

Laservorbehandlung in der klebtechnischen Serienfertigung

Neue Konzepte für die optimale Einbindung eines Reinigungs- und Vorbehandlungsschritts in eine industrielle Serienfertigung mit direkter Integration des Klebstoffauftrages sind für eine Vielzahl von Unternehmen von großem Interesse. Um nun diese integrierte Vorbehandlung chromatfrei, trocken und nahezu staubfrei zu gestalten, empfiehlt sich der Einsatz eines Lasers. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes INTLASKLEB wurden Integrationskonzepte erarbeitet.

ELISABETH STAMMEN, STEFAN BÖHM,
KLAUS DILGER, CHRISTIAN LAMMEL

Hinlänglich bekannt ist, dass die Eigenschaften einer Klebung sehr stark von der zu klebenden Oberfläche abhängen. Durch die Auswahl geeigneter Behandlungsmethoden lässt sich die Oberflächenbenetzbarkeit, die Haftung und die Lebensdauer der Klebverbindung deutlich steigern [1]. Zu entfernen sind Schmutz, Lösemittel und Fette; zusätzlich sind die Oberflächen zu aktivieren. Jedoch lassen sich die bekannten Methoden nicht oder nur aufwändig in eine klebtechnische Serienfertigung integrieren [2; 3]. Ebenfalls sind Anpassungen der Behandlungsmethoden auf geänderte Produkte oder Bauteile nicht oder nur aufwändig möglich. Die Vorteile des Lasers gegenüber den konventionellen Oberflächenbehandlungs-Verfahren sind:

- Oberflächenbehandlung ohne (Wirk-)Medium (Chemikalien und Nachreinigung sind nicht nötig; dadurch werden Kosten- und Umweltvorteile erreicht, da Medien nicht entsorgt werden müssen)
- Berührungsloses, verschleißfreies und abrasionsfreies Verfahren (keine Oberflächenschädigung bei entsprechenden Parametern)
- Wirkung sehr gut steuerbar, tritt nur am Ort der Lasereinstrahlung auf (Kosteneinsparung durch lokale Vorbehandlung)

Bei der Oberflächenvorbehandlung von Werkstoffen mit Laserstrahlung wird ein Laserstrahl über das Werkstück geführt oder das Werkstück wird unter einem stationären Laserstrahl verfahren (Bild 1).

Die erzielte Oberflächenmodifikation ist von den verschiedenen Parametern der Laserstrahlung und den chemischen bzw. physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes sowie den Umgebungsbedingungen abhängig. Die variablen Parameter der Laserstrahlung sind:

- Laserwellenlänge (Lasersystem)
- Energiedichteverteilung bzw. Leistungsdichteverteilung auf der Werkstoffoberfläche, Verfahrensstrategie
- Prozessgasatmosphäre.

In Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften und den Parametern der verwendeten Laserstrahlung ist es möglich, eine Werkstoffoberfläche zu reinigen [4], die Oberflächeneigenschaften (Topographie, Struktur) durch Abtrag zu verändern und auch chemisch zu modifizieren.

Die Bestrahlung bietet die Möglichkeit, Werkstoffoberflächen ortsselektiv mit einer sehr hohen Flexibilität vorzubehandeln. Dies hat im Vergleich zu anderen Verfahren den Vorteil, dass nur die zu klebenden Flächen bearbeitet werden müssen.

Vorbehandlung mit Nd:YAG-Laserstrahlung

Innerhalb des Projektes INTLASKLEB wurden sechs unterschiedliche Werkstoffe,

darunter drei Aluminiumlegierungen (Al 6016, Al 6040, Al 6043), mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser und einem eigens entwickelten Scankopf mit verschiedenen Laserparametern vorbehandelt. Die einzelnen Laserparameter wurden hinsichtlich ihrer Beeinflussung der Oberfläche untersucht. Entscheidend war dabei ihre chemische Zusammensetzung und die damit verbundene Klebbarkeit.

Bild 2 zeigt REM-Aufnahmen der Oberfläche von Al 6040 nach der Vorbehandlung mit vier unterschiedlichen Laserparametern. Hierbei unterscheiden sich die Laserparameter sowohl durch die Leistungsdichte der einzelnen Laserpulse (LP 6 > LP 3 > LP 2 > LP 1) als auch durch die Überlappung der einzelnen Laserpulse (LP 6 stark überlappt bis LP 1 nicht überlappt) in einer Scanlinie. Beim Einsatz des LP 6 ist die gesamte Oxidschicht entfernt, und die Oberflächentopographie zeichnet sich durch eine feine, homogene Struktur aus.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Vorbehandlung mit LP 6 sehr gute Festigkeiten und Beständigkeiten erzielt werden. Grund hierfür sind die chemischen und morphologischen Veränderungen der oberflächennahen Schichten.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Laservorbehandlung erfolgte mit einer Laserstrahl-Workstation CL120Q der Firma Clean Lasersysteme, Herzogenrath. Zu den relevanten Nd:YAG-Laserparametern zäh-

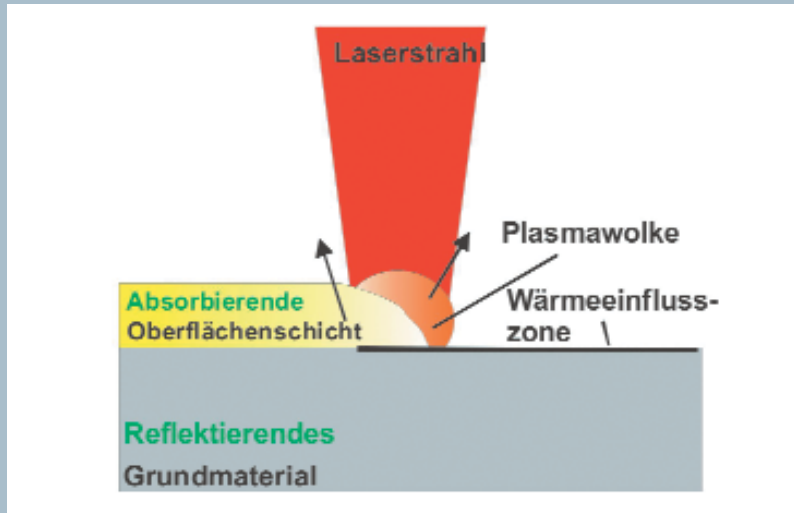


Bild 1: Prinzip der Laservorbehandlung

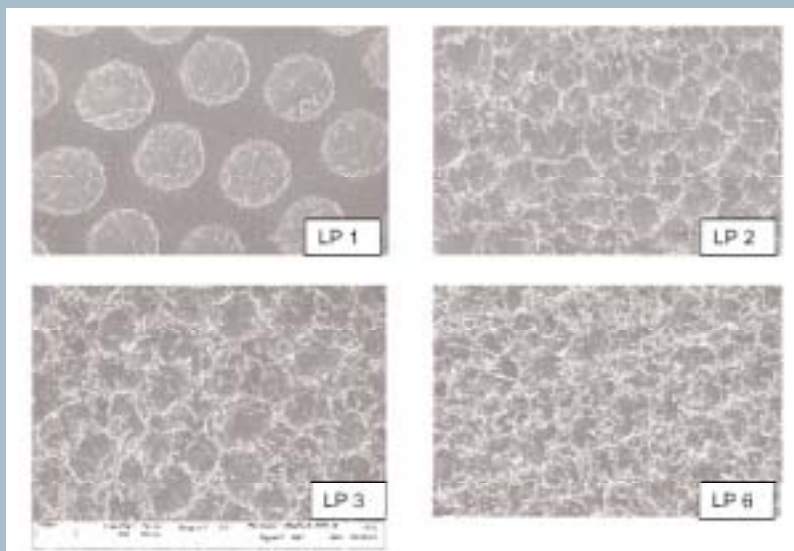


Bild 2: Oberfläche von Aluminium Al 6040 nach der Bearbeitung mit den Parametern LP1, LP2, LP3 und LP6

len u. a. die Wellenlänge von 1064 nm, die max. Pulsspitzenleistung von 150.000 W und die Pulsdauer von 80-500 µs.

Neben der Laservorbehandlung unter Normalatmosphäre wurden auch zusätzliche Prozessgase mit dem Ziel eingesetzt, die Prozesszone vor Atmosphäre zu schützen und die gebildete Oberfläche zusätzlich zu modifizieren.

Für die Versuche kamen ein zweikomponentiger raumtemperatur-härtender Polyurethanklebstoff (Teromix 6700, Henkel Teroson) und ein einkomponentiger heiß-härtender Epoxidlebstoff (Betamate 1496, Dow Automotive) zum Einsatz.

Die Zugscherproben wurden nach DIN EN 1465 gefertigt, wobei der Klebstoffauftrag und der Fügeprozess direkt nach der Laservorbehandlung erfolgte. Die Proben wurden sowohl einer quasistatischen Zugscherprüfung (in Anlehnung an DIN EN 1465, Geschwindigkeit 5 mm/min) als auch einer Crashzerreiprüfung (5 m/s) unterzogen. Die Prüfungen fanden bei einer konstanten Raumtemperatur von 21 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 50 % ± 5 % rel. statt. Zur Auswertung wurde aus der gemessenen realen Überlappungslänge und der Probenbreite die Klebfläche berechnet. Mit dieser und der Maximalkraft wurde dann die Klebfestigkeit ermittelt, die zusammen mit dem Bruchbild die charakteristischen Vergleichsmerkmale für Klebungen liefern. Bei den Bruchbildern wurde zwischen adhäsivem, kohäsivem und Substratversagen (Materialbruch) unterschieden.

Alterungseinflüsse

Da eine alleinige Prüfung direkt nach der Aushärtung des Klebstoffes nur eine begrenzte Aussagekraft bzgl. der Klebfestigkeit

Al 6016 Betamate 1496	ohne VB ungealtert	ohne VB nach VDA	LP 1 ungealtert	LP 1 nach VDA	LP 2 ungealtert	LP 2 nach VDA	LP 3 ungealtert	LP 3 nach VDA	LP 6 ungealtert	LP 6 nach VDA
Luft Koh. Anteil	30,71 (2,20) 0%	9,28 (3,42) 0%	34,31 (1,06) 0%	26,1 (1,41) 0%	32,00 (0,93) 40%	14,94 (6,73) 12%	32,58 (0,89) 0%	20,18 (2,08) 83%	29,43 (3,19) 0%	25,43 (2,07) 0%
Flammsilikat Koh. Anteil	27,24 (1,62) 0%	6,11 (5,44) 0%	22,47 (3,38) 0%	18,72 (0,69) 0%	23,4 (2,02) 0%	20,14 (2,61) 0%	29,29 (0,92) 0%	27,09 (1,00) gn kohäsiv	27,38 (0,27) 0%	24,8 (1,30) gn kohäsiv
Sauerstoff Koh. Anteil	n.d.	n.d.	28,75 (6,15) 0%	18,38 (1,19) 0%	28,52 (0,82) 0%	19,15 (1,48) 0%	33,13 (3,15) 100%	23,3 (1,74) M.B.	33,24 (1,71) 100%	24,35 (1,08) M.B.
Schutzgas Koh. Anteil	n.d.	n.d.	27,74 (3,39) 0%	17,77 (2,33) 0%	29,08 (1,78) 0%	22,47 (1,56) 50%	27,53 (1,98) 0%	22,36 (1,63) 80%	25,79 (3,25) 0%	23,03 (1,43) 100%

Tabelle 1: Ergebnisse für Al 6016, verklebt mit Betamate 1496

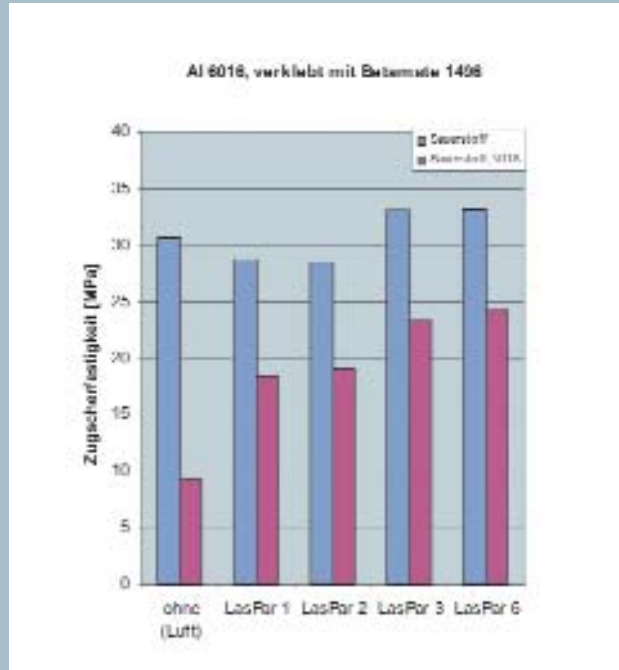
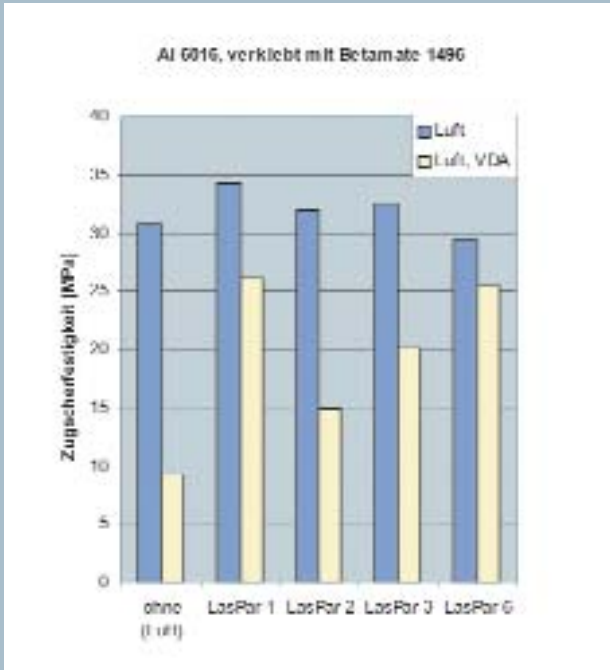


Bild 3: Al 6016, verklebt mit Betamate 1496. Links die Ergebnisse für die Laservorbereitung unter Normalatmosphäre, rechts für die Laservorbereitung unter zusätzlichem Sauerstoffeinfluss. Referenz: entfettete Probe ohne weitere Vorbehandlung, Verklebung unter Normalatmosphäre

keit hat, wurde ein Teil der Proben zur Untersuchung der Langzeitbeständigkeit einer künstlichen Alterung unterzogen und danach ebenfalls quasistatisch geprüft. Der 10 Zyklen umfassende, modifizierte VDA-Wechselstest 621-415 beinhaltet folgenden Wochenzyklus:

- 24 h Salzsprühstest
- 6 h Schwitzwassertest
- 3 h Raumtemperatur
- dreimal – 6 h bei 100 °C
– 2 h Raumtemperatur
- 5 h bei -30 °C
- 66 h Raumtemperatur

Dabei hat die Feuchte- und Temperaturwechselbelastung mit korrosiver Bean-

spruchung einen maßgeblichen Einfluss auf die Alterungsbeständigkeit der Proben.

Ergebnisse der Zugscherprüfungen

Die Ergebnisse für die Klebungen von Al 6016 und Al 6040 mit Betamate 1496 sind in tabellarischer Form (Luft = Lasern bei Normalatmosphäre; Flamm-silikat = Lasern mit überströmendem Pyrosil [6]; Sauerstoff = Lasern mit überströmendem Sauerstoff; Schutzgas = Lasern mit überströmendem Stickstoff) und exemplarisch für einige Prozessgase als Diagramm dargestellt. In der Tabelle wird der Mittelwert der Zugscherfestigkeit im N/mm² sowie – in Klammern – die Standardabweichung angegeben.

Außerdem erfolgt eine Begutachtung des kohäsiven Anteils am Gesamtbruchbild in Prozent.

Die Behandlung der Oberfläche mittels Laserstrahlung verbessert die Alterungsbeständigkeit von Al 6016. Ursache dafür ist die Strukturierung und morphologische Vergrößerung der Oberfläche. Dies ist besonders deutlich ausgeprägt, wenn man unter Normalatmosphäre lasert. Hier zeigt der hauptsächlich reinigende Laserparameter 2 die geringste Verbesserung der Alterungsbeständigkeit. Laserparameter 1, der die Oberfläche stark texturiert, jedoch auch Teile der alten Oxidschicht stehen lässt, liefert nach der Alterung im VDA-Wechselstest eine gleich gute Zugscherfestigkeit wie La-

Al 6040 Betamate 1496	ohne VB ungealtert	ohne VB nach VDA	LP 1 ungealtert	LP 1 nach VDA	LP 2 ungealtert	LP 2 nach VDA	LP 3 ungealtert	LP 3 nach VDA	LP 6 ungealtert	LP 6 nach VDA
Luft	25,78 (0,98)	9,32 (4,45)	26,56 (0,47)	17,94 (3,50)	26,58 (0,77)	10,82 (5,61)	27,35 (0,42)	20,21 (2,49)	26,27 (0,85)	21,27 (2,37)
Koh. Anteil	0%	0%	0%	0%	20%	0%	0%	20%	100%	50%
Flamm-silikat	19,15 (1,21)	5,14 (2,03)	20,64 (1,94)	13,51 (1,54)	19,3 (1,07)	10,87 (1,90)	24,29 (0,63)	24,27 (0,76)	23,56 (0,30)	22,78 (1,90)
Koh. Anteil	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	gn kohäsiv
Sauerstoff	n.d.	n.d.	26,28 (0,33)	16,16 (2,29)	27,93 (0,71)	19,56 (1,69)	26,37 (0,92)	19,53 (0,50)	28,63 (0,32)	21,64 (1,03)
Koh. Anteil			0%	0%	0%	85%	100%	90%	MB	95%

Tabelle 2: Ergebnisse für Al 6040, verklebt mit Betamate 1496

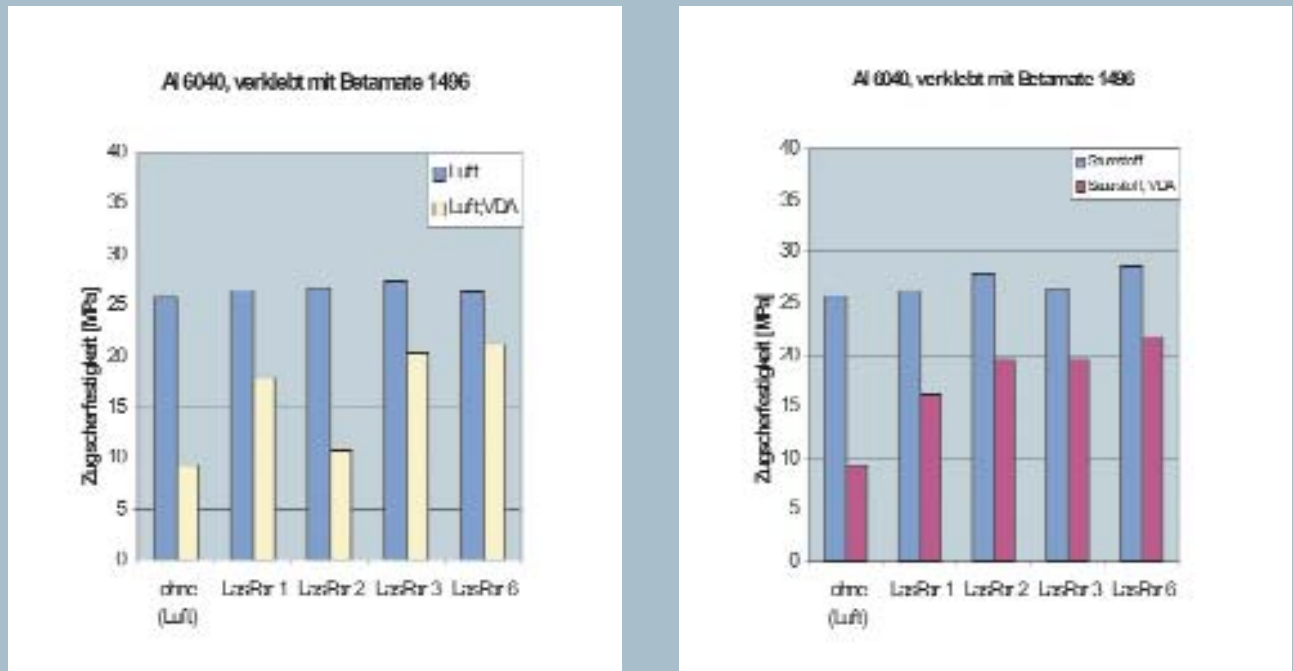


Bild 4: Al 6040, verklebt mit Betamate 1496. Links die Ergebnisse für die Laservorbereitung unter Normalatmosphäre, rechts für die Laservorbereitung unter zusätzlichem Sauerstoffeinfluss. Referenz: entfettete Probe ohne weitere Vorbehandlung, Verklebung unter Normalatmosphäre

serparameter 6, der die Oberfläche sehr gleichmäßig bearbeitet und die natürliche Oxidschicht vollständig entfernt. Beim Lasern unter gleichzeitigem Einströmen des Prozessgases Sauerstoff erzielt die Bearbeitung mit Laserparameter 6 die besten Festigkeiten. Sie sind mit denen des Laserns unter Normalatmosphäre vergleichbar. Für die verschiedenen Laserparameter zeigt sich ein insgesamt homogeneres Bild nach der Alterung. Die Sauerstoffatmosphäre bedingt einen gleichmäßigen Aufbau einer neuen Oxidschicht bereits während des Laserprozesses. Die Alterungsbeständigkeit wird von einer gleichmäßig von der alten Oxidschicht befreiten Oberfläche begünstigt. Dies ergibt sich aus der besseren Anbindung des Klebstoffs auf der Oberfläche und dem damit verbundenen kohäsiven Versagen der Klebschicht.

Für Al 6040 erhält man vergleichbare Tendenzen. Insgesamt liegen die Zugscherfestigkeiten etwas niedriger als für Al 6016, jedoch verstärkt sich die Homogenität der Messwerte besonders beim Lasern unter Sauerstoffeinfluss. Die Standardabweichung ist durchweg gering, was auf eine sehr gleichmäßige Vorbehandlung schließen lässt.

Hochdynamische Prüfungen

Im Verlauf des Projektes wurden auf Wunsch der Industrie hochdynamische

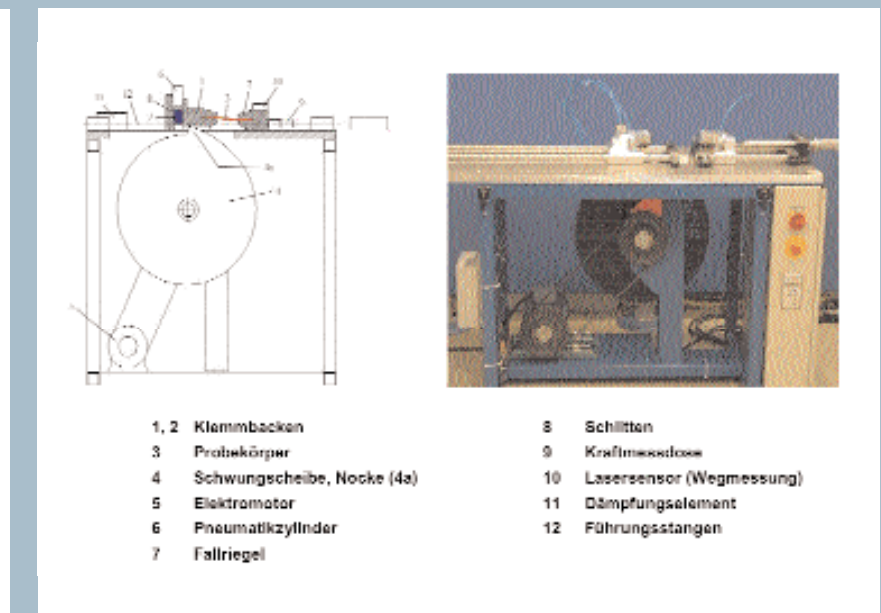


Bild 5: Impact-Rotations-Prüfstand

Prüfungen an ausgewählten Proben durchgeführt, um den Einfluss der Laservorbereitung auf das Crashverhalten zu untersuchen. Dazu wurden Proben der Materialien Al 6040 und Al 6043 (eloxiert) mit dem Laser vorbehandelt und mit Betamate 1496 verklebt. Zusätzlich wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit ebenfalls Proben, die entfettet oder Saco-gestrahlt waren [5], mit den gleichen Geschwindigkeiten geprüft. Die Prüfungen fanden an

einem Impact-Rotations-Prüfstand statt (Bild 5).

Es ist zu erkennen, dass die Crashfestigkeit der laservorbereiteten Proben (LP6) höher ist als bei Saco-gestrahnten Proben (Bild 6). Die Begutachtung der Bruchbilder zeigt immer ein kohäsives oder fügeteilnahes, kohäsives Versagen.

Bislang wurden noch keine hochdynamischen Untersuchungen mit gealterten Proben durchgeführt.

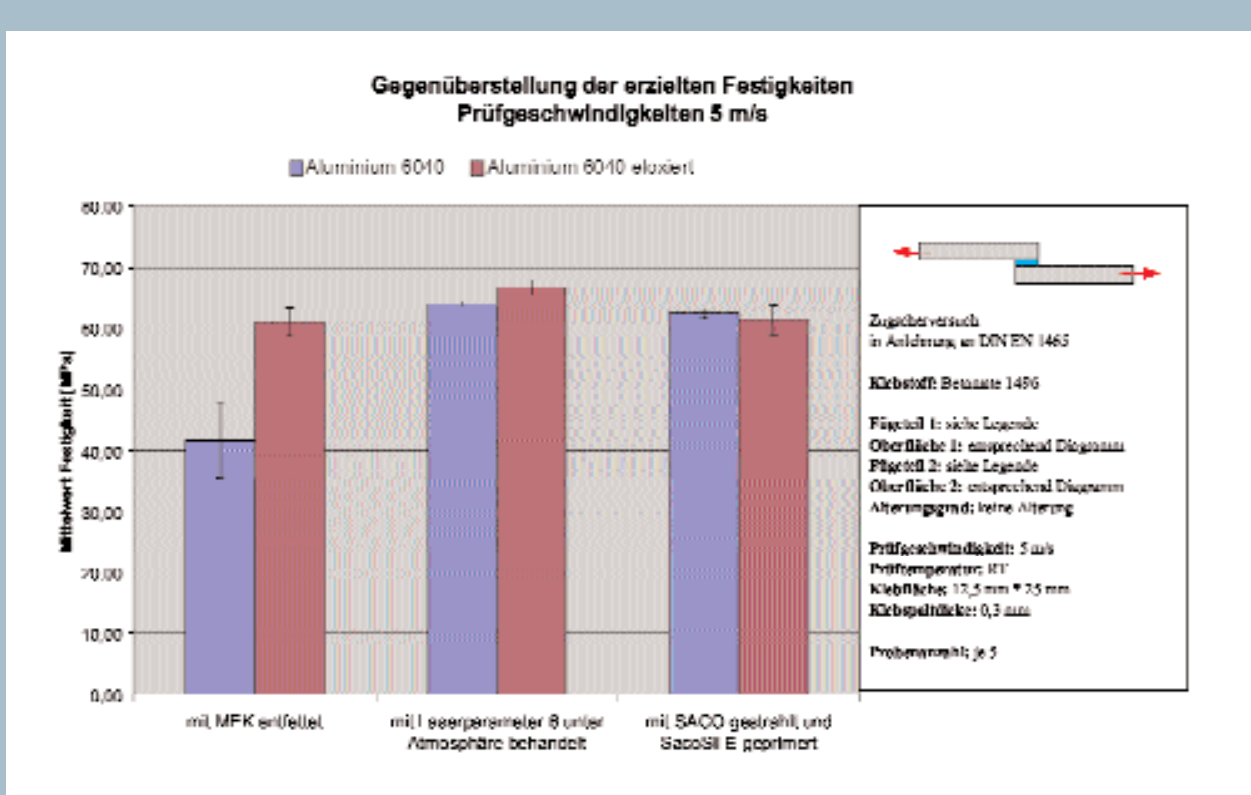


Bild 6: Vergleich der Crashfestigkeiten für die Substrate Al 6040 und Al 6043

Integration der Laservorbereitung in eine industrielle Serienfertigung

Das Ziel bei der Entwicklung eines integrierten Laservorbereitungs-/Klebstoffauftragskopfes bestand darin, nicht nur einen Arbeitsschritt in einer späteren Produktion einzusparen (z. B. die manuelle mechanische Oberflächenbehandlung bei metallischen Werkstoffen), sondern auch die Sicherheit und Stabilität des Fertigungsschrittes deutlich zu erhöhen. Denn nur Fertigungsprozesse, die über eine hohe Stabilität verfügen, können auch im spä-

teren (Großserien-)Einsatz eine gleichbleibende und hohe Qualität der gefertigten Produkte garantieren. Vor allem vor dem Hintergrund, dass beim Einsatz der Klebtechnik noch große Unsicherheiten bezüglich der Oberflächenbehandlung der Fügeteile sowie der Klebstoffverarbeitung und -aushärtung bestehen, kann ein stabiles Fertigungsverfahren deutlich die Akzeptanz der Klebtechnik in der industriellen Produktion erhöhen und zu einer weiteren Verbreitung der Klebtechnik beitragen. Das Anbringen des Laserkopfes sollte direkt am Dosierkopf erfolgen, um die Vorbe-

handlung in den Auftragsprozess zu integrieren. Dabei liegt der Arbeitsbereich des Lasers vor dem Bereich des Klebstoffauftrags (Bild 7). Der sich einstellende Vorlauf ist von den Maßen des Auftragskopfes und der Zugänglichkeit für den Laserstrahl abhängig. Um die Zusatzfunktionen wie Absaugen der entstehenden Partikel und Dämpfe, Vorbehandlung und Klebstoffauftrag unter Schutzgas sowie ein Ausrichten des Lasers zum Bauteil zu vereinfachen, sollte der Vorlauf so klein wie möglich gewählt werden. Bei der Montage des Lasers sind in erster

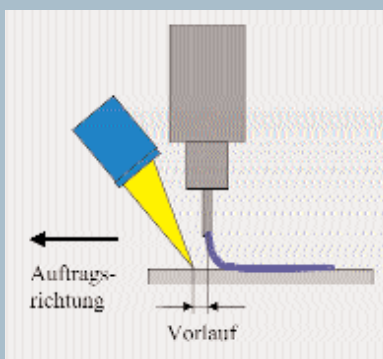


Bild 7: Hintereinanderschaltung der Arbeitsbereiche

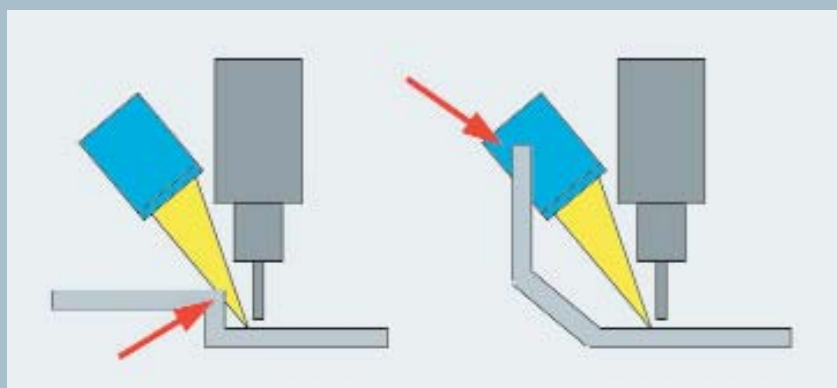


Bild 8: Einfluss der Bauteilkontur auf den Lasereinsatz bzw. dessen Anbringung



Dosierkopfbewegung



Bauteilbewegung

Bild 9: Handhabung von Dosierkopf oder Bauteil durch den Roboter

	Dosierkopfbewegung	Bauteilbewegung
Platzbedarf	-	+
Anzahl der Stationen	-	+
Beanspruchung der Schläuche	-	+
Bauteilschwingung	+	-
Stabile Raupenlage	+	-
Rotation optische Einheit	-	-
Roboterarbeitsschritte	12	7

Tabelle 3: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Bewegungskonzepte

Linie der Abstand der Optik zum Arbeitspunkt und der Eintrittswinkel (Winkel zur Oberfläche) zu berücksichtigen.

Der Abstand Laser zu Bauteil lässt sich durch den Einsatz unterschiedlicher Optiken variieren. In Abhängigkeit von der Bauteilkon- tur und von dem benötigten freien Arbeits- raum kann somit das System individuell an- gepasst werden. Damit lässt sich auf jeden Fall eine Kollision von Laser und Bauteil ver- hindern. Unterbrechungen des Laserstrahls aufgrund von Bauteilkanten bzw. -hinter- schneidungen hingegen erfordern Ände- rungen der Roboterbahnkurven (vgl. Bild 8). Der Eintrittswinkel ist unter Berücksichti- gung der Forderung nach minimalem Vor- lauf vor allem von der Größe bzw. Breite des Dosierkopfs abhängig. Prinzipiell soll- te eine senkrechte Bestrahlung zur Ver- meidung von Reflexionen in die Optik ver- mieden werden. Die optimalen Einstrahl- winkel sind von der zu behandelnden Ober- fläche abhängig und müssen in Vorversu- chen ermittelt werden. Der Aufbau des La- sers aus einem feststehenden Modul zur Faserankopplung und einem dazu von plus 120° bis minus 120° drehbarem Scanmodul erlaubt das Einstellen nahezu beliebiger Winkel. Die Untersuchungen an einer Pkw- Tür wurden mit einer Auslenkung von ca. 15° aus der Senkrechten durchgeführt.

Aufgrund stark abweichender Bauformen und Baugrößen der Dosierköpfe (abhängig von Applikation und Hersteller) können für die Anbindung des Lasers an die Dosier- einheit keine Standardadapter angeboten werden.

Grundsätzlich lassen sich beim automati- sierten Auftrag entweder das Bauteil oder der Bearbeitungskopf bewegen (Bild 9).

Beide Auftrags- oder Bewegungskonzepte bieten Vor- und Nachteile, die in Abhän- gigkeit von der Anwendung variieren und überprüft werden müssen (Tabelle 3). Die Zuführung des Klebstoffs zum Dosierer und zur Auftragspistole mittels beheizter Schläuche spiegelt den Stand der Technik wider.

Ergebnis-Transfer

Beide vorgestellten Bewegungskonzepte wurden in Form von Musterarbeitsplätzen umgesetzt und durch die Etablierung eines Industriearbeitskreises öffentlich zugäng- lich gemacht. Der Industriearbeitskreis wird auch über das offizielle Projektende hinaus fortgeführt, so dass für Interessen- ten weiterführende Ergebnisse zur Verfü- gung stehen. Nähere Informationen dazu (z. B. aktuelle Termine) sowie die vollstän- digen Ergebnisse des Projektes sind unter www.intlaskleb.de erhältlich. ■

Quellenverweis Autoren & Vita

Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen ist wis- senschaftliche Mitarbeiterin der Abtei- lung "Kleben und mechanisches Fügen" am Institut für Füge- und Schweißtech- nik der Technischen Universität Braun- schweig; Prof. Dr.-Ing. Stefan Böhm (s.boehm@tu-bs.de) leitet diese Abtei- lung; Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger (k.dilger@tu-bs.de) ist Geschäftsführender Leiter des Institutes für Füge- und Schweißtechnik und Dr. Christian Lam- mel (christian.lammel@iff-gmbh.de) ist Geschäftsführer der IFF GmbH, Isma- ning.

Danksagung

Der vorliegende Artikel stellt in Auszü- gen die Ergebnisse des Projektes „Inte- gration eines Laservorbereitungssys- tems in eine klebtechnische Serienferti- gung – INTLASKLEB“ dar, das durch den Projektträger PFT, Karlsruhe, inner- halb des „Forschung für die Produktion von Morgen“ - Programms begleitet und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wur- de. Die Autoren bedanken sich für die gute Zusammenarbeit zwischen den Konsortialpartnern und der Projektlei- tung, vertreten durch Frau Schwab und Herrn Wagner.

[1] Tavakoli, S.M.: Surface preparation: Power beams clean up. Assembly Automation, Band 14 (1994) Heft 4, Seite 36-38

[2] Ciba Specialty Chemicals Holding Inc., Patent WO 96/23037, 1996

[3] Ciba Specialty Chemicals Holding Inc., Patent WO 99/37830, 1999

[4] Brenner, B.; Bonß, S.; Nowotny, S.; Wiedemann, G.: Hochleistungsdiodenla- ser erschließen sich die Materialbearbei- tung Maschinenmarkt, Würzburg, Band 105 (1999) Heft 10, Seite 40-43

[5] Saco-Verfahren; DELO-Industriekleb- stoffe GmbH & Co. KG, Landsberg

[6] Pyrosil-Technologie; Sura Chemicals, Jena