

Einfluss von Laserstrukturen auf das Rührreibschweißen von Kunststoffen

Laserstrukturierung von Rührreibschweißwerkzeugen

S. Stribick, S. Akcara, E. Dieringer

Das Kunststoff-Rührreibschweißen ist aufgrund von hohen Schweißnahtfaktoren und Oberflächengüten von großem Interesse. Dennoch sind die bisher möglichen Vorschubgeschwindigkeiten begrenzt. Vorangegangene Untersuchungen zeigten ein Verbesserungspotenzial durch eine gezielte Werkzeugoberflächengestaltung. Im Rahmen dieses Beitrages werden systematisch der Einfluss verschiedener Laserstrukturen auf die Verfahrensgeschwindigkeit und Festigkeiten der Schweißnähte beim Rührreibschweißen näher untersucht.

STICHWÖRTER

Fügetechnik, Oberflächentechnik, Kunststoffe

Laser surface texturing of friction stir welding tools

Plastic friction stir welding is of great interest due to high welding factors and good surface characteristics. Welding speed, however, is limited. Previous investigations pointed towards potential improvements by a systematically tool surface design. The aim of this paper is to show the influence of laser texturing on the welding speed and welding strength of friction stir welding.

1 Einleitung und Motivation

Die meisten OEMs im Mobilitätssektor fokussieren ihre Innovationskonzepte bereits auf Leichtbauprodukte und -werkstoffe. Neben geringeren CO₂-Emissionen wird auch ein höherer Wirkungsgrad im Verhältnis von Leistung zu Gewicht angestrebt [1]. Gerade Kunststoffe und faserverstärkte Kunststoffe besitzen ein hohes Leichtbaupotenzial. Jedoch stellt eine zuverlässige und qualitativ hochwertige Verbindungstechnik noch immer eine große Herausforderung dar. Ein vielversprechendes Verfahren für diese Anforderungen ist das Rührreibschweißen. [2]

Vorteile vom Rührreibschweißen sind der geringe Aufwand zur Fügestellenaufbereitung, die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe, die hohen Schweißnahtqualitäten und die Möglichkeit zur Integration von Fasern über die Schweißnahtgrenzflächen hinaus. Nachteilig ist vor allem die geringe Vorschubgeschwindigkeit aufgrund der verringerten Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Aluminium. [2–4]

Es gibt viele Möglichkeiten, die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen. In der vorangegangenen Untersuchung konnte bereits bei ersten Eintrittsversuchen die erhöhte Erwärmungsleistung durch laserstrukturierte Pins im Vergleich zu unstrukturierten Werkzeugen gezeigt werden [5]. Im Rahmen dieser darauf aufbauenden Veröffentlichung wird der Einfluss der Laserstrukturen auf die sich einstellenden Festigkeiten und erreichbaren Vorschübe ohne Qualitätsverlust näher betrachtet.

2 Rührreibschweißen von thermoplastischen Kunststoffen

Beim Rührreibschweißen werden zwei Bauteile mit einem verschleißfesten, rotierenden Werkzeug bestehend aus Pin und Schulter miteinander verbunden. Ermöglicht wird dies durch die rotationsbedingte Reibung, welche das Material erhitzt und plastifiziert. Die Schweißnaht entsteht dabei entlang des Übergangs zwischen den Fügepartnern, entweder im Stumpfstoß oder Überlapp [6]. Dabei wird der Prozess in vier Phasen eingeteilt: Dem Werkzeugeintritt, der Verweilphase zur Erwärmung der Fügepartner, der Schweißphase und dem Werkzeugaustritt mit charakteristischen Endkrater. [3]

Um der geringen Viskosität von Kunststoffen gerecht zu werden, wurden Werkzeuge mit stehender Schulter entwickelt, um Kunststoffe in der Schweißnaht zu halten und damit Fehler zu vermeiden [7]. Haupteinflussfaktoren auf die Schweißnahtqualität sind Werkzeugdrehzahl, -form, und -werkstoff, die Vorschubgeschwindigkeit sowie eine zusätzliche Vorwärmung des Werkzeuges [2]. Die definierte Gestaltung der Oberfläche, beispielsweise mittels Mikro-Laserstrukturierung, kann ebenfalls Einfluss auf die Erwärmung der Kunststoffe während des Werkzeugauftritts nehmen [5].

Die Mikro-Laserstrukturierung wird bereits für verschiedene Anwendungsfälle im Bereich der Tribologie oder des Klebens näher berücksichtigt. So kann durch eine definierte Gestaltung der Laserparameter und der Verfahrensstrategie beim Lasern eine Oberfläche gezielt gestaltet werden [8]. Weitere Vorteile sind die gute Umweltverträglichkeit, die einfache Integrierbarkeit in bestehende Prozessketten und die Selektivität der Laserbearbei-

Tabelle. Verwendeter Parametersatz für die Laserstrukturierung.

Linienabstand [mm]	Anzahl der Fahrten	Geschwindigkeit [mm/s]	Leistung [W]	Frequenz [kHz]
0,3	5	350	10,5	50

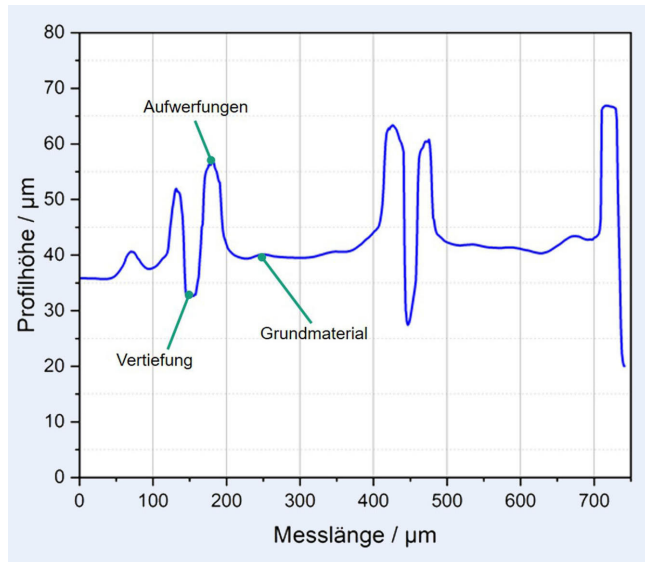


Bild 1. Höhenprofil der gelaserten Struktur auf den Werkzeugen. Grafik: Fraunhofer IPA

ung [9]. In mehreren Veröffentlichungen konnten bereits die Vorteile für die Werkzeugindustrie durch eine gezielte Laserstrukturierung gezeigt werden, beispielsweise von Esch [10] beim Bohren von Aluminium.

Im vorliegenden Beitrag wird der Einfluss einer gezielten Werkzeugstrukturierung auf die sich ergebenden Festigkeiten und erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten beim Schweißen von unverstärkten Polypropylen näher untersucht.

Die nachfolgenden Versuche gliedern sich in drei Teile: Im ersten Teil wird die Gestaltung der Laserstrukturen vorgenommen. Dafür werden Laserparameter und Strukturierungsarten variiert. Im nächsten Schritt wird untersucht, welchen Einfluss die verschiedenen Strukturen auf die Schweißnahtqualität bei unterschiedlichen Werkzeuggeometrien haben. Zum Abschluss werden mit ausgewählten Werkzeugen die Vorschübe stufenweise

erhöht und es wird überprüft, ob durch die Laserstrukturierung ein Vorteil im Bereich der Prozesszeit generiert wird.

3 Versuchsaufbau und -vorgehen

3.1 Auswahl und Gestaltung der Laserstrukturierung

Für die Oberflächengestaltung werden die Pins mit einem 30-W-Faserlaser der Firma MSW Laserstechnik mit einer Wellenlänge von 1064 nm strukturiert. Die Strukturierung wurde so gestaltet, dass die Oberfläche stabile Schmelzkränze ausbildet, um die Oberflächenrauheit dauerhaft zu erhöhen. Für den verwendeten Stahlwerkstoff C 1.4301 haben sich die folgenden Parameter in der Tabelle als geeignet herausgestellt.

Im Vergleich zur Ausgangsoberfläche hat sich das Höhenprofil durch die Laserstrukturierung signifikant verändert, wie in Bild 1 zu sehen. Die Vertiefungen sind deutlich zu erkennen und liegen im Bereich um circa 10 μm, während die Aufwerfungen über 20 μm betragen.

Als Strukturgeometrie wurde die Variation verschiedener Linienformen (gerade, gebogen) und eine Kombination (gekreuzt) gestaltet. Die drei Varianten sind in Bild 2 dargestellt. Diese werden in den weiteren Untersuchungen auf die Seitenflächen der Werkzeugpins aufgebracht und deren Einfluss auf die Schweißnahtqualität und erreichbaren Vorschübe mit hoher Schweißnahtqualität näher untersucht.

3.2 Rührreißschweißen mit unterschiedlichen Laserstrukturierungen

Bei der Untersuchung wurden mehrere Werkzeuggeometrien betrachtet. Diese sind konisch-zylindrisch, dreieckig und sechseckig. Als Werkzeugwerkstoff wurde der Stahl C 1.4301 gewählt. Die Pinlänge beträgt 3,6 mm bei einer Plattendicke des Polypropylens von 4,0 mm. Das Werkzeug besitzt eine stehende, gefederte Schulter ohne Nut aus Stahl C 1.4305. Die Werkzeugschulter hat einen Durchmesser von 22 mm. Die Versuche wurden an dem CNC-Bearbeitungszentrum „Reichenbacher ECOLT“ durchgeführt. Im ersten Versuch, um die Werkzeuge und Laserstrukturi-

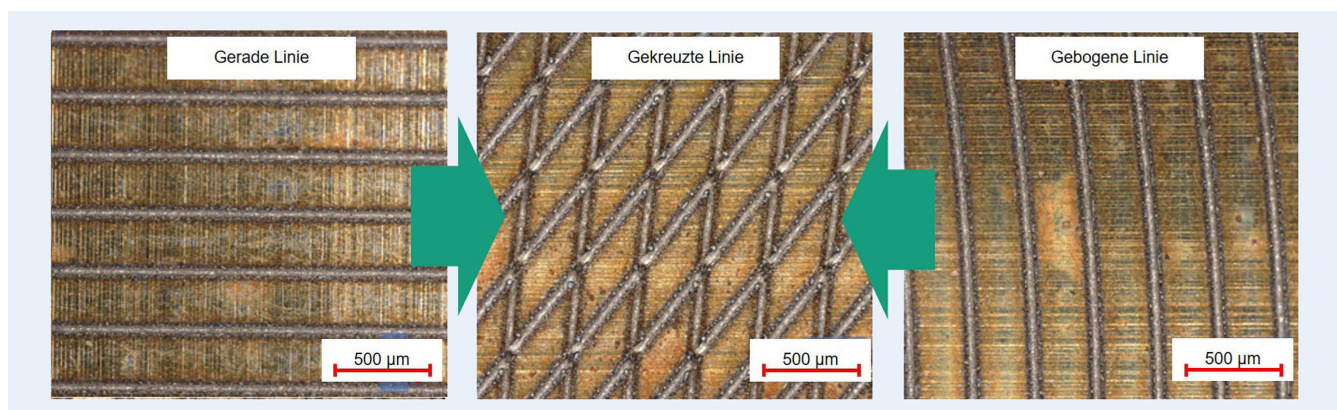


Bild 2. Erarbeitete Laserstrukturen auf den Rührreißschweißwerkzeugen. Grafik: Fraunhofer IPA

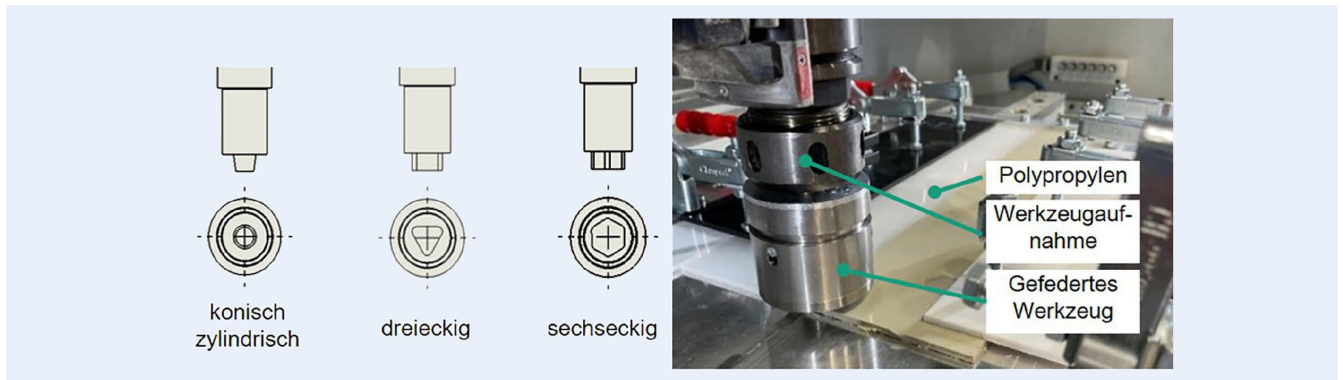


Bild 3. Verwendete Werkzeugpins (links) und Versuchsaufbau (rechts). Foto: Fraunhofer IPA

ren auf ihre Leistungsfähigkeit zu bewerten, wurde die Drehzahl auf 2500 min^{-1} und der Vorschub auf 6 mm/min festgelegt. Die Verweilzeit vor dem Verfahren betrug 30 s . Um die Durchmischung der 70 mm langen Stumpfstoßschweißnähte besser beurteilen zu können, wurde transparentes und eingefärbtes Polypropylen verwendet. Die genutzten Werkzeugpins und der Versuchsaufbau sind in **Bild 3** dargestellt.

Jede Werkzeugform wurde in vier Varianten getestet. Neben den drei in Kapitel 3.1 vorgestellten Laserstrukturen wurde auch je ein unstrukturiertes Werkzeug als Referenz verwendet. Um die Leistungsfähigkeit der Strukturen zu prüfen, wurde mit jeder Konfiguration eine Schweißnaht hergestellt, mit der anschließend die Zugfestigkeit mit drei Proben im Vergleich zum Grundmaterial ermittelt wurde. Es fällt hierbei auf, dass vereinzelt Kunststoff im zurückgezogenen Werkzeug hängen bleibt. Dies schränkt eine erneute Nutzung des Werkzeuges jedoch nicht ein. Ein Zusammenhang mit der Art der Laserstrukturierung und der Anhaftung von Kunststoff auf dem Werkzeug konnte in der Versuchsreihe nicht festgestellt werden. In **Bild 4** sind die Ergebnisse der Zugversuche im Vergleich zum Grundmaterial mit $27,34 \text{ MPa}$ dargestellt.

Der maximale Schweißnahtfaktor wurde mit dem unstrukturierten konisch-zylindrischen Werkzeug erreicht. Die Festigkeit von $23,633 \text{ MPa}$ führte zu einem Schweißnahtfaktor von $86,41 \%$ der Ausgangsfestigkeit des hier verwendeten Polypropylens.

Bei den Festigkeiten fällt ein großer Abfall beim dreieckigen Werkzeug mit gewellter Laserstrukturierung auf. Die Bruchbilder legen eine unvollständige Verbindung der beiden Fügepartner auf der Retreating Side nahe. Auch ist zu erkennen, dass bei dem dreieckigen und dem zylindrischen Werkzeug die Laserstrukturierung keine Vorteile hinsichtlich der einstellenden Festigkeiten liefert. Die Ergebnisse sind vergleichbar. Im Gegensatz hierzu ist beim sechseckigen Werkzeug durch die Laserstrukturierung eine Verbesserung der Festigkeitskennwerte zu beobachten. Diese sind jedoch geringer als die Festigkeiten der anderen beiden Werkzeugformen. Ein Grund hierfür wird im Verhältnis von Pin-Oberfläche zu Schulterfläche gesehen. Die Pins besitzen alle eine Teilfläche, die als eine kleine rotierende Schulter gesehen werden kann, welche die Vermischung und Erwärmung beeinflusst. Diese ist beim konisch-zylindrischen Werkzeug mit $78,54 \text{ mm}^2$ am größten und beim sechseckigen Pin mit $37,29 \text{ mm}^2$ am kleinsten. Beim dreieckigen Pin sind es $52,88 \text{ mm}^2$.

Um den Einfluss dieser Fläche und die Leistungsfähigkeit der Laserstrukturierung gezielt bewerten zu können, wurden in den nachfolgenden Versuchen die unstrukturierten konisch-zylindrischen und sechseckigen Werkzeuge betrachtet und das mit geraden Linien strukturierte sechseckige Werkzeug verglichen. Diese Gegenüberstellung zwischen dem bisher besten Werkzeug, dem konisch-zylindrischen Werkzeug ohne Strukturierung und dem vielversprechenden sechseckigen Werkzeug für die Laserstrukturierung, ermöglicht weiterführende Aussagen zu Oberflächenzustand und Werkzeuggeometrie.

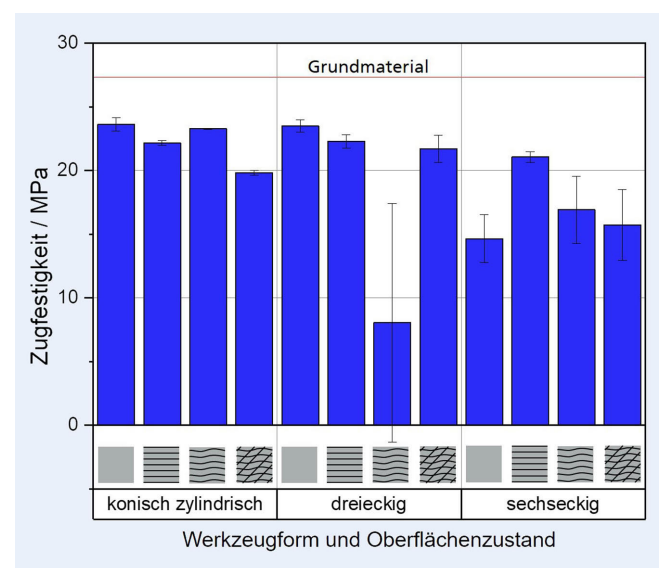


Bild 4. Zugfestigkeiten bei Polypropylenschweißnähten mit unterschiedlichen Werkzeugformen und strukturierten Oberflächen bei 6 mm/min Vorschub ($x = 3$). Grafik: Fraunhofer IPA

drischen und sechseckigen Werkzeuge betrachtet und das mit geraden Linien strukturierte sechseckige Werkzeug verglichen. Diese Gegenüberstellung zwischen dem bisher besten Werkzeug, dem konisch-zylindrischen Werkzeug ohne Strukturierung und dem vielversprechenden sechseckigen Werkzeug für die Laserstrukturierung, ermöglicht weiterführende Aussagen zu Oberflächenzustand und Werkzeuggeometrie.

3.3 Rührreißschweißen mit steigenden Vorschüben

In dieser Versuchsreihe wurde die Eignung der Werkzeuge für steigende Vorschübe getestet. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde in Stufen vom minimalen Vorschub von 6 mm/min auf den in dieser Versuchsreihe maximalen Vorschub von 30 mm/min erhöht. Vergleichbar zu den vorangegangenen Untersuchungen konnten hier immer wieder Kunststoffanhaftungen festgestellt werden. Auch hier konnte kein Zusammenhang zwischen Laserstruktur, Werkzeugform und Kunststoffanhaftung gezeigt werden. Eine Form des Verschleißes der Strukturen konnte ebenso nicht festgestellt werden.

Zusätzlich wurde für den Vergleich der Werkzeuge und die Einschätzung der wirkenden Temperaturen und deren Einfluss

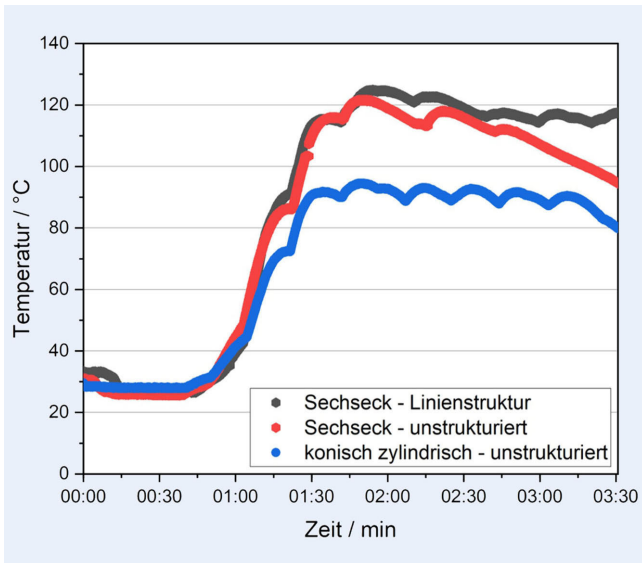


Bild 5. Prozesstemperaturen unterschiedlicher Werkzeuge beim Rührreißschweißen von Polypropylen ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $v_f = 18 \text{ mm/min}$. Grafik: Fraunhofer IPA

auf die Schweißnahtfestigkeit eine „Optris PI400“ Thermokamera leicht versetzt neben die Werkzeuge gestellt und die Temperatur direkt am Werkzeugaustritt bestimmt.

Um Einflüsse auf die sich einstellenden Temperaturen festzustellen, wurden die unterschiedlichen Werkzeugformen und -strukturierungen bei gleichen Prozessparametern verglichen. Ein beispielhafter Vergleich ist für $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ und $v_f = 18 \text{ mm/min}$ stellvertretend für alle Messungen in **Bild 5** dargestellt.

Es ist zu sehen, dass die Temperatur auf dem Kunststoff beim konisch-zylindrischen Werkzeug deutlich geringer ist als bei den anderen beiden Werkzeugen. Bei diesen ist auch kein merklicher Unterschied zwischen dem sechseckigen Werkzeug mit und ohne Strukturierung zu erkennen, sodass der Einfluss der Laserstrukturierung auf die sich final einstellende Prozesstemperatur als gering eingeschätzt wird. Ein Einfluss im Bereich der Erwärmungsgeschwindigkeit in den ersten Sekunden konnte bereits in vorangegangenen Arbeiten nachgewiesen werden [5]. Auffällig ist nur die Temperaturabnahme beim sechseckigen Werkzeug ohne Strukturierung nach 2:45 min. Dieser Temperaturabnahme liegt eine Behinderung der Sicht der Kamera auf die Schweißnaht durch die Einspannung der Kunststoffplatten zugrunde und ist daher zu vernachlässigen.

In **Bild 6** sind die Schweißnähte des sechseckigen Werkzeuges ohne Strukturierung mit steigenden Vorschüben und mit einem Vergleich zum konisch-zylindrischen Werkzeug dargestellt.

Alle Schweißnähte besitzen eine Länge von 70 mm und eine Breite von 10 mm. Die Schweißnähte von dem Werkzeug mit Strukturierung sind vergleichbar. Deutlich ist bei allen Schweißnähten des sechseckigen Werkzeuges eine Fehlstelle zu erkennen. Hier gibt es auf der Retreating Side eine unvollständige Anbindung verursacht durch einen stark ausgeprägten Tunnelfehler, der sich über die ganze Schweißnahtlänge zieht. Dieser Fehler gilt für das sechseckige Werkzeug auch mit Laserstrukturierung und konnte beim konisch-zylindrischen Werkzeug nur in stark abgeschwächter Form beobachtet werden. Der Fehler ist hier oberflächennah und dringt längst nicht so weit in die Schweißnaht vor wie beim sechseckigen Werkzeug. Vereinzelt können auch auf der Oberfläche Schweißgrate beobachtet werden. Dazu gehören die Schweißnähte mit 6 mm/min und 24 mm/min Vorschub. Für die Schweißnähte mit 18 mm/min, 24 mm/min und

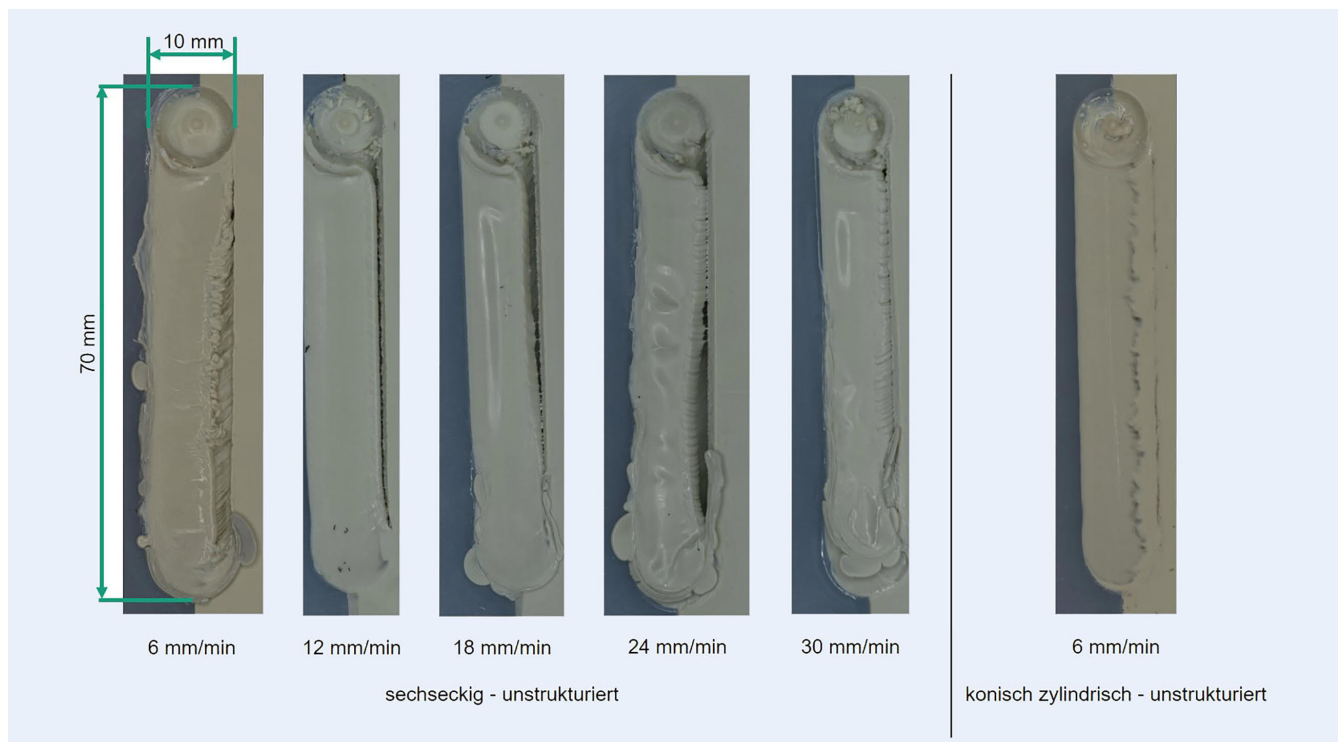


Bild 6. Schweißnähte des sechseckigen Werkzeuges über steigende Vorschübe (links) und des konischen zylindrischen Werkzeuges mit 6 mm Vorschub (rechts). Foto: Fraunhofer IPA

30 mm/min ergeben sich zudem Erhöhungen über das Grundmaterial hinaus. Als ursächlich werden falsche Prozessparameter und zu geringe Anpresskräfte gesehen.

Die optische Qualität der Schweißnähte beim konisch-zylindrischen Werkzeug ist wegen der besseren Vermischung durch die größere Schulterfläche deutlich höher. Optisch ist zwar die Durchmischung zu erkennen, dies liegt aber nur an den unterschiedlich eingefärbten Kunststoffen. Qualitativ handelt es sich um eine fehlerfreie, ebene und gleichmäßige Schweißnaht.

Die Festigkeitswerte in **Bild 7** bestätigen nochmals die bessere Qualität des konisch-zylindrischen Werkzeuges.

Es ist zu sehen, dass die Festigkeitswerte beim konisch-zylindrischen Werkzeug in den ersten Erhöhungsschritten des Vorschubs stark abnehmen. Ab 18 mm/min nehmen diese aber nur noch langsam ab. Im Gegensatz dazu nimmt die Festigkeit der Schweißnähte bei den sechseckigen Werkzeugen rapide auf Minimalwerte ab. Grund hierfür sind die zuvor aufgezeigten Fehlstellen, die gute Schweißnahtqualitäten verhindern.

Es zeigt sich also eindeutig, dass die konisch-zylindrische Werkzeugstruktur deutlich höhere Festigkeiten in den Schweißnähten erzeugt. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Festigkeiten bei den sechseckigen Werkzeugen unabhängig vom Oberflächenzustand deutlich abnehmen. Die Gründe können vielfältig sein, etwa die andere Werkzeugform und die kleinere rotierende Schulterfläche, welche die Fließeigenschaften des Thermoplastes negativ beeinflussen können. Außerdem ist der Unterschied zwischen den Prozesstemperaturen nicht zu vernachlässigen.

Die Betrachtung der Prozesstemperaturen mit den resultierenden Festigkeiten legt hier nahe, dass zu hohe Temperaturen die Festigkeit negativ beeinflussen können. Es ist somit darauf zu achten, dass die rotierende Schulterfläche nicht zu groß wird, da sonst eine zu starke Erwärmung stattfindet. Das Verhältnis zwischen Pin und rotierender Schulter muss also entsprechend abgestimmt sein. Dies muss in weiterführenden Untersuchungen gezielt betrachtet werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurde untersucht, welchen Einfluss Laserstrukturen auf die resultierenden Schweißnahtfestigkeiten, die wirkenden Prozesstemperaturen und die möglichen maximalen Vorschübe ohne Qualitätsverlust haben. Dabei wurden folgenden Erkenntnisse gesammelt:

- Die Werkzeugform und Oberflächenstrukturierung hat einen Einfluss auf die sich einstellenden Festigkeiten. Einen Einfluss der Oberflächenstrukturierung mittels Laser auf die sich final einstellenden Prozesstemperaturen konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden.
- Die Werkzeugform hat einen starken Einfluss auf die sich einstellende Oberflächenqualität und die resultierenden Prozesstemperaturen und damit die Festigkeit der Schweißnähte.
- Die sich ergebende Festigkeit ist ein Zusammenspiel aus Werkzeugform und Prozessparameter. Ein geeigneter Oberflächenzustand, beispielsweise durch geeignete Strukturierung, kann die Festigkeit positiv beeinflussen, ist aber nicht automatisch gegeben.
- Die abschließenden Versuche legen nahe, dass zu hohe Prozesstemperaturen die Festigkeit negativ beeinflussen.

Es lässt sich feststellen, dass positive Effekte, wie Festigkeitssteigerungen aufgrund der Laserstrukturierung für bestimmte

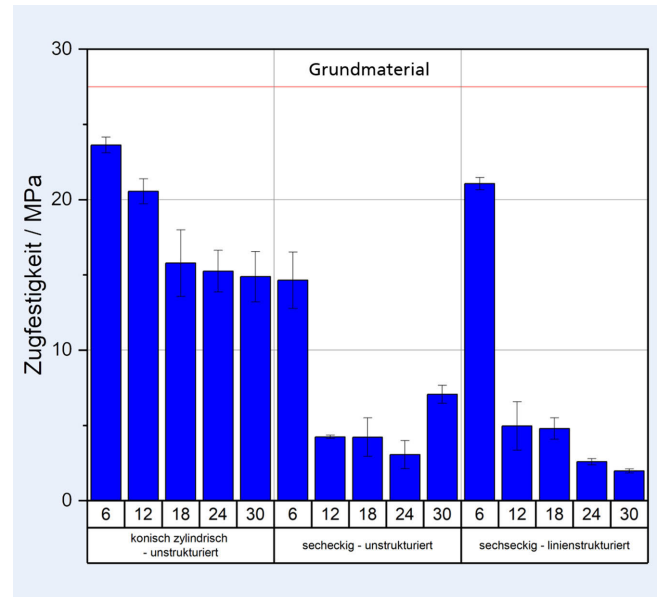


Bild 7. Vergleich des konischen zylindrischen, unstrukturierten Werkzeuges mit den sechseckigen linienstrukturierten und unstrukturierten Werkzeugen bei steigenden Vorschüben ($x = 3$). Grafik: Fraunhofer IPA

Werkzeugformen erkennbar sind. Dies verweist auf ein grundsätzliches Potenzial. Jedoch müssen diese Potenziale noch auf andere Werkzeuge übertragen werden, um die positiven Effekte und damit Schweißnahtqualitäten zu maximieren. Dazu sind tiefere Untersuchungen nötig. Deshalb werden zukünftig die folgenden Untersuchungen angestrebt:

- Die Positionierung und Form der Laserstrukturen muss auf erfolgreiche Werkzeugformen, wie das konisch-zylindrische Werkzeug, angepasst werden. Es wird so eine weitere Verbesserung der Schweißnahtqualität auch bei höheren Vorschüben erwartet.
- Die gesammelten Erkenntnissen aus Temperaturmessung und Festigkeitsuntersuchung zeigen, dass eine weitere Erhöhung der Prozesstemperatur nicht zielführend ist. Aus diesem Grund muss eine Anpassung der Prozessparameter, eine Minimierung der Werkzeuggröße oder Anpassung der Werkzeugform sowie des Durchmesserverhältnisses zwischen Pin und rotierender Schulter in Betracht gezogen werden.

Im Rahmen weiterer auf diesen Ergebnissen aufbauenden Untersuchungen werden diese Aspekte eingehender betrachtet.

FÖRDERHINWEIS

Das Projekt „Thermowelding“ wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Förderprogramms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ gefördert (Förderkennzeichen: ZF4814201). Diese Veröffentlichung ist im Rahmen des Projektes am Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb an der Universität Stuttgart entstanden. Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern kama Maschinenbau GmbH und CMO-SYS GmbH für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Siebenpfeiffer, W.: Leichtbau-Technologien Im Automobilbau. Werkstoffe – Fertigung – Konzepte. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014
- [2] Lambiase, F.; Derazkola, A.; Simchi, A.: Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers – State of the Art. *Materials* 13 (2020) 10, #2291; doi.org/10.3390/ma13102291
- [3] Schuster, M.: Position der Werkzeugschulter entscheidend. Erkenntnisse beim Rührreißschweißen von Metallen nicht auf thermoplastische Kunststoffe überführbar. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 6, S. 503–507. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [4] Czigány, T.; Kiss, Z.: Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites. *Proceedings of ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2011, no pages
- [5] Stribick, S.; Dieringer, E.; Huber, P.: Werkzeugeintritt beim Rührreißschweißen. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 11–12, S. 840–845. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [6] Mishra, D.; Sahu, S. K.; Mahto, R. P. et al.: Friction Stir Welding for Joining of Polymers. In: Dixit, U. S.; Narayanan, R. G. (eds.): *Strengthening and Joining by Plastic Deformation*. Singapore: Springer Singapore 2019, pp. 123–162
- [7] Eslami, S.; Figueiredo, M. A. V. de; Tavares, P. J. et al.: Parameter optimisation of friction stir welded dissimilar polymers joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (2018) 5–8, pp. 1759–1770
- [8] Demir, A. G.; Maressa, P.; Previtali, B.: Fibre Laser Texturing for Surface Functionalization. *Physics Procedia* 41 (2013), pp. 759–768
- [9] Rechner, R.; Jansen, I.; Beyer, E.: Laseroberflächenvorbehandlung von Aluminium zur Optimierung der Oxidschichteigenschaften für das strukturelle Kleben. Zweites Doktorandenseminar Klebtechnik.
- Vorträge der gleichnamigen Veranstaltung in Dresden am 5./6. September 2011. Düsseldorf: DVS Media 2012
- [10] Esch, P.: Untersuchung zur Wirkungsweise von lasererzeugten Mikrostrukturen auf Funktionsflächen an Bohrwerkzeugen für metallische Leichtbauwerkstoffe. Dissertation, Universität Stuttgart, 2021



Sascha Stribick, M.Sc.

Foto: Pieter van Munster

Selim Akcara, B.Sc.

Erik Dieringer, M.Sc.

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Universität Stuttgart, Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1108
sascha.stribick@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de
www.iff.uni-stuttgart.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)