

Energy Efficiency in Forging I

The goals of reducing costs, creating a competitive advantage, using resources sparingly, and protecting the climate have to be regarded in context in the future. Each area consuming resources has to be examined and the potential for reduction found. The hot and cold forging industry is characterised by high material input and great energy consumption. German Forging Association, the Laboratory for Forging (LFM - Labor für Massivumformung) and several companies have taken up the subject of energy efficiency in order to develop possible potential for hot forging.

Energieeffizienz in der Massivumformung I

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz,
Dipl.-Ing. Harald Hermanns, Iserlohn,
Dipl.-Ing. Joachim Höh, Ennepetal,
Dr.-Ing. Markus Langejürgen,
Dr.-Ing. Andreas Seitzer, Remscheid

Die Ziele Kostenreduzierung, Wettbewerbsfähigkeit, Ressourcenschonung und Klimaschutz müssen zukünftig im Zusammenhang gesehen werden. Hierbei gilt es, jeden Bereich, der Ressourcen verbraucht, zu betrachten und nach Reduzierungspotenzialen zu suchen.

Hoher Materialeinsatz und großer Energieverbrauch kennzeichnen die Branche Massivumformung. Der Industrieverband Massivumformung e. V., das Labor für Massivumformung und mehrere Firmen haben das Thema Energieeffizienz aufgegriffen, um mögliche Potenziale für die Warmmassivumformung zu erarbeiten.

Im Teil I der Ergebnisveröffentlichung werden Konzepte und Demonstrator-Ergebnisse vorgestellt, die zeigen, wie und in welchem Umfang

- der Erwärmer-Wirkungsgrad bei Induktionsanlagen verbessert,
- die Wärme aus dem Kühlkreislauf von Induktionsanlagen genutzt sowie
- die Umformwärme nach dem Schmieden in den Prozess zurückgeführt werden können.

Reduzierung des Energiebedarfs bei der Induktionserwärmung

Eine Vorstudie hat gezeigt, dass die derzeit eingesetzten Induktionserwärmer mit einem Gesamtwirkungsgrad von < 60 Prozent arbeiten.

Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen war, im Rahmen einer engen Kooperation zwischen einem Anlagenhersteller und einem Produktionsunternehmen den Gesamtwirkungsgrad von Induktionserwärmungsanlagen zu verbessern und somit die eingesetzte Erwärmungsenergie zu reduzieren.

Der Wirkungsgrad ist allgemein definiert als das Verhältnis von abgegebener Leistung zu zugeführter Leistung, wobei die zugeführte Leistung der Summe aus abgegebener Leistung und Verlustleistung entspricht. Die Betrachtungen zum Wirkungsgrad einer induktiven Erwärmungsanlage zeigen, dass der Gesamtwirkungsgrad aus dem Produkt der Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten folgt. So ist an der Energiewandlung neben dem Netztrafo, dem Umrichter und dem Kondensatorenschrank im We-

sentlichen der Induktor mit seinem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad beteiligt. Der elektrische Wirkungsgrad wird im Wesentlichen durch das Verhältnis von Wärmgutdurchmesser zu Spulendurchmesser und die Wahl der richtigen Frequenz bestimmt. Um einen hohen elektrischen Wirkungsgrad realisieren zu können, sollten beide Durchmesser möglichst optimal aufeinander abgestimmt sein. Im Idealfall gäbe es somit für jeden Materialdurchmesser einen optimal angepassten Induktor. Da dies jedoch für die meisten Anwendungsfälle nicht praktikabel und wirtschaftlich ist, gilt es, das Produktspektrum des Anwenders genau zu analysieren und zu sinnvollen Durchmesserbereichen zusammenzufassen. Die Auslegung des Induktors stellt daher stets einen Kompromiss aus optimaler Anpassung und hoher Flexibilität dar.



Bild 1: Vergleich der Energieverbräuche und Wirkungsgrade.

Der thermische Wirkungsgrad dagegen wird maßgeblich durch die Erwärmungsdauer und somit die Länge der Erwärmungsstrecke beeinflusst. Die Strahlungsverluste nehmen dabei proportional zur vierten Potenz der absoluten Oberflächentemperatur zu. Bei vorgegebener Durchwärmung ist der thermische Wirkungsgrad umso höher, je kürzer die Verweilzeit des Wärmeguts auf der Zieltemperatur ist. Die Zielsetzung besteht prozesstechnisch daher darin, eine gute Durchwärmung des Wärmeguts zu

gewährleisten und aus Gründen der Energieeffizienz die Haltezeit auf Erwärmungstemperatur, das heißt die Spulenstrecke möglichst kurz zu wählen. Über Dämmung und Auskleidung der Spulen können die Abstrahlverluste zusätzlich beeinflusst werden. Eine Reduzierung der thermischen Verluste kann somit durch geeignete, thermisch isolierende Auskleidungsmaterialien erfolgen, deren Wärmewiderstand näherungsweise linear mit der Wandstärke steigt.

So zeigt eine vergleichende Untersuchung zur Erwärmung von Werkstücken im Durchmesserbereich von 80 mm bis 110 mm, dass je nach Auswahl der Induktordurchmesser die Energieverbräuche stark schwanken. Tendenziell ergeben sich bei gleicher Tonnage bessere Gesamtwirkungsgrade bei kleinen Werkstückdurchmessern. Dieser Effekt basiert auf der geringeren abstrahlenden Oberfläche der Werkstücke und somit einem besseren thermischen Wirkungsgrad.

Vergleich der Induktordurchmesser [mm]	110/100	110/90	100/90	110/100	110/90	100/90
Materialdurchmesser [mm]	90	90	90	85	85	85
Energieverbrauch enge Kopplung [kWh/t]	321	307	307	326	311	311
Energieverbrauch weite Kopplung [kWh/t]	341	341	321	357	357	326
Einsparung an Energieverbrauch [kWh/t]	20	34	13	31	46	15
Einsparung an Energieverbrauch [%]	6	10	4	9	13	5
Durchsatz [kg/h]	7.000	8.000	10.000	6.000	7.000	9.000
Stunden pro Schicht	8					
Schichten pro Tag	2					
Arbeitstage pro Woche	5					
Jahresarbeitswochen	50					
Durchsatz [t/a]	28.000	32.000	40.000	24.000	28.000	36.000
Energiekosten [Cent/kWh]	10					
Einsparung an Energiekosten pro Jahr [€]	57.179	107.303	52.444	73.675	128.142	54.241

Tabelle 1: Vergleich der jährlichen Energiekosten.

Das Bild 1 zeigt in der oberen Hälfte eine Zusammenfassung der Studie. Die oberste Linie beginnt ganz links mit dem Energieverbrauch für 110 mm Rundmaterial in einem für diesen Querschnitt optimierten Induktor. Möchte man im gleichen Induktor Material mit nur 100 mm Durchmesser erwärmen, steigt der Energieverbrauch bereits um 3 Prozent an. Werden die zu erwärmenden Werkstücke nochmals kleiner, ergibt sich für 90 mm Durchmesser schon ein um 8 Prozent höherer Energieverbrauch und für 85 mm Material sind mehr als 12 Prozent zusätzliche Energie aufzuwenden. Ähnlich verhält es sich bei einem Vergleich für einen Induktor der für 100 mm Material ausgelegt wurde (blaue Linie). Verglichen mit einer Erwärmung in einem Induktor für 110 mm kann der Energieverbrauch bereits um mehr als 3 Prozent gesenkt werden. Der größte Unterschied im Rahmen dieses Vergleichs ergibt sich bei der Erwärmung von 85 mm Material in einem für 110 mm ausgelegten Induktor. Dieses Verhältnis erscheint groß, wird aber im industriellen Alltag häufig so eingesetzt. Eine Abweichung von mehr als 30 Prozent vom Nenndurchmesser sollte unter keinen Umständen betrieben werden, da hier die Energieverbräuche nochmals empfindlich ansteigen.

Was diese Verbräuche in Kosten bedeuten, zeigt die Hochrechnung in Tabelle 1. In der oberen Zeile sind die verglichenen Nenndurchmesser der Induktoren angegeben. Darunter ist der Durchmesser des erwärmten Materials angegeben. Die jeweiligen Energieverbräuche und die absolute Einsparung je Tonne sowie die relative Einsparung folgen in den nächsten Zeilen. Für einen angenommenen Zweischichtbetrieb mit 50 Arbeitswochen pro Jahr ergeben sich die jährlichen Durchsätze für derartige Anlagen. Bei einem beispielhaften Energiepreis von 10 Cent pro kWh kommt bereits beim ersten Vergleich ein beachtliches Ersparnispotenzial heraus. Je nach vergleichener Situation ergeben sich Einsparungen in einer Höhe von mehr als

100.000 Euro, sodass dringend empfohlen wird, jede Anlage auf ein mögliches Optimierungspotenzial zu überprüfen.

Nutzung der Wärme aus dem Kühlkreislauf von Induktionserwärmern

Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen war, im Rahmen der engen Kooperation mit einem Anlagenhersteller, die Wärme aus dem Kühlkreislauf von Induktionserwärmungsanlagen zu nutzen.

Die Nutzung der thermischen Energie auf niedrigerem Temperaturniveau ist meist sehr aufwendig, und ein Ausgleich stark schwankender Energiemengen ist im Allgemeinen nur mit großen Energiespeichern möglich. Durch eine geänderte Kühlstrategie ist es möglich, die Rücklauftemperatur der Induktoren zu erhöhen und dauerhaft zu stabilisieren. Eine Nutzung wird hierdurch prinzipiell vereinfacht. Feldversuche zeigen, dass 30 Prozent der eingestellten Anlagenleistung nutzbar gemacht werden können. Dies betrifft im Wesentlichen die Verlustleistung im Wasser des Induktors. Über geeignete Maßnahmen kann die Auslauftemperatur des Induktors auch dauerhaft bei 60 °C gehalten werden, ohne den Induktor zu beschädigen. Bei dieser Temperatur ist die Wärme wirtschaftlich für die Raumbeheizung und die Warmwasserbereitung nutzbar.

Wie groß das Potenzial einer solchen Rückgewinnung ist, zeigt folgendes Beispiel: Bei 4.000 Jahresbetriebsstunden und einer Verfügbarkeit der Gesamlinie von 75 Prozent ergeben sich 3.000 Jahresnutzungsstunden. Von der Anlagenleistung gelangen 432 kW ins Kühlwasser. Dieser Wasserkreis kann nicht direkt genutzt werden, sodass weitere Verluste

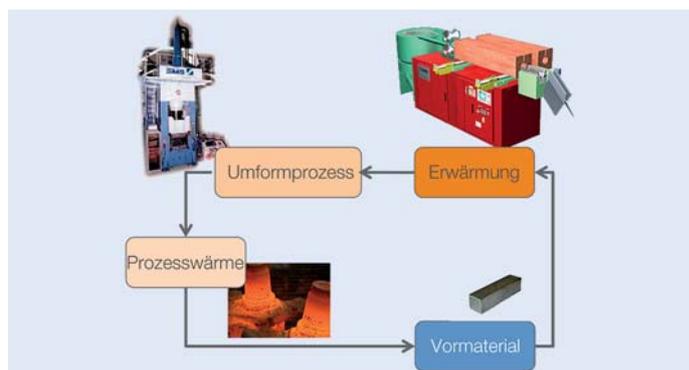


Bild 2: Nutzung der Prozesswärme zur Vormaterialerwärmung.

durch einen zusätzlichen Wärmetauscher zu berücksichtigen sind. Bei einer Auslauftemperatur von 60 °C erhöht sich auch die Temperatur des Kupferwickels gegenüber dem Normalbetrieb. Der Widerstand der Spule steigt und der elektrische Wirkungsgrad sinkt. Zur Kompensation sind zusätzlich etwa 17 kW elektrische Energie notwendig, die in der Berechnung Berücksichtigung finden. In der Regel ist die zurückgewonnene Wärme nur in der kalten Jahreszeit vollständig nutzbar. Bei diesem Beispiel wurde eine Heizperiode von 7 Monaten angesetzt. Ein höheres Potenzial ergibt sich, falls die Energie ganzjährig genutzt werden kann. Die jährliche Ersparnis bewegt sich im Bereich zwischen 20.000 Euro und 35.000 Euro (Tabelle 2).

Rückführung der Umformwärme in den Produktionsprozess

Gegenstand dieses Teils der Untersuchungen war, ein Konzept zu entwickeln, zu erproben und zu bewerten, um die Prozesswärme nach der Warmumformung dem zu erwärmenden Vormaterial zumindest teilweise wieder zuzuführen und danach mittels Induktionserwärmung auf Umformtemperatur zu erwärmen (Bild 2).

Für die Übertragung der Prozesswärme auf das Vormaterial wurden drei verschiedene Varianten theoretisch untersucht und hinsichtlich

Heizperiode pro Jahr [Monate]	7
Arbeitswochen pro Jahr	50
Arbeitstage pro Woche	5
Schichten pro Tag	2
Stunden pro Schicht	8
Jahrestonnage [t/a]	12.000
Relation zum Heizwert des Erdgases [kWh/(m³)]	10,6
Effizienz des Wärmetauschers	0,8
Energiepreis	
Gas [€/kWh]	0,04
Strom [€/kWh]	0,10

Jahresbetriebsstunden [h/a]	4.000
Verfügbarkeit [%]	75
Mittlere Tonnage [t/h]	4,00
Jahresnutzungsstunden [h/a]	3.000
Leistung des Umrichters [kW]	1.440
nutzbare Leistung im Kühlwasser [kW]	432
nutzbare Leistung zur Wärmerückgewinnung [kW]	345,6
zusätzliche elektrische Energie [kW]	17,28
Einsparung für den Teillastbereich [€/h]	12,10
Jährliche Ersparnis für Ganzjahresbetrieb [€/a]	36.288
Jährliche Ersparnis für die Heizperiode [€/a]	21.168

Tabelle 2: Einsparmöglichkeiten durch Wärmerückgewinnung.

technischer, logistischer und wirtschaftlicher Machbarkeit vorbewertet (Bild 3). Hierbei hat sich die Variante C als die geeignetste herausgestellt.

Für die Variante C wurde ein Demonstrator entwickelt, gebaut und unter Serienbedin-

gungen und bei verschiedenen Zuluftparametern getestet. Die besten Ergebnisse bezüglich erreichbarer Vormaterialtemperatur und Aufwärmzeit werden bei einer Zuluftmenge von zirka 1 kg/s erreicht. In diesem Fall wird nach einer Zeit von 0,5 Stunden je nach Probenlage in dem Transportbehälter eine

Vormaterialtemperatur von bis zu 140 °C erreicht (Bild 4).

Bei der Vormaterialerwärmung durch Prozesswärme tritt unabhängig von dem gewählten Erwärmungskonzept immer die Problematik auf, dass die Wärmezufuhr von der Laufzeit und

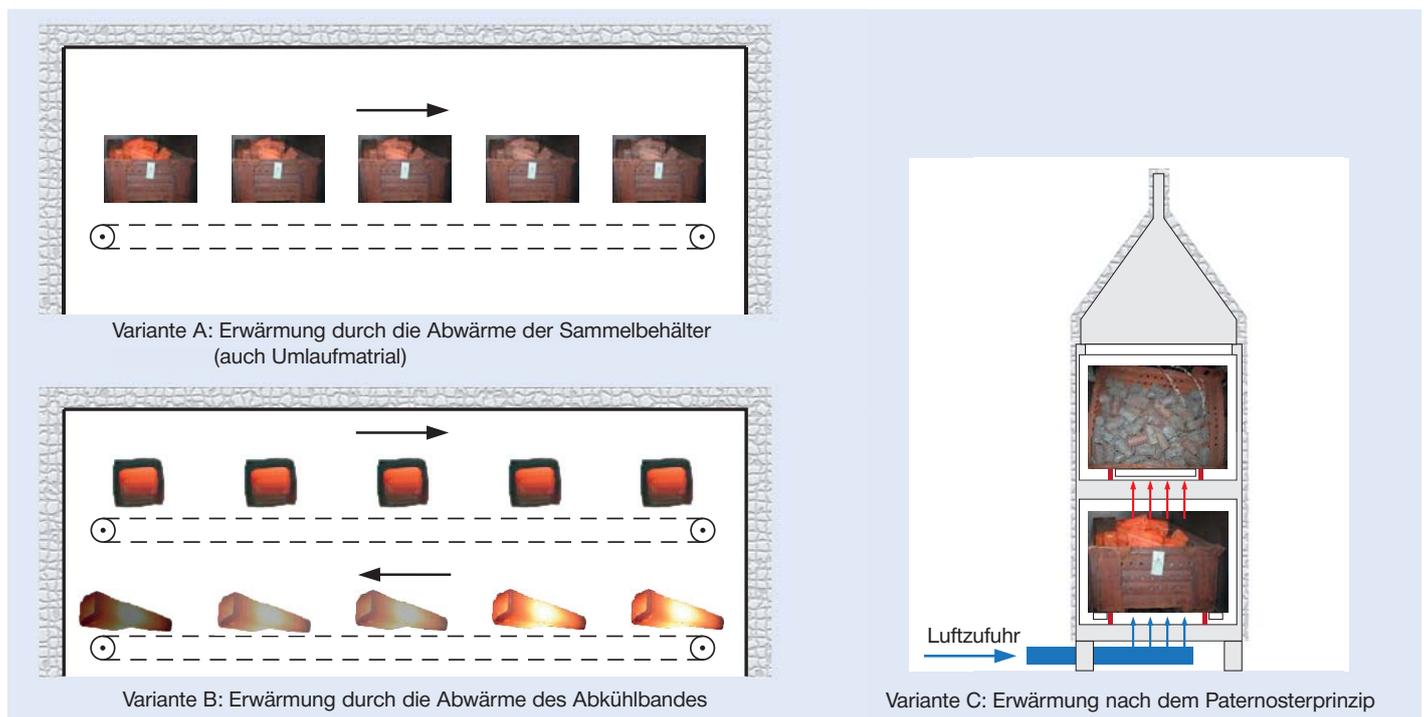


Bild 3: Prinzipielle Varianten zur Vormaterialerwärmung.

Produktivität des Fertigungsprozesses abhängig ist. Eine kontinuierliche Wärmezufuhr und damit konstante Vormaterialtemperaturen sind daher nicht gewährleistet. Aus diesem Grund ist zwischen der Vormaterialerwärmung und der abschließenden Induktionserwärmung ein Homogenisierungsprozess notwendig, der eine konstante Vormaterialtemperatur zu Beginn der induktiven Erwärmung sicherstellt. Theoretische und praktische Untersuchungen haben ergeben, dass die Temperaturhomogenisierung dann besonders sinnvoll ist, wenn sie gekoppelt wird mit einer Temperaturerhöhung in einem Gaserwärmer. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass neben der Temperaturhomogenisierung ein wesentlicher Teil der Erwärmung auf Basis von Primärenergie erfolgt. Das führt in Summe zu einer merklichen Reduzierung der Energiekosten und des CO₂-Ausstoßes.

Als besonders geeignetes Verfahren für die Temperatur-Homogenisierung und weitere Erwärmung wurde das „Jet-Heating“ [Irret2011] ermittelt. Der Erwärmungsprozess durch Jet-Heating zeichnet sich dadurch aus, dass das zu homogenisierende und weiter zu erwärmende Gut mit einem heißen Prallstrahl (Luft, $v = 30$ bis 60 m/s) beaufschlagt wird. Hierdurch werden hohe Wärmeübergangskoeffizienten erreicht, sodass im Vergleich zur konvektiven und Strahlungserwärmung deutlich geringere Erwärmungszeiten und damit deutlich geringere Bauräume der Erwärmeranlagen benötigt werden. Die Wärmeerzeugung erfolgt beim Jet-Heating mit Gasbrennern. Der Ablauf der Erwärmung bei Nutzung der Prozesswärme ist in Bild 5 schematisch dargestellt.

Untersuchungen mit einer Jet-Heating-Testanlage haben ergeben, dass die Erwärmungszeit von 140 °C auf 700 °C bei einer Vormaterialgeometrie von $\varnothing 95 \times 180$ mm zirka 30 Minuten beträgt (Bild 6).

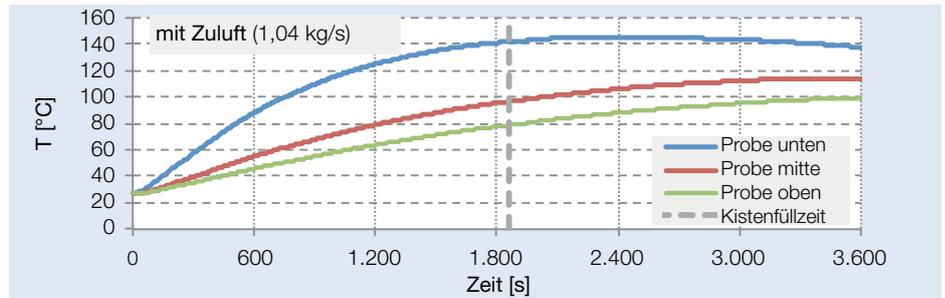


Bild 4: Erwärmungsverlauf in Abhängigkeit der Probenlage.

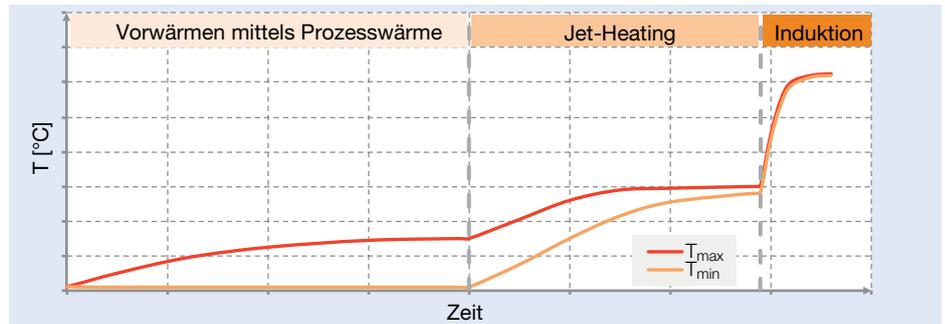


Bild 5: Schematische Darstellung der Erwärmung von Vormaterial bei Nutzung der Prozesswärme.

Die Auswirkung der im Vergleich zur konventionellen Induktionserwärmung längeren Erwärmungsdauer auf die Zunderbildung und Randentkohlung wurde für den Temperaturbereich unterhalb 800 °C für zwei Werkstoffe untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vorwärmtemperatur bis mindestens 550 °C ohne Beeinträchtigung möglich ist.

Eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung hat ergeben, dass die Energiekosten bei der hier untersuchten Erwärmungsstrecke (Massendurchsatz 2.570 kg/h, 140 °C Vorwärmen mittels Prozesswärme, Temperaturhomogenisierung und -erhöhung mittels Jet-Heating auf 550 °C, abschließende Induktionserwärmung auf 1.250 °C) zirka 22 Prozent günstiger sind als

bei der konventionellen Induktionserwärmung. Die dabei erreichbare CO₂-Reduzierung beträgt zirka 23 Prozent. Unter Berücksichtigung der geänderten Erwärmungsanlage und einem Abschreibungszeitraum von 15 Jahren können die gesamten Erwärmungskosten (Energie- + Anlagenkosten) um zirka 10 Prozent reduziert werden.

Zusammenfassung

Durch die Studie konnte gezeigt werden, dass durch eine geeignete Abstimmung von Werkstück- und Induktor-Durchmesser der Wirkungsgrad von Induktionsanlagen signifikant verbessert und dadurch die jährlichen Erwärmungskosten deutlich gesenkt werden können. Es konnte weiter gezeigt werden, dass es durch

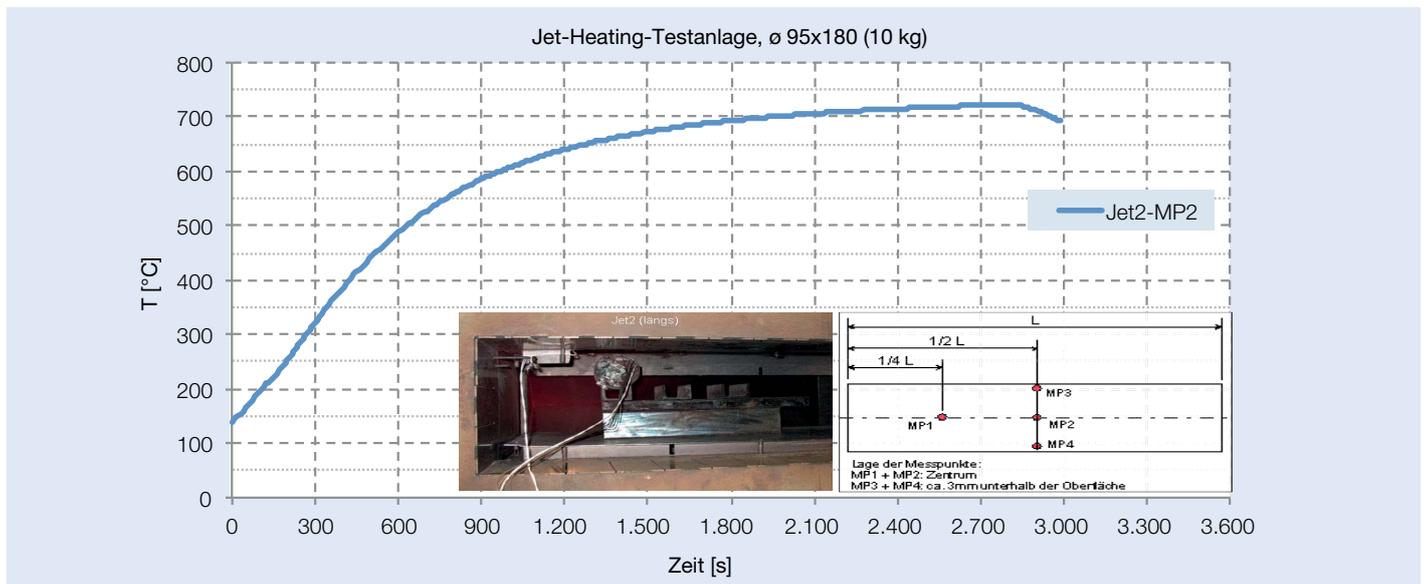


Bild 6: Erwärmungsverlauf in einer Jet-Heating-Testanlage (Vormaterial $\varnothing 95 \times 180$ mm, 10 kg).

Bilder: Autoren

eine geänderte Kühlstrategie möglich ist, die Rücklauftemperatur der Induktoren zu erhöhen und dauerhaft zu stabilisieren. Feldversuche haben gezeigt, dass 30 Prozent der eingestellten Anlagenleistung nutzbar gemacht werden können. Über geeignete Maßnahmen kann die Auslauftemperatur des Induktors auch dauerhaft bei 60 °C gehalten werden, ohne den Induktor zu schädigen. Bei dieser Temperatur ist die Wärme

wirtschaftlich für die Raumbeheizung und die Warmwasserbereitung nutzbar. Das jährliche Einsparpotenzial bewegt sich im Bereich zwischen 20.000 Euro und 35.000 Euro.

Für die Rückführung der Umformenergie in den Prozess wurde ein Konzept entwickelt und auf Basis von Demonstratoren getestet, bei dem die Umformenergie nach dem Schmiedeprozess

teilweise auf das Vormaterial übertragen wird, danach eine Temperaturhomogenisierung mit gleichzeitiger weiterer Erwärmung auf Basis von Primärenergie erfolgt, woran sich dann eine Induktionserwärmung bis zur gewünschten Umformtemperatur anschließt. Mit diesem Konzept lassen sich die Erwärmungskosten um zirka 10 Prozent und der CO₂-Ausstoß um 23 Prozent reduzieren. ■



Prof. Dr.-Ing.
Rainer Herberitz



Dipl.-Ing.
Harald Hermanns



Dipl.-Ing.
Joachim Höh



Dr.-Ing.
Markus Langejürgen



Dr.-Ing.
Andreas Seitzer

Die beteiligten Projektpartner:

- CDP Bharat Forge GmbH
- Hirschvogel Umformtechnik GmbH
- Industrieverband Massivumformung e. V.
- Labor für Massivumformung (LFM)
- MAHLE Motorkomponenten GmbH
- Rasche Umformtechnik GmbH & Co KG
- SMS Elotherm GmbH
- Zenergy Power GmbH

Das Verbundprojekt ENERMASS, in dem die Umsetzungsmaßnahmen erarbeitet und bewertet wurden, wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Literatur

[Irret2011] Irretier O., Schütt W.: Konvektive Erwärmung – Aspekte im Industrieofenbau, elektrowärme international Heft 1/2011