

# Laserstrahlfügen der Werkstoffpaarungen Aluminium/Polyamid und Aluminium/Polyvinylchlorid

Im Beitrag wird eine Prozessoptimierung des Laserstrahlfügens der Werkstoffpaarungen EN AW-6082(AlSi1MgMn)/Polyamid 6.6 und EN AW-6082/Polyvinylchlorid-Hart vorgestellt. Die Untersuchungen geben Aufschluss darüber, welchen Einfluss verschiedene Parameter auf die Verbindung und die einzelnen Fügepartner selbst haben und welche Kombination die besten Fügeergebnisse liefert. Zudem wird gezeigt, dass bestimmte Vorbehandlungsmethoden der Versuchswerkstoffe, vor allem für Aluminium, die Fügequalität deutlich steigern können und weiteres Optimierungspotenzial bieten. Weiterhin wird die Komplexität eines solchen Optimierungsvorgangs ersichtlich, welcher sich nicht nur auf die Parametervariation des Lasers beschränkt. Er betrifft auch die Auslegung der Peripherie, wie die Probenaufspannung oder die Vorbehandlung der Fügepartner, was ein Anpassen der Parameter mit sich bringt. Im Zugversuch werden die laserstrahlgefügten Proben mit herkömmlich geklebten Proben hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften verglichen.

## 1 Einleitung

Der technologische Fortschritt erzeugt immer neue Verfahren und Methoden um bestehende Prozesse effizienter und besser umsetzen zu können. Dabei nimmt die Ressourcenschonung und Energieeffizienz eine immer größer werdende Rolle ein. In diesem Kontext werden Leichtbaulösungen in der Zukunft wegweisend sein. Um diese Lösungen zu realisieren bedarf es oft der Paarung verschiedener Werkstoffe, die dann im Optimalfall so kombiniert werden, dass ihre Eigenschaften bezogen auf die Anwendung bestens ausgeschöpft werden. Bisher werden die entsprechenden Bauteilkomponenten häufig durch Klebstoff verbunden, auch wenn damit Probleme der Fertigung und – bei späterem Einsatz – der Alterung auftreten. Technologien wie das Laserstrahlfügen nehmen daher immer mehr an Bedeutung zu. Diese finden heute schon zum Herstellen von Hybridbauteilen (Bauteile aus stark unterschiedlichen Werkstoffen) in der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt ihren Einsatz und werden immer häufiger verwendet. Weiterhin ermöglicht das Laserstrahlfügen extrem kurze Prozesszeiten und arbeitet nahezu verschleißfrei – beides gute Voraussetzungen für eine Automatisierung. Zudem lassen sich Kunststoffe ohne zusätzliches Medium, wie Klebstoff, mit Metallen verbinden, was ein großer Vorteil beim späteren Recyclingprozess von Hybridbauteilen ist, da weniger Materialien stofflich getrennt werden müssen. Darüber hinaus lassen sich durch die Bandbreite an Kunststoffen unterschiedlichste Anwendungsgebiete abdecken.

## 2 Versuchsaufbau/Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen wurden auf einer Anlage vom Typ „Trumpf TruLaser Station 5005“ durchgeführt, **Bild 1**. Diese besitzt eine Arbeitsebene von 300 mm × 300 mm und einen vertikalen Verfahrensweg von 500 mm. Die maximale Verfahrensgeschwindigkeit des Koordinatentischs

## DIE AUTOREN



### Prof. Dr.-Ing. Peter Böhm

Leiter des Fachgebiets für Werkstoffe und Schweißen der Hochschule Trier, Fachbereich Technik  
p.boehm@mb.hochschule-trier.de  
www.schweissenundschneiden.de/?id=400241



### Dennis Müller, B.Eng.

Bachelor of Engineering der Hochschule Trier, Fachbereich Technik  
muellerd@hochschule-trier.de



### Dr.-Ing. Christian Lamberti

Grundlagenforschung und Entwicklung – Additive Fertigungsverfahren, Ceratizit Luxemburg Sàrl  
christianlamberti@outlook.com  
www.schweissenundschneiden.de/?id=400256

## STICHWÖRTER

Aluminium, Laserstrahlfügen, Kleben, Kunststoff, Werkstofffragen, Werkstoffkombinationen

beträgt dabei maximal 6 m/min bei einer Positionierungsgenauigkeit von 0,1 mm. Als Strahlquelle kam ein Festkörperlaser „TruFiber 500“ mit einer Nd:YAG-Faser zum Einsatz. Das für die hier beschriebenen Arbeiten verwendete Lasersystem mit einem Faserdurchmesser von 22 µm zeichnet sich durch eine sehr hohe Strahlqualität aus und ermöglicht hochdynamische Schweißprozesse. Der Brennpunktdurchmesser beträgt dabei etwa 21 µm.

Die verbaute Laserstrahloptik verfügt über eine programmierbare Fokussieroptik und eignet sich zum Schweißen und Bohren. Der Vorteil dieser Anlage besteht in seinem großzügig nutzbaren Arbeitsraum bei gleichzeitig dynamischer Strahlführung. Bei der Durchführung der Versuche wurde der Laserstrahl räumlich moduliert. Das heißt, dass die Spiegeloptik den Laserstrahl auf eine Kreisbahn mit dem Radius  $R_x$  ablenkt, während sich gleichzeitig der Koordinatentisch mit einem linearen Vorschub bewegt. Dies hat den Vorteil, dass ein breiteres Schmelzbad erzeugt werden kann, während man gleichzeitig die Energiedichte des fokussierten Laserstrahls beibehält. Auf diese Weise gelingt es, die Oxidschicht des Aluminiums zu durchbrechen, da diese einen Schmelzpunkt von etwa 2072 °C aufweist und um einen stabilen Tiefschweißprozess im Metall aufrecht zu erhalten.



Bild 1 • „Trumpf TruLaser Station 5005“ mit angeschlossenem Faserlaser (Bild: Trumpf).

Bei den Versuchen wurden folgende Parameter variiert: Laserstrahlleistung  $P$  [W], Vorschubgeschwindigkeit  $F$  [mm/min], Modulationsradius  $R_x$  [mm], Modulationsgeschwindigkeit  $v$  [mm/s], Fokusbagenoffset  $z$  [mm]. In **Bild 2** ist eine schematische Darstellung der Bewegung des Laserstrahls über die programmierbare Laseroptik mit gleichzeitiger Vorwärtsbewegung des Koordinatentischs, auf dem die Probe aufgespannt ist, dargestellt.

Zum Laserstrahlfügen des Aluminiumbauteils mit dem Kunststoffbauteil werden beide überlappt aufeinandergelegt. Der Laserstrahl trifft auf der Gegenseite der geplanten Verbindungsfläche auf das Aluminiumbauteil auf und erzeugt einen Schmelzbereich, der das Aluminiumbauteil nicht über die gesamte Dicke durchdringt

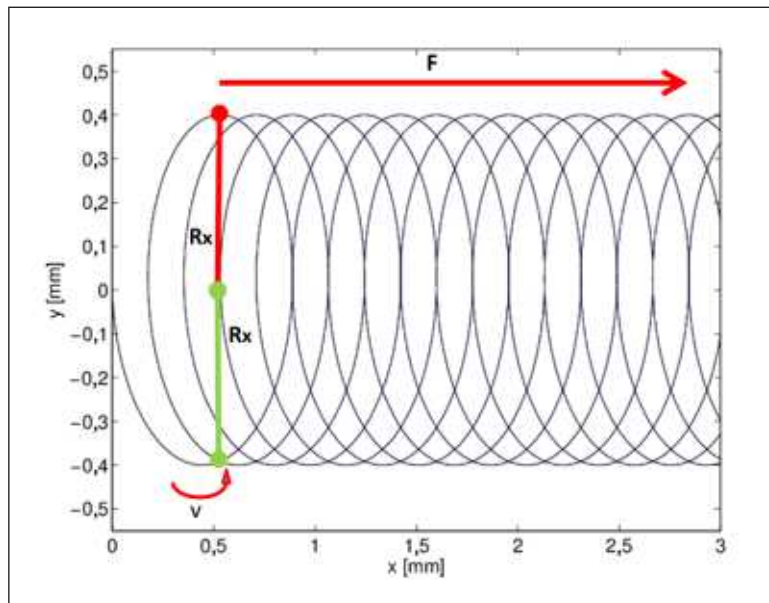


Bild 2 • Schematische Darstellung der Laserstrahlbewegung während des Fügevorgangs; Verfahren des Koordinatentischs mit der Geschwindigkeit  $F$  mit gleichzeitiger Kreisbewegung des Laserstrahls mit dem Radius  $R_x$  und der Geschwindigkeit  $v$ .

und entlang der geplanten Nahtbahn weitergeführt wird, **Bild 3**. Ein Durchstoßen des Aluminiumteils und das Auftreffen des Laserstrahls auf das Kunststoffteil sind zu vermeiden. Der erhitzte Bereich des Aluminiumbauteils, der mit dem Kunststoffteil in Kontakt ist, schmilzt auch das Kunststoffteil in der Fügezone auf und sorgt somit für eine Benetzung der Aluminiumoberfläche mit dem flüssigen Kunststoff. Mit dem Erkalten entsteht eine Adhäsionsverbindung der beiden Teile. Beide Teile besitzen einen Schmelzbereich. Da die Schmelzen aber nicht in Kontakt kommen und sich nicht vermischen – was werkstofftechnisch auch nicht möglich

## ABSTRACT

# Laser joining of the material combinations aluminum/polyamide and aluminum/polyvinyl chloride

In the article a process optimization of laser beam joining of the material combinations EN AW-6082 (AlSi1MgMn)/polyamide 6.6 and EN AW-6082/polyvinyl chloride hard is presented. Various process parameters are investigated concerning their influence on the individual joining partners themselves and the resulting connection. It is shown that specific pre-treatment methods, especially for aluminum, can significantly increase the joint quality and offer further optimization potential. Furthermore, an optimal parameter combination is proposed for the best joining results. The complexity of such an

optimization process can be seen. The parameter variation is not limited to the laser exclusively but also affects the design jigs and sample alignment as well as the pre-treatment methods for the joining partners. In the tensile test, the laser beam-joined samples are compared with conventionally bonded samples with regard to their mechanical-technological properties.

## KEYWORDS

aluminium, laser joining, adhesive bonding, plastics, material questions, material combinations

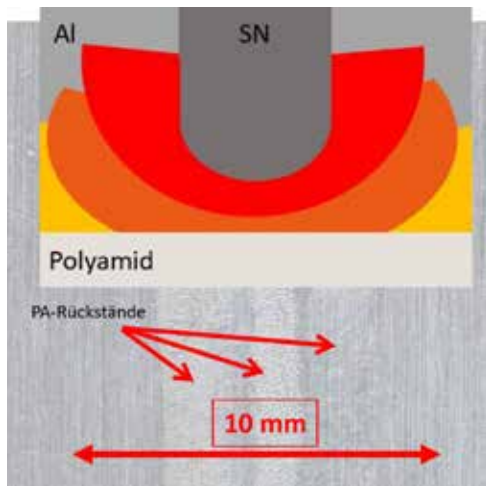


Bild 3 • Wärmeübertragung (schematisch) des aufgeschmolzenen Aluminiums (Al – Aluminium, SN – Schweißnaht) mit gleichzeitiger Ansicht der abgelösten Aluminiumprobe mit darauf verbliebenen Rückständen des Polyamids.

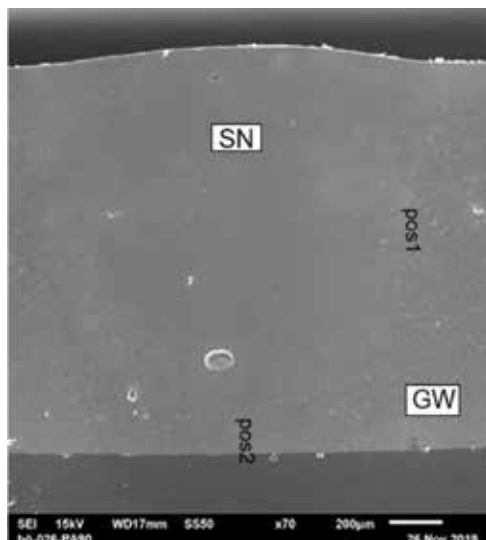


Bild 4 • Rasterelektronenstrahlmikroskop-Aufnahme des Querschnitts einer laserstrahlgeführten Verbindung von Aluminium (hellgrau) und Polyamid 6.6. (dunkelgrau; SN – Schweißnaht, GW – Grundwerkstoff).

wäre –, handelt es sich bei dieser Verbindung nicht um eine Schweißverbindung. Aufgrund des Fügemechanismus der Adhäsion sind derartige Verbindungen dem Kleben zuzurechnen. In **Bild 4** ist eine Rasterelektronenstrahlmikroskop-Aufnahme eines Querschnitts einer laserstrahlgeführten Verbindung von Aluminium mit PA 6.6 zu sehen. Darauf ist erkennbar, dass es zu einer spaltfreien Fügefläche gekommen ist. Weiterhin ist die Tiefe des aufgeschmolzenen Bereichs im Aluminiumblech sichtbar und mit SN gekennzeichnet. Auf die Auswirkungen des ungewollten Durchschmelzens des Aluminiumbauteils mit Kontakt der Aluminiumschmelze mit dem Kunststoff wird später eingegangen.

Nach jedem Laserstrahlfügen einer Probe wurde diese anschließend getrennt, um die Qualität der Anbindung und die Fügeflächen zwischen den beiden Werkstoffen zu ermitteln. Anhand dieser Informationen wurden die zuvor genannten Parameter angepasst. Für



Bild 5 • Draufsicht auf eine laserstrahlgeführte Probe aus Aluminium und Polyamid 6.6 im Überlappstoß.

vielversprechende Parameter wurden entsprechende Proben für den Zugversuch und die metallografische Untersuchung erstellt. Um grobe oberflächige Verunreinigungen auf der Kunststoffoberfläche zu beseitigen, wurden die PA- und PVC-Proben unmittelbar vor dem Fügeprozess mit Schleifpapier (P1200) angeschliffen und mit Isopropanol gereinigt.

Die Zugproben wurden auf einer Länge von 20 mm überlappt und mittig gefügt, **Bild 5**. Das Aluminiumblech wurde breiter als das Polyamidteil zugeschnitten, um ein Vor- bzw. Nachwärmen zu erreichen, wodurch die Fügefläche vergrößert werden konnte.

### 3 Ergebnisse im Überlappstoß Aluminium/ Polyamid 6.6

Die besten Ergebnisse der Aluminium-Polyamid-Verbindung wurden mit einer Streckenenergie von 8,88 J/mm nach der Gleichung  $E_s = P/F$  [J/mm] erzielt (P – Leistung, F – Vorschubgeschwindigkeit). Weiterhin konnten durch die gewählte Parameterkombination Fehler im Aufschmelzbereich des Aluminiums, wie Risse und Poren, verhindert oder auf ein Minimum reduziert werden. Letztere sind jedoch durch die Wasserstoffaffinität der Aluminiumschmelze und dem Nichtdurchschmelzen des Aluminiumblechs nicht immer vermeidbar [1]. Ein Anpassen der Leistung auf 370 W, in Verbindung mit einer erhöhten Modulationsgeschwindigkeit, führte zu einem homogeneren Aufschmelzen auf gesamter Nahtbreite, wodurch ein Wiederaufschmelzen verhindert werden konnte. Das Schmelzbad war in vorherigen Parameterkombinationen mit geringerer Leistung, geringerem Vorschub und geringerer Modulationsgeschwindigkeit inhomogener, was sich in einer erhöhten Anzahl an Fehlstellen im Aluminium bemerkbar machte.

Die Entgasungsmöglichkeit der metallischen Schmelze mit den optimierten Parametern wird durch ein trichterförmiges Ausbilden der Dampfkapillare verbessert. Diese bildet sich bei der erhöhten Modulationsgeschwindigkeit nicht mehr senkrecht zur Oberfläche aus, sondern flacht leicht ab. Diese Neigung der Dampfkapillare führt entgegen der Vorschubrichtung unweigerlich zu Leistungseinbußen. Die resultierende trichterförmige Ausbildung dieses Kanals weist jedoch einen größeren Querschnitt auf, wodurch die Gase besser in diesem an die Schmelzbadoberfläche steigen. Zudem werden die Schmelzgase bei einer trichterförmigen

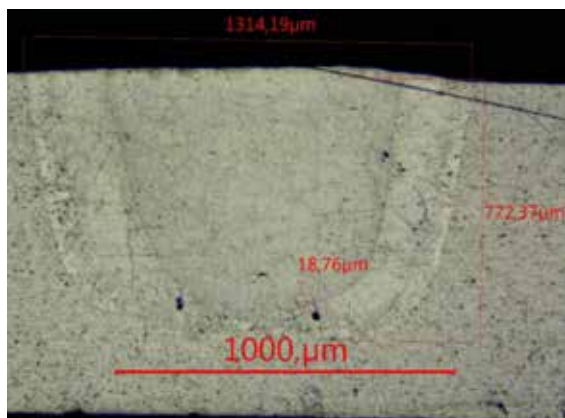


Bild 6 • Querschliff durch das Aluminiumblech mit aufgezeigter Eindringtiefe des Laserstrahls in das Aluminiumblech und optimierter Wärmeübertragung sowie einem fehlerfreien Aufschmelzbereich.

Ausbildung in einem geringeren Maß von den entstehenden Metalldämpfen in der Dampfkapillare in die Schmelze gedrückt, wodurch der Druckausgleich wiederum zusätzlich begünstigt wird [2]. Damit waren die ersten Probleme gelöst – die Bestimmung der genauen Einschmelztiefe des Laserstrahls in die Aluminiumprobe sowie das Vermeiden von auftretenden Fehlern wie Heißrisse oder Poren im Aluminium, **Bild 6**.

Ein kritischer Faktor, welcher – sowohl beim Aluminium als auch beim Polyamid – unter anderem zu einer schlechten Nahtoberfläche führt ist ein Durchschmelzen des Aluminiumblechs. Dabei kommt die flüssige Aluminiumschmelze mit dem Kunststoff in direkten Kontakt, welcher dann schlagartig verdampft. Dabei entstehen große Inhomogenitäten in der Verbindung, da Teile der Schmelze durch die entstehenden Gase, welche nur nach oben hin entweichen können, herausgeschleudert werden. Teilweise drücken sich Teile der Polyamidschmelze durch die so entstehenden Kanäle nach oben hin durch. Um dies zu verhindern, muss entweder die Leistung reduziert oder der Vorschub erhöht werden. Bei Erhöhung des Vorschubs muss jedoch, wie zuvor beschrieben, die Geschwindigkeit der Strahloszillation gleichermaßen gesteigert werden. Wird der Laserstrahl genau mit einem Umlauf seiner Kreisbahnbewegung mit einem Zehntelmillimeter Vorschub des Koordinatentischs eingestellt, können in diesem Fall gute Ergebnisse erzielt werden. Die Näherungsformel des Verhältnisses von Vorschub zur Geschwindigkeit der Strahloszillation lautet

$$(F \cdot 2\pi \cdot R_x) / (60v) \approx 0,1 \text{ mm},$$

mit  $F$  – Tischvorschub,  $v$  – Geschwindigkeit der Strahloszillation und  $R_x$  – Modulationsradius.

Weiterhin können erstmals Polyamidrückstände nach dem Trennen der Verbindung auf der Aluminiumoberfläche nachgewiesen werden, anzunehmenderweise das Hauptindiz für die verbesserte Anbindung. Durch die geeigneten Veränderungen der Parameter ist zudem eine Veränderung der Blasenbildung im Polyamidschmelzbad erkennbar. Die Blasen treten dabei



Bild 7 • Tropftest der Oberflächenenergie; links: unbehandelte Aluminiumoberfläche, rechts: speziell behandelte Aluminiumoberfläche.

nicht mehr so groß und einzeln auf, sondern weisen eine kleinere und viel feiner verästelte Struktur auf, welche sich auch in den Polyamidrückständen auf der Aluminiumoberfläche widerspiegelt. Weiterhin entstehen die Blasen nicht nur hauptsächlich in der Mitte des Kunststoffschmelzbaus, sondern bilden sich bis in die Randzonen des Schmelzbaus hin aus. Das lässt auf einen gleichmäßigeren Wärmeeintrag auf gesamter Breite der Schmelzzone schließen. Dieser wird wahrscheinlich durch die tiefere Einschmelzung im Aluminium und die kürzere Prozesszeit hervorgerufen. Der geringere Abstand vom Wurzelbett zur Kontaktfläche des Aluminiumteils mit dem Kunststoffteil ermöglicht eine konzentriertere und intensivere Wärmeabgabe, **Bild 3**.

Die besseren Anbindungsergebnisse spiegeln sich auch in den Fügeflächen wider. Diese fallen flächendeckender und homogener aus und weisen keine Lücken wie zuvor auf. Im Polyamidschmelzbad kann bis auf ein, zwei kleine Blasen, keine weitere Blasenbildung erkannt werden. Dies wird wahrscheinlich durch die extrem kurze Prozessdauer von 0,6 s in Verbindung mit der hohen Leistung erreicht. Die geringe Wulstbildung in den An- und Ausfahrzonen lässt darauf schließen, dass das Polyamid nur in seinen obersten Schichten aufgeschmolzen wird. Somit wird auch verhältnismäßig weniger Polyamid plastifiziert, welches potenziellen Wasserdampf beim Aufschmelzen bilden kann. Weiterhin fällt die Breite des Kunststoffschmelzbaus gegenüber geringeren Vorschubgeschwindigkeiten kleiner aus, was auf die resultierende kürzere Zeit der Wärmeeinbringung zurückgeführt werden kann [3]. Dadurch wird die Anpresskraft auf weniger plastifiziertes Polyamid verteilt, wodurch sich die Adhäsionskräfte dort anzunehmenderweise besser ausbilden können, da es zu einer stärkeren Kontaktierung der Fügeflächen kommt. Zudem kann die Blasenbildung durch erhöhte Anpresskraft minimiert werden, da ein stärkeres Anpressen der Kunststoffschmelze dem Expandieren der Gase im Kunststoff entgegenwirkt [4].

Weiterhin konnte die Fügequalität durch eine spezielle Oberflächenvorbehandlung der Aluminiumproben gesteigert werden, wodurch die Oberflächenbenetzbarkeit verbessert wurde. Rein qualitativ wird das Benetzungsvermögen in **Bild 7** dargestellt. Mit den so präparierten Aluminiumoberflächen konnte die Zugkraft der laserstrahlgefügteten Aluminium/PA-6.6-Proben auf 1.800 N gesteigert werden, **Bild 8**, was einer errechneten Scherspannung von 33,48 N/mm<sup>2</sup> entspricht, **Bild 9**.

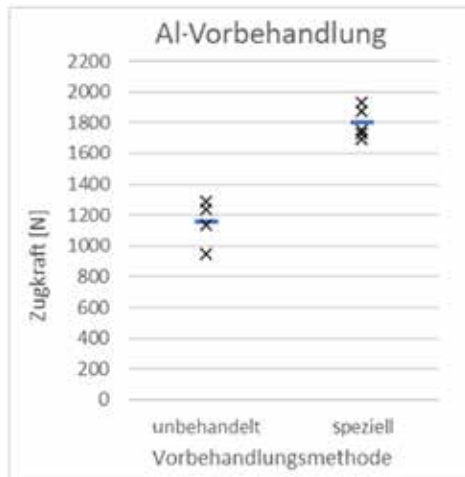


Bild 8 • Steigerung der Zugfestigkeiten der laserstrahlgefügten Verbindung zweier Aluminium/PA-6.6-Proben durch spezielle Vorbehandlungsmethoden der Aluminiumoberflächen.



Bild 9 • Steigerung der errechneten Scherspannungen der laserstrahlgefügten Aluminium/PA-6.6-Proben durch spezielle Vorbehandlungsmethoden der Aluminiumoberflächen.



Bild 10 • PVC-Rückstände auf der Aluminiumoberfläche nach Trennung der gefügten Proben.

#### 4 Ergebnisse im Überlappstoß Aluminium/ Polyvinylchlorid

Bei der Werkstoffpaarung Al/PVC konnten Anbindungsergebnisse erst durch ein thermisches Zersetzen des Polyvinylchlorids erreicht werden. Dadurch färbt sich das Kunststoffschmelzbad gelb, was auf eine Anreicherung mit Chlor schließen lässt. Erst dann werden auch PVC-Rückstände nach dem Trennen der

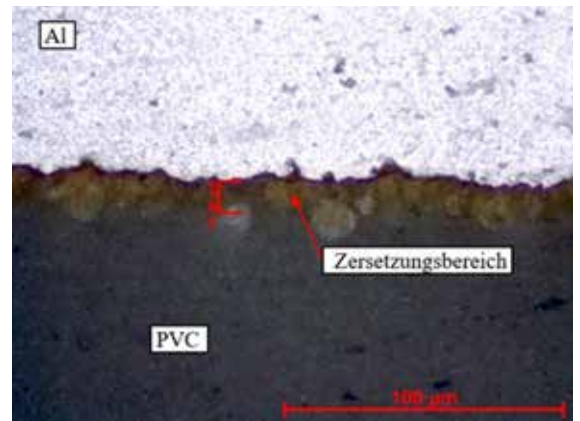


Bild 11 • Querschliff einer laserstrahlgefügten Aluminium-PVC-Verbindung, deutlich erkennbar ist der Zersetzungsbereich des PVCs an der Phasengrenze sowie die spaltenfreie Anbindung des PVCs an das Aluminium.

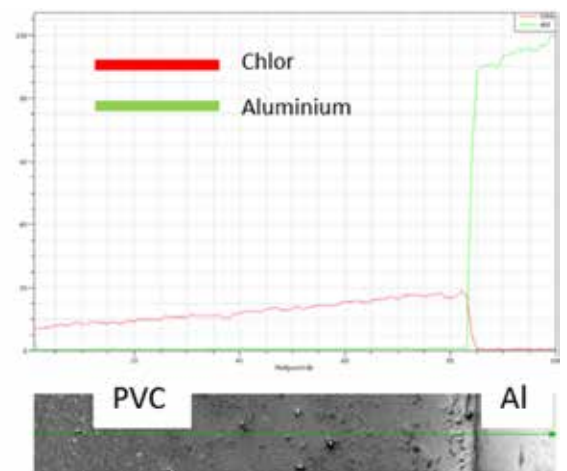


Bild 12 • Verteilung von Chlor und Aluminium in der laserstrahlgefügten Verbindung Al/PVC (ermittelt durch energiedispersive Röntgenspektroskopie und Analyse der Elemente).

Verbindung am Aluminium ersichtlich, **Bild 10**. Ein Aufschmelzen des PVCs bis kurz vor seiner Zersetzung kann keine Anbindung erzielen. Durch seinen geringen Schmelzpunkt von 80°C ist eine Plastifizierung auch neben der Naht erkennbar, obwohl die Prozesszeit nur 0,6 s beträgt.

Die mangelnde Anbindung wird unter anderem damit begründet, dass durch die rasche Plastifizierung des PVCs nicht genügend Anpresskraft auf die Schmelze ausgeübt werden kann, damit diese am Aluminium haftet. Daher kann auch keine Haftung mit geringerem Vorschub und Leistungskombinationen erzielt werden. Durch den Zersetzungsprozess hingegen bilden sich Blasen in der Mitte der Fügezone. Die somit entstehende Volumenerhöhung der Schmelze drückt diese kräftiger an die Aluminiumoberfläche, wodurch ein besserer Kontakt hergestellt werden kann. Diese Annahme wird ebenfalls von F. Yusof und Y. Miyashita geteilt [4; 5]. Die Blasenbildung und Zersetzungserscheinungen sind in **Bild 11** beispielhaft wiedergegeben.

Zusätzlich zeigt eine EDX-Analyse eine Anreicherung des Chlorgehalts zur Fügezone hin, was die Annahme der thermischen Zersetzung bestätigt, **Bild 12**. Die im

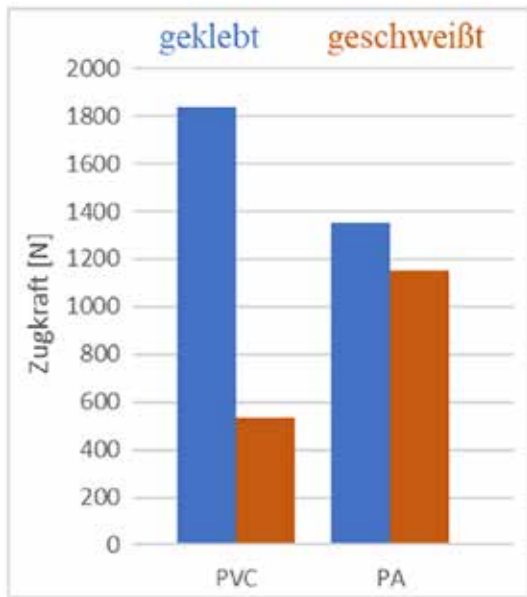


Bild 13 • Vergleich der Zugkräfte der herkömmlich geklebten (blau) und der laserstrahlgefühten Proben (braun).

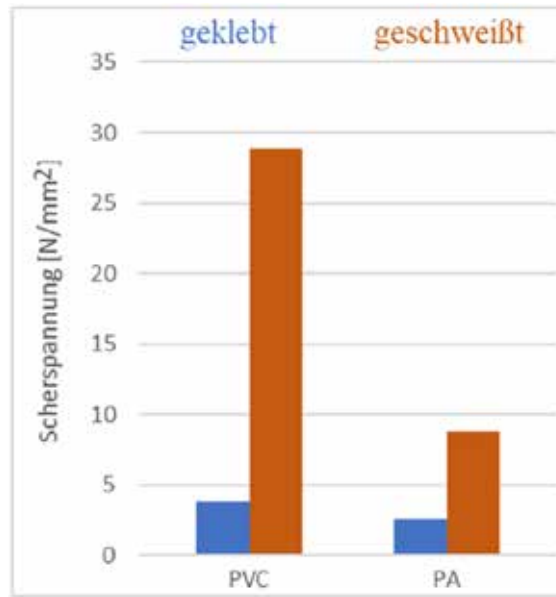


Bild 14 • Vergleich der errechneten Scherspannungen der herkömmlich geklebten (blau) und der laserstrahlgefühten Proben (braun)

Bild durch den grünen Pfeil dargestellte Strecke wurde abgefahren und gleichzeitig die Elementverteilung ermittelt. Der rot dargestellte Graph gibt den Chloranteil, der grün dargestellte Graph den Aluminiumanteil an. Bei den Zugversuchen konnten Werte von 530 N für die Zugkraft und 28,9 N/mm<sup>2</sup> für die Scherspannung erreicht werden. Bei der Berechnung der Scherspannungen ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur die zersetzten Bereiche des PVC-Schmelzbads eine anbindende Wirkung aufweisen. Somit wurden die Scherspannungen über die Anbindungsfläche der PVC-Rückstände am Aluminium berechnet.

## 5 Vergleich der herkömmlich geklebten und der laserstrahlgefühten Proben

Um einen Vergleich zum herkömmlichen Kleben ziehen zu können, wurden sowohl laserstrahlgefühte als auch herkömmlich geklebte Zugproben mit den gleichen Abmaßen hergestellt. Die Überlappungslänge der geklebten Proben betrug 20 mm, was eine gesamte Klebfläche von 20 mm × 25 mm ergab. Die Aluminiumproben (Rohzustand) wurden mit Isopropanol gereinigt, ebenso die Polyamid- bzw. PVC-Proben. Als Klebstoff wurde „Loctite 406“ verwendet. Die Trocknung der Klebung betrug 48 h bei Raumtemperatur. Es wurden jeweils vier Zugproben für die unterschiedlichen Werkstoffpaarungen erstellt. **Bild 13** bzw. **Bild 14** stellen die Mittelwerte der Ergebnisse dar.

Vergleicht man die herkömmlich geklebten mit den laserstrahlgefühten Proben, so lässt sich vor allem bei den PVC-Proben eine deutliche Steigerung der maximalen Zugkräfte feststellen, was vor allem auf die größere Fügefläche zurückzuführen ist. Die geringere Reißdehnung führt dazu, dass die PVC-Zugproben zudem besser als die Polyamid-Zugproben abschneiden, obwohl beide über die gleiche geklebte Fügefläche verfügen. Insgesamt erreichen die herkömmlich geklebten Proben

höhere Zugkräfte. Die reinen Zugkräfte sind jedoch nur relativiert zu sehen, da die Klebfläche fast viermal so groß ist wie die Fügefläche der laserstrahlgefühten Proben. Berechnet man die Scherspannungen, so liefern die laserstrahlgefühten Proben aufgrund der kleineren Fügefläche höhere Werte. Die größere effektiv gefügte Fläche der herkömmlich geklebten Proben führt zudem zu einem höheren Gradienten der Scherspannung innerhalb der Fügefläche und begünstigt somit ein allmähliches Ablösen. Die laserstrahlgefühten Proben werden zudem durch ihre geringe effektive Fügefläche, welche der Kunststoffschmelzbadbreite entspricht, im Zug-Scherversuch begünstigt. Jedoch beeinflusst dies nicht die Tatsache, dass beim Laserstrahlfügen durch Wärmeleitung hohe Scherspannungen auf kleinstem Raum realisiert werden können.

## 6 Fazit

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das Herstellen laserstrahlgefühter Verbindungen von „EN AW-6082/Polyamid 6.6“ bzw. „EN AW-6082/PVC-Hart“ möglich und eine Alternative zum herkömmlichen Kleben ist. Besonders die extrem kurzen Prozesszeiten des Laserstrahlfügens sind dabei für industrielle Anwendungen attraktiv. Die Blasenbildung im Polyamid-6.6-Schmelzbad konnte durch die gewählte Parameterkombination fast komplett beseitigt werden, da durch die kurze Prozessdauer von 0,6 s nur die Oberfläche des Polyamids aufgeschmolzen wurde. In Verbindung mit der erhöhten Oberflächenenergie der behandelten Aluminiumproben konnten Zugkräfte von über 1100 N beziehungsweise eine Scherspannung von 8,5 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Damit weisen die laserstrahlgefühten Al/PA-Proben weitaus höhere Werte auf als die herkömmlich geklebten Proben mit Werten von durchschnittlich 3,5 N/mm<sup>2</sup>. Durch die optimierte Oberflächenbehandlung kann die Kunststoffschmelze die

behandelten Aluminiumproben aufgrund der erhöhten Oberflächenenergie besser benetzen, wodurch sich die Haftungsmechanismen verstärkt ausbilden können.

Bei der Werkstoffpaarung Al/PVC konnten Scherspannungen bis zu  $28 \text{ N/mm}^2$  erreicht werden, sie liegen damit ein Vielfaches höher als bei den geklebten Proben. Die entstandene Verbindung kam jedoch erst durch den Zersetzungsprozess des PVCs zustande. Die genauen Umstände, welche zu der messbaren Steigerung der Verbindungsfestigkeit zwischen den artungleichen Werkstoffen führen, können derzeit noch nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Einerseits kann spekuliert werden, dass die Anbindung darauf beruht, dass die entstehenden Gase im Zersetzungsgebiet durch ihr Expandieren die Schmelze stärker an die Aluminiumoberfläche drücken und dadurch einen intensiveren Kontakt der Fügeflächen mit einer erhöhten Adhäsionskraft hervorrufen. Andererseits korreliert die Anreicherung des Chlorgehalts innerhalb des Kunststoffs – zur Fügezone hin und vor allem unmittelbar unter der Aluminiumschmelzzone – mit der Zunahme der Bruchkraft. Inwieweit eine verstärkte Ausbildung der Adhäsionskräfte durch die

Mechanismen funktioneller Gruppen ermöglicht wird, bedarf weiterer Untersuchungen [6].

#### Literatur

- [1] Enz, J.: Laserstrahlschweißen von hochfesten Aluminium-Lithium Legierungen. HZG REPORT 2012-2, S. 11...13, 68. Helmholtz-Zentrum Geesthacht 2012.
- [2] Tang, Zuhao: Heißrissvermeidung beim Schweißen von Aluminiumlegierungen mit einem Scheibenlaser. Diss. Univ. Bremen 2004, Strahltechnik Bd. 53, S. 3/8, BIAS-Verlag 2014.
- [3] Schrickler, K., u. a.: Experimental investigation and modeling of the melting layer in polymer-metal hybrid structures. Wdg. in the World 59 (2015), H. 3, S. 407/12.
- [4] Miyashita, Y., u. a.: Formation behavior of bubbles and its effect on joining strength in dissimilar materials laser spot joining between PET and SUS304. Mechanical Engineering J. 2 (2015), H. 1.
- [5] Yusof, F., u. a.: Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate. Science and Technology of Welding and Joining 17 (2012), H. 7, S. 544/49.
- [6] Lamberti, C.: Optimierung und Charakterisierung einer mittels Laserstrahl gefügten Verbindung zwischen Aluminium und Polyamid 6.6. Diss., S. 128/29. University of Luxembourg 2018.



Auch als App  
für iOS  
erhältlich!

## Prüfungsfragenkatalog für den Schweißer

Mehr als 800 Multiple-Choice-Fragen behandeln alle Wissensgebiete, in denen sich ein angehender Schweißer auskennen muss. Damit ermöglicht der Fragenkatalog die optimale Vorbereitung auf alle Schweißerprüfungen.

Die Fragen sind auf nationale und internationale Schweißerprüfungen abgestimmt und entsprechen der aktuell gültigen Normung.

Pro Frage ist jeweils nur eine Antwort richtig – ein Lösungsschlüssel am Ende des Buches hilft beim Überprüfen der Ergebnisse. Dies garantiert eine ideale Prüfungsvorbereitung.

### Der Fragenkatalog ist unterteilt in die Blöcke:

- Schweißprozesse
- Werkstoffe/Schweißzusatzwerkstoffe
- Arbeitssicherheit
- Nahtvorbereitung
- Arbeitstechnik
- Qualitätssicherung

4. Auflage 2016,  
84 Seiten broschiert,  
DIN A4, Best.-Nr.: 600085  
Preis: 26,00 Euro  
Preis der App: 10,99 Euro



DVS Media GmbH • Aachener Straße 172 • 40223 Düsseldorf

T +49 211 1591-162 • F +49 211 1591-150 • [vertrieb@dvs-media.info](mailto:vertrieb@dvs-media.info) • [www.dvs-media.eu](http://www.dvs-media.eu)