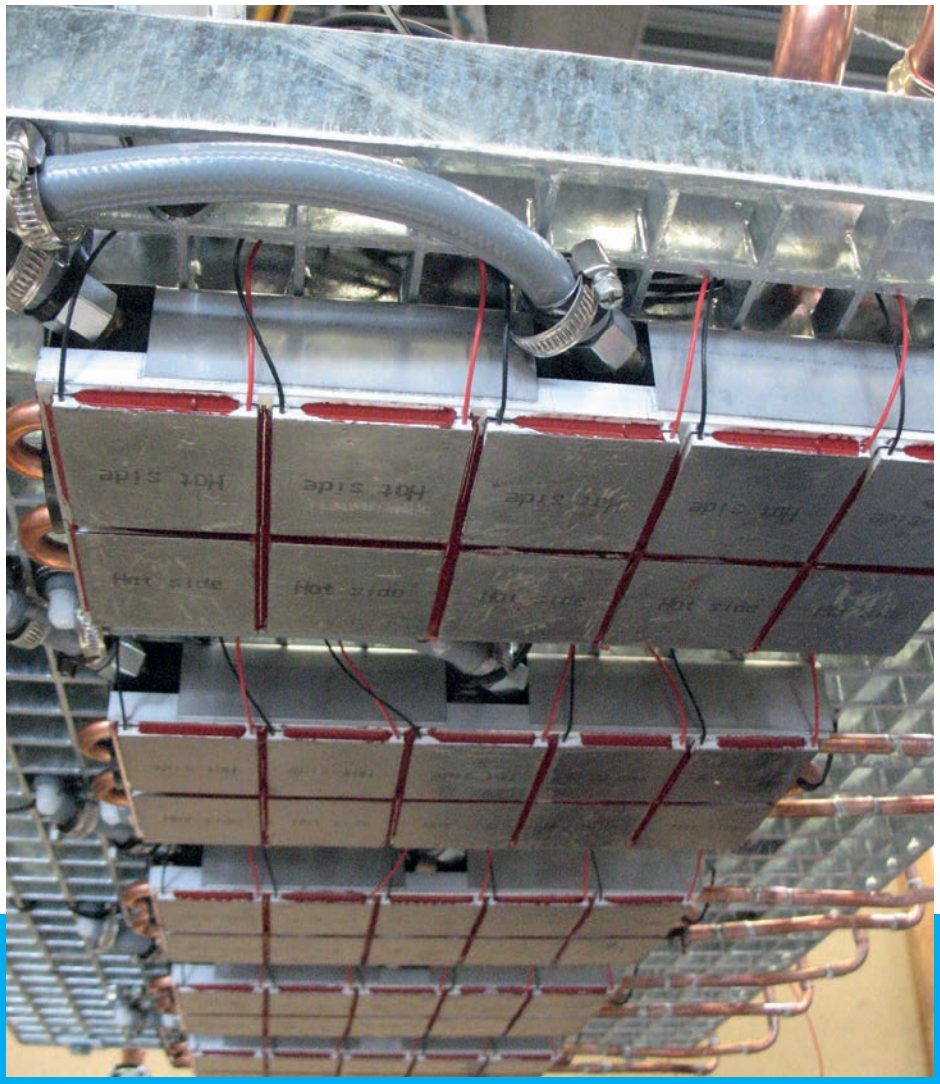

Entwicklung eines Energiewandlers zur Rückgewinnung von Prozessenergie in der Massivumformung auf Basis thermo-elektrischer Generatoren

Die Branche Massivumformung verarbeitet auf Umformpressen und -hämmern zum Großteil Stückgüter aus Stahl für die Automobilindustrie. Prozessbedingt muss der Stahl für die Verarbeitung auf zirka 1.200 bis 1.300 °C erwärmt werden. Die hohe gebundene Prozessenergie wird in den verschiedenen Stadien der Umformung und bei der Abkühlung auf den Transport-/Abkühlbändern und in den Transportbehältern ohne weitere Nutzung an die Umgebung abgegeben. Thermoelektrische Generatoren können diese Wärme in elektrische Energie umwandeln.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing.
Rainer Herbertz

leitet das Labor für Massivumformung im Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn

Dipl.-Ing.
Rainer Labs

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Labors für Massivumformung im Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn

Dr. rer. nat.
Dirk G. Ebling

ist Vizepräsident für Forschung und Transfer an der Hochschule Düsseldorf

Alexander Krumm,
M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik an der Hochschule Düsseldorf

Björn Pfeiffelmann,
M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik an der Hochschule Düsseldorf

Dipl.-Ing.
André Stunz

arbeitet in der Abteilung Organization and Processes und ist Energiemanagementbeauftragter für die SEISSENSCHMIDT GmbH in Plettenberg

Dipl. Ing. (FH)
Michael Roesemann

ist Projektleiter in der Abteilung Innovation und Management der Seissenschmidt GmbH in Plettenberg

Zur Umwandlung von thermischer in elektrische Energie sind nur wenige Verfahren bekannt. Ein seit vielen Jahren bekanntes Verfahren stellen die sogenannten thermoelektrischen Generatoren (TEG) dar. Die TEG sind aus zwei verschiedenen elektrischen Halbleitern aufgebaut. Tritt ein Temperaturunterschied an den Verbindungsstellen (Heiß- und Kaltseite) der beiden Halbleiter auf, entsteht auf Grund des Seebeck-Effekts eine elektrische Spannung (Bild 1).

Die meisten der heute kommerziell verfügbaren TEG sind auf Grund ihrer Konstruktion hinsichtlich ihrer maximalen Temperatur bei etwa 200 bis 300 °C begrenzt. Um einen optimalen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärme in elektrische Energie zu erreichen, muss die Wärmeenergie – abhängig vom Aufbau des thermoelektrischen Generators – bei einer definierten und weitgehend konstanten Temperatur zur Verfügung stehen.

Der sinnvolle Einsatz von TEG ist somit an die Bedingung geknüpft, dass die vorgeschalteten und wärmeliefernden Prozesse sich durch eine weitgehende Temperatur- und Energiekonstanz auszeichnen. Weiterhin ist das zulässige Temperaturniveau auf der Heißseite der TEG sehr begrenzt, da bei Überschreitung einer maximalen Temperatur die TEG zerstört werden. Massivumformprozesse haben diese Eigenschaft nicht, weil

- es sich um taktgebundene Stückgutprozesse handelt,
- nach jedem gefertigten Los der Prozess für das Rüsten des nächsten Betriebsauftrags unterbrochen werden muss,
- die Prozesse unplanmäßigen Störungen unterliegen,
- die Temperatur der Umformteile sehr hoch ist, sodass sich ein direkter Strahlungskontakt mit den TEG verbietet.

Aus diesen Gründen sind TEG zur Prozessenergienutzung in Massivumformprozessen zunächst ungeeignet. Auch die rasante Weiterentwicklung von TEG hinsichtlich höherer Wirkungsgrade und höherer Temperaturen wird hieran in absehbarer Zeit nichts ändern, da die Abhängigkeit von Temperatur und Wirkungsgrad nicht zu umgehen ist.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Energiewandler konzipiert, entwickelt und als Demonstrator gebaut sowie im industriellen Umfeld getestet und bewertet, mit dem die hohe Prozessenergie bei Massivumformprozessen mit möglichst hohem Wirkungsgrad durch TEG in elektrischen Strom umgewandelt und dann als hochwertiger Energieträger belie-

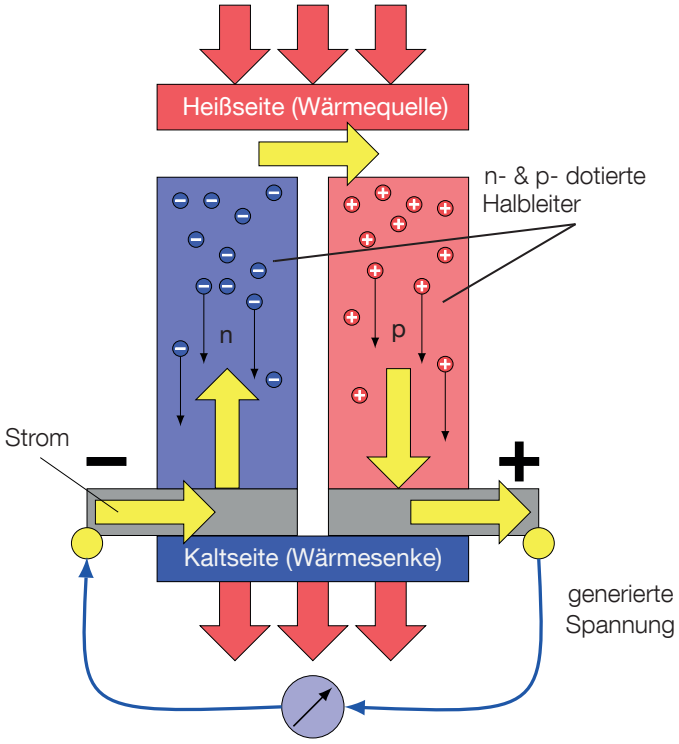

Bild 1: Funktionsprinzip eines TEG
Bild: Y. Miyazaki et al, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50, p. 035804, 2011

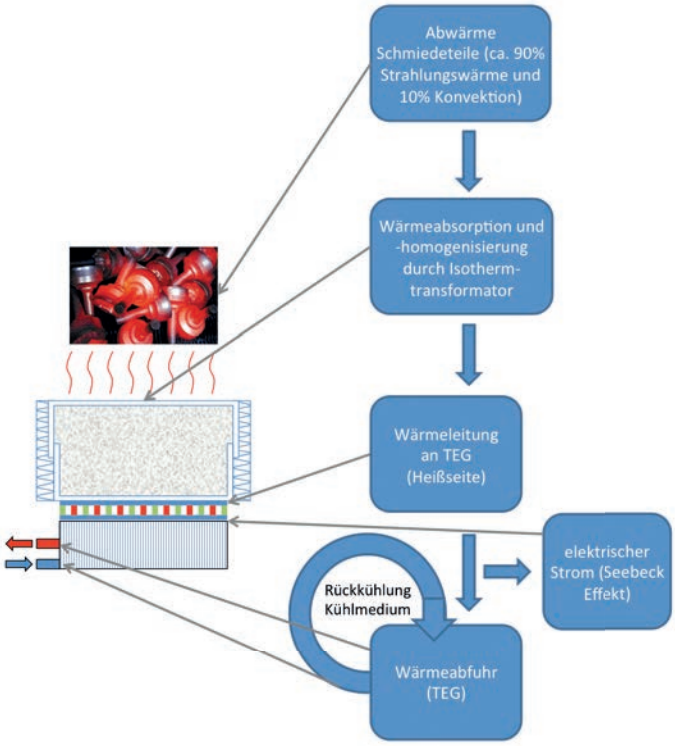

Bild 2: Prinzip des Energiewandlers
Bild: Autoren

big weitergenutzt werden soll. In Bild 2 ist das Prinzip des Energiewandlers dargestellt.

Folgende Entwicklungsschwerpunkte sind zu nennen:

- Entwicklung eines Isotherm-Transformators, der dadurch gekennzeichnet ist, dass er instationäre Temperaturverhältnisse und ein hohes Temperaturniveau auf der Prozessseite in eine nahezu konstante Temperatur mit angepasstem Temperaturniveau auf der TEG-Seite umwandelt. Hierzu wurden verschiedene Varianten möglicher Isotherm-Transformatoren konzipiert, entwickelt und vergleichend gegenübergestellt. Die technisch und wirtschaftlich aussichtsreichsten Varianten wurden dann als Demonstrator gebaut, in Versuchen zusammen mit TEG getestet und bewertet.

- Steigerung des Systemwirkungsgrads durch Optimierung des thermischen Widerstands in den TEG-Kontaktstellen. Sowohl ein zu hoher als auch ein zu niedriger thermischer Widerstand führt zu deutlichen Verschlechterungen der Energieausnutzung, da entweder die Wärme nicht vollständig genutzt wird, oder die Temperaturdifferenz zusammenbricht und das Kühlsystem deutlich größer als notwendig ausgelegt werden muss.

- Entwicklung eines leistungsstarken und kostengünstigen Kühlsystems für die Kaltseite der TEG.

- Entwicklung und Realisierung eines Anbindungskonzepts des TEG-Kühlsystems an das betriebliche Kühlsystem, mit dem Ziel eines minimalen Energieeigenverbrauchs.

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wurde der Energiewandler wie folgt aufgebaut (Bild 3):

Als Unterteil wird ein aus Kupfer gefertigter „Isothermtransformator" eingesetzt, dessen Unterseite schwarz beschichtet ist und als Absorber fungiert. Über den Absorber wird die Strahlungswärme der abkühlenden Schmiedeteile aufgenommen. Das Innere des Isothermtransformators ist mit Zinn gefüllt, wodurch zwei Ziele erreicht werden sollen. Zum einen soll das Zinn als latenter Wärmepuffer dienen und kurze Prozessunterbrechungen ausgleichen. Diese Funktion steht im Temperaturbereich des Phasenübergangs (fest → flüssig, zirka 232 °C) zur Verfügung. Zum anderen soll durch den Einsatz von Zinn und Kupfer ein möglichst guter örtlicher Wärmeausgleich stattfinden. Um den Wärmeübergang vom Zinn auf die Oberseite des Isothermtransformators zu verbessern, wurden große Wärmeübertragungsflächen vorgesehen.

Auf der Oberseite des Isothermtransformators werden fünf Arrays mit je zehn TEG installiert. Über den TEG werden zur Kühlung handelsübliche Wasserkühler platziert. Eine gute Kontaktierung zwischen TEG und Heißseite sowie zwischen TEG und Kaltseite ist für einen effizienten Betrieb der Generatoren notwendig. Hierzu wurden die TEG gegen Heiß- und Kaltseite durch pneumatische Druckkissen angedrückt, die mit 8 bar beaufschlagt werden können. Um den Druck auf die TEG aufbringen zu können, wurde der Isothermtransformator in eine „Aufnahme" gestellt und über den Druckkissen ein Schwerlastgitter installiert. Aufnahme und Schwerlastgitter wurden miteinander verschraubt. Jeder der fünf TEG-Arrays wurde mit einem Micro-Wechselrichter verdrahtet. Der erzeugte Strom

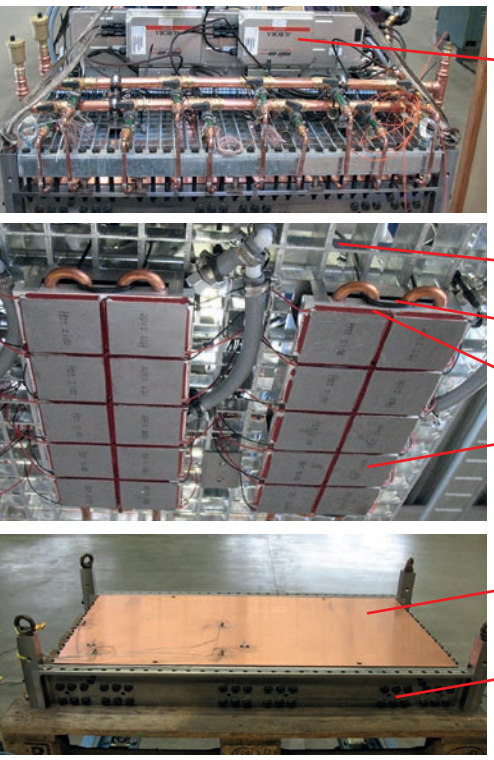

Bild 3: Aufbau deines Demonstrators
Bild: Autoren

wurde in das Betriebsnetz eingespeist. Um das Verhalten des Demonstrators im betrieblichen Einsatz beurteilen zu können, wurden mehrere Sensoren installiert.

In diesem Vorhaben wurden zwei Demonstratoren mit unterschiedlichen Isothermtransformatoren (unterschiedliche Zinnmenge und unterschiedliche Wärmeübergangsfläche) untersucht. Für die durchgeführten Praxisversuche wurden die Demonstratoren über einem Abkühlband einer Hatebur-Presse installiert (Bild 4).

Durch die Versuche konnte gezeigt werden, dass die heute an die Umgebung abgegebene Wärme bei der Warmmassivumformung zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt werden kann. Etwa ein Drittel der bei der Bauteilabkühlung abgegebenen Wärmemenge kann durch den Isothermtransformator aufgenommen werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden von den Schmiedeteilen etwa 45 kW thermische Leistung auf einer Fläche von 0,5 m² abgegeben.

Durch die entwickelten Isothermtransformatoren konnten die für die Umwandlung von Wärme in Strom eingesetzten Thermoelektrischen Generatoren (TEG) vor einer Überhitzung geschützt werden. Dieser Überhitzungsschutz ist notwendig, da die TEG ansonsten auf Grund von Defekten ausfallen und nicht mehr reparabel sind.

Die Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Demonstratoren unter Produktionsbedingungen zeigen eine Lösung auf, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung (Temperaturrange < 10 °C) auf hohem Temperaturniveau (zirka 220 °C) auf

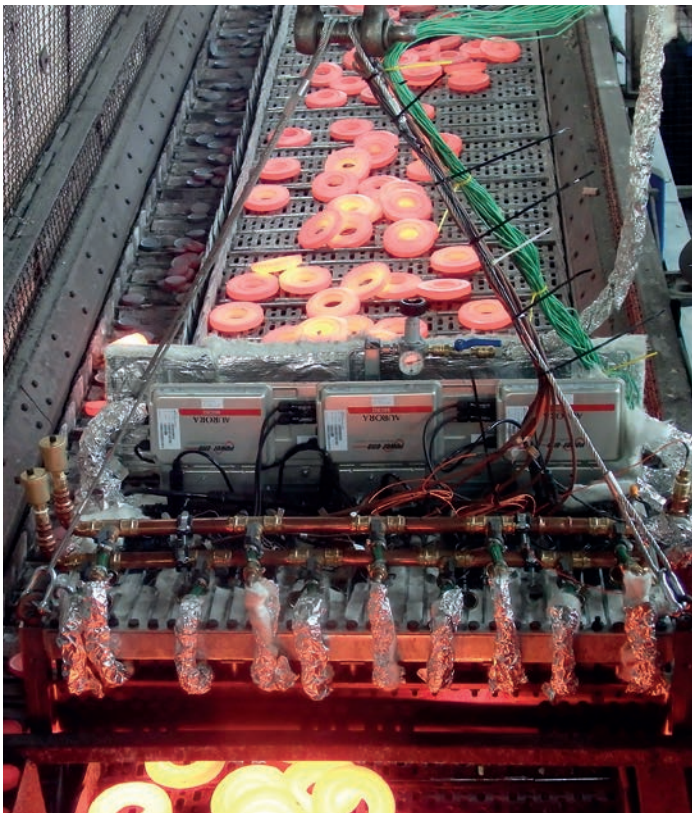

Bild 4: Demonstrator über Abkühlband
Bild: Seissenschmidt GmbH

der Heißseite der TEG realisieren zu können (Bild 5). Dies ist Voraussetzung für eine effiziente Umwandlung der Wärme in elektrischen Strom. Auf Grund der gleichmäßigen Temperaturverteilung ist ein System mit einer preiswerteren Verschaltung (weniger Wechselrichter) vorstellbar.

Durch Ausnutzung von latenter Wärme kann eine gute Wärmeversorgung der TEG bei kurzen Prozessunterbrechungen/-schwankungen (ein bis zwei Minuten) erreicht werden.

Durch eine Analyse der marktverfügbaren Thermogeneratoren konnte ein kostengünstiger Typ der Customs Thermoelectric, Inc. mit relativ hoher Betriebstemperatur bis etwa 300 °C und vergleichsweise gutem maximalen Wirkungsgrad von etwa 3,2 Prozent bei einem ΔT von 140 K ausgewählt werden. Durch die optimierte Anbindung an den Isothermtransformator und die Kühlungsmodule sowie ein entsprechend optimiertes Konzept zur Einspeisung der elektrischen Leistung konnten bis zu 80 Prozent der möglichen elektrischen Leistung aus dem System ins Netz eingespeist werden. Insgesamt wurde ein Wirkungsgrad bezogen auf die abgegebene Wärmeleistung der Schmiedeteile von nur zirka 1 Prozent erreicht.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Entwicklung des Kühlsystems gelegt, wobei verschiedene Systemvarianten getestet wurden. Eine Unterstützung der Kühlung durch Absorptionskälte unter Nutzung der zur Verfügung stehenden Wärme erwies sich als unwirtschaftlich.

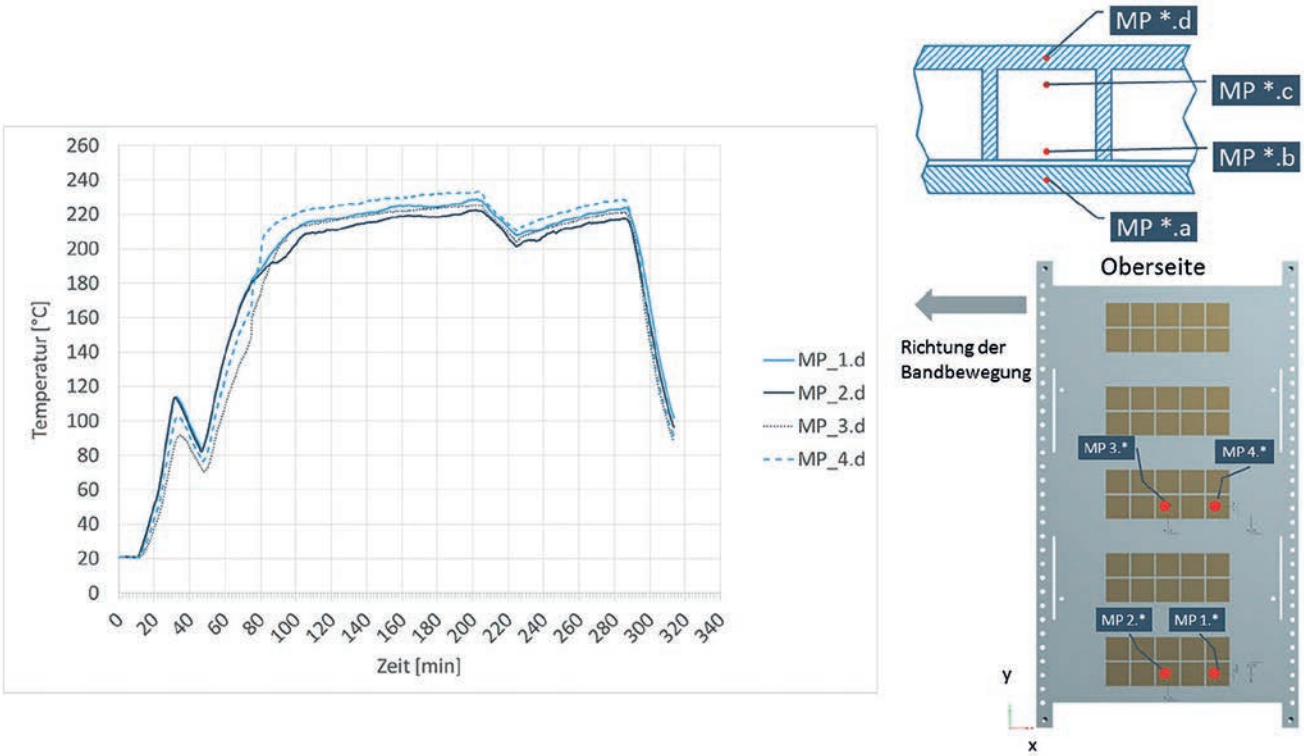

Bild 5: Heißseitentemperatur der TEG
Bild: Autoren

Weiterhin wurde eine Variante zur Reduzierung des Wärmedurchtrittswiderstands auf der Kaltseite mit Integration des notwendigen Anpressdrucks bis zur Patentreife entwickelt. Diese Kühlvariante konnte aber aufgrund von Materialfehlern nicht in den Demonstrator integriert werden. Eine aus käuflichen Komponenten kostengünstig entwickelte Systemvariante wurde erfolgreich zur Wärmeabführung im Demonstrator eingesetzt und führte etwa 33 Prozent der von den Schmiedeteilen nach allen Raumrichtungen abgegebenen Wärme ab.

Durch die Realisierung einer Wasserkühlung auf der Kaltseite der TEG konnte eine Lösung gefunden werden, bei der das vorhandene Kühlsystem, welches vorrangig für die Kühlung der induktiven Erwärmungssysteme bei der Schmiedeteilherstellung genutzt wird, zum Einsatz kommt. Hierdurch ist der Aufwand für die Installation eines entsprechenden Systems in die betriebliche Praxis relativ gering.

Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat indes gezeigt, dass der hier getestete Energieumwandler zur Zeit nicht wirtschaftlich betrieben werden kann, da zum einen die Ausbeute an elektrischer Leistung zu gering ist und zum anderen die Herstellkosten zu hoch sind. Hierdurch konnten weitere Forschungs- und Entwicklungspotenziale identifiziert werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Europäischen Union gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

EUROPÄISCHE UNION

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
Investition in unsere Zukunft