

Gezielte Temperierung in der Warmmassivumformung

Robustifizierung von mehrstufigen Umformprozessen

N. Gerke, H. Amend, J. Peddinghaus, J. Uhe, K. Brunotte, B.-A. Behrens

ZUSAMMENFASSUNG Die Warmumformung von hybriden Bauteilen durch mehrstufige Umformprozesse stellt derzeit eine große Herausforderung dar. Die Verbundfestigkeit der Werkstoffe ist abhängig von den Eigenschaften der Fügezone, welche eine hohe Sensitivität gegenüber der Temperaturführung aufweist. Anhand einer umfangreichen Versuchsreihe wird die Temperaturschwankung in den Bauteilen über die Prozesskette an definierten Stellen erfasst und ein Ansatz zur Kompensation der Schwankungen vor den Umformungen aufgezeigt.

Robustification of multi-stage forming processes

Currently, the hot forming of hybrid components using multi-stage forming processes poses a major challenge. The bond strength of the materials depends on the properties of the joint zone, which is highly sensitive to temperature control. Based on an experimental study, the temperature deviation in the components is recorded at defined points along the process chain and an approach for compensating the deviations before forming is presented.

STICHWÖRTER

Tailored-Forming, Temperaturführung, Umformtechnik

1 Einführung

Die Warmmassivumformung hybrider Bauteile, vor allem von Aluminium-Stahl-Verbindungen, stellt sich aufgrund der stark divergierenden physikalischen und metallurgischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe als eine erhebliche prozesstechnische Herausforderung dar [1]. Im industriellen Kontext, etwa in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, gewinnt die gezielte Werkstoffkombination zunehmend an Bedeutung, da sie gewichtsoptimierte Leichtbaulösungen erlaubt, ohne die strukturelle Integrität der Bauteile zu beeinträchtigen [2]. Dies trägt maßgeblich bei zur Erfüllung gesetzlicher Anforderungen an die CO₂-Reduktion, wie sie etwa in der EU-Verordnung 2019/631 festgelegt sind [3].

Die wesentliche Schwierigkeit ist die niedrigere Schmelztemperatur von Aluminium im Vergleich zu Stahl. Weiter resultieren aus den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\approx 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ für Aluminium und $\approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ für Stahl) während des Erwärmungs- und Abkühlungsvorgangs erhebliche thermisch induzierte Scherspannungen an der Werkstoffgrenze [4]. Diese Spannungen gefährden die Unversehrtheit der Fügezone und können zur Ausbildung von Rissen führen [5]. Erschwerend kommt die Tendenz zur Bildung spröder intermetallischer Phasen (IMP) wie Fe₂Al₅ ab einer Temperatur von circa 500 °C hinzu [6]. Diese Phasen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften der Verbindung signifikant negativ, vor allem im Hinblick auf die Entstehung von Rissen im Grenzbereich durch die hohe Härte und Sprödigkeit [7]. Bereits geringe Temperaturerhöhungen begünstigen ein beschleunigtes Wachstum dieser Phasen, was die Handhabung und Weiterverarbeitung zusätzlich

erschwert [8, 9]. Die Diffusionszone an der Werkstoffgrenze ist hier von zentraler Bedeutung, da ihr Wachstum stark von Temperatur und Haltezeit abhängig ist. Untersuchungen [10] zeigen, dass bereits Haltezeiten von 120 s bei Temperaturen oberhalb von 500 °C zur Ausbildung eines etwa 2 µm dicken intermetallischen Phasensaums an einem Aluminiumzylinder führen können. Diese Schichten beeinträchtigen nicht nur die Verbundeneigenschaften, sondern auch die Umformformbarkeit, da die komplexere Atomstruktur Versetzungsbewegungen verhindert [11].

Neben den thermischen Eigenschaften unterscheiden sich Aluminium und Stahl auch im plastischen Verhalten. Aluminiumlegierungen zeichnen sich bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen durch eine hohe Umformbarkeit aus, wohingegen Stähle deutlich höhere Temperaturen erfordern, um ein entsprechendes Formänderungsvermögen zu erreichen [12]. Um die Fließspannungen beider Werkstoffe anzugleichen und ein kompatibles Umformverhalten zu gewährleisten, ist eine differenzierte Temperaturführung nötig, die eine exakt abgestimmte Prozesssteuerung erfordert. Vor allem bei mehrstufigen Warmumformprozessen können sich Temperaturschwankungen akkumulieren. Dies beeinflusst die Mikrostrukturentwicklung durch komplexere Rekristallisationsmechanismen negativ [13] und begünstigt lokal die Bildung intermetallischer Phasen durch Temperaturgradienten [14]. Solche Schwankungen erfordern eine kontinuierliche Temperaturüberwachung entlang der gesamten Prozesskette, um prozessbedingte Risiken zu minimieren. Eine präzise Steuerung des zulässigen Temperaturfensters ist dabei essenziell, um sowohl das Wachstum intermetallischer Schichten zu begrenzen als auch eine stabile und reproduzierbare Umformung sicherzustellen. Aktuelle

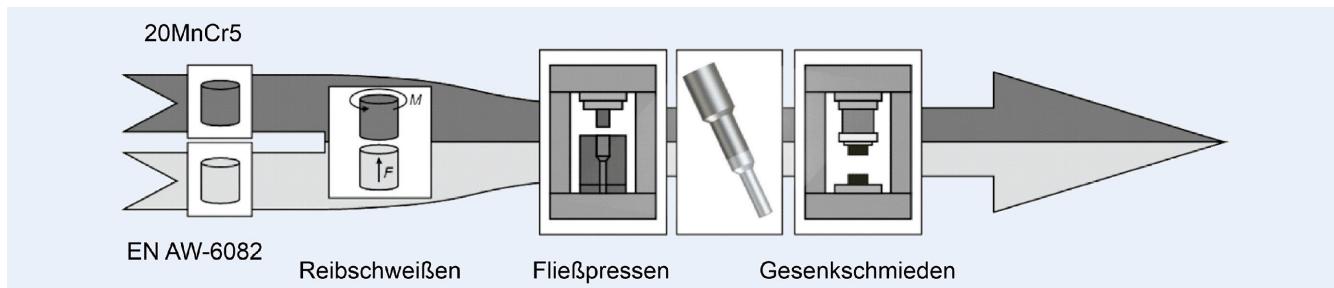


Bild 1 Prozesskette zum mehrstufigen Umformen hybrider Stahl-Aluminium-Ritzelwellen im Teilprojekt B02 des SFB 1153. *Grafik: IFUM*

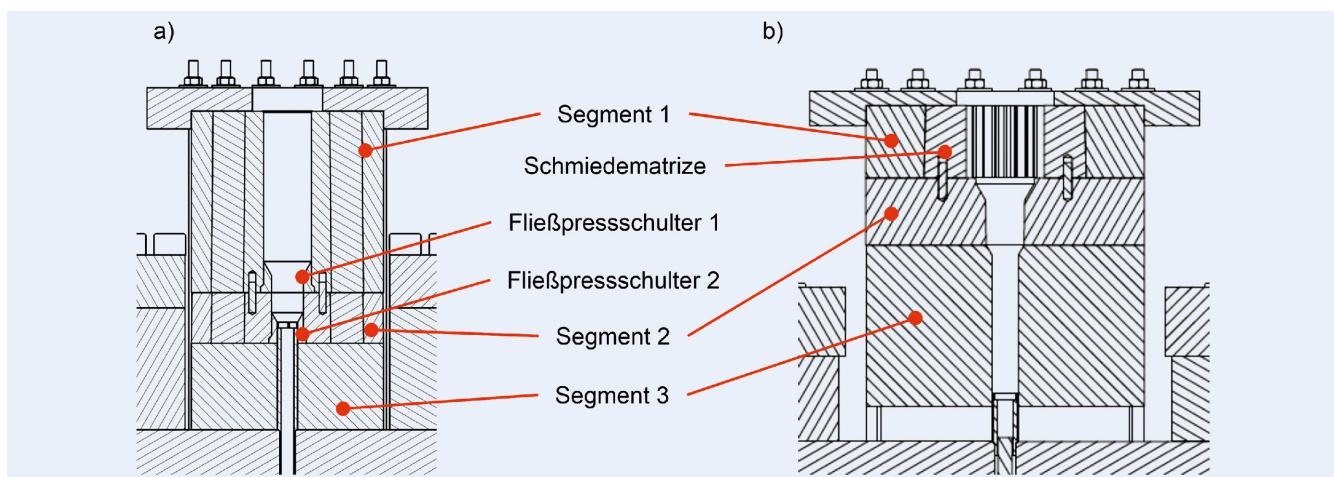


Bild 2 Temperaturprofil nach dem Transfer und Fließpressen einer auf 1200 °C erwärmten Probe. *Grafik: IFUM*

Studien zeigen, dass gezielte Erwärmungsstrategien, etwa durch induktives Heizen in Kombination mit aktiver Kühlung, eine vielversprechende Möglichkeit zur Kompensation thermischer Ungleichmäßigkeiten bieten [15, 16].

Schon bei der mehrstufigen Umformung von Monomaterialien ist die Temperaturlöpführung von entscheidender Bedeutung. Die Prozessgrenzen sind bei der Verarbeitung hybrider Halbzeuge noch deutlich enger. Aufgrund der Temperaturlöpführung besteht eine hohe Sensitivität für eine Schädigung des Verbundes in Folge der thermomechanischen Prozessroute [17, 18]. Diese engen Prozessgrenzen erfordern weiterführende Maßnahmen, um eine sichere und robuste Prozessführung zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Arbeit der systematischen Analyse der thermischen Prozesssensitivität beim Warmumformen hybrider Bauteile aus 20MnCr5 und EN AW-6082. Dabei soll insbesondere untersucht werden, wie Temperaturgradienten und intermetallische Phasenbildung die Qualität der Fügezone beeinflussen. Ziel ist die Entwicklung eines adaptiven, regelbaren Temperierkonzepts zur gezielten Kontrolle kritischer Temperaturbereiche und zur Sicherstellung einer prozessstabilen, reproduzierbaren Umformung.

2 Schmiedeprozess

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht eine mehrstufige Warmumformprozesskette zur Herstellung hybrider Bauteile aus dem Stahl 20MnCr5 und der Aluminiumlegierung EN AW-6082. Ziel ist es, durch eine abgestimmte Abfolge von Erwärmung, Fließpressen und abschließendem Gesenkschmieden ein Bauteil

mit definierten, prozesssicheren Fügezoneneigenschaften herzustellen, Bild 1.

Die Prozesskette beginnt mit dem Reibschweißen von Proben aus 20MnCr5-Stahl und EN AW-6082. In diesen hybriden Halbzeugen werden vor der Umformung spezifische Temperaturen eingestellt, um die Ausbildung spröder intermetallischer Phasen und das Aufschmelzen des Aluminiums zu vermeiden. Die Erwärmung erfolgt auf ein angepasstes Temperaturniveau, das sowohl eine ausreichende Umformbarkeit des Stahls sicherstellt als auch die wärmeempfindliche Fügezone schützt. Dabei ist entscheidend, dass die Fließspannungen der beiden Werkstoffe möglichst aufeinander abgestimmt werden, um ein homogenes Umformverhalten zu erreichen und lokale Überbelastungen oder Störungen im Materialfluss zu vermeiden. Das Temperaturprofil und die Erwärmungsparameter wurden durch vorangegangene Untersuchungen ermittelt. Für den Stahlbereich wird eine Zieltemperatur von 1100 °C bis 1150 °C verwendet. Der Bereich der Fügezone wird auf Temperaturen von 200 °C bis 400 °C temperiert. Die Temperaturen im Bereich des Aluminiums fallen von der Fügezone bis zum Probenende ab. Nach Erreichen der Zieltemperatur erfolgt ein automatisierter Transfer zur ersten Umformstufe, dem Fließpressen. Dabei wird das Halbzeug in das Werkzeug, Bild 2 a), welches auf einer servomotorischen Spindelpresse „Synchropress 4M-6000“ montiert ist, eingelegt und der Bauteildurchmesser in zwei Schritten zunächst von 40,0 mm auf 27,2 mm und anschließend weiter auf 17,6 mm verjüngt.

Das eingebrachte inhomogene Temperaturfeld ist wie in [19] bereits festgestellt, rapiden zeitlichen Veränderungen unterlegen. Bedingt durch die Schwankungen der Verbundeneigenschaften, der Umgebungsbedingungen sowie der Prozessbedingungen in der

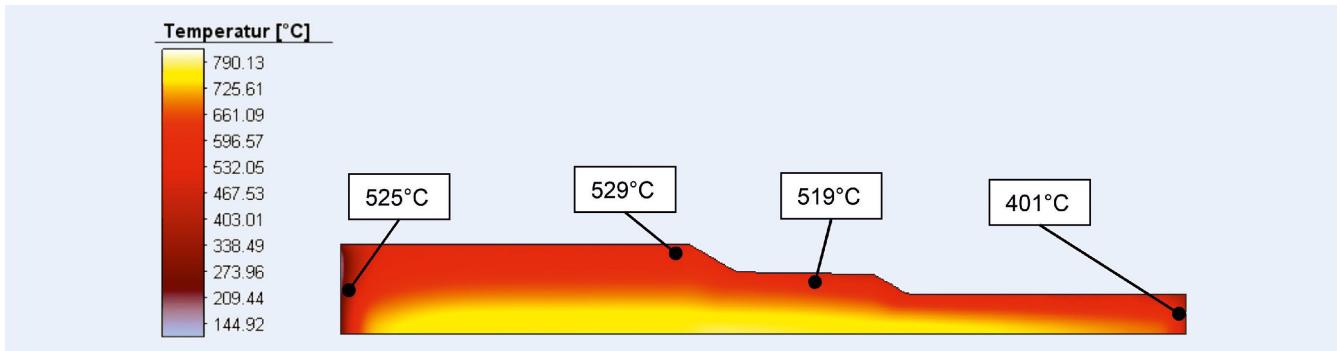


Bild 3 a) Fließpresswerkzeug, b) Gesenkschmiedewerkzeug. Grafik: IFUM

ersten Umformstufe (wie Werkzeugtemperatur, Schmierstoffzustand) ist die zweite Umformstufe erheblichen Unsicherheiten unterlegen. Eine sichere Einhaltung der engen Prozessfenster kann entsprechend ohne geeignete Kompensationsmaßnahmen beim Tailored Forming, dem werkstoffgerechten Herstellen hybrider Bauteile durch kombinierte Umformung und Fügen unterschiedlicher Werkstoffe, nicht eingehalten werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden schon in der Umformung von homogen erwärmten Stahlproben erhebliche Schwankungen im Temperaturfeld festgestellt, die auch simulativ verifiziert werden konnten (Bild 3).

Die Temperaturdifferenz in der Probe nach dem Transfer und der Umformung betrug 120 °C. Bei Übertragung auf hybride und inhomogen erwärmte Halbzeuge ist von einer erheblichen Zunahme dieser Unsicherheiten auszugehen, welche ebenfalls durch thermisch-mechanisch gekoppelte Prozesssimulationen abgebildet werden.

Die finale Umformung erfolgt im Gesenkschmiedeprozess. Das warme Werkstück wird nach dem Fließpressen in das Gesenk, Bild 2 b), eingelegt und in die Endkontur gebracht. Während dieser Phase ist die Temperaturverteilung entscheidend für die Qualität der hybriden Fügezone. Bereits geringfügige Abweichungen in der Temperatur führen zu ungleichen Umformverläufen, Beeinträchtigungen der metallurgischen Bindung und unter Umständen zur Ausbildung unerwünschter intermetallischer Phasen, vor allem an der Stahl-Aluminium-Grenze.

Die geometrieabhängigen Temperaturfelder resultieren sowohl aus der Überlagerung von abgeführter Wärme durch Kontakt mit der Umgebung und dem Werkzeug und der eingebrachten Umformwärme. Thermografische Analysen zeigten, dass besonders an den Randzonen des Bauteils durch Kontakt mit dem Werkzeug ein signifikanter Temperaturabfall auftritt, während zentrale Bereiche deutlich höhere Temperaturen aufweisen. Die Sensitivität dieser thermischen Effekte ist hoch, da zwischen Einlegen und Umformbeginn circa 20 Sekunden vergehen, was zur Entstehung axialer und radiauer Temperaturgradienten führt.

Nach dem Fließpressen folgt ein weiterer Transfer, in dem sich das Temperaturprofil des Werkstücks durch Wärmeleitung weiter verändert. Aktuelle numerische und experimentelle Untersuchungen zeigen, dass selbst kurze Transferzeiten mit Luftkontakt zu signifikanten Temperaturunterschieden im hybriden Halbzeug führen können. Diese thermischen Inhomogenitäten resultieren direkt aus ungleichen Wärmeleitfähigkeiten und unzureichender Wärmeübertragung zwischen Aluminium und Stahl. Zudem kommt es bei zu geringer oder fehlender Kühlung zu einer Schädigung der Fügezone in Form von Rissen im Randbereich,

Anbindungsfehlern oder lokalen Aufschmelzungen. Eine zu hoher Temperaturgradient zwischen Stahlbereich und Fügezone führt dagegen zu einem starken Temperaturabfall im Bereich des Stahls. Dadurch steigt die benötigte Umformkraft an und das Umformvermögen sinkt. Ohne das Anpassen des Induktionsprofils führt das Erhöhen der Kühlleistung dazu, dass der Zieltemperaturbereich des Stahls nicht erreicht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass das Prozessfenster für eine fehlerfreie Umformung sehr eng ist und bereits geringe Abweichungen in der Temperaturverteilung das Risiko von Schädigungen erheblich erhöhen. Die Sensitivität gegenüber thermischen Schwankungen ist daher ein kritischer Faktor im Tailored Forming hybrider Werkstoffe.

Besonders herausfordernd sind die kombinierten Effekte aus Wärmeverlust, Geometrieänderung und Werkstoffunterschieden, denn sie resultieren in lokal variierenden Fließbedingungen in der anschließenden Umformstufe sowie, bei Überschreitung enger Prozessgrenzen, in einem Versagen des Bauteils.

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Bildung spröder intermetallischer Phasen an der Grenzfläche zwischen Stahl und Aluminium. *Zhang et al.* [20] sowie *Eggersmann und Mehrer* [21] zeigen, dass diese intermetallischen Schichten bereits bei moderaten Temperaturen in wenigen Sekunden anwachsen können und bei unkontrollierter Prozessführung Schichtdicken von bis zu mehreren Mikrometern erreichen. Ihre Bildung ist stark abhängig von Temperaturverlauf und Haltezeit. Zudem wirken sich Veränderungen in der Anbindung auf den lokalen Wärmeübergangskoeffizienten aus, was die Unsicherheit in der Prozessführung weiter steigert.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig: Die Prozesskette reagiert äußerst sensibel auf jede thermische Störung. Schon geringe lokale Unterschiede führen zum Versagen des Gefügeverbunds. Besonders kritisch ist der Abschnitt zwischen Fließpressen und Gesenkschmieden, da sich in dieser Phase die thermischen Gradienten durch die Wärmeleitung verringern und das Wachsen der IMP sowie das Aufschmelzen des Aluminiums begünstigen. Über die gesamte Prozesskette vom Fügen über das Erwärmen bis zur zweiten Umformstufe kumulieren erhebliche Unsicherheiten in der Temperaturverteilung. Aufgrund der engen Prozessfenster beim Tailored Forming, welche schon für einstufige Prozesse festgestellt wurden, sind Kompensationsmaßnahmen notwendig, um eine ausreichende Robustheit zu gewährleisten.

In dieser Arbeit wurde eine Zwischenbehandlungsanlage konzipiert, um diese Problematik zu adressieren. Eine Prinzipskizze des Konzeptes ist Bild 4 zu entnehmen.

In der Anlage können sowohl Roh- als auch fließgepresste Bauteile temperiert werden. Durch das vertikale Verfahren der

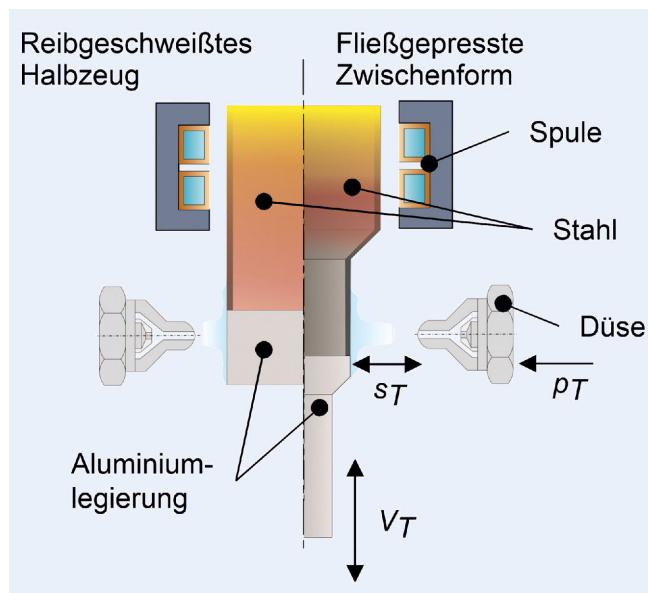


Bild 4 Konzept für die thermische Zwischenbehandlung. Grafik: IFUM

Probe ist eine direkte Erwärmung über größere Bereiche möglich. Zudem können abzukühlende Bereiche definiert erreicht werden. Über die Variation des Mediendruckes sowie den Abstand der Düsen kann die Kühlleistung entsprechend den Anforderungen angepasst werden. Die Einheit besteht aus einem modular aufgebauten System, das um die Bauteilachse montiert ist, Bild 5 a) und Bild 5 b). Sie kombiniert zwei zentrale Funktionen: eine segmentierte Induktionserwärmung und ein komplementäres Sprühkühlsystem.

Das grundlegende System wurde aufbauend auf Piwek *et al.* [19] entwickelt und adaptiv erweitert. Sowohl die Erwärmung als auch die Sprühkühlung erfolgt auf einer definierten Höhe auf der Mantelfläche des rotationssymmetrischen Bauteils. Durch eine gezielte Steuerung der axialen Bewegung des Bauteils wird das Halbzeug adaptiv lokal erwärmt oder gekühlt. Die Induktionseinheit arbeitet frequenzgeregelt, wobei die Spule gezielt entweder aktiviert oder deaktiviert werden kann. Die thermische Energie wird somit genau und dynamisch eingebracht, gesteuert über ein Temperaturregelkreissystem, das auf Echtzeitdaten zurückgreift.

Das Kühlsystem basiert auf Hochdruckdüsen, die in einem umlaufenden Ringsegment angeordnet sind. Darüber kann selektiv gekühlt werden, wobei die Kühlmedien Luft und Wassernebel verwendet werden. Die Düsensegmente lassen sich zudem automatisiert in Position und Intensität regeln. Eine adaptive Sensorik erkennt zusätzlich Umgebungsbedingungen wie etwa die Bauteiltemperatur an den Stirnflächen. Zur möglichst vollständigen Abbildung der Temperaturlösung werden Temperatursensoren in die Greifknoten der handhabenden Roboter integriert. Die Kombination dieser beiden Systeme erlaubt es, innerhalb von wenigen Sekunden das Temperaturprofil entlang der axialen Länge des Bauteils aktiv zu modulieren.

Um die Erwärmung und Sprühkühlung zielführend und bauelindividuell zu parametrisieren und inline auf die auftretenden Prozessunsicherheiten zu reagieren, wird auf datenbasierte Methoden zurückgegriffen. Mittels numerischer Parameterstudien wird ein Ersatzmodell trainiert und als digitaler Zwilling eingesetzt. Basierend auf den inline erfassten Prozessmerkmalen werden in Echtzeit charakteristische Bauteilgrößen, zum Beispiel die Temperatur in der Fügezone, abgeleitet. Basierend auf diesen Größen sowie des digitalen Ersatzmodells werden die erforderlichen Erwärmungs- und Abkühlprofile erstellt und angewendet. Fu *et al.* [22] zeigen, dass der Einsatz solch adaptiver Temperaturregelungen die Umformqualität signifikant verbessern kann. Die Einbindung in die Steuerarchitektur der Presse ermöglicht zudem eine prozesssynchrone Anpassung der Parameter. Für den Praxiseinsatz wurde die Anlage auf einen flexiblen Grundrahmen und ein modulares Interface ausgelegt, um eine schnelle Integration in bestehende Pressensysteme zu ermöglichen. Diese Prozesskette erlaubt es, datenbasierte Strategien zur robusten Warmumformung hybrider Stahl-Aluminium-Bauteile mittels Tailored Forming zu entwickeln und zu erproben.

Somit ist es möglich, das Temperaturprofil für das Gesenk schmieden herzustellen. Dabei wird der durch Transfer und Werkzeugkontakt abgekühlte Stahlbereich erneut auf eine Temperatur im Bereich von 1100 °C bis 1150 °C erwärmt. Die Bereiche der Fügezone und des Aluminiums, die durch Wärmeleitung eine höhere Temperatur als vor der ersten Umformung aufweisen, werden erneut auf unter 300 °C abgekühlt. Die sich dadurch ergebenden Effekte sind das Verhindern des Aufschmelzens des Aluminiums und die Begrenzung des Wachstums der intermetallischen Phase, welche für ein sprödes Materialverhalten in der Fügezone sorgt.

In zukünftigen Arbeiten soll die Anlage um KI-basierte Vorphersagemodele ergänzt werden, um anhand historischer Prozess-

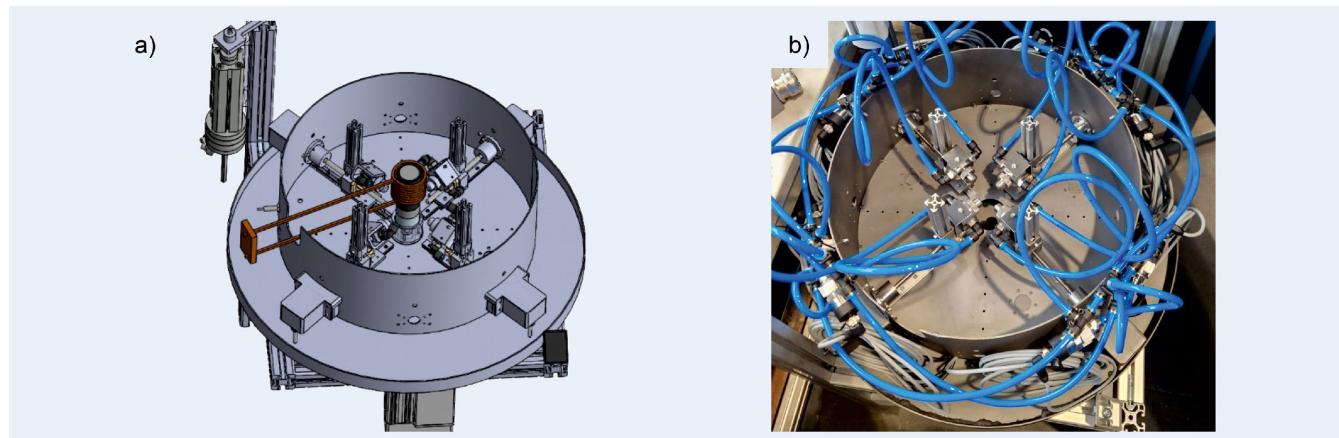


Bild 5 Adaptives Erwärmungskühlsystem: a) Konzept, b) Umsetzung. Grafik/Foto: IFUM

daten und Bauteilreaktionen eine vorausschauende Temperatursteuerung zu ermöglichen. Perspektivisch wird die vollständige Integration in Industrie-4.0-Strukturen angestrebt, inklusive Manufacturing-Execution-Systems (MES)-Anbindung, digitaler Rückverfolgbarkeit und selbstlernender Prozessregelung. Damit bildet dieses Konzept die Grundlage für eine neue Generation robuster, datengetriebener Warmumformprozesse für hybride Werkstoffsysteme. Dabei sind numerische und experimentelle Untersuchungen zur Wärmeübertragung in Gesenken, wie sie von Wilson *et al.* [23] durchgeführt wurden, essenziell für das thermische Feintuning in zukünftigen Anlagen.

3 Fazit

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Warmumformung hybrider Bauteile aus 20MnCr5 und EN AW-6082 eine hochgradig prozesssensitive Herausforderung darstellt, vor allem im Hinblick auf die Temperaturführung, intermetallische Phasenbildung und Fließspannungsanpassung. Durch die gezielte Temperierung vor der Umformung sowie die innovative Zwischenbehandlungseinheit mit kombinierter Induktionserwärmung und Sprühkühlung konnte ein Ansatz entwickelt werden, der die zentralen Herausforderungen dieses Materialverbunds adressiert. Besonders kritisch ist der Bereich zwischen dem Fließpressen und dem Gesenkschmieden, in dem thermische Ungleichgewichte entstehen, die mechanische Defekte und unerwünschte Phasen begünstigen.

Die adaptive Temperiereinheit ermöglicht es erstmals, Temperaturgradienten entlang der Bauteilachse aktiv auszugleichen und so eine stabile, prozesssichere Fügezone zu erzeugen. Die Integration eines digitalen Zwillings zur Echtzeitregelung sowie die geplante Anbindung an KI-gestützte Steuerungssysteme unterstreichen das Potenzial des entwickelten Konzepts für eine intelligente, robuste und industrietaugliche Prozessführung im Sinne von Industrie 4.0. Damit leistet die Arbeit einen grundlegenden Beitrag zur Weiterentwicklung des Tailored Forming hybrider Leichtbaustrukturen.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 252662854 – SFB 1153 Teilprojekt B02. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung dieser Forschungsarbeit.

LITERATUR

- [1] Behrens, B.-A.; Uhe, J.; Petersen, T. et al.: Challenges in the Forging of Steel-Aluminum Bearing Bushings. *Materials* (Basel, Switzerland) 14 (2021) 4, doi.org/10.3390/ma14040803
- [2] Szczepaniak, A.: Investigation of intermetallic layer formation in dependence of process parameters during the thermal joining of aluminium with steel. *Dissertation*, RWTH Aachen University, 2016
- [3] Europäische Union: 2019/631. Verordnung (EU) 2019/631 des europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von CO2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011. Stand: 14.04.2019. Internet: eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32019R0631. Zugriff am 14.10.2025
- [4] Picot, F.; Gueydan, A.; Martinez, M. et al.: A Correlation between the Ultimate Shear Stress and the Thickness Affected by Intermetallic Compounds in Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloy–Stainless Steel Joints. *Metals* 8 (2018) 3, doi.org/10.3390/met8030179
- [5] Meyer, M.; Schmauder, S.: Thermal stress intensity factors of interface cracks in bimaterials. *International Journal of Fracture* 57 (1992) 4, pp. 381–388
- [6] Novák, P.; Michalcová, A.; Marek, I. et al.: On the formation of intermetallics in Fe-Al system – An *in situ* XRD study. *Intermetallics* 32 (2013), pp. 127–136
- [7] Rahman, S. A. A.; Mamat, S.; Ahmad, M. I. et al.: Study on Intermetallic Compound (IMC) in dissimilar joining of steel and aluminum (Fe-Al) – a review paper. *Welding in the World* 68 (2024) 9, pp. 2351–2376
- [8] Beygi, R.; Galvão, I.; Akhavan-Safar, A. et al.: Effect of Alloying Elements on Intermetallic Formation during Friction Stir Welding of Dissimilar Metals: A Critical Review on Aluminum/Steel. *Metals* 13 (2023) 4, #768
- [9] Herbst, S.; Aengeneyndt, H.; Maier, H. J. et al.: Microstructure and mechanical properties of friction welded steel-aluminum hybrid components after T6 heat treatment. *Materials Science and Engineering: A* 696 (2017), pp. 33–41
- [10] Uhe, J.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Verbundstrangpressen unter Berücksichtigung der intermetallischen Phasenbildung. *Dissertation*, Leibniz Universität Hannover, 2021
- [11] Behrens, B.-A.; Kosch, K. G.; Frischkorn, C. et al.: Compound Forging of Hybrid Powder-Solid-Parts Made of Steel and Aluminum. *Key Engineering Materials* 504–506 (2012), pp. 175–180
- [12] Doege, E.; Heinz, M.-N.; Imtiaz, S.: *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe: mit Fließkurven für 73 Werkstoffe und einer grundlegenden Einführung*. München: Carl Hanser Verlag 1986
- [13] Chen, F.; Cui, Z.; Chen, J.: Prediction of microstructural evolution during hot forging. *Manufacturing Review* 1 (2014), doi.org/10.1051/mfreview/2014006
- [14] Yu, X.; Huang, J.; Yang, T. et al.: The Growth Behavior for Intermetallic Compounds at the Interface of Aluminum-Steel Weld Joint. *Materials* (Basel, Switzerland) 15 (2022) 10, doi.org/10.3390/ma15103563
- [15] Ince, C.-V.; Chugreeva, A.; Böhm, C. et al.: A design concept of active cooling for tailored forming workpieces during induction heating. *Production Engineering* 15 (2021) 2, pp. 177–186
- [16] Behrens, B.-A.; Uhe, J.; Ross, I. et al.: Tailored Forming of hybrid bulk metal components. *International Journal of Material Forming* 15 (2022) 3, #42
- [17] Uhe, J.; Wester, H.; Behrens, B.-A.: Numerical Process Design for the Production of a Load-Adapted Hybrid Bearing Bushing. *Key Engineering Materials* 957 (2023), pp. 143–150
- [18] Wester, H.; Behrens, B.-A.: Numerical Process Analysis of Forming Semi-Finished Hybrid Parts. *Key Engineering Materials* 957 (2023), pp. 135–142, doi.org/10.4028/p-p1hb2b
- [19] Piwek, A.: Influence of enlarged joining zone interfaces on the bond properties of tailored formed hybrid components made of 20MnCr5 steel and EN AW-6082 aluminium. *Material Forming , ESAFORM 2024*, pp. 792–801
- [20] Zhang, W.; Sun, D.; Han, L. et al.: Characterization of Intermetallic Compounds in Dissimilar Material Resistance Spot Welded Joint of High Strength Steel and Aluminum Alloy. *ISIJ International* 51 (2011) 11, pp. 1870–1877
- [21] Eggersmann, M.; Mehrer, H.: Diffusion in intermetallic phases of the Fe-Al system. *Philosophical Magazine A* 80 (2000) 5, pp. 1219–1244
- [22] Fu, Y.; Kottenstette, N.; Chen, Y. et al.: Feedback Thermal Control for Real-time Systems. *Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, Stockholm, Sweden, 2010, pp. 111–120
- [23] Wilson, W. R.; Schmid, S. R.; Liu, J.: Advanced simulations for hot forging: heat transfer model for use with the finite element method. *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 (2004), pp. 1912–1917

Niklas Gerke, M.Eng. 

gerke@ifum.uni-hannover.de

Hendrik Amend, B.Sc.

Julius Peddinghaus, M.Sc. 

Dr.-Ing. Johanna Uhe 

Dr.-Ing. Kai Brunotte 

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens 

Leibniz Universität Hannover, Institut für
Umformtechnik und Umformmaschinen IFUM
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifum.uni-hannover.de

LIZENZ



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