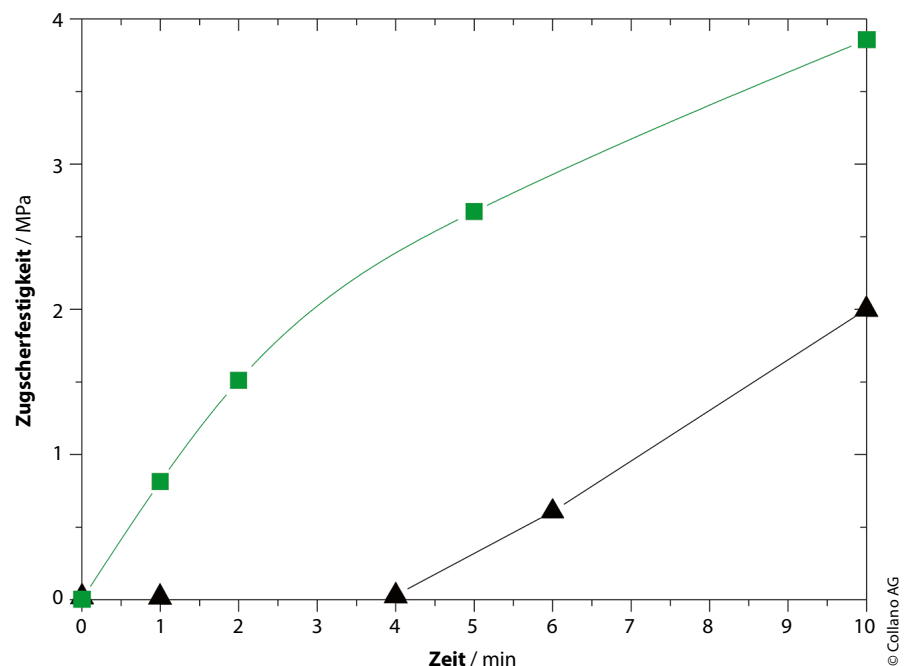
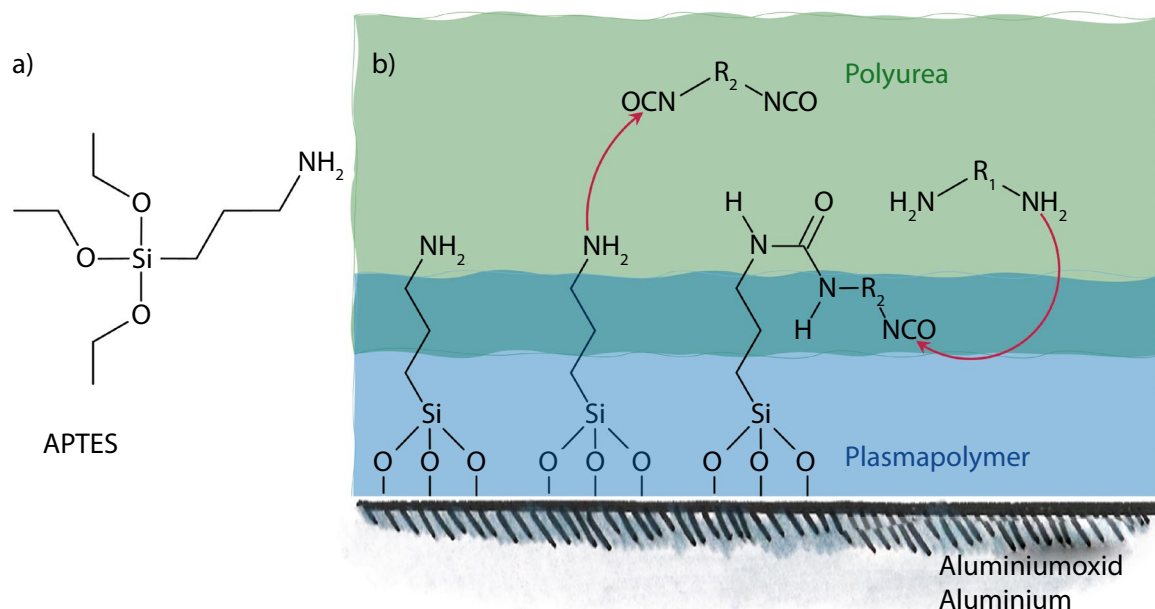


Bild 1 Zugscherfestigkeit als Funktion der Zeit für zwei Klebstoffe im Zugscherversuch: Festigkeitsaufbau des (■) Polyureas im Vergleich zu einem schnell härtenden (▲) Polyurethan.



© Collano AG

Bild 2 Schematische Darstellung von APTES: a) Molekülstruktur von APTES; b) Plasmapolymersierte APTES-Schicht auf Aluminiumoxid mit primären Amingruppen, die kovalente Bindungen zu den Polyurea-Isocyanatgruppen ausbilden und so eine chemische Brücke zwischen Aluminiumsubstrat und Polyurea-Klebstoff schaffen. Die gezeigte Anordnung ist bewusst vereinfacht, da APTES auf Aluminium und Aluminiumoxid auch andere Anlagerungsformen ausbilden kann.

urea-Klebstoffe verschieben diese Grenze. Die zugrunde liegende Polyadditionsreaktion zwischen Isocyanaten und Aminen verläuft bis zu etwa 1000-mal schneller als die entsprechende Isocyanat-Polyol-Reaktion klassischer Polyurethane [2], [3]. Diese Beschleunigung zeigt sich unmittelbar im Festigkeitsaufbau. Als Substrat dient Aluminium EN AW-6063 (Al-6063) mit kathodischer Tauchlackierung (E-Coat). Der Polyurea-Klebstoff wird bei 60 °C gemischt und mit einer Gegenstrommischanlage bei Raumtemperatur appliziert. Seine offene Zeit beträgt 1,5 s.

Bereits nach rund einer Minute erreicht der Klebstoff eine Zugscherfestigkeit von etwa 1 MPa. Bei einem schnellen Standard-Polyurethan sind hingegen erst nach vier Minuten überhaupt Festigkeiten messbar. Selbst nach zehn Minuten erreicht dieses lediglich gut die Hälfte der Festigkeit des Polyurea-Klebstoffs (Bild 1). Aus prozesstechnischer Sicht ist vor allem entscheidend, dass die Verklebung mit Polyurea bereits nach etwa einer Minute handhabungsfest ist, während konventionelle Klebstoffe wie Polyurethan oder Epoxide hierfür mehrere Minuten benötigen. Ausführliche Informationen zu Polyurea-Klebstoffen liefern die Artikel von Hug et al. in adhäsion KLEBEN+DICHTEN [4], [5]. Mit einem derart schnellen Festigkeitsaufbau werden Taktzeiten möglich, die das Kleben für hochautomatisierte Fertigungslinien grundsätzlich attraktiv machen und

in Bereiche vorstoßen lassen, die bislang typischerweise dem Schweißen vorbehalten waren. In solchen Anwendungen müssen die Substrate zunächst vorplatziert werden, um anschließend mittels Injektion oder Verguss stoffschlüssig miteinander verklebt zu werden. Doch mit der Schnelligkeit des Klebstoffs allein ist das Problem nicht gelöst. Im Gegenteil: Es verlagert sich an eine andere Stelle, nämlich an die Grenzfläche zwischen Metall beziehungsweise Metalloxid und Klebstoff.

Schnelligkeit allein genügt nicht

Für strukturelle Aluminiumverklebungen kommen heute häufig kathodische Tauchlackierungen oder industrielle Lacksysteme zum Einsatz – in der Regel Isolierlacke (sogenannte Isolacke), die auch als Haftvermittler dienen [6]. Bei beiden Prozessen handelt es sich um nasschemische Vorbehandlungen, die mit einem erheblichen Energie-, Zeit- und Materialaufwand verbunden sind und zum Teil außerhalb der Fertigung der Serienhersteller erfolgen. Dadurch entstehen zusätzliche Unbekannte und potenzielle Qualitätsrisiken. Aus Sicht der Prozessintegration stellt sich daher die Frage, ob eine trockene, prozessintegrierbare Vorbehandlung dieselbe Grenzflächenfunktion übernehmen und damit das Potenzial schnell härtender Polyurea-Verklebungen direkt auf Metall- oder Metalloxidoberflächen für die industrielle Pra-

xis erschließen kann. Die hier dargestellten Ergebnisse beruhen auf einem Innosuisse-Projekt (102.681 IP-ENG), das gemeinsam von der Fachhochschule Nordwestschweiz und Collano durchgeführt wurde. Der vorliegende Beitrag fasst ebenfalls Erkenntnisse der Arbeit von Michl et al. zusammen und ordnet diese in eine praxisorientierte Sicht der atmosphärischen Plasmapolymersation zur Erzeugung von Haftvermittlern für schnell härtende Polyurea-Klebstoffe ein [7].

Die vierte Form der Materie als Werkzeug

Atmosphärische Plasmen zählen neben festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen zum vierten Aggregatzustand der Materie. Sie bestehen aus einem reaktiven Gemisch aus Ionen, freien Elektronen, Radikalen und neutralen Spezies [8]. Dabei handelt es sich um energiereiche Materie, die als Polarlicht, Flamme oder Blitz in Erscheinung tritt und sich, kontrolliert in einer Plasmadüse erzeugt, für oberflächenchemische Anwendungen nutzen lässt. Grundsätzlich ist zwischen zwei verschiedenen Anwendungen zu unterscheiden: Plasmaaktivierung und Plasmapolymersation. Bei der Plasmaaktivierung wird die vorhandene Substratoberfläche lediglich chemisch modifiziert, ohne dass eine eigenständige Schicht entsteht. Auf Metallen wie Aluminium und Stahl, deren Oberflächen un-

ter Umgebungsbedingungen von einer dünnen Oxidschicht bedeckt sind, werden Verunreinigungen entfernt und die Oxidschichten durch den Einbau zusätzlicher polarer, überwiegend sauerstoffhaltiger Gruppen wie Hydroxyl-, Carbonyl- und Carboxylgruppen chemisch aktiviert [9].

Plasmaaktivierung und Plasmapolymerisation im Vergleich

Bei der Plasmapolymerisation wird ein Monomer oder Monomergemisch in die Plasmadüse eingebracht und auf dem Substrat zu einem dünnen, vernetzten Plasmapolymer umgesetzt. Für die vorliegende Anwendung ist APTES von zentraler Bedeutung. Seine Silanstruktur kann an oxidische Aluminiumoberflächen ankoppeln, während die terminale Aminfunktion schnell mit Isocyanaten des Polyurea-Systems reagiert. So entsteht eine nanometerdünne Zwischenschicht, die einerseits über Silan- beziehungsweise Siloxangruppen chemisch an die metallische Oberfläche gebunden ist und andererseits über Amin-Isocyanat-Reaktionen an den Klebstoff koppelt. Der Polyurea-Klebstoff kann dadurch konsequenter als lasttragendes und energieabsorbierendes Material ausgelegt werden [10], ohne zugleich alle Schwankungen der Metalloberfläche kompensieren zu müssen. In der Summe resultiert faktisch ein Drei-Komponenten-Klebstoffsystem: die Amin- und die Isocyanatkomponente als Hauptbestandteile sowie das APTES-Plasmapolymer als nanometerdünne Haftvermittlerschicht, die

kovalent an das Polyurea koppelt (*Bild 2*). Gerade dieser Unterschied zur bloßen Oberflächenaktivierung macht den Kern des Ansatzes aus. Es geht nicht darum, eine Oberfläche nur kurzzeitig benetzbarer zu machen, sondern eine funktionelle, nanoskalige Interphase mit definierter Chemie gezielt aufzubauen.

Der Belastungstest: von 2,5 auf 17 MPa

Die mechanische Leistungsfähigkeit der APTES-Plasmapolymererschicht wurde in einstufigen Zugscherversuchen nach DIN EN 1465 an Al-6063 mit einer Überlappung von $12,5 \times 25,0$ mm untersucht. Die Substrate wurden zunächst standardisiert entfettet und anschließend entweder unbehandelt belassen, lediglich mit Luftplasma gereinigt oder mit einer APTES-Plasmapolymerisationsschicht versehen, die mittels atmosphärischem Plasmadüsenverfahrens (Luft als Prozessgas) in einem Durchgang abgeschieden wurde. Als Referenz wurde Al-6063 verwendet, wie es im industriellen Einsatz typischerweise von Systemherstellern kathodisch tauchlackiert oder lackiert vorliegt und anschließend verklebt wird. Als Klebstoff wurde ein zweikomponentiger, schnellhärtender Polyurea-Klebstoff mit einer offenen Zeit von 1,5 s eingesetzt. Der Klebstoff wurde mittels einer Hochdruck-Geigenstrommischanlage in eine definierte Fugenstärke von 5 mm eingebracht. Nach 2 h Lagerung bei Raumtemperatur wurden die Proben bei 80 °C für 4 h nachgehärtet.

Diese Temperierung diente ausschließlich der beschleunigten vollständigen Aushärtung und damit der Verkürzung der Versuchszeiten; sie ist nicht als notwendiger Prozessschritt für die praktische Anwendung zu verstehen. Die Zugscherfestigkeit wurde bei Raumtemperatur mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/min ermittelt; das Bruchverhalten (adhäsiv und kohäsiv) wurde durch visuelle Inspektion der Bruchflächen unter UV-Licht beurteilt. Die Zahlen sprechen für sich. Unbehandeltes Al-6063 erreicht mit Polyurea eine Zugscherfestigkeit von lediglich etwa 2,5 MPa. Wird eine reine Plasmaaktivierung durchgeführt, steigt dieser Wert auf rund 4,5 MPa. Das Versagensbild bleibt jedoch vollständig adhäsiv, und die Verklebung löst sich sauber vom Metallsubstrat, ohne dass der Klebstoff selbst nennenswert beansprucht wird. Mit einer plasmapolymerisierten APTES-Schicht auf Al-6063 steigt die Zugscherfestigkeit auf etwa 12 MPa, und das Bruchbild verschiebt sich deutlich hin zu überwiegend kohäsivem Versagen innerhalb der Klebefuge. Unter optimierten Bedingungen lassen sich mit derselben Kombination aus APTES-Plasmapolymer und Polyurea sogar initial rund 17 MPa bei mehr als 80 % kohäsivem Bruchbild erreichen. Das ist ein Wert, der in die Größenordnung klassischer Vorbehandlungen vorstößt und dem Niveau tauchlackierter oder lackierter Aluminiumsubstrate bemerkenswert nahekommt (*Bild 3*).

Wie fein diese Chemie steuerbar ist, zeigt ein Blick auf die Prozessparameter. Die Schichtdicke des APTES-Plasmapolymers

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

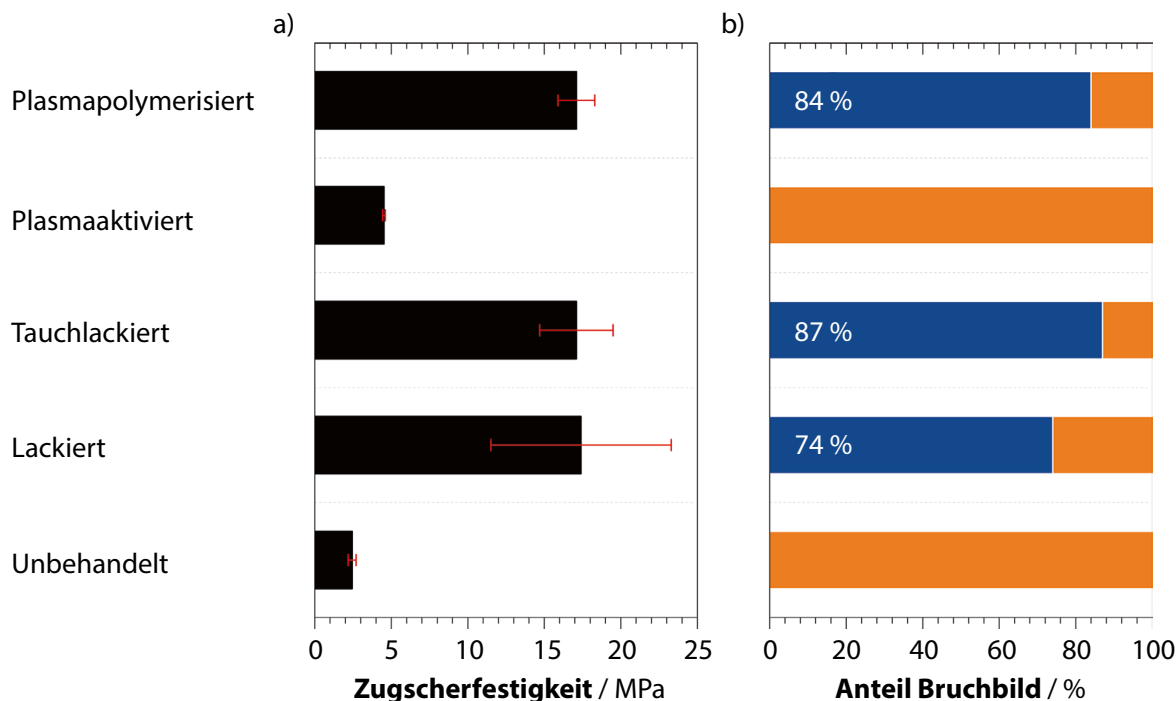


Bild 3 Zugscherfestigkeiten und Bruchbilder von Polyurea-Klebung auf Al-6063 in Abhängigkeit von der Oberflächenbehandlung: a) mittlere Zugscherfestigkeit mit Fehlerbalken für unbehandelte, lackierte, tauchlackierte, plasmaaktivierte und plasmapolymerisierte Aluminiumsubstrate; b) zugehöriger Anteil des Bruchbildes mit kohäsivem (blau) versus adhäsivem (orange) Versagensbild.

nimmt mit zunehmender Düsendgeschwindigkeit exponentiell ab, von rund 100 nm bei sehr langsamer Verfahrensgeschwindigkeit (rund 2 m/min) auf etwa 10 nm bei hohem Tempo (rund 30 m/min). Dabei bleiben nach einer Lösungsmittelwäsche durchwegs 50 bis 75 % der ursprünglich abgeschiedenen Schichtdicke erhalten. Der Rest sind lose gebundene, nicht vernetzte Oligomerfragmente, die keine mechanische Funktion übernehmen. Für die industrielle Praxis bedeutet dies, dass sich die gewünschte Zielschichtdicke sowohl über die Verfahrensgeschwindigkeit als auch über mehrere Beschichtungsdurchgänge gezielt einstellen lässt [7].

Weniger ist mehr

Ein naheliegender Entwicklungsansatz bestand darin, die APTES-basierte Plasmapolymerisationsschicht durch den Einsatz von Co-Monomeren weiter zu optimieren. APTES wurde dabei mit Hexamethylcyclotrisilazan (HMCTSZ), Octamethylcyclotetrasiloxan (OMCTS), Trimethylphenylsilan (TMPS), Trimethoxyphenylsilan (TMOPS) sowie 2-Aminoethanol (Ethanolamin, EA) kombiniert. Die Auswahl folgte einer klaren Logik. Silazan- und Siloxan-Derivate sollten den Vernetzungsgrad und die Netzwerksteifigkeit des Plasmapolymeren erhöhen,

aromatische Silane die chemische und thermische Stabilität verbessern und Ethanolamin zusätzliche aminische Funktionalität einbringen, ohne die Silan-Anbindung an das Aluminium vollständig aufzugeben. Die Ergebnisse fielen jedoch eindeutig aus – und widersprachen der Erwartung. Mischungen von APTES mit HMCTSZ, OMCTS, TMPS, TMOPS oder Ethanolamin führten durchweg zu einer Verschlechterung der Haftung gegenüber einem reinen APTES-Plasmapolymer. In allen untersuchten plasmapolymerisierten Monomerenmischungen lagen die Zugscherfestigkeiten klar unter den etwa 12 MPa, die mit dem reinen APTES-Plasmapolymer auf Al-6063 erreicht werden [7]. Der zentrale Befund lautet daher, dass das Einfache dem Komplexeren überlegen ist. Reines APTES-Plasmapolymer stellt offenbar die günstigste Balance aus zugänglichen Aminfunktionen, hinreichender Vernetzung der Schicht und ausreichender mechanischer Integrität der Interphase bereit und bildet damit eine robuste Basis für die Haftvermittlung zwischen Al-6063 und schnellen Polyurea-Klebstoffen.

Die Oberflächenchemie entscheidet

Warum ist das einfachere System dem komplexeren überlegen? Die Antwort liegt tief in der Oberflächenchemie verborgen

und wurde erst durch Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) und chemische Derivatisierungs-XPS (CD-XPS) sichtbar. Die Zusammensetzung wird im Folgenden in Atomprozent (at.%) angegeben. Das Ausmaß der Fragmentierung ist dabei dramatisch. Während das APTES-Monomer selbst zu 64,3 at.% aus Kohlenstoff und zu 7,1 at.% aus Stickstoff besteht, sinkt der Kohlenstoffanteil im fertigen Plasmapolymer je nach Prozessbedingung auf 20 bis 35 at.%, während der Sauerstoffanteil auf 46 bis 65 at.% ansteigt und nur noch 1 bis 4 at.% Stickstoff verbleiben. Das Plasma zerlegt das Molekül förmlich bis auf sein Silan-Sauerstoff-Grundgerüst und baut es unter Verlust eines Großteils der ursprünglichen Aminfunktion neu zusammen. Dennoch bleiben genügend reaktive Aminfunktionen an der Oberfläche zurück, um die Haftung zum Klebstoff zu vermitteln. Entscheidend ist dabei ein Schwellenverhalten. Sobald genügend zugängliche Amingruppen auf der Substratoberfläche vorhanden sind, steigt die Haftung nicht mehr proportional mit weiterem Funktionalisierungsgrad an. In diesem Bereich bestimmen zunehmend die Kohäsion des Plasmapolymeren und seine Verankerung an der Oxidschicht des Al-6063 die resultierende Festigkeit – nicht der Gesamtstickstoffgehalt allein, der sich als unzuverlässiger Prädiktor für die Haftung erweist.

Oberflächenvorbehandlung	vor PV 1200		nach PV 1200	
	Zugscherfestigkeit	kohäsives Bruchbild	Zugscherfestigkeit	kohäsives Bruchbild
	MPa	%	MPa	%
Plasmapolymerisiert	17,1 +/- 1,2	84	12,5 +/- 2,5	5
Tauchlackiert	17,1 +/- 2,4	87	16,3 +/- 2,5	95
Lackiert	17,4 +/- 5,9	74	17,0 +/- 1,0	99

Tabelle 1 Zugscherfestigkeit und Bruchbild vor und nach dem Klimawechseltest PV 1200.

© Collano AG

Mehrere Detailergebnisse fügen sich in dieses Bild. Der Wechsel des Prozessgases von Luft auf Stickstoff erhöht die funktionelle Stickstoffausbeute zwar teilweise, verbessert die Zugscherfestigkeit jedoch nicht signifikant. Eine veränderte Düsengeometrie führt trotz günstigerer chemischer Signaturen ebenfalls nicht zu höherer Haftung. Plasmapolymerisiertes 3-Aminopropyl-diethoxymethylsilan (APDEMS) wurde gewählt, um den Einfluss einer leicht veränderten Kopfgruppe systematisch zu untersuchen. Dabei ersetzt ein Methylrest eine Ethoxygruppe. Untersucht wurden die Auswirkungen auf die Fragmentierung, die Netzwerkbildung und die Stabilität der aminhaltigen Funktionen. Trotz geringerer Oxidation bleibt APDEMS mechanisch hinter dem einfacheren APTES-Plasmapolymer zurück. Die übergeordnete Erkenntnis lautet daher: Nicht die maximale Funktionalitätsdichte ist ausschlaggebend, sondern das feine Zusammenspiel aus chemischer Zusammensetzung, Vernetzungsgrad und Grenzflächenmechanik.

Wenn Feuchtigkeit an die Grenze geht

Eine hohe Anfangsfestigkeit ist die eine Seite der Medaille, Dauerhaftigkeit unter realen Klimabedingungen die andere. Um Letztere abzubilden, wurde das Langzeitverhalten in einem Klimawechseltest nach VW PV 1200 untersucht: Die Proben durchliefen mehrere Klimazyklen (je 12 h) mit Aufheizen auf +80 °C bei 80 % relativer Luftfeuchte, anschließender Abkühlung auf -40 °C (Luftfeuchte unregelt) und Rückkehr auf Raumklima. Atmosphärische Plasmapolymerisation mit APTES bringt die Ausgangsfestigkeit von Polyurea-Verklebungen auf das Niveau etablierter Vorbehandlungen, zeigt im Klimawechseltest PV 1200 jedoch ein abweichendes Alterungsverhalten. Vor dem Klimawechseltest liegen die Zugscherfestigkeiten der plasmapolymerisierten, tauchlackierten

und lackierten Proben mit rund 17 MPa in einem vergleichbaren Bereich, jeweils bei hohen Anteilen kohäsiver Bruchbilder von 74 bis 87 %. Nach PV 1200 sinkt die Zugscherfestigkeit der Probe mit der APTES-Plasmapolymerschicht auf etwa 12,5 MPa, und der kohäsive Bruchanteil geht auf rund 5 % zurück, während tauchlackierte und lackierte Systeme sowohl Festigkeit als auch kohäsiven Anteil weitgehend stabil halten. Mechanisch ist diese Abnahme deutlich, aber nicht katastrophal; kritischer ist die Verschiebung des Versagensbildes weg vom kohäsiven Bruch hin zu verstärktem Grenzflächenversagen (Tabelle 1). Aus ergänzenden Untersuchungen ist bekannt, dass die Feuchtigkeitsunterwanderung primär an der Grenzfläche zwischen Aluminiumgrundwerkstoff und Oxidschicht ansetzt, also nicht bei den Plasmapolymer- und Polyurea-Schichten [11]. Dies stützt die Interpretation, dass weiteres Optimierungspotenzial weniger in der Polyurea-Chemie oder im APTES-Plasmapolymer selbst, sondern vielmehr an der Aluminium-Aluminiumoxid-Grenze und ihrer Stabilität unter Wechselfeuchtebedingungen zu suchen ist. Eine wichtige Einschränkung betrifft dabei die Geometrie der Prüfkörper. Tauchlackierte und lackierte Zugscherproben sind vollständig von der Beschichtung umhüllt, während Al-6063 mit APTES-Plasmapolymer offene Kanten und Poren aufweist. Es bleibt daher eine offene und lohnende Frage, inwieweit die beobachtete Unterwanderung und der Verlust an kohäsivem Bruchanteil durch diese offenen Randbereiche mitverursacht werden und ob eine angepasste Randabdichtung oder Geometriegestaltung das Langzeitverhalten APTES-basierter Plasmapolymerschichten weiter verbessern könnte.

Vom Labor in die Fertigungslinie

Eine Technologie, die im Labor viel versprechend ist, muss sich am Ende an der Fertigungslinie bewähren. Die atmosphä-

rische Plasmapolymerisation lässt sich direkt in den Klebprozess integrieren und ist mit automatisierten Fertigungslinien mit kurzen Taktzeiten kompatibel (Bild 4). Wie belastbar dieser Anspruch ist, zeigte ein 8-Stunden-Dauertest an einer Laboranlage mit APTES unter Luft. Die Anlage durchlief dabei alle 30 min einen automatisierten Selbstreinigungszyklus, bei dem eine feine Metallbürste den Düsendurchmesser freihält, während der interne Rückdruck an der Düse stündlich protokolliert wurde, um eine schleichende Verstopfung frühzeitig zu erkennen. Über die volle Laufzeit blieb die Schichtdicke im Rahmen der Messunsicherheit stabil, und im kleinen Maßstab wurden keine kritischen Probleme wie ein Verstopfen der Düse beobachtet [7]. Damit lässt sich der Nutzen gegenüber klassischen Vorbehandlungssystemen konkret beschreiben: weniger Nasschemie, ein geringes Monomervolumen (rund 10 g/h), geringerer Bedarf an Trocknungs- und Ofenstrecken sowie eine bessere Kopplung an schnelle Fügeverfahren. Besonders für Anwendungen im Automobil- und Elektromobilitätsfeld ist dieser Ansatz relevant, da dort Taktzeit, Energieeinsatz, Prozessrobustheit und Logistikaufwand, etwa für lackierte oder tauchlackierte Bauteile, gemeinsam bewertet werden und ganze Logistikketten entfallen können. Erste überschlägige Abschätzungen im Kontext der Elektrofahrzeugfertigung deuten auf ein Einsparpotenzial von rund 15 €/Modul allein durch den Wegfall aufwendiger Vorbehandlungsschritte hin, während sich mit Polyurea-Klebstoffen Bauteile innerhalb von rund einer Minute bis zur Handhabungsfestigkeit fertigen lassen.

Eine einfache Wahrheit und ihre Konsequenzen

Die Ergebnisse zeigen nicht, dass alle Probleme der Aluminiumverklebung gelöst sind. Sie zeigen aber, dass eine vergleichsweise einfache, APTES-basierte Plasmapolymerisation eine belastbare und industriell anschlussfähige Haftvermittlerstrategie für ultraschnelle Polyurea-Klebstoffe darstellt. Zugleich liefern die Daten eine klare Korrektur einer verbreiteten Entwicklungslogik. Mehr funktionelle Gruppen, mehr Stickstoff oder komplexere Monomerenmischungen führen nicht automatisch zu besserer Leistung und Haftung. Künftige Arbeiten sollten gezielt auf Salzsprüh-, Feuchte- und Klimaeinfluss sowie die Feuchtigkeitsunter-

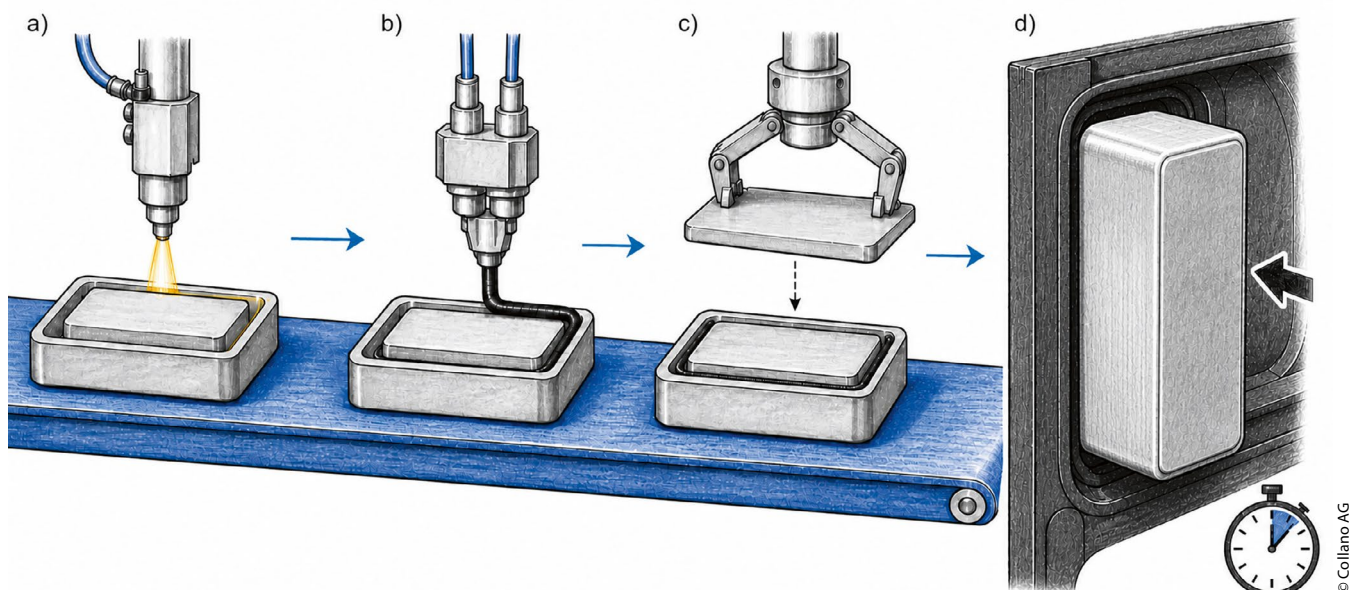


Bild 4 Integration der atmosphärischen Plasmapolymerisation in einen automatisierten Klebprozess: a) Auftrag einer plasmapolymeren Haftvermittlerschicht, b) unmittelbare Applikation des Klebstoffs, beispielsweise als Polyurea-Verguss, c) Fügen und Fertigstellung des Bauteils sowie d) direkter Einbau nach Erreichen der Handhabungsfestigkeit innerhalb kurzer Zeit.

wanderung an der Grenzfläche zwischen Aluminiumgrundwerkstoff und Oxidschicht adressieren. Die vorliegende Arbeit zeigt das Potenzial einer trockenen, prozessintegrierbaren Vorbehandlung für den industriellen Einsatz ultraschneller Aluminiumverklebungen auf. //

Literaturhinweise

- [1] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, Springer-Verlag, 1986
- [2] Polyurea Elastomer Technology: History, Chemistry & Basic Formulating Techniques. Online: https://thepolyureacompany.com/wp-content/uploads/2022/03/1_WP02.pdf, aufgerufen am 12.08.2026
- [3] Oertel, G.: Polyurethane Kunststoff-Handbuch 7. München/Wien, Hanser, 1993
- [4] Hug, P.: Schnellhärtende Klebstoffe für die Fahrzeugmontage. In: adhäsion KLEBEN + DICHTEN (2020), Nr. 5-6, S. 14-16
- [5] Hug, P.; Jung, H.: Batterien in kurzen Taktzeiten verkleben. In: adhäsion KLEBEN + DICHTEN (2023), Nr. 6, S. 14-19
- [6] Peng, H.; Zhou, T.; Fan, Y.; Shangguan, L.; Zhang, N.: Recent advances in aluminum alloy surface treatment technology and bonding properties. In: physica status solidi (a) (2025), Nr. 222
- [7] Michl, T. D.; Schwegler, A.; Zvolkska, K.; Grob, M.; Keller, P.; Schaller, R.; Jung, H.; Fischer, M.; Frei, P.; Roos, E.; Kresser, K.; Hamed, Y.; Ben Salem D.; Neuhaus, S.: From plasma chemistry to adhesion

strength: Mechanical characterization of pure versus mixed aminosilane films for bonding polyurea to aluminum. In: Plasma Processes and Polymers (2026), Nr. 23

- [8] Kroker, T.; Grossmann, M.; Sengstock, K.; Drescher, M.; Wessel-Staarmann, P.; Simonet, J.: Ultrafast electron cooling in an expanding ultracold plasma. In: Nature Communications (2021), Nr. 596, S. 2-8
- [9] Yang, R.; Kang, J.; Tian, Z.; Qie, L.; Wang, R.: Plasma cleaning of metal surfaces: From contaminant removal to surface functionalization. In: Surfaces MDPI (2026), Nr. 9, S. 1-26
- [10] Ding, L.; Wang, Y.; Lin, J.; Ma, M.; Hu, J.; Qiu, X.; Wu, C.; Feng, C.: Recent advances in polyurea elastomers and their applications in blast protection: A review. In: Journal of Materials Science (2024), Nr. 59, S. 14893-14923
- [11] Cavezza, F.; Boehm, M.; Terryn, H.; Hauffman, T.: A review on adhesively bonded aluminum joints in the automotive industry. In: Metals MDPI (2020), Nr. 10, S. 1-32

Die Autoren | Kontakt

Heiko Jung, Leitung R&D, Collano AG

Marcel Fischer, Leitung Application, Collano AG

Bruno Traber, Know-how Management und R&D, Collano AG

Raphael Schaller, CTO, Collano AG

Thomas D. Michl, Senior Research Fellow, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW

Sonja Neuhaus, Professorin für Oberflächenfunktionalisierung, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW

Collano AG

Neulandstrasse 1
6203 Sempach Station
Schweiz
info@collano.com
www.collano.com

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Hochschule für Technik und Umwelt

Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch
Schweiz
info.technik@fhnw.ch
www.fhnw.ch/de

Springer Professional

Metalloxyde



Mathias Keiber: Nickeloxide beschleunigen grüne Stahlproduktion.
<https://sn.pub/wb3f0w>

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.