

Original

Ventzke, V.; Riekehr, S.; Horstmann, M.; Haack, P.; Kashaev, N.:
**Einseitiges Nd:YAG-Laserstrahlschweissen zum Herstellen
von T-Stossverbindungen aus Aluminiumlegierungen
für den Flugzeugbau**
In: Schweißen und Schneiden (2014) DVS-Verlag

2014 Vol. 66(1-2): 22-26

Einseitiges Nd:YAG-Laserstrahlschweißen zum Herstellen von T-Stoßverbindungen aus Aluminiumlegierungen für den Flugzeugbau

Im Flugzeugbau werden T-Stoßverbindungen aus Aluminiumlegierungen entweder durch Nieten oder zweiseitiges Laserstrahlschweißen hergestellt. Der Beitrag beschreibt das einseitige Nd:YAG-Laserstrahlschweißen als Methode zur Herstellung von Haut-Clip-Verbindungen aus AA6156-T4/AA6013-T6 und AA2139-T3/AA6013-T6 in T-Stoßausführung. Ein grundlegendes Problem bei dieser Vorgehensweise ist das hohe Porositätsniveau in einseitig lasersrahlgeschweißten T-Stoßverbindungen. Es wird gezeigt, dass die Porenbildung nicht durch die Art der Aluminiumlegierungen, die Schweißrichtungsvariationen und die Fügeflächenvorbereitung bestimmt wird, sondern durch einen zu hohen Einstrahlwinkel zwischen Laserstrahl und Hautfeld. Erforderlich ist eine Einstrahlung des Laserstrahls im Bindebereich zwischen Clip und Hautfeld, um durch Verringerung des Einstrahlwinkels eine Reduzierung des Porositätsniveaus erzielen zu können.

1 Einleitung

Zweiseitiges Laserstrahlschweißen zur Herstellung von Haut-Stringer-Verbindungen aus Aluminiumlegierungen in Rumpfstrukturen hat sich im Flugzeugbau bewährt [1...3]. Mit diesem Verfahren können fehlerfreie und symmetrische Laserstrahlschweißnähte erzielt werden [1...4]. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde der Frage nachgegangen, inwieweit Haut-Clip-Verbindungen aus AA6156-T4/AA6013-T6 und AA2139-T3/AA6013-T6 im T-Stoß durch einseitiges Nd:YAG-Laserstrahlschweißen im cw-Betrieb realisiert werden können. Das einseitige Laserstrahlschweißen war ein Teilaspekt im von der EU geförderten Projekt „Wel-Air“ (Development of short distance welding concepts for airframes) [11]. Der Verwendungszweck von Clips (senkrecht zu den Stringern auf dem Hautfeld angebrachte Blechteile) besteht darin, dass an ihnen Druckspanten montiert werden. Aluminiumlegierungen aus der Familie AA6XXX, zum Beispiel die in dieser Arbeit verwendeten Aluminiumlegierungen AA6156-T4 und 2 AA6013-T6, werden als schweißgeeignet eingestuft [1...5]. Die eingeschränkte Schweißseignung von AA2024 führte zur Entwicklung der Aluminiumlegierung AA2139 [2], die bei den hier beschriebenen Untersuchungen ebenfalls zum Einsatz kam. Ziel der Arbeit war es, den einseitigen Laserstrahlschweißprozess unter Berücksichtigung der T-Stoßgeometrie auf die zu fügenden Werkstoffe abzustimmen und die Qualität der Verbindungen zu bewerten. Aus den Untersuchungen waren Anhaltspunkte zur Qualitätsverbesserung abzuleiten, da Vorversuche ergeben haben, dass die T-Stoßverbindungen zahlreiche Poren aufwiesen. Der Ansatz des einseitigen Laserstrahlschweißens zur Herstellung von T-Stoßverbindungen bietet sich vor allem dann an, wenn die zu fügenden Komponenten durch geometrische Randbedingungen



Dipl.-Phys. Volker Ventzke
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofforschung, Geschäftsbereich Werkstoffmechanik, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht
volker.ventzke@hzg.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=200953



Dipl.-Ing. Stefan Riekehr
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofforschung, Geschäftsbereich Werkstoffmechanik, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht
stefan.riekehr@hzg.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=206807



Dipl.-Phys. Manfred Horstmann
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofforschung, Geschäftsbereich Werkstoffmechanik, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht
manfred.horstmann@hzg.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=207065



Peter Haack
Technischer Mitarbeiter am Institut für Werkstofforschung, Geschäftsbereich Werkstoffmechanik, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht
peter.haack@hzg.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=207066

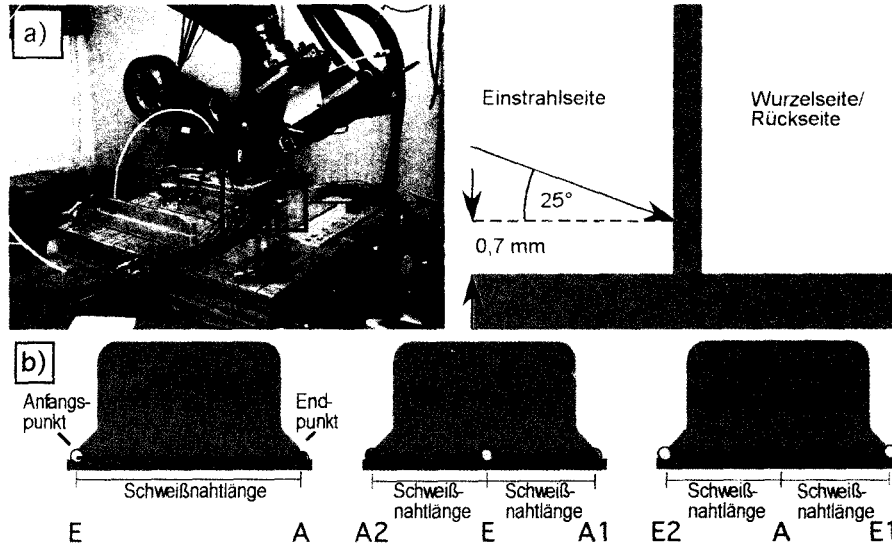


Dr.-Ing. Nikolai Kashaev
Leiter der Abteilung „Fügen und Bewerten (WMF)“ am Institut für Werkstofforschung, Geschäftsbereich Werkstoffmechanik, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht
nikolai.kashaev@hzg.de
www.schweissenundschneiden.de/?id=206804

Aluminium/Aluminiumlegierungen, Luft- und Raumfahrzeugbau, Laserstrahlschweißen, Poren, Rissbildung, Schweißnahtfehler, Werkstofffragen, Werkstoffkombinationen

schwer zugänglich sind. Dies kann der Fall sein, wenn in Rumpflängsrichtung Stringer verlaufen und zwischen ihnen die Clips positioniert werden müssen. Die Besonderheit von Haut-Clip-Verbindungen besteht darin, dass es sich hierbei um kurze Schweißnähte handelt, deren jeweiligen Einschweißpunkte sich innerhalb einer mechanisch beanspruchten Rumpfstruktur befinden. Diese Punkte markieren hierbei den geometrischen Übergang zwischen Haut und Clip und können die Wirkung von Kerben haben. Eine weitere Besonderheit ist darin zu sehen, dass die Wärmeeinbringung beim einseitigen Laserstrahlschweißen und die daraus resultierende Tempera-

Bild 1 • Versuchsanordnung zum Nd-YAG-Laserstrahlschweißen von T-Stoßverbindungen (a) und Schweißrichtungsvariationen (b).



turverteilung nicht symmetrisch sind, wie dies beim zweiseitigen Laserstrahlschweißen der Fall ist [6].

2 Werkstoffe und Vorgehensweise

Für die Durchführung der Laserstrahlschweißversuche wurden die luftfahrtspezifischen Aluminiumlegierungen AA6156-T4 (Dicke $d = 4,5$ mm) bzw. AA2139-T3 ($d = 3,2$ mm) als Hautwerkstoff und AA6013-T6, ($d = 2,0$ mm) als Clip-Werkstoff ausgewählt. In Tabelle 1 sind die Probenvorbereitungen und Parameter für die Laserstrahlschweißversuche aufgeführt. Daraus lässt sich unter anderem entnehmen, dass die Fügeflächenvorbereitung zur Beseitigung von Oxidschichten und Verunreinigungen systematisch modifiziert worden ist. Die Schweißversuchsordnung ist in Bild 1a schematisch wiedergegeben. Eine Variation der Schweißrichtungen ist in Anlehnung an [10] ebenfalls vorgenommen worden, wobei T-Stoßkonfigurationen mit einem Anfangs- (A) und einem Endpunkt (E), mit zwei Anfangspunkten (A1, A2) und einem Endpunkt (E) sowie mit zwei Endpunkten (E1, E2) und einem Anfangspunkt (A) hergestellt wurden. Diese Richtungsvariationen gehen aus Bild 1b hervor.

Die Variation der Schweißrichtungen und der Fügeflächenvorbereitung wurde durchgeführt, um deren Einfluss auf die Qualität der Laserstrahlschweißnaht zu beurteilen. Hinter der Schweißrichtungsvariation stand die Überlegung, dass unter Produktionsbedingungen ein

Tabelle 1 • Art der Fügeflächenvorbereitung und Parameter beim Laserstrahlschweißen.

Art der Fügeflächenvorbereitung	
Variante 1	keine mechanische Bearbeitung, nur Reinigung mit Aceton
Variante 2	Haut und Clip manuell geschliffen, Reinigung mit Aceton
Variante 3	Haut und Clip maschinell geschliffen, Reinigung mit Aceton
Variante 4	Haut mit SiO ₂ -Perlen gestrahlt und Clip manuell geschliffen, Aceton-Reinigung
Variante 5	Haut und Clip mit SiO ₂ -Perlen gestrahlt, Reinigung mit Aceton
Laserstrahlschweißparameter	
cw-Leistung	3,0 kW
Brennweite	200 mm
Fokuslage	0,0 mm
Vorschub	1,2 bis 3,0 m/min
Drahtzufuhr	4,0 bis 5,0 m/min
Heliumdurchfluss	10 bis 25 l/min einstrahlseitig 10 bis 15 l/min rückseitig
Einstrahlwinkel und -höhe	25° bei 0,7 mm bezogen auf die Haut

Haut-Clip-Aufbau infolge geometrischer Begrenzungen durch bereits mit dem Hautfeld geschweißter Stringer und durch laseroptische Komponenten schwer zugänglich sein kann. Die T-Stoßverbindungen sind zerstörungsfrei

One-sided Nd:YAG laser beam welding for the manufacture of T-joints made of aluminium alloys for aircraft construction

In aircraft construction, T-joints between aluminium alloys are manufactured either by riveting or by two-sided laser beam welding. The article describes one-sided Nd:YAG laser beam welding as a method of manufacturing skin/clip joints between the AA6156-T4/AA6013-T6 and AA2139-T3/AA6013-T6 aluminium material combinations in T-joint designs. One fundamental problem associated with this procedure is the high porosity level in T-joints executed by means of one-sided laser beam welding. It is shown that the formation of pores is determined not only by the types of the aluminium alloys, the

variations in the welding directions and the preparation of the joining faces but also by an excessive angle of incidence between the laser beam and the skin field. The laser beam must be transmitted in the bonding region between the clip and the skin field in order to reduce the porosity level by decreasing the angle of incidence.

aluminium/aluminium alloys, aerospace manufacturing, laser welding, pores, crack formation, weld defects, material questions, material combinations

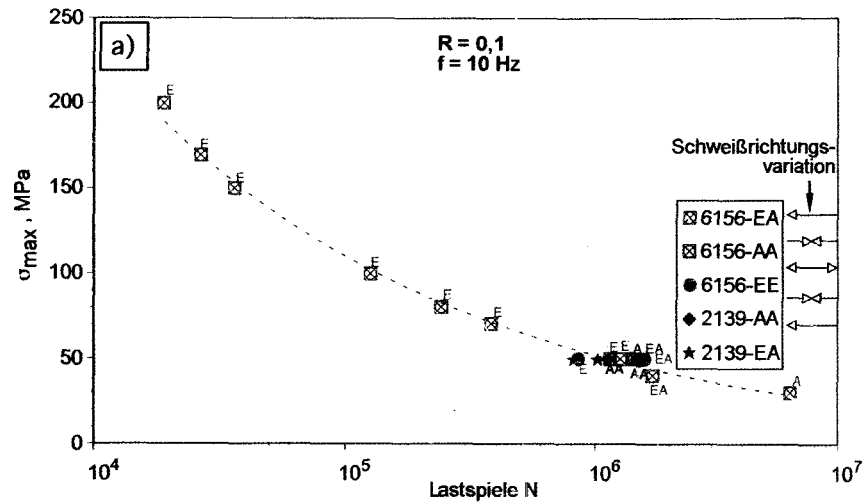


Bild 2 • Dauerschwingversuche an Nd:YAG-laserstrahlgeschweißten T-Stoßverbindungen (die Fotos zeigen beispielhaft eine T-Stoßverbindung mit einem Anfangs- und einem Endpunkt); a) Wöhlerkurve, b) Rissinitiiierung am Endpunkt, c) Parallelschliff (zeigt Makroporen und einen Riss am Endpunkt).

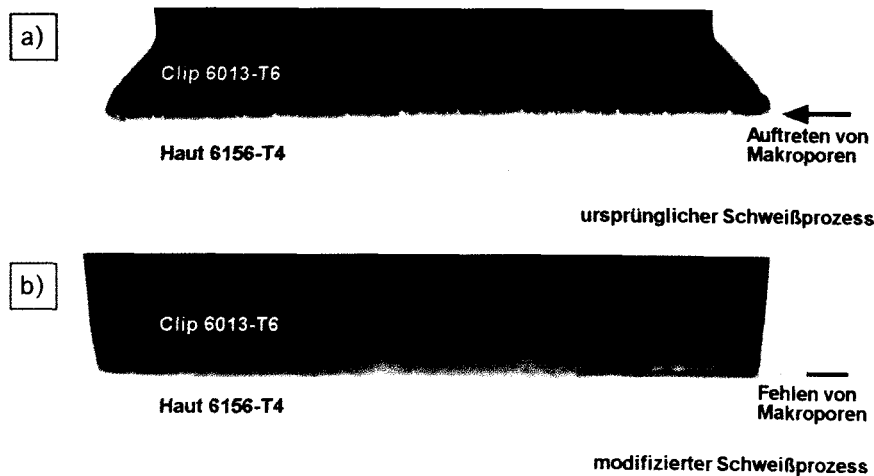
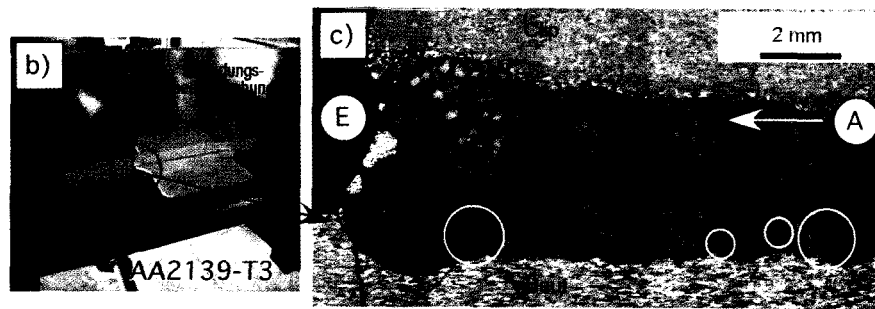


Bild 3 • Positivabzüge von Röntgenfilmen; a) Makroporen in der Schweißnaht bei Einstrahlwinkel 25°; b) Auswirkung der Verringerung des Einstrahlwinkels auf 11° auf die Nahtqualität.

mittels Röntgenprüfung nach DIN EN ISO 17636-1 und metallografisch anhand von Längs- und Parallelschliffproben bewertet worden. Mikrohärtprüfung, Dauerfestigkeitsprüfung und Zugversuch rundeten die Charakterisierung der T-Stoßverbindungen ab. Des Weiteren wurden an den einseitig laserstrahlgeschweißten T-Stoßverbindungen Temperaturmessungen durchgeführt, um Aufschluss über die lokale Verteilung der Maximaltemperaturen zu bekommen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die mit den in Tabelle 1 angegebenen Laserstrahlschweißparametern hergestellten T-Stoßverbindungen sind durch eine asymmetrische Schweißnahtform gekennzeichnet. Die Schweißnähte zeigen teilweise einen Einfall auf der Rückseite. Das einseitig Laserstrahl-

schweißen führte neben einer vollständigen Durchschweißung im T-Stoß zu einer Einschweißung im Hautbereich mit maximalen Einschweißstiefen von 1,0 bis 2,5 mm, Bild 2c. Die Röntgenprüfung ergab, dass sämtliche laserstrahlgeschweißten T-Stoßverbindungen durch ein hohes Porositätsniveau gekennzeichnet sind, Bild 3a. Die Makroporen sind über die gesamte Schweißnahtlänge verteilt. Die lichtmikroskopischen Panoramaaufnahmen in Bild 4 zeigen am Beispiel von T-Stoßverbindungen mit drei Einschweißpunkten, dass diese Makroporen bevorzugt an der Wurzelseite anzutreffen sind. Als ungünstig ist die Richtungsvariation mit zwei Endpunkten E1 und E2 und einem Anfangspunkt A in der Mitte der Laserstrahlschweißnaht anzusehen, weil dort keine Überlappung zustande kam, Bild 4a. Ein wesentlicher Grund bestand darin, dass eine genaue Positio-

nierung des Laserstrahls nicht möglich war. Dagegen lieferte die Richtungsvariation mit zwei Anfangspunkten A1 und A2 und einem Endpunkt E eine vollständige Durchschweißung in Längsrichtung, Bild 4b.

Die Einschweißpunkte an den jeweiligen Clip-Enden einer T-Stoßverbindung stellen einen geometrischen Übergang zwischen Haut und Clip dar und haben somit die Wirkung von Kerben, von denen Risse ausgehen können. Dass dies der Fall war, geht aus Bild 2a und b hervor, die zeigen, dass sich zwischen mechanisch beanspruchter Haut und unbelastetem Clip infolge von Spannungskonzentrationen ein Ermüdungsriss in der Wärmeeinflusszone gebildet hat. Während der Ausbreitung verblieb der Riss zunächst in der Wärmeeinflusszone und breitete sich dann nahezu senkrecht zur Schweißnaht in den Grundwerkstoff der Haut aus. Es ist hier festzuhalten, dass von den Poren keine Risse ausgingen. Ein Wöhler-Diagramm ist in Bild 2a wiedergegeben. Es ist festzustellen, dass die Unterschiede zwischen den jeweiligen T-Stoßvarianten geringfügig sind. Das Bruchversagen wurde nicht durch die Werkstoffe und Schweißrichtungsvariationen gemäß Bild 1b selbst bestimmt, sondern vielmehr durch Kerbwirkung im Übergangsbereich zwischen Clip und Haut.

An AA6156-T4 als Grundwerkstoff, an einer laserstrahlgeschweißten Stumpfstoßverbindung aus dieser Legierung und an einer einseitig laserstrahlgeschweißten T-Stoßverbindung aus AA6156-T4 als Haut- und AA6013-T6 als Clip-Werkstoff mit einem Anfangs- und einem Endpunkt sind Zugversuche durchgeführt worden. In den T-Stoßverbindungen wurde der Haut-Werkstoff bis zum Bruchversagen quer zur Laserstrahl-schweißnaht beansprucht. Die ermittelten Kenndaten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Bindeeffizienz $R_{p0,2}^{(FZ)}/R_{p0,2}^{(GW)}$ bzw. $R_m^{(FZ)}/R_m^{(GW)}$ der Stumpfstoßverbindung liegt bei etwa 91% bzw. etwa 89% und ist im Zusammenhang mit dem Härteverlust infolge der lokalen Auflösung der Ausscheidungshärtung zu sehen [7; 8]. Die deutlich geringere Bruchdehnung von 5% der Stumpfstoßverbindung im Vergleich zum Grundwerkstoff ist auf Dehnungskonzentrationen in der Laserstrahl-schweißnaht bzw. an der Laserstrahl-schweißnaht zurückzuführen [9]. Das heißt, dass die gesamte Verformung auf eine kurze Probenlänge entsprechend der Breite aus Wärmeeinflusszone und Laserstrahl-schweißnaht beschränkt war. Das führte bezogen auf die gesamte Prüflänge von 50 mm zu der geringen Bruchdehnung, obwohl die Laserstrahl-schweißnaht selbst durch Duktilität gekennzeichnet ist [9]. Im Vergleich zur Stumpfstoßverbindung wiesen die T-Stoßverbindungen höhere Werte für Dehngrenze und Zugfestigkeit auf, was auf einen Versteifungseffekt durch den Clip zurückzuführen ist. Das Bruchversagen trat hauptsächlich entlang der Schmelzlinie ein.

Die Ursache für die Porenbildung konnte durch die metallografischen Untersuchungen nicht geklärt werden. Einen Hinweis auf die Entstehungsursache lieferten aber die Temperaturmessungen. Die grafische Auftragung der Maximaltemperaturen über die Position der

Tabelle 2 • Dehngrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A_{50mm} , Bindewirksamkeit $R_{p0,2}^{(FZ)}/R_{p0,2}^{(GW)}$ bzw. $R_m^{(FZ)}/R_m^{(GW)}$; Vergleich zwischen Grundwerkstoff AA6156-T4 (GW), Stumpfstoßverbindung aus AA6156-T4 und T-Stoßverbindung aus AA6156-T4 (Haut) und AA6013-T6 (Clip).

Proben	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50mm} [%]	$R_{p0,2}^{(FZ)}/R_{p0,2}^{(GW)}$ [%]	$R_m^{(FZ)}/R_m^{(GW)}$ [%]
AA6156-T4 Grundwerkst.	232	326	21.5		
AA6156-T4 Stumpfstoß	211	289	5.0	90.9	88.7
1246L_0	232	308	7.4	100.0	94.5
1246L_1	232	321	10.6	100.0	98.5
1246L_2	230	320	10.4	99.1	98.2
1246L_3	230	318	9.7	99.1	97.5
1246L_4	236	325	8.4	101.7	99.7
1246L_6	228	311	8.6	98.3	95.4

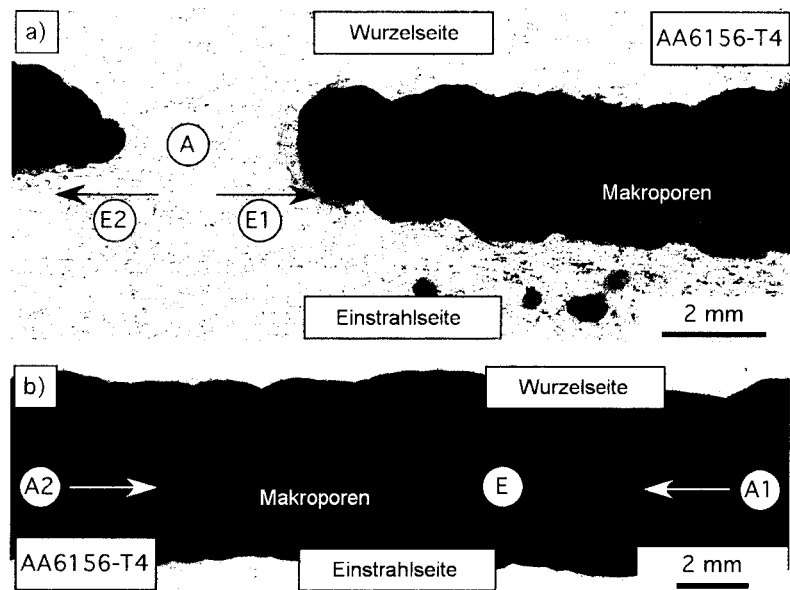


Bild 4 • Längsschnitte von Nd:YAG-laserstrahlgeschweißten T-Stoßverbindungen (wurzelseitig angeordnete Makroporen im Hautbereich); a) Richtungsvariation E2-A-E1, b) A2-E-A1.

Thermoelemente zeigt deutlich, dass diese auf der Rückseite der T-Stoßverbindung niedriger waren als auf der Einstrahlseite und im Clip, Bild 5a. Damit ging ein lokaler Härteabfall einher, welcher auf der Einstrahlseite höher war als auf der Rückseite. Es besteht somit eine lokale Korrelation zwischen Mikrohärtigkeit und maximaler Temperatur. Der Clip wirkte während des einseitigen Laserstrahl-schweißens wie eine Kühlfalle mit der Folge, dass das Schweißbad wurzelseitig wahrscheinlich schneller erstarren konnte als auf der Einstrahlseite im Clip- und Hautbereich. An der Wurzelseite eingeschlossene Gase konnten aus der Schmelze nicht vollständig austreten, weil dort die Erstarrungsgeschwindigkeit höher war als die Ausgasungsgeschwindigkeit und Restgase demzufolge als Makroporen eingeschlossen wurden. Die Porositätsentwicklung liegt also in der guten Wärmeleitung der Aluminiumlegierungen begründet. Vergleichsuntersuchungen zur Herstellung von T-Stoßverbindungen aus den Aluminiumlegierungen AA2198-T3 und AA2196-T8 durch doppelseitiges gleichzeitiges Laserstrahl-schweißen [4] haben gezeigt, dass diese nahezu porenfrei waren. Beim doppelseitigen gleichzeiti-

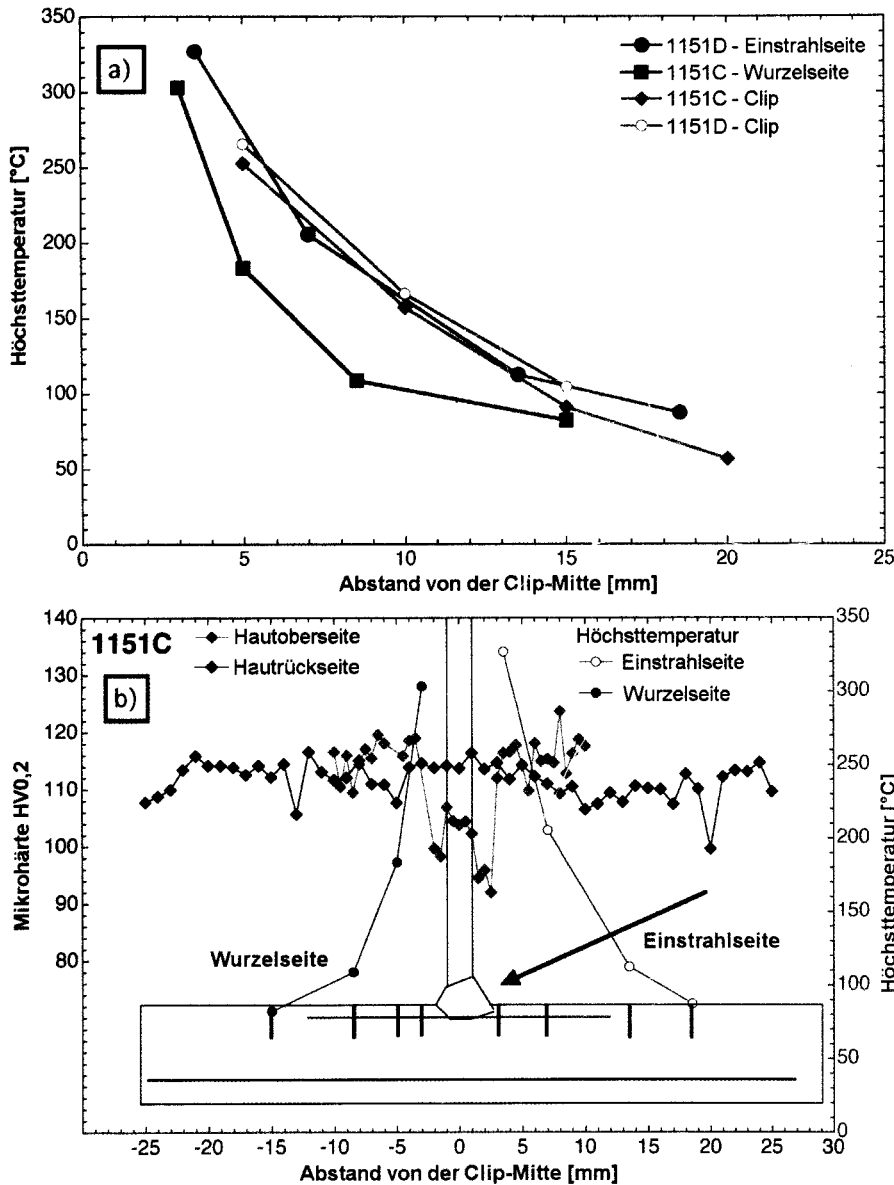


Bild 5 • Örtliche Verteilung der Maximaltemperaturen auf der Einstrahl- und Rückseite sowie im Clip (Haut AA6156-T4, Dicke 6 mm, Clip AA6013-T6, Dicke 2 mm).

gen Laserstrahlschweißen ist die Temperatur auf beiden Seiten gleich [6], hieraus war zu schließen, dass die Variation des Einstrahlwinkels von 25° zu flacheren Winkeln zu einer Öffnung des Keyholes an der Wurzelseite und damit verbunden zu einer Erhöhung der Temperatur führen sollte. Die Röntgenaufnahmen, Bild 3, scheinen dies zu bestätigen. Sie zeigen, dass mit der Verringerung des Einstrahlwinkels von 25 auf 11° eine deutliche Absenkung des Porositätsniveaus erzielt werden konnte. Die Stoßflächenvorbereitung nach Variante 2 erwies sich als ausreichend, Tabelle 1.

4 Schlussbemerkung

Das einseitige Nd:YAG-Laserstrahlschweißen zum Herstellen von T-Stoßverbindungen aus AA6156-T4 und AA2139-T3 als Hautwerkstoffe sowie AA6013-T6 als Clip-Werkstoff mit den in Tabelle 1 aufgeführten Parametern führte in der Schweißnaht unabhängig von der Werkstoffart, den Schweißrichtungsvariationen und Vorgehensweise bei der Fügeflächenvorbereitung zur Bildung zahlreicher Makroporen. Die Einschweißpunkte an den

jeweiligen Clip-Enden haben die Wirkung von Kerben, was die Rissinitiierung im mechanisch beanspruchten Hautbereich begünstigt hat. Härteverlust und Gefügeheterogenität im Bereich der Schweißnaht und Wärmeinflusszone führten dort zu Bruchversagen unter quasistatischer Zugbeanspruchung des Hautwerkstoffs quer zur Schweißnaht. Eine signifikante Reduzierung des Porositätsniveaus ließ sich durch Verringerung des Einstrahlwinkels von 25 auf 11° erzielen. Damit ist gezeigt, dass das einseitige Laserstrahlschweißen eine geeignete Methode ist, um schwer zugängliche Nähte im T-Stoß zu realisieren und eine Ergänzung zu den etablierten Verfahren darstellt.

Literatur

- [1] Tao, W., u. a.: Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects. *Optics & Laser Technology* 52 (2013), S. 1/9.
- [2] Dittrich, D., u. a.: Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design - First results. *Physics Procedia* 12 (2011), S. 6/10.
- [3] Pacchione, M., u. J. Telgkamp: Challenges of the metallic Fuselage. 25. Int. Congress of the Aeronautical Sciences. ICAS 2006, S. 1/12.
- [4] Enz, J., u. a.: Prozessoptimierung für das Laserstrahlschweißen von hochfesten Aluminium-Lithium-Legierungen. *Schw. Schn.* 64 (2012), Heft 8, S. 482/485.
- [5] Lenczowski, B.: New lightweight alloys for welded aircraft structure. ICAS 2002, S. 401.1/401.4.
- [6] Siva Shanmugam, N., u. a.: A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds. *Materials and Design* 31 (2010), S. 4528/4542.
- [7] Çam, G., u. a.: Characterization of laser and electron beam welded Al alloys. *Practical Metallography* 37 (2000) 2, S. 59/89.
- [8] Ma, T., u. G. den Ouden: Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding. *Materials Science and Engineering*, A266 (1999), S. 198/204.
- [9] Vaidya, W. V., u. a.: Mechanical behavior of laser beam and friction stir welded aluminium alloys for airframes. *Welding in the World*, 48 (2004), S. 261/273.
- [10] Machold, W., u. a.: Influence of the welding sequence on residual stresses in laser welded T-joints of an airframe aluminium alloy. *Materials Science Forum* 571-572 (2008), S. 375/580.
- [11] N. N.: Development of short distance welding concepts for airframes. EU Projekt, http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/wel_air_en.htm.