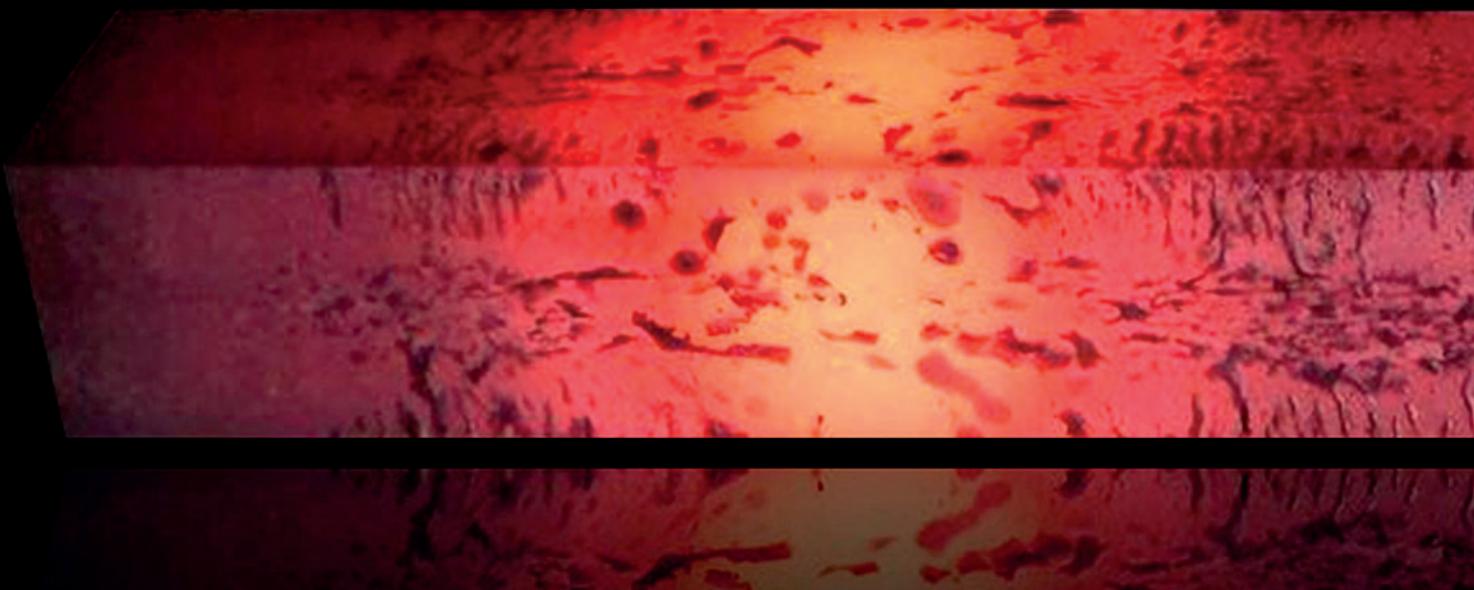


Maßgeschneiderte Bauteilerwärmung für die Massivumformung – ein Vergleich zwischen direkten und indirekten Erwärmungsverfahren

Warmmassivumgeformte Komponenten werden zu Beginn des Prozesses homogen erwärmt, um eine definierte Fließspannung einzustellen und damit das gewünschte Umformverhalten zu erreichen. Ein aktuelles Forschungsprojekt untersucht die gezielte inhomogene Erwärmung von Bauteilen und die damit einhergehende räumlich verteilte Einstellung der Umformeigenschaften von Rund- und Vierkantstählen. Der folgende Beitrag vergleicht Konduktion und Induktion als zwei direkte Erwärmungsverfahren mit der direkten Flammenbeaufschlagung als indirektes Erwärmungsverfahren. Am Beispiel von zylindrischen Schmiederohtteilen untersucht er, inwieweit sich maßgeschneiderte Temperaturfelder in nur einem Erwärmungsschritt erzeugen lassen.



AUTOREN



Martin Ennen, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektroprozess-technik (ETP) der Leibniz Universität Hannover



Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake

leitet den Forschungsbereich „Magnetofluid-dynamische Prozesse und ressourcenschonende Energienutzung“ am Institut für Elektroprozess-technik (ETP) der Leibniz Universität Hannover



Stephanie Thie, M.Sc.

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen University



Justin Hauch, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen University



Dr.-Ing. Nico Schmitz

ist Gruppenleiter des Forschungsbereichs „Verbrennung“ am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen University

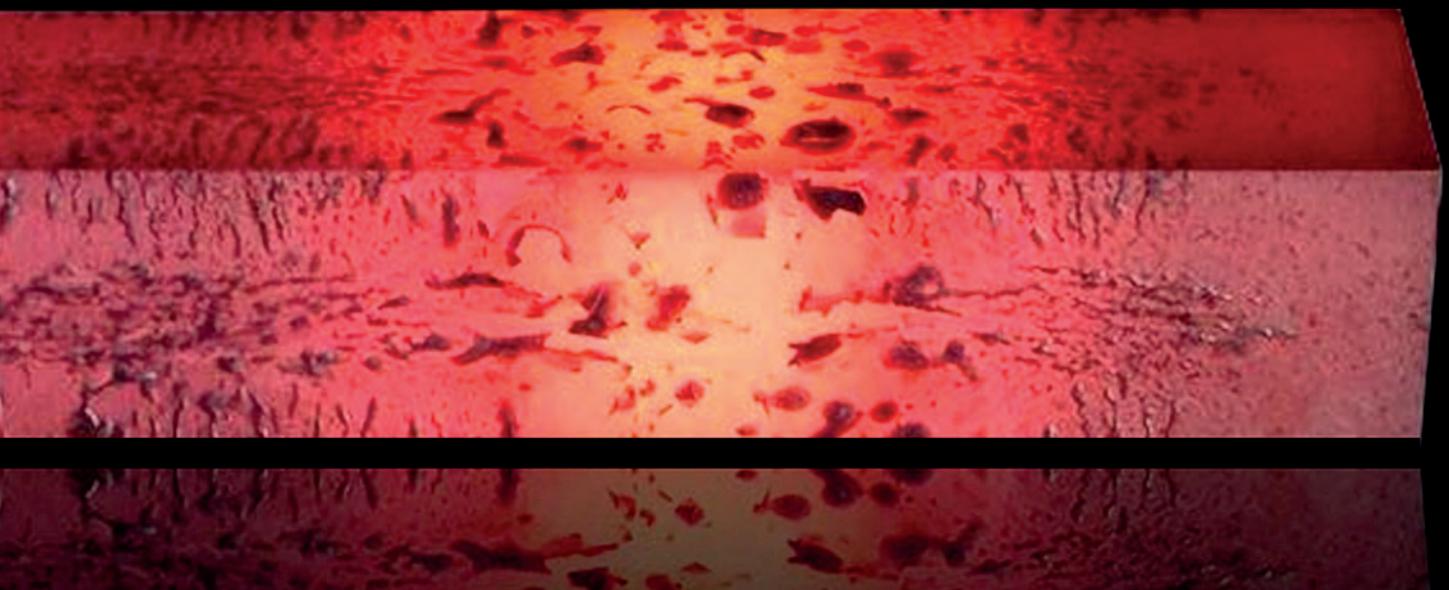


Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer

leitet das Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen University

Die Umformigenschaften eines Bauteils können, unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften und seiner Geometrie, gezielt über ein definiertes Temperaturprofil eingestellt werden. Mit steigender Temperatur sinken die Fließspannungen im Bauteil sodass eine plastische Verformung mit geringerem Kraftaufwand erreicht werden kann. Ebenso wird durch die höhere Temperatur das Formänderungsvermögen des Werkstoffs erhöht [1].

Bei einem Stab konnten beispielsweise durch das Einstellen verschiedener Temperaturen und somit verschiedener Fließspannungen in gezielten Bereichen unterschiedliche Durchmesser zweier Flansche erreicht werden. Die Anwendung mehrerer Umformprozessschritte lässt sich so auf einen Prozessschritt reduzieren [2]. Komplexe Vorformen können ohne aufwendige Werkzeuge in den Bereichen erzeugt werden



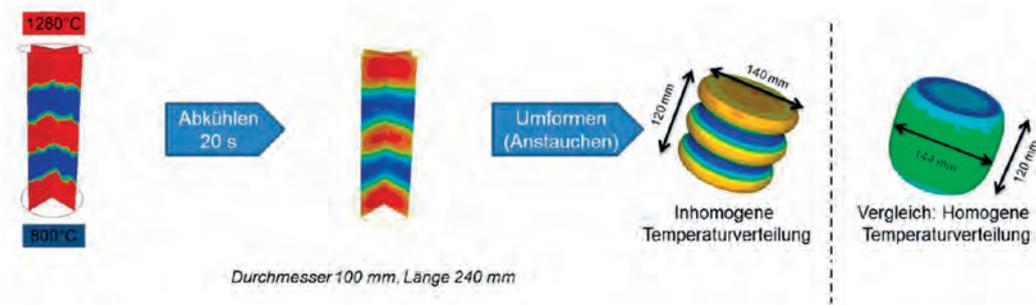


Bild 1: Auswirkungen einer inhomogenen Bauteilerwärmung auf die Umformung (Anstauchen) [4]

und das Umformverhalten kann verbessert werden, indem die Fließspannungen gezielt in den Bereichen eingestellt werden [3] (Bild 1).

AUSGANGSSITUATION

Für die Untersuchung werden zylindrische Schmiederohteile mit den Durchmessern 50 mm und 80 mm sowie verschiedene Werkstoffe (1.4301, 1.0503 und 1.7225) abschnittsweise symmetrisch erwärmt, um ein definiertes Temperaturprofil in nur einem Erwärmungsschritt einzustellen. Das angestrebte Temperaturprofil besteht aus insgesamt fünf Zonen und vier Übergangsbereichen. Die fünf Zonen unterteilen sich in drei Halbwarmumformungsbereiche (HWB) mit einer Zieltemperatur von $950\text{ °C} \pm 30\text{ °C}$ und zwei Warmumformungsbereiche (WB) mit einer Zieltemperatur von $1.250\text{ °C} \pm 30\text{ °C}$. Die Anfangstemperatur des Bauteils beträgt 20 °C . Um die Zieltemperatur in den jeweiligen Schmiederohtteilen einzustellen, werden drei verschiedene Erwärmungsmethoden untersucht: Induktion, Konduktion sowie die Erwärmung mittels direkter Flammenbeaufschlagung (Direct Flame Impingement, DFI). Um die Untersuchung praxisnah auszurichten, wird eine zusätzliche Handling- beziehungsweise Abkühlzeit von 10 Sekunden nach dem Erwärmungsvorgang angestrebt. Diese schließt den Transport von der Erwärmungseinheit zum Umformaggregat ein.

ERWÄRMUNG MITTELS INDUKTION

Die Erwärmung von Stahl unter Verwendung von Induktionsanlagen ist ein weitverbreitetes Verfahren in der Industrie und findet Anwendung beim Härten oder Massivumformen [4].

Die Induktion ist ein kontaktloses Erwärmungsverfahren und basiert auf dem Transformatorprinzip: Ein mit Wechselstrom durchflossener Leiter beziehungsweise Induktor erzeugt ein mit derselben Frequenz schwingendes Magnetfeld, das nach dem Induktionsgesetz eine Spannung in einem schwach bis gut leitfähigen Werkstück (Metalle) induziert. Diese Spannung erzeugt einen elektrischen Leitungsstrom beziehungsweise Wirbelstrom, der aufgrund des elektrischen Widerstands des Materials Joulesche Wärmequellen direkt im Werkstück bildet. Mit der Induktion gehen zwei wesentliche elektrische Effekte einher, die charakteristisch für das Erwärmungsprinzip sind:

Zum einen der Skin-Effekt und zum anderen der Proximity-Effekt [4]. Beide Effekte führen dazu, dass der induzierte Strom und somit die Wärmequellen dem Induktor konturnah folgen. Dadurch kann über die Induktorgeometrie direkt Einfluss auf das Erwärmungsprofil genommen werden.

Geometrien und elektrische Größen des Induktorstroms und dessen Frequenz spielen eine wesentliche Rolle bei der Prozessauslegung und führen dazu, dass die Induktor- und die Prozessauslegung mitunter komplex sind: Für jede Geometrie und jeden Werkstoff ist eine erneute Anpassung notwendig. Diesem Anspruch steht jedoch eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber, etwa die gute Dosier- und Regelbarkeit, hohe Leistungsdichten und kurze Prozesszeiten. Durch letztere lassen sich hohe Temperaturgradienten erzeugen, die insbesondere hinsichtlich ihrer örtlichen Verteilung eine scharfe Zonenteilung ermöglichen [5].

ERWÄRMUNG MITTELS KONDUKTION

Die Konduktion ist ein einfaches und robustes Verfahren zur Erwärmung elektrisch leitfähiger Materialien. Das Verfahren zeichnet sich durch sehr hohe Prozesswirkungsgrade (70 bis 95 Prozent) aus und wird überwiegend im Bereich der Platinen-, Draht- und Knüppelerwärmung eingesetzt [4].

Bei der konduktiven Erwärmung ist das Werkstück ein Teil des Stromkreises und wird direkt von einem Strom durchflossen, der nach dem Jouleschen Gesetz zu einer Erwärmung führt. Die im Werkstück umgesetzte Leistung ist dabei abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Materials und dem angelegten Strom. Eine wichtige Voraussetzung ist ein gleichmäßiger Querschnitt über die Länge des Werkstücks und eine glatte Oberfläche für eine bessere Kontaktierung. Im Gegensatz zur Induktion kann für die konduktive Erwärmung neben Wechselstrom auch Gleichstrom verwendet werden, was wiederum eine homogene Erwärmung über den Querschnitt begünstigt. Die bestimmende Größe des Erwärmungsprozesses ist der Stromfluss. Theoretisch können beliebig große Stromstärken beziehungsweise Leistungsdichten in das Werkstück eingespeist und folglich die Prozesszeiten sehr kurz gehalten werden.

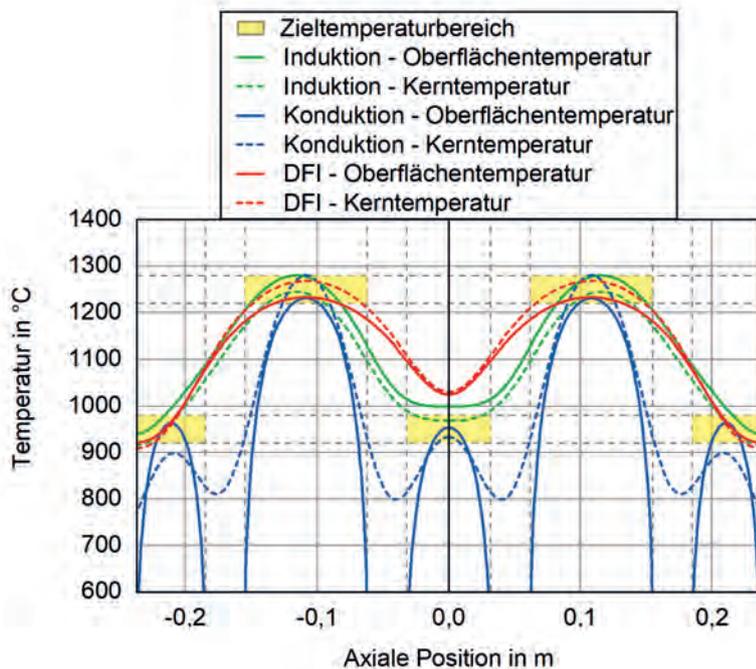


Bild 2: Vergleich zwischen den numerischen Ergebnissen der drei Erwärmungsverfahren für einen Rundstab aus 1.0503 und mit einem Durchmesser von 50 mm

In der Praxis stehen dem als reglementierende Faktoren einerseits die Stromquelle und andererseits die Stromkontaktierung gegenüber. Die Kontakte werden überwiegend aus gut leitfähigen Materialien wie Kupfer und Kupferlegierungen gefertigt, um die Kontaktverluste gering zu halten [6]. Häufig muss eine Kühlung der Kontakte vorgesehen werden. Dies mindert den Prozesswirkungsgrad, erhöht aber den Temperaturgradienten im Übergangsbereich von einem WB zu einem HWB und kann somit gezielt für die maßgeschneiderte Erwärmung eingesetzt werden.

ERWÄRMUNG MITTELS DIREKTER FLAMMENBEAUFSCHLAGUNG

Bei der direkten Flammenbeaufschlagung (DFI) handelt es sich um die Erwärmung eines Bauteils mittels Brennern, wobei die Flamme direkt auf die Oberfläche des Halbzeugs gerichtet ist. Die großen Geschwindigkeiten und die hohe Flammentemperatur führen dazu, dass ein hoher konvektiver Wärmeübergang erreicht werden kann. Das Verfahren bietet daher einen verringerten Brennstoffeinsatz, eine gesteigerte Produktivität und niedrigere Schadstoffemissionen. Im Vergleich zu Verfahren, bei denen die Flamme das Bauteil nicht tangiert, ist im Bereich des Stagnationspunkts eine Inhomogenität der Wärmeübertragung zu berücksichtigen, da die Reaktion in der Flamme zu einer inhomogenen Temperaturverteilung führt [7]. Die Erwärmung mit DFI kommt in der Industrie vor allem in Durchlauföfen für die Wärmebehandlung zum Einsatz.

Im Projekt wurde das Bauteil mit bis zu acht Brennern mit einer maximalen Leistung von jeweils 60 kW erwärmt. Die Brenner sind auf die Mitte des Warmumformbereichs gerichtet und können im Abstand zum Bauteil variiert werden. Die Brenner werden mit Erdgas als Brennstoff und Luft als Oxidator betrieben. Prozessbedingt wird die Probe eingehaust, sodass auch die Strahlung der umliegenden Wände genutzt werden kann.

BESTIMMUNG DER PROZESSKENNZAHL

Für das jeweilige Erwärmungskonzept werden geeignete numerische FEM-Modelle unter Verwendung von Ansys® 2019 R2 erstellt und durch Messkampagnen verifiziert und validiert. Die Modellkonzepte und die Ergebnisse der Modellvalidierung sind in [8] veröffentlicht und detailliert beschrieben. Bild 2 zeigt exemplarische Simulationsergebnisse der axialen Temperaturverteilung entlang der Oberfläche und im Kern der jeweiligen Erwärmungsmethoden für einen Rundstab aus 1.0503 mit einem Durchmesser von 50 mm. Dort ist zu erkennen, dass die Zieltemperatur am besten mit der induktiven Erwärmung erreicht wird. Die Konduktion weist außerdem eine große Temperaturdifferenz zwischen Kern- und Oberflächentemperatur auf. Dies begründet sich durch den Einfluss der Wasserkühlung an den Kontakten und den damit einhergehenden erhöhten Temperaturentzug an der Oberfläche. Beim DFI ist die Temperatur im mittleren HWB mit den aktuellen Prozessparametern zu hoch. Der Temperaturunterschied zwischen Kern und Oberfläche ist im Vergleich zu den elektrischen Verfahren jedoch am geringsten.

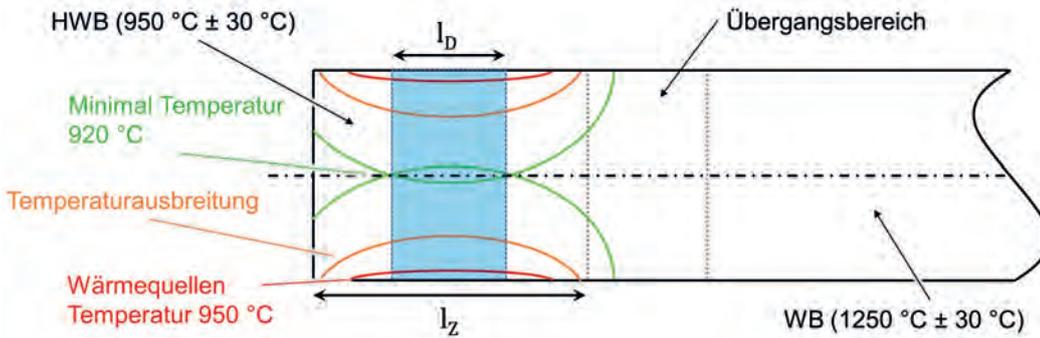


Bild 3: Schematische Darstellung der Isothermen zur Bestimmung der Kennzahl zur Charakterisierung der Temperaturzonen am Beispiel der Zone HWB
Bilder: Autoren

Für die quantitative Beurteilung der Güte der jeweiligen Zonen-erwärmung wird eine Kennzahl aus der Zonenlänge $l_{z,i}$ und der Länge der effektiv durchwärmten Bereiche $l_{D,i}$ innerhalb der Zonen bestimmt. Dabei werden ausschließlich die Bereiche berücksichtigt, deren Oberflächen- und Kerntemperatur innerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs liegen. Bild 3 zeigt die Bestimmung der $l_{D,i}$ anhand der Isothermen für einen HWB nach Abschluss des Erwärmungsvorgangs inklusive der Handling-Zeit.

Die Kennzahl berechnet sich aus der Summe aller durchwärmten Abschnitte geteilt durch die Summe der Zonenlängen des gesamten Werkstücks, exklusive der Übergangsbereiche:

$$K_P = \frac{\sum l_{D,i}}{\sum l_{z,i}}$$

Demnach gibt die Kennzahl die prozentuale Übereinstimmung von erreichtem und Zieltemperaturprofil an.

VERGLEICH DER ERWÄRMUNGSVERFAHREN

Unter Verwendung der validierten numerischen Simulationsmodelle werden Parameterstudien durchgeführt, deren Ergebnisse die Vergleichsgrundlage für die wirtschaftliche und qualitative Bewertung der Erwärmungsverfahren für das „Tailored Heating“ darstellen. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse für die verschiedenen Rundstahlvarianten. Neben der Prozesszeit und der zugeführten Leistung wird auch die erzielte Kennzahl K_P angegeben.

Mit dem Verfahren der Induktion lassen sich Kennzahlen zwischen 0,56 und 0,63 für die untersuchten Durchmesser und Werkstoffe erzielen. Alle Stahlsorten lassen sich gleichermaßen gut erwärmen und geben Kennzahlen in einem ähnlichen Bereich zurück. Unterschiede sind lediglich zwischen den Durchmessern erkennbar. Mit zunehmendem Querschnitt steigt die Dauer für die Durchwärmung, was wiederum eine Minderung der axialen Temperaturgradienten und somit der Prozesskennzahl zur Folge hat. Durch gezielte Optimierung der Induktorgeometrie, insbesondere in den Übergangsbereichen, lassen sich die Kennzahlen noch weiter verbessern.

Werkstoff	Durchmesser	Induktion			Konduktion			DFI		
		Prozesszeit	zugeführte Leistung	K_P	Prozesszeit	zugeführte Leistung	K_P	Prozesszeit	zugeführte Leistung	K_P
	mm	s	kWh		s	kWh		s	kWh	
1.0503	50	79	2,0	0,61	33	1,2	0,14	630	63,0	0,37
	80	165	5,5	0,58	93	3,9	0,12	750	75,0	0,39
1.7225	50	81	1,9	0,63	31	1,2	0,13	630	63,0	0,38
	80	150	5,2	0,56	85	3,8	0,12	750	75,0	0,41
1.4301	50	82	1,9	0,53	23	1,1	0,15	630	63,0	0,41
	80	184	5,3	0,62	60	3,3	0,14	750	75,0	0,51

Tabelle: Übersicht der simulierten Prozessparameter für die Rundstahlvarianten mit einem Durchmesser von 50 mm und 80 mm, Werkstoffe: 1.0503, 1.7225 und 1.4301

Die Konduktion weist einerseits die kürzesten Prozesszeiten, andererseits die kleinsten Kennzahlen auf. Das Zieltemperaturprofil wird nur zu 12 bis 15 Prozent erreicht. Dies begründet sich darin, dass der Einfluss der wassergekühlten Kontakte auf das Temperaturprofil besonders im Bereich der Oberfläche groß ist. Durch Verwendung hochtemperaturbeständiger Stromkontakte, die gegebenenfalls ungekühlt für den Prozess eingesetzt werden können, besteht ein hohes Maß an Verbesserungspotenzial für den Prozess.

Mit dem DFI-Verfahren wird das Zieltemperaturprofil über 37 bis 51 Prozent der geforderten Länge erreicht. Es bildet sich ein gleichmäßiges Plateau im oberen Zieltemperaturbereich aus (Bild 2). Im Vergleich zu den elektrischen Erwärmungsverfahren bietet das DFI den Vorteil, dass der Aufbau der Anlage für viele Geometrien einsetzbar ist und keine Umbauarbeiten erforderlich sind. Zudem kann die hohe Temperatur des Abgases für weitere Prozessschritte rekuperiert werden.



- [1] Herbertz, R.; Hermanns, H.; Labs, R.: Massivumformung kurz und bündig, Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen, 2015
- [2] Steinhoff, K.; Maier, H. J.; Biermann, D.: Investigation of plastic forming under the influence of locally and temporally variable temperature and stress states: functionally graded materials in industrial mass production. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2009, pp.35 – 52
- [3] Goudarzi, M.; Langner, J.: IMU 42 – Studie zur simulativen Untersuchung des Umformverhaltens von Rohteilen mit inhomogener Temperaturverteilung. Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, 2013
- [4] Nacke, B.; Baake, E.: Induktives Erwärmen – Wärmen, Härten, Glühen, Löten, Schweißen. Essen: Vulkan Verlag, 2014
- [5] Baldan, M.; Steinberg, T.; Baake, E.: Optimal design of inductor addressed to a tailored heating forging process. Int. J. Microstructure and Materials Properties, Vol. 13, Nos. 1/2, 2018
- [6] Lupi, S.: Fundamentals of Electroheat. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2017
- [7] Chander, S.; Ray, A.: Flame impingement heat transfer: A review. Energy Conversion and Management 46 (2005), No 18 – 19, pp. 2803 – 2837
- [8] Thie, S.; Hauch, J.; Schmitz, N.; Pfeifer, H.; Ennen, M.; Baake, E.: Untersuchung einer gezielten Bauteilerwärmung für die Massivumformung. Prozesswärme: Vulkan Verlag, (4) 2020

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Verglichen wurden die Möglichkeiten einer ganzheitlichen maßgeschneiderten Bauteilerwärmung mittels Induktion, Konduktion und DFI für zylindrische Schmiederohteile mit den Durchmessern 50 mm und 80 mm aus 1.4301, 1.7225 und 1.0503. Es hat sich gezeigt, dass nach aktuellem Stand mit der Induktion das Zieltemperaturprofil am genauesten eingestellt werden kann. So konnten Kennzahlen in einem Bereich zwischen 0,56 und 0,63 erzielt werden. Sowohl Konduktion als auch DFI weisen kleinere Kennzahlen bis maximal 0,51 auf. Alle Verfahren können durch Optimierungen in der Prozessführung weiter verbessert werden.

Das größte Potenzial für die maßgeschneiderte Erwärmung von Schmiederohteilen besteht in einer Hybridisierung der Verfahren untereinander. So können die kurzen Erwärmungszeiten von Konduktion oder Induktion effizient genutzt werden, um das gesamte Bauteil homogen auf das Temperaturniveau der Halbwarmumformung zu erwärmen. Die Warmumformungsbereiche können anschließend durch „Boostern“ eingestellt werden, entweder mittels Induktion, wenn beispielsweise ein hoher Durchsatz gefordert ist, oder mittels DFI, wenn die Geometrien häufig wechseln. Durch das vorgestellte Verfahren der maßgeschneiderten Erwärmung von Schmiederohteilen bietet sich ein enormes Potenzial einerseits zur Steigerung der Umformqualität und andererseits zur Einsparung von Energie, CO₂ sowie Materialeinsatz.



Das IGF-Projekt 19511 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Maschinenbau e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e. V., Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt am Main, angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**



aufgrund eines Beschlusses
des deutschen Bundestages