Energy Efficiency in Forging II

Changes in energy policy and rising energy costs require a closer examination of each sector that consumes energy resources and looking for energy efficiency potential. The forging industry is characterised by high energy consumption. The industrial association Industrieverband Massivumformung e. V. (German Forging Association), the Labor für Massivumformung (LFM – Laboratory for Forging) and several companies have taken up the topic of energy efficiency within the scope of the joint project ENERMASS to develop and assess possible potential for hot forging. Part II of the publication series presents concepts and demonstrator results that illustrate how and to what extent process heat can be collected and forwarded and how it can be utilised.

Energieeffizienz in der Massivumformung II

Werner Dacher, Denklingen,
Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz,
Dipl.-Ing. Harald Hermanns,
Dipl.-Ing. Rainer Labs, Iserlohn,
Dipl.-Ing. Joachim Höh, Ennepetal und
Dirk Rother, Plettenberg

Veränderungen in der Energiepolitik und steigende Energiekosten machen es erforderlich, jeden Bereich, der Energieressourcen verbraucht, zu betrachten und nach Energieeffizienzpotenzialen zu suchen. Hoher Energieverbrauch kennzeichnet die Branche Massivumformung. Der Industrieverband Massivumformung e. V., das Labor für Massivumformung und mehrere produzierende Unternehmen haben das Thema Energieeffizienz im Rahmen des Verbundprojekts ENERMASS aufgegriffen, um mögliche Potenziale für die Warmmassivumformung zu erarbeiten und zu bewerten. Im Teil II einer Veröffentlichungsreihe werden Konzepte und Demonstrator-Ergebnisse vorgestellt, die zeigen, wie und in welchem Umfang Prozesswärme gesammelt und weitergeleitet werden kann und die Prozesswärme einer Nutzung zugeführt werden kann.

Sammeln und Weiterleiten der Prozesswärme

Ziel dieses Arbeitspunkts war es, die Voraussetzungen zu schaffen, um Systeme zur Nutzung der Prozesswärme in Massivumformprozessen einsetzen zu können. Dazu mussten Konzepte erprobt und bewertet werden, um die Prozessenergie den Produktionsteilen nach dem Umformprozess zu entziehen, auf ein anderes Medium zu übertragen und zu „bündeln“, um sie dann einer Energienutzung zuführen zu können. Hierbei mussten unterschiedliche Temperaturniveaus, Besonderheiten der Stückgutproduktion, die Umwandlungsprozesse des Werkstoffs und die räumlich verteilten Produktionsanlagen berücksichtig werden, wodurch unterschiedliche Strategien zum Energieaustausch notwendig waren.

Folgende Abgrenzungen wurden getroffen:

- Energieverluste der Fertigteile und des Materialüberschusses: Diese beiden Verlustpunkte weisen ein ähnliches Temperaturniveau auf. Das Material (Fertigteil oder Grat) wird in Transportbehälter gefüllt und gibt seine Wärmeenergie an die Umgebungsluft ab. Bei den hier zu entwickelnden Maßnahmen zum Energieaustausch ist zu berücksichtigen, dass die Behälter relativ langsam gefüllt werden (je nach Bauteilgröße einige Minuten bis einige Stunden) und natürlich auch während des Füllvorgangs Wärme an die Umgebungsluft abgegeben wird.

- Energieverluste bei der BY-Behandlung (gesteuertes Abkühlen): Bei diesem Verfahrensschritt muss ein materialabhängiges Temperatur-Zeit-Profil eingehalten werden,

was bei den Maßnahmen zum Energieaustausch besonders berücksichtigt werden muss.

- Energieverluste bei der Wärmebehandlung: Die Verlustenergie fällt hier auf hohem Niveau bereits in gebündelter Form an. Hier sind Maßnahmen zu entwickeln, die die Abwärme auf möglichst hohem Niveau weiterleiten können.

Zur Erfassung der Abwärmemengen und Temperaturen aus Fertigteilbehältern wurde ein Demonstrator entwickelt und gebaut (Bild 1). Hierbei handelt es sich um einen rundum isolierten Schrank mit der Möglichkeit, zwei Fertigteilbehälter übereinander zu platzieren. Durch eine Tür an der Frontseite des Demonstrators können die Fertigteilbehälter gewechselt werden. Die Zufuhr der Fertigteile erfolgt über eine Schleuse im oberen Bereich des Demonstrators. Ein frequenzgeregelter Ventilator sorgt für einen variablen Luftstrom von bis zu 10.000 m³/h. Neun Temperaturmesspunkte und ein Luftgeschwindigkeitsmesspunkt dienen zur Aufnahme der erforderlichen Daten. Zur besseren Durchströmung der Fertigteilbehälter wurden die Böden der Behälter modifiziert.

Die Erprobung des Demonstrators erfolgte in der Serienproduktion einer Schmiedelinie für Aufreißzähne. Es wurden Versuche mit zwei verschiedenen Bauteilen mit einem Gewicht von 9 kg beziehungsweise 18 kg sowie einer Sollausbringung von 173 Stk./h beziehungsweise 126 Stk./h durchgeführt. Der obere Fertigteilbehälter wurde dabei im Produktionstakt mit den Fertigteilen befüllt und nach Erreichen der Füllgrenze gegen einen leeren Behälter ausgetauscht, um daraufhin auf der unteren Ebene im Demonstrator abgestellt zu werden. Während der gesamten Versuchszeit wurden folgende Messwerte kontinuierlich erfasst:

- Zulufttemperatur,
- Innentemperatur Demonstrator,
- Ablufttemperatur,
- Abluftgeschwindigkeit.

Durch den Demonstrator können in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie beziehungsweise -größe und der zugeführten Luftmenge bis zu 55 Prozent der Abwärme der Fertigteilkisten gesammelt und weitergeleitet werden. Die Ablufttemperatur beträgt hierbei bis zu 300 °C.

Um die Abwärme von einem BY-Band zu erfassen, wurde ein weiterer Demonstrator gebaut (Bild 2).

Bei der Planung dieses Demonstrators war zu beachten, dass die Abkühlung der Bauteile durch eventuelle Hitzestaus nicht verzögert wird, sodass die mechanischen Anforderungen an die Bauteile nicht erreicht werden. Aus

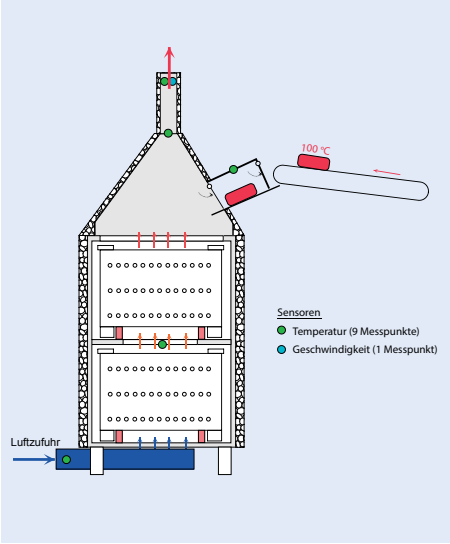


Bild 1: Aufbau des Demonstrators „Transportbehälter“.

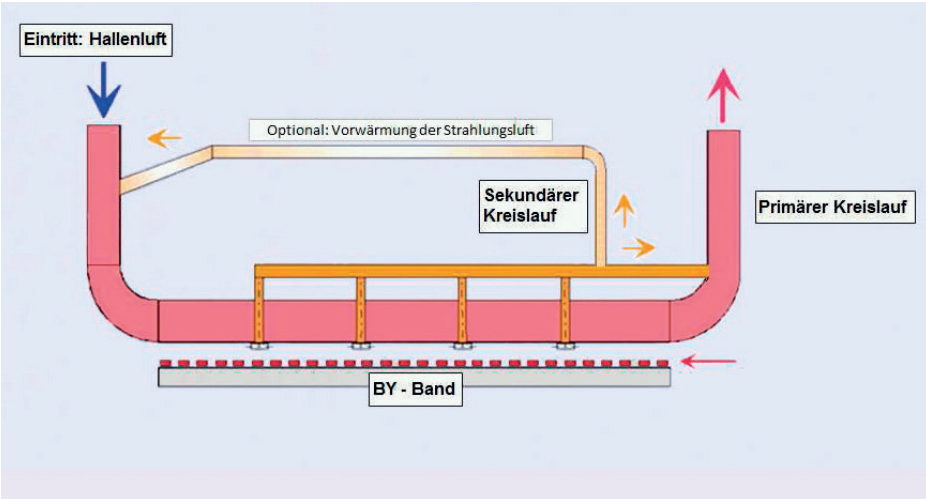


Bild 2: Aufbau des Demonstrators „BY-Band“.

diesem Grund wurde der Demonstrator mit zwei Luftkreisläufen ausgestattet. Der primäre Kreislauf dient der Weiterleitung des Hauptenergiestroms (Strahlung und Konvektion). Durch den sekundären Kreislauf wird die Heißluft zwischen BY-Band und Demonstrator abgesaugt (Bild 3), um eine Überhitzung zu verhindern. Diese Luft kann wahlweise direkt abgeführt oder aber dem Primärkreislauf auf der Lufteinlassseite zugeführt werden. Beide Kreisläufe sind mit Ventilatoren zum Lufttransport ausgestattet.

Der Demonstrator wurde in der Serienproduktion an einem BY-Abkühlband eingesetzt. Über einen Zeitraum von zehn Produktionsschichten wurde die abgeführte Wärmemenge gemessen.

Durch den Demonstrator können bis zu 70 Prozent der Abwärme des Abkühlbands gesammelt und weitergeleitet werden. Die Ablufttemperatur beträgt in diesem Fall 80 bis 90 °C.

Bild 3: Absaugvorrichtung der Abwärme.

Um in einem weiteren Ansatz (Versuch) die Abwärmeleistung einer bestehenden Wärmebehandlungsanlage zu erfassen, wurden Temperatur- und Geschwindigkeitssensoren installiert (Bild 4).

Der betrachtete Prozessablauf sieht vor, dass das zu erwärmende Material zuerst in einem Hochtemperaturofen auf 900 °C erwärmt wird, anschließend in einer Isothermkammer mittels Luft auf 600 °C abgeschreckt und dann durch einen Niedertemperaturofen bei 600 °C zur Entnahmestelle transportiert wird. Die zum Abkühlen verwendete Luft wird durch den Kamin der Isothermkammer abgeführt, während die Abgase des gasbeheizten Ofens durch den Abgaskamin ins Freie gelangen. Die abgeführten Wärmemengen wurden an beiden Schornsteinen (Abluft Isothermkammer und Abgaskamin) über einen Zeitraum von je 16 Stunden gemessen. Die Messwerte weisen auf Grund der gesamten Ablaufsteuerung einen zyklischen Verlauf auf. Eine Zusammenfassung der Messergebnisse und der Wärmeleistung ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Isothermkammer liefert bei einem Zeitanteil von 55 Prozent eine Wärmeleistung von zirka 136 kW bei einer mittleren Ablufttemperatur von 146 °C. Die Wärmeleistung des Abgaskamins beträgt zwischen 50 und 120 kW bei relativ niedrigen Abgastemperaturen von zirka 50 bis 75 °C.

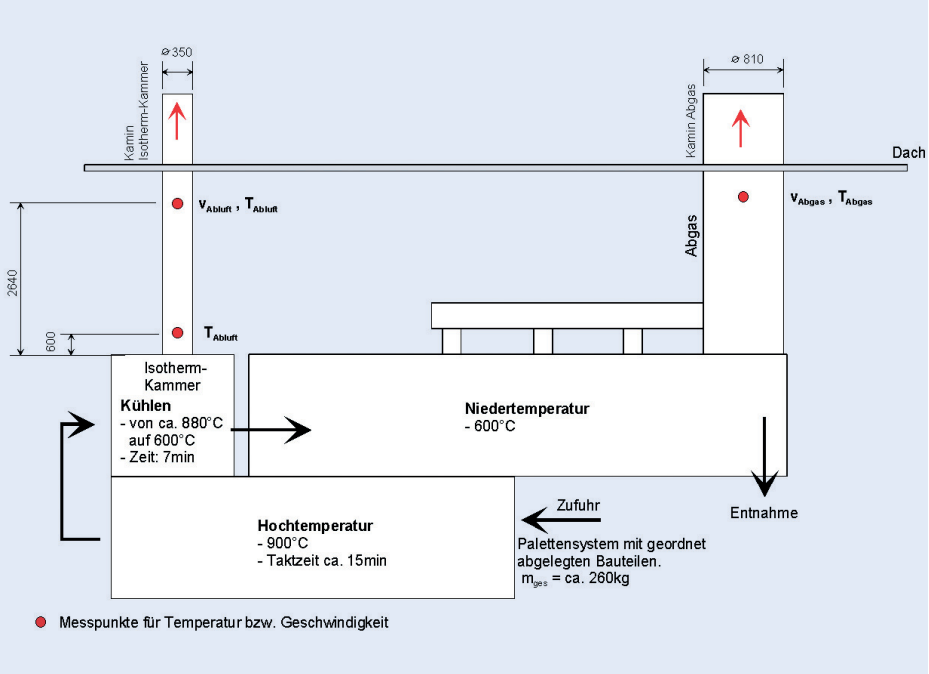


Bild 4: Position der Messsensoren an der Wärmebehandlungsanlage.

P [kW]	T [°C]	v [m/s]	t [s]	Zeitanteil [%]	Bemerkung
136	146	14,2	456	55	Abluft Isotherm-Kammer
33	109	4,6	39	5	Abluft Isotherm-Kammer
15	112	2,0	337	41	Abluft Isotherm-Kammer
111	61	6,7	171	21	Abgas
52	72	2,4	648	79	Abgas

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messergebnisse der Wärmebehandlungsanlage.

Möglichkeiten und Grenzen bei der Erzeugung elektrischer Energie aus der Prozesswärme

Eine Möglichkeit der Abwärmenutzung stellt die Umwandlung in elektrischen Strom dar. Hierzu wurden Marktanalysen und technisch/wirtschaftliche Bewertungen zu den Energieumwandlern

- Stirling-Motor und
- ORC-Anlage

durchgeführt.

Die Analysen ergaben, dass keines der heute käuflichen Systeme unter den vorhandenen Bedingungen (Abwärmenutzung in der Massivumformung) derzeit technisch/wirtschaftlich betrieben werden kann.

Die am Markt verfügbaren Stirlingmotoren sind sowohl aufgrund der hohen Anschaffungskosten als auch aus technischer Sicht nicht einsetzbar, da entweder die Leistung deutlich zu gering ist oder aber die notwendige Eingangstemperatur nicht bereitgestellt werden kann. Bei ORC-Anlagen sprechen derzeit hauptsächlich hohe Anschaffungskosten gegen deren Einsatz in der Massivumformung. Des Weiteren sind solche Systeme für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt, der im Umformprozess nicht gewährleistet werden kann. Für das Projekt ENERMASS bedeutete dies, dass der geplante Einsatz der oben genannten Systeme in diesem Projekt nicht durchgeführt wurde.

Eine Recherche zur alternativen Nutzung der Abwärme ergab, dass Systeme verfügbar sind, mit denen Abwärme gespeichert, transportiert und an einem beliebigen Ort wieder genutzt werden kann. Solche Systeme sind

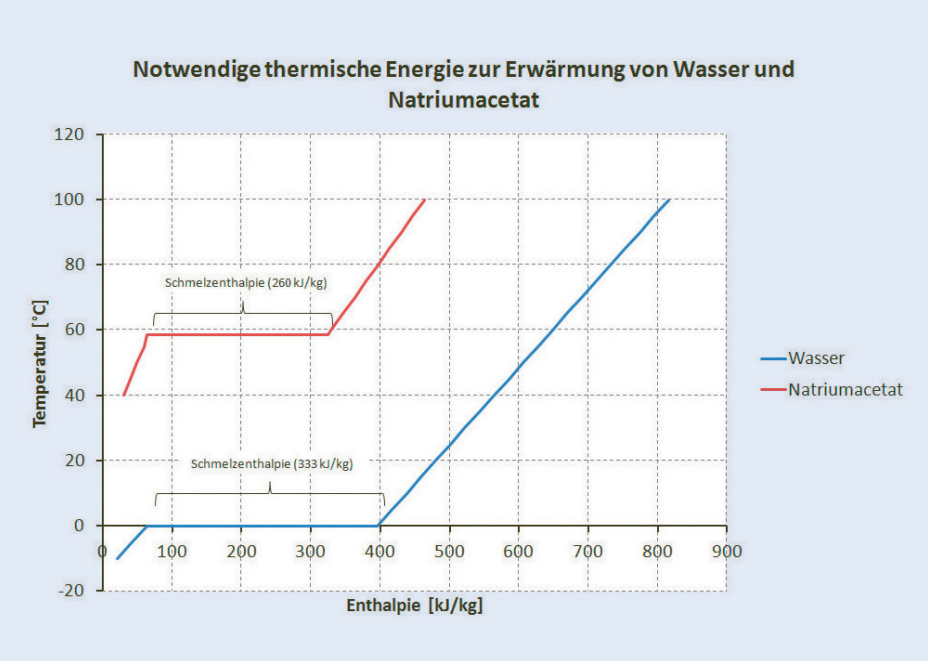


Bild 5: Enthalpie Natriumacetat – Wasser.

unter dem Begriff mobile Latentwärmespeicher bekannt.

Einsatz von Latentwärmespeichern zur Nutzung der Prozesswärme

Wenn bei Zufuhr von thermischer Energie auf ein Medium kein Temperaturanstieg zu beobachten ist, dann wird von latenter Wärme gesprochen (typisches Beispiel hierfür ist das Schmelzen von Eis). Diesen Effekt machen sich Latentwärmespeicher zu Nutze. In solchen Speichern werden Speichermedien eingesetzt, deren Schmelzpunkt möglichst hoch liegt. In dem in diesem Projekt verwendeten Latentwärmespeicher kam Natriumacetat als Speichermedium zum Einsatz.

In Bild 5 ist die notwendige thermische Energie zur Erwärmung von Wasser und Natriumacetat in Abhängigkeit der Temperatur gegenübergestellt. Der entscheidende Vorteil von Natriumacetat gegenüber Wasser ist das höhere Temperaturniveau des Schmelzpunkts (58,5 °C). Wärme auf diesem Temperaturniveau ist zum Beispiel für die Gebäudeheizung gut einsetzbar. Dieses Konzept wurde innerhalb des Projekts getestet und bewertet. Bild 6 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau.

Als Wärmequelle kam die Isothermkammer der bereits beschriebenen Wärmebehandlungsanlage zum Einsatz. Hierzu wurde in den Kamin der Isothermkammer ein Luft/Wasser Wärmetauscher integriert (Bild 7). Dieser wurde mit einer Andockstation für den mobilen Latentwärmespeicher außerhalb der Produktionshalle mit einer isolierten Verrohrung verbunden. Zur Erfassung der Wärmeströme wurde eine geeignete Sensorik installiert (Bild 8). Der mobile Latentwärmespeicher wurde inklusive Trailer für die Dauer der Untersuchung von der LaTherm GmbH in Dortmund gemietet.

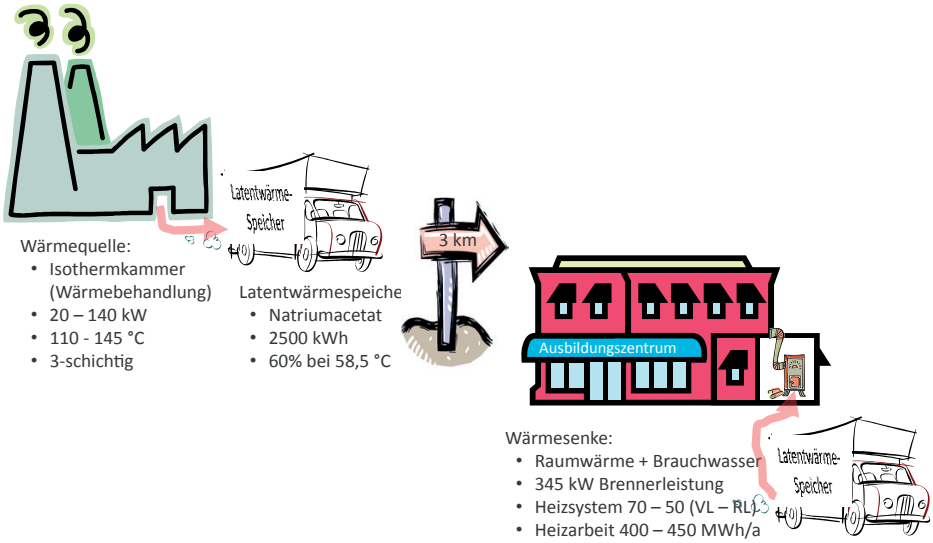


Bild 6: Konzeption „Einsatz eines Latentwärmespeichers“.

Bild 7: Wärmetauscher über der Isothermkammer mit Umgehungsleitung.

Bild 9: Umgebaute Heizungsanlage.

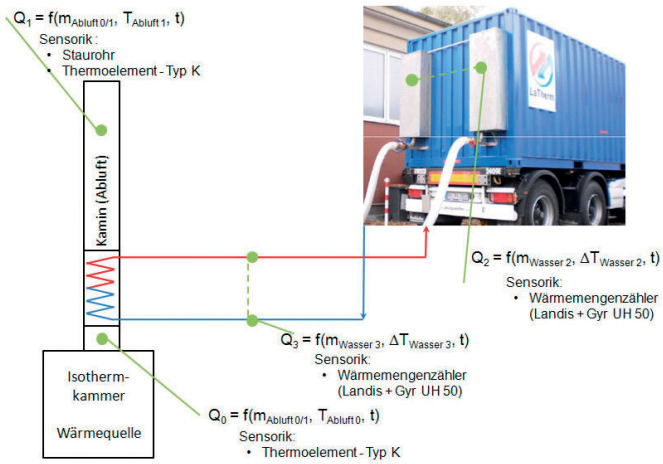


Bild 8: Messanordnung an der Wärmequelle.

Umfang der Untersuchung	
Zeitraum	15.12.2011 bis 23.3.2012
Anzahl Ladevorgänge	14
Anzahl Entladevorgänge	14
Gesamte Ladezeit	784 h
Gesamte Entladezeit	476 h
Lademenge	580 bis 2020 kWh
Entlademenge	970 bis 2100 kWh
Mittlere Ladeleistung	26 kW
Mittlere Entladeleistung	39 kW

Tabelle 2: Eckdaten des Untersuchungszeitraums.

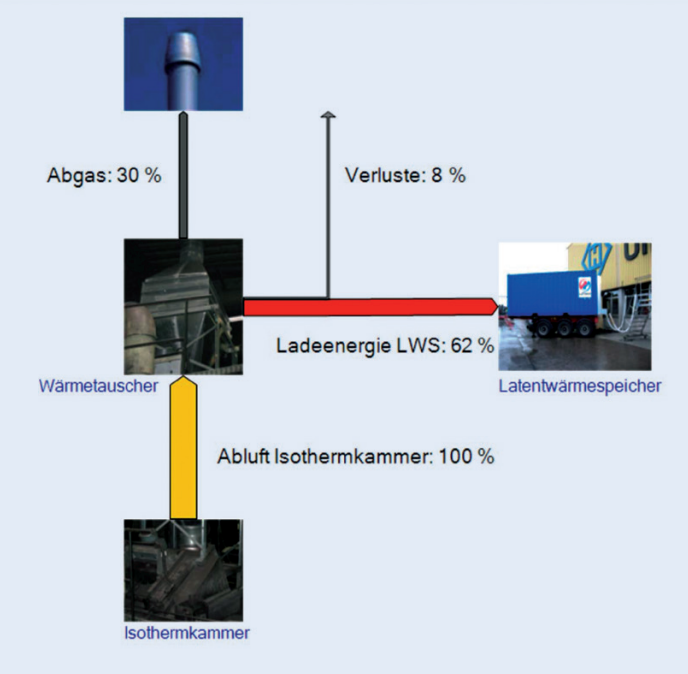


Bild 10: Energiefluss beim Ladevorgang des Latentwärmespeichers.

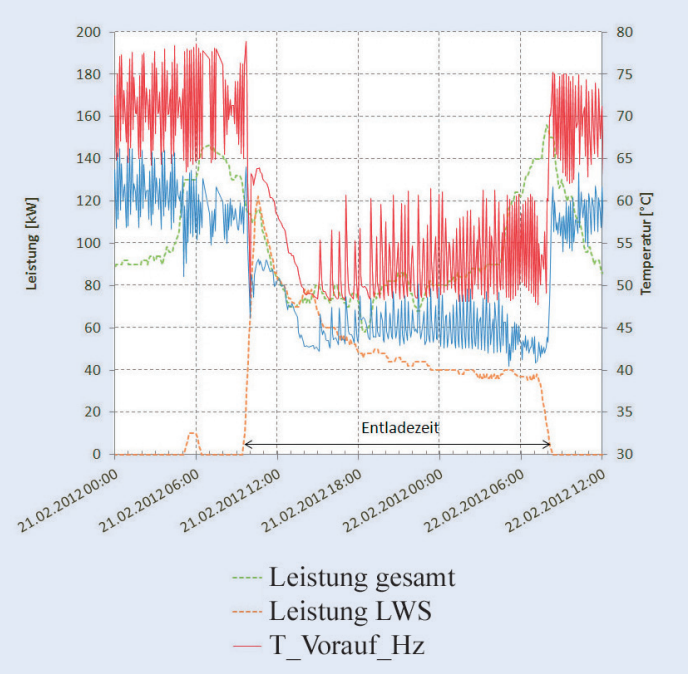


Bild 11: Entladevorgang des Latentwärmespeichers (LWS) bei Frost.

Um die im Latentwärmespeicher gespeicherte Energie wieder abführen zu können, ist das Heizungssystem des in 3 km Entfernung befindlichen Ausbildungszentrums umgebaut worden. Neben einem Wärmetauscher, der das Heizungssystem mit dem Latentwärmespeicher verbindet, wurden zwei elektronisch geregelte Heizungspumpen installiert (Bild 9). Um eine sichere Entladung zu gewährleisten, ist der gesamte Umbau in die Steuerung der Gebäudeleittechnik integriert worden. Das betrachtete Heizsystem ist für 70 °C Vorlauftemperatur und 50 °C Rücklauftemperatur ausgelegt. Wie bei der Wärmequelle wurden auch hier Sensoren zur Erfassung der Energieströme installiert.

In dem etwa vier Wintermonate dauernden Praxistest wurde festgestellt, dass der Wärmetauscher an der Isothermkammer einen Wirkungsgrad von etwa 70 Prozent aufweist. Im Untersuchungszeitraum wurden insgesamt je 14 Lade- und Entladevorgänge erfasst und ausgewertet (Tabelle 2). Die mittlere Ladeleistung der untersuchten Ladevorgänge betrug 26 kW, die mittlere Ladezeit lag bei 56 Stunden (Bild 10). Beim Entladevorgang zur Unterstützung der Heizungsanlage spielt die Außentemperatur eine entscheidende Rolle. In Bild 11 ist ein Entladevorgang bei einer mittleren Außentemperatur von -4,8 °C dargestellt. Die abgegebene Leistung des Latentwärmespeichers ist geringer als die benötigte Gesamtleistung. Wie Bild 12 zeigt, können bei diesen niedrigen Außentemperaturen nur etwa 55 Prozent der benötigten Nutzwärme durch den Latentwärmespeicher zur Verfügung gestellt werden. Die restliche Wärmeenergie muss von der Heizungsanlage bereitgestellt werden. Bei steigender Außentemperatur wird der Anteil der Nutzwärme, die durch den Latentwärmespeicher bereitgestellt werden

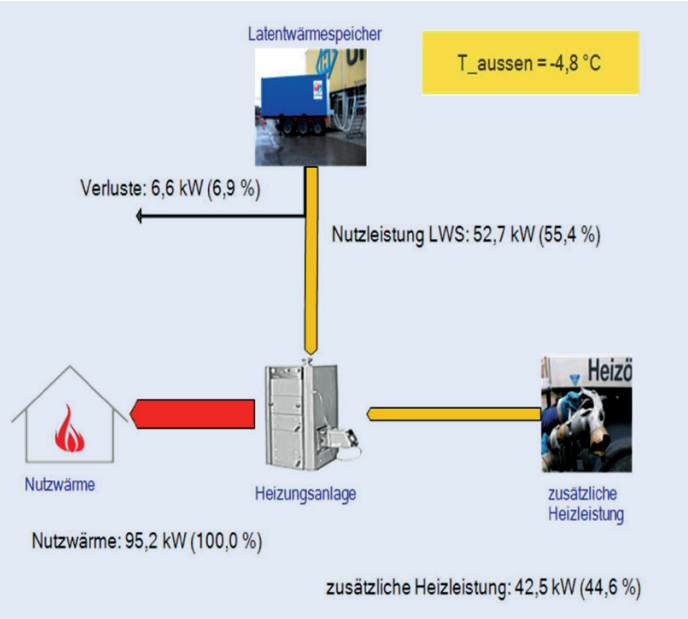


Bild 12: Leistung/Energiefluss eines Entladevorgangs bei Frost.

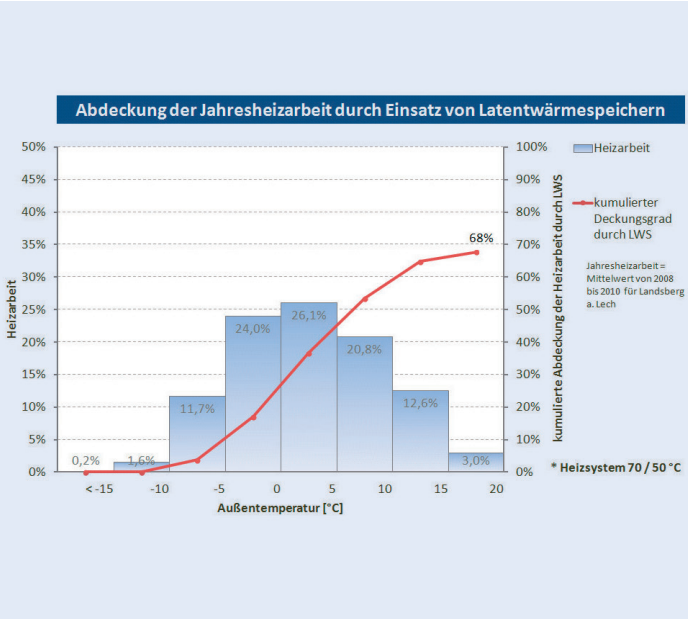


Bild 13: Gesamtabdeckungsgrad der Jahresheizarbeit durch einen Latentwärmespeicher.

Bilder: Autoren

kann, größer. So kann beispielsweise bei zirka +5 °C Außentemperatur mehr als 90 Prozent der Nutzwärme durch den Latentwärmespeicher zur Verfügung gestellt werden. Unter Berücksichtigung der Außentemperaturverteilung des gewählten Standorts konnte ermittelt werden, dass zirka 68 Prozent der Jahresheizarbeit durch den mobilen Latentwärmespeicher abgedeckt werden kann (Bild 13).

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, bei der eine mittlere Rendite von mindestens 10 Prozent über die angenommene Nutzungsdauer von 20 Jahren unterstellt wurde, führt zu folgenden Anforderungen an ein Gesamtkonzept:

- Es werden mindestens zwei Latentwärmespeicher benötigt (gleichzeitiges Laden und Entladen).
- Die Wärmesenke muss einen Gesamtwärmebedarf von mindestens 770.000 kWh pro Jahr aufweisen.
- Die Wärmequelle muss mindestens 110 kW Ladeleistung zur Verfügung stellen.
- Durch Optimierungen müssen die im Testbetrieb angefallenen Kosten um 20 Prozent reduziert werden.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen an unterschiedlichen Demonstratoren (Fertigteilbehälter, BY-Band und Wärmebehandlungsanlage) zur Bündelung der Prozesswärme in Warmmassivumformbetrieben haben gezeigt, dass die erfasste Abwärme Temperaturen zwischen 80 °C und 300 °C erreichen kann. Die Wirkungsgrade der Demonstratoren lagen hierbei zwischen 55 bis 70 Prozent.

Die geplante Umwandlung der gebündelten Abwärme in elektrische Energie scheiterte an den technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen heute verfügbarer Stirlingmotoren beziehungsweise ORC-Anlagen sowie an den derzeitigen Preisen für Industriestrom.

Die mehrmonatige Testphase mit einem mobilen Latentwärmespeicher hat gezeigt, dass unter der Voraussetzung einer ausreichenden Ladeleistung, einem hinreichend großen Wärmebedarf, einer ausreichenden Speicherkapazität und optimierten Kosten eine wirtschaftliche Nutzung der vorhandenen Abwärme möglich ist. ■

Werner Dacher

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz

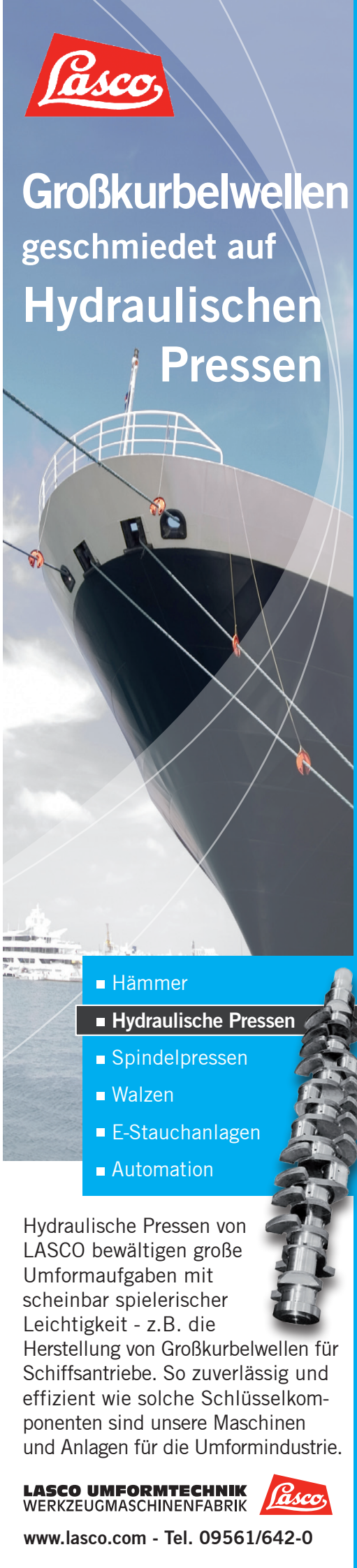
Dipl.-Ing. Harald Hermanns

Dipl.-Ing. Rainer Labs

Dipl.-Ing. Joachim Höh

Dirk Rother

Die beteiligten Projektpartner am Gesamtprojekt ENERMASS waren:

- CDP Bharat Forge GmbH,
- Hirschvogel Umformtechnik GmbH,
- Industrieverband Massivumformung e. V. (Projektkoordination),
- 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“ unter dem Förderkennzeichen 02 PO 2000 gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.