

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe im Stumpfstoß

Durch den stetigen Anstieg der Anforderungen an produzierte Kunststoffbauteile sowie die damit verbundenen erhöhten Qualitätsansprüche in bestimmten Einsatzgebieten wie der Medizintechnik gewinnen optische Technologien zur Werkstoffbearbeitung immer mehr an Bedeutung. Die durchgeführten Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von Kunststoffen zeigen, dass neben der klassischen Fügepartneranordnung im Überlappstoß auch mit einer Anordnung im Stumpfstoß Schweißnähte mit besonders hoher Qualität bei optimaler Prozess- und Parametergestaltung erreicht werden können. Dazu wurden in dieser Arbeit erste Erkenntnisse durch eine Parameteroptimierung des Laserstrahlprozesses im einstufigen Stumpfstoßverfahren zur Generierung maximaler Zugfestigkeiten der Schweißverbindung für den Standard-Thermoplast PE-HD gewonnen. Das große Potenzial dieser Fügepartneranordnung zeigt sich darin, dass Schweißnahtfestigkeiten auf Grundwerkstoffniveau erreicht werden. Dies bildet die Grundlage für Anwendungsgebiete mit hohen Güteanforderungen an die Schweißnahtqualität. Zudem eignet sich die Werkstoffbearbeitung mit dem Laserstrahl besonders gut für einen hohen Automatisierungsgrad, sodass hohe Stückzahlen durch kurze Prozesszeiten erreicht werden können.

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das Laserstrahlschweißen von Kunststoffen als erfolgversprechende Technologie zum stofflichen Verbinden von Polymerbauteilen etabliert. Dabei ist je nach Fügepartneranordnung das Laserdurchstrahlschweißen (Überlappstoß) und das Laserstrahlschweißen am Stumpfstoß (I-Stoß) zu differenzieren. Im Gegensatz zum Laserdurchstrahlschweißen konnte sich das Laserstrahl-Stumpfstoßschweißen in der industriellen Anwendung bisher jedoch nicht durchsetzen [1]. In der Regel werden bei den klassischen Kunststoffschweißverfahren, zum Beispiel dem Heizelementstumpfschweißen oder dem Ultraschallschweißen, Schweißnahtfestigkeiten erreicht, die deutlich unter den Festigkeiten des Grundwerkstoffs liegen. Die Laserstrahlfügetechnologie weist im Gegensatz dazu jedoch eine besonders hohe Komplexität der Schweißparameter auf. Darüber hinaus existiert bisher relativ wenig Erfahrung im Bereich des Laserstrahlschweißens von Kunststoffen im Stumpfstoßverfahren durch grundlegende Forschungsarbeiten. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungsergebnisse am Beispiel von „Polyethylen High-Density“ (PE-HD) zeigen allerdings, dass durch die Vielzahl der optimierbaren Prozessparameter mit diesem Verfahren sehr gute Schweißergebnisse erzielt werden können. Somit bietet das Laserstrahl-Stumpfstoßschweißen ein hohes Potenzial für Spezialanwendungen, in denen eine besonders hohe Qualität der Schweißnähte gefordert wird.

2 Methoden

Die Untersuchungen wurden mit einem Faserlaser des Herstellers TRUMPF durchgeführt. Kernelemente

DIE AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Peter Böhm

Leiter des Fachgebiets für Werkstoffe und Schweißen der Hochschule Trier, Fachbereich Technik
Peter.Boehm@hochschule-trier.de



Martin Jung, M. Eng.

Master of Engineering der Hochschule Trier
Fachbereich Technik
jungmar@hochschule-trier.de

Weitere Informationen zu den Autoren unter <https://www.schweissenundschneiden.de/autoren>

STICHWÖRTER

Festigkeit, Kunststoff, Schweißen von Kunststoff, Laserstrahlschweißen

der Laserstation sind der Koordinatentisch mit einem Verfahrbereich von 300 mm × 300 mm in der x-y-Ebene sowie die in z-Richtung verstell- und programmierbare Fokussieroptik. Durch den Einsatz einer mit Ytterbium dotierten Quarzfaser wird Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 1070 nm emittiert, die durch das Optiksyste im Brennpunkt auf einen Durchmesser von 19,6 µm fokussiert wird.

Erzeugt werden Kunststoffschweißverbindungen in einem einstufigen Laserstrahl-Stumpfstoßschweißprozess, bei dem Energieeintrag und Fügevorgang gleichzeitig vollzogen werden, **Bild 1**. Gegenüber einer zweistufigen Prozessführung wie dem Heizelementstumpfschweißen, bei der Erwärmung und Schweißung zeitlich getrennt voneinander stattfinden, kann somit auf eine relativ aufwendige Umstellphase vom Heiz- auf den Anpressvorgang verzichtet werden [2]. Zur Realisierung der Stumpfstoßschweißnaht wurde ein geradliniger Konturschweißprozess mit überlagerter Wobbelbewegung (TWIST-Verfahren) angewendet.

Der numerisch gesteuerte Koordinatentisch ermöglicht die geradlinige Vorschubbewegung entlang der Schweißkontur unter der ortsfesten Fokussieroptik. Scannerspiegelsysteme innerhalb der Optik lenken den Laserstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf eine kreisförmige Bahn, sodass sich durch die Überlagerung der Bewegungen die charakteristische Wobbelkontur, **Bild 2**, einstellt.

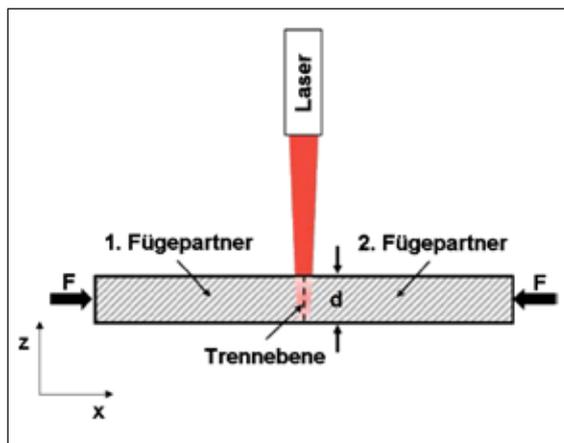


Bild 1 • Darstellung (schematisch) des einstufigen Laserstrahl-Stumpfstoßschweißens mit Fügepartneranordnung, Energieeintrag und wirkendem Fügedruck.

Durch die Verwendung einer zusätzlichen Wobbelbewegung kann das plastifizierte Volumen in der Fügezone aufgrund einer variablen Schweißnahtbreite individuell eingestellt und somit auch die hohe Intensität des Faserlaserstrahls auf einen größeren geometrischen Bereich verteilt werden [3]. Weiterhin ergeben sich durch diese Methode die Wobbelgeschwindigkeit und der Wobbelradius als zusätzliche Steuergrößen für den Schweißprozess. Über die Einstellung der kreisförmigen Bewegungselemente hinsichtlich Durchmesser, Überlappung sowie Rotationsfrequenz, kann insbesondere die Nahtbreite gezielt beeinflusst werden [2]. Diese Wobbelparameter sind neben der Fokusslage, der Streckenenergie und dem Fügedruck die zentralen Faktoren für den Laserstrahl-schweißprozess in der Stumpfstoßanordnung.

3 Ergebnisse

Als Versuchswerkstoff wurde der teilkristalline Standardthermoplast PE-HD mit einer Werkstückdicke von 3 mm verwendet. Zudem wurde dieser Kunststoff in einer uneingefärbten Ausführung ausgewählt, um der Forderung nach Kunststoffen mit einer möglichst geringen Additivierung für den Einsatz in der Medizintechnik möglichst Rechnung zu tragen. Das ausgewählte PE-HD verfügte bei einer Laserstrahlwellenlänge von 1070 nm über einen Transmissionsgrad von etwa 58%, einen Reflexionsgrad von etwa 23% und einen Absorptionsgrad von etwa 19%. Aufgrund dieser optischen Werkstoffeigenschaften liegt die optische Eindringtiefe dieses Kunststoffs bei über 6 mm. Da die optische Eindringtiefe der Fügepartner somit größer ist als die verwendete Werkstückdicke, ist die Voraussetzung für eine ausreichende Volumenabsorption der Laserstrahlung im Thermoplast gegeben [1].

Bild 3 zeigt eine durchlichtmikroskopische Aufnahme einer Dünnschnittprobe aus einer im Stumpfstoßverfahren laserstrahlgeschweißten PE-HD-Verbindung. Diese weist einen ähnlichen strukturellen Nahtaufbau wie Heizelement- und Vibrationsschweißverbindungen auf. Deutlich sichtbar ist die klare Abgrenzung zwischen Grundwerkstoff und rekristallisiertem Werkstoff. Zudem ist der Bereich mit sogenannten Fließlinien sichtbar. Diese ergeben sich aus der Scherströmung bzw. aus dem austretenden Schmelzfluss in Richtung der Ober- und Unterseite des Werkstücks während des Schweißvorgangs unter gleichzeitig wirkendem Fügedruck [2].

Für das Ziel einer vollständigen Durchschweißung der gesamten Werkstückdicke d , Bild 1, zeigte sich in einer Variation des Fokusslagen-Offsets (hier: gezielte Defokussierung in Bezug zur Werkstückoberfläche),

ABSTRACT

Laser welding of thermoplastics with butt joint preparation

Due to the steady increase in the requirements for plastic components produced and the associated increased quality requirements in certain areas of application such as medical technology, optical technologies for material processing are becoming more and more important. The investigations carried out for the laser welding of plastics show that, in addition to the classic joint partner arrangement in the lap joint, weld seams with particularly high quality can be achieved with an arrangement in the butt joint with optimal process and parameter design. For this purpose, initial knowledge was gained in this thesis by optimizing the parameters of the laser process in a single-stage butt joint process to generate maximum tensile strengths of the welded joint for the standard

thermoplastic PE-HD. The great potential of this joint partner arrangement is shown in the fact that weld seam strengths are achieved at the basic material level. This forms the basis for areas of application with high quality requirements for the weld seam quality. In addition, material processing with the laser beam is particularly suitable for a high degree of automation, so that high quantities can be achieved through short process times.

KEYWORDS

strength, plastics, welding of plastics, laser welding

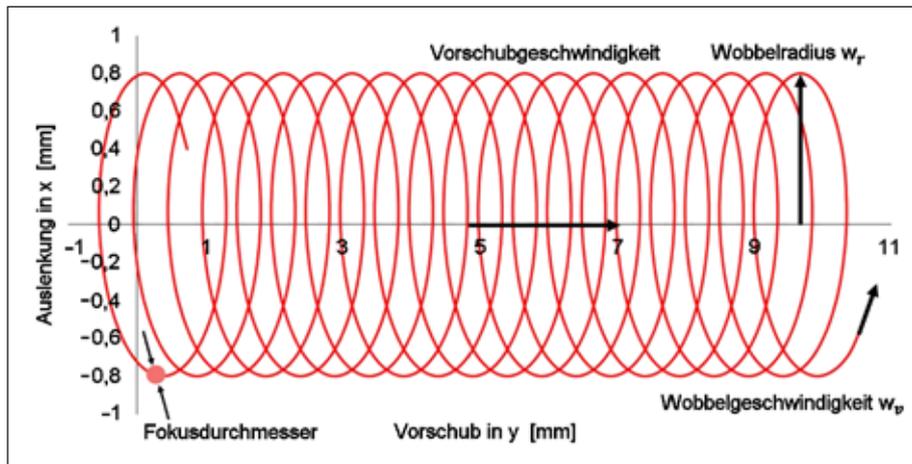


Bild 2 • Darstellung (schematisch) einer Wobbelkontur mit den Hauptkenngrößen Wobbelradius, Wobbelgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Fokusbereich.



Bild 3 • Durchlichtmikroskopische Aufnahme (90°-Polarisation) einer laserstrahlgeschweißten PE-HD-Stumpfstoßnaht. (Aufnahme gefertigt vom LaborLaserTechnik an der Rheinischen Fachhochschule Köln)

dass ein negativer Offset von 5 mm einen positiven Beitrag für eine homogene Plastifizierung liefert. Außerdem erfolgt eine Verringerung an Schweißnahtfehlern. Die Verbesserungen durch diese Einstellung sind darauf zurückzuführen, dass der exponentiellen Intensitätsabnahme der Laserstrahlung bei Durchdringung des Polymers entgegengewirkt wird. Mit einer Fokuslage unterhalb des Werkstücks steht somit in tieferen Schichten der Fügepartner tendenziell eine höhere Strahlungsintensität für die Plastifizierung des Werkstoffs zur Verfügung. Zudem ist der Laserstrahl auf Höhe der Werkstückoberfläche durch die negative Fokuslage weniger stark eingeschnürt als im Fokus, sodass dort die Laserstrahlung mit einer geringeren Intensität (weniger Energie je Flächeneinheit) wirksam wird. Aufgrund dessen können thermische Schädigungen durch Wärmestau und lokale Verbrennungen im oberflächennahen Bereich verhindert werden.

Besonders durch den relativ hohen Transmissionsgrad der uneingefärbten Proben und der geforderten Einschweißtiefe (gesamte Werkstückdicke) ist ein vergleichsweise hoher Energieeinsatz notwendig. Für das Erreichen eines Zugfestigkeitswerts von über 90% der Grundwerkstofffestigkeit wird für PE-HD eine Streckenenergie von 125 J/mm benötigt. Diese muss mit einer Vorschubgeschwindigkeit von etwa

120 mm/min generiert werden, damit eine ausreichende Strahl-Stoff-Wechselwirkungszeit gegeben ist.

Für den Fügeprozess erwies sich bei guter Nahtvorbereitung (Planparallelität der Fügeflächen sowie möglichst spalt- und versatzfreie Fügepartnerausrichtung) bereits ein geringer Fügedruck von 14 N/mm² als ausreichend. Eine stufenweise Erhöhung der Flächenpressung bis auf 41 N/mm² führte zu keiner Steigerung der Zugfestigkeit der Schweißverbindung. Trotz der zunehmenden Verdrängung des plastifizierten Werkstoffs aus der Fügezone infolge einer Druckerhöhung (stärkere Quetschströmung führt zur Ausbildung von größeren Schweißwülsten an Ober- und Unterseite), konnte jedoch auch keine signifikante Minderung der Zugfestigkeit festgestellt werden. Demnach kann für PE-HD im Laserstrahl-Stumpfstoßschweißverfahren von einem Fügedruck ab mindestens 14 N/mm² ausgegangen werden.

Eine Untersuchung der Wobbelparameter ergab, dass diese Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Homogenität der Schweißnaht (Fehlstellenausprägung und Konturregelmäßigkeit) sowie auf das Verhältnis von Schweißnahttiefe zu Schweißnahtbreite besitzen. Abhängig von den übrigen Prozessparametern existiert sowohl für die Wobbelgeschwindigkeit als auch für den Wobbelradius ein kritischer Wert, ab dem es zu einer schlagartigen Verringerung an Fehlstellen und zu einer regelmäßigeren Nahtkontur kommt. Im Zuge dieser Verbesserung nehmen jedoch die Schweißnahtbreite und damit das plastifizierte Volumen stark ab.

Die starke Auswirkung der Wobbelparameter auf die Schweißnahtgestalt zeigt Bild 4, in dem für unterschiedliche Kombinationen von Wobbelgeschwindigkeit (w_p) und Wobbelradius (w_r) – bei sonst konstanten Prozessparametern (Leistung 250 W, Vorschubgeschwindigkeit 120 mm/min, Fokuslagenoffset -5,0 mm und Fügedruck 27 N/mm²) – die Decklagenbildung der resultierenden Stumpfstoßschweißnähte beispielhaft dargestellt ist. Sowohl eine hohe Wobbelgeschwindigkeit als auch ein kleiner Wobbelradius führen bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit dazu, dass sich während des Schweißprozesses mehr Kreiselemente der Wobbelbewegung

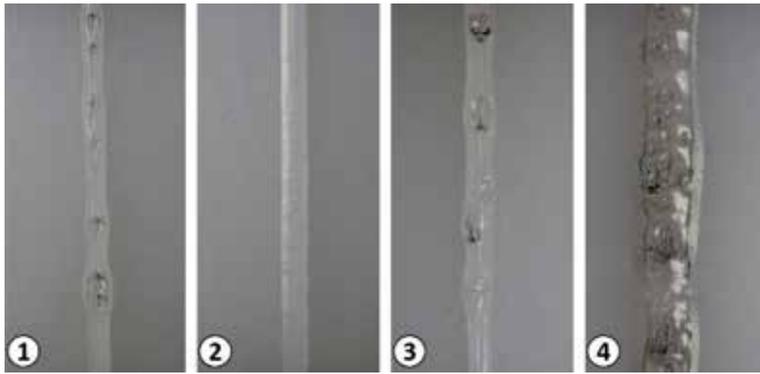


Bild 4 • Beispielhafte Darstellung der Decklagenausbildung bei unterschiedlichen Wobbelgeschwindigkeiten w_v und Wobbelradien w_r (sonstige Prozessparameter konstant);
 1) $w_v = 1000 \text{ mm/s}$, $w_r = 0,4 \text{ mm}$,
 2) $w_v = 7000 \text{ mm/s}$, $w_r = 0,4 \text{ mm}$,
 3) $w_v = 7000 \text{ mm/s}$, $w_r = 1,2 \text{ mm}$,
 4) $w_v = 1000 \text{ mm/s}$, $w_r = 1,2 \text{ mm}$.

innerhalb eines gemeinsamen Schmelzbads befinden. Eine derartige Kombination dieser zwei Faktoren führt zu einer sehr homogenen Schweißnaht ohne Fehlstellen und einer sehr gleichmäßigen Nahtkontur aufgrund eines quasisimultanen Erwärmungseffekts, **Bild 4, Teilbild 2**. Eine gegenteilige Einstellung dieser Parameter bewirkt eine von Fehlstellen geprägte Schweißnaht mit einer sehr unregelmäßigen und deutlich breiteren Nahtkontur, **Bild 4, Teilbild 4**.

Die Auswertung der Zugfestigkeiten dieser Parameterkombinationen in **Bild 5** zeigt, dass

Schweißverbindungen mit der Kombination aus einem großen Wobbelradius und einer niedrigen Wobbelgeschwindigkeit (Parameterkombination aus **Teilbild 4 in Bild 4**) den niedrigsten Mittelwert der Zugfestigkeit bei gleichzeitig größter Messergebnisstreuung aufweisen. Im Vergleich dazu besitzen die Schweißnähte mit der optisch homogensten Nahtausbildung durch eine hohe Wobbelgeschwindigkeit und einem geringen Wobbelradius (Parameterkombination aus **Teilbild 2 in Bild 4**) eine im Mittel um etwa 50% höhere Zugfestigkeit. Damit besitzen diese einen Schweißfaktor (Zugfestigkeit der

Anzeige

siegmund

Der neue Standard: Professional Extreme 8.7

- ✓ Mehr Spannmöglichkeiten an der Seitenwange durch 3 Bohrungsreihen
- ✓ Oberfläche geschützt vor Schweißspritzer und Anhaftung von Schweißperlen
- ✓ Sehr gute Ebenheit für hohe Genauigkeit während der Fertigung
- ✓ Erhältlich ab 1.089 €

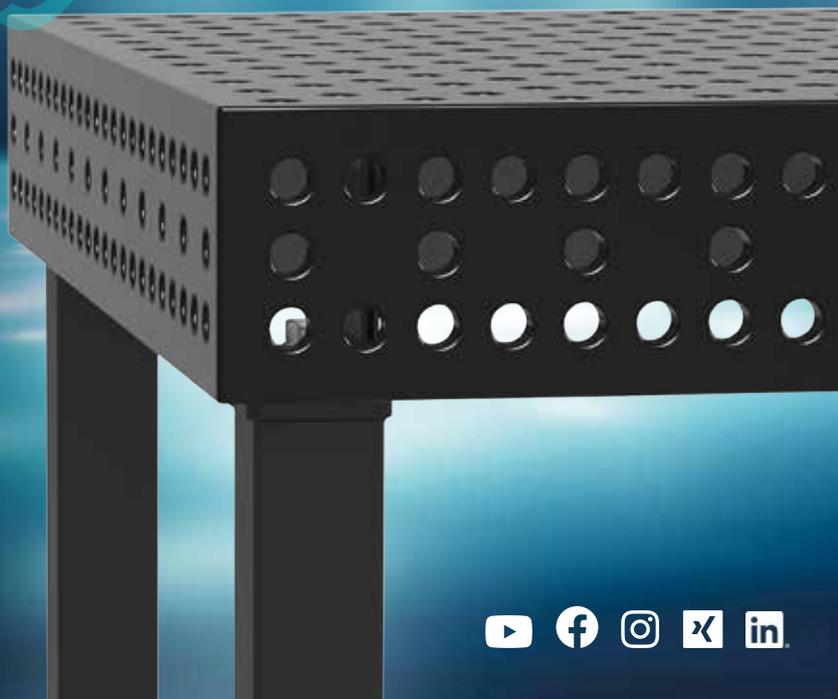


Detaillierte Informationen
finden Sie unter:
www.siegmund.com/schweisstische

Unser gesamtes Produktsortiment unter:

www.siegmund.com

new
TABLES



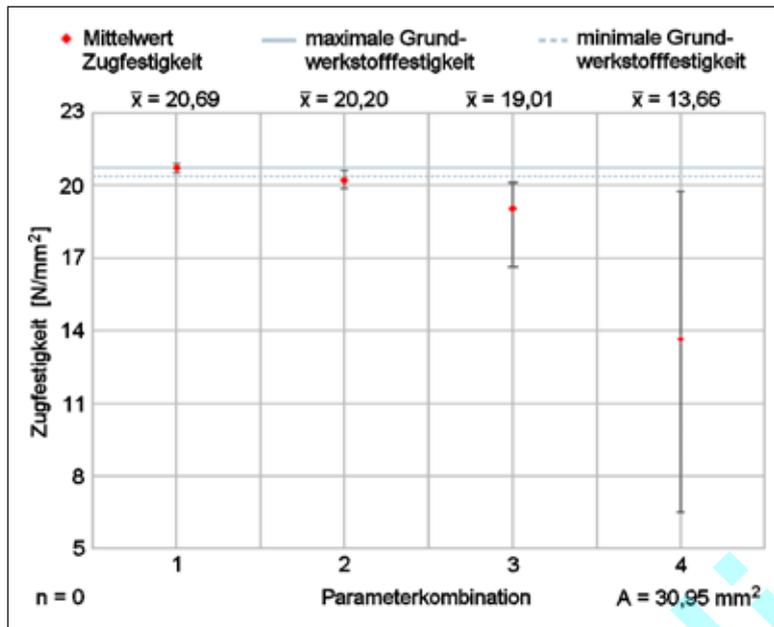


Bild 5 • Mittlere Zugfestigkeit für jede Parameterkombination aus Bild 4 mit einem Stichprobenumfang n einschließlich der Messdatenstreuung.

Schweißnaht in Bezug auf die Grundwerkstofffestigkeit) von etwa 97,5% und liegen somit knapp unter dem Festigkeitswert des Grundwerkstoffs. Die höchsten Zugfestigkeiten werden allerdings mit Schweißnahtverbindungen erreicht, die mit einem geringen Wobbelradius und einer verhältnismäßig niedrigen Wobbelgeschwindigkeit (Parameterkombination aus **Teilbild 1 in Bild 4**) erzeugt werden. Unter Berücksichtigung der Messtoleranz erreichen diese – trotz vereinzelter Fehlstellen in der Decklage – mit einem mittleren Schweißfaktor von etwa 99,9% die Festigkeit des Grundwerkstoffs.

Gleichzeitig führt die Parameterkombination 1, **Bild 4**, zu einer noch geringeren Streuung bzw. höheren Reproduzierbarkeit der Zugfestigkeitsergebnisse. Die geringere Streuung der Ergebnisse ist auf das Bruchverhalten dieser Schweißverbindungen zurückzuführen. Erreichen die Schweißverbindungen die Festigkeit des

Grundwerkstoffs, kommt es im Zugversuch zu einer ein- oder beidseitigen Einschnürung der Probe außerhalb des Schweißnahtbereichs im Grundwerkstoff, **Bild 6 links**. Durch die Zugbelastung in Längsrichtung der Probe lösen sich die knäuelartigen Strukturen der Molekülketten im Grundwerkstoff und die einzelnen Molekülketten gleiten voneinander ab, sodass je Einschnürungsbereich zwei Fließfronten entstehen. Im Nahtbereich liegen die Molekülketten aufgrund der Quetschströmung im Fügeprozess mit einer Hauptorientierung quer zur Belastungsrichtung vor. Aus diesem Grund kommt es bei einer ausreichenden Nahtfestigkeit zuerst zu einer Einschnürung im Grundwerkstoff. Treffen die Fließfronten bei einer weiteren Steigerung des Deformationswegs auf den Schweißnahtbereich, kann aus diesem infolge der Molekülkettenorientierung nicht genügend Werkstoff nachfließen. Das Resultat ist ein Versagen der Zugprobe am Schweißnahttrand oder ein Aufschälprozess der Schweißnaht, **Bild 6 rechts**.

Allgemein reduziert sich gegenüber dem Grundwerkstoff die nominelle Bruchdehnung durch die Schweißverbindung um etwa 50%. Da aufgrund der Einschnürung im Grundwerkstoff ein Versagen der Probe jenseits des Streckpunkts auftritt, ist die maximale Zugfestigkeit in erster Linie von der Grundwerkstofffestigkeit abhängig und somit die Streuung der Messergebnisse sehr gering.

4 Fazit

Insgesamt ist die Anwendung des Laserstrahlschweißens für thermoplastische Kunststoffe im einstufigen Stumpfstoßverfahren, insbesondere mit einer zusätzlichen Überlagerungsbewegung des Laserstrahlspots, vor allem durch die Vielzahl der Parameter und deren teilweise komplexe Wechselwirkung gekennzeichnet. Zudem müssen die Schweißparameter für jede Werkstoffpaarung bzw. Werkstoffauswahl individuell ermittelt werden. Die große Diversität der Prozessparameter ist jedoch auch gleichzeitig eine große Stärke dieses Verfahrens, da durch optimierte Parameterkombinationen



Bild 6 • Ein- und beidseitige Einschnürung der Zugproben außerhalb des Schweißnahtbereichs im Grundwerkstoff (links) und Bruchbilder der Schweißverbindung infolge der Grundwerkstoffeinschnürung (rechts).

Schweißnähte mit sehr guten Ergebnissen hinsichtlich der maximalen Zugfestigkeit (Festigkeit der Schweißnaht erreicht nahezu den Festigkeitswert des Grundwerkstoffs) erzielt werden können.

Ferner zeichnet sich der Kunststofffügeprozess mittels Laserstrahlung im Stumpfstoßverfahren durch relativ kurze Prozesszeiten, eine hohe Flexibilität bezüglich der Nahtgeometrie und einen hohen Automatisierungsgrad aus. Aufgrund dieses Eigenschaftsspektrums bietet dieses Verfahren ein großes Potenzial für Klein- und Kleinstanwendungen im industriellen Umfeld, bei denen hohe Schweißnahtqualitäten – wie zum Beispiel bei medizinischen Produkten verlangt – angestrebt bzw. gefordert werden. Durch den Einsatz speziell abgestimmter Additive besteht zusätzlich die Möglichkeit, dass die benötigte Fügeleistung sowie die Prozesszeit reduziert werden können. In diesem Zusammenhang sind weiterführende Untersuchungen mit anderen Kunststoffen und Kunststoffen ohne Additive angestrebt, sodass die gesamte Anwendungsvielfalt für das Laserstrahlschweißen im einstufigen Stumpfstoßverfahren geklärt werden kann.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich herzlich für die fachliche und technische Unterstützung bei Prof. Dr. Russek und seinen Mitarbeitern an der Rheinischen Fachhochschule Köln gGmbH, LaborLaserTechnik.

Literatur

- [1] Russek, U. A.: Prozesstechnische Aspekte des Laserdurchstrahlschweißens von Thermoplasten. Diss, TH Aachen. Shaker-Verlag, Aachen 2006.
- [2] Polster, S.: Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile. Diss., Univ. Erlangen-Nürnberg. Meisenbach-Verlag, Bamberg 2009.
- [3] Otto, G. u. A. Olowinsky: TWIST-Laserschweißen von Kunststofffolien mit 1567 nm Erbium-Faserlaserstrahlung. Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen, Jahresbericht 2014, S. 107.
- [4] Russek, U. A.: Laserschweißen von Kunststoffen. Die Bibliothek der Technik, Bd. 319. Verlag Moderne Industrie, München 2009.
- [5] Dietz, R.: Strukturbezogene Betrachtung zum Zeitstandverhalten geschweißter Polyolefinhalbzeuge – Morphologie und Bruchverhalten. Diss., TU Chemnitz. Universitätsverlag der Technischen Universität Chemnitz 2017.

Anzeige

...click and cut

Autogenschneiden ist mehr als ein Schneidbrenner

VOLLAUTOMATISCHE PROZESSSTEUERUNG
FÜR AUTOGENSCHNEIDMASCHINEN
(APC)

GCE[®]
Gas Control Equipment
www.gcegroup.com

iht
automation
www.iht-automation.com