

Energie- und Materialeffizienz für Prozessketten der Massivumformung am Beispiel des Schmiedens

Prof. Dirk Landgrebe, Dr. Verena Kräusel



Tag der Massivumformung, Hannover Messe, 14. April 2015

AGENDA

1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Numerische Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
4. Betrachtungen zur Materialeffizienz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Institut für Werkzeugmaschinen
und Produktionsprozesse IWP
TU Chemnitz

WB Umformtechnik und Fügen

Professur Umformendes Formgeben und Fügen
Prof. D. Landgrebe

Blech- umformung	Massiv- umformung	Fügen
Blech- bearbeitung und Grundlagen	Warmmassiv- umformung	Thermisches Fügen
Wirkmedien- umformung/ Werkzeug- konzepte	Kaltmassiv-/ Präzisions- umformung	Mechanisches Fügen

Umform- technik	Fügetechnik
Blech- umformung	Thermisches Fügen
Walzprofilieren/ Prozess- konzepte	

WB Werkzeugmaschinen, Produktionssysteme
und Zerspanungstechnik
Prof. M. Putz

Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
Prof. M. Putz

WB Mechatronik und Funktionsleichtbau
Prof. W.-G. Drossel

Professur Adaptronik und Funktionsleichtbau
Prof. W.-G. Drossel

Profil Professur Umformendes Formgeben und Fügen

→ Lehr- und Forschungstätigkeit zu den Themen:

- **Gestaltung energie- und ressourceneffizienter Produktionsprozesse** in der Blech- als auch der Massivumformung
- **Umformung leichtbaurelevanter Werkstoffe** (NE-Metalle, hybride Materialien, hoch- und höchstfeste Blechwerkstoffe)
- **Auslegung von Umform- und Schneidwerkzeugen** für die Kalt- und Warmumformung
- **Entwicklung industrietauglicher, thermischer Fügeverfahren** für hochwertige Verbindungen von Hochleistungs- und Leichtbauwerkstoffen sowie deren Kombinationen
- Technologieentwicklung und Prozessgestaltung für **integrierte Füge-Umformprozesse**



UFF
Professur für Umformendes
Formgeben und Fügen

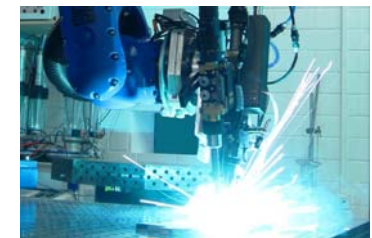
Leistungsangebot Forschung

Werkstoffprüfung

- Ermittlung mechanischer und technologischer Werkstoffkennwerte sowie metallografische Untersuchungen
- Gezielte Eigenschaftseinstellung durch thermomechanische Behandlungen

Prozess-, Technologie- und Werkzeugentwicklung

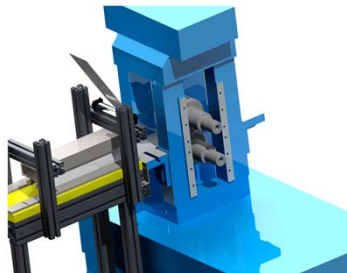
- Numerische und experimentelle Machbarkeitsuntersuchungen zu Umform-, Schneid- und Fügeprozessen
- Numerische und experimentelle Analyse der Werkzeugbelastungen
- Analysen und Auslegung von Umform-, Füge- und Schneidprozessen, inkl. Werkzeugen, u. a. für:
 - Inkrementelle Blech- und Massivumformung (z. B. Walzprofilieren)
 - Blechwarmumformung
 - Scherschneidverfahren
- Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Prozessen und Prozessketten sowie Wirtschaftlichkeitsabschätzungen
- Verfahrensintegrationen



Ausstattung

Maschinen

- Elekterspindelpresse 800 kN
- Duo-/Quarto-Walzwerk
- Kammerofen 528/1200-M
- Laborofen Typ LM 512
- Walzprofilanlage



Schweißausrüstung

- UP-Schweißanlage
- Hochfrequenz-Generator
- WIG-Schweißmaschine
- MIG/MAG-, E-Hand-Schweißmaschinen
- Lichtbogen Schweiß- und Lötanlage



Probenpräparation

- Trennschneider
- vollautomatische Einbettpresse
- halbautomatisches Schleifen und Polieren

Mess- und Prüftechnik

- Rauheits-Messgerät T1000
- Universal-Härteprüfeinrichtung M1C 010
- 3D-Mikroskop VHX-600
- Streifenziehanlage
- Universalprüfmaschine inspekt 150 kN
- Experimentierset Ion für Schweißuntersuchungen
- Echtzeitmesssystem Compact-RIO

Profil Fraunhofer IWU

- Gründung am 1. Juli 1991
- Standorte: **Chemnitz**, **Dresden**, **Zittau**,
Augsburg, Wolfsburg, Leipzig
- 9 500 m² Versuchsfelder
- Angewandte Produktionsforschung
- Leitinstitut für „Ressourceneffiziente Produktion“

IWU Campus Chemnitz 2015



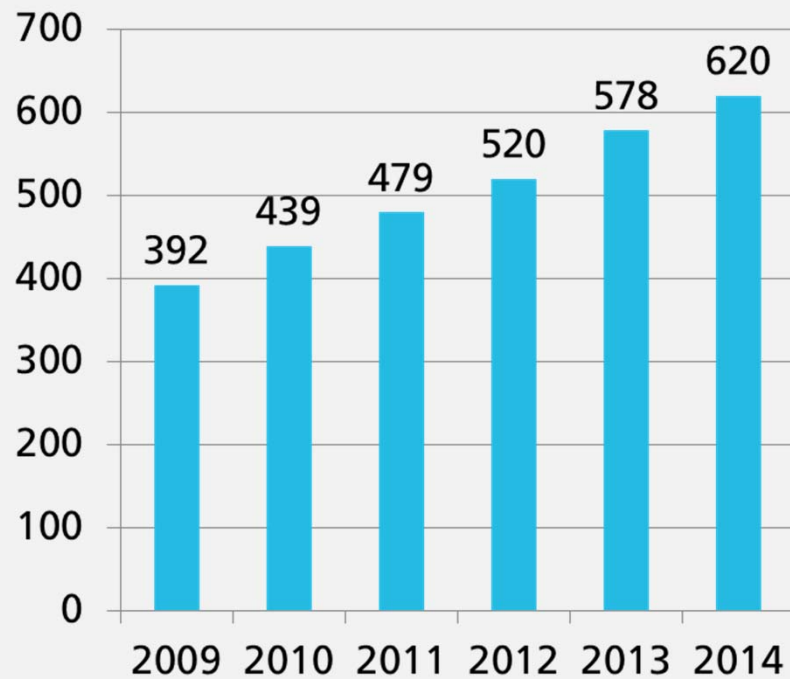
Deutschland
Land der Ideen



Ausgezeichneter Ort 2014/15

Profil Fraunhofer IWU

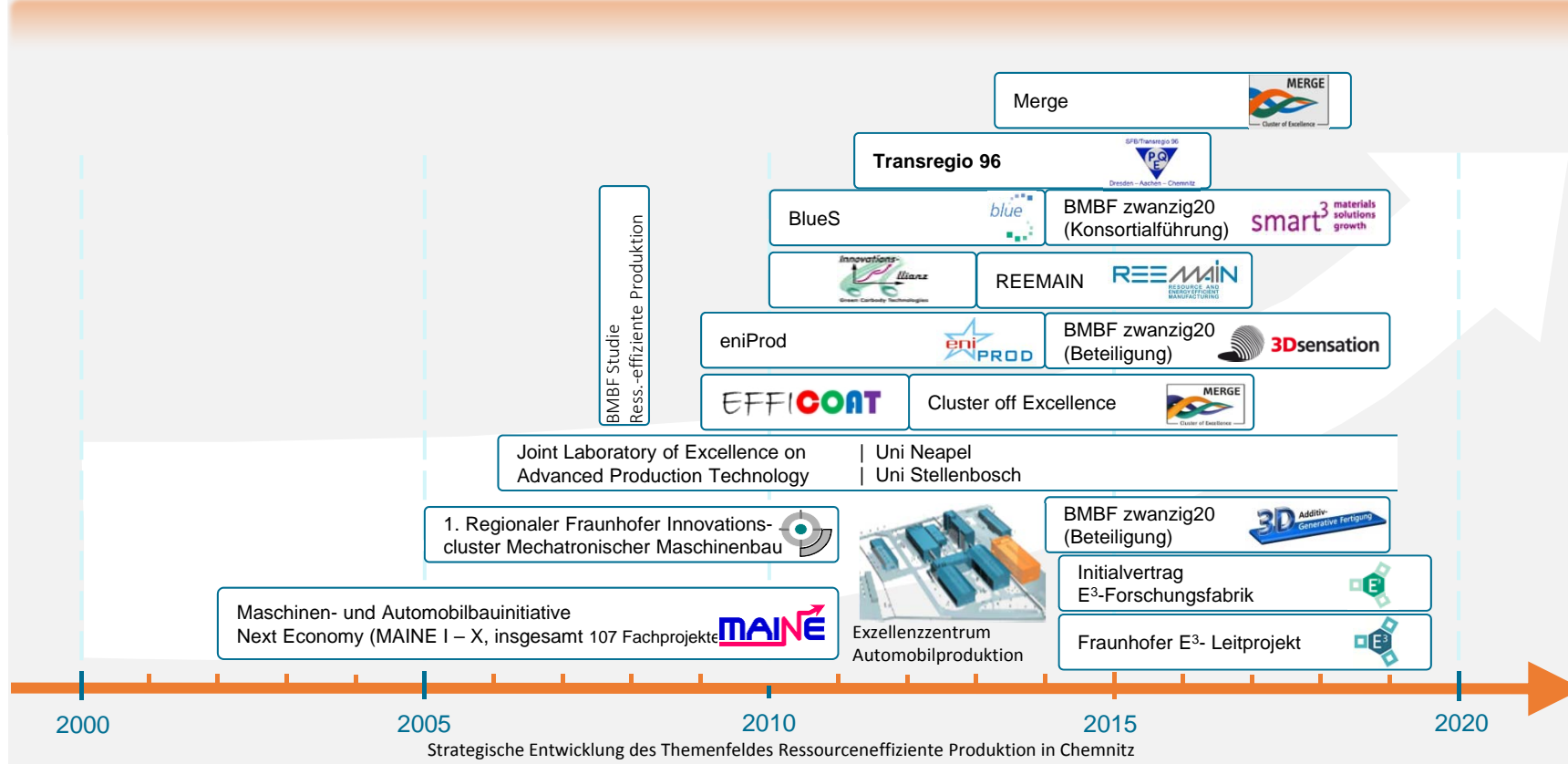
Mitarbeiterentwicklung



Betriebshaushalt in Mio. €



Fraunhofer IWU: Entwicklung zum Leistungszentrum »Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion«



AGENDA

1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Numerische Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
1. Betrachtungen zur Materialeffizienz
2. Zusammenfassung und Ausblick



Bildquellen: MEV; istockphoto www.globalisierung2011.wordpress.com

Treiber für Energie- und Ressourceneffizienz

POLITIK



Deutschland

→ Nationales Reformprogramm 2012
-40 % THG-Emissionen*

EU

→ Ökodesignrichtlinie
→ Wachstumsstrategie EUROPA 2020
-20 % THG-Emissionen*

*gegenüber 1990

GESELLSCHAFT

2050
Weltweit 9 Mrd.
Menschen
67 % in urbanen
Räumen



Bevölkerungspyramide in Dtl.

Quelle: World Urbanization Prospects 2011/UN-2012; Statistisches Bundesamt 2012

KUNDE

Bsp.: Selbstverpflichtung der Automobilindustrie

VW: -25 % Energieverbrauch, Abfall, Lösemittel-Emissionen
Wasserverbrauch, CO₂-Emissionen → bis 2018

Daimler: -20 % der produktionsbedingten CO₂-Emissionen pro Fahrzeug
gegenüber 2007 → bis 2015



Quelle: Volkswagen Media Services;
<http://nachhaltigkeit.daimler.com>

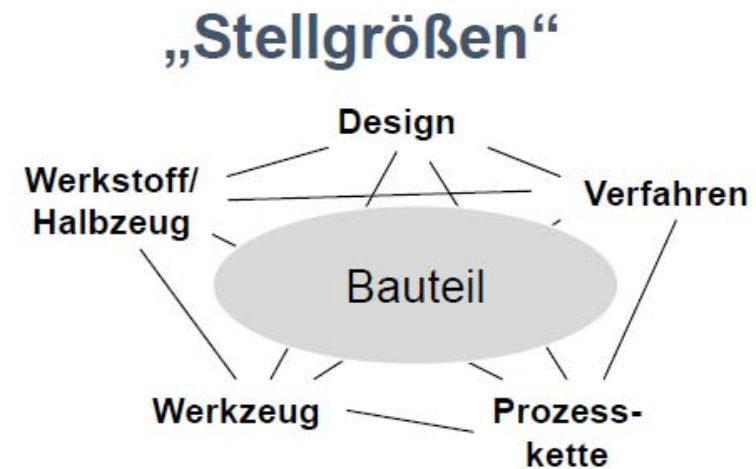
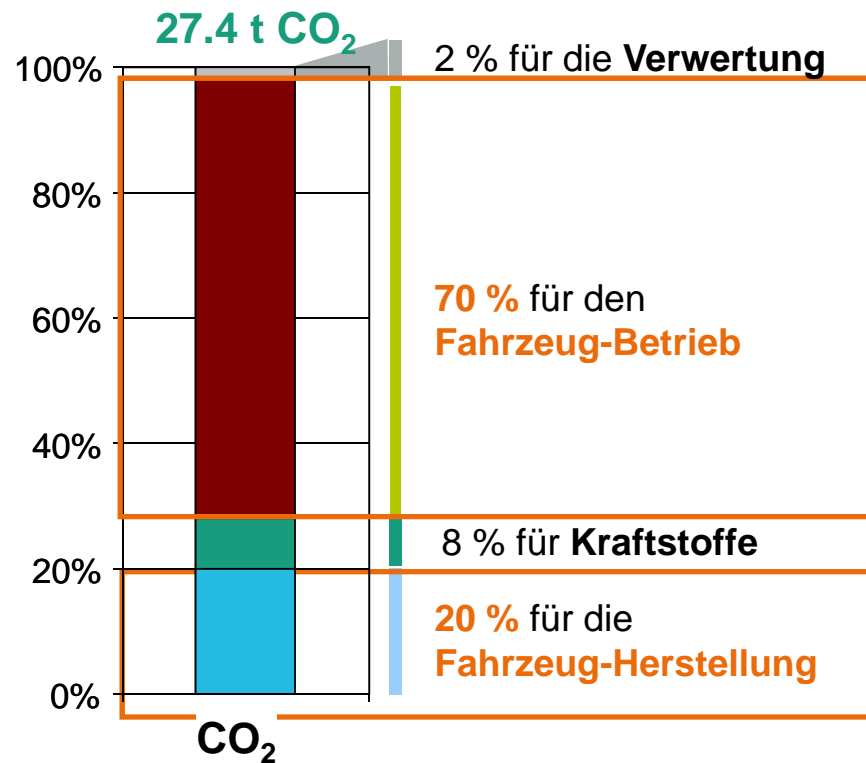
Fotos: MEV, Destatis

AGENDA

1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Numerische Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
4. Betrachtungen zur Materialeffizienz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Potenziale am Beispiel der Automobilproduktion

Verbrauch von CO₂ Äquivalenten* eines Golf VI



* inkl. Methan, Lachgas, Kältemittel R132; inkl. aller Werkstoffe und Verarbeitungsprozesse; 150.000 km, inkl. Kraftstoffvorkette

Quelle: Volkswagen AG

A Effizienzsteigerung im Produktbetrieb

- Reduzierung Energiebedarf (Kraftstoffverbrauch)
- Reduzierung Emissionen
- belastungsangepasste Bauteildesign

→ Leichtbau

- Werkstoffe
- Bauweisen

→ Beeinflussung Bauteileigenschaften

- Werkstoffverbunde
- Werkstoffmodifizierung
(maßgeschneiderte Eigenschaften)

B Effizienzsteigerung in der Produktherstellung

- Reduzierung Ressourceneinsatz (z. B. Zeit, Energie, Werkstoff)

→ Alternative Herstelltechnologien

- Verfahrenssubstitution (z. B. Einsatz Net-Shape-/Umformtechnologien)
- Prozesskettenverkürzung

→ Effizienzeinrichtungen (Werkzeuge, Maschinen)

A Effizienzsteigerung im Produktbetrieb

Beispiel: Werkstoffverbunde (Schiffsmotoren)

HEUTE



Herangehensweise

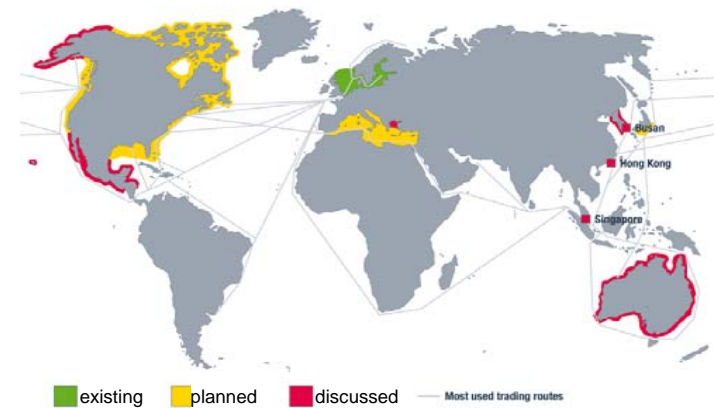
- **Verbesserung** der **Verbrennung** basierend auf optimierten Antriebs-(Motor-)Komponenten

Enabler

- Innovative **Werkstoffverbunde** (Stahl + Nimonic / Inconel)
- **Herstelltechnologien** Fügen, Schmieden

Herausforderungen

- Signifikante Reduzierung der **Emissionen** - Ruß
- Stickoxide
- Einrichtung von **ECAs** (emission controlled areas)



- Einführung von Emissions-**Richtlinien**
TIER I...III → Ruß, NO_x
TIER IV (ab 2020) → zusätzlich SO_x



INKOV

A Effizienzsteigerung im Produktbetrieb

Beispiel: Werkstoffverbunde



INKOV

Lösungsansatz

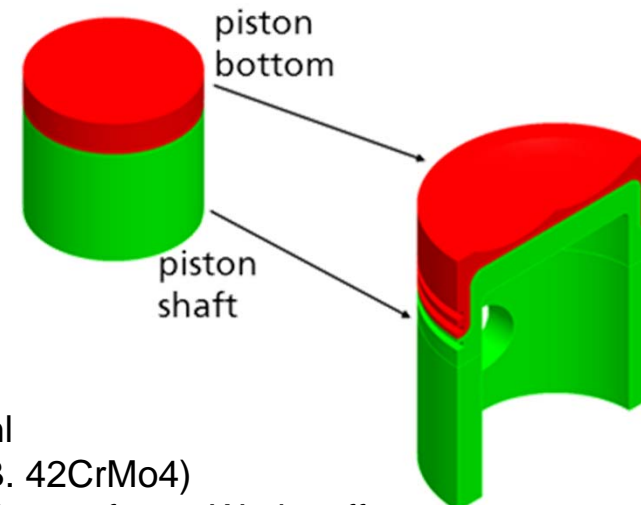
- Erhöhung der
 - **Verbrennungstemperatur** ($\vartheta = 1600 \text{ °C} \rightarrow \vartheta = 1800 \text{ °C}$)
 - **mittlerer Zylinderdruck** ($p = 25 \text{ bar} \rightarrow p = 40 \text{ bar}$)

➔ hohe **thermische** und **mechanische Belastung** der **Motorenkomponenten**

neue Werkstoffverbunde für **Ventil** und **Kolben**

- Festigkeit \uparrow
- Temperaturfestigkeit \uparrow

➔ Ziel: Systematische Untersuchungen zur **Verbund-Realisierung/Umformung**



- Stahl
(z. B. 42CrMo4)
- Hochwarmfester Werkstoff
(z. B. Nimonic, Inconel)

B Effizienzsteigerung in der Produktherstellung

Beispiel: Prozesskette „Hohle Getriebewelle“

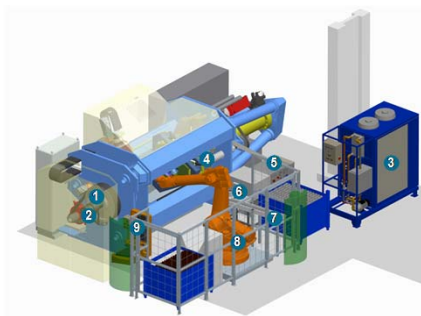
Vorform

z. B. - Schmieden



Hohlwelle

z. B. - Bohrungsdrücken
- Querkeilwalzen



Verzahnung



z. B. - Verzahnungswalzen
- Axialformen
(auch spanend – Wälzfräsen)



Finish-Bearbeitung



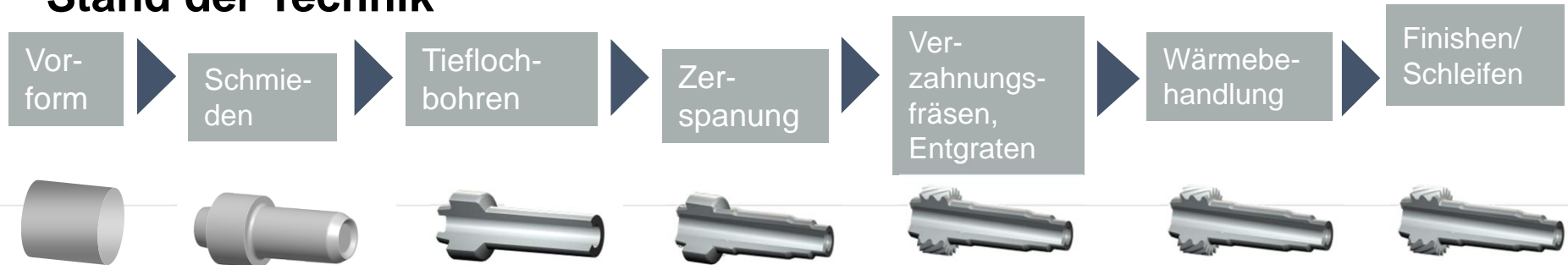
Wellengeometrie

z. B. - Querkeilwalzen
- Rundkneten

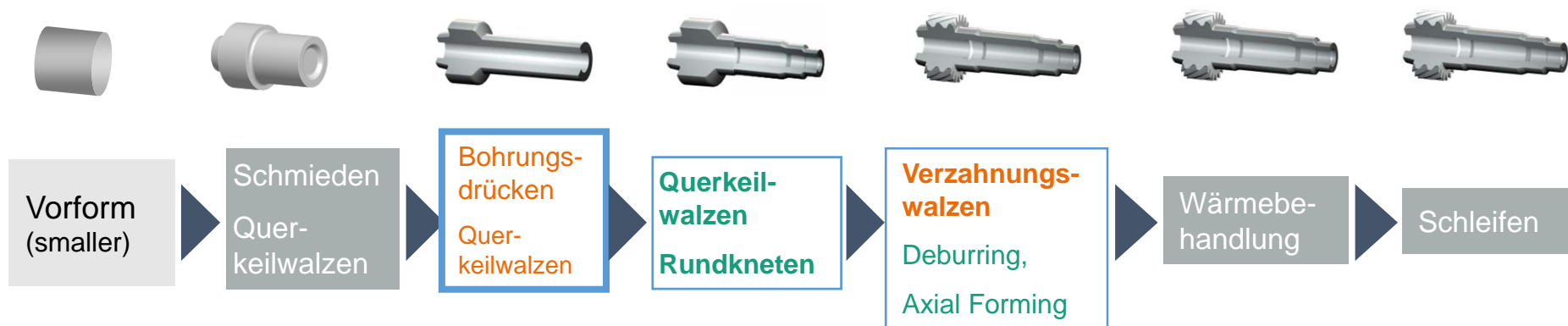
B Effizienzsteigerung in der Produktherstellung

Beispiel: Prozesskette „Hohle Getriebewelle“

Stand der Technik



Alternative: Umformbasierte Prozesskette



B Effizienzsteigerung in der Produktherstellung

Beispiel: Prozesskette „Hohle Getriebewelle

Bohrungsdrücken

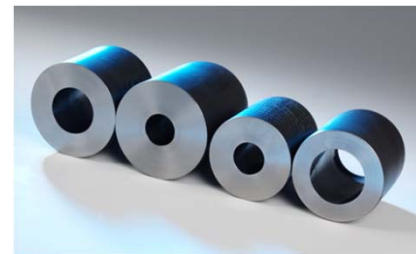
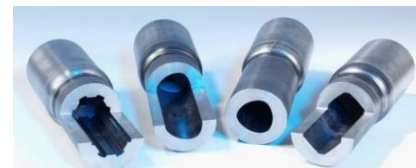
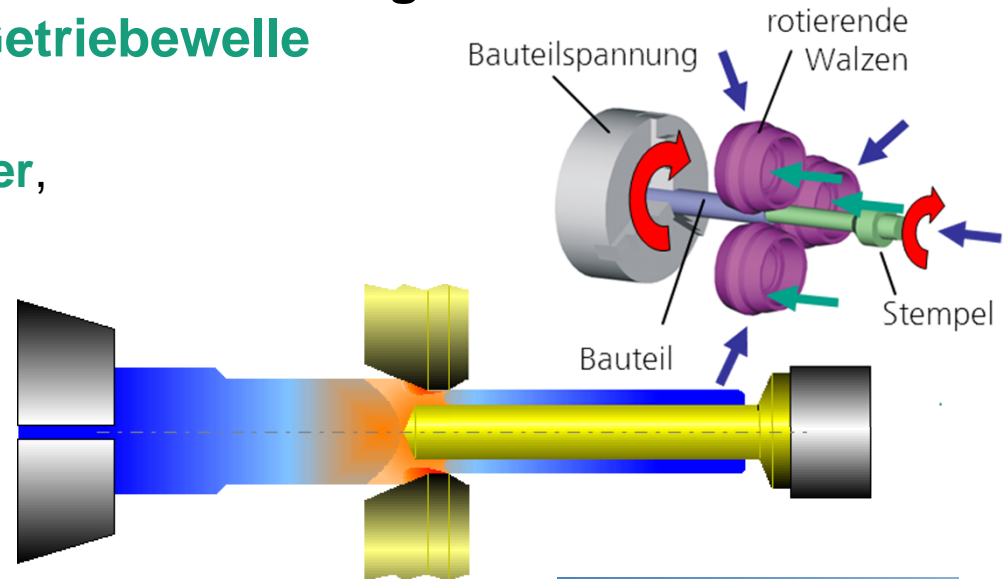
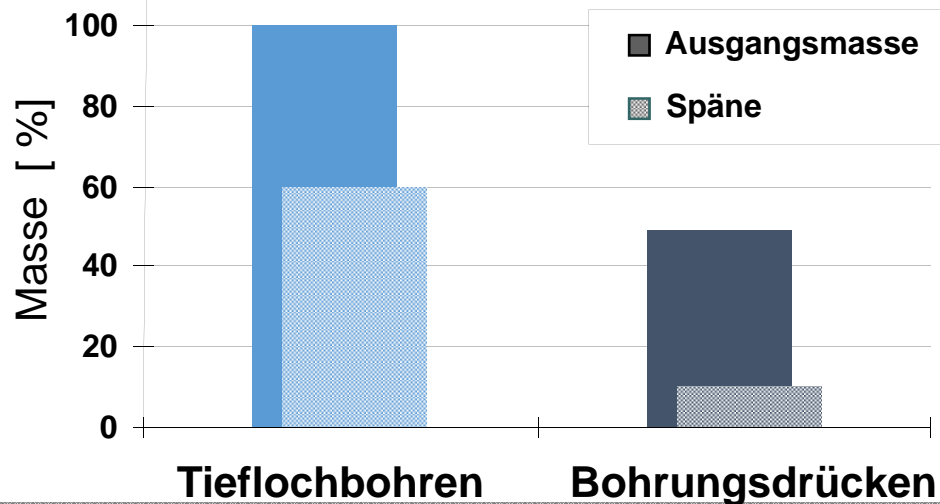
- Herstellung **rotationssymmetrischer, hohler Bauteile** (z. B. Wellen)

- im Vergleich zum Tieflochbohren

→ **Werkstoffeinsatz** ↓
(bis zu 40 %)

→ **Prozesszeit** ↓
(bis zu 50 %)

→ Realisierung von **Innenprofilen**

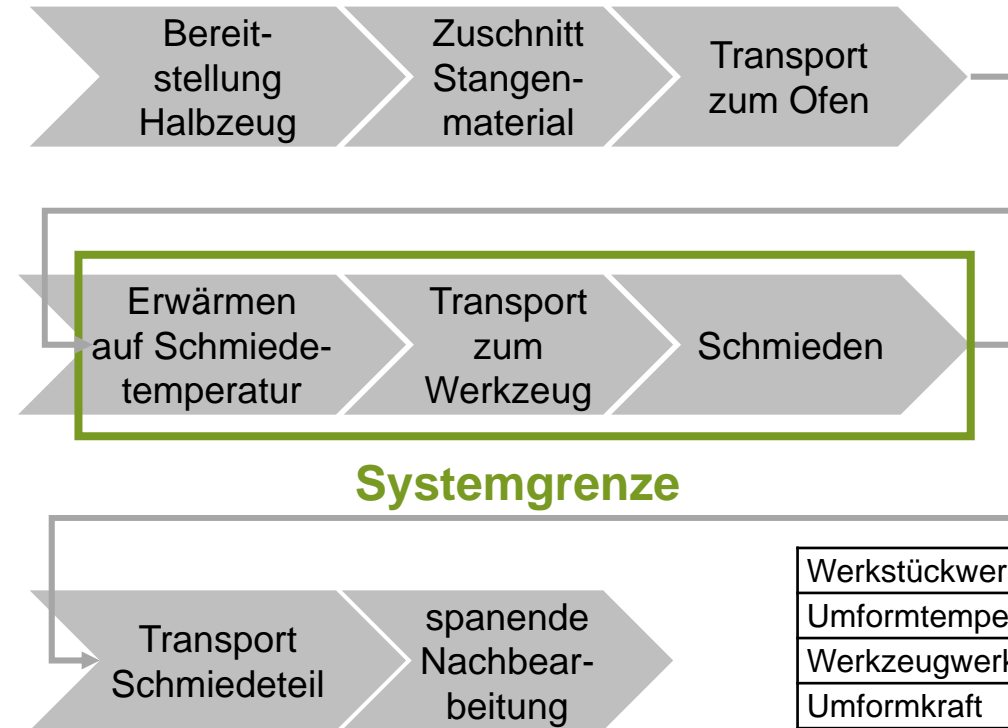


AGENDA

1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
4. Betrachtungen zur Materialeffizienz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Prozesskette: Definition der Systemgrenze

Bearbeitungsfolge Schmiedeteil



Demonstrator Getriebewelle



technologische Einflussgrößen

Werkstückwerkstoff	20MnCr5; D = 60 mm; L = 195 mm
Umformtemperatur	800 bis 1200 °C
Werkzeugwerkstoff	X40CrMoV5-1 (Werkstoff Nr. 1.2344)
Umformkraft	30 % bis 75 % der Nennkraft
Art der Presse	Kupplungsspindelpresse $F_{\max} = 20 \text{ MN}$
Umformgeschwindigkeit	250 bis 530 mm/s
Gratdicke	1 bis 3 mm
Reibungszahl	$\mu = 0,3$
Schmierstoff	Trockenspray „Con Traer G300“

Methodik



Datenerfassung mittels ITO-Modell:

- mathematische Prozessmodellierung und -beschreibung
- Ermittlung der Übergabewerte für Folgeprozesse
- Präzisierung von Einflussgrößen und des Prozessfensters

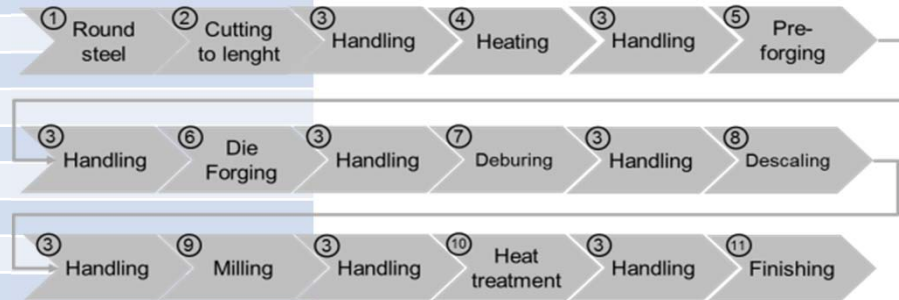
Beispiel Schmieden:

Input	Throughput	Output
Werkzeug	Temperatur	Schmiedeteil
Halbzeug	Umformkraft	Grat
Strom	Umformgeschwindigkeit	Zunder
Hilfsmittel	Gratdicke	Restwärme
Material-/Energieströme und Zeit-/Kostenentwicklung		

Ergebnisse ITO-Modell

Struktur	Element	Grundelement		
Input	Stoffe	Rohstoffe	Rundstahl	
		Hilfsstoffe	Reinigungsmittel elektrisch	
		Medien	Druckluft (9,11)	
		Verbrauchs-stoffe	Schmiermittel (5,6,7) Kühlmittel (7,9,11)	
	Throughput	Hilfsobjekte	Maschinen/Anlagen	Säge (2) Ofen (4,10) Schmiedepresse (5,6,7) Fräsmaschine (9,11) Roboter (3)
			Werkzeuge	Sägeblatt (2) Gesenke (5,6,7) Fräser (9,11)
			Personal	Arbeiter
			Einflussgrößen	Einstellgrößen Geschwindigkeit Temperatur Gratdicke Umformgrad Umformkraft
		Störgrößen	Umgebungstemperatur	
Output		Produkt	Zielprodukt	Bauteilgeometrie mechan. Eigenschaften Bauteilqualität (Form- und Lagetol. ...)
			Kuppelprodukt	-
			Emissionen	stofflich energetisch
		Abfall		Grat Zunder Späne Schmiermittelreste

reale Bearbeitungsfolge



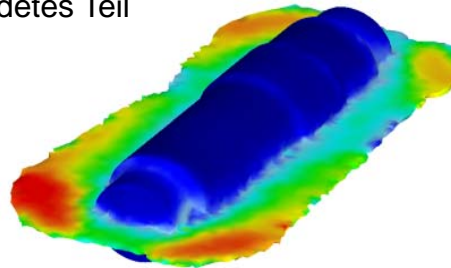
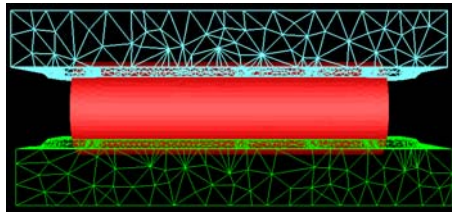
Stadienfolge



Ergebnisse der FE-Simulation

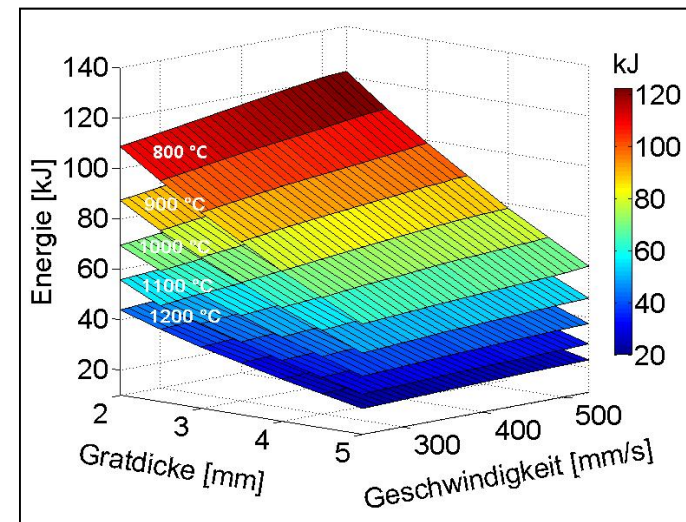
benötigte Prozessenergie → Funktion der Schmiedetemperatur und der Gratdicke

Simulationsmodell und geschmiedetes Teil



Simulationsparameter

Simulationssoftware	FORGE
Reibung	$\mu = 0,3$
Werkstückwerkstoff	20MnCr5
Werkstücktemperatur	800 bis 1200 °C
Werkzeugtemperatur	160 °C
Art der Presse	Spindelpresse
Umformgeschwindigkeit	250 bis 530 mm/s
Gratdicke	2 bis 5 mm

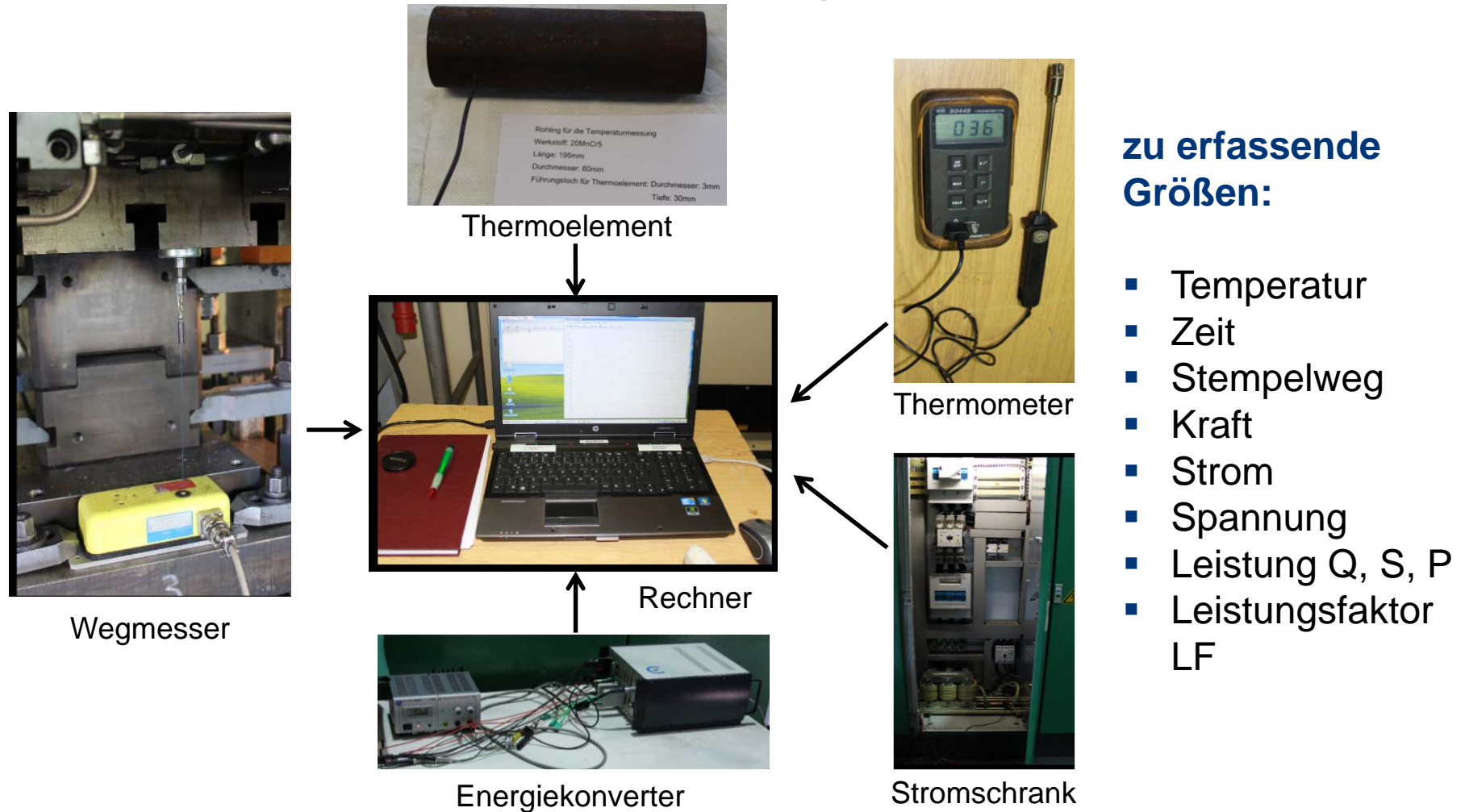


Die benötigte Umformenergie wird bei größer werdender Schmiedetemperatur und Gratdicke kleiner.

AGENDA

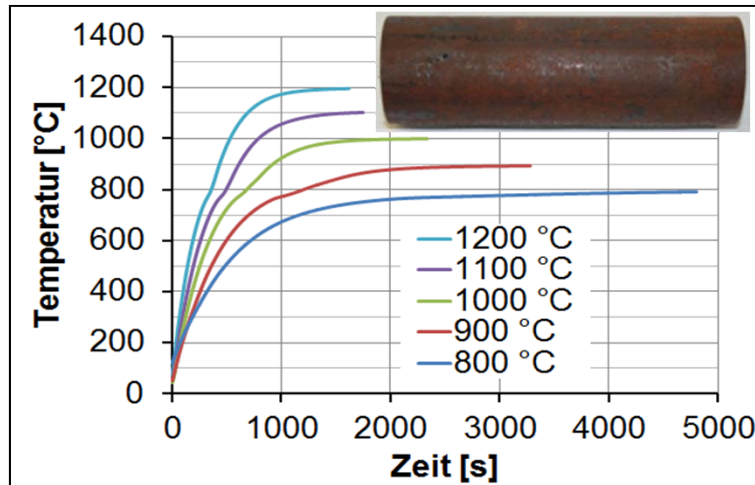
1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
4. Betrachtungen zur Materialeffizienz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Messaufbau für die Untersuchungen zum Schmieden



Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Schmieden

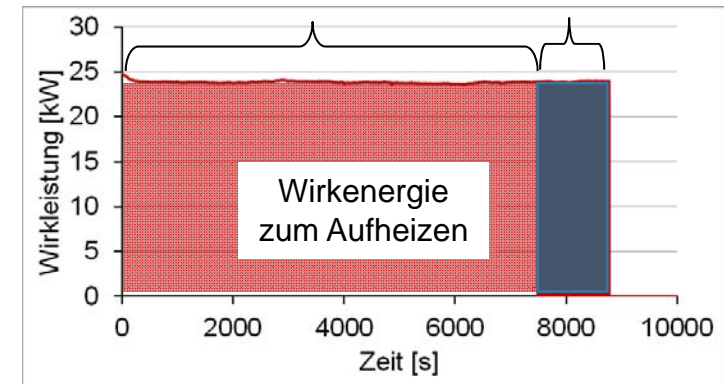
Temperaturverläufe im Werkstück beim Erwärmen



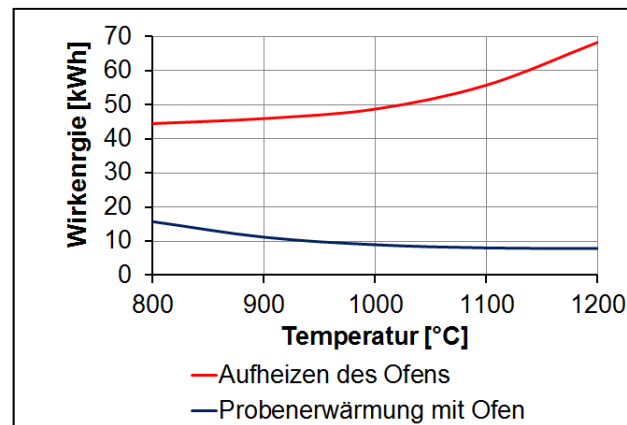
Kammerofen
Fa. Nabertherm

Energieaufnahme des Ofens bei 1100 °C

Aufheizen Bauteilerwärmung

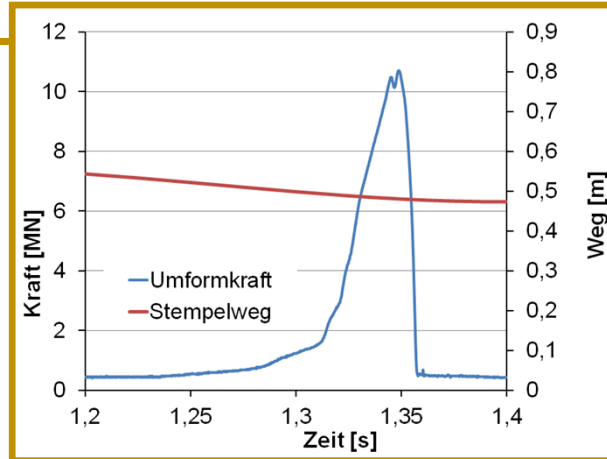
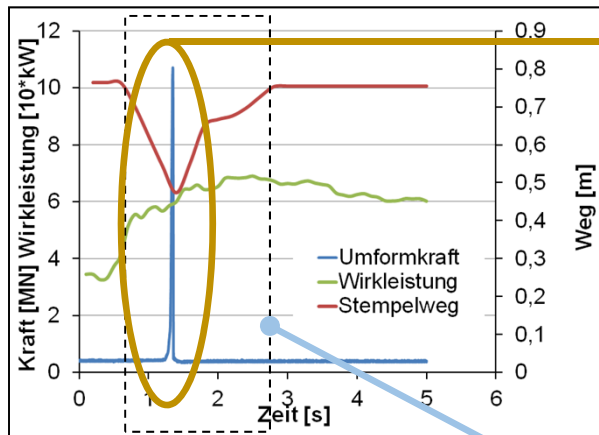


Energie beim Aufheizen
des Ofens und beim
Erwärmen einer Probe



Je höher die Erwärmungs-
temperatur, desto geringer die
Wirkenergie beim Schmieden.

Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Schmieden

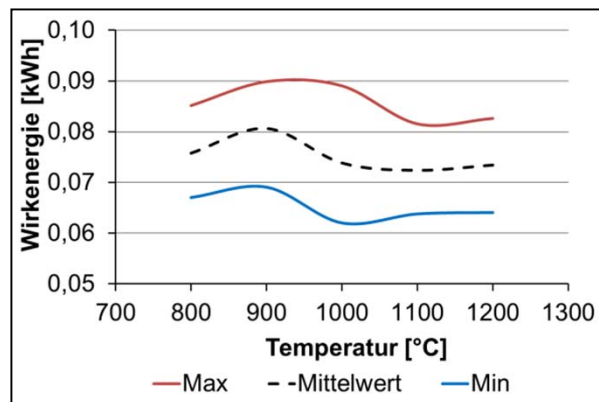


Wegmesser

Versuchsaufbau

Umformkraft und Stempelweg
in Abhängigkeit der Prozesszeit

ca. 50 % der Prozesszeit für
eigentliche Umformoperation



Energieaufnahme der Kupplungs-
spindelpresse SPKA 2000

Min- und Max-Werte durch Variation von:

- Gratdicke (1, 2, 3 mm ...) und
- Umformkraft (30 %, 40%, 50 %)

Fazit in Bezug auf die Energieeffizienz

- Gesamtprozesskette zur Herstellung von massivumgeformten Komponenten umfasst neben der eigentlichen Prozesskette zur Herstellung der Bauteile auch die Prozessketten zur Herstellung des Vormaterials und der Werkzeugfertigung
 - ➔ Systemgrenzen für die Betrachtung definieren!

- Schlussfolgerungen aus der Analyse der Prozesskette zur Bauteilfertigung:
 - Notwendigkeit der Energiemessung zur Identifikation von Grund- bzw. Spitzlasten sowie Verlusten
 - hohe Signifikanz auf die Steigerung der Energieeffizienz haben:
 - Auswahl der Erwärmungsanlage (u. a. Ofenleistung und -größe) und deren Bestückung
 - Maßnahmen zur Energierückgewinnung

AGENDA

1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
4. Betrachtungen zur Materialeffizienz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Vergrößerung der Systemgrenze

- Basis: Vollwelle mit gefügtem Zahnrad
 - Herstellung der **Vollwelle durch Gesenkschmieden**
 - Herstellung des Zahnrades mit Schrägverzahnung ($m = 2,0$; Eingriffswinkel 28°) durch spanende Fertigung und Verzahnungswalzen
 - ➔ **Materialausnutzung beim Schmieden: 72,3 %**

- Materialeinsparung durch:
 - Optimierung der PK – **Genaus Schmieden**
 - ➔ **Materialausnutzung: > 85 %**
 - Optimierung von Bauteil und PK – Einsatz von **Hohlwellen** und Herstellung durch **Bohrungsdrücken**
 - ➔ **Materialausnutzung: bis 90 %**



gefügte Baugruppe

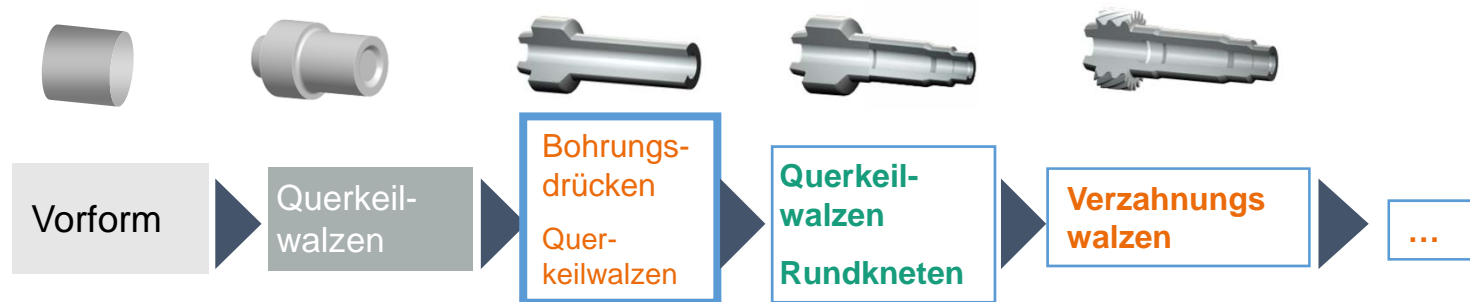


Stadienfolge Gesenkschmieden

Anfangs- und Endform der Hohlwelle



Materialeffizienz durch alternative Prozessketten?



- Alternative zur Basislösung mit **Losrad**:

- Herstellung der **Vollwelle** durch **Querkeilwalzen**

➡ **Verschlechterung des Materialausnutzungsgrades!**

- Alternative zur Basislösung mit **Festrad**:

- Herstellung der **Vollwelle** durch **Querkeilwalzen**
 - Herstellung der **Verzahnung** durch **Verzahnungswalzen**

➡ **Einsparung des Fügeprozesses**



AGENDA

1. Globale Trends und ihre Auswirkung auf die Produktion
2. Wege zur Energieeffizienz in der Produktion
3. Energieeffizienter Schmiedeprozess
 - 3.1 Prozessanalyse und Energiebilanz
 - 3.2 Experimentelle Untersuchungen
4. Betrachtungen zur Materialeffizienz
5. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- vollständige bauteilgeometrie- und verfahrensbezogene Prozessmodellierung und Bilanzierung in Haupt-, Neben- und Endformgebungsprozessen ist Basis für die Steigerung der Energieeffizienz:
 - Parameteridentifikation und energetische Bewertung der Prozessstufen
 - Optimierung von einzelnen Prozessen und Prozessketten
 - Integration von Handling, Transport und Recycling in das Energienutzungskonzept
 - ➔ für Schmieden auf Spindelpresse, Querkeilwalzen, Bohrungsdrücken und Verzahnungswalzen im Rahmen von eniPROD[®] realisiert

- darüber hinaus gehende Effizienzsteigerung möglich durch:
 - endkonturnahe Umformung
 - Verfahrenssubstitution und Prozesskettenverkürzung
 - Prozesskopplung von Ur- und Umformtechnik für komplexe 3D-Geometrien
 - ➔ Fortführung der begonnenen Untersuchungen unter Einbeziehung weiterer Umformprozesse

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Das Spitzentechnologiecluster „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®) wurde gefördert von der Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen.

