

## Material Efficiency in Forging Technology

The subject of resource efficiency plays an ever increasing role in the social and political agenda. It can be expected that raw material prices and energy costs will rise more clearly in the future and that CO<sub>2</sub> emission will be more regulated than before due to shortage of resources and further political objectives. Industries with a high energy and raw material demand will have to find ways to improve their processes regarding resource efficiency. The forging industry has initiated the process for resource efficient production and developed possible potential through initial company-spanning projects.

# Materialeffizienz in der Massivumformung

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz, Dipl.-Inf. Wolfgang Licht und Dipl.-Ing. Franz Fuss, Iserlohn

Das Thema Ressourceneffizienz nimmt auf der gesellschaftlichen und politischen Agenda einen immer höheren Stellenwert ein. Es ist davon auszugehen, dass Rohstoffkosten und Energiekosten durch Verknappung der Ressourcen und durch politische Zielvorgaben zukünftig deutlicher steigen werden als bisher schon und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter reglementiert wird. Branchen mit hohem Energie- und Rohstoffbedarf werden Wege finden müssen, ihre Prozesse bezüglich der Ressourceneffizienz zu verbessern. Die Branche Massivumformung hat den Prozess zur ressourceneffizienteren Produktion eingeleitet und über erste firmenübergreifende Projekte mögliche Potenziale herausgearbeitet.

### Einleitung

Die Themen „Umwelt-/Klimaschutz“ und „Verknappung der natürlichen Ressourcen“ stehen in Megatrendstudien zwischenzeitlich auf den ersten Rängen, zum Beispiel in einer Studie der Firma Bosch [1]. Das Thema Umwelt-/Klimaschutz hat in der öffentlichen Debatte zwischenzeitlich einen Stellenwert erreicht wie kaum ein anderes. Die Politik hat darauf mit Vorgaben bezüglich CO<sub>2</sub>-Reduzierung, Steigerung der erneuerbaren Energien und Verbesserung der Energieeffizienz reagiert. Das Thema „Verknappung der natürlichen Ressourcen“ findet seit geraumer Zeit seinen Niederschlag in steigenden Preisen für Rohstoffe und Energie.

Die Branche Massivumformung mit ihren zirka 100 meist mittelständischen Unternehmen verarbeitet für die Herstellung massivumgeformter Stückgüter große Mengen Material (vorwiegend Stahl). Für die Stahlerzeugung und dessen Weiterverarbeitung werden große Energiemengen benötigt. Bezogen auf den Primärenergiebedarf für die Herstellung von Mas-



Bild: Flükiger & Co AG

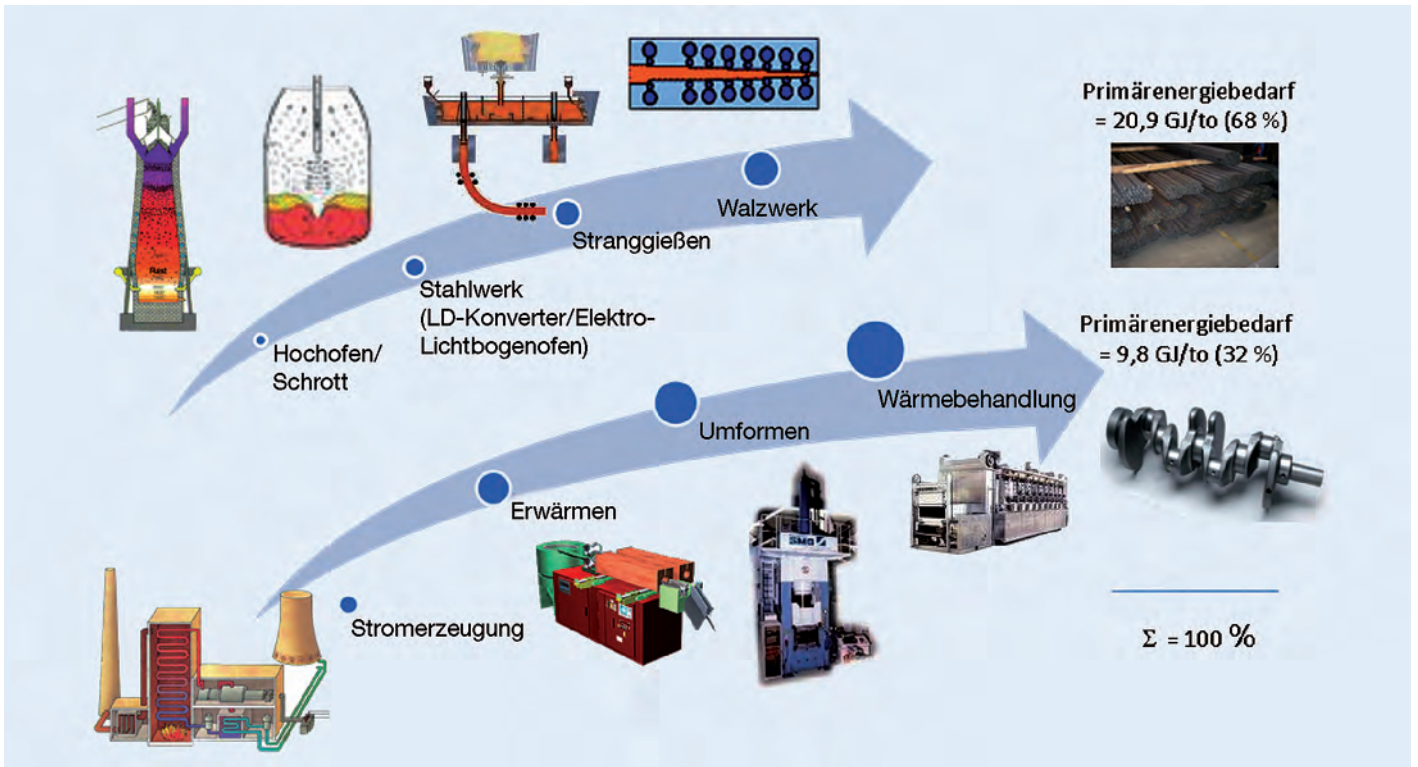


Bild 1: Energiebilanz für Massivumformteile.

sivumformbauteilen entfallen zirka zwei Drittel auf die Vormaterialerzeugung in den Stahlwerken und zirka ein Drittel auf die Weiterverarbeitung in den Unternehmen der (Warm-) Massivumformung (Bild 1).

Darüber hinaus zeichnen sich die Prozesse der Massivumformung teilweise durch einen hohen Materialüberschuss aus. Der Materialwirkungsgrad, als Verhältnis von Rohteilmasse zu Materialeinsatzmasse, liegt für ein untersuchtes repräsentatives Teilespektrum zwischen 0,38 für komplizierte Fassonteile und 1,00 für einzelne rotationssymmetrische Teile (Bild 2). Dieser Materialüberschuss wird mit erheblichen Energiemengen und CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Stahlwerk erzeugt und durch die Massivumformung weiterverarbeitet.

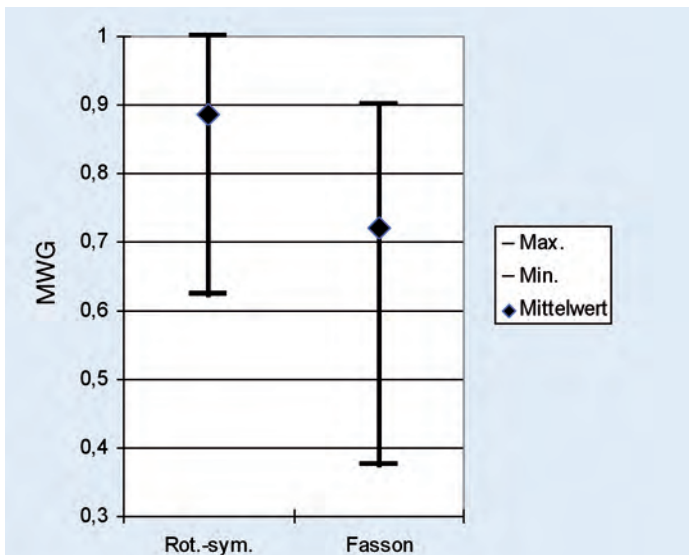


Bild 2: Materialwirkungsgrad in der Massivumformung für ein repräsentatives Teilespektrum.

Der Industrieverband Massivumformung e. V., das Labor für Massivumformung (LFM) und mehrere Firmen haben das Thema Materialreduzierung mit dem Ziel aufgegriffen, Potenziale für die Warmmassivumformung zu erarbeiten und zu nutzen. Die Materialreduzierung hat für die Reduzierung der Primärenergie und die CO<sub>2</sub>-Emission eine große Hebelwirkung, weil nicht verbrauchtes Material weder erzeugt noch im Umformbetrieb erwärmt werden muss. Für die Materialreduzierung wurden dabei zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt.

**Projektansatz 1: Optimale Prozesswege durch Produkt- und Verfahrensbenchmarking**

In dem Projekt „Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung“ wurden auf der Basis eines repräsentativen Teilespektrums verschiedene Umform-

verfahren und Werkzeugtechnologien in einem Benchmark verglichen. Auf dieser Grundlage wurden optimale Prozesswege, Verfahren und Werkzeugtechnologien identifiziert und damit die Potenziale für eine Reduzierung des Materialeinsatzes abgeschätzt (Bild 3).

Für die Untersuchungen wurde ein repräsentatives Teilespektrum mit 92 Artikeln von verschiedenen Firmen ausgewählt, bestehend aus 35 rotationssymmetrischen Teilen und 57 Fassonteilen. Das Bauteilspektrum umfasst Teile mit einem Fertigteilgewicht zwischen 0,08 kg bis 48 kg, einer Feingliedrigkeit zwischen 0,05 bis 0,83 und einem Materialwirkungsgrad zwischen 0,38 und 1,00. Aus den artikelspezifischen Daten und der laufenden Produktion wurden 48 Parameter erfasst, die folgenden Bereichen zugeordnet werden können:

- Artikeldaten / Fertigteil
- Halbzeug
- Bauteilgeometrie
- Stadienfolge / Umformstufen
- Umformverfahren
- Werkzeugkonzept
- Umformanlage
- Materialüberschuss.

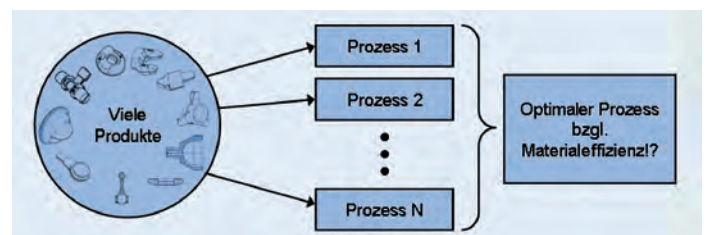


Bild 3: Projektansatz 1.

	Klasse	MWG (netto)		Nutzen		Verfahren Vorform										Verfahren Fertigform				
		Min.	Max.	Einfach	Mehrfach	Walzen		Stauchen			Fließpressen	Gesensschmieden				Gesensschmieden				
						REWA	GKW	Parallel	Formstauchen offen	Formstauchen geschlossen		Rückwärtsfließpressen	Offenes Gesenk	Gratbremse	Sperrkasten	Geschlossenes Gesenk	Offenes Gesenk	Gratbremse	Geschlossenes Gesenk	
<b>Rotationssymmetrische Teile</b>	RH 1 - S2	0,62	1,00	X				X								X			X	
	RH 2 - S1	0,87	0,87	X				X									X			
	RH 2 - S2	0,83	1,00	X				X								X			X	
	RH 3 - S2	0,75	1,00	X				X											X	
	RH 3 - S3	0,84	0,84	X				X					X					X		
	RH 4 - S1	0,87	0,87	X				X					X					X		
	RH 4 - S3	0,74	0,74	X				X							X			X		
	RH 5 - S3	0,84	1,00	X						X						X				X
	RH 6 - S1	1,00	1,00	X					X			X								X
	RH 7 - S3	0,77	1,00	X							X	(X)				(X)				X
<b>Fassenteile</b>	1-S2	0,61	0,83	X				X							X			X		
	1-S3	0,76	0,88	X						X					X				X	
	2-S2	0,69	0,90	X				X								X			X	
	2-S3	0,64	0,66	(X)	(X)			X										X		
	3-S2	0,51	0,81		X			X					X					X		
	3-S3	0,68	0,82		X	(X)	(X)	X					X					X		
	4-S2	0,56	0,70	X				X					X					X		
	4-S3	0,48	0,77	X		(X)	(X)						X					X		
	4-S4	0,38	0,83	X		(X)			X					X					X	
	Sonder	0,80	0,89						Spezielle Artikelgruppen (Baggerzähne, Kolben, ...)											

Bild 4: Identifikation optimaler Verfahrenswege.

	Branche in Deutschland	Theoretisches Einsparpotenzial (6,7 %)
Schmiedetonnage [to/a] <sup>(1)</sup>	2.340.000	
Einsatzmasse [to/a] <sup>(2)</sup>	3.120.000	209.040
Erwärmungsenergie [GWh/a] <sup>(3)</sup>	1.248	84
Primärenergie [GWh/a] <sup>(4)</sup>	26.704	1.789
CO <sub>2</sub> -Emission Stahlherstellung [to/a] <sup>(5)</sup>	4.196.400	281.159
CO <sub>2</sub> -Emission Erwärmung für Umformung [to/a] <sup>(6)</sup>	743.808	49.835
CO <sub>2</sub> -Emission gesamt [to/a] <sup>(7)</sup>	4.940.208	330.994

(1) IMU Produktionsstatistik 2007, Gesensschmiedeteile, Freiformschmiedestücke und Rohrleitungsformstücke aus Stahl

(2) bei 25 % Gratanteil

(3) bei 400 kWh/to

(4) Stahlherstellung (= Hochofen + Stahlwerk + Stranggießen + Walzwerk) + Umformung (= Erwärmen + Umformen + Wärmebehandlung)

(5) 1345 kg CO<sub>2</sub>/to Rohstahl; Quelle: Stahl Online

(6) Es wird unterstellt, dass die benötigte Erwärmungsenergie zu 100 % durch Strom bereitgestellt wird.

CO<sub>2</sub>-Emission: 596 g/kWh, deutscher Strommix 2006 (Quelle: Umweltbundesamt)

(7) Ohne Antriebsenergie der Umformmaschinen

Bild 5: Theoretisches Brancheneinsparpotenzial.

Um aus den erfassten Daten optimale Prozesswege identifizieren zu können, müssen vergleichbare Bauteile in Geometrieklassen zusammengefasst werden, weil sonst Bauteile und Prozesse miteinander verglichen werden, die nicht vergleichbar sind. Für die geometrische Klassifizierung der Teile wurde auf frühere Arbeiten [2] bis [6] aufgesetzt und in mehreren Schritten eine erweiterte Formenordnung, bestehend aus einer Kombination von Stoffflusskomplexität und Fein-

gliedrigkeit, entwickelt. Hiermit konnte eine recht gute Abbildungsqualität des repräsentativen Teilespektrums auf vergleichbare Geometrieklassen erreicht werden. Innerhalb dieser Geometrieklassen konnten nun optimale Prozesswege, Umformverfahren und Werkzeugkonzepte identifiziert werden. Dabei konnte festgestellt beziehungsweise bestätigt werden, dass es immer die Vorformstufen bezüglich Anzahl, Verfahren und Werkzeugkonzept sind, die zu einem optimalen Materialwirkungsgrad

Zur Abschätzung des Materialeinsparpotenzials wurde der relative Materialüberschuss (nur Gratanteil) des Klassenbesten auf das jeweilige Bauteil innerhalb derselben Geometrieklasse übertragen. Dabei konnten bei einzelnen Teilen eine Verbesserung der Materialeffizienz von 16 bis 38 Prozent bei den rotationssymmetrischen Teilen und 13 bis 30 Prozent bei den Fassonteilen identifiziert werden.

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Produktionsmengen liegt das theoretische Einsparpotenzial für das gesamte repräsentative Teilespektrum für rotationssymmetrische Bauteile bei 4,4 Prozent, für Fassonteile bei 7,8 Prozent der Einsatzmasse. Unter Berücksichtigung der jährlichen Produktionsmengenverteilung für rotationssymmetrische Teile beziehungsweise für Fassonteile lässt sich daraus ein gewichtetes theoretisches Einsparpotenzial von 6,7 Prozent über alle Bauteile des repräsentativen Teilespektrums ableiten.

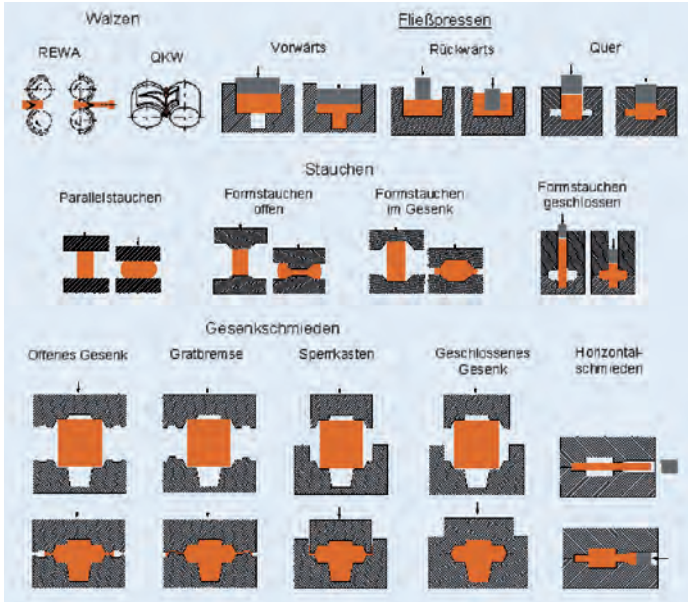


Bild 6: Verfahrenskatalog.

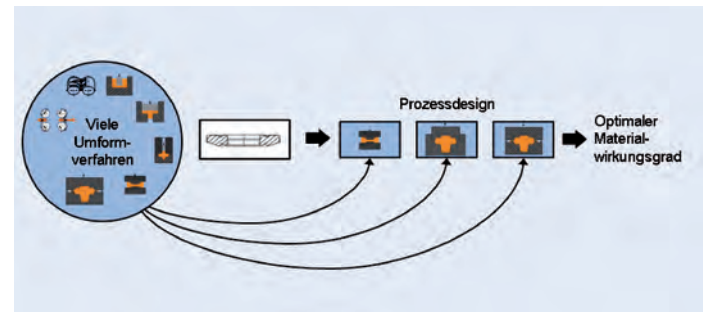


Bild 7: Projektansatz 2.

Alternative Verfahrens-Wege										
Formenklasse	Untergruppe	Verfahrens-Weg	Vor-material	Var-ante	Nutzen	Stadienfolge				Material-wirkungsgrad $\eta_{Ma}$ [%]
RH2-S1	Ringe/ Ringförmige Bauteile	1.1		Ist	1	1.1.1 Parallel-Stauchen	5.1 Gesenkschmieden offen	5.1 Gesenkschmieden offen	Abgraten, Lochen	$\eta_{Ist}$
		1.2		Soll 1	1	1.2.1 Formstauchen offen QF		5.1 Gesenkschmieden offen	Abgraten, Lochen	$\eta_{Soll} = \eta_{Ist} + 8\%-22\%$
		1.3		Soll 2	1	1.2.1 Formstauchen offen QF		5.4 Gesenkschmieden geschlossen	Lochen	$\eta_{Soll} = \eta_{Ist} + 8\%-28\%$
		1.4		Soll 3	1	1.1.1 Parallel-Stauchen	3.1.2 Rückwärts Fließpressen m. Gegenhalter	5.1 Gesenkschmieden offen	Abgraten, Lochen	$\eta_{Soll} = \eta_{Ist} + 8\%-22\%$
		1.5		Soll 4	1	1.1.1 Parallel-Stauchen	3.1.2 Rückwärts Fließpressen m. Gegenhalter	5.4 Gesenkschmieden geschlossen		$\eta_{Soll} = \eta_{Ist} + 8\%-28\%$

Bild 8: Beispiel für alternative Verfahrenswege.

Bilder: Autoren

Wesentlich interessanter ist jedoch, dass die relative Einsparung bezogen auf den ohnehin nur beeinflussbaren Materialüberschuss (Gratanteil) bei rotationsymmetrischen Teilen bei zirka 86 Prozent und bei Fassonteilen bei zirka 31 Prozent liegt.

Übertragen auf die gesamte Branche in Deutschland ergeben sich daraus die in Bild 5 dargestellten theoretischen Einsparpotenziale. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Verhältnis rotationsymmetrischer Teile/Fassonteile des repräsentativen Teilespektrums sich in ähnlicher Größenordnung in der Branchentonnage wiederfindet.

### Projektansatz 2: Optimale Prozesswege durch optimiertes Prozessdesign

In dem Projekt „Erhöhung der Material- und Energieeffizienz in der Massivumformung“ wurde zur Steigerung der Materialeffizienz ein völlig anderer Weg beschritten. Ausgehend von dem Verfahrenskatalog verfügbarer Umformverfahren (Bild 6) wurden alternative Produktionslinien zusammengestellt und zusammen mit alternativen Werkzeugkonzepten und Halbzeuggeometrien bezüglich erreichbarer Materialwirkungsgrade systematisch untersucht (Bild 7).

Durch Stoffflusssimulationen auf Basis der Finiten-Elemente-Methode [7] wurden die Potenziale bezüglich der Materialeffizienz herausgearbeitet und bewertet. Hierbei zeigte sich wieder die Stärke von Simulationsrechnungen und des verwendeten Systems, ohne die eine solche umfassende Untersuchung nicht möglich gewesen wäre. Für diesen Projektansatz wurde auf das gleiche Teilespektrum zurückgegriffen und die gleiche Einteilung der Klassen verwendet wie im zuvor beschriebenen Projektansatz. Das Ergebnis der Untersuchungen wurde in einer Gesamtverfahrensmatrix zusammengefasst. Dabei wird deutlich, dass Verfahren und Werkzeugkonzepte mit hohem Materialwirkungsgrad eher eine geringe Flexibilität bezüglich der herstellbaren Geometrien aufweisen. Dem gegenüber stehen Verfahren und Werkzeugkonzepte, die eine hohe Flexibilität haben, aber einen eher schlechten Materialwirkungsgrad aufweisen. Weiterhin ist ersichtlich, dass es Klassen gibt, in denen, bezogen auf einzelne Teile, mehrere gleichwertige Wege zu einem günstigen Materialwirkungsgrad führen (Bild 8).

Derzeit werden in der Schmiedeindustrie im Wesentlichen Materialien mit den Standardquerschnitten Rund und Vierkant eingesetzt. Diese müssen bei den jeweiligen Artikeln nicht immer die Idealform darstellen. Deshalb wurde stichprobenartig geprüft, inwiefern Halbzeu-

ge mit einem der Teilegeometrie angepassten Querschnitt Vorteile für die Materialökonomie darstellen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Materialeinsparung von zirka 2 Prozent erzielt werden kann. Es hat sich aber auch gezeigt, dass der Nutzen für die Materialökonomie in keinem Verhältnis zu den Zusatzkosten für das Vormaterial steht. Zu beachten sind hierbei auch die Aspekte Trennen, Handling, Erwärmen/Vereinzelung, et cetera, die weitere Zusatzkosten nach sich ziehen werden.

Auch bei den Untersuchungen im Projektansatz 2 hat sich wieder gezeigt beziehungsweise bestätigt, dass eine endkonturnahe Massenverteilung in den ersten Vorformstufen ohne größeren Materialverlust den entscheidenden Einfluss auf die Materialökonomie hat.

### Zusammenfassung und Ausblick

Materialökonomie, Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Ausstoß stehen in einem engen Zusammenhang. Energieintensive Branchen wie die Massivumformung werden ihre Prozesse diesbezüglich zukünftig verbessern müssen. In zwei sehr unterschiedlich angelegten Projektansätzen wurden Möglichkeiten zur Materialeffizienzsteigerung aufgezeigt. In einem Benchmark-Vergleich der Verfahren und Werkzeugkonzepte zeigte sich, dass theoretische Materialeinsparungen in den Geometrie-Klassen von 12 Prozent bis 38 Prozent möglich sind. Die Untersuchungen mit alternativen Prozessdesigns mithilfe von FEM-Simulationen bestätigen diese Einsparpotenziale und zeigen, dass darüber hinaus durch innovative alternative Verfahren und Werkzeugkonzepte Potenziale zur Materialreduzierung von 7 Prozent bis 41 Prozent vorhanden sind.

### Danksagung

Die hier vorgestellten Projekte wurden mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU AZ 26966) und des Ministeriums für Innovation Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen (FH Extra 280447502/12) gefördert. Die Autoren danken diesen beiden Förderstellen, den beteiligten Unternehmen und dem Industrieverband Massivumformung e. V. (IMU) für ihre Unterstützung.



Prof. Dr.-Ing.  
Rainer Herbertz



Dipl.-Inf. Wolfgang Licht



Dipl.-Ing. Franz Fuss

Die Untersuchung hat damit gezeigt, dass die Verfahren der Massivumformung noch ein deutliches Potenzial bezüglich der Materialeffizienz haben. Eine direkte Umsetzung ist aber nur in Einzelfällen möglich, weil das jeweilige Unternehmen schon aus wirtschaftlichen Gründen im Allgemeinen nicht die Vielzahl der erforderlichen Verfahren verfügbar halten kann, die für die Optimierung nötig wären. Das unternehmensspezifische Prozessdesign zielt entweder auf wenige und ähnliche Artikel mit jeweils hohen Stückzahlen oder auf viele unterschiedliche Artikel mit kleinen bis mittleren Stückzahlen ab. Im ersten Fall führt das im Allgemeinen zu hoher Produktivität bei akzeptabler Materialeffizienz, im zweiten Fall zu hoher Flexibilität zu Lasten der Materialeffizienz. Diese Diskrepanz ist nur zu überwinden, wenn zukünftig neue Umformmaschinen mit deutlich erweiterten und integrativen Funktionen entwickelt werden, die in Verbindung mit angepassten Werkzeugkonzepten ein Geometriespektrum erzeugen können, das heute nur den etablierten Einzelverfahren vorbehalten ist. Die Entwicklung eines solchen „Fleximaten“ ist Gegenstand einer nächsten Projektstufe. ■

### Quellennachweis

- [1] Studie der Firma Bosch: [http://www.bosch.com/de/com/sustainability/issues/corporate\\_leadership/megatrends\\_2/megatrends.html](http://www.bosch.com/de/com/sustainability/issues/corporate_leadership/megatrends_2/megatrends.html)
- [2] DIN EN 10243 Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen  
Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen 2000-06  
Teil 2: Warm hergestellt in Waagrecht-Stauchmaschinen 2000-06
- [3] IDS: „Schmiedeteile – Gestaltung, Anwendung, Beispiele“; Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung im Industrieverband Deutscher Schmieden e. V. (IDS), Hagen
- [4] Spies, K.: „Eine Formenordnung für Gesenkschmiedestücke“; Werkstatttechnik und Maschinenbau 47, 1957, 201 – 205
- [5] „Schmiedetechnische Mitteilungen“; Industrieanzeiger, Jahrgang 110/1988, Nr. 5 (19.01.88), Nr. 11 (15.03.88) und Nr. 41 (24.05.88)
- [6] Schmieder, F.: „Formenordnung für Gesenkschmiedeteile“; Industrieverband Deutscher Schmieden e. V. (IDS), Ausschuss Schmieden (VDI/ADB) als Ergebnis des Forschungsvorhabens „Entwicklung einer neuen Formenordnung für Gesenkschmiedestücke als Basis einer rechnergestützten Werkstückklassifizierung“, Forschungsgesellschaft Umformtechnik, veröffentlicht in [5]
- [7] FORGE 2009: FEM-Simulations-Software der Firma Transvalor S.A.; [www.transvalor.com](http://www.transvalor.com)