1.1 Reduktion der Heißgasschweißen

Referent: Johannes Schmid, M.Sc. ¹, Dennis F. Weißer, M.Sc. ¹, Dennis Mayer, M.Eng. ¹, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll ², Prof. Dr.-Ing. Matthias H. Deckert ¹
¹ Bereich Kunststofftechnik der Fakultät Maschinen und Systeme der Hochschule Esslingen, Deutschland
² Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung an der Technischen Universität Chemnitz, Deutschland

Erwärmungszeit

1 Einleitung

Zum Fügen von technischen Kunststoffbauteilen haben sich in der Serienfertigung Fügeverfahren mit berührender und berührungsloser Erwärmung etabliert (Abbildung 1). In den letzten Jahren werden zum Schweißen von technischen Kunststoffen vermehrt berührungslose Fügeverfahren, wie Laser-, Infrarot- oder Heißgasschweißen, eingesetzt. Die Wahl des Schweißverfahrens für ein zu fügendes Kunststoffbauteil hat in Abhängigkeit des Erwärmungsprinzips einen signifikanten Einfluss auf die Entstehung von Partikeln im Bauteil (vgl. [1], [2]). Je nach Fügeverfahren ist eine nachträgliche Reinigung notwendig, um die meist in der Automobilindustrie geforderten Sauberkeits-Grenzwerte einhalten zu können.

Grund dafür ist das Entstehen von Partikeln wie z. B. beim Reibschweißen oder das Anhaften von Schmelze am Heizspiegel beim Heizelementschweißen. Dies wird bei der Auswahl eines geeigneten Fügeverfahrens für technische Kunststoffe (z. B. Polyamide) immer häufiger als ausschließendes Kriterium aufgeführt. Beim Reibschweißen entstehen in der Kaltreibphase Partikel mit einer Länge von einigen Millimetern, welche im Bauteil verbleiben [1]. Das Anhaften der Schmelzeschicht beim Heizelementschweißen kann die Festigkeit der Schweißverbindung negativ beeinflussen und tritt vor allem bei niedrigviskosen Materialien wie PA6 und PA66 auf (vgl. [3]). Für diese Werkstoffe ist ein Wechsel des Schweißverfahrens auf z. B. Laser-, Infrarot- oder Heißgasschweißen sinnvoll.

Das Laserdurchstrahl- und das Heißgasschweißen sind bezüglich der Bauteilsauberkeit optimale Fügeverfahren, da bei der Bauteilerwärmung keine Partikel freigesetzt werden und es zu keinem unkontrolliertem Schweißaustrieb oder sonstigem Partikelaustrag kommt (vgl. [1], [2]).



Abbildung 1: Übersicht berührender und berührungsloser Kunststofffügeverfahren

beim

2 Heißgasschweißen

In den letzten Jahren gewinnt der Fügeprozess Heißgasschweißen immer mehr an Bedeutung als weiteres Serienschweißverfahren für technische Kunststoffe (vgl. [4], [2]). Das Heißgasschweißen ist eine Weiterentwicklung des weitverbreiteten Heizelementschweißen (vgl. [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]). Wissenschaftliche Untersuchungen, welche sich speziell mit dem Heißgasschweißen beschäftigen, sind nur in geringer Anzahl zu finden.

Die partikelfreie, berührungslose Erwärmung des Kunststoffes und vor allem die freie Gestaltung der Schweißnaht sind Vorteile des Prozesses Heißgasschweißen. Die komplette Schweißkontur beider zu fügenden Bauteilhälften wird mit kleinen, eng beieinanderliegenden Röhrchen auf dem Heißgaswerkzeug nachgebildet. Durch den aus den Röhrchen austretenden, heißen Gasstrom wird der Kunststoff gezielt an den dafür vorgesehen Fügeflächen aufgeschmolzen (Abbildung 2). Anschließend werden die Bauteile unter Druck gefügt.



Abbildung 2: Übersicht Verfahrensablauf Heißgasschweißen

Die Vorteile des Heißgasschweißens liegen, neben einer berührungslosen Erwärmung, vor allem auch in der freien Gestaltung der Schweißnaht und deren Verlauf. Es können, im Gegensatz zu den üblichen Schweißverfahren wie Ultraschalloder Vibrationsschweißen, vergleichsweise einfach dreidimensionale Schweißnähte hergestellt werden ([12], [13], [2]). Nachteilig an dem Verfahren sind die hierfür benötigten, hochkomplexen Werkzeuge, relativ lange Zykluszeiten und ein hoher Energiebedarf (vgl. [2], [14]).

Typische heißgasgeschweißte Bauteile sind Behälter, Tanks, Ölführungen oder Ventilblöcke für die Automobilindustrie, aber auch Batteriegehäuse für die Elektromobilität. Auch in der Medizintechnik findet das Heißgasschweißen Anwendung.

3 Entwicklung eines neuen Düsenkonzepts

3.1 Das Aufschmelzverhalten

Beim konventionellen Heißgasschweißprozess wird ein Düsensystem aus aneinander gereihten, runden Röhrchen (im weiteren Verlauf "Rund-Düse" genannt) verwendet. Die aktuell verwendete Rund-Düse erwärmt den Kunststoff durch eine Prallströmung. Dadurch entstehen die kraterförmigen, aus der Praxis bekannten, Strukturen auf der Kunststoffoberfläche unter jeder einzelnen Düse. Bei dieser Düsen-Art entstehen, neben schwierig zu kontrollierenden Oberflächentemperaturen, vergleichsweise hohe Wärmeverluste. Dies hat lange Aufheizzeiten zur Folge, da das heiße Gas nach dem Auftreffen auf die Kunststoffoberfläche seitlich unkontrolliert wegströmt, Abbildung 3 (links). Die partielle Erwärmung des Kunststoffes führt zu einer Überhitzung in der Mitte der Naht, die Randbereiche werden jedoch vergleichsweise wenig erwärmt. Durch die ungleichmäßige Aufschmelzung des Kunststoffes ergibt sich ein begrenzter Fügeweg und ein enges Prozessfenster. Außerdem ist der Schweißprozess mit der Rund-Düse weniger reproduzierbar und reagiert empfindlich auf kleinste Einflussfaktoren.

Ein neu entwickeltes Düsensystem, welches die Schweißnaht beim Erwärmen umschließt (nachfolgend "Aufsatz-Düse" genannt), ermöglicht es, die benötigte Erwärmungszeit des Kunststoffes deutlich zu reduzieren. Bei der Aufsatz-Düse, dargestellt in Abbildung 3 (rechts), ragt das Kunststoffbauteil mindestens 0,5 mm in die Düse hinein. Durch das Umschließen der Schweißnaht wird das heiße Prozessgas daran gehindert seitlich unkontrolliert abzuströmen. Dies ermöglicht eine kontrollierte Strömungskinematik und ein homogenes Aufschmelzen des Schweißsteges. Dadurch können mit der Aufsatz-Düse auch toleranzbedingte Schwankungen in den Abmaßen der Kunststoffbauteile besser ausgeglichen werden. Darüber hinaus wir ein größerer Fügeweg erreicht, da mehr Kunststoff aufgeschmolzen wird. Gleichzeitig können, bedingt durch das effiziente Erwärmen des Kunststoffes, höhere Temperaturen in kürzerer Zeit erreicht werden, was den Heißgasschweißprozess auch für technische Kunststoffe mit hohen Schmelztemperaturen nutzbar macht.



Abbildung 3: Vergleich des Aufschmelzverhaltens einer Kunststoffschweißnaht, dargestellt im Schnitt, ein Röhrchen betrachtet; links: Rund-Düse (Abstand: 2 mm); rechts: Aufsatz-Düse (Abstand: - 0,5 mm)

Das neu entwickelte Düsenkonzept führt, im Vergleich zur Rund-Düse, im Kunststoff zu einem gleichmäßigerem Aufschmelzverhalten. Unterschiede bezüglich des durch das Düsenkonzept bedingte Aufschmelzverhalten werden beispielhaft an einem PA66-GF35 (Zytel® 70G35HSLR BK416LM – DuPont) untersucht. Bei der konventionellen Rund-Düse wird in der Mitte der Schweißnaht mehr Wärme eingetragen, während die Randbereiche weniger erwärmt werden, Abbildung 4. An den Rändern der

Seite 4

Schweißnaht ist zu erkennen, dass wenig Kunststoff aufgeschmolzen wird. Der Fügeweg ist durch das ungleichmäßige Aufschmelzen des Kunststoffes begrenzt.



Abbildung 4: Dünnschnittaufnahme einer mit Rund-Düse erwärmten Schweißnaht mit elliptisch aufgeschmolzenem Fügebereich (links) und schematische Zeichung (rechts); Schnittdicke: t = 10 μm; Höhe Rekristallisationsschicht: 156,69 μm (links); 376,82 μm (mittig); 253,78 μm (rechts)

Im Gegensatz zur Rund-Düse wird bei der Aufsatz-Düse die Schweißnaht vollständig von der Düse abgedeckt. Dadurch ist der Heißgasstrom deutlich kontrollierter und ermöglicht ein gleichmäßiges Aufschmelzen des Kunststoffes, Abbildung 5. Zusätzlich wird der Wärmeverlust reduziert und damit die Aufheizzeit deutlich verkürzt.



Abbildung 5: Dünnschnittaufnahme einer mit Aufsatz-Düse erwärmten Schweißnaht mit einem mit dem Heizelementschweißen vergleichbaren aufgeschmolzenen Fügebereich (links) und schematische Zeichnung (rechts);

Schnittdicke: t = 10 μ m; Höhe Rekristallisationsschicht: 448 μ m (links); 428 μ m (mittig); 480 μ m (rechts)

Aufgrund des optimierten Strömungsprofils kann die Aufsatz-Düse den Erwärmungsvorgang bis zum Erreichen der notwendigen Schmelztemperaturen bei den untersuchten Werkstoffen um bis zu 60 % reduzieren. Hierbei werden reproduzierbare. robuste und gegenüber der Rund-Düse gleichmäßigere Schweißnahtfestigkeiten erzielt. Als Folge führt dies, neben einer erheblich kürzeren Zykluszeit beim Schweißen, zu einer Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs und damit zu einer Optimierung der Prozesskosten. (vgl. [15, 16]).

3.2 Versuchsaufbau zum Vergleich der Düsenkonzepte

Um den Einfluss der beiden Düsen-Varianten auf das Erwärmungsverhalten des Kunststoffes untersuchen zu können, werden mit der Rund- und Aufsatz-Düse Temperaturmessungen durchgeführt. Es werden zwei Platten (60 mm x 60 mm x 4 mm) verschweißt und das Erwärmungsverhalten des Kunststoffes mit selbst hergestellten Thermoelementen Typ J gemessen. Die Heißgasschweißanlage (Typ: VDP 2012, Hersteller: KVT Bielefeld GmbH, Bielefeld) ist mit Drucksensoren und einem IR-Kamera-System ausgestattet (Abbildung 6) (vgl. [15]).



Abbildung 6: Heißgasschweißanlage mit IR-Kamera-System und Drucksensoren zur Fügedrucküberwachung

3.3 Vergleich des Erwärmungsverhaltens der Rund- und Aufsatz-Düse

Der Kunststoff muss entsprechend der gewünschten Schweißtiefe aufgeschmolzen werden. In der Praxis hat sich eine Schweißtiefe von 0.8 mm bis 1.0 mm bewährt. Die Auswertungen der Temperaturmessungen zeigen, dass die Aufsatz-Düse den Kunststoff effizienter erwärmen kann (Abbildung 7). Innerhalb von 10 s erwärmt die Aufsatz-Düse den Kunststoff in einer Tiefe von 0,5 mm auf 190 °C, die Rund-Düse erreicht in der gleichen Zeit 155 °C. Nach weiteren 15 s Erwärmungszeit erreicht die Rund-Düse im Kunststoff eine Temperatur von 201 °C. Es ist zu erkennen, dass mit der Aufsatz-Düse im Vergleich zur Rund-Düse eine um 10 s kürzere Aufheizdauer benötigt wird, um vergleichbare Temperaturen zu erreichen. Mit der Rund-Düse muss das Bauteil weitere 5 s erwärmt werden, um eine homogene Temperaturverteilung über die gesamte Breite der Schweißfläche und damit vergleichbare Schweißnahtfestigkeiten zu gewährleisten (vgl. [15]).

Der Heißgasschweißprozess kann, ohne Betrachtung des Bauteilhandlings, in drei Abschnitte unterteilt werden:

- Erwärmen des Kunststoffs,
- Ausschwenken des Heißgaswerkzeuges, Fügen der Bauteile und
- Abkühlen der Bauteile.

Ein Vergleich der beiden Düsenkonzepte verdeutlicht, dass der Gesamtprozess mit der Aufsatz-Düse (exklusive Bauteilhandling) von 35 s auf 20 s verkürzt werden kann.



Abbildung 7: Vergleich der gemessenen Temperaturen während des Heißgasschweißprozesses als Mittelwert aus dem unteren und oberen Spiegel im Vergleich. Geschweißt wird mit Stickstoff als Prozessgas.

Um das IR-Kamera-System zu validieren werden Temperaturmessungen mit Thermoelementen und der eingebauten IR-Kamera durchgeführt (Abbildung 8):

- IR-Messung wird nach Ausschwenken des Heißgasspiegels durchgeführt,
- G + 0.1 mm: Messung der Gastemperatur auf Kunststoffoberfläche,
- K 0.0 mm: Messung der Temperatur der Kunststoffoberflächen,
- K 0.5 mm: Messung der Temperatur des Kunststoffes in 0,5 mm Tiefe.

Die gemessenen Temperaturen nach dem Erwärmungsvorgang stimmen zwischen Thermoelementen und IR-Kamera-System überein. Im weiteren Verlauf werden die Temperaturen des IR-Kamera-System verwendet.



Abbildung 8: Vergleich der Temperaturmessungen mit IR-Kamera und Thermoelementen bei einer Erwärmungszeit von 12,5 s und einer Gastemperatur von 355 °C

4 Schweißversuche an Druckbehälter-Probekörpern

4.1 Versuchsaufbau zur Untersuchung des Berstverhaltens

Um die beiden Düsen-Systeme (Rund- und Aufsatz-Düse) anwendungsnah zu untersuchen, werden Schweißversuche an Druckbehälter-Probekörpern durchgeführt (Abbildung 10). Die entstehenden Oberflächentemperaturen werden mit dem IR-Kamera-System ausgewertet (Abbildung 9). Der Vergleich der beiden Düsen-Systeme wird an zwei Polyamiden durchgeführt:

- PA6-GF40 (Zytel® 73G40HSLA BK416LM DuPont),
- PA66-GF35 (Zytel® 70G35HSLR BK416LM DuPont).



Abbildung 9: Obere Schweißposition (links) und untere Schweißposition (rechts)

Eine Erweiterung der Untersuchung an kugelförmigen Bauteilen ist sinnvoll, da viele Bauteile, welche durch Heißgasschweißen gefügt werden, behälterähnliche Bauteile mit einer geschlossenen Schweißnaht sind.





Abbildung 10: Probekörper zur Berstdruck-Untersuchung (links) und geschweißter Berstdruck-Probekörper (rechts)

4.2 Einfluss der Erwärmungszeit

Die Versuche an einem PA6-GF40 und einem PA66-GF35 zeigen, dass die Oberflächentemperatur des Kunststoffes mit steigender Erwärmungszeit steigt (Abbildung 11). Des Weiteren zeigt sich, dass bei der Aufsatz-Düse, im Vergleich zur Rund-Düse, bei gleicher Temperatur des Heißgaswerkzeuges die Oberflächentemperatur bei einer Verlängerung der Erwärmungszeit um 5 s deutlich stärker ansteigt:

- PA6-GF40, Aufsatz-Düse, 6 K/s vs. Rund-Düse 1 K/s (400 °C),
- PA66-GF35, Aufsatz-Düse, 7 K/s vs. Rund-Düse 2 K/s (475 °C).

Die Untersuchungen zeigen, dass das Aufsatz-Düsen-System den Kunststoff schneller erwärmt. Zudem werden in kürzerer Erwärmungszeit höhere Kunststoffoberflächentemperaturen erreicht. Des Weiteren sind die Standard-Abweichungen bei den Untersuchungen mit dem Rund-Düsen-System deutlich größer, im Vergleich zum Aufsatz-Düsen-System, was auf einen instabileren Prozess hindeutet.





4.3 Zusammenhang zwischen Kunststoffoberflächentemperatur und Fügedruck

Mit dem Aufsatz-Düsen-System zeigt sich bei den untersuchten PA6-GF40 und dem PA66-GF35, dass der Fügedruck nach dem Erreichen der gewünschten Schweißtiefe mit steigender Kunststoffoberflächentemperatur sinkt (Abbildung 12). Erklärt werden kann dies durch eine größere Aufschmelztiefe im Kunststoff, die wiederum führt zu einem geringeren, notwendigen Fügedruck bei gleichbleibender Schweißtiefe. Dieses Verhalten ist bei dem Rund-Düsen-System nicht erkennbar. Die Standard-Abweichungen bei den Versuchen mit dem Rund-Düsen-System sind im Vergleich zur Aufsatz-Düse signifikant größer und der Prozess damit schwieriger zu kontrollieren.



Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur des Kunststoffs und Fügedruck an einem PA6-GF40 (links) und einem PA66-GF35 (rechts)

4.4 Einfluss der Kunststoffoberflächentemperatur auf den erreichbaren Berstdruck

Die Untersuchungen an einem PA6-GF40 und einem PA66-GF35 mit der Aufsatz-Düse zeigen, dass steigende Oberflächentemperaturen zu höheren Berstdrücken führen. Eine Oberflächentemperatur des PA6-GF40 von 275 °C führt zu einem Berstdruck von mehr als 18 bar. Bei der Rund-Düse führt eine Oberflächentemperatur von 250 °C zu einem Berstdruck von 16 bar, jedoch sind die Standard-Abweichungen im Vergleich zur Aufsatz-Düse deutlich größer und damit ist die Reproduzierbarkeit kleiner.



Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur des Kunststoffs und Berstdruck an einem PA6-GF40

Bei der Aufsatz-Düse werden mit dem untersuchten PA66-GF35 bei einer Oberflächentemperatur des Kunststoffes von 317 °C Berstdrücke von 15 bar erreicht. Im Vergleich hierzu werden mit dem Rund-Düsen-System lediglich Berstdrücken von 13 bar mit größeren Standardabweichungen erreicht.



Abbildung 14: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur des Kunststoffs und Berstdruck an einem PA66-GF35

4.5 Einfluss des Fügedrucks auf den erreichbaren Berstdruck

Beim Aufsatz-Düsen-System zeigt sich an dem untersuchten PA6-GF40, dass mit sinkendem Fügedruck die erreichbaren Berstdrücke steigen. Bei einem Fügedruck von weniger als 0,5 MPa werden die höchsten Berstdrücke (18 bar) erreicht. Dieses Verhalten kann bei dem Rund-Düsen-System nicht beobachtet werden. Es kann kein Zusammenhang zwischen Fügedruck und erreichtem Berstdruck beobachtet werden.



Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Fügedruck und Berstdruck an einem PA6-GF40

Die Untersuchungen an dem PA66-GF35 (Abbildung 16) zeigt, wie auch bei dem untersuchten PA6-GF40 (Abbildung 15), dass bei der Aufsatz-Düse ein sinkender Fügedruck zu steigenden Berstdrücken führt. Ein Fügedruck von weniger als 0,5 MPa zu den höchsten Berstdrücken (15 bar) führt. Auch bei der Rund-Düse führen geringere Fügedrücke zu höheren Berstdrücken.



Abbildung 16: Zusammenhang zwischen Fügedruck und Berstdruck an einem PA66-GF35

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit der Aufsatz-Düse wird die Schweißnaht vollständig von der Düse selbst umschlossen. Dadurch wird der Wärmeverlust minimiert und die Strömung des Heißgases kann deutlich besser kontrolliert werden. Bei Polyamiden mit verschiedenen Basispolymeren und unterschiedlichen Glasfaseranteilen ist im Schnitt eine Reduktion der Erwärmungszeit von bis zu 50 % möglich. Die getesteten Materialien finden am Markt große Anwendung.

Die Untersuchungen an den kugelförmigen Bauteilen zeigen, dass bei dem untersuchten PA6-GF40 mit Kunststoffoberflächentemperaturen zwischen 275 °C und 290 °C Berstdrücke von mehr als 16 bar erreicht werden. Für das untersuchte PA66-GF35 führen Oberflächentemperaturen am Kunststoff von 300 °C bis 320 °C zu Berstdrücken von über 12 bar.



Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur des Kunststoffs und erreichbarem Berstdruck bei den untersuchten Werkstoffen

Bei den untersuchten Werkstoffen führt ein geringerer Fügedruck zu den höchsten Berstdrücken. Bei dem PA6-GF40 führen Fügedrücke von unter 0,4 MPa, für PA66-GF35 von unter 0,6 MPa zu den höchsten Berstdrücken.



Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Fügedruck und erreichbarem Berstdruck bei den untersuchten Werkstoffen

Mit der Aufsatz-Düse werden bei durchgängig kürzeren Erwärmungszeiten Berstdrücke von bis zu 18,5 bar (PA6-GF40) und 15 bar (PA66-GF35) erreicht. Des Weiteren sind bei der Aufsatz-Düse die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern ersichtlich, für die Rund-Düse trifft dies nicht zu. Für den Einsatz der Aufsatz-Düse ergeben sich, aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und Versuche folgende Empfehlungen für die beiden Werkstoffe (Tabelle 1). Mit der Rund-Düse sind die genannten Prozessparameter gegebenenfalls nicht im optimalen Prozessfenster.

Werkstoff	PA6-GF40 73G40HSLA BK416LM	PA66-GF35 70G35 HSLR BK416LM
Schmelztemperatur [°C]	220	263
Fügetemperatur [°C]	275 bis 289	305 bis 320
Fügedruck [MPa]	0,40 bis 0,26	0,58 bis 0,33
erreichbare Berstdrücke [bar]	16,8 bis 18,5	12,7 bis 15,0

Tabelle 1: Übersicht sinnvoller Prozessparameter zum Schweißen mit der Aufsatz-Düse

Für eine wirtschaftliche Darstellung des Schweißprozesses ist in erster Linie eine kurze Zykluszeit relevant. Die wirtschaftliche Nutzung wird beim Heißgasschweißen ebenfalls durch einen geringeren Gasverbrauch bzw. eine geringere Temperatur des Heißgaswerkzeuges gefördert. Daher ist es zielführend, die Erwärmungszeit und die Heißgaswerkzeugtemperatur zu reduzieren. Zudem führt ein breiteres Prozessfenster und die kürzere Erwärmungszeit bei der Aufsatz-Düse zu einer größeren Akzeptanz des Heißgasschweißens. Neue schweißbare Werkstoffe eröffnen wiederum neue Anwendungsfelder und Märkte.

Literatur

- [1] Belmann, A.: Kontaminationsreduktion beim Fügen von Kunststoffen. Joining Plastics Fügen von Kunststoffen 11 (2017) 1, S. 34–41
- [2] Gabriele Rzepka: Feste Verbindung unter besonderer Atmosphäre. Wie partikelarmes, berührungsloses Schweißen von technischen bis hun zu Hochleistungskunststoffen gelingt. K-Profi 10 (2021) 5, S. 32–37
- [3] Potente, H., Schöppner, V. u. Hoffschlag, R.: Untersuchungen zum Schmelzeanhaften beim Heizelementschweißen. Joining Plastics - Fügen von Kunststoffen (2010), S. 102–107
- [4] Mochev, S. u. Endemann, U. M.: Mehr als nur heiße Luft. Systematische Prozesoptimierung für das Heißgasschweißen. Kunststoffe (2016) 12, S. 76–79
- [5] Egen, U.: Gefügestruktur in Heizelementschweißnähten an Polypropylen-Rohren, Universität Kassel Dissertation. Kassel 1985
- [6] Kreiter, J.: Optimierung der Schweißnahtfestigkeit von Heizelementstumpfschweißungen von Formteilen durch verbesserte Prozessführung und Selbsteinstellung, Universität Paderborn Dissertation. Paderborn 1987
- [7] Tüchert, C.: Einfluss der inneren Eigenschaften von Schweißverbindungen auf die langzeitige Schweißnahtgüte. Influence of the Internal Properties of Weld Seams on the Long Term Weld Seam Quality, RWTH Aachen Dissertation. Aachen 2005
- [8] Bonten, C.: Beitrag zur Erklärung des Wirkmechanismus in Schweissverbindungen aus teilkristallinen Thermoplasten. Contribution to an explanation of the acting mechanism in welded seams out of semi-crystalline thermoplastics, Universität Gesamthochschule Essen Dissertation. Essen 1998
- Baudrit, B., Schmitt, M., Kressirer, S., Stübs, O., Heidemeyer, P., Bastian, M. u. Dommer, M.: Energieeffizenz beim Heizelementschweißen. Joining Plastics - Fügen von Kunststoffen 8 (2014) 3, S. 197–203
- [10] Potente, H., Schöppner, V., Hoffschlag, R., Schnieders, J. u. Gövert Stefan: Zykluszeit einsparen durch intensive Kühlung beim Heizelementschweißen. Joining Plastics - Fügen von Kunststoffen (2008), S. 50–56
- [11] Friedrich, N. u. Schöppner, V.: Zykluszeitreduzierung ohne Qualitätsverlust beim Heizelementstumpfschweißen durch Zwangskühlung mittels Druckluft. Joining Plastics - Fügen von Kunststoffen (2012), S. 134–141
- [12] Mochev, S.: Heißgasschweißen Aktuelle Entwicklungen und Möglichkeiten. Fügen von Kunststoffen im Automobilbau. Fügen von Kunststoffen im Automobilbau. Landshut 2018
- [13] Neuartiges Heißgasschweißen von Kunststoffbautei-len. Spektrum 48 Hochschulzeitschrift. Spektrum, Deckert, M. H., Schmid, J. u. Weißer, D., Esslingen 2019
- [14] Mochev, S. u. Endemann, U. M.: Schneller und besser. Werkzeuganpassung reduziert Prozesszeiten und verbessert Nahtqualität. Kunststoffe 2018 (2018) 9, S. 122–124
- [15] Schmid, J., Deckert, M. H., Weißer, D. F., Mayer, D., Böhler, G., Böhler, S. u. Müller, A. K.: Reduktion der Erwärmungszeit beim Heißgasschweißen. Reduction of ther heating time for hot gas welding. Kunststofftechnik 17 (2021) 2, S. 112–128
- [16] Schmid, J., Weißer, D., Mayer, D., Böhler, G., Böhler, S., Müller, A. K. u. Deckert, M. H.: Heißgasschweißen in der Komfortzone. Neuartige Düsengeneration eröffnet vielfältige Möglichkeiten. Kunststoffe (2021) 09, S. 80–82