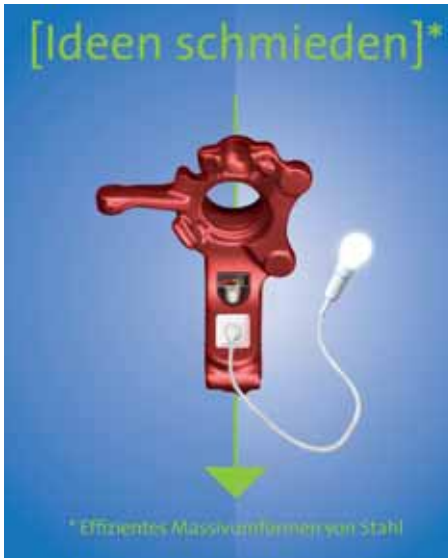


Cross-sectoral projects for reducing energy and material consumption in the forging processes.

Energy Potentials in Hot and Cold Forging

The objectives cost reduction, competitiveness, conservation of resources and climate protection must be seen in one context in the future. To this end, it is necessary to scrutinise each sector in which resources are consumed with the aim of discovering

reduction potentials. Both the metal working industry as well as the forging branch are characterised by high consumption of materials and energy. The Industrieverband Massivumformung e. V. (German Industry Association of Forging), the Labor für Massivumformung (LFM-Laboratory for forging) and several companies have concentrated their efforts on the topics energy and materials reduction in three sponsored projects in order to determine and exploit the potentials for hot forging.



Quelle: Effizienzfabrik – Innovationsplattform „Ressourceneffizienz in der Produktion“.

Die Branche Massivumformung mit ihren ca. 120 meist mittelständischen Unternehmen (schwerpunktmäßig massivumgeformte Stückgüter für die Automotive-Industrie) verarbeitet jährlich die im Folgenden dargestellten Stahlmengen und benötigt für die Prozesswärme die angegebenen Energiemengen (Tabelle 1).

Diese riesigen Energiemengen werden nur in sehr geringem Umfang einer weiteren Nutzung zugeführt, sie werden schlichtweg in die Umgebung abgeführt. Die bei der Stromerzeugung für die benötigte Erwärmungsenergie freigesetzte CO₂-Menge ist in Tabelle 2 dargestellt.

Aus wirtschaftlicher, energetischer- und umweltpolitischer Sicht ist die geschilderte Situation nicht akzeptabel. Das Thema einer maßgeblichen Nutzung der Prozessabwärme ist für die Branche Massivumformung von nachhaltiger Bedeutung. Derzeit ist kein System verfügbar, mit dem industrielle Abwärme, wie sie in der Massivumformindustrie entsteht, prozesssicher und wirtschaftlich in mechanische- oder elektrische Energie umgewandelt werden kann. Auch eine effiziente Rückführung der Prozesswärme in den Prozess ist nicht gelöst. Weiterhin zeichnen sich die oben genannten Prozesse der Massivumformung verfahrensbedingt durch einen hohen Materialüberschuss aus, was bedingt durch den hohen Energieanteil für die Stahlerzeugung zu weiteren Energieverlusten führt.

Ziel des Projekts ist es, den Primärenergiebedarf und die CO₂-Emission bei der Herstellung von Umformteilen zu senken. Der Projektansatz sieht vor, dass die gesamte Energie-

Querschnittsprojekte zur Energie- und Materialreduzierung bei Massivumformprozessen

Energiepotenziale in der Massivumformung

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz,
Dipl.-Ing. Rainer Labs und
Dr.-Ing. Markus Langejürgen, Iserlohn

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 metallverarbeitende Industrie, so auch die Branche Massivumformen. Der Industrieverband Massivumformung e. V., das Labor für Massivumformung (LFM) und mehrere Firmen greifen in drei geförderten Projekten die Themen Energie- und Materialreduzierung gezielt auf, um dadurch die Potenziale für die Warmmassivumformung zu erarbeiten und zu nutzen.

bilanz von der Stahlerzeugung bis zum fertigen Schmiedeteil berücksichtigt wird.

Zur Lösung der geschilderten Situation sind die folgenden Schritte vorgesehen:

1. Materialreduzierung
2. Steigerung der Energieeffizienz durch
 - A. Nutzung der Prozesswärme zur Erzeugung elektrischer Energie
 - B. Reduzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung
 - C. Rückführung und Nutzung der erheblichen Energiemengen aus der Prozesswärme in den Produktionsprozess (Bild 1).

1. Materialeffizienz

Massivumformverfahren arbeiten heute verfahrensbedingt mit bis zu 40 Prozent Materialüberschuss. Das bedeutet, dass erhebliche Ma-

terial- und Energieressourcen bei der Stahlerzeugung und -weiterverarbeitung aufgewendet werden müssen, die über die ganze Prozesskette wieder verloren gehen.

Im Rahmen dieses Projektteils geht es darum, einen bestmöglichen Materialwirkungsgrad bei Massivumformverfahren zu erreichen (Primärziel). Weiterhin sollen durch die systematische Untersuchung Anforderungen für Funktionen abgeleitet werden, die dann in neue Umformmaschinen und deren Steuerungen integriert werden können (Sekundärziel).

Der Materialüberschuss ist im Wesentlichen von den folgenden vier Parametern abhängig:

- Der Bauteilgeometrie (geometrische Komplexität)
- Den Umformverfahren und deren Verkettung

- Der Werkzeugtechnologie
- Der verwendeten Halbzeuggeometrie.

Zu klären, wie diese Parameter bezüglich der Materialökonomie zusammenhängen, ist Gegenstand dieses Teilprojekts. Die Bearbeitung erfolgt auf Basis eines repräsentativen Teilspektrums und schwerpunktmäßig unter Anwendung von Stoffflussimulationen mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM).

Das Teilprojekt „Konstruktions- und Verfahrensoptimierung mit Versuchsplantechnik“ dient ebenfalls der Entwicklung und Erprobung sowie Bewertung von Maßnahmen, um den Materialeinsatz für die Massivumformung zu reduzieren. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Ansatz wird hier im Wesentlichen auf betriebliche Bauteil- und Prozessdaten zurückgegriffen, mit dem Ziel, hierüber optimale Prozesswege zu identifizieren.

Bei dem Thema „Vergüten aus der Schmiedewärme“ soll ein Wärmebehandlungsprozess hinsichtlich Energieeinsatz und Erreichung mechanischer Eigenschaften optimiert werden. Eine Erhöhung der mechanischen Eigenschaften hat indirekt eine Materialeinsparung zur Folge, da Bauteile bei gleicher Belastung filigraner konstruiert werden können.

Im Teilprojekt „Aufmaßreduzierung“ stehen Produkte und Prozesse im Vordergrund, wo das Vorformverfahren Reckwalzen zum Einsatz kommt. Für dieses Vorformverfahren sollen Lösungen erarbeitet werden, mit denen das Materialaufmaß reduziert werden kann.

2. Steigerung der Energieeffizienz

Das Teilprojekt „Energieeffizienz“ dient der Entwicklung und Erprobung sowie Bewertung von Maßnahmen, um die Energie zur Erzeugung der Prozesswärme zu reduzieren bzw. diese für den Prozess wieder zu nutzen. Im Einzelnen:

A. Nutzung der Prozesswärme zur Erzeugung elektrischer Energie.

Hier werden theoretische Hintergründe aufgearbeitet, sowie Vorgehensweisen/-Grundlagen für die anschließende betriebliche Umsetzungsphase ausgearbeitet. Die einzelnen Bearbeitungsphasen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Entwicklung und Bewertung eines Konzepts zur „Energiebündelung“
- Entwicklung und Bewertung eines Konzepts zur „Energieleitung“
- Entwicklung einer Messstrategie zur Bewertung von „Energiebündelung und -leitung“
- Konzeptauswahl zur Energieumwandlung von Prozesswärme in elektrische Energie
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Auf Grundlage dieser theoretischen Betrachtungen sollen Demonstratoren gebaut, getestet und bewertet werden. Die Ergebnisse werden in Form von Leitfäden dokumentiert (was kann erreicht werden, was muss dafür getan werden, wie muss es getan werden?).

B. Reduzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung.

Eine Vorstudie hat gezeigt, dass die heute weitgehend eingesetzten Induktionserwärmer mit einem Gesamtwirkungsgrad von < 60 Prozent arbeiten. Weiterhin hat diese Vorstudie ergeben, dass es neuartige Erwärmer auf Basis von Supraleitern (HTS) gibt, die mit einem Wirkungsgrad von > 80 Prozent arbeiten. Diese HTS-Erwärmer werden bisher ausschließlich für die Erwärmung von Buntmetallen (also nicht ferromagnetischen Metallen) eingesetzt.

Die hier geplanten Arbeiten sollen auf der bestehenden HTS-Technologie aufsetzen und das Anwendbarkeitsspektrum für den Bereich (ferromagnetische) Schmiedeteile evaluieren bzw. erweitern. Die einzelnen Bearbeitungsphasen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Bestehende HTS-Anlage evaluieren
- Pflichtenheft erstellen
- Umsetzungskonzept erarbeiten
- Handlings- und Produktionskonzept erarbeiten
- Wirtschaftlichkeitsbewertung.

Durch FEM-Analysen und gegebenenfalls Messungen an vorhandenen HTS-Anlagen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Kann Stahl mit einer HTS Anlage auf Schmiedetemperatur erwärmt werden?
- Genügen die erwärmten Stahlteile den schmiedetechnischen Anforderungen (zum Beispiel Temperatursteuerung, Verzunderung, Taktzeit, Durchwärmung etc.)?
- Welche Voraussetzungen müssen hierbei eingehalten werden (zum Beispiel Materialquerschnitt, Materialabmessungen)?
- Welchen energetischen Vorteil hat eine

Deutschland	
Schmiedetonnage ¹⁾	2.340.000 to/a
Erwärmungsenergie ²⁾	1.248 GWh/a
Erwärmungskosten ³⁾	125 Mio €/a

1) IMU Produktionsstatistik 2007, Gesenkschmiedeteile, Freiformschmiedestücke und Rohrleitungsformstücke aus Stahl
 2) bei 400 kWh/to; Gratanteil 25 %
 3) bei 10 Cent/kWh

Tabelle 1: Energiebedarf für Prozesswärme.

CO ₂ -Emission auf Grund der benötigten Erwärmungsenergie	
CO ₂ -Emission	743.808 to CO ₂ /Jahr

(Es wird unterstellt, dass die benötigte Erwärmungsenergie zu 100 % durch Strom bereitgestellt wird. CO₂-Emission = 596 g/kWh, deutscher Strommix 2006, Quelle: Umweltbundesamt)

Tabelle 2: CO₂-Emission.

HTS-Anlage gegenüber einer konventionellen induktiven Erwärmungsanlage bei der Erwärmung von Stahl?

- Welche Erwärmungskosten fallen bei einer HTS-Anlage bzw. bei einer konventionellen induktiven Erwärmungsanlage pro Kilogramm Stahl an?
- Gesamtwirtschaftlichkeit auf Basis von Stückkosten ermitteln.

In einem weiteren Ansatz soll die heutige Induktionserwärmer-Technologie optimiert werden.

In einem zweiten Projektteil geht es darum, den Energiewirkungsgrad von Induktionserwärmern im Rahmen einer engen Kooperation zwischen einem Hersteller und einem Produktionsunternehmen zu verbessern. Mit den Arbeiten werden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt:

- Reduzierung der eingesetzten Erwärmungsenergie sowie eine
- Energierückführung in den Prozess.

Bei der Schmiedeerwärmung tritt neben der zur Erwärmung führenden Energie ein prozessabhängiger Anteil von Energie auf, der in den meisten Fällen bislang ungenutzt blieb. Eine Übersicht der Wirkungsgrade zeigt Bild 2 für eine typische



Bild 1: Gesamtprojektstruktur.

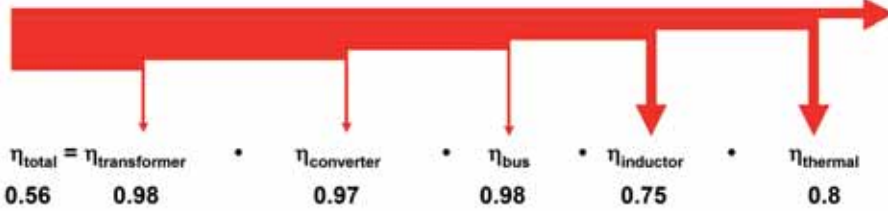


Bild 2: Gesamtwirkungsgrad eines Induktionserwärmers.

Schmiedeerwärmungsanlage. Es ist zu sehen, dass der elektrische Wirkungsgrad $\eta_{inductor}$ und der thermische Wirkungsgrad $\eta_{thermal}$ der Induktionsspule das größte Potenzial bietet.

Der erste Teil der Anstrengungen konzentriert sich daher im Rahmen des Projekts darauf diesen Anteil zu reduzieren und somit den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern. Hierbei unterteilen sich die Maßnahmen auf das rein thermische Verhalten und somit die Verringerung der Verluste durch die Wärmeabgabe des Werkstücks über das Induktorgehäuse. Mögliche Einflussparameter sind hierbei die Auswahl und die Dimensionierung des Auskleidungsmaterials der Induktoren und der Zwischenräume.

Ein weiterer Punkt betrifft den optimalen Transport der elektrischen Energie in das Werkstück und die Umwandlung in Wärme



Bild 3: Induktionserwärmer mit erhöhter Rücklauftemperatur. Bilder: Autoren

eingesetzt, eine Verifizierung erfolgt anhand eines Versuchsstands beim Pilotanwender.

Die aus dem Versorgungsnetz bezogene elektrische Energie wird über Transformatoren $\eta_{transformer}$ und Schwingkreisumrichter $\eta_{converter}$ von der Netzspannung und der Netzfrequenz von üblicherweise 50 Hz auf prozessspezifische Frequenzen und Spannungen umgewandelt und über Stromschienen oder Kabel η_{bus} zum Induktor geleitet. Die Frequenzumwandlung erfordert eine große Anzahl von Schaltvorgängen, die in der Regel durch Leistungshalbleiter auf Siliziumbasis realisiert werden. Diese sind durch den geringen zulässigen Temperaturbereich und

die großen zu schaltenden Lasten intensiv auf einem niedrigen Temperaturniveau zu kühlen. Aktuelle Tendenzen zeigen, dass neue Entwicklungen auf Basis von SiC-Halbleitern bei geringeren Verlusten mit höheren Temperaturen betrieben werden können. Dies verbessert einerseits den elektrischen Wirkungsgrad des Umrichters $\eta_{converter}$, erleichtert aber auch durch ein höheres Temperaturniveau die Nutzung der unvermeidlichen Restenergie, die im Folgenden vorgestellt wird.

Die Nutzung von thermischer Energie auf niedrigem Temperaturniveau ist teilweise sehr aufwendig und ein Ausgleich stark schwankender Energiemengen ist meist nur mit großen Energiespeichern möglich. Durch geänderte Halbleitertechnologie erhöht sich durch die bereits erwähnte höhere

direkt im Werkstück. Hierzu muss die elektromagnetische Kopplung von Induktor und Werkstück näher untersucht werden, da dies die physikalische Grundlage eines guten elektrischen Wirkungsgrades bildet. Mögliche Parameter sind hier das Spulendesign und die Betriebsfrequenz. Hierbei gilt es einen energetisch gelungenen Kompromiss aus elektrischem Wirkungsgrad und Flexibilität der Erwärmungsanlage zu finden. Zur Optimierung der Erwärmungsanlage wird die Methode der Finiten Elemente



Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz



Dipl.-Ing. Rainer Labs



Dr.-Ing. Markus Langejürgen

zulässige Betriebstemperatur die Rücklauftemperatur der Umrichter Kühlung und eine Nutzung wird hierdurch prinzipiell vereinfacht.

Eine Speicherung der Energie kann umgangen werden, falls die Energie unmittelbar dem Prozess erneut zugeführt werden kann. Es soll im Rahmen dieses Projekts die Integration einer Vorwärmung aus der gespeicherten Energie der gefertigten Teile auf Machbarkeit geprüft werden. Hierzu wird ein Induktionserwärmer, wie er im Bild 3 gezeigt ist, mit höherer Rücklauftemperatur konzipiert und im Rahmen eines Versuchsaufbaus erprobt werden.

Es darf dabei nicht außer acht gelassen werden, dass eine erhöhte Betriebstemperatur der Induktionsspule die Leitungsverluste erhöht, da der spezifische elektrische Widerstand von Kupfer ebenfalls mit der Temperatur steigt. Hier erfolgt ein detaillierter Kosten-Nutzen-Vergleich. Anhand der gewonnenen Messdaten erfolgt eine detaillierte Bewertung der umgesetzten Maßnahme.

C. Rückführung und Nutzung der erheblichen Energiemengen aus der Prozesswärme in den Produktionsprozess.

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes werden Konzepte und Maßnahmen entwickelt, erprobt und bewertet, um die Prozessenergie dem zu erwärmenden Vormaterial teilweise wieder zuzuführen. Als Lösungsweg ist geplant, ein neues Materialflusskonzept zu entwickeln, was den Energieaustausch prinzipiell ermöglicht. Die einzelnen Bearbeitungsphasen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Entwicklung, Erprobung und Bewertung eines Konzepts zur Übertragung „gebündelter“ Energie auf das Vormaterial
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
- Dokumentation.

Für die Erprobung wird ein Demonstrator zur Energierückführung auf das Vormaterial erstellt und getestet. Die Anforderungen an eine nachfolgende Erwärmung bis auf Endtemperatur werden in Form eines Pflichtenhefts beschrieben.

Die beteiligten Projektpartner:

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

Die Projekte werden gefördert mit finanzieller Unterstützung durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und Europäischer Fonds für regionale Entwicklung NRW (EFRE).