

Industrieverband Massivumformung e. V.
in Kooperation mit
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
Hirschvogel Umformtechnik GmbH
Rasche Umformtechnik GmbH & Co. KG
CDP Bharat Forge GmbH
Mahle Brockhaus GmbH
Bültmann GmbH
Zenergy Power GmbH

Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung

Abschlussbericht,
gefördert unter dem Az: 26966 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz	Labor für Massivumformung
Dipl.-Ing. Harald Hermanns	Labor für Massivumformung
Dipl.-Inf. Wolfgang Licht	Labor für Massivumformung
Dr. Carsten Bühner	Zenergy Power GmbH
Jens Krause	Zenergy Power GmbH
Dipl. Ing. Peter Billstein	Bültmann GmbH

Hagen, 25.3.2011

Industrieverband Massivumformung e. V.
in Kooperation mit
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
Hirschvogel Umformtechnik GmbH
Rasche Umformtechnik GmbH & Co. KG
CDP Bharat Forge GmbH
Mahle Brockhaus GmbH
Bültmann GmbH
Zenergy Power GmbH

Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung

Abschlussbericht,
gefördert unter dem Az: 26966 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz	Labor für Massivumformung
Dipl. Ing. Harald Hermanns	Labor für Massivumformung
Dipl. Inf. Wolfgang Licht	Labor für Massivumformung
Dr. Carsten Bühner	Zenergy Power GmbH
Jens Krause	Zenergy Power GmbH
Dipl. Ing. Peter Billstein	Bültmann GmbH

Hagen, 25.3.2011

**Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **26966**Referat **24**

Fördersumme

220.000 €

Antragstitel **Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung**

Stichworte

Laufzeit
21 Monate

Projektbeginn
26.03.2009

Projektende
31.12.2010

Projektphase(n)

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger Industrieverband Massivumformung e.V.
Goldene Pforte 1
58093 Hagen

Tel 02331 / 9588-33

Fax 02331 / 51046

Projektleitung
Dipl.-Math. Sabine
Widdermann

Bearbeiter

Kooperationspartner Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung, 58644 Iserlohn
Hirschvogel Umformtechnik GmbH, 86920 Denklingen
Rasche Umformtechnik GmbH Co. KG, 58840 Plettenberg
CDP Bharat Forge GmbH, 58256 Ennepetal
Mahle Brockhaus GmbH, 58840 Plettenberg
Bültmann GmbH, 58809 Neuenrade
Zenergy Power GmbH, 53359 Rheinbach

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Durch das Projekt soll der Energiebedarf und die CO₂ Emission bei der Herstellung von Umformteilen gesenkt werden. Dies wird notwendig, da zum einen die Energiekosten weiterhin steigen werden, und zum anderen die Energiemenge, die in der deutschen Massivumformung zur Erwärmung benötigt werden sehr hoch ist (ca. 1250 GWh/a elektrisch; der Primärenergiebedarf ist ca. 3 mal so hoch). Weiterhin zeichnen sich die Prozesse der Massivumformung verfahrensbedingt durch einen hohen Materialüberschuss aus (bis zu 40%), was bedingt durch den hohen Energieanteil für die Stahlerzeugung zu weiteren Energieverlusten führt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zur Lösung der geschilderten Situation wurden 2 Wege verfolgt:

1. Materialreduzierung (Reduzierung des Materialüberschuss)
2. Steigerung der Energieeffizienz

Durch den Arbeitspunkt Materialreduzierung wurde validiert, ob und wie sich Regeln in allgemeingültiger Form herleiten lassen, um so einen bestmöglichen Materialwirkungsgrad erreichen zu können. Dazu sind aufbauend auf bewährten Formenordnungen für Massivumformprodukte die Potentiale der einzelnen Massivumformverfahren unter Berücksichtigung geeigneter Werkzeugkonzepte und Halbzeuge entwickelt und bewertet worden.

Durch den Arbeitspunkt Steigerung der Energieeffizienz wurden die Wege zur

- 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

entwickelt und bewertet.

Ergebnisse und Diskussion

Zu 1. Materialreduzierung: Auf Basis eines repräsentativen Teilespektrums (RTS) und einer entwickelten Formenordnung wurden optimale Verfahrenswege und Werkzeugtechnologien im Sinne einer Benchmark bewertet. Auf dieser Grundlage wurde eine Potentialabschätzung durchgeführt mit dem Ergebnis, dass das RTS ein erwartetes Optimierungspotential von 803 to/a Stahl hat, was einer Primärenergiereduzierung von 6,87 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 1.271 to/a entspricht. Hochgerechnet auf die Branche Massivumformung ergibt sich ein erwartetes Einsparpotential von 106.080 to/a Stahl, was einer Primärenergiereduzierung von 908 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 167.967 to/a entspricht. Für die Übertragung der Ergebnisse in die Praxis konnte eine Verfahrens- und Technologieregel abgeleitet werden, die den Umformbetrieben hilft, die o.g. Potentiale zu heben. Die Umsetzbarkeit wird derzeit dadurch eingeschränkt, weil oftmals die erforderlichen Fertigungseinrichtungen in den Betrieben fehlen.

Zu 2.: Zur Steigerung der Energieeffizienz wurden im Rahmen des Projektes 3 Wege verfolgt: Bei der Sammlung und Leitung von Prozessenergie konnten auf Grundlage von Strömungsversuchen und CFD-Berechnungen verschiedene Energiesammelmodule entwickelt und bewertet werden mit dem Ergebnis, dass von der abgreifbaren Prozesswärme eines Musterprozesses (ca. 240 kWh/to) ca. 24 bis 52 % gesammelt und einer Nutzung zugeführt werden können.

Für die Umwandlung von gesammelter Prozessenergie in elektrischen Strom wurden die Konzepte Stirling-Motor, ORC-Verfahren und thermoelektrische Generatoren (TEG) untersucht und technologisch sowie wirtschaftlich bewertet. Aufgrund der erreichbaren Prozesswärmemetemperatur, des Wirkungsgrades der Wandlerysteme (ca. 5 bis 10% der zugeführten Energie), der Anlagenkosten und der derzeitigen Stromkosten ist keines der Systeme derzeit sinnvoll einsetzbar. Aufgrund der rasanten Entwicklung der TEG's bzgl. Kosten und Wirkungsgrad bieten diese Systeme allerdings für die Massivumformung ein Potential für die Zukunft.

Alternativ wurden auch mobile Latentwärmespeicher betrachtet. Diese Art der thermischen Zwischenspeicherung ist unter heutigen Bedingungen bereits wirtschaftlich. Die Prozesswärme könnte mit einem Anteil von bis zu 46% einer erneuten Nutzung zugeführt werden. Das entspricht einem theoretischen Einsparpotential an Primärenergie von 348 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 92.295 to/a.

Für die alternative Erwärmung von Stahl auf Basis der HTS-Technologie wurden Messungen an einer bestehenden Anlage und theoretische Berechnungen durchgeführt sowie ein Anlagenlayout für die Stahlerwärmung entwickelt und bewertet mit dem Ergebnis, dass HTS- Erwärmungsverfahren aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten und der sehr langen Taktzeit (bedingt durch die automatische Einzelteilerwärmung) für Stahlwerkstoffe derzeit keine wirtschaftlich darstellbare Alternative zur induktiven Erwärmung ist. Ein Vorteil der HTS-Technologie ist seine Schnelligkeit; wegen der kurzen Verweildauer des einzelnen Werkstücks im Ofen ist mit weniger Zunderbildung zu rechnen.

Bei der Rückführung von Prozessenergie in den Prozess zur Vormaterialerwärmung wurde ein Durchströmungsmodul mit anschließender Temperaturhomogenisierungsstrecke (und gleichzeitiger Temperaturerhöhung mit Gas) auf Basis der Jet-Heating-Technologie entwickelt und bewertet, mit dem Ergebnis, dass von der rückführbaren Prozesswärme ca. 50% genutzt werden kann. Das entspricht zusammen mit der Ausgleichsstrecke einem theoretischen Einsparpotential an Primärenergie von 1.192 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 212.481 to/a.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Bereits während der Projektlaufzeit erfolgte die Verbreitung von Zwischenergebnissen in nachfolgender Weise: Fachaufsatz in der Zeitschrift Schmiede Journal 3/2010, Bericht im IMU-Arbeitskreis Schmiedeleiter 2009 u. 2010, Bericht im IMU-Ausschuss Forschung und Technik 2009 u. 2010, Bericht im WSM-Arbeitskreis Energie 2010. In 2011 ist die Verbreitung der Vorhabensergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen: IMU/VDMA-Fachtagung „Ressourceneffizienz in der Massivumformung“ am 3./4. Mai 2011 in Hagen, Präsentation der Ergebnisse in der IMU-Faktendatenbank, Fachaufsatz in der Zeitschrift Schmiede Journal Herbst 2011.

Fazit

Durch das Vorhaben konnten Ansätze entwickelt und auf Umsetzbarkeit hin geprüft werden, um den Primärenergiebedarf und die CO₂ Emission bei der Herstellung von Warmumformteilen zu reduzieren. Es konnte gezeigt werden, dass der Primärenergiebedarf und die CO₂ Emission signifikant reduziert werden können. Die Ergebnisse des Vorhabens geben für die Branche Massivumformung die Leitlinien für eine betriebliche Umsetzung vor.

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung	1
1	Einleitung	3
2	Vorhabensdurchführung	7
2.1	Teilprojekt Materialreduzierung	7
2.1.1	Untersuchungsmatrix / Teilespektrum	8
2.1.2	Einteilung des Teilespektrums in Formenordnung	9
2.1.2.1	Formenordnung Spies	10
2.1.2.2	Formenordnung nach Schmieder	10
2.1.2.3	Rotationssymmetrie	10
2.1.2.4	Feingliedrigkeit	11
2.1.2.5	Weitere Bauteilkenngößen	12
2.1.2.6	Stoffflusskomplexität	13
2.1.2.7	Untersuchte Ansätze	14
2.1.2.8	Klassifizierung	14
2.1.2.9	Bewertung der Ansätze	15
2.1.3	Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung	15
2.1.4	Erstellen alternativer Fertigungswege- und Verfahren	16
2.1.5	Konstruktions- und Verfahrensregeln	16
2.1.6	Evaluierung der Ergebnisse	16
2.1.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	16
2.2	Teilprojekt Steigerung der Energieeffizienz	17
2.2.1	Nutzung der Prozesswärme zur Erzeugung elektrischer Energie	17
2.2.1.1	Energiebündelung	17
2.2.1.2	Energieleitung	19
2.2.1.3	Messstrategie	20
2.2.1.4	Energie umwandeln	20
2.2.1.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	21
2.2.2	Sonstige Nutzung der Prozesswärme	21
2.2.3	Reduzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung	22
2.2.3.1	HTS Anlage evaluieren	22
2.2.3.2	Pflichtenheft Erwärmung von Schmiedeteilen	23
2.2.3.3	Umsetzungskonzept für die Erwärmung von Stahl mittels HTS Anlage	24
2.2.3.4	Handlings- und Produktionskonzept	24
2.2.3.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	24

2.2.4	Rückführung und Nutzung der Energie aus der Prozesswärme in den Produktionsprozess	25
2.2.4.1	Entwicklung und Bewertung eines Konzepts zur Übertragung gebündelter Energie auf das Vormaterial	25
2.2.4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	26
3	Vorhabensergebnisse	27
3.1	Teilprojekt Materialreduzierung.....	27
3.1.1	Untersuchungsmatrix / Teilespektrum.....	27
3.1.2	Einteilung des Teilespektrums in Formenordnung	27
3.1.3	Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung	30
3.1.4	Erstellen alternativer Fertigungswege und -verfahren	32
3.1.5	Konstruktions- und Verfahrensregeln	38
3.1.6	Evaluierung der Ergebnisse	39
3.1.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	39
3.2	Teilprojekt Steigerung der Energieeffizienz.....	40
3.2.1	Nutzung der Prozesswärme zur Erzeugung elektrischer Energie.....	42
3.2.1.1	Energiebündelung	42
3.2.1.2	Energieleitung	53
3.2.1.3	Messstrategie	56
3.2.1.4	Energie umwandeln	57
3.2.1.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	65
3.2.2	Sonstige Nutzung der Prozesswärme	67
3.2.3	Reduzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung.....	69
3.2.3.1	HTS Anlage evaluieren	69
3.2.3.2	Pflichtenheft Erwärmung von Schmiedeteilen	71
3.2.3.3	Umsetzungskonzept für die Erwärmung von Stahl mittels HTS Anlage	71
3.2.3.4	Handlings- und Produktionskonzept.....	72
3.2.3.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	73
3.2.4	Rückführung und Nutzung der Energie aus der Prozesswärme in den Produktionsprozess	74
3.2.4.1	Entwicklung und Bewertung eines Konzepts zur Übertragung gebündelter Energie auf das Vormaterial	74
3.2.4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	78
3.2.5	Energie- und CO ₂ Bilanz	79
4	Verbreitung der Vorhabensergebnisse	81
5	Fazit.....	82
6	Literaturverzeichnis	85

Anhänge:

Anhang 1 Parameter der Bauteile

Anhang 2 Bauteile als Bildübersicht

Anhang 3 Klassenspezifische Verteilungsdiagramme MWG

Anhang 4 Verfahrensregel für die Materialreduzierung - Anwendung und Beispiele

Anhang 5 Pflichtenheft für die Erwärmung und das Handling von Gesenkschmiedeteilen aus Stahl

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Primärenergiebedarf für die Herstellung von Umformteilen.....	3
Tabelle 2: CO2 Emission für die Herstellung von Umformteilen.....	3
Tabelle 3: Energieeinsparpotential durch Materialreduzierung.....	3
Tabelle 4: Energieeinsparpotential durch Reduzierung der Erwärmungsenergie.....	4
Tabelle 5: Stoffflusskomplexität.....	13
Tabelle 6: Beispiel für die Ermittlung der minimal notwendigen Einsatzmasse.....	15
Tabelle 7: Wärmeinhalte verschiedener Bauteile.....	20
Tabelle 8: Messung unterschiedlicher Betriebszustände.....	23
Tabelle 9: Übersicht der untersuchten Ansätze.....	27
Tabelle 10: Bewertung der Klassifizierungsansätze.....	28
Tabelle 11: Bewertung für Ansatz 4: Erste Codestelle Schmieder.....	28
Tabelle 12: Bewertung für Ansatz 6: Methode des planvollen Auswählens.....	28
Tabelle 13: Bewertung für Ansatz 7: Stoffflusskomplexität.....	28
Tabelle 14: Bewertung für Ansatz 8: Stoffflusskomplexität x Feingliedrigkeitsgruppe.....	29
Tabelle 15: Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung für rotationssymmetrische Bauteile.....	30
Tabelle 16: Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung für Fassonteile.....	30
Tabelle 17: Potentialbewertung für das repräsentative Teilespektrum.....	31
Tabelle 18: Potentialbewertung.....	31
Tabelle 19: Ergebnisse des klassenspezifischen Vergleichs der Daten für rotationssymmetrische Bauteile.....	32
Tabelle 20: Einfluss von Parametern auf den MWG für rotationssymmetrische Teile.....	32
Tabelle 21: Ergebnisse des klassenspezifischen Vergleichs der Daten für Fassonteile.....	33
Tabelle 22: Einfluss von Parametern auf den MWG für Fassonteile.....	34
Tabelle 23: Verfahren der jeweils Klassenbesten.....	37
Tabelle 24: Evaluierung der Ergebnisse mit Unternehmen.....	39
Tabelle 25: Potential der Kosteneinsparungen.....	39
Tabelle 26: Versuchsparameter Warmversuch.....	43
Tabelle 27: Ergebnisse Warmversuch.....	44
Tabelle 28: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 1.....	45
Tabelle 29: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 2.....	46
Tabelle 30: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 3.....	49
Tabelle 31: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 4.....	50
Tabelle 32: Zusammengestellte Energiebilanz der Einzelmodule normiert auf 1 to Einsatzmaterial.....	52
Tabelle 33: Ausgewählte Messgeräte.....	56
Tabelle 34: Übersicht Anbieter von Thermoelektrischen Generatoren.....	57
Tabelle 35: Eckwerte thermoelektrischer Generatoren.....	58
Tabelle 36: Übersicht Anbieter von Stirlingmotoren.....	61
Tabelle 37: Eckwerte Stirlingmotoren.....	62
Tabelle 38: Übersicht ORC Anbieter.....	63
Tabelle 39: Eckwerte ORC-Prozess.....	64
Tabelle 40: Vergütung für elektrischen Strom.....	65
Tabelle 41: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Energieumwandler.....	66
Tabelle 42: Sonstige mögliche Nutzung der Prozesswärme.....	67
Tabelle 43: Wirtschaftlichkeitsabschätzung Latentwärmespeicher.....	68

Tabelle 44: Erwärmungsschritte HTS.....	71
Tabelle 45: Parameter Erwärmungskostenvergleich (Kosten und Taktzeit: Herstellerangaben)	73

Verzeichnis der Bilder

Bild 1: Übersicht der Projektansätze	6
Bild 2: Materialüberschuss	7
Bild 3: Verteilung des MWG in Bezug auf Rotationssymmetrie.....	11
Bild 4: Prinzipdarstellung der Energiesammlung und -leitung	18
Bild 5: Versuchsaufbau Strömungskanal	18
Bild 6: Messaufbau zur Temperaturmessung an einem BY-Band	19
Bild 7: Wirkungsgrad Energieumwandler	21
Bild 8: Anordnung Thermoelemente	22
Bild 9: FEM-Modell des Ofens	24
Bild 10: Erwärmung heute	25
Bild 11: Zusammenhang Transportelement Zangenende (Masse geschätzt) - MWG	35
Bild 12: Übersicht der Verfahren und Werkzeugtechnologien	36
Bild 13: Verfahrensregel	38
Bild 14: Leistungsbilanz einer Schmiedelinie.....	40
Bild 15: Modulares Gesamtkonzept	41
Bild 16: Modul 1.....	42
Bild 17: Modul 2.....	46
Bild 18: Modul 3.....	47
Bild 19: BY-Band - Ergebnisse Temperaturmessung (Unterseite Wärmetauscher).....	47
Bild 20: BY-Band - Wärmetauscherkonzept	48
Bild 21: BY-Band – CFD Simulation	48
Bild 22: BY-Band – Ergebnisse CFD Simulation.....	49
Bild 23: Modul 4.....	50
Bild 24: Modul 10	51
Bild 25: Reihenschaltung mehrerer Wärmeübertragungsmodule (Gegenstromprinzip)	52
Bild 26: Druckverluste eines geraden Rohrstücks	53
Bild 27: Druckverluste Rohrbogen.....	54
Bild 28: Gesamtdruckverluste eines Rohrleitungssystems	54
Bild 29: Lüfterleistung.....	55
Bild 30: Wärmeverluste einer isolierten Rohrleitung nach [VDI06].....	55
Bild 31: TEG Kennlinie.....	59
Bild 32: TEG unter typischen Bedingungen eines Umformprozesses	59
Bild 33: Grundvergütung elektrischer Strom nach EEX.....	65
Bild 34: Temperaturmessung Versuchsserie 1	69
Bild 35: Erfasste Leistungsdaten.....	70
Bild 36: Wirkungsgrad einer HTS Anlage in Abhängigkeit der Auslastung.....	70
Bild 37: Übersicht der Gesamtanlage	71
Bild 38: Verkippung des Magneten zum Be- und Entladen.....	72
Bild 39: Vergleich Erwärmungskosten	73
Bild 40: Wärmebedarf für die Stahlerwärmung	74
Bild 41: Erwärmung einer Vormaterialschüttung, $v = 1 \text{ m/s}$	75
Bild 42: Erwärmung einer Vormaterialschüttung, $v = 5 \text{ m/s}$	75
Bild 43: Einfluss der Eingangstemperaturschwankung beim induktiven Erwärmen auf die Ausgangstemperatur	76
Bild 44: Vormaterialerwärmung und Homogenisierung	76
Bild 45: Jet-Heating.....	77
Bild 46: Wirtschaftlichkeitsvergleich bei Materialvorwärmung.....	78

Bild 47: Energiebilanz unterschiedlicher Nutzungswege	79
Bild 48: Primärenergiereduktion	79
Bild 49: CO2 Reduktion.....	80

Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
A	Fläche, Querschnittsfläche	m ²	
A_{FT}	Oberfläche Fertigteil	mm ²	
A_{KmG}	Oberfläche Knüppel mit Grat	mm ²	
A_{KoG}	Oberfläche Knüppel ohne Grat	mm ²	
A_{Kugel}	Oberfläche einer volumengleichen Kugel	mm ²	
AA_{mG}	Oberfläche Knüppel mit Grat / Oberfläche Fertigteil		
AA_{oG}	Oberfläche Knüppel ohne Grat / Oberfläche Fertigteil		
AV	Oberfläche / Volumen	1/mm	
AV_{norm}	Oberfläche / Volumen normiert		
c_p	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg*K)	
EEX	European Energy Exchange		
HTS	Hochtemperatur Supraleiter		
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung		
\dot{m}	Massenstrom	kg/s	
m_E	Einsatzmasse	kg	
m_{FT}	Masse Fertigteil	kg	
m_{HK}	Masse Hüllkörper	kg	
m_L	Masse Lochtaler	kg	
MWG	Materialwirkungsgrad		
p	Druck	Pa	
P	Leistung	kW	
\dot{Q}	Wärmestrom	kW	
RTS	Repräsentatives Teilespektrum		
S	Feingliedrigkeitsfaktor		
Sp	Sphärizität		
T	Temperatur	°C	
TKK	Technologie-Komplexitäts-Klassen		
v	Geschwindigkeit	m/s	
V_{FT}	Volumen Fertigteil	mm ³	
η_M	Materialwirkungsgrad		
η_{Anl}	Anlagenwirkungsgrad		
η_{Ges}	Gesamtwirkungsgrad		
ρ	Dichte	kg/m ³	

0 Zusammenfassung

Durch das Vorhaben sollten Ansätze entwickelt und auf Umsetzbarkeit hin geprüft werden, um den Primärenergiebedarf und die CO₂ Emission bei der Herstellung von Warmumformteilen zu reduzieren. Dazu wurden 2 Wege verfolgt:

1. Materialreduzierung (Reduzierung des Materialüberschuss)
2. Steigerung der Energieeffizienz

Zu 1.: Die Materialreduzierung hat für die Reduzierung der Primärenergie und die CO₂ Emission eine große Hebelwirkung, weil nicht verbrauchtes Material weder erzeugt noch im Umformbetrieb erwärmt werden muss. Im Rahmen des Projektes wurde ein repräsentatives Teilespektrums (RTS) auf Grundlage einer entwickelten Formenordnung in geeignete Ordnungsklassen überführt und hinsichtlich optimaler Verfahrenswege und Werkzeugtechnologien im Sinne einer Benchmark bewertet. Auf dieser Grundlage wurde eine Potentialabschätzung durchgeführt mit dem Ergebnis, dass das RTS ein erwartetes Optimierungspotential von 803 to/a Stahl hat, was einer Primärenergiereduzierung von 6,87 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 1.271 to/a entspricht. Hochgerechnet auf die Branche Massivumformung ergibt sich ein erwartetes Einsparpotential von 106.080 to/a Stahl, was einer Primärenergiereduzierung von 908 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 167.967 to/a entspricht. Für die Übertragung in die Praxis konnte eine Verfahrens- und Technologieregel abgeleitet werden, die den Umformbetrieben hilft, die o.g. Potentiale zu heben. Die Umsetzbarkeit wird derzeit dadurch eingeschränkt, weil oftmals die erforderlichen Fertigungseinrichtungen in den Betrieben fehlen.

Zu 2.: Zur Steigerung der Energieeffizienz wurden im Rahmen des Projektes 3 Wege verfolgt: Sammlung und Leitung von Prozessenergie, Umwandlung von Prozessenergie in elektrischen Strom, alternative Erwärmung auf Basis der HTS-Technologie und Rückführung von Prozessenergie in den Prozess.

Bei der Sammlung und Leitung von Prozessenergie konnte auf Grundlage von Strömungsversuchen und CFD-Berechnungen verschiedene Energiesammelmodule entwickelt und bewertet werden mit dem Ergebnis, dass von der abgreifbaren Prozesswärme (ca. 240 kWh/to) ca. 24 bis 52 % gesammelt und einer Nutzung zugeführt werden können.

Für die Umwandlung von gesammelter Prozessenergie in elektrischen Strom wurden die Konzepte Stirling-Motor, ORC-Verfahren und thermoelektrische Generatoren (TEG) untersucht und technologisch sowie wirtschaftlich bewertet. Aufgrund der erreichbaren Prozesswärmtemperatur, des Wirkungsgrades der Wandlersysteme (ca. 5 bis 10% der zugeführten Energie), der Anlagenkosten und der derzeitigen Stromkosten ist keines der Systeme derzeit sinnvoll einsetzbar. Aufgrund der rasanten Entwicklung der TEG's bzgl. Kosten und Wirkungsgrad bieten diese Systeme allerdings für die Massivumformung ein Potential für die Zukunft.

Für die alternative Nutzung der thermischen Energie, wurden mobile Latentwärmespeicher betrachtet. Diese Art der thermischen Zwischenspeicherung ist unter heutigen Bedingungen bereits wirtschaftlich. Die Prozesswärme könnte mit einem Anteil von bis zu 46% einer erneuten Nutzung zugeführt werden. Das entspricht einem theoretischen

Einsparpotential an Primärenergie von 348 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 92.295 to/a.

Für die alternative Erwärmung von Stahl auf Basis der HTS-Technologie wurden Messungen an einer bestehenden Anlage und theoretische Berechnungen durchgeführt sowie ein Anlagenlayout für die Stahlerwärmung entwickelt und bewertet. Trotz des besseren Wirkungsgrades gegenüber der induktiven Erwärmung ist das HTS- Erwärmungsverfahren aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten und der sehr langen Taktzeit für Stahlwerkstoffe derzeit keine wirtschaftlich darstellbare Alternative zur induktiven Erwärmung. Ein Vorteil der HTS-Technologie ist seine Schnelligkeit; wegen der kurzen Verweildauer des einzelnen Werkstücks im Ofen ist mit weniger Zunderbildung zu rechnen.

Bei der Rückführung von Prozessenergie in den Prozess zur Vormaterialerwärmung wurde ein Durchströmungsmodul mit anschließender Temperaturhomogenisierungsstrecke (und gleichzeitiger Temperaturerhöhung mit Gas) auf Basis der Jet-Heating-Technologie entwickelt und bewertet, mit dem Ergebnis, dass von der rückführbaren Prozesswärme ca. 50% genutzt werden kann. Das entspricht zusammen mit der Ausgleichsstrecke einem theoretischen Einsparpotential an Primärenergie von 1.192 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 212.481 to/a.

Bei den Ergebnissen zu 1. sind die Unternehmen der Branche Massivumformung gehalten die Umsetzung auf ihre Produkte voranzutreiben.

Die erfolgversprechenden Ergebnisse zu 2. aus der Wissensphase des DBU-Projektes werden in einer Anwendungsphase des BMBF-Projektes (Erhöhung der Energieeffizienz in der Massivumformung) umgesetzt, indem Demonstratoren entwickelt, konstruiert und gebaut werden, und dann in praktischen Versuchen in Betrieben der Massivumformung eingesetzt und bewertet werden.

Kooperationspartner BMBF-Projekt:

- CDP Bharat Forge GmbH
- Mahle Brockhaus GmbH
- Hirschvogel Umformtechnik GmbH
- Zenergy Power GmbH
- Rasche Umformtechnik GmbH & Co. KG
- SMS Elotherm GmbH

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ 26966), wofür an dieser Stelle im Namen aller Beteiligten gedankt sei.

1 Einleitung

Die für die Herstellung der jährlichen deutschen Umformtonnage (2.340.000 to/a) benötigte Primärenergie ist im Folgenden dargestellt:

Primärenergiebedarf für die Herstellung von Umformteilen	
Stahlherstellung ⁽¹⁾	5827 kWh / to
Umformung ⁽²⁾	2732 kWh / to
Gesamtenergiebedarf	8559 kWh / to
<small>(1) Hochofen + Stahlwerk + Stranggießen + Walzwerk</small>	
<small>(2) Erwärmen + Umformen + Wärmebehandlung</small>	

Tabelle 1: Primärenergiebedarf für die Herstellung von Umformteilen

Diese riesigen Energiemengen werden nur in sehr geringem Umfang einer weiteren Nutzung zugeführt, sie werden schlichtweg in die Umgebung abgeführt.

Die bei der Herstellung von Umformteilen freigesetzte CO₂-Menge ist nachfolgend dargestellt:

CO ₂ Emission für die Herstellung von Umformteilen / Jahr	
CO ₂ Emission Stahlherstellung ⁽¹⁾	4.196.400 to CO ₂ / Jahr
CO ₂ Emission Erwärmung für Umformung ⁽²⁾	743.808 to CO ₂ / Jahr
CO₂ Emission gesamt⁽³⁾	4.940.208 to CO₂ / Jahr
<small>(1) 1345 kg CO₂ / to Rohstahl; Quelle: Stahl Online</small>	
<small>(2) Es wird unterstellt, dass die benötigte Erwärmungsenergie zu 100% durch Strom bereitgestellt wird. CO₂ Emission = 596 g / kWh, deutscher Strommix 2006, Quelle: Umweltbundesamt</small>	
<small>(3) Ohne Antriebsenergie der Umformmaschinen</small>	

Tabelle 2: CO₂ Emission für die Herstellung von Umformteilen

Aus energetischer-, umweltpolitischer und wirtschaftlicher Sicht ist die geschilderte Situation unakzeptabel.

Durch das Vorhaben soll der Materialüberschuss (von bis zu 40%) um ca. 1/3 reduziert werden. Übertragen auf die ganze Branche führt das zu folgenden Effekten:

	Materialüberschuss um 1/3 reduzieren
Einsparung Primärenergie ⁽¹⁾	2224 GWh/a
Einsparung CO ₂ Emission ⁽²⁾	411.667 to CO ₂ / Jahr
<small>(1) Jahrestonnage: 2.340.000 to/a; Materialüberschuss 25%;</small>	
<small>(2) Bezogen auf die CO₂ Emission aus der Stahlherstellung und der Erwärmung für Umformung</small>	

Tabelle 3: Energieeinsparpotential durch Materialreduzierung

Des Weiteren soll die bei der Erwärmung auf Umformtemperatur eingesetzte Energie um ca. 1/3 reduziert, zurückgewonnen oder einem zusätzlichen Nutzen zugeführt werden. Übertragen auf die ganze Branche führt das zu folgenden Effekten:

	Energie zur Erwärmung auf Umformtemperatur um 1/3 reduzieren
Einsparung Primärenergie (1)	1272 GWh/a
Einsparung CO2 Emission (2)	248.000 to CO2 / Jahr
(1) Jahrestonnage: 2.340.000 to/a; Materialüberschuss 25%; (2) Es wird unterstellt, dass die benötigte Erwärmungsenergie zu 100% durch Strom bereitgestellt wird. CO2 Emission = 596 g / kWh, deutscher Strommix 2006, Quelle: Umweltbundesamt	

Tabelle 4: Energieeinsparpotential durch Reduzierung der Erwärmungsenergie

Durch eine im 1. Halbjahr 2008 durchgeführte und vom Industrieverband Massivumformung e.V. finanzierte Vorstudie wurde als vorbereitende Maßnahme für ein Forschungsvorhaben das Ziel verfolgt, folgende Fragen zu beantworten:

1. Welche Energiemengen fallen auf welchem Niveau bei der Warmmassivumformung an?
 - ⇒ An 4 Pilotanlagen wurden Energiemessungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Prozessablauf durchgeführt. Hierdurch wurden die Stationen
 - Erwärmer
 - Gratschrott (Materialüberschuss)
 - Wärmebehandlung / gesteuertes Abkühlen (BY-Band)
 - Teilebehälter
 als hauptsächliche „Energieverlustquellen“ identifiziert (ca. 75% der eingesetzten Energie). Das jeweilige Energie- / Temperaturniveau wurde hierbei quantifiziert.

2. Welche Lösungen u./o. Konzepte gibt es in anderen energieintensiven Branchen hinsichtlich der Rückgewinnung der Prozesswärme?
 - ⇒ Es wurde in verschiedenen energieintensiven Branchen (Zementindustrie, Chemische Industrie, Metallerzeugung und –verarbeitung, Papiererzeugung, Energieversorgung) Lösungen / Lösungsansätze zur Rückgewinnung der Prozesswärme recherchiert. Hierbei wurden folgende Schwerpunkte festgestellt:
 - Niedertemperaturverstromung mit ORC bzw. Kalina
 - Wärmetauscher zur Warmwasser- und Raumheizung
 - Fernwärmeversorgung
 - Abwärmenutzung zur Vorwärmung von Verbrennungsluft
 - Abwärmenutzung zur Erzeugung elektrischer Energie mittels Kondensationsturbine
 - Kälteerzeugung durch Absorptionskältemaschinen
 - Latentwärmespeicher
 - Hochtemperatur-Supraleiter-Technologie (HTS) zur Vormaterialerwärmung bei Buntmetallen

3. Welche der Systeme sind unter welchen Bedingungen mit welcher zu erwartenden Effizienz in der Warmmassivumformung nutzbar?
- ⇒ Eine Vorbewertung hat gezeigt, dass Niedertemperaturverstromungssysteme (z.B. ORC, Kalina etc.) geeignet erscheinen, um eine Energierückführung der Prozesswärme in Nutzenergie zu erreichen.
Weiterhin konnte ein alternatives Erwärmerkonzept durch Hochtemperatur-Supraleiter-Technologie (HTS) identifiziert werden, das mit einem signifikant besseren Wirkungsgrad arbeitet, bisher aber nur für nichtmagnetische Werkstoffe entwickelt und in Einsatz gebracht wurde.
Eine grobe Wirtschaftlichkeitsbewertung hat ergeben, dass die Massivumformindustrie unter günstigen Bedingungen eine Steigerung der Energieeffizienz um ca. 22 Mio. € bzw. ca. 700 GWh Primärenergie pro Jahr erreichen kann (bewertet zu heutigen Stromkosten von ca. 10 Cent/kWh).

Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojektes sollen Möglichkeiten zur direkten und indirekten Energiereduzierung bei der Warmmassivumformung entwickelt und erprobt werden. Hierzu werden die folgenden Wege verfolgt:

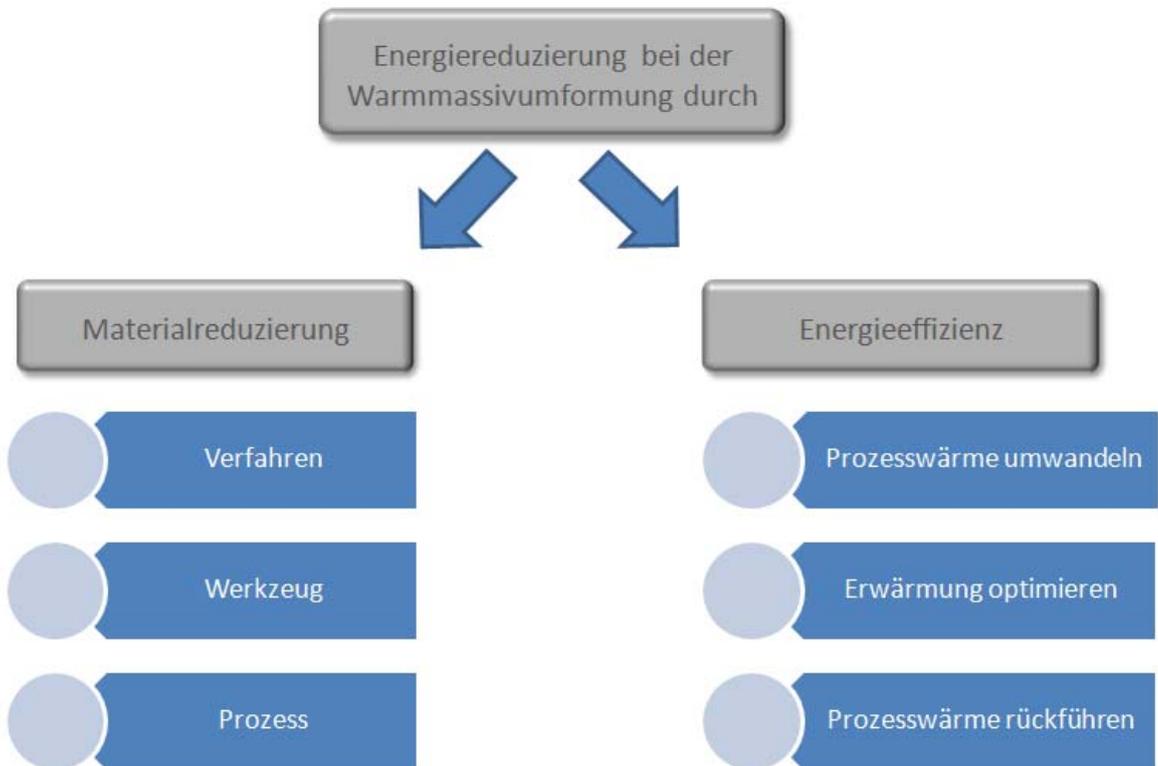


Bild 1: Übersicht der Projektansätze

Teilprojekt Materialreduzierung

Dieses Teilprojekt dient der Entwicklung von Maßnahmen, um den Materialeinsatz sowie die Prozessenergie für die Massivumformung zu reduzieren. Die Ergebnisse sollen in Konstruktions- und Verfahrensregeln abgebildet werden, um sie für die betriebliche Praxis anwendbar zu machen.

Teilprojekt Energieeffizienz

Dieses Teilprojekt dient der Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen, um die Energie zur Erzeugung der Prozesswärme zu reduzieren bzw. diese für den Prozess wieder zu nutzen. Hierfür werden die folgenden sich ergänzenden Wege verfolgt:

- 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.

2 Vorhabensdurchführung

2.1 Teilprojekt Materialreduzierung

Bei der Herstellung von Massivumformprodukten geht heute bis zu 40 % des eingesetzten Materials während des Herstellungsprozesses verloren. Gelingt es, diesen Materialüberschuss, wie in Bild 2 gezeigt, deutlich zu reduzieren, können einerseits erhebliche Materialressourcen und andererseits erforderliche Erwärmungsenergie für den Umformprozess eingespart werden.

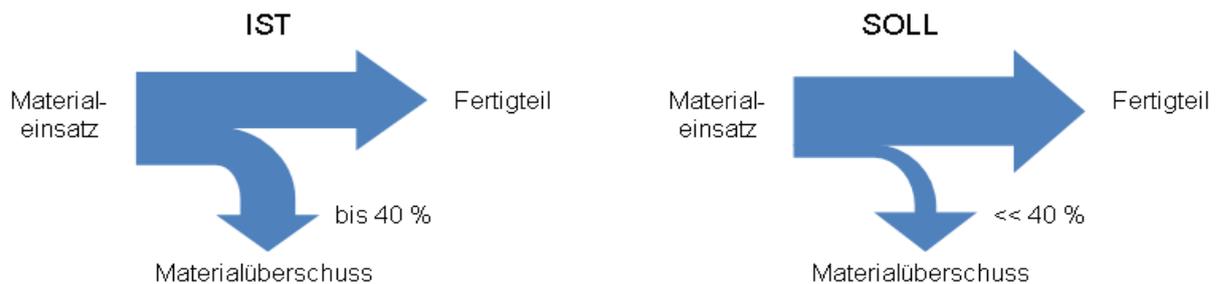


Bild 2: Materialüberschuss

Der Materialüberschuss setzt sich dabei zusammen aus dem Gratanteil und dem Lochanteil. Die Materialökonomie lässt sich in Form des Materialwirkungsgrades (MWG) η_M ausdrücken:

$$\eta_M = \frac{m_{FT} + m_L}{m_E} \quad 0 < \eta_M \leq 1$$

Dabei bezeichnen:

m_{FT}	Masse Fertigteil [kg]
m_L	Masse Lochtaler [kg]
m_E	Einsatzmasse [kg]

Das Teilprojekt Materialreduzierung dient der Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen, um den Materialeinsatz für die Massivumformung zu reduzieren. Im Rahmen dieses Projektarbeitspunktes wurde im Wesentlichen auf der Basis eines repräsentativen Teilespektrums auf betriebliche Daten der Bauteile und Prozesse zurückgegriffen, die zur Vergleichbarkeit in geeignete Klassen zusammengefasst werden.

In einer „Verfahrens-Benchmark“ wurden dann die Bauteile innerhalb der einzelnen Klassen miteinander verglichen. Der Grundgedanke dabei ist, dass sich beim Vergleich der „besten“ mit den „schlechtesten“ Teilen in Bezug auf den MWG Gründe finden und sich daraus optimale Umformverfahren und Werkzeugkonzepte ableiten lassen.

2.1.1 Untersuchungsmatrix / Teilespektrum

Der Materialüberschuss ist im Wesentlichen von folgenden 4 Faktoren abhängig:

- der Bauteilgeometrie
- den Umformverfahren und deren Verkettung
- der Werkzeuggeometrie
- dem verwendeten Halbzeug

Der Untersuchungsraum spannt sich in zwei Dimensionen auf. Die erste Dimension bilden die repräsentativen Bauteile, die zweite Dimension stellen die Parameter dar. Insgesamt entsteht damit eine Untersuchungsmatrix in Form einer Tabelle.

Bei der Auswahl der Bauteile war darauf zu achten, dass:

- Bauteile mit unterschiedlichen Geometrien (Formkomplexität),
- mit unterschiedlichen Umformverfahren und
- unterschiedlichen Werkzeugkonzepten

in einem repräsentativen Teilespektrum ausgewählt werden.

Untersucht wurden 92 Artikel.

Für die Auswahl der Parameter war maßgeblich:

- Welche Parameter könnten einen Einfluss auf den Materialwirkungsgrad haben?
- Welche Parameter können für eine Klassifizierung der Bauteile sinnvoll sein?
- Welche Parameter beschreiben die eingesetzten Konstruktions- und Fertigungsverfahren, sowie die Werkzeugkonzepte?

Für die Untersuchungsmatrix wurden 48 Parameter abgeleitet, die sich den folgenden Bereichen zuordnen lassen:

- Artikeldaten / Fertigteil
- Halbzeug
- Bauteilgeometrie
- Stadienfolge / Umformstufen
- Umformverfahren
- Werkzeugauslegung
- Umformanlage
- Materialüberschuss

Die verwendeten Parameter sind in Anhang 1 dargestellt.

In Zusammenarbeit mit den Firmen

- CDP Bharat Forge,
- Hammerwerk Fridingen,
- Jung Boucke,
- MAHLE Brockhaus,
- Rasche Umformtechnik und
- Seissenschmidt

wurde ein „repräsentatives Teilespektrum“ mit insgesamt 92 Artikeln zusammengestellt. Die Parameter wurden aus artikelspezifischen Bestandsdaten und der laufenden Produktion erfasst. Aus den Parametern wurden zusätzliche kennzeichnende Größen gebildet, wie z.B. der Materialwirkungsgrad, Oberfläche / Volumen, etc.

2.1.2 Einteilung des Teilespektrums in Formenordnung

Um aus den erfassten Daten optimale Prozesswege identifizieren zu können, müssen vergleichbare Bauteile in Klassen zusammengefasst werden, weil sonst Dinge miteinander verglichen werden, die nicht vergleichbar sind. Hierzu bedient man sich üblicherweise s. g. Formenordnungen. Nachfolgende Formenordnungen wurden in der Vergangenheit für die Gesenkschmiedetechnik entwickelt:

- Formenordnung nach Spies
- Formenordnung nach Schmieder

Neben diesen Formenordnungen wurden folgende Kenngrößen der Bauteilgeometrie als Grundlage für die Bildung von geeigneten Ansätzen zur Klassifizierung verwendet:

- Rotationssymmetrie
- Feingliedrigkeit
- Abgeleitete Bauteilkenngrößen

In den folgenden Abschnitten werden die Formenordnungen und die untersuchten Kenngrößen näher erläutert.

2.1.2.1 Formenordnung Spies

Die Formenordnung nach Spies [Spies57] ist eine schon länger in der Massivumformung bekannte Ordnung zur Klassifizierung von Bauteilen. Hierbei werden die 3 Formklassen gedrungene Form, Scheibenform, Langform unterschieden.

Innerhalb der Formklassen wird nach Lage der Nebenformelemente zwischen Formengruppen unterschieden. Innerhalb der Formengruppen wird nach Art der Nebenformelemente zwischen Untergruppen unterschieden. Bei Langformen wird zusätzlich zwischen 4 Längengruppen unterschieden. Insgesamt ergeben sich daraus 73 Klassen, die mit einer 3- bzw. bei Langformen 4-stelligen Zahl bezeichnet werden.

Wegen der hohen Zahl an Klassen war die Anwendung der Formenordnung nach Spies in voller Tiefe nicht sinnvoll. Für die Bildung von Ansätzen wurden daher die 3 Formklassen und die Punkte verwendet.

2.1.2.2 Formenordnung nach Schmieder

Die Formenordnung nach Schmieder [Schm88] ist ein neuerer Ansatz zur Klassifizierung von Bauteilen. Er ordnet jedem Bauteil einen 6-stelligen Code aus Ziffern und/oder Buchstaben zu. Die erste Codestelle bezeichnet eine von 25 Formklassen (A-Z).

Dabei wird zunächst zwischen den 3 Hauptkategorien Rotationsteile, Grundformteile und Kombinationsteile unterschieden. Bei Grundformteilen wird weiter zwischen rotationssymmetrischer Grundform und nicht-rotationssymmetrischer (prismatischer) Grundform unterschieden. Dann folgt eine weitere Aufteilung nach dem Verhältnis der Hauptabmessungen (A und B) in gedrungene Form, Langform und Flachform. Für Kombinationsteile in gedrungener bzw. Flachform wird nach Lage der Teilungsfläche (TF) und bei Langformen nach Lage der Hauptachse (HA) differenziert. Die Codestellen 2 bis 6 beschreiben sehr detailliert weitere geometrische Eigenschaften, wie z.B. Außen-, Innen-, Stirnseitenkontur, Symmetrieabweichungen, Längen-, Dickenverhältnisse und Nebenformelemente. Für jede Formklasse ergeben sich mit den Codestellen 2 bis 6 mindestens 30.000, insgesamt mehr als 20.000.000 Kombinationen.

Auch hier war die Anwendung der Formenordnung in voller Tiefe wegen der extrem großen Zahl an Klassen nicht sinnvoll. Für die Bildung von Ansätzen wurde daher nur die erste Codestelle verwendet.

2.1.2.3 Rotationssymmetrie

Rotationssymmetrische Bauteile weisen eine geringere Formenvielfalt auf und haben im Durchschnitt einen deutlich höheren Materialwirkungsgrad, wie [Bild 3](#) zeigt.

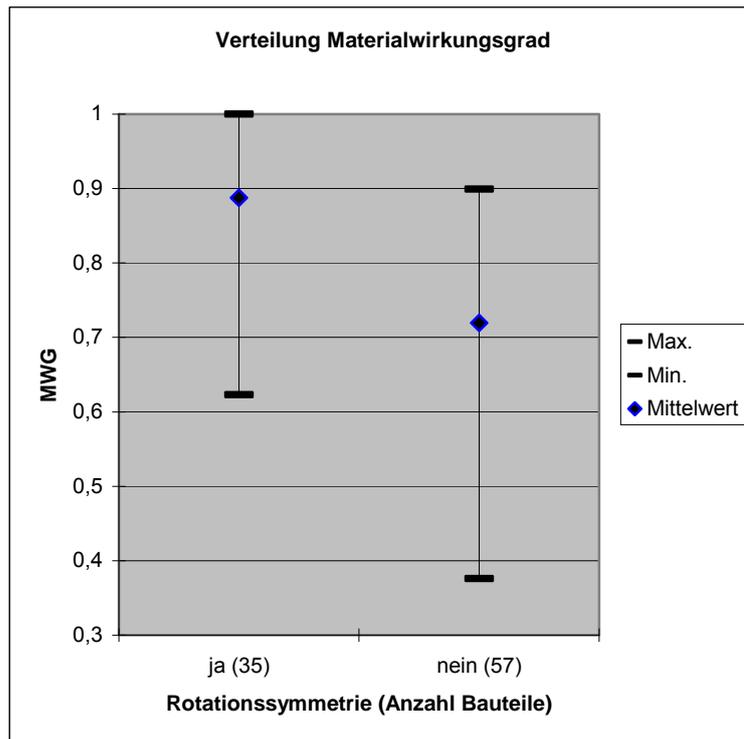


Bild 3: Verteilung des MWG in Bezug auf Rotationssymmetrie

Daher wurden die Bauteile zunächst grundsätzlich in zwei Gruppen aufgeteilt und klassifiziert:

- Rotationssymmetrische Bauteile
- Fassonteile

Dabei gelten Bauteile als rotationssymmetrisch, wenn sie entweder im strengen geometrischen Sinn oder im Wesentlichen, d.h. bis auf Nebenformelemente, rotationssymmetrisch sind und die Rotationsachse parallel zur Schmiederichtung liegt.

2.1.2.4 Feingliedrigkeit

Der Feingliedrigkeitsfaktor ist eine dimensionslose Größe und wird über das Verhältnis der Masse des Fertigteils zur Masse des Hüllkörpers definiert:

$$S = \frac{m_{FT}}{m_{HK}}$$

Dabei bezeichnen:

- | | |
|----------|-------------------------|
| S | Feingliedrigkeitsfaktor |
| m_{FT} | Masse Fertigteil [kg] |
| m_{HK} | Masse Hüllkörper [kg] |

Aus dem Feingliedrigkeitsfaktor werden vier Gruppen gebildet:

S1 für $0,63 < S \leq 1$

S2 für $0,32 < S \leq 0,63$

S3 für $0,16 < S \leq 0,32$

S4 für $0 < S \leq 0,16$

2.1.2.5 Weitere Bauteilkenngrößen

Aus Oberfläche und Volumen von Fertigteil und Ausgangsmaterial wurden noch weiterer Bauteilkenngrößen definiert und daraufhin analysiert, ob sie einen Beitrag für einen Klassifizierungsansatz leisten können:

Oberfläche zu Volumen des Fertigteils:

$$AV = \frac{A_{FT}}{V_{FT}}$$

Nachteil dieser Kenngröße ist, dass sie nicht dimensionslos ist. Durch Normierung gelangt man zur dimensionslosen Variante:

$$AV_{norm} = \frac{A_{FT}}{V_{FT}} \cdot \sqrt[3]{V_{FT}}$$

Oberfläche Knüppel mit/ohne Grat zu Oberfläche Fertigteil:

$$AA_{oG} = \frac{A_{KoG}}{A_{FT}} \quad AA_{mG} = \frac{A_{KmG}}{A_{FT}}$$

Sphärizität Fertigteil:

$$Sp = \frac{A_{Kugel}}{A_{FT}}$$

Dabei bezeichnen:

A_{FT}	Oberfläche Fertigteil [mm^2]
V_{FT}	Volumen Fertigteil [mm^3]
A_{KoG}	Oberfläche Knüppel ohne Grat [mm^2]
A_{KmG}	Oberfläche Knüppel mit Grat [mm^2]
A_{Kugel}	Oberfläche der zum Fertigteil volumengleichen Kugel [mm^2]

Da eine Kugel unter allen volumengleichen Körpern derjenige mit der geringsten Oberfläche ist, gilt: $0 < Sp \leq 1$. Für kompakte Teile liegt der Wert nahe 1.

2.1.2.6 Stoffflusskomplexität

Den bekannten Formenordnungen von Spies und Schmieder ist gemeinsam, dass sie überwiegend auf rein geometrischen Informationen des Bauteils aufsetzen. Die fertigungstechnische Komplexität und der Materialwirkungsgrad beim Gesenkschmieden hängen aber von zwei wesentlichen Faktoren ab:

- Der Stoffflusskomplexität, d.h. die Vielfältigkeit unterschiedlicher Richtungen in die der Stoff fließen muss um eine Werkzeugfüllung sicherzustellen.
- Der Strecke, die der Stoff innerhalb der Werkzeugkavität in einer jeweiligen Richtung zurücklegen muss.

Im Rahmen der Entwicklung wurde zur Beurteilung der Stoffflusskomplexität der Fassonteile die Klassifizierung nach Spies verwendet.

Für die rotationssymmetrischen Teile bot sich das nicht an, weil die Klassifizierung nach Spies hierfür zu grob ist. Hier wurde ein priorisiertes Klassifizierungsschema nach Vorwärts-, Rückwärts- und Querfließpressen (siehe Tabelle 5) entwickelt, was man als eine sinnvolle und notwendige Erweiterung der Klassifizierung nach Spies verstehen kann.

Klasse	Stoffflusspriorität		
	1	2	3
RH 1	Q		
RH 2	Q		V
RH 3	Q	R	
	Q	V	
RH 4	Q	V	R
	Q	R	V
RH 5	V	Q	
RH 6	V	R	
RH 7	V	R	Q

Stofffluss:
 Q = Querfließen
 V = Vorwärtsfließen
 R = Rückwärtsfließen

Tabelle 5: Stoffflusskomplexität

Zur Beurteilung der Strecke, die der Stoff innerhalb der Werkzeugkavität in einer jeweiligen Richtung zurücklegen muss, wurde der Feingliedrigkeitsfaktor verwendet. Dieser skalare Wert liefert auf einfache Weise eine Information über die Massenverteilung des Schmiedeteils und damit über den Stoffflussweg.

2.1.2.7 *Untersuchte Ansätze*

Aus den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Kriterien wurden Ansätze für die Klassifizierung der Bauteile gebildet durch:

- Auswahl der Kriterien
- Modifikation der Kriterien
- Kombination (Berechnung, Kreuzprodukt, etc.)

Folgende Ansätze wurden gebildet und untersucht:

Ansatz 1: Formenklasse Spies x Feingliedrigkeitsgruppe

Dieser Ansatz wird aus dem Kreuzprodukt der Formenklasse Spies (GF = gedrungene Form, SF = Scheibenform, LF = Langform) und der Feingliedrigkeitsgruppe (1 für S1 bis 4 für S4) gebildet. Dabei entstehen insgesamt 12 Klassen.

Ansatz 2: Schwierigkeit aus der Formenordnung Spies

Dieser Ansatz wird aus Schwierigkeit nach Spies (Punkte 1 bis 4) gebildet, wobei 4 Klassen entstehen.

Ansatz 3: Formschwierigkeit

Dieser Ansatz wird aus der Summe der Schwierigkeit nach Spies (Punkte 1 bis 4) und der Feingliedrigkeitsgruppe (1 für S1 bis 4 für S4) gebildet. Dabei entstehen die 7 Klassen 2 bis 8.

Ansatz 4: Erste Codestelle Formenordnung Schmieder

Bei diesem Ansatz wird die erste Codestelle aus der Formenordnung Schmieder verwendet. Dabei entstehen 25 Klassen (A bis Z ohne O).

Ansatz 5: Schwierigkeit aus der Formenordnung Spies x Feingliedrigkeitsgruppe

Dieser Ansatz wird aus dem Kreuzprodukt der Schwierigkeit nach Spies (Punkte 1 bis 4) und der Feingliedrigkeitsgruppe (S1 bis S4) gebildet. Dabei entstehen insgesamt 16 Klassen.

Ansatz 6: Methode des planvollen Auswählens (Erfahrungswissen)

Dieser Ansatz wurde speziell für rotationssymmetrische Teile gebildet und fasst die Bauteile nach Erfahrungswissen zu 7 Klassen vergleichbarer Teile zusammen.

Ansatz 7: Stoffflusskomplexität

Dieser Ansatz wurde speziell für rotationssymmetrische Teile entwickelt und bildet 7 Klassen (RH 1 bis RH 7) nach der Komplexität des Stoffflusses.

Ansatz 8: Stoffflusskomplexität x Feingliedrigkeitsgruppe

Dieser Ansatz wird aus dem Kreuzprodukt der Stoffflusskomplexität (RH 1 bis RH 7) und der Feingliedrigkeitsgruppe (1 für S1 bis 4 für S4) gebildet. Dabei entstehen insgesamt 28 Klassen.

2.1.2.8 *Klassifizierung*

Auf der Basis der erfassten Daten wurden die Bauteile für jeden Ansatz klassifiziert. Dabei wird für jeden Ansatz jedem Bauteil genau eine Klasse zugeordnet.

2.1.2.9 Bewertung der Ansätze

Die Ansätze wurden zunächst nach folgenden Kriterien auf Basis des repräsentativen Teilespektrums bewertet:

1. Umformverfahren und Werkzeugkonzepte des jeweils Klassenbesten sollten auf alle Bauteile innerhalb der jeweiligen Klasse augenscheinlich übertragbar sein.
2. Die Range des MWG sollte innerhalb einer jeden Klasse hinreichend groß sein.

Für den ersten Punkt wurden klassenspezifische Bildübersichten erstellt und begutachtet. Grundlage für den zweiten Punkt waren Diagramme, in denen für jede Klasse das Minimum, das Maximum und der Mittelwert des MWG dargestellt sind.

Da es bei rotationssymmetrischen Bauteilen 4 Ansätze gab, die die beste Bewertung erhalten haben, wurde durch klassenspezifischen Vergleich der Bauteile die am besten geeignete Klassifizierung ermittelt. Dabei wurde untersucht, wie gut sich die Unterschiede im MWG in jeder Klasse erklären lassen.

2.1.3 Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung

Für die Ermittlung der notwendigen Einsatzmassen wurde für jedes Bauteil die Einsatzmasse zunächst in die Anteile für Fertigteil, Überschuss Grat und Überschuss Lochtaler aufgeteilt. Der Anteil für den Überschuss Grat wurde für jedes Bauteil vom „Klassenbesten“ übernommen, d.h. von dem Bauteil in der Klasse, das den kleinsten prozentualen Anteil für den Überschuss Grat aufweist. Aus der Summe dieser drei Größen wurde dann die notwendige Einsatzmasse berechnet. In Tabelle 6 ist ein Beispiel dargestellt.

	Klassenbester		Bauteil IST		Bauteil optimiert	
	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
Einsatzmasse	1,378	100,0	0,858	100,0	0,752	100,0
Fertigteil	1,170	84,9	0,650	75,7	0,650	86,4
Grat	0,164	11,9	0,208	24,3	0,102	13,6
Lochtaler	0,044	3,2	0,000	0,0	0,000	0,0
		$11,9 / 100 * 0,858$		=	0,102	

Tabelle 6: Beispiel für die Ermittlung der minimal notwendigen Einsatzmasse

Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass der MWG des jeweils Klassenbesten prinzipiell erreichbar sein sollte.

Durch eine Übertragung dieser Ergebnisse des untersuchten Teilespektrums auf Kennzahlen der gesamten Branche wurden die Potentiale in Bezug auf die Einsparung von Material, Erwärmungsenergie und die CO₂-Emission berechnet.

2.1.4 Erstellen alternativer Fertigungswege- und Verfahren

Die am besten bewerteten Ansätze (Ansatz 8 für rotationssymmetrische Bauteile und Ansatz 5 für Fassonteile) wurden weiter untersucht. Bei der klassenspezifischen Analyse ging es darum, die Bauteile mit hohem und niedrigem MWG in jeder Klasse miteinander zu vergleichen und die Einflussgrößen zu identifizieren, die für diese Unterschiede augenscheinlich maßgebend sind.

2.1.5 Konstruktions- und Verfahrensregeln

Auf Grundlage der Ergebnisse aus 2.1.4 soll versucht werden, geeignete Konstruktions- und Verfahrensregeln zu erstellen.

2.1.6 Evaluierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden den einzelnen Firmen vorgestellt und erläutert. Nach kritischer Diskussion mit den Experten wurden die Ergebnisse aus Sicht der einzelnen Firma bewertet.

2.1.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Mit den in Abschnitt 2.1.3 ermittelten Ergebnissen bezogen auf die Einsparung von Material und Erwärmungsenergie wurden die sich daraus ergebenden Potentiale für die Reduzierung der Energie und der Kosten berechnet.

2.2 Teilprojekt Steigerung der Energieeffizienz

2.2.1 Nutzung der Prozesswärme zur Erzeugung elektrischer Energie

2.2.1.1 Energiebündelung

Das Ziel der Energiebündelung ist einen möglichst großen Anteil der von den Produktions- teilen nach dem Umformprozess abgegebenen Wärmeenergie zu nutzen, auf ein anderes Medium zu übertragen und zu „bündeln“, um sie dann einem Energiewandler zuzuführen.

Die Besonderheiten der Stückgutproduktion bei der Warmmassivumformung erfordern unterschiedliche Strategien zum Energietausch/-umwandlung.

Prinzipiell können folgende Abgrenzungen getroffen werden:

- 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 BY (gesteuertes Abkühlen)
Bei diesem Verfahrensschritt muss ein materialabhängiges Temperatur-Zeit- Gefälle eingehalten werden, was bei den Maßnahmen zum Energieaustausch besonders berücksichtigt werden muss.
- Energieverluste bei der Wärmebehandlung / Schmiedeblockerwärmer mit fossilen Brennstoffen
Die Verlustenergie fällt hier bereits in gebündelter Form an (Abluft bzw. Abgas).

Aufgrund der oben beschriebenen Besonderheiten der Stückgutfertigung kommt als Trägermedium für die Energiesammlung bevorzugt Luft in Frage. Unter bestimmten Voraussetzungen sind aber auch andere Medien wie z. B. Wasser möglich.

Es wurden unterschiedliche Arten der Energiebündelung erarbeitet und zu einem modularen Gesamtkonzept zusammengestellt.

Aus der Problematik der Durchströmung einer Schüttung (s. Bild 4) heißer Produktionsteile blieben folgende Fragestellungen offen:

- Wie hoch ist der Druckverlust in einer Schüttung?
- Welches Temperaturniveau kann mit dem Wärmeträger Luft erreicht werden?
- Wie ist der zeitliche Abkühlverlauf?
- Welche Wärmeleistung kann übertragen werden?
- Welche Wärmemenge kann übertragen werden?

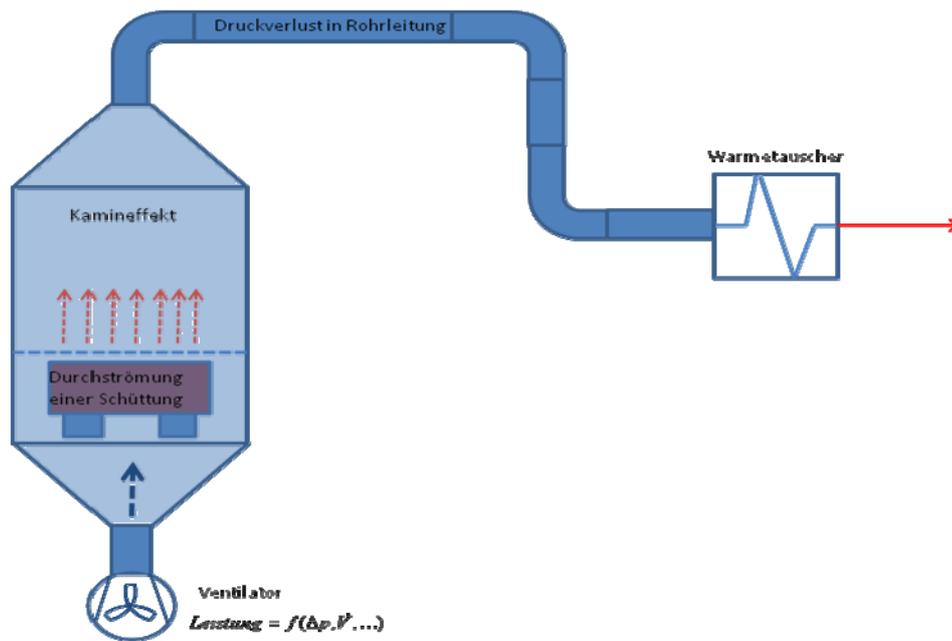


Bild 4: Prinzipdarstellung der Energiesammlung und -leitung

Zur Klärung dieser Fragestellungen wurde ein spezieller Versuchsaufbau im strömungstechnischen Labor der Fachhochschule Südwestfalen realisiert.

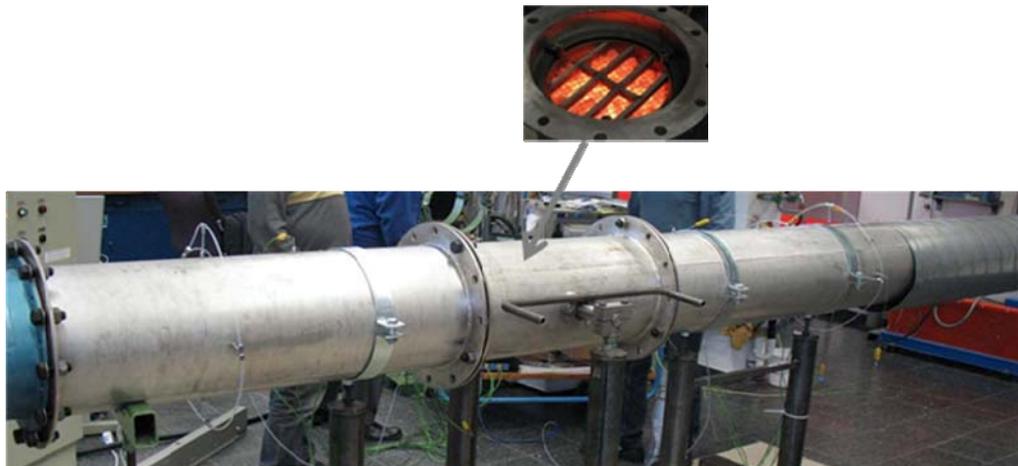


Bild 5: Versuchsaufbau Strömungskanal

Bei einem Abkühlband / BY-Band ist unklar, welche Leistung bei welchem Temperaturniveau an Luft übertragen werden kann.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden in einem Schmiedebetriebe Temperaturmessungen durchgeführt (s. Bild 6)

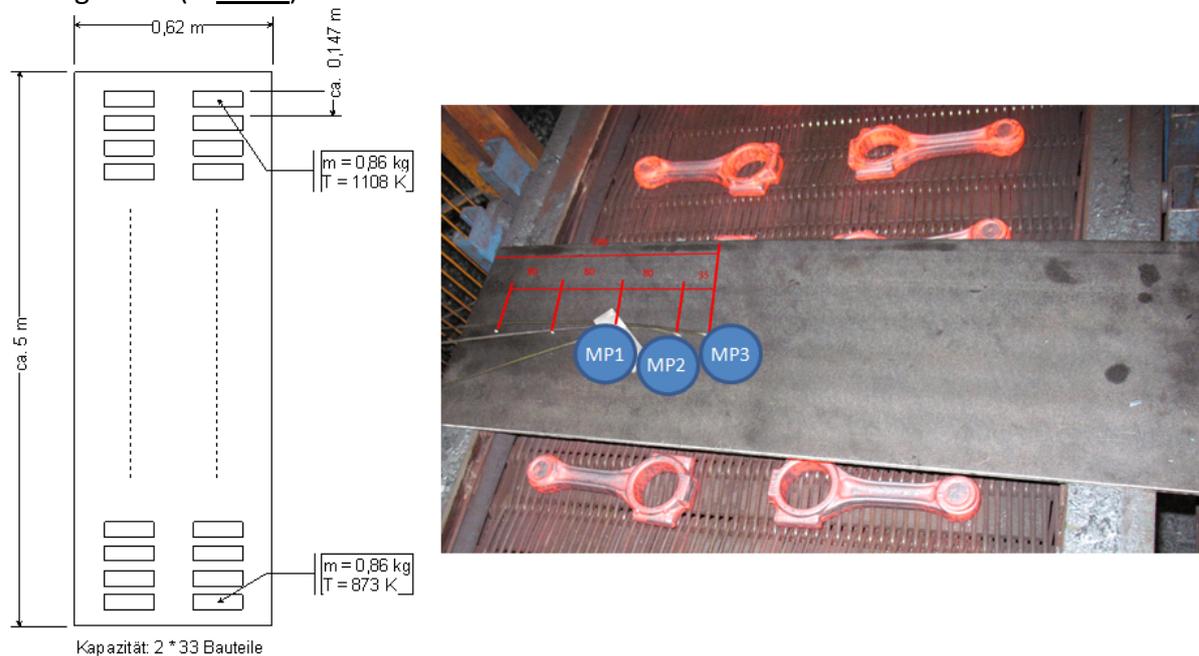


Bild 6: Messaufbau zur Temperaturmessung an einem BY-Band

Ausgehend von diesen Messergebnissen konnten dann Computational Fluid Dynamics (CFD) Berechnungen durchgeführt werden, um

- den möglichen Volumenstrom und
- die mögliche Lufttemperatur

zu bestimmen.

2.2.1.2 Energieleitung

Um die „gesammelte“ Energie verwerten zu können, muss das Wärmeträgermedium zum Energieumwandler geleitet werden.

Für den Transport des Wärmeträgermediums ist ein zusätzlicher Antrieb (z.B. Ventilator) notwendig. Dieser Antrieb benötigt zum Betrieb eine Energiezufuhr (z.B. Strom). Die notwendige Leistung des Antriebs ist unter anderem von den im Rohrleitungssystem auftretenden Druckverlusten abhängig, die wiederum von den Prozessparametern (z.B. Temperatur, Geschwindigkeit etc.) und der Auslegung des Rohrleitungssystems abhängig sind.

Zusammengefasst treten in einem Rohrleitungssystem die folgenden Energieverluste auf:

- Wärmeverluste des Trägermediums
- Druckverluste (und somit Energiebedarf für den Antrieb)

Diese Energieverluste müssen möglichst niedrig gehalten werden.

Hierfür wurden für gerade Rohre und Rohrbögen bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern Druckverlustberechnungen durchgeführt.

Des Weiteren wurden die Wärmeverluste für isolierte Rohre quantifiziert.

2.2.1.3 Messstrategie

Zur Bewertung der Energiebündelung/-leitung muss die Wärmemenge/-leistung des Energieträgers (Luft) gemessen werden. Die Wärmeleistung des Luftstromes kann indirekt über die Luftmenge und –temperatur bestimmt werden.

$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T$$

\dot{Q} = Wärmestrom

c_p = spezifische Wärmekapazität

\dot{m} = Massenstrom

ΔT = Temperaturdifferenz

Der Massenstrom \dot{m} kann bei bekanntem Kanalquerschnitt durch die Luftgeschwindigkeit und die temperaturabhängige Luftdichte ermittelt werden.

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \rho$$

v = Luftgeschwindigkeit

A = Kanalquerschnitt

ρ = Luftdichte (temperaturabhängig)

Fazit:

Um den Wärmestrom ermitteln zu können benötigt man die Luftgeschwindigkeit und die Temperatur des Luftstroms. Hierfür wurde eine Messstrategie erarbeitet.

2.2.1.4 Energie umwandeln

In Tabelle 7 sind die verfügbaren Wärmeinhalte verschiedener Bauteile bei unterschiedlichen Ablegetemperaturen zunächst abgeschätzt worden.

Teil	m kg	Taktzeit s	Gratanteil %	$\dot{m}_{\text{Fertigteile}}$ kg/h	Wärmestrom Fertigteile bei [°C]			
					300 KW	500	800	1000
A	1,4	9,7	38,6%	319	12,9	22,1	36,0	45,2
B	3,38	13	31,6%	641	25,9	44,4	72,2	90,7
C	9,9	14	25,3%	1903	77,0	131,9	214,4	269,4
D	34,1	23,8	12,0%	4538	183,5	314,6	511,3	642,4

Tabelle 7: Wärmeinhalte verschiedener Bauteile

In der Regel beträgt die Bauteiltemperatur nach dem Abgraten noch ca. 1000°C. Unter der Annahme, dass bei diesem Temperaturniveau ca. 50% der Leistung auf Luft übertragen werden kann, stehen für einen Energieumwandler **ca. 20 bis 320 kW** zur Verfügung. Desweiteren wird angenommen, dass die Lufttemperatur nach der Wärmeübertragung eine mittlere Temperatur von **200 °C** erreicht. Somit kann ein Volumenstrom von **330 bis 5300 Nm³/h** realisiert werden.

Mit diesen Randbedingungen wurde recherchiert, welche am Markt verfügbaren Energieumwandler prinzipiell in Frage kommen. Diese Energieumwandler wurden in das modulare Gesamtkonzept integriert. Des Weiteren wurden die Anlagentypen der identifizierten Systeme hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

Folgende Kenngrößen wurden für die als geeignet eingestuften Anlagentypen zusammengestellt:

- Ausgangsleistung
- aufgenommene Leistung
- Eingangstemperatur
- Massenstrom
- Gesamtwirkungsgrad elektrisch (wenn möglich)
- Anlagenwirkungsgrad elektrisch (Herstellerangabe)

Die Definition der beiden angegebenen Wirkungsgrade verdeutlicht das folgende Bild.

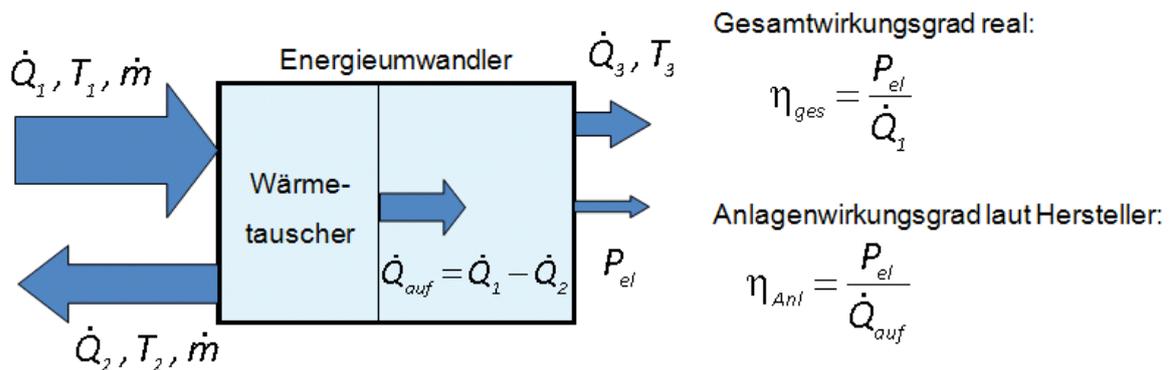


Bild 7: Wirkungsgrad Energieumwandler

2.2.1.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen Systeme wurden folgende Komponenten berücksichtigt:

- Erträge aus der Energieumwandlung
- Investitionskosten (Afa und Zinsen)
- Kosten für Instandhaltung und Reparatur
- Eigenenergieverbrauch des Energieumwandler
- Raumkosten

Hierdurch lassen sich die verschiedenen Systeme wirtschaftlich miteinander vergleichen.

2.2.2 Sonstige Nutzung der Prozesswärme

Neben der Umwandlung der Prozesswärme in Strom wurden auch einige Abschätzungen zur thermischen Nutzung der Prozesswärme durchgeführt.

2.2.3 Reduzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung

2.2.3.1 HTS Anlage evaluieren

In diesem Arbeitspunkt wird eine vorhandene HTS Anlage (zur Erwärmung von Aluminium) evaluiert, um die tatsächliche Energieeffizienz zu quantifizieren und die Integration in eine Fertigungslinie zu beurteilen.

Zur Ermittlung der Energieeffizienz bzw. des Wirkungsgrades der HTS Anlage wurden die folgenden Versuchsserien durchgeführt:

Versuchsserie 1 – Temperatur und Leistungsmessung an 4 geschwärtzten Proben:

Es wurden 4 Materialproben (AlMgSi 0,5) in Serienabmessungen ($D=143\text{ mm}$ und $L=690\text{ mm}$) erwärmt. Gleichzeitig wurde die benötigte elektrische Leistung in Abhängigkeit der Zeit gemessen.

Direkt nach der Erwärmung wurden an den Proben Temperaturmessungen durchgeführt. Anhand der gemessenen Temperatur wurde die in den Proben enthaltene Wärmeenergie berechnet.

Für die Temperaturmessungen wurden die 4 Proben im Vorfeld mit 6 Bohrungen für Thermoelemente versehen (s. Bild 8).

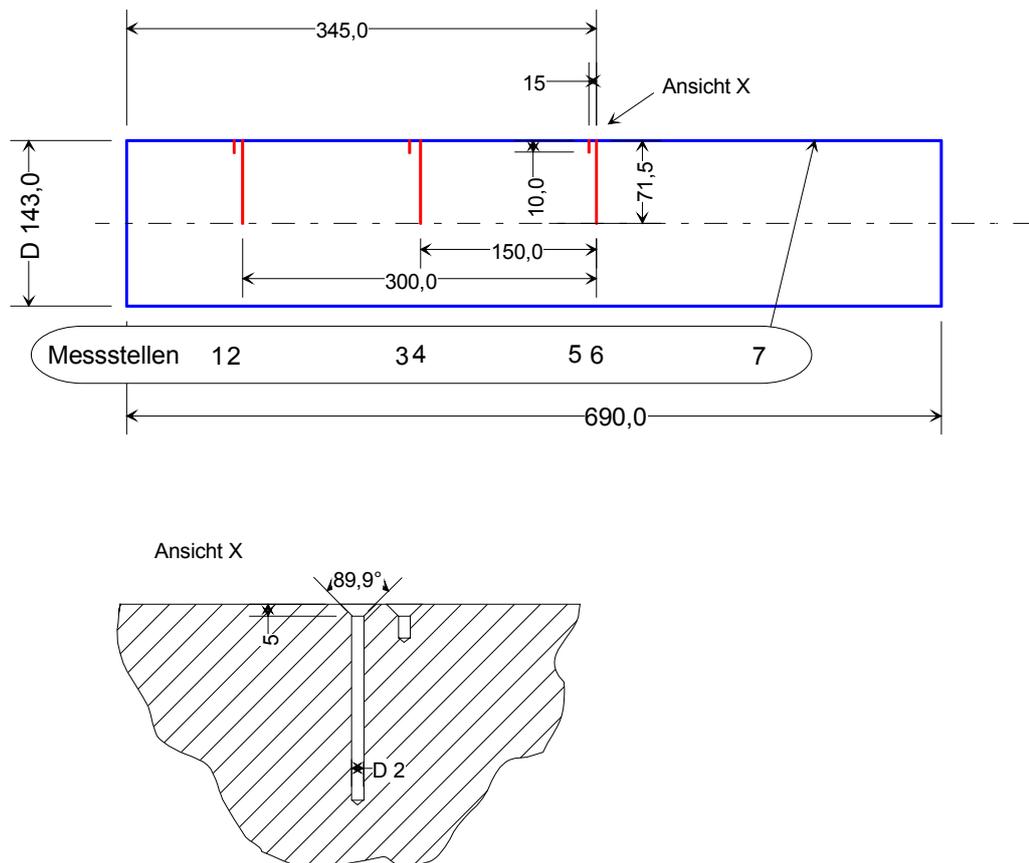


Bild 8: Anordnung Thermoelemente

Zusätzlich wurde die Oberflächentemperatur mit einem Thermodraht und mit einer Thermographiekamera gemessen. Für die Temperaturerfassung mittels Thermographie wurden die Proben eingeschwärtzt, um somit stabile Emissionsgrade / Messwerte zu erreichen.

Die Produktionsanlage besteht aus 2 Erwärmungslinien, die im Serienbetrieb abwechselnd betrieben werden. Für die Versuche wurde nur eine Erwärmungslinie verwendet.

Versuchsserie 2 – Erwärmung im kontinuierlichen Betrieb

In dieser Versuchsreihe wurde die Anlage kontinuierlich betrieben (d.h. beide Linien wurden abwechselnd beladen). An den Proben wurde nach der Erwärmung eine Oberflächentemperaturmessung mittels Thermodraht durchgeführt. Insgesamt wurden 10 Proben erwärmt.

Versuchsserie 3 – verschiedene Betriebszustände

Da in der ersten Versuchsserie nur eine Anlage betrieben wurde, muss bei der Auswertung die Grundleistung die die 2. Linie während dieser Zeit benötigt heraus gerechnet werden. Hierzu wurden die folgenden Betriebszustände eingestellt und der Stromverbrauch für jeweils etwa 5 Minuten ermittelt:

Messung	Proben	Beschreibung
A	keine Proben	Anlage im Leerlauf, um die Grundlast zu ermitteln.
B	keine Proben	Anlage im „ausgeschalteten“ Zustand / Stillstand. (Die Anlage muss permanent gekühlt werden, und verbraucht somit auch Strom wenn nicht produziert wird)

Tabelle 8: Messung unterschiedlicher Betriebszustände

Aus der ermittelten Wärmeenergie und der verbrauchten elektrischen Energie wurde der Wirkungsgrad der HTS Anlage bestimmt. Hierbei wurde berücksichtigt, ob mit einer oder mit beiden Linien erwärmt wurde.

2.2.3.2 Pflichtenheft Erwärmung von Schmiedeteilen

Für die weitere Erarbeitung des Umsetzungs-, Handlings- und Produktionskonzepts wurde ein Pflichtenheft für die Erwärmung von Schmiedematerial erarbeitet. Hierbei lag der Fokus auf Stahlmaterial in den heute verwendeten üblichen Qualitäten.

2.2.3.3 *Umsetzungskonzept für die Erwärmung von Stahl mittels HTS Anlage*

Es wird das Konzept eines Ofens für Stahl exemplarisch vorgestellt, der rechteckige Blöcke mit Querschnitt 90x90 mm und einer Länge von 500 mm aufwärmt.

Die Leistung einer solchen Anlage wurde mit dem FEM-Programm Ansys abgeschätzt.

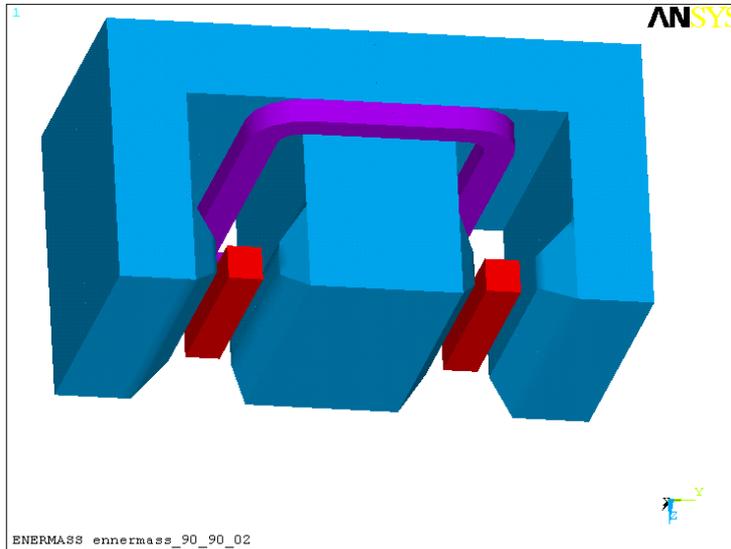


Bild 9: FEM-Modell des Ofens

Dabei sind einige Vereinfachungen vorgenommen worden. Die magnetischen Eigenschaften ("BH-Kurve") wurden von Baustahl übernommen, und vorausgesetzt, dass diese unverändert bis zu einer Curie-Temperatur von 770°C gelten. Darüber ist das Material unmagnetisch, d. h. es hat eine relative Permeabilität von eins. Die Materialwerte für die elektrische Leitfähigkeit (1,8 MS/m) und spezifische Wärmekapazität (500 W/kg/K) wurden für den gesamten Temperaturbereich von 20°C bis 1200°C konstant angenommen.

Die Motordrehzahl wird bei dieser Abschätzung auf 1200 Umdrehung pro Minute eingestellt.

2.2.3.4 *Handlings- und Produktionskonzept*

Unter Berücksichtigung physikalischer Eigenschaften wurde ein Handlings- und Produktionskonzept erarbeitet. Für die anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde die erreichbare Taktzeit ermittelt.

2.2.3.5 *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung*

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird ein Vergleich zwischen einer HTS Anlage und einer konventionellen Induktionsanlage angestellt. Hierbei werden sowohl Investitionsvolumen, Taktzeit und Wirkungsgrade der verschiedenen Anlagentypen berücksichtigt.

2.2.4 Rückführung und Nutzung der Energie aus der Prozesswärme in den Produktionsprozess

2.2.4.1 Entwicklung und Bewertung eines Konzepts zur Übertragung gebündelter Energie auf das Vormaterial

Bei der heutigen Vormaterialerwärmung wird einem Erwärmer (hauptsächlich werden induktive Erwärmer verwendet) das Material bei Raumtemperatur zugeführt und anschließend auf die vorgegebene Temperatur (ca. 1200°C bis 1300 °C) erwärmt.

Induktive Erwärmung

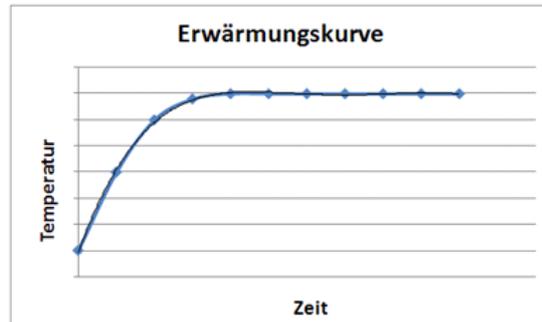
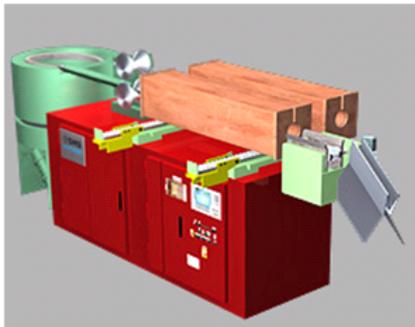


Bild 10: Erwärmung heute

Bei der Entwicklung eines Konzepts zur Vormaterialerwärmung mittels Prozesswärme wird davon ausgegangen, dass die benötigte Energie bereits in gebündelter Form vorliegt. Als Trägermedium wird Luft vorausgesetzt.

Nach erfolgter Vormaterialerwärmung wird das Material dem serienmäßigen Erwärmer zur Aufheizung auf Endtemperatur zugeführt. Da die Induktive Erwärmung die mit Abstand am weitest verbreitete Art der Vormaterialerwärmung ist, wird diese auch bei der Konzeption als abschließende Erwärmungsart gewählt.

Das Konzept soll sich auszeichnen durch

- kurze Erwärmungszeiten
- möglichst hohe Vorwärmtemperatur
- möglichst gleichmäßige Erwärmung
- geringer Platzbedarf

Um nicht vermeidbare Schwankungen in der Bereitstellung der notwendigen Prozesswärme (z.B. durch Prozessunterbrechungen, Prozessanläufe) zu kompensieren, muss in dem Konzept eine Funktion zur Homogenisierung der Materialvorwärmung berücksichtigt werden.

Da eine gleichmäßige Schmiedetemperatur für viele Qualitätsmerkmale (z.B. Füllung, Dickenmaße) von entscheidender Bedeutung ist, wird der Einfluss einer Eingangstemperaturschwankung auf die Ausgangstemperaturschwankung bei der induktiven Erwärmung abgeschätzt.

2.2.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Das Erwärmungskonzept mit Vormaterialvorwärmung mittels Prozesswärme wird bezüglich

- Energiebedarf
- Primärenergiebedarf und
- Erwärmungskosten

mit der heute üblichen Erwärmung (induktive Erwärmung) verglichen.

3 Vorhabensergebnisse

3.1 Teilprojekt Materialreduzierung

Das Teilprojekt Materialreduzierung dient der Entwicklung und Erprobung sowie Bewertung von Maßnahmen, um den Materialeinsatz für die Massivumformung zu reduzieren. Dazu wurden auf der Basis eines repräsentativen Teilespektrums Daten der Bauteile und Prozesse ausgewertet, die Bauteile in Klassen eingeteilt und innerhalb der Klassen durch eine „Verfahrens-Benchmark“ optimale Prozesswege identifiziert. Die Ergebnisse der einzelnen Schritte dieses Teilprojektes werden in den folgenden Unterabschnitten dargestellt.

3.1.1 Untersuchungsmatrix / Teilespektrum

Die Untersuchungsmatrix enthält insgesamt 92 Bauteile von 6 unterschiedlichen Firmen. Darunter sind 35 rotationssymmetrische Teile und 57 Fassonteile. Das Bauteilspektrum umfasst Teile mit einem Fertigteilegewicht zwischen 0,08 kg bis 47,8 kg, einer Feingliedrigkeit zwischen 0,05 bis 0,83 und einem Materialwirkungsgrad zwischen 0,38 und 1,00 (Mittelwert: 0,78). Anhang 2 zeigt alle Bauteile als Bildübersicht.

3.1.2 Einteilung des Teilespektrums in Formenordnung

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der untersuchten Ansätze und das Ergebnis der Klassifizierung der Bauteile.

Ansatz	Beschreibung	Anzahl Klassen		Anzahl belegter Klassen	
		Rotations-symmetr. Bauteile	Fassonteile	Rotations-symmetr. Bauteile	Fassonteile
1	Formenklasse Spies x Feingliedrigkeitsgruppe	12	12	6	8
2	Schwierigkeit aus der Formenordnung Spies	4	4	3	4
3	Formschwierigkeit = Schwierigkeit aus FO Spies + Feingliedrigkeitsgruppe	7	7	4	6
4	Erste Codestelle Formenordnung Schmieder	25	25	4	11
5	Schwierigkeit aus der FO Spies x Feingliedrigkeitsgruppe	16	16	9	10
6	Methode des planvollen Auswählens (Erfahrungswissen)	7		6	
7	Stoffflusskomplexität	7		7	
8	Stoffflusskomplexität x Feingliedrigkeitsgruppe	28		10	

Tabelle 9: Übersicht der untersuchten Ansätze

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Bewertung der Klassifizierungsansätze dargestellt. Für rotationssymmetrische Bauteile sind die Ansätze 4, 6, 7 und 8 am besten geeignet, bei den Fassonteilen ist es der Ansatz 5.

Ansatz	Beschreibung	Bewertung	
		Rotations-symmetr. Bauteile	Fassenteile
1	Formenklasse Spies x Feingliedrigkeitsgruppe	-	-
2	Schwierigkeit aus der Formenordnung Spies	-	-
3	Formschwierigkeit = Schwierigkeit aus FO Spies + Feingliedrigkeitsgruppe	-	0
4	Erste Codestelle Formenordnung Schmieder	+	-
5	Schwierigkeit aus der FO Spies x Feingliedrigkeitsgruppe	-	+
6	Methode des planvollen Auswählens (Erfahrungswissen)	+	
7	Stoffflusskomplexität	+	
8	Stoffflusskomplexität x Feingliedrigkeitsgruppe	+	

+ = gut, 0 = mittel, - = schlecht

Tabelle 10: Bewertung der Klassifizierungsansätze

In **Tabelle 11** bis **Tabelle 14** sind die Ergebnisse des klassenspezifischen Vergleichs für die Ansätze 4, 6, 7 und 8 bei **rotationssymmetrischen Bauteilen** dargestellt.

Klasse	Anzahl Bauteile	Erklärbarkeit (Anzahl Bauteile)		
		gut	mäßig	schlecht
A	9	9	0	0
C	12	4	8	0
E	5	1	3	1
G	9	7	1	1
Summe:		21	12	2

Tabelle 11: Bewertung für Ansatz 4: Erste Codestelle Schmieder

Klasse	Anzahl Bauteile	Erklärbarkeit (Anzahl Bauteile)		
		gut	mäßig	schlecht
1	12	6	6	0
2	5	4	0	1
3	6	1	4	1
4	3	3	0	0
5	7	7	0	0
7	2	2	0	0
Summe:		23	10	2

Tabelle 12: Bewertung für Ansatz 6: Methode des planvollen Auswählens

Klasse	Anzahl Bauteile	Erklärbarkeit (Anzahl Bauteile)		
		gut	mäßig	schlecht
RH 1	6	5	1	0
RH 2	6	1	5	0
RH 3	9	6	3	0
RH 4	3	2	1	0
RH 5	3	3	0	0
RH 6	1	1	0	0
RH 7	7	7	0	0
Summe:		25	10	0

Tabelle 13: Bewertung für Ansatz 7: Stoffflusskomplexität

Klasse	Anzahl Bauteile	Erklärbarkeit (Anzahl Bauteile)		
		gut	mäßig	schlecht
RH 1 - S2	6	5	1	0
RH 2 - S1	1	1	0	0
RH 2 - S2	5	1	4	0
RH 3 - S2	8	5	3	0
RH 3 - S3	1	1	0	0
RH 4 - S1	1	1	0	0
RH 4 - S3	1	1	0	0
RH 5 - S3	3	3	0	0
RH 6 - S1	1	1	0	0
RH 7 - S3	7	7	0	0
Summe:		26	8	0

Tabelle 14: Bewertung für Ansatz 8: Stoffflusskomplexität x Feingliedrigkeitsgruppe

Für rotationssymmetrische Bauteile gelingt es mit Ansatz 8 am besten die Unterschiede im MWG zu erklären. Von den in Abschnitt 2.1.2.5 dargestellten Bauteilkenngrößen ließ keine ein Potential für eine bessere Klassifizierung erkennen.

Zusammenfassend ergibt sich damit, dass für rotationssymmetrische Bauteile Ansatz 8 und für Fassonteile Ansatz 5 am besten geeignet sind. Im Anhang 3 sind die klassenspezifischen Verteilungsdiagramme für den MWG dieser beiden Ansätze dargestellt. Da die Schwierigkeit nach Spies auch als Beurteilung der Komplexität des Stoffflusses interpretiert werden kann, können beide Ansätze als Kreuzprodukt von Stoffflusskomplexität und Feingliedrigkeit aufgefasst werden. Die daraus abgeleiteten Klassen sollen im Folgenden als Technologie-Komplexitäts-Klassen (TKK) bezeichnet werden.

Damit zeigt sich, dass die aus den Formenordnungen von Spies und Schmieder, sowie der Feingliedrigkeit abgeleiteten Ansätze und deren Kombination augenscheinlich kein sinnvolles Ergebnis liefern. Erst die Einführung der Technologie-Komplexitäts-Klassen auf der Basis der Stoffflusskomplexität (siehe Abschnitt 2.1.2.6) und der Feingliedrigkeit führte zu dem gewünschten Erfolg. Innerhalb der Klassen findet man bzgl. der Technologie-Komplexität vergleichbare Schmiedeteile, aber mit unterschiedlichen Materialwirkungsgraden.

Durch die nachträgliche Zuordnung von Materialwirkungsgraden und Prozesswegen konnten optimale Prozesswege innerhalb der Klassen identifiziert werden (siehe Abschnitte 3.1.4 und 3.1.5).

3.1.3 Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung

Auf der Grundlage der in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Ermittlung der minimal notwendigen Einsatzmassen zeigt Tabelle 15 eine Zusammenfassung der sich theoretisch ergebenden **Materialeinsparungen für rotationssymmetrische Bauteile**:

Klasse	Anzahl Teile	MWG		IST		Optimiert		Theoretisches Materialeinsparungspotential			Bemerkung
		Minimum	Maximum	Einsatz-masse [kg/a]	Grat-gewicht [kg/a] (1)	Einsatz-masse [kg/a]	Grat-gewicht [kg/a] (1)	Einsatz-masse [kg/a]	relativ [%] bezogen auf Einsatzmasse	relativ[%] bezogen auf Gratgewicht	
RH 1 - S2	6	0,623	1,000	1.966.757	84.500	1.882.257	0	84.500	4,3	100,0	
RH 2 - S1	1	0,866	0,866	80.000	10.200	80.000	10.200	0	0,0	0,0	
RH 2 - S2	5	0,825	1,000	1.730.387	122.850	1.607.537	0	122.850	7,1	100,0	
RH 3 - S2	8	0,748	1,000	481.814	39.465	442.349	0	39.465	8,2	100,0	(2)
RH 3 - S3	1	0,844	0,844	64.000	10.000	64.000	10.000	0	0,0	0,0	
RH 4 - S1	1	0,869	0,869	60.830	7.700	60.830	7.700	0	0,0	0,0	
RH 4 - S3	1	0,737	0,737	111.090	24.150	111.090	24.150	0	0,0	0,0	
RH 5 - S3	3	0,843	1,000	346.029	12.475	333.554	0	12.475	3,6	100,0	
RH 6 - S1	1	1,000	1,000	1.178.834	0	1.178.834	0	0	0,0	0,0	
RH 7 - S3	7	0,765	1,000	1.414.100	69.430	1.344.670	0	69.430	4,9	100,0	(2)
Alle	34			7.433.841	380.770	7.105.121	52.050	328.720	4,4	86,3	

(1) Die Gewichtsanteile für Fertigteile und Lochtaler bleiben unverändert.

(2) Bei je einem Bauteil fehlt die Produktionsmenge.

Tabelle 15: Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung für rotationssymmetrische Bauteile

Tabelle 16 zeigt die gleiche Zusammenfassung für Fassonteile:

Klasse	Anzahl Teile	MWG		IST		Optimiert		Theoretisches Materialeinsparungspotential			Bemerkung
		Minimum	Maximum	Einsatz-masse [kg/a]	Grat-gewicht [kg/a] (1)	Einsatz-masse [kg/a]	Grat-gewicht [kg/a] (1)	Einsatz-masse [kg/a]	relativ [%] bezogen auf Einsatzmasse	relativ[%] bezogen auf Gratgewicht	
1-S2	6	0,608	0,825	278.779	76.475	251.174	48.870	27.605	9,9	36,1	
1-S3	5	0,757	0,877	1.146.829	220.528	1.062.788	136.488	84.041	7,3	38,1	
2-S2	8	0,685	0,899	495.898	71.592	474.301	49.995	21.597	4,4	30,2	
2-S3	2	0,643	0,660	10.700	3.770	10.572	3.642	129	1,2	3,4	
3-S2	10	0,508	0,810	2.021.774	444.471	1.961.725	384.422	60.049	3,0	13,5	
3-S3	7	0,680	0,823	6.530.190	1.322.520	6.221.210	1.012.290	308.980	4,7	23,4	
4-S2	2	0,556	0,700	200.000	83.400	176.600	60.000	23.400	11,7	28,1	
4-S3	5	0,483	0,773	3.008.683	961.683	2.730.791	683.791	277.891	9,2	28,9	(2)
4-S4	7	0,376	0,833	2.107.549	791.301	1.668.423	352.175	439.126	20,8	55,5	
Sonder	4	0,803	0,893	377.700	54.200	363.401	39.901	14.299	3,8	26,4	
Alle	56			16.178.102	4.029.940	14.920.986	2.771.574	1.257.116	7,8	31,2	

(1) Die Gewichtsanteile für Fertigteile und Lochtaler bleiben unverändert.

(2) Bei einem Bauteil fehlt die Produktionsmenge.

Tabelle 16: Notwendige Einsatzmassen und Potentialbewertung für Fassonteile

Für rotationssymmetrische Bauteile liegt das theoretische Einsparpotential bei 4,4 %, für Fassonteile bei 7,8 % der Einsatzmasse. Wesentlich interessanter ist jedoch, dass die relative Einsparung bezogen auf den beeinflussbaren Überschuss (Gratanteil) bei rotationssymmetrischen Teilen bei ca. 86 % und bei Fassonteilen bei ca. 31 % liegt.

Unter Berücksichtigung der jährlichen Einsatzmassenverteilung für rotationssymmetrische Teile bzw. für Fassonteile lässt sich daraus ein gewichtetes theoretisches Einsparpotential von 6,7 % über alle Bauteile des repräsentativen Teilespektrums ableiten, wie Tabelle 17 zeigt.

	Einsatzmasse [kg/a]	Anteil [%]	Theoretisches Materialeinsparungspotential	
			relativ [%] bezogen auf Einsatzmasse	relativ [%] bezogen auf Gratgewicht
Rotationssymmetrische Teile	7.433.841	31	4,4	86,3
Fassonteile	16.178.102	69	7,8	31,2
Alle	23.611.943	100	6,7	48,6

Tabelle 17: Potentialbewertung für das repräsentative Teilespektrum

Übertragen auf die gesamte Branche in Deutschland ergeben sich daraus die in Tabelle 18 dargestellten theoretischen Einsparpotentiale. Dabei werden zwei Szenarien berücksichtigt: Eine „optimistische“ Variante, die von 6,7 % Einsparpotential ausgeht und eine „erwartete“ Variante, die mit der Hälfte, d.h. mit einem Einsparpotential von 3,4 % gerechnet ist.

	Branche in Deutschland	Theoretisches Einsparpotential optimistisch (6,7%)	Einsparpotential erwartet (3,4%)
Schmiedetonnage [to/a] ⁽¹⁾	2.340.000		
Einsatzmasse [to/a] ⁽²⁾	3.120.000	209.040	106.080
Erwärmungsenergie [GWh/a] ⁽³⁾	1.248	84	42
Primärenergie [GWh/a] ⁽⁴⁾	26.704	1.789	908
CO2-Emission Stahlherstellung [to/a] ⁽⁵⁾	4.196.400	281.159	142.678
CO2-Emission Erwärmung für Umformung [to/a] ⁽⁶⁾	743.808	49.835	25.289
CO2-Emission gesamt [to/a] ⁽⁷⁾	4.940.208	330.994	167.967

(1) IMU Produktionsstatistik 2007, Gesenkschmiedeteile, Freiformschmiedestücke und Rohrleitungsumformstücke aus Stahl
(2) bei 25 % Gratanteil
(3) bei 400 kWh/to
(4) Stahlherstellung (= Hochofen + Stahlwerk + Stranggießen + Walzwerk) + Umformung (= Erwärmen + Umformen + Wärmebehandlung)
(5) 1345 kg CO₂ / to Rohstahl; Quelle: Stahl Online
(6) Es wird unterstellt, dass die benötigte Erwärmungsenergie zu 100 % durch Strom bereitgestellt wird.
CO₂-Emission: 596 g/kWh, deutscher Strommix 2006 (Quelle: Umweltbundesamt)
(7) Ohne Antriebsenergie der Umformmaschinen

Tabelle 18: Potentialbewertung

Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Verhältnis rotationssymmetrische Teile / Fassonteile des repräsentativen Teilespektrums sich in ähnlicher Größenordnung in der Branchentonnage wiederfindet.

3.1.4 Erstellen alternativer Fertigungswege und -verfahren

Prozesswege lassen sich i.W. durch die drei Komponenten Halbzeug, Umformverfahren und Werkzeugkonzept beschreiben. In einem klassenspezifischen Vergleich wurden die Bauteildaten in Bezug auf diese drei Komponenten untersucht.

Die Ergebnisse des Vergleichs sind für **rotationssymmetrische Bauteile** in Tabelle 19 zusammengefasst.

Klasse	Anzahl Bauteile	Bemerkungen
RH 1 - S2	6	3 Bauteile mit optimalem MWG Netto: Hatebur, voll automatisiert
		1 Bauteil (Kegelrad) mit geringerem MWG, trotz Hatebur, voll automatisiert, 3 Stufen
		2 Bauteile mit niedrigem MWG: Kurbelpresse bzw. Gegenschlaghammer, manuell, geringe Prod.-menge
RH 2 - S1	1	
RH 2 - S2	5	1 Bauteil mit optimalem MWG Netto: voll automatisiert, geschlossenes Gesenk
		4 Bauteile mit mittlerem MWG: Kurbel- bzw. Spindelpresse, manuell (Unterschiede bei 64, 65 über Lage der Asymmetrien erklärbar)
RH 3 - S2	8	1 Bauteil mit optimalem MWG Netto: Hatebur, voll automatisiert
		1 Bauteil mit hohem MWG, trotz Spindelpresse, manuell: Einfache Geometrie
		2 Bauteile mit hohem MWG: Hatebur, voll automatisiert
		2 Bauteile mit hohem MWG, trotz Gegenschlaghammer bzw. Kurbelpresse, manuell
		1 Bauteil mit mittlerem MWG: Exzenterpresse, teilweise automatisiert
1 Bauteil mit niedrigem MWG: Exzenterpresse, teilweise automatisiert, Nutzen 3		
RH 3 - S3	1	
RH 4 - S1	1	
RH 4 - S3	1	
RH 5 - S3	3	1 Bauteil mit optimalem MWG Netto: Hatebur, voll automatisiert, 3 Stufen
		1 Bauteil mit optimalem MWG Netto: Kurbelpresse, voll automatisiert, 2,5 Stufen
		1 Bauteil mit niedrigerem MWG: Exzenterpresse, teilweise automatisiert, 2 Stufen
RH 6 - S1	1	1 Bauteil mit optimalem MWG Netto: Hatebur, voll automatisiert, 3 Stufen
RH 7 - S3	7	3 Bauteile mit sehr hohem MWG: Hatebur, voll automatisiert
		4 Bauteile mit niedrigem MWG: Exzenterpresse, manuell bzw. teilweise automatisiert, < 3 Stufen

Tabelle 19: Ergebnisse des klassenspezifischen Vergleichs der Daten für rotationssymmetrische Bauteile

Der Einfluss verschiedener Parameter auf den Materialwirkungsgrad ist für rotationssymmetrische Teile in Tabelle 20 dargestellt.

Parameter	Einfluss auf MWG	Bemerkung
Werkzeugkonzept im Zusammenhang mit Aggregat/Automatisierung	3	
Werkzeugtechnologie im Zusammenhang mit Griffelement und Auslegung Grat	3	
Produktionsmenge	2	
Querschnittsform	0-1	
Vorformen	0-1	
Stauchen und Biegen zur Formänderung	0	
Komplexität (Klasse)	0	
Komplexität (Feingliedrigkeit)	0	
Anzahl Stufen	0	
Rotationssymmetrie (streng/i.W.)	0	
	3 = stark 2 = mittel 1 = schwach 0 = keiner	

Tabelle 20: Einfluss von Parametern auf den MWG für rotationssymmetrische Teile

Für **rotationssymmetrische Bauteile** lassen sich folgende wesentliche Ergebnisse ableiten:

- Bauteile, die auf einer Hatebur-Anlage gefertigt werden, weisen i.a. einen hohen MWG auf. Dabei ist aber nicht das Aggregat von entscheidender Bedeutung, sondern vielmehr das Konzept einer endkonturnahen Massenverteilung in den Vorformstufen als Folge des Einsatzes „geschlossener Werkzeuge“.
- Bauteile, die auf automatisierten Anlagen gefertigt werden weisen i.a. einen höheren MWG im Vergleich zu manuell bedienten Anlagen auf. Gründe dafür sind in der geringen Toleranz der Einlageposition und der Transportzeiten bei automatisierten Anlagen zu sehen. Außerdem bieten große Produktionsmengen, wie sie bei automatisierten Anlagen die Regel sind, einen hohen Anreiz, die Prozesse und Werkzeuge zu optimieren, was sich positiv auf die Materialökonomie auswirkt. Die Automatisierung ist allerdings häufig mit dem Anlagentyp und dem Werkzeugkonzept verknüpft.
- Bauteile mit einer geringen Produktionsmenge weisen vielfach einen niedrigen MWG auf. Es erscheint plausibel, dass aus wirtschaftlichen Gründen Entwicklungspotentiale für eine Optimierung der Prozesse und Werkzeuge nicht ausgenutzt werden.
- In wenigen Klassen zeigt sich, dass beim Einsatz von rundem Ausgangsmaterial ein höherer MWG erzielt wird, als beim Einsatz der Querschnittsform Vierkant.
- In wenigen Klassen zeigt sich, dass eine zusätzliche Vorformstufe zu einem leicht höheren MWG führt.
- Flache Bauteile (z.B. flache Scheiben) mit weit außenliegender Hauptmasse weisen eine relativ geringe Materialeffizienz auf, die allerdings mit spezifisch angepassten Vorformgravuren deutlich verbessert werden kann.

Die Ergebnisse des klassenspezifischen Vergleichs sind für Fassonteile in Tabelle 21 zusammengefasst.

Klasse	Anzahl Bauteile	Bemerkungen
1-S2	6	2 Bauteile mit hohem MWG: Nutzen = 1
		4 Bauteile mit niedrigerem MWG: Nutzen > 1
1-S3	5	2 Bauteile mit höherer MWG: Hatebur, voll automatisiert, 3 Stufen, Nutzen = 1
		3 Bauteile mit niedrigerer MWG: Exzenterpresse, nur teilweise automatisiert, nur 2 Stufen, Nutzen > 1 (bei Teilen 18, 17)
		insgesamt aber keine allzu großen Unterschiede im MWG
2-S2	8	2 Bauteile mit hohem MWG: Hatebur, voll automatisiert, Nutzen = 1
		2 Bauteile mit hohem MWG: Spindelpresse???, Nutzen = 1
		1 Bauteil höherem MWG (Netto!): Hatebur, voll automatisiert, Nutzen = 1
		2 Bauteile mit mittlerem MWG: Exzenterpresse, nur teilweise automatisiert, Nutzen = 2
2-S3	2	1 Bauteil mit niedrigem MWG: Exzenterpresse, geringe Produktionsmenge
2-S3	2	Keine Aussage möglich: Teile liegen im MWG zu dicht beieinander
3-S2	10	2 Bauteile mit hohem MWG wegen ???
		6 Bauteile mit mittlerem MWG wegen ???
3-S3	7	2 Bauteile mit niedrigem MWG: niedrige Produktionsmenge (3) bzw. Nutzen = 4 (90)
3-S3	7	???
4-S2	2	1 Bauteil mit hohem MWG: 2 VF, Nutzen = 1
		1 Bauteil mit niedrigem MWG: Riemenfallhammer, Nutzen = 4
4-S3	5	1 Bauteil mit hohem MWG: 4 Stufen, Exzenterpresse, teilweise automatisiert, Nutzen = 1
		2 Bauteile mit mittlerem MWG: Exzenterpresse, min. teilweise automatisiert, Nutzen = 1, 3 Stufen (99)
		2 Bauteile mit sehr niedrigem MWG: Zangenende, Oberdruckhammer, manuell, Nutzen = 4
4-S4	7	Sehr große Spanne im MWG!
Sonder	4	

Tabelle 21: Ergebnisse des klassenspezifischen Vergleichs der Daten für Fassonteile

Der Einfluss von Parametern auf den Materialwirkungsgrad für **Fassonteile** ist in Tabelle 22 dargestellt.

Parameter	Einfluss auf MWG	Bemerkung
Walzen	3	bei Langteilen mit starker Massenverteilung
Nutzen	2	
Werkzeugkonzept im Zusammenhang mit Aggregat/Automatisierung	1	
Anzahl Stufen/Vorformen	1	
Querschnittsform	0	
Stauchen/Biegen zur Formänderung	0	
Produktionsmenge	0	
Komplexität (Klasse)	0	
Komplexität (Feingliedrigkeit)	0	
Griffelement im Zusammenhang mit Werkzeugkonzept/Grat	0	
	3 = stark 2 = mittel 1 = schwach 0 = keiner	

Tabelle 22: Einfluss von Parametern auf den MWG für Fassonteile

Für **Fassonteile** lassen sich folgende wesentliche Ergebnisse ableiten:

- Bei Langteilen mit unterschiedlicher Massenverteilung wird durch Walzen i.a. ein deutlich besserer Materialwirkungsgrad erzielt.
- Bauteile mit Einfachnutzen weisen eine höhere Materialeffizienz auf, als vergleichbare Bauteile mit Mehrfachnutzen (mehrere Gravuren in einem Werkzeug).
- In einigen Klassen zeigt sich, dass Bauteile, die auf automatisierten Anlagen gefertigt werden vielfach einen höheren MWG im Vergleich zu manuell bedienten Anlagen aufweisen. Gründe dafür sind in der geringen Toleranz der Einlageposition und der Transportzeiten bei voll automatisierten Anlagen zu sehen. Außerdem bieten große Produktionsmengen, wie sie bei automatisierten Anlagen die Regel sind, einen hohen Anreiz, die Prozesse und Werkzeuge zu optimieren, was sich positiv auf die Materialökonomie auswirkt. Die Automatisierung ist allerdings häufig mit dem Anlagentyp und dem Werkzeugkonzept verknüpft.
- In einigen Klassen ist erkennbar, dass eine höhere Anzahl von Umformstufen zu einem höheren MWG führt.
- Bauteile, die auf einer Anlage mit Hauptaggregat Hammer gefertigt werden, weisen einen geringeren Materialwirkungsgrad auf. Gründe dafür sind, dass als Transportelement ein Zangenende notwendig ist und bestimmte Werkzeugkonzepte, wie z.B. Sperrkasten, nicht umsetzbar sind.

Für Bauteile mit einem Transportelement „Zangenende“ wurde theoretisch untersucht, welchen Einfluss das Zangenende auf den MWG hat. Wie Bild 11 zeigt, ist bei Verzicht auf ein Zangenende der MWG im Mittel bis zu 10 % höher.

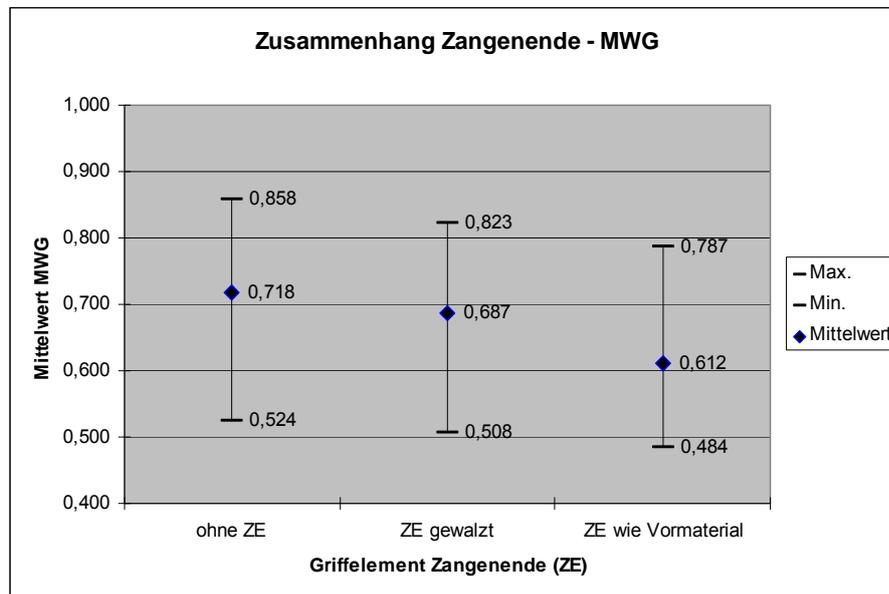


Bild 11: Zusammenhang Transportelement Zangenende (Masse geschätzt) - MWG

Die am besten bewerteten Ansätze (Ansatz 8 für rotationssymmetrische Bauteile und Ansatz 5 für Fassonteile) wurden weiter untersucht, indem Bauteile mit hohem und niedrigem MWG in jeder Klasse miteinander verglichen und die Einflussgrößen identifiziert wurden, die für diese Unterschiede augenscheinlich maßgebend sind. Durch diesen (Benchmark-) Vergleich wurde deutlich, dass bei den Teilen mit hohem MWG eine Verfahrens- u/o Werkzeugtechnologie verwendet wird, mit der bereits in der ersten Vorformstufe die Massenverteilung des Endproduktes ohne oder mit geringem Materialverlust erreicht wird.

Als wesentliche Verfahren und Werkzeugtechnologien wurden identifiziert:

- Formstauchen in geschlossenem Werkzeug
- Fließpressen in geschlossenem Werkzeug
- Gesenkschmieden in geschlossenem Gesenk oder mit Sperrkasten
- Reck- oder Querkeilwalzen (ausschließlich bei Fassonteilen)

Bild 12 zeigt in einer Übersicht alle Verfahren und Werkzeugtechnologien, die bei dem repräsentativen Teilespektrum zum Einsatz kamen.

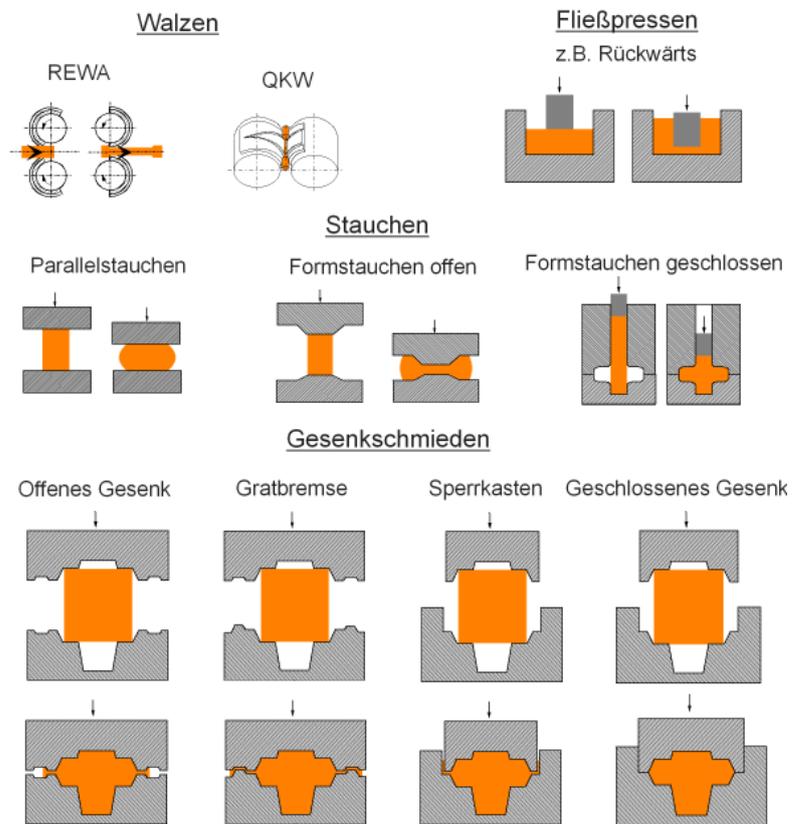


Bild 12: Übersicht der Verfahren und Werkzeugtechnologien

In Tabelle 23 sind für jede Klasse die Verfahren und Werkzeugkonzepte des jeweils Klassenbesten zusammengefasst. Teile, die unter Anwendung dieser Verfahrens- u/o Werkzeugtechnologien hergestellt werden, weisen bei rotationssymmetrischen Teilen eine Verbesserung des MWG von 16 – 38 % und bei den Fassonteilen von 12 – 30 % auf.

	Klasse	MWG (netto)		Nutzen		Verfahren Vorform										Verfahren Fertigform			
		Min.	Max.	Einfach	Mehrfach	Walzen		Stauchern			Fließpress	Gesenk-schmieden				Gesenk-schmieden			
						REWA	QKW	Parallel	Formstauchen offen	Formstauchen geschlossen		Rückwärts-fließpressen	Offenes Gesenk	Gratbremse	Sperrkasten	Geschlossenes Gesenk	Offenes Gesenk	Gratbremse	Geschlossenes Gesenk
Rotationssymmetrische Teile	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	
Fassonteile	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, ...)											

* Nur 1 bzw. 2 Teile in der Formengruppe -> begrenzt aussagefähig

(X) Alternative Verfahren

Tabelle 23: Verfahren der jeweils Klassenbesten

3.1.5 Konstruktions- und Verfahrensregeln

Detaillierte Konstruktionsregeln konnten dem repräsentativen Teilespektrum und den verfügbaren Firmendaten auch innerhalb einzelner Klassen nicht entnommen werden. Sehr wohl kann aus dem Ergebnis aus 3.1.4 eine Verfahrensregel abgeleitet werden.

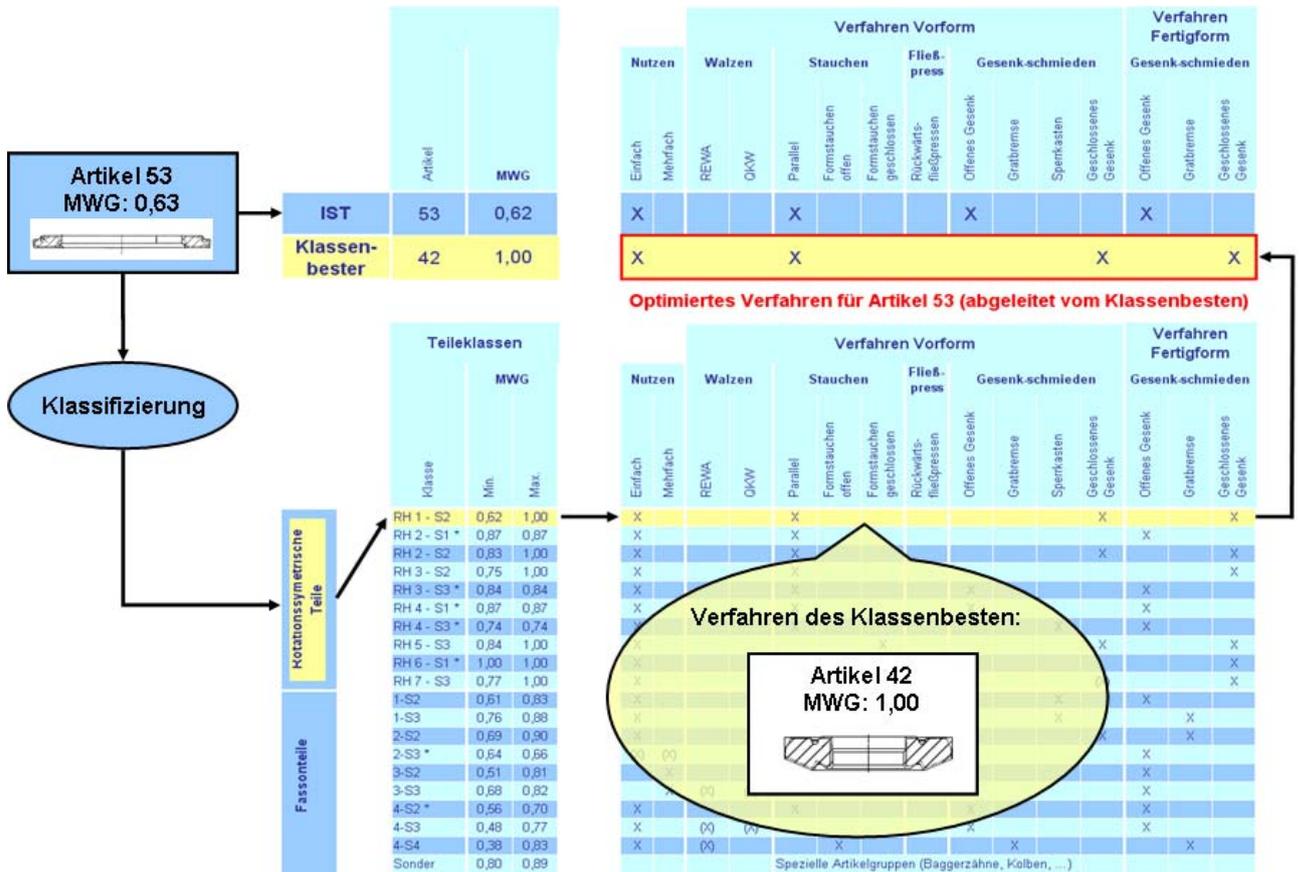


Bild 13: Verfahrensregel

Durch Klassifizieren eines Bauteils und Zuordnung zu einer der Klassen kann eine geeignete und in der Praxis bereits bewährte Verfahrens- u/o Werkzeugtechnologie zugeordnet werden. In Anhang 4 wird die Vorgehensweise bei der Anwendung der Verfahrensregel ausführlicher erläutert und an konkreten Beispielen dokumentiert.

Diese Regel kann und wird keine 100%-Schärfe haben, was aufgrund der natürlichen Unschärfe einer Formenordnung und -klassifizierung und der teilespezifischen Besonderheiten auch nicht zu erwarten ist. Jedoch wird man auf diesem Wege einen guten und in der Praxis bereits bewährten „Startwert“ erhalten, von dem aus die Detailkonstruktion unter Berücksichtigung der teilespezifischen Besonderheiten erfolgen kann.

3.1.6 Evaluierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden Fachleuten beteiligter Unternehmen vorgestellt und mit ihnen eingehend diskutiert. Die Ergebnisse dieser Evaluierung sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

Firma	Anzahl Bauteile	Plausibel
Rasche	28	1
Seissenschmidt	17	2
Hammerwerk Fridingen	23	2
		1 = vollständig 2 = im Wesentlichen 3 = teilweise 0 = nein

Tabelle 24: Evaluierung der Ergebnisse mit Unternehmen

3.1.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.3 (vgl. Tabelle 18) ergeben sich Kosteneinsparungen sowohl beim Ausgangsmaterial, als auch bei der Erwärmungsenergie. Übertragen auf die Branche in Deutschland zeigt Tabelle 25 die Einsparpotentiale für die beiden Szenarien, der „optimistischen“ Variante, die von 6,7 % Einsparpotential ausgeht und einer „erwarteten“ Variante, die mit der Hälfte, d.h. mit einem Einsparpotential von 3,4 % gerechnet ist.

	Branche in Deutschland	Einsparpotential optimistisch (6,7%)	Einsparpotential erwartet (3,4%)
Kosten Ausgangsmaterial [Mio. €/a] ⁽¹⁾	1.580	105	53
Erwärmungskosten [Mio. €/a] ⁽²⁾	124,8	8,4	4,2
(1) bei 500 €/to (2) bei 10 Cent/kWh			

Tabelle 25: Potential der Kosteneinsparungen

3.2 Teilprojekt Steigerung der Energieeffizienz

Die an einer typischen Schmiedeanlage auftretenden Wärmeverluste entlang der Prozesskette sind in Bild 14 dargestellt.

Da die Wärmequellen an unterschiedlichen Stellen im Prozess (z.B. Gratschrott im Transportbehälter, Fertigteile auf Abkühlband, Fertigteile im Transportbehälter) und auf unterschiedlichem Niveau vorhanden sind, ist es zweckmäßig an mehreren Stellen die Wärme zu bündeln und seriell zu verknüpfen, um so dem Ziel nach einer möglichst hohen Leistungsausbeute auf möglichst hohem Temperaturniveau gerecht zu werden.

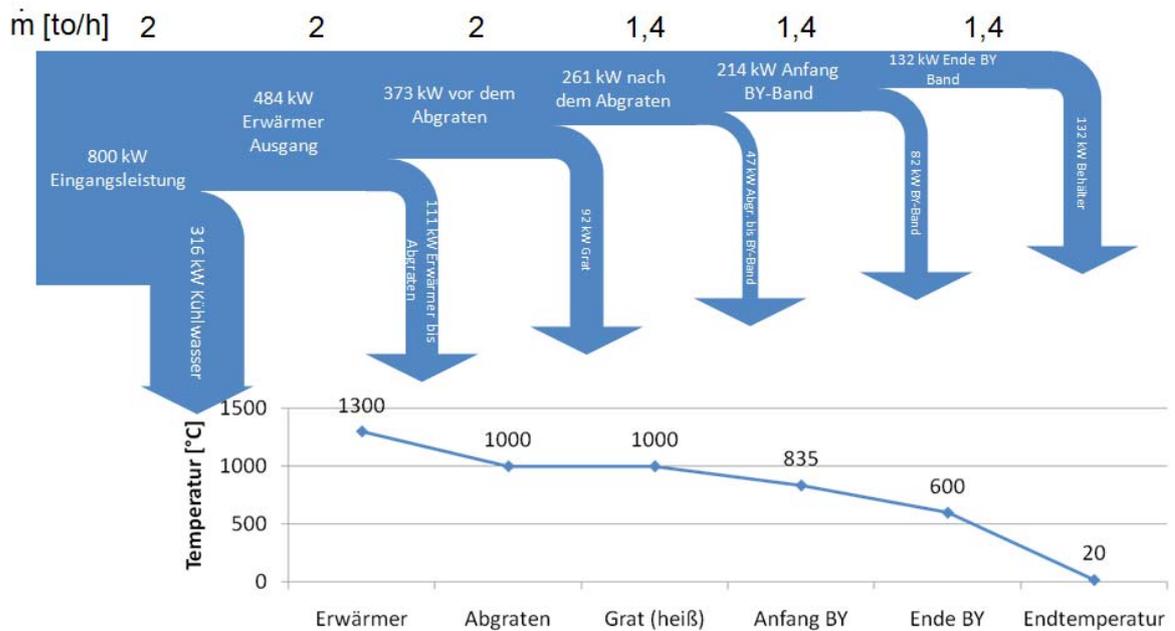


Bild 14: Leistungsbilanz einer Schmiedelinie

Um an unterschiedlichen Stellen im Prozess Energie zu sammeln, zu bündeln, umzuwandeln bzw. anderweitig zu nutzen wurden verschiedene Module entwickelt, und als modulares Gesamtkonzept zusammengefasst (s. Bild 15). Die Einzelheiten der jeweiligen Module sind den einzelnen Ergebniskapiteln zu entnehmen.

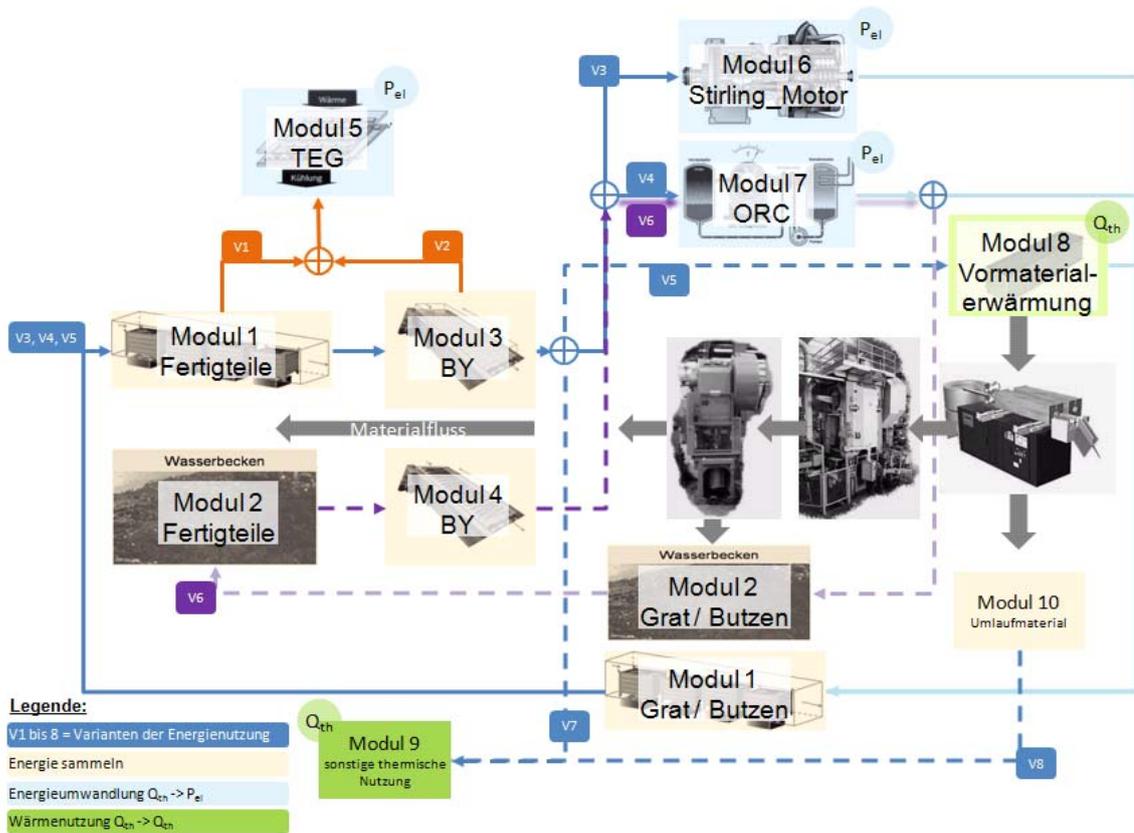


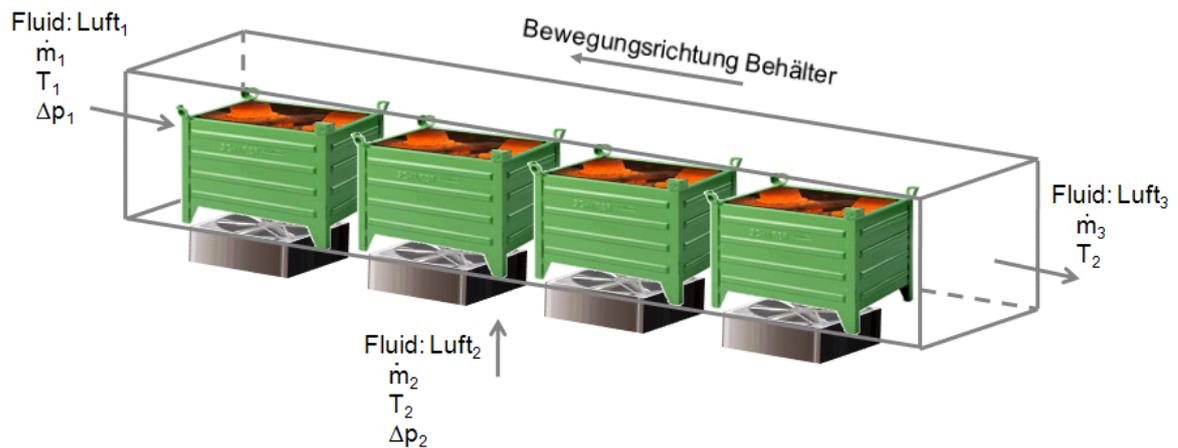
Bild 15: Modulares Gesamtkonzept

3.2.1 Nutzung der Prozesswärme zur Erzeugung elektrischer Energie

3.2.1.1 Energiebündelung

Zur Energiebündelung wurden folgende Module entwickelt:

Modul 1: Abkühlung von Teilen im Transportbehälter



- Behälter werden automatisch weitergetaktet (Gegenstromprinzip).
- Starttemperatur nach Abkühlband / BY-Band 300 – 600 °C.
- Ventilatoren für Luft₂ sind optional, wenn die natürliche Konvektion nicht ausreicht.
- Modul auch für Gratschrott und Butzen einsetzbar.

Bild 16: Modul 1

Zur Abschätzung der übertragbaren Wärmeenergie bei einer Schüttung wurden Wärmerversuche durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind im Folgenden dargestellt.

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8
Bauteil	Kugel 				Brückenteil 			
Masse [g]	888				193			
Oberfläche [mm ²]	11.310				11.000			
Oberfläche/Volumen [1/mm]	0,1				0,45			
Stückzahl	47		96		217		392	
Füllmasse [kg]	42		85		42		76	
Füllhöhe ca. [mm]	231		441		306		522	
Lückengrad [%] 0% - vollständige Füllung 100% - keine Füllung	58		55		68		67	
Massenstrom Luft [kg/h]	175	520	175	520	175	520	175	520
Anströmgeschw. [m/s]	0,72	2,15	0,72	2,15	0,72	2,15	0,72	2,15
Temperatur Teile ca. [°C]	1.000							
Wärmeinhalt der Teile zu Versuchsbeginn [kWh]	7,72	7,72	15,78	15,78	7,74	7,74	13,98	13,98

Tabelle 26: Versuchsparameter Warmversuch



		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8
Bauteil		Kugel				Brückenteil			
Stückzahl		47		96		217		392	
Gesamtmasse	[kg]	42		85		42		76	
Wärmeinhalt der Teile (bei 1000°C)	[kWh]	7,72	7,72	15,78	15,78	7,74	7,74	13,98	13,98
Massenstrom Luft	[kg/h]	175	520	175	520	175	520	175	520
Anströmgeschwindigkeit	[m/s]	0,72	2,15	0,72	2,15	0,72	2,15	0,72	2,15
Max. Temperatur T_{MW}	[°C]	249,3	240,6	419,9	393,6	429,2	464,5	524,8	572,6
Max. Druckverlust in der Schüttung	[Pa]	19	148	56	314	44	287	105	675
Max. Leistung	[kW]	11,5	32,9	21,2	52,5	21,4	69,6	26,9	88,6
Übertragene Wärmemenge Q_{200} (bis Temp. $T_{MW} = 200$ °C)	[kWh]	2,45	1,15	8,19	9,91	4,15	5,08	8,81	10,3
- relativ zum Wärmeinhalt der Teile	[%]	32	15	52	63	54	66	63	74
- Zeitdauer für die Übertragung	[min]	14,3	2,3	34,6	14,8	17,3	7,0	30,3	11,8

Tabelle 27: Ergebnisse Warmversuch

Fazit der Warmversuchs-Ergebnisse:

- Die max. erreichten Lufttemperaturen liegen in Abhängigkeit der erwärmten Bauteilmenge, der Anströmgeschwindigkeit und der Bauteilgeometrie bei 240°C bis 570°C (Ausgangstemperatur der Bauteile: ca. 1000°C).
- Der Druckverlust in der Schüttung steigt proportional mit der Höhe der Schüttung an und hängt wesentlich von der Strömungsgeschwindigkeit und von der Bauteilgeometrie (Lückengrad) ab. Der maximale Druckverlust beträgt bis zu 680 Pa.
- Bezogen auf den ursprünglichen Wärmeinhalt der Teile beträgt die übertragene Wärmemenge (für $T_{Luft} > 200$ °C) bei der geringen Anzahl der Kugel-Bauteile 15 – 30%, bei allen anderen Versuchen 50 – 75%.
- Ohne zusätzliche Isolierung der Luftleitrohre kühlt der Luftstrom auf den ersten 0,5 m bis zu 50 °C ab.

Aus den Warmversuchen wurde die in Tabelle 28 abgeschätzte Energie-Übertragungsbilanz für Modul 1 ermittelt.

		Position	Grat / Butzen in Kiste	Fertigteil in Kiste
		Modul	1	1
Schmiedeteil	m_pkt (1)	to/h	0,3	0,7
		kg/s	0,08	0,19
	T_Ende (1)	°C	220	220
	T_Anfang (1)	°C	1000	600
	Q_pkt (2)	kW	43,6	43,6
Arbeitsmedium	Arbeitsmedium		Luft	Luft
	Übertragungsgrad auf Arbeitsmedium (3)		0,5	0,5
	Q_pkt (2)	kW	21,8	21,8
	T_Anfang (1)	°C	20	20
	T_Ende (1)	°C	200	200
	m_pkt (2)	kg/s	0,12	0,12
		kg/h	431,2	431,6
	V_pkt (2)	Nm ³ /h	365,4	365,8
		m ³ /h		

- (1) Vorgabe
- (2) berechnet
- (3) Strömungsversuche

Tabelle 28: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 1

Abschätzung der Modulkosten:

Einhausung, Isolierung, Ventilator, Vorrichtung für Behältertransport, elektrischer Anschluss
=> ca. 5.000,- € (Einzelkiste, Transport durch Stapler) bis 15.000 (2-3 Kisten)

Modul 2: Abkühlung von Teilen in Wasser

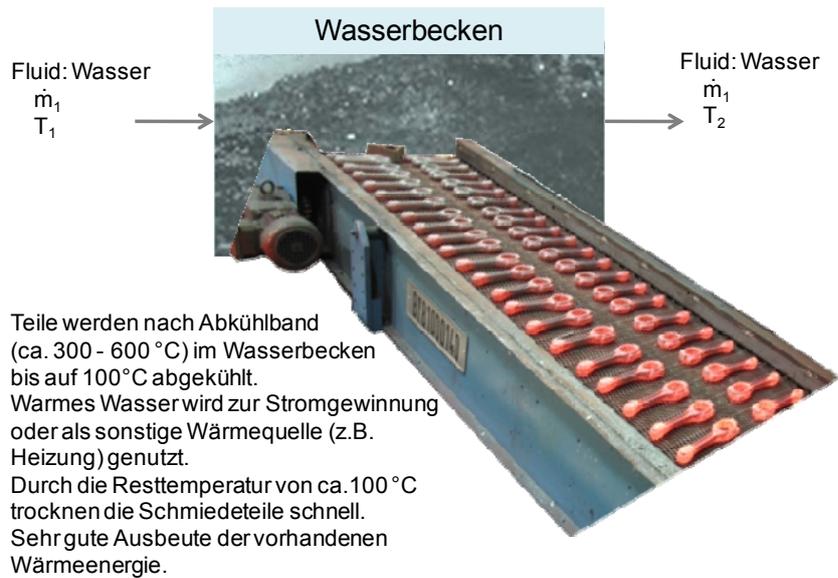


Bild 17: Modul 2

		Position	Grat / Butzen in Wasser	Fertigteil in Wasser
		Modul	2	2
Schmiedeteil	m_pkt (1)	to/h	0,3	0,7
		kg/s	0,08	0,19
	T_Ende (1)	°C	120	120
	T_Anfang (1)	°C	1000	600
	Q_pkt (2)	kW	51,0	57,6
Arbeitsmedium	Arbeitsmedium		Wasser	Wasser
	Übertragungsgrad auf Arbeitsmedium (1)		1	1
	Q_pkt (2)	kW	51,0	57,6
	T_Anfang (1)	°C	80	80
	T_Ende (1)	°C	100	100
	m_pkt (2)	kg/s	0,61	0,69
		kg/h	2187,1	2470,0
	V_pkt (2)	Nm ³ /h		
	m ³ /h	2,3	2,6	

(1) Vorgabe

(2) berechnet

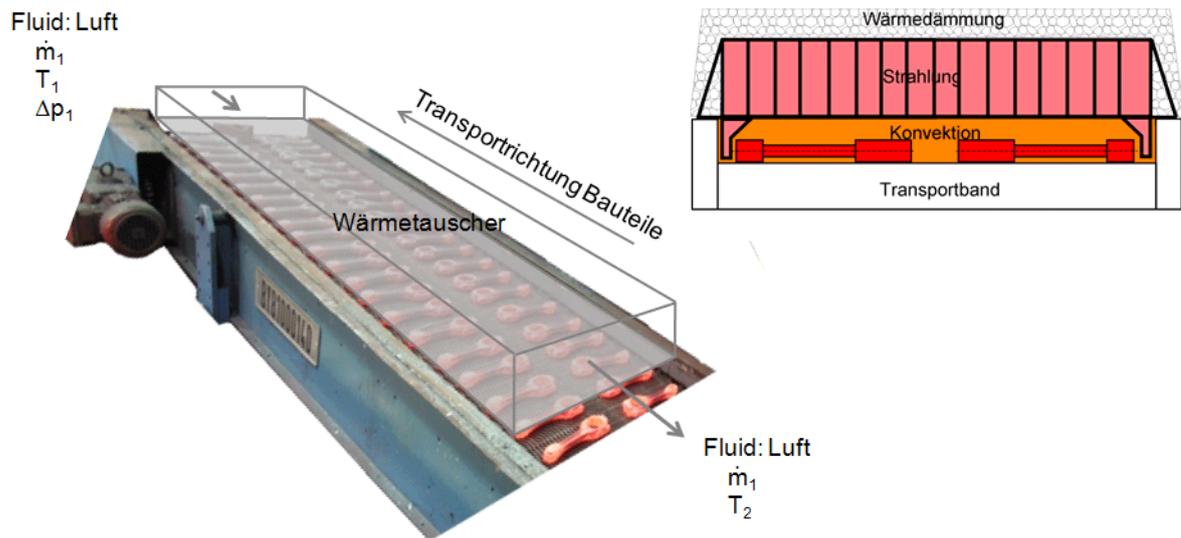
Tabelle 29: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 2

Abschätzung der Modulkosten:

Wasserbecken, Umwälzpumpe, Schmutzfilter, Teileförderer, Verrohrung, elektrischer Anschluss

=> ca. 15.000,- €

Modul 3: Abkühlband – Wärmeübertragung durch Strahlung - Gegenstromprinzip



- Die Unterseite des Wärmetauschers wird durch Wärmestrahlung erwärmt.
- Die zu erwärmende Luft wird im Gegenstromprinzip durch den Wärmetauscher geleitet.
- Die Bauteile werden nicht aktiv mit zusätzlicher Luft beaufschlagt => Es wird keine Beeinflussung des BY-Verfahrens erwartet.

Bild 18: Modul 3

Zur Abschätzung der übertragbaren Wärmeenergie bei einem Transportband wurden Temperaturmessungen und CFD-Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

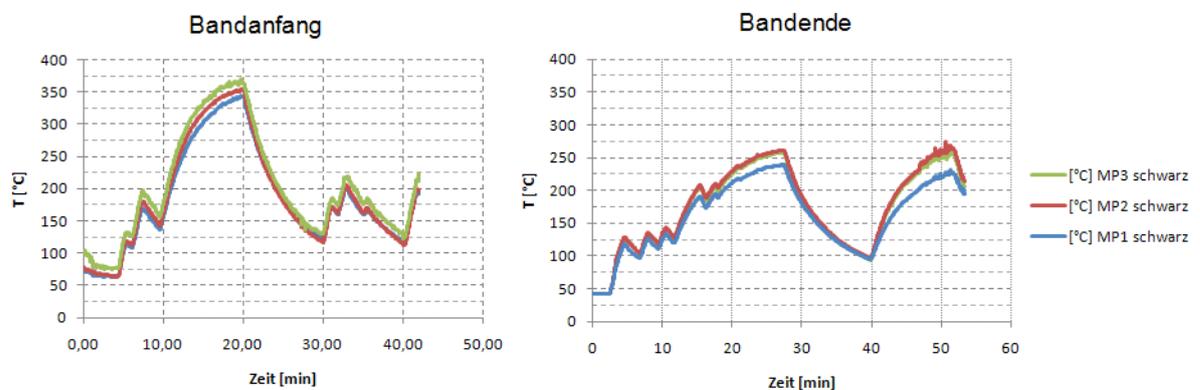


Bild 19: BY-Band - Ergebnisse Temperaturmessung (Unterseite Wärmetauscher)

- Im kontinuierlichen Betrieb wird eine Temperatur von ca. 350 °C am Bandanfang erreicht (Unterseite Wärmetauscher).
- Im kontinuierlichen Betrieb wird eine Temperatur von ca. 250 °C am Bandende erreicht (Unterseite Wärmetauscher).

Für die CFD Berechnung wurde ein Wärmetauscher wie in Bild 20 dargestellt modelliert.

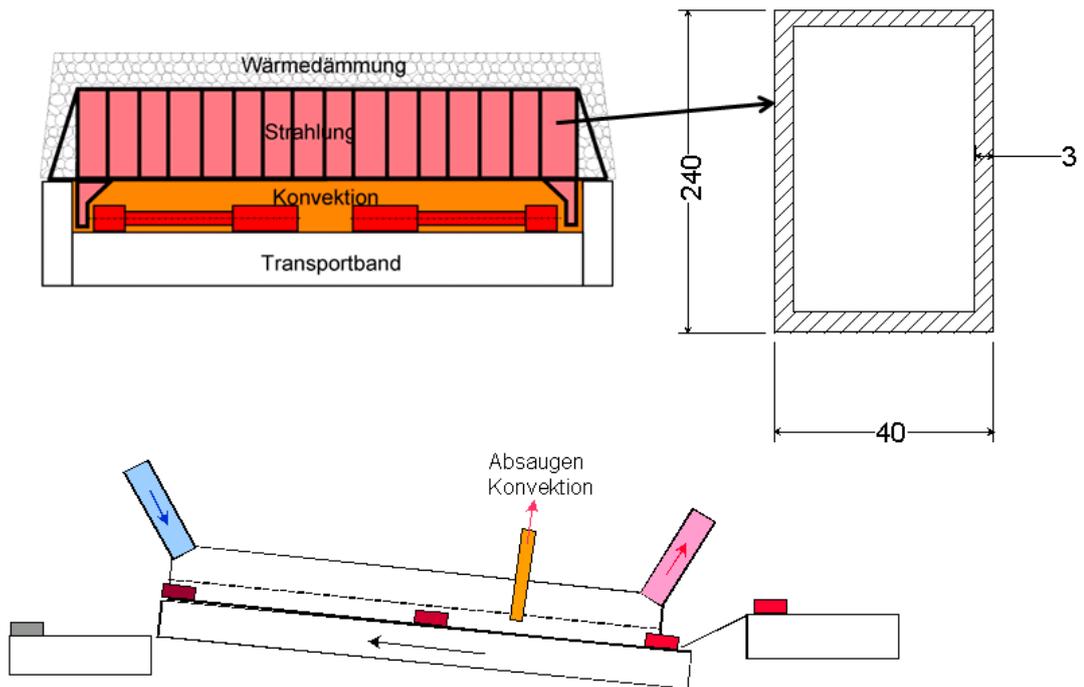
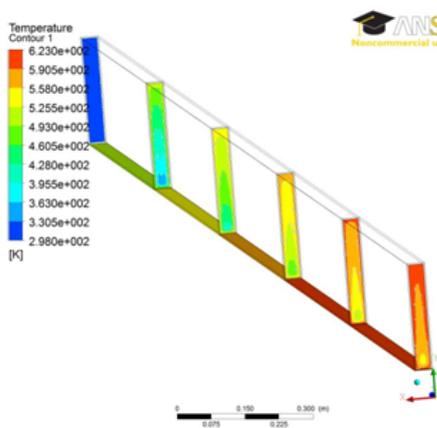


Bild 20: BY-Band - Wärmetauscherkonzept

Repräsentativ wurde nur ein Wärmetauscherrohr simuliert (s.Bild 21)



- 1 Rohr
- aufgeteilt in 5 Abschnitte
- zugeführter Wärmestrom aus Vorversuchen abgeleitet

Bild 21: BY-Band – CFD Simulation

Die Ergebnisse der Simulation sind in Bild 22 dargestellt.

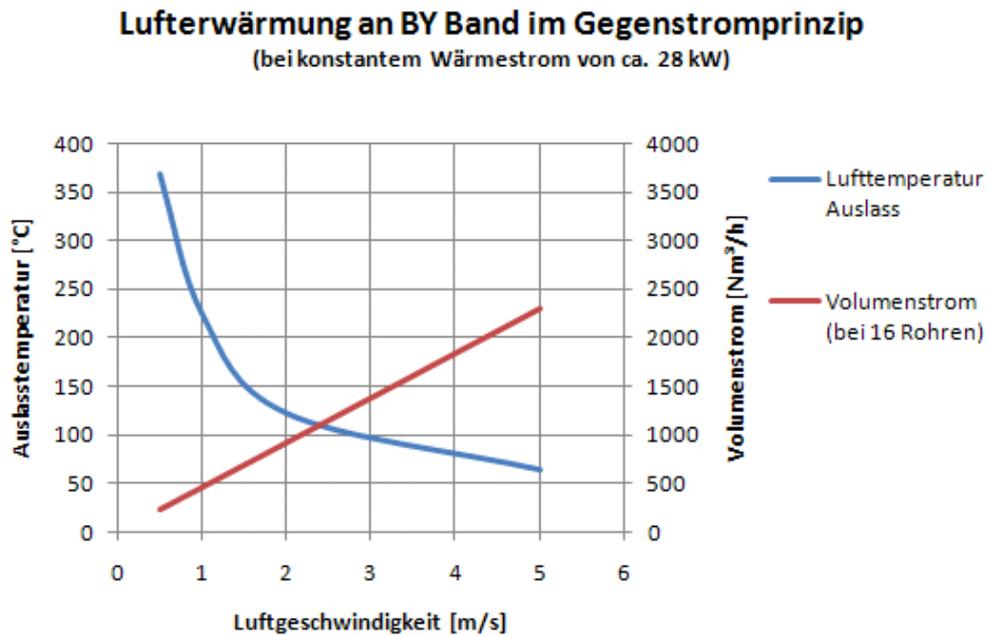


Bild 22: BY-Band – Ergebnisse CFD Simulation

Auf dem im Unternehmen betrachteten Abkühlband geben die Schmiedeteile eine Leistung von ca. 84,4 kW ab. Mit dem untersuchten Wärmetauscher (Kühler) können etwa 35 % (28 kW bei 1,4 to Schmiedeteile / h) der auf dem BY Band abgegebenen Leistung auf das Trägermedium Luft übertragen werden.

Hieraus ergibt sich die in Tabelle 30 dargestellte Energie-Übertragungsbilanz für Modul 3 (normiert auf 1 to Vormaterial/h bei 30% Gratanteil).

		Position	BY-Band (Luft)
		Modul	
Schmiedeteil	m_pkt (1)	to/h	0,7
		kg/s	0,19
	T_Ende (1)	°C	600
	T_Anfang (1)	°C	835
	Q_pkt (2)	kW	42,2
Arbeitsmedium	Arbeitsmedium		Luft
	Übertragungsgrad auf Arbeitsmedium (2) (3)		0,35
	Q_pkt (2)	kW	14,8
	T_Anfang (1)	°C	20
	T_Ende (1)	°C	200
	m_pkt (2)	kg/s	0,08
		kg/h	292,6
	V_pkt (2)	Nm³/h	248,0
	m³/h		

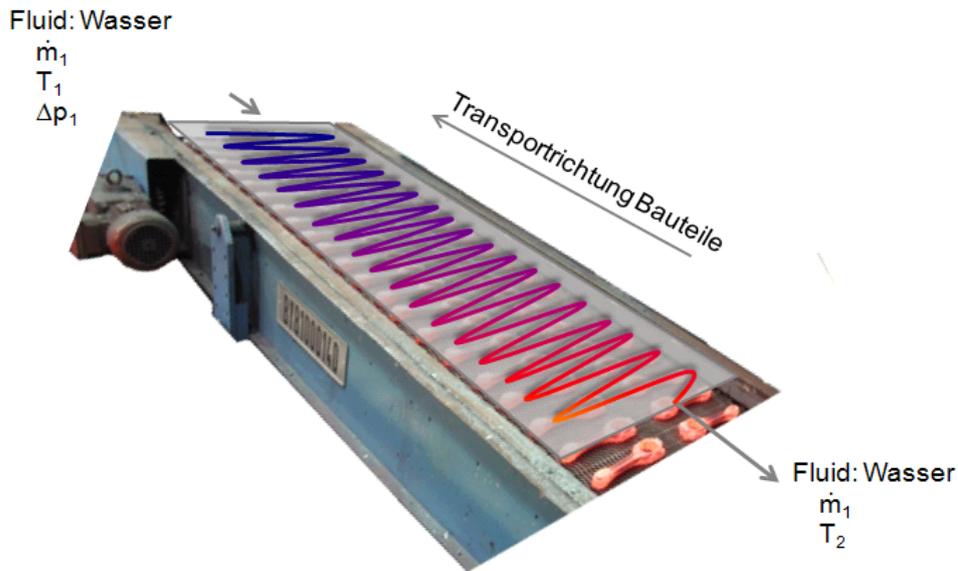
- (1) Vorgabe
- (2) berechnet
- (3) Strömungsversuche

Tabelle 30: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 3

Abschätzung der Modulkosten:

Wärmetauscher, Isolierung, Ventilator, elektrischer Anschluss => ca. 10.000,- €

Modul 4: Abkühlband – Wärmeübertragung durch Strahlung - Gegenstromprinzip



- Die Unterseite des Wärmetauschers wird durch Wärmestrahlung erwärmt.
- Das zu erwärmende Wasser wird im Gegenstromprinzip durch den Wärmetauscher geleitet.
- Die Bauteile werden nicht aktiv mit zusätzlicher Luft beaufschlagt => Es wird keine Beeinflussung des BY-Verfahrens erwartet.

Bild 23: Modul 4

		Position	BY-Band (Wasser)
		Modul	4
Schmiedeteil	m_pkt (1)	to/h	0,7
	T_Ende (1)	kg/s	0,19
	T_Anfang (1)	°C	600
	T_Anfang (1)	°C	835
	Q_pkt (2)	kW	42,2
Arbeitsmedium	Arbeitsmedium		Wasser
	Übertragungsgrad auf Arbeitsmedium (2)		0,35
	Q_pkt (2)	kW	14,8
	T_Anfang (1)	°C	80
	T_Ende (1)	°C	100
	m_pkt (2)	kg/s	0,18
		kg/h	633,3
	V_pkt (2)	Nm³/h	
m³/h		0,7	

(1) Vorgabe

(2) berechnet

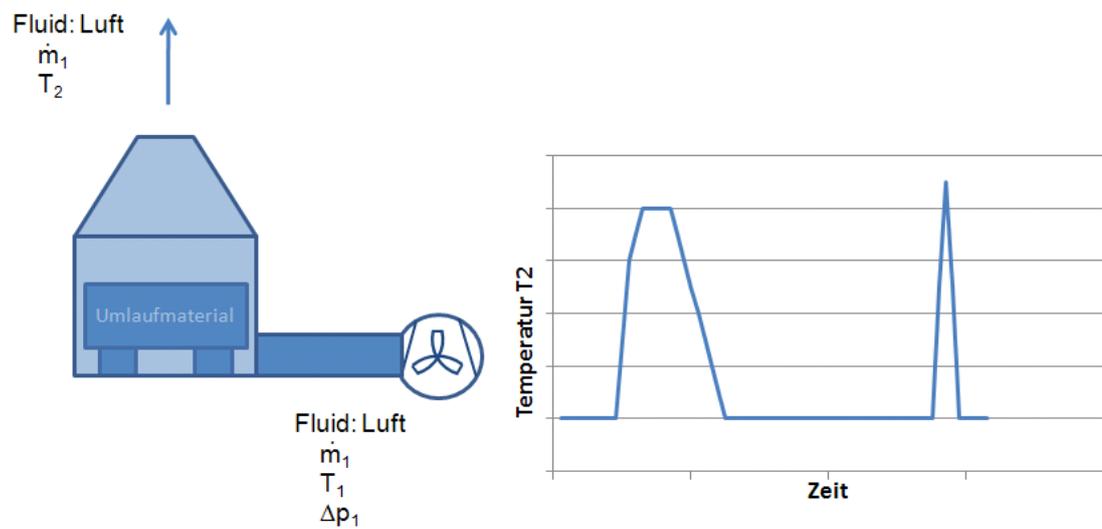
Tabelle 31: Beispielhafte Energie-Übertragungsbilanz bei Modul 4

Abschätzung der Modulkosten:

Wärmetauscher, Isolierung, Pumpe, elektrischer Anschluss

=> ca. 5.000,- €

Modul 10: Umlaufmaterial



- Hohes Temperaturniveau.
- Durch den stark diskontinuierlichen Anfall an Prozesswärme nur schwierig für direkte Energieumwandlung nutzbar.
=> Ggf. zur Aufladung von Latentwärmespeichern nutzbar.

Bild 24: Modul 10

Abschätzung der Modulkosten:

Einhausung, Isolierung, Ventilator, elektrischer Anschluss

=> ca. 5.000,- €

Wie Bild 25 zeigt, ist der ideale Massenstrom und somit die ideale Leistungsausbeute von der Auslegung der Einzelmodule und den spezifischen Prozessbedingungen abhängig.

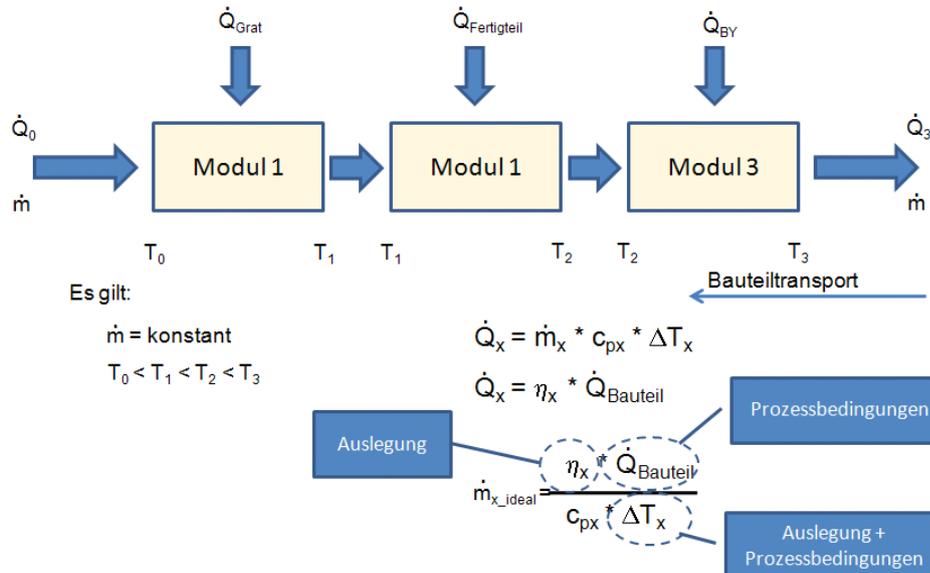


Bild 25: Reihenschaltung mehrerer Wärmeübertragungsmodule (Gegenstromprinzip)

Unter Idealbedingungen können die in Tabelle 32 dargestellten Energiemengen „gesammelt“ werden.

		Position	Weg A				Weg B			
			Grat / Butzen in Kiste	Fertigteil in Kiste	BY-Band (Luft)	Summe Weg A	Grat / Butzen in Wasser	Fertigteil in Wasser	BY-Band (Wasser)	Summe Weg B
		Modul	1	1	3		2	2	4	
Schmiedeteil	m_pkt (1)	to/h	0,3	0,7	0,7		0,3	0,7	0,7	
		kg/s	0,08	0,19	0,19		0,08	0,19	0,19	
	T_Ende (1)	°C	220	220	600		120	120	600	
	T_Anfang (1)	°C	1000	600	835		1000	600	835	
	Q_pkt (2)	kW	43,6	43,6	42,2		51,0	57,6	42,2	
Arbeitsmedium	Arbeitsmedium		Luft	Luft	Luft		Wasser	Wasser	Wasser	
	Übertragungsgrad auf Arbeitsmedium (1) (2) (3)		0,5	0,5	0,35		1	1	0,35	
	Q_pkt (2)	kW	21,8	21,8	14,8	58,3	51,0	57,6	14,8	123,4
	T_Anfang (1)	°C	20	20	20		80	80	80	
	T_Ende (1)	°C	200	200	200		100	100	100	
	m_pkt (2)	kg/s	0,12	0,12	0,08		0,61	0,69	0,18	
		kg/h	431,2	431,6	292,6		2187,1	2470,0	633,3	
	V_pkt (2)	Nm³/h	365,4	365,8	248,0					
	m³/h					2,3	2,6	0,7		

- (1) Vorgabe
- (2) berechnet
- (3) Strömungsversuche

Tabelle 32: Zusammengestellte Energiebilanz der Einzelmodule normiert auf 1 to Einsatzmaterial

Bezogen auf die durch die Erwärmung in die Bauteile eingebrachte Energiemenge (ca. 240kWh/to) entspricht dies einem Anteil von 24 % bis 52 %.

3.2.1.2 Energieleitung

Die Druckverluste in einem Rohrleitungssystem setzen sich zusammen aus:

- Druckverluste durch Rohrreibung
- Druckverluste durch Einzelwiderstände
- Druckverluste durch hydrostatischen Druck
- Druckverluste durch Geräte

In Bild 26 sind die Druckverluste eines geraden Rohrstücks (für 1 Meter Länge) in Folge von Rohrreibung und in Bild 27 die Druckverluste eines Rohrbogens (Einzelwiderstand) bei unterschiedlichen Durchmessern und unterschiedlicher Lufttemperatur dargestellt [Wag01]. Zur Abschätzung eines gegebenen Rohrsystems können die abgelesenen Werte für gerade Rohrstücke / Rohrbögen mit der tatsächlichen Länge / Anzahl multipliziert werden. Durch Addition dieser Werte ergibt sich dann der Gesamtdruckverlust.

Druckverlust eines geraden Rohrstücks bei unterschiedlichen Bedingungen

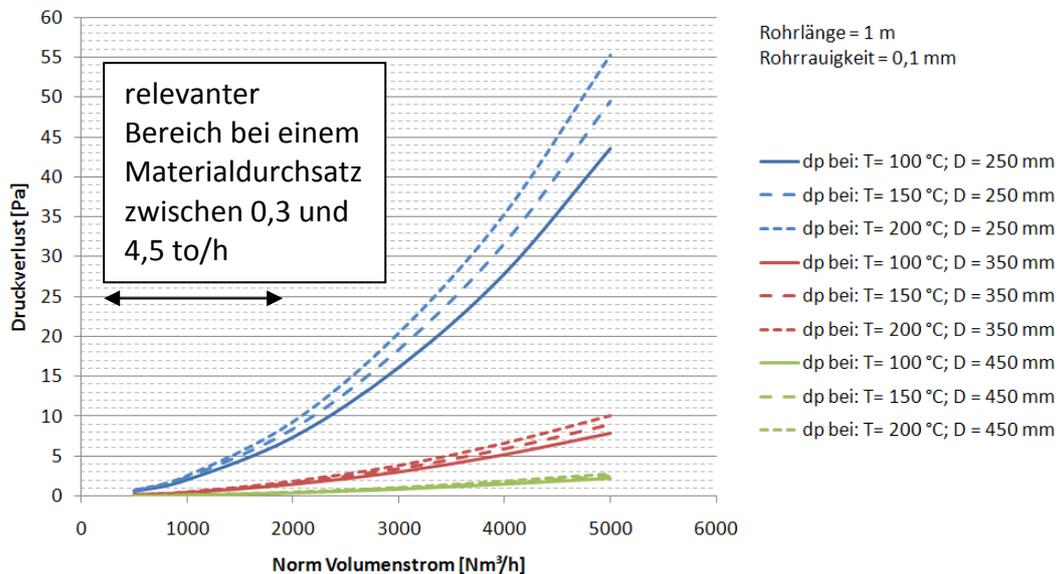


Bild 26: Druckverluste eines geraden Rohrstücks

Druckverlust eines Rohrbogens bei unterschiedlichen Bedingungen

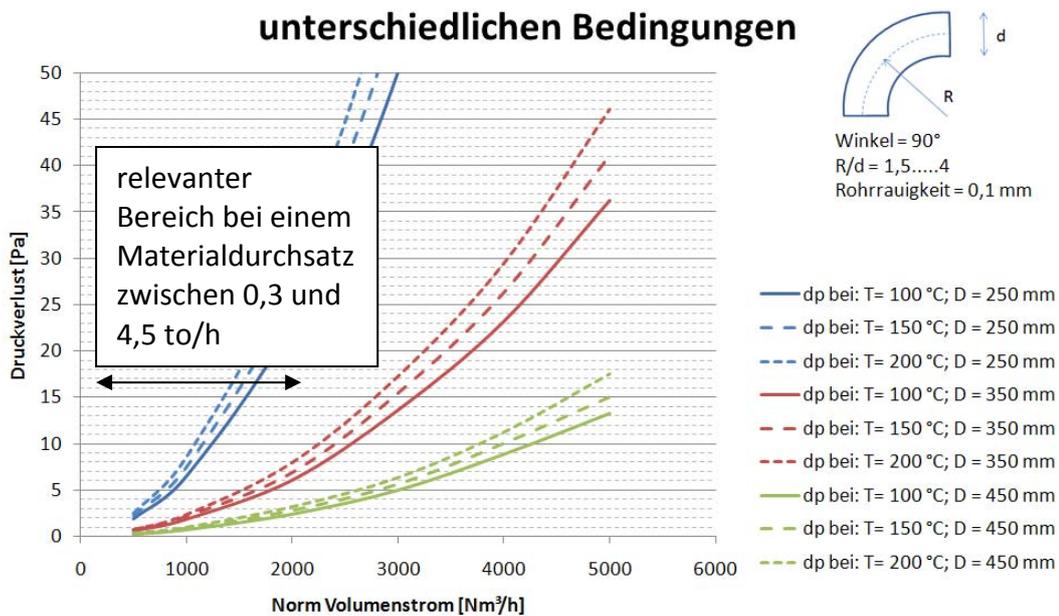


Bild 27: Druckverluste Rohrbogen

Der hydrostatische Druckverlust beträgt ca. 10 Pa pro Höhenmeter.

Da der Kostenaufwand mit steigendem Durchmesser zunimmt und der Druckverlust mit kleiner werdendem Durchmesser ansteigt, erscheint ein Durchmesser von ca. 350 mm als ein guter Kompromiss.

Für ein angenommenes Rohrleitungssystem von 20 m Länge, mit 4 Rohrbögen und einem Höhenunterschied von 3m führen die oben genannten Druckverluste zu den in [Bild 28](#) dargestellten Gesamtdruckverlusten:

Gesamtdruckverlust eines Rohrleitungssystems bei unterschiedlichen Bedingungen

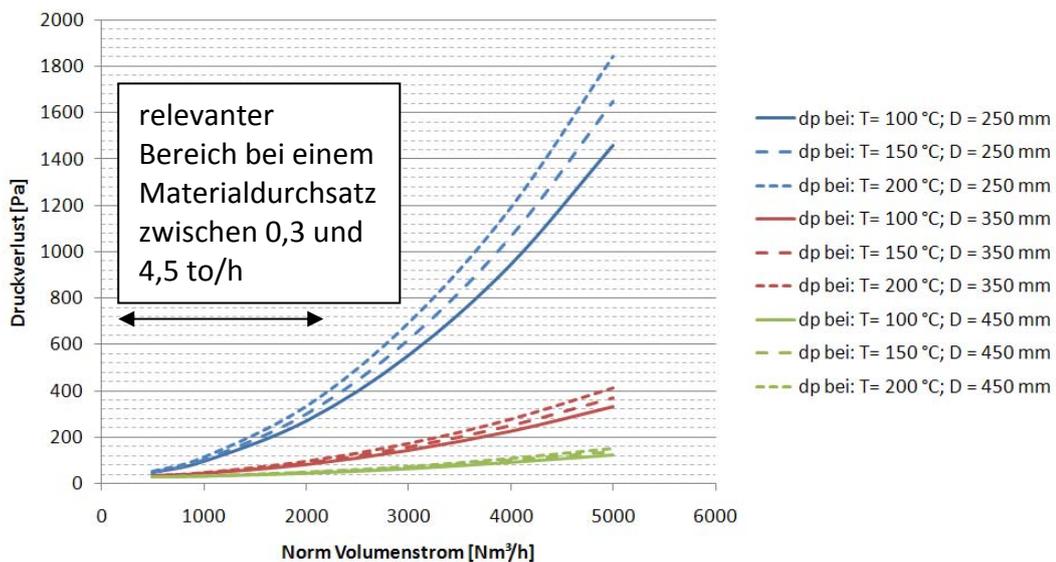


Bild 28: Gesamtdruckverluste eines Rohrleitungssystems

Für das o.g. beispielhafte Rohrleitungssystem wird ein Ventilator mit der in **Bild 29** dargestellten Leistung benötigt (Wirkungsgrad 50%, ohne Sicherheitsaufschlag).

Notwendige Lüfterleistung für eine angenommenens Rohrleitungssystem

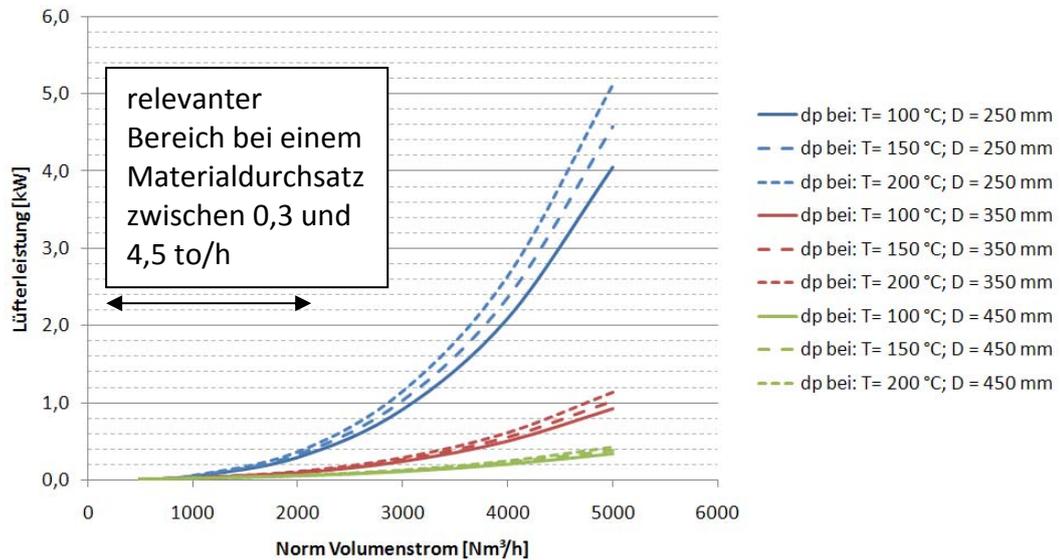


Bild 29: Lüfterleistung

In **Bild 30** sind die Wärmeverluste einer isolierten Rohrleitung dargestellt.

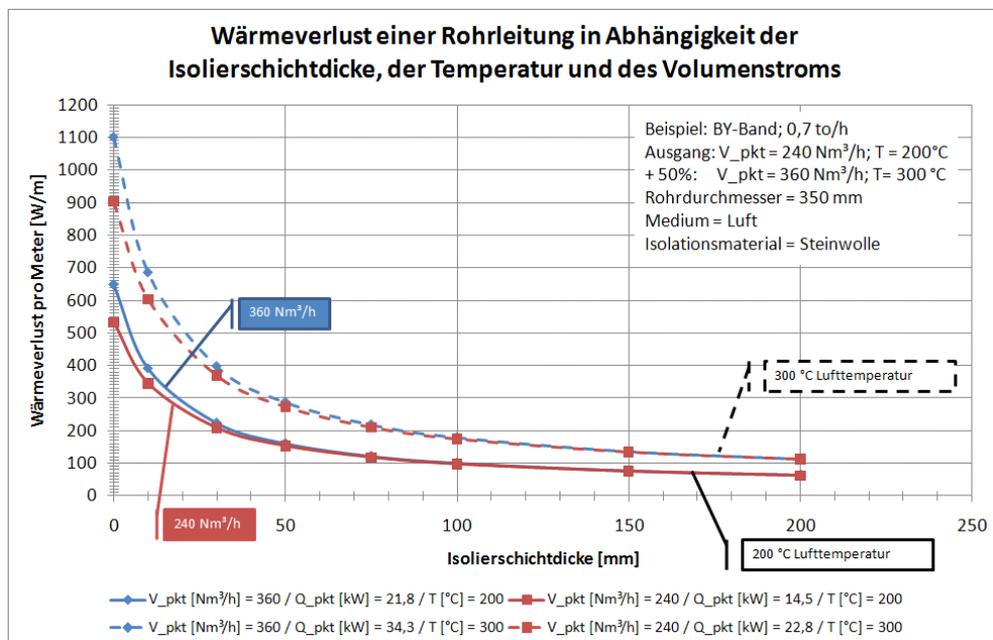


Bild 30: Wärmeverluste einer isolierten Rohrleitung nach [VDI06]

Bezogen auf eine verfügbare Leistung von 14,8 kW bei 200°C (BY-Band; Modul3) und einer angenommenen Rohrleitungslänge von 20 m ergibt sich bei einer Isolierschichtdicke von 100 mm ein Wärmeverlust von 1,94 kW (13%).

3.2.1.3 Messstrategie

Auf Basis der Warmversuche im Strömungskanal und daraus erfolgten Hochrechnungen/ Abschätzungen für den Industrieinsatz ergeben sich folgende Anforderungen an die Messtechnik:

- Lufttemperatur: bis 800°C
- Luftgeschwindigkeit: 1,0 – 20 m/s
- Luftreinheit: Verschmutzung mit Zunderpartikeln oder Staub möglich

Auf Basis einer umfassenden Marktrecherche und eigenen Erfahrungen bei den Warmversuchen wurden folgende Messgeräte bzw. Sensoren für die Umsetzungsphase ausgewählt:

Messgröße	Messgerät/-sensor	Bemerkung
Temperatur T	Mantelthermoelemente NiCr-Ni, Typ K	Temperaturbereich bis 1200°C.
Luftgeschwindigkeit	Edelstahl-Staurohr (Prandtl-Staurohr, Differenzdruckmessung)	Temperaturbereich bis 1000°C.

Tabelle 33: Ausgewählte Messgeräte

3.2.1.4 Energie umwandeln

Im Folgenden sind die Konzepte, die notwendigen Eingangsparameter und ausgewählte Anlagenkenndaten der einzelnen Energieumwandler (vgl. auch Bild 15: Modulares Gesamtkonzept) dargestellt:

Modul 5: Thermoelektrische Generatoren (TEG)

Thermogeneratoren wandeln auf Grund des Seebeck Effekts eine Temperaturdifferenz direkt in elektrischen Strom um. Damit ein Strom fließen kann, muss

- der Warmseite Wärme zugeführt werden und
- die Kaltseite gekühlt werden.

Verwendet werden hauptsächlich Halbleitermaterialien.

Angestrebt wird:

- eine gute elektrische Leitung
- eine schlechte Wärmeleitung (hohes ΔT)

Im Rahmen des Projektes wurde eine umfassende Marktstudie durchgeführt.

Anbieter	Ausgangsleistung [W_{el}]	Bewertung	Bemerkungen
marlow industries	2,7 bis 8	+	
Thermalforce	2 bis 47	+	
Hi-Z	3,3 bis 21,6	+	
Micorpelet	0,13 bis 0,2	-	geringe Baugröße (gedacht für Stromversorgung von Sensoren), aber größte Leistungsdichte (W/m^2)
Quick-Ohm	2,1 – 35	+	
NN		+	Es werden heute schon Elemente gebaut mit Wirkungsgraden um 10%. Genauere Angaben liegen zurzeit nicht vor.

Tabelle 34: Übersicht Anbieter von Thermoelektrischen Generatoren

Anbieter Typ	Ausgangsleistung	aufgen. Leistung	Eingangstemperatur	Gesamtwirkungsgrad elektrisch	Anlagenwirkungsgrad elektrisch	Preis ¹⁾
	P_{el} [W _{el}]	\dot{Q}_{auf} [W]	T_1 [°C]	η_{ges} [%]	η_{Anl} [%]	[€/kW]
marlow industries	2,7 bis 8	54 - 159	230		5	3050 - 6400
Thermalforce	2 bis 47	56 – 850	150 - 250		4-5,8	1.000 – 18.000
Hi-Z	3,3 bis 21,6	57 – 374	230		5,8	7.500 – 17.000
Micorpelet	0,13 bis 0,2	5,3 – 8,8	145		2,4	
Quick-ohm	2,1 – 7,9	52 – 200	175		4	4.000 – 12.000
Quick-ohm	35		490		4	
NN			> 200		10 - 15	

Tabelle 35: Eckwerte thermoelektrischer Generatoren

- 1) Preise gelten nur für die thermoelektrischen Generatoren (ohne Adaptierung und Kühlung)

Fazit:

- Elemente weisen zurzeit einen geringen Wirkungsgrad auf und sind relativ teuer. Aktuelle Entwicklungen streben Wirkungsgrade um 10% bei Kosten von ca. 1000 € / kW an
=> TEG könnten in Zukunft interessant werden.
- Die Kennlinie eines TEG (s. Bild 31) passt bezüglich Temperaturniveau und Temperaturstreuung nicht zu den typischen Bedingungen in einem Umformprozess (s. Bild 32). Daher sind TEG für einen Umformprozess zunächst ungeeignet. Zusätzliche Entwicklungen, die für eine homogene Temperatur sorgen (Isotherm-Transformator), könnten diese Problematik allerdings beseitigen.

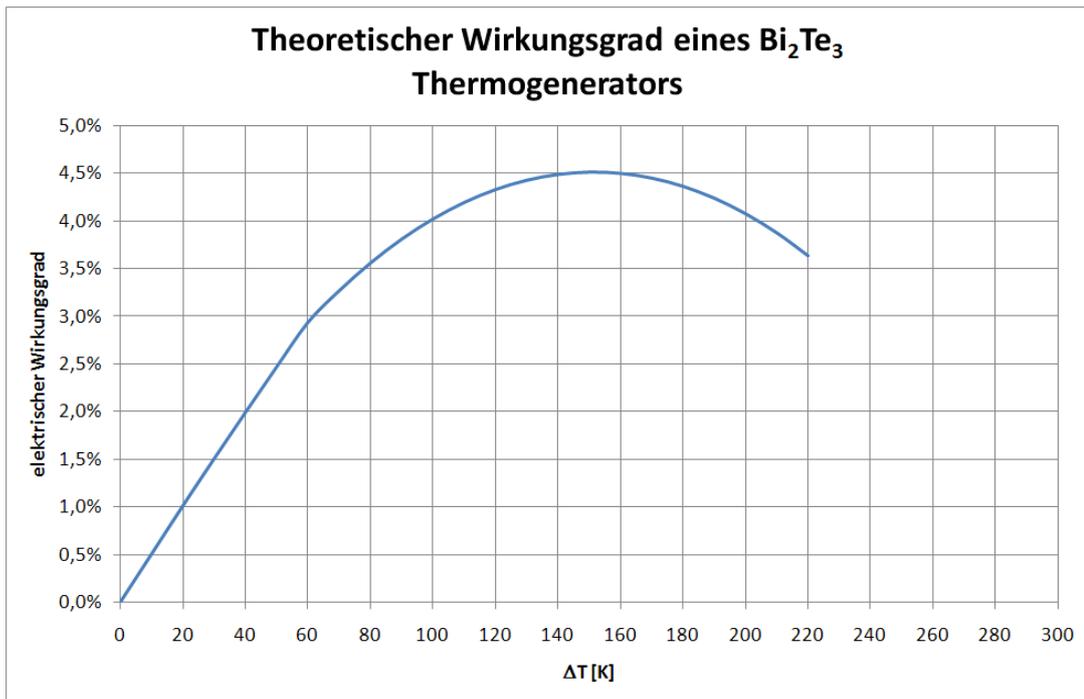


Bild 31: TEG Kennlinie

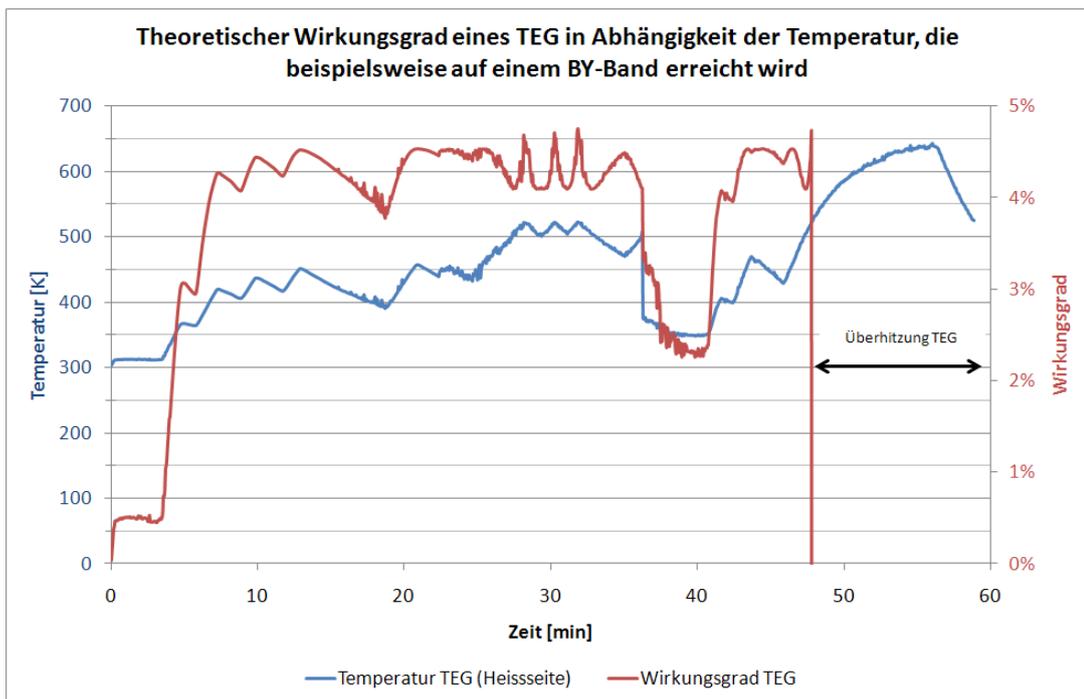


Bild 32: TEG unter typischen Bedingungen eines Umformprozesses

Modul 6: Stirlingmotor

Bei Stirlingmotoren wird Wärmeenergie in mechanische Arbeit umgesetzt. Bei einem Stirlingmotor wird die Wärmeenergie von außen an den Motor herangeführt. Dabei können beliebige Wärmequellen verwendet werden [Schl08].

Das physikalische Grundprinzip dieses Prozesses besteht aus einem periodischen Ablauf temperaturbedingter Expansion und Kompression eines unter Druck stehenden Arbeitsgases. Dieses Arbeitsgas ist zwischen zwei Kolben eingeschlossen, welche die auf sie ausgeübte Kraft über Pleuelstangen auf eine Rotationswelle übertragen.

Grundlegende Elemente dieses Volumenänderungsprozesses sind der erhitzte Arbeitszylinder, der gekühlte Kompressionszylinder und ein Regenerator, der zur Energiezwischenspeicherung dient, und damit angenähert isotherme Zustandsänderungen ermöglicht.

Im Rahmen des Projektes wurde eine umfangreiche Marktstudie durchgeführt. In Tabelle 36 sind einige Anbieter von Stirlingmotoren dargestellt.

Anbieter	Ausgangsleistung [kW _{el}]	Bewertung	Bemerkungen
SOLO Kleinmotoren GmbH	9	-	Nachfolger: Stirling Systems
Stirling Systems GmbH Stirling Systems AG	9	-	Nachfolger: Cleanergy
Cleanergy	10	+	Basis: SOLO 161 Anwendungen nur im Bereich CHP (Gas), und Solar (Dish-Stirling)
Weber Solartechnik Sunmachine	1,5 bis 3	-	zu klein Sunmachine ist insolvent
Viebach	0,5	-	zu klein
SPM (Stirling Power Module Energieumwandlungsges. mbH)	1	-	zu klein
Jenni Energietechnik	9 (SOLO) 1 (SPM)	- -	SOLO: wird nicht mehr unterstützt SPM: zu klein
BSR Solar Technologies	?	-	Nutzt Sonnenenergie für Wasserpumpen Keine konkreten Angaben verfügbar
Schlaich Bergemann und Partner	10 (50)	-	Ing.-Büro hat diverse Großprojekte mit Dish-Stirling-Systemen realisiert (SOLO)
Stirling Biopower	38	+	Als BHKW verfügbar, als System zur Abwärmenutzung ab 2011 geplant
Enatec micro-cogen B.V., Niederlande	1	-	zu klein
Disenco, Großbritannien	3	-	zu klein
WhisperGen, Neuseeland	1	-	zu klein
United Stirling AB, Malmö (Schweden)	75	-	Nachfolger: Kockums AB
Kockums AB, Schweden	75	-	Ausrüster für Marine U-Boote Keine Antwort auf Anfragen erhalten Kommerzielle Produkte ab 2009 über Firma Ripasso
Ripasso Energy AB, Schweden	?	-	Noch keine Informationen verfügbar
SES Stirling Energy Systems	25	+	Dish-Stirling-System SunCatcher
ReGen Power Systems, USA (MA)	250 bis 1000	-	zu groß
Stirling DK, Dänemark	9, 35, 75	-	Keine Anwendungen zur Wärmerückgewinnung
Infinia, USA	1 (für BHKW) 3,3 (Dish-Stirling)	- -	BHKW: zu klein Dish-Stirling: Nur für Solaranwendungen in Großprojekten > 1 MW
Sunpower, USA	0,035 bis 7,5	-	Forschung und Prototypenentwicklung z.B. für NASA

Tabelle 36: Übersicht Anbieter von Stirlingmotoren

Tabelle 37 zeigt beispielhaft die notwendigen Eingangsgrößen für größere Anlagen (elektrische Ausgangsleistung $\geq 10 \text{ kW}_{el}$):

Anbieter Typ	Ausgangsleistung	aufgen. Leistung	Eingangstemperatur	Massenstrom	Gesamtwirkungsgrad elektrisch	Anlagenwirkungsgrad elektrisch	Preis
	P_{el} [kW _{el}]	\dot{Q}_{auf} [kW]	T_1 [°C]	\dot{m} [kg / sec]	η_{ges} [%]	η_{Anl} [%]	[€/kW]
Cleanergy V161	10		>> 650				
Stirling Biopower FleXgen G38	17 (38)	100 (Optimal 133)	550 (Optimal 900)	0,95 (0,65)	3	17 28,5	6340 (2840)
SES Stirling Energy Systems	25	Keine weiteren Angaben Anwendungen nur im Bereich Solar (SunCatcher)					

Tabelle 37: Eckwerte Stirlingmotoren

Stirling-Motoren können prinzipiell schon bei sehr kleinen Temperaturdifferenzen betrieben werden, dabei sind der Wirkungsgrad und die erzielte Leistung jedoch extrem niedrig. Ursache dafür ist, dass die Größe des Wärmetauschers und damit auch die Kosten je kW_{el} Ausgangsleistung quadratisch mit $1/\Delta T$ steigen.

Eine elektrische Ausgangsleistung von $> 10 \text{ kW}$ kann mit heute am Markt verfügbaren Motoren nur mit sehr hohen Temperaturen erzielt werden, wie sie entweder bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern, Biomasse, Gas, etc. oder der starken Konzentration solarer Energie über Parabolspiegel entstehen.

Fazit:

- Für Anlagen auf der Basis von Stirlingmotoren kann nach heutigem Stand der Technik nicht die erforderliche Eingangstemperatur aus dem Massivumform-Prozess zur Verfügung gestellt werden.
- Nach heutigem Stand Technik und der erzielbaren Vergütung für den erzeugten Strom bzw. der Förderung der Anlagen sowie des geringen Wirkungsgrades ist ein wirtschaftlicher Betrieb noch nicht möglich.

Modul 7: Organic Rankine Cycle (ORC) Anlage

In einer ORC Anlage wird einem organischen Arbeitsmedium Wärme zugeführt. Das organische Arbeitsmedium hat einen geringen Siedepunkt (geringer als Wasser). Durch die Zufuhr von Wärme verdampft das Arbeitsmedium, wodurch ein Motor / eine Turbine angetrieben wird, der/die wiederum einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Der entspannte Dampf wird anschließend wieder verflüssigt, und dem Verdampfer erneut zugeführt (Kreisprozess).

Die Anwendung der ORC-Technologie zur Nutzung von Abwärme war bisher aus wirtschaftlichen Gründen auf einen Leistungsbereich oberhalb von 300 kW_{el} beschränkt. In jüngster Zeit wurden auch kleinere ORC-Anlagen entwickelt, die vor allem zur Nutzung der Abwärme von BHKWs und in den Bereichen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) (mit Brennstoffen Holz, Gas, Biomasse), Solarthermie, Geothermie Anwendung finden. Solarthermie und Geothermie führen die Wärmeenergie über ein flüssiges Medium einer Niedertemperatur-ORC-Anlage zu, während bei BHKWs ein gasförmiges Medium (Abgas) mit Temperaturen > 300 °C einer Hochtemperatur-ORC-Anlagen zuführen. BHKWs stellen die Wärmeenergie kontinuierlich (>8000 h/a) und auf gleichbleibend hohem Niveau bereit, was bei industrieller Abwärme aus Massivumform-Prozessen nicht möglich ist.

Im Rahmen des Projektes wurde eine umfassende Marktstudie durchgeführt. In Tabelle 38 sind einige Anbieter von ORC Anlage aufgelistet:

Anbieter	Ausgangsleistung P _{el} [kW _{el}]	Bewertung	Bemerkungen
LTi ADATURB GmbH	30 bis 60	+	Pilotphase
GMK (Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen)	50 (ORC-IC60) 500 bis 1600 (INDUCAL)	+ -	Baureihe INDUCAL ist zu groß
ergion GmbH (innovative energy systems)	bis 50	-	Stand: F+E, Probetrieb
Köhler & Ziegler Anlagentechnik GmbH	(50) 75 bis 200	+	
Adoratec GmbH	300 bis 2400	-	zu groß
CONPOWER Energieanlagen GmbH & Co. KG	30 bis 60	-	Firma bietet nur Dienstleistungen und OEM-Produkte
WSK Energie- und Umwelttechnik	52 bis 65	-	2 Anlagen wurden gebaut, keine weiteren Anlagen wegen finanzieller Probleme
Turbolina	3,5 bis 500	+	Vorserie
Turboden	400 bis 1500	-	zu groß
Ormat	200 bis 22000	-	zu groß
Pratt & Whitney	280	-	zu groß
Infinity Turbine	10	+	
Fraunhofer UMSICHT	30 bis 120	+	Liefert Prototypen und Vorserienmodelle

Tabelle 38: Übersicht ORC Anbieter

Tabelle 39 zeigt beispielhaft die notwendigen Eingangsgrößen für kleinere Anlagen (elektrische Ausgangsleistung von 10 bis 75 kW_{el})

Anbieter Typ	Ausgangsleistung	Aufgen. Leistung	Eingangstemperatur	Massenstrom	Gesamtwirkungsgrad elektrisch	Anlagenwirkungsgrad elektrisch	Preis
	P_{el} [kW _{el}]	\dot{Q}_{auf} [kW]	T_1 [°C]	\dot{m} [kg / sec]	η_{ges} [%]	η_{Anl} [%]	[€/kW]
LTi ADATURB TG 30 DV	30	180	250			17	ca. 5000
LTi ADATURB TG 60 DV	60	360	270	3,63	6,3	17	ca. 3000-4000
GMK ORC-IC60	50	500 bis 800	> 300 typ. 400	2,05	6	bis 10	5600
Köhler & Ziegler	75	min. 500	95 bis 250 Wasser			ca. 12 bis 14	3950 + WT
Turbolina	30	300	90 Wasser			10 bis 12	ca. 5400
Infinity Turbine	10	ca. 100	90 Wasser	ca. 1,4		ca. 10	3200 (ohne Generator)
Fraunhofer UMSICHT	60	400	450	1,28	10,7	ca. 15	

Tabelle 39: Eckwerte ORC-Prozess

Bei ORC Anlagen kann heute ein elektrischer Wirkungsgrad von ca. 10 – 20% erreicht werden.

Fazit:

- Die Anlagen sind für einen kontinuierlichen Betrieb ausgelegt. Bei diskontinuierlichem Betrieb (wie in Schmiedebetrieben auf Grund von Unterbrechungen üblich) wird empfohlen, mit Speichern zu arbeiten.
- Nach heutigem Stand Technik und der erzielbaren Vergütung für den erzeugten Strom bzw. der Förderung der Anlagen, sowie des erreichbaren Wirkungsgrads ist ein wirtschaftlicher Betrieb noch nicht möglich.

3.2.1.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Verwendung des erzeugten Stroms existieren prinzipiell die Möglichkeiten

- Eigenverbrauch oder
- Einspeisung in das öffentliche Netz

Bei der Vergütung ist zu beachten, ob die Anlage den Anforderungen an das KWK-Gesetz genügt. In diesem Fall wird ein von der Anlage abhängiger Zuschlag bei der Vergütung gewährt. Wesentliche Anforderung ist jedoch, dass durch den Stromumwandler neben der Stromerzeugung auch thermische Energie bereitgestellt und nachweislich genutzt wird.

Tabelle 40 gibt einen groben Überblick der möglichen Vergütung des erzeugten Stroms.

Vergütung	Eigenverbrauch [Cent/kWh]	Einspeisung [Cent/kWh]	Einschränkung
vermiedenen Strombezug	12,52		Da der Strom selbst verbraucht wird, entfällt für die produzierte Strommenge der Fremdbezug. Angegeben ist der Mittlere deutsche Strompreis für Umformbetriebe. Quelle: Euroforge 2009
Grundvergütung KWK (Mittelwert EEX vom vorangegangenen Quartal)	-	5,5	Für Anlagen < 50 kWel Wert variabel siehe EEX
Entgelt für vermiedene Netznutzung	-	0,5 bis 1	Werte geschätzt
Zuschlag	5,11	5,11	Anlagen die nach dem 1.1.2009 in Betrieb genommen werden müssen „hocheffizient“ sein. Vergütungsdauer: 10 Jahre bei Neuanlagen < 50 kW
Energiesteuerrückvergütung	-	-	Greift bei vorab versteuerten fossilen Energieträgern. Dann sind je nach Energieträger unterschiedliche Beträge anzusetzen.
Maximale Summe	17,73	11,61	

Tabelle 40: Vergütung für elektrischen Strom

Die Entwicklung der Grundvergütung laut EEX ist in folgendem Bild dargestellt:

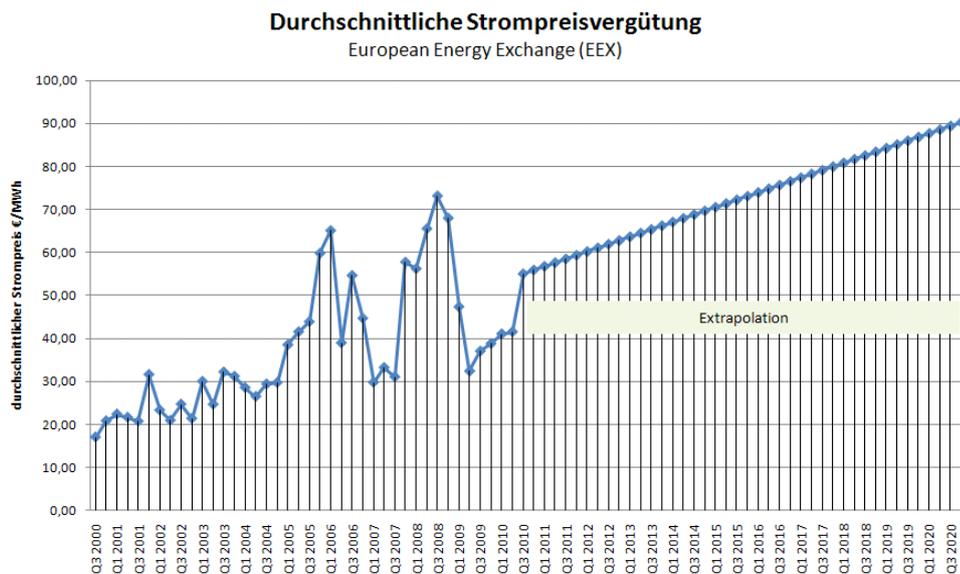


Bild 33: Grundvergütung elektrischer Strom nach EEX

Da der Zuschlag nach KWK Gesetz nicht sicher gegeben ist, wurde bei den folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen von einem Stromeigenverbrauch ohne KWK-Zuschlag ausgegangen. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 41.

<u>Investitionskosten</u>		TEG (optimal)	TEG (realistisch)	Stirling	ORC
Wärmetauscher (gesammelter Wärmeenergie zur Anlage)	€	5.000	5.000	incl.	incl.
Anlage	€	90.000	165.000	108.000	150.000
Generator	€	incl.	incl.	incl.	incl.
Netzanbindung	€	10.000	10.000	incl.	incl.
Summe Investitionskosten	€	105.000	180.000	108.000	150.000
<i>Info: Kosten / kW</i>		3.500	6.000	6.353	5.000
<u>Energieertrag des Umwandlers</u>		TEG	TEG	Stirling	ORC
Mittlere el. Ausgangsleistung	kW	30	30	17	30
Umwandler (1)					
Auslastung Schmiedelinie	Schichten/Tag	3	3	3	3
Arbeitstage	Tage / a	250	250	250	250
Lastlaufgrad Schmiedelinie	%	70	70	70	70
Laufzeit Schmiedelinie = Laufzeit Umwandler	h/a	4.200	4.200	4.200	4.200
Energieertrag Umwandler	kWh/a	126.000	126.000	71.400	126.000
Energievergütung	€/kWh	0,125	0,125	0,125	0,125
Summe Einnahme aus Energieertrag	€/a	15.750	15.750	8.925	15.750
<u>Instandhaltung und Reparatur</u>					
I+R Anteil	% von Invest	1	1	2	4
Summe i+R Kosten	€/a	-1.050	-1.800	-2.160	-6.000
<u>Verbrauchskosten des Umwandlers</u>					
Eigenverbrauch Strom	% von Ertrag	5	5	keine Angaben	bei Energieertrag berücksichtigt
Summe Verbrauchskosten	€/a	-787,5	-787,5	0	0
<u>Afa und Zinsen</u>					
Abschreibungszeit	a	15	15	15	15
Afa	€/a	7.000	12.000	7.200	10.000
Zinssatz	%	5	5	5	5
Zinsen	€/a	2.625	4.500	2.700	3.750
Summe Afa und Zinsen	€/a	-9.625	-16.500	-9.900	-13.750
<u>Raumkosten</u>					
zusätzlicher Platzbedarf	m ²	0	0	40	40
Kosten / m ²	€/m ² *a	24	24	24	24
Summe Raumkosten	€/a	0	0	-960	-960
<u>Bilanz</u>		TEG	TEG	Stirling	ORC
Summe Einnahmen	€/a	15.750	15.750	8.925	15.750
Summe Ausgaben	€/a	-11.463	-19.088	-13.020	-20.710
Einnahmen - Ausgaben	€/a	4.288	-3.338	-4.095	-4.960

(1) Annahme

Tabelle 41: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Energieumwandler

Fazit:

Derzeit arbeitet keins der untersuchten Energieumwandlungssysteme wirtschaftlich.

Bei den Kosten der „TEG (optimal)“ wurden zukünftig erwartete Kosten und Wirkungsgrade angenommen. Die meisten Entwicklungen befinden sich bei diesem System zurzeit in der Erprobungs- / Prototypenphase. Es kann erwartet werden, dass TEG in Zukunft wirtschaftlich einsetzbar sind.

Ein weiterer Anstieg der Stromkosten wird die wirtschaftliche Situation der Energieumwandlung zusätzlich verbessern.

3.2.2 Sonstige Nutzung der Prozesswärme

Modul 9: Sonstige thermische Nutzung

Nutzung	Bemerkung
Heizung (Büroräume)	Energiebedarf -> 150 kWh / (a*m ²) [Bausubstanz 80er Jahre] bei 1000 m ² und 0,05 €/kWh <u>=> 7500 € / (a*1000m²)</u>
Heizung (Fertigungshalle)	Beispiel: Hallenvolumen -> 6300 m ³ (Grundfläche ca. 600 m ²); Raumtemperatur -> 18 °C; 0,5-facher Luftwechsel => 170 kW Wärmebedarf Jahresvolllaststunden = 1600 h/a und 0,05 €/kWh => 13600 €/a
Heißwasser	Heißwasser: Wärmebedarf zur Erwärmung von 100 Liter Wasser um 50 °C -> 5,8 kWh/100 Liter Warmwasserbedarf pro Person und Tag -> 100 Liter [Annahme] bei 100 Personen, 220 Tage/a und 0,05€/kWh <u>=> 6380 € / (a*100Personen)</u>
Gesenkvorwärmung	Um 100 kg Gesenkmaterial um 100 °C zu erwärmen werden ca. 1,4 kWh Energie benötigt (verlustfreie Erwärmung) Beispiel: 1 Anlage wird 2 x pro Woche gerüstet 1 Gesenkpaar wiegt 600 kg -> Zu erwärmende Masse pro Jahr = 62400 kg/a -> Energiebedarf 873 kWh/a -> bei 0,05 €/kWh -> <u>Erwärmungskosten = 43,65 € / (a*Anlage)</u> => Bedarf unbedeutend
Latentwärmespeicherung	s. separate Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in <u>Tabelle 43</u>
Kälteerzeugung	zusätzliche Analyse notwendig
Sonstiger interner Nutzen	
Sonstiger externer Nutzen	

Tabelle 42: Sonstige mögliche Nutzung der Prozesswärme

Latentwärmespeicher bieten die Möglichkeit Prozesswärme zu speichern. Die gespeicherte Wärme kann dann zu einem späteren Zeitpunkt an beliebigem Ort wieder verwendet werden (es sind Speicher verfügbar, bei denen der Energieverlust <0,5% am Tag beträgt). Eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung zu einem mobilen Latentwärmespeicher ist in Tabelle 43 dargestellt.

<u>Investitionskosten</u>		Latentwärmespeicher
2 Anschlüsse	€	20.000
Speicher	€	50.000
Summe Investitionskosten	€	70.000
<i>Info: Kosten / kWh</i>		28
<u>Energieertrag</u>		
Speicherkapazität	kWh	2500
Lade- / Entladezyklen	/a	200
Energieertrag	kWh/a	500.000
Energievergütung	€/kWh	0,05
Summe Einnahme aus Energieertrag	€/a	25.000
<u>Instandhaltung und Reparatur</u>		
I+R Anteil	% von Invest	2
Summe i+R Kosten	€/a	-1.400
<u>Verbrauchskosten</u>		
Transportkosten / (Zyklus*a)	€/a	-4000
Summe Verbrauchskosten	€/a	-4000
<u>Afa und Zinsen</u>		
Abschreibungszeit	a	15
Afa	€/a	4.667
Zinssatz	%	5
Zinsen	€/a	1.750
Summe Afa und Zinsen	€/a	-6.417
<u>Raumkosten</u>		
zusätzlicher Platzbedarf	m ²	50
Kosten / m ²	€/m ² *a	24
Summe Raumkosten	€/a	-1200
<u>Bilanz</u>		
Summe Einnahmen	€/a	25.000
Summe Ausgaben	€/a	-13.017
Einnahmen - Ausgaben	€/a	11.983

Tabelle 43: Wirtschaftlichkeitsabschätzung Latentwärmespeicher

Fazit:

Die Anwendung von Latentwärmespeichern ist schon seit einigen Jahren bekannt. In der Massivumformung scheint der Einsatz derartiger Speicher sinnvoll / wirtschaftlich zu sein, wenn eine Konzeption gefunden wird, wie die Wärmeenergie vermarktet / genutzt werden kann. Des Weiteren sind Fragen wie Maschinenanbindung, Aufladezeiten / Entladezeiten etc. unter Praxisbedingungen detailliert zu untersuchen.

3.2.3 Reduzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung

3.2.3.1 HTS Anlage evaluieren

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass bei Erwärmung von Aluminiumblöcken mittels einer HTS Anlage eine gleichmäßige Durchwärmung über den Querschnitt mit Abweichungen von $< 5^{\circ}\text{C}$ erreicht werden kann (s. [Bild 34](#); Vergleiche die Messstellen 1 mit 2; 3 mit 4 und 5 mit 6).

Über die Länge des untersuchten Produkts ergibt sich eine maximale Gesamt-Temperaturabweichung von $< 20^{\circ}\text{C}$ (s. [Bild 34](#); Vergleiche Probe 3, Messstelle 1 und Messstelle 4).

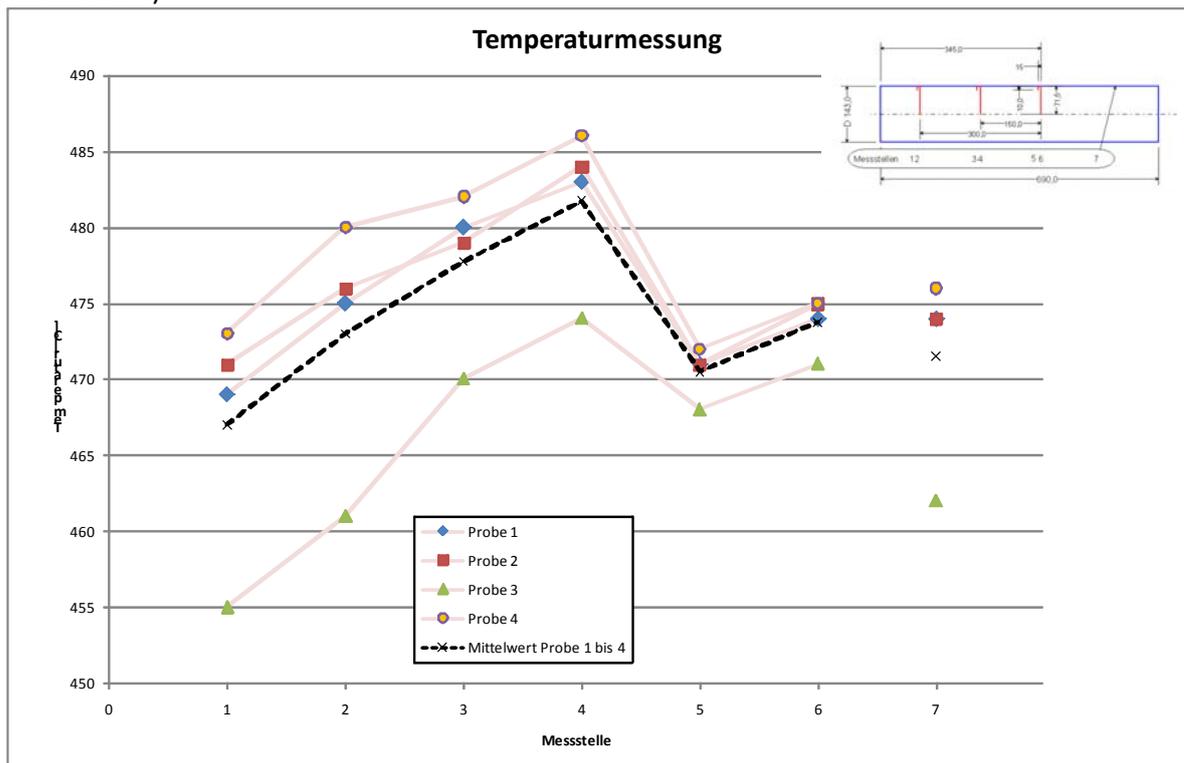


Bild 34: Temperaturmessung Versuchsserie 1

Der mit den eingestellten Versuchsbedingungen (Erwärmungszeit, Leistung etc.) erreichbare Wirkungsgrad beträgt 66,9% (Die erfassten Leistungsdaten sind in [Bild 35](#) dargestellt). Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen:

- Die Isolierung des Erwärmungsraums entsprach nicht mehr dem Auslieferungszustand. Vorgesehene Isolierungen waren teilweise nicht mehr vorhanden.
- Die eingestellte Sollleistung entsprach nicht der maximal möglich Anlagenleistung. Hierdurch wird der Einfluss des konstanten Grundverbrauches der Anlage auf den Wirkungsgrad höher gewichtet.
- Der Verbrauch für die Kühlung könnte nach Herstellerangaben um ca. 5 kW optimiert werden (Einfluss auf Wirkungsgrad ca. 1 bis 2%)
- Bei den Versuchen kamen die Bauteilaufnahmen nicht auf Betriebstemperatur.

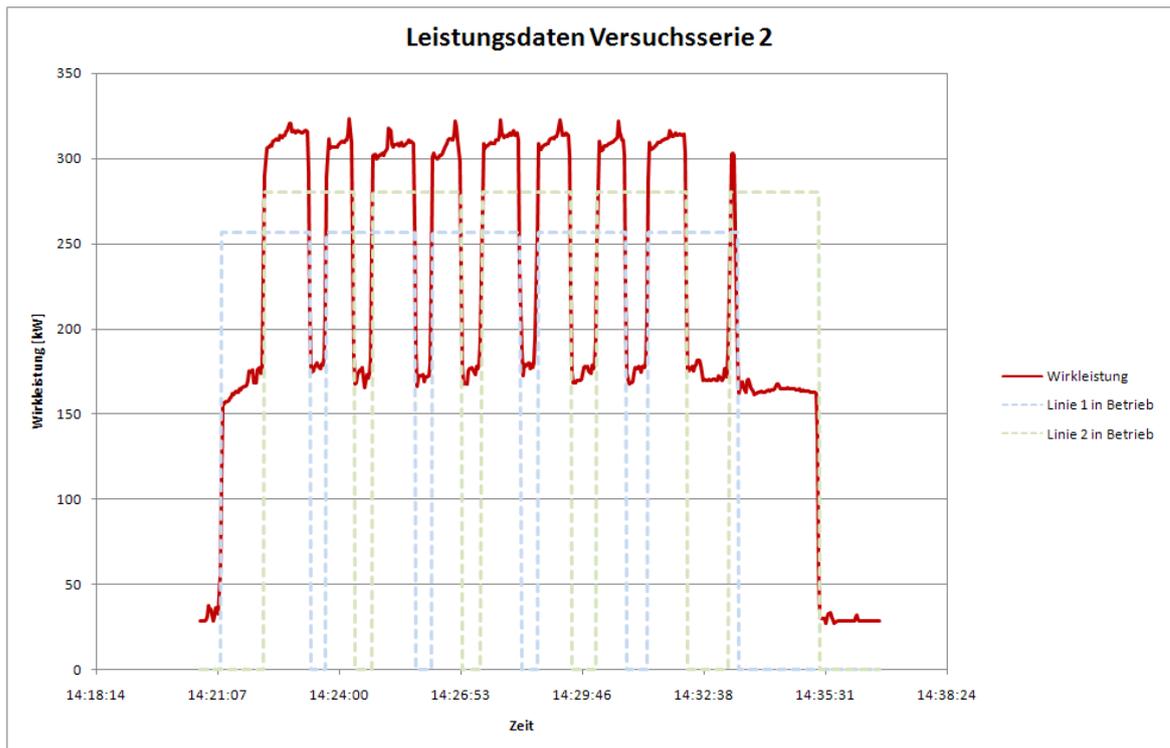


Bild 35: Erfasste Leistungsdaten

Wird die Anlage am optimalen Arbeitspunkt betrieben (Vollauslastung, maximale Leistung), ist ein Wirkungsgrad $> 70\%$ zu erwarten.

Bei einer Anlagennutzung unterhalb der Vollauslastung verschlechtert sich der Wirkungsgrad, da sowohl im Leerlauf (Standby) als auch im ausgeschalteten Anlagenzustand Strom verbraucht wird (s. [Bild 36](#))

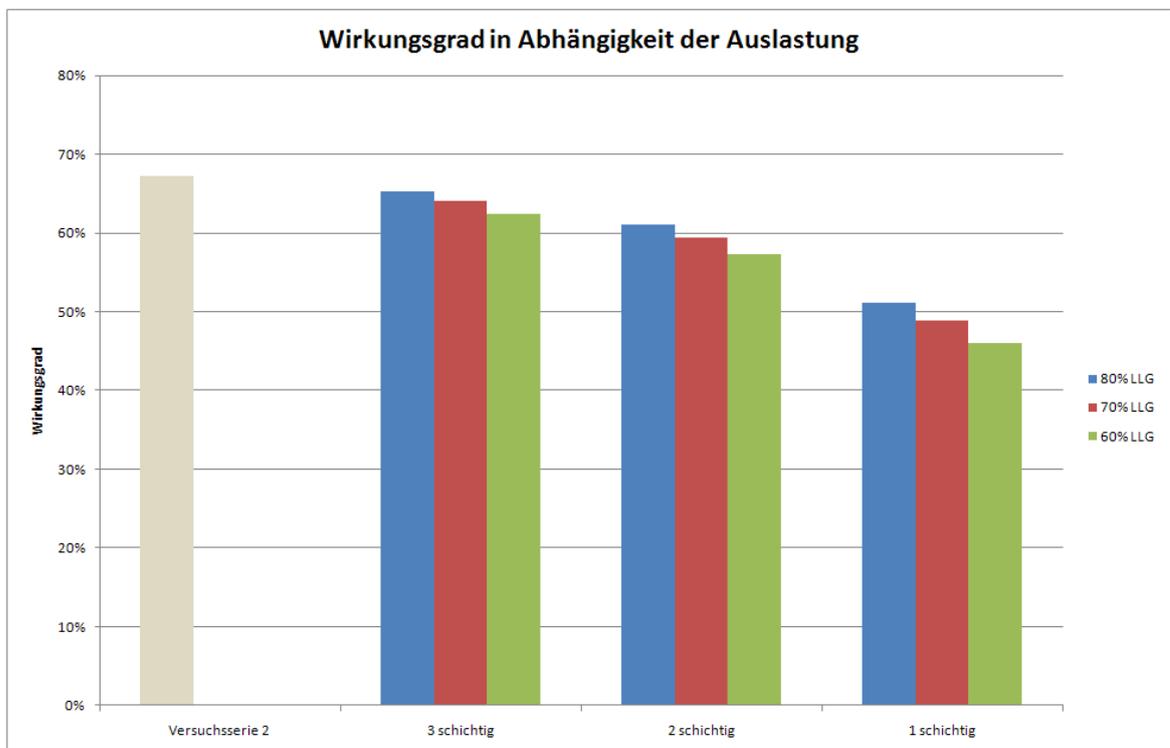


Bild 36: Wirkungsgrad einer HTS Anlage in Abhängigkeit der Auslastung

Anmerkung: Der Wirkungsgrad der Versuchsserie 2 stellt den unter Serienbedingungen maximal erreichbaren Wirkungsgrad dar. D.h. 24h/Tag Auslastung und keine Unterbrechungen.

3.2.3.2 *Pflichtenheft Erwärmung von Schmiedeteilen*

Das Pflichtenheft ist in Anhang 5 dargestellt.

3.2.3.3 *Umsetzungskonzept für die Erwärmung von Stahl mittels HTS Anlage*

Bild 37 zeigt schematisch das Anlagenkonzept einer HTS-Anlage für die Stahlerwärmung.

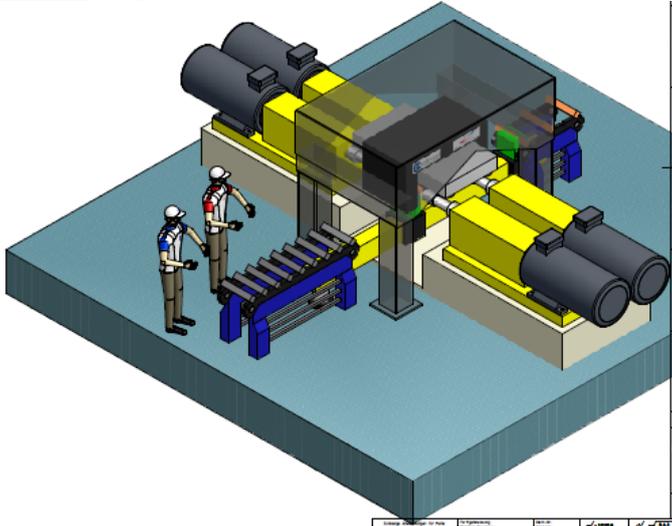


Bild 37: Übersicht der Gesamtanlage

Die Erwärmung erfolgt in zwei Schritten: Bis zur Curie-Temperatur wird das Magnetfeld wegen des Ferromagnetismus des Materials auf das Werkstück fokussiert und damit verstärkt. Oberhalb der Curie-Temperatur ist diese Verstärkung nicht wirksam.

Bei dem aktuellen Stand können nur aus Erfahrungswerten Annahmen über den Wirkungsgrad getroffen werden. Bis zur Curie-Temperatur sind 85% zu erwarten, bei höheren Temperaturen ist der Wert geringer (Annahme: $\leq 75\%$)

Temperaturen	Heizleistung [kW]	Wirkungsgrad	Dauer [s]
20°C - 770°C	218	0,85	64
770°C-1200°C	51	0,75	179

Tabelle 44: Erwärmungsschritte HTS

Bei der Berechnung der Gesamttaktzeit ist die Stillstandszeit des Ofens zu berücksichtigen (s. Kap. 3.2.3.4)

Als Fazit ergeben sich folgende Kennzahlen für das vorgestellt Konzept:

- Taktzeit 132 s,
- Tonnage 870 kg/h.

3.2.3.4 Handlings- und Produktionskonzept

Die wichtigste Eigenschaft, die bei dem Entwurf zu beachten ist, sind die ferromagnetischen Kräfte auf die Werkstücke. Dabei können Kräfte bis 1400 N auftreten. Bis zu der Curie-Temperatur von $\sim 770^\circ\text{C}$ werden die Werkstücke von dem Magneten angezogen, so dass zum Beladen ein starker das Werkstück umgreifender Greifer wichtig ist. Weil gleichzeitig der Luftspalt zwischen Werkstück und Magnet zur Leistungssteigerung klein sein soll, wird der Magnet zum Beladen hochgeklappt.

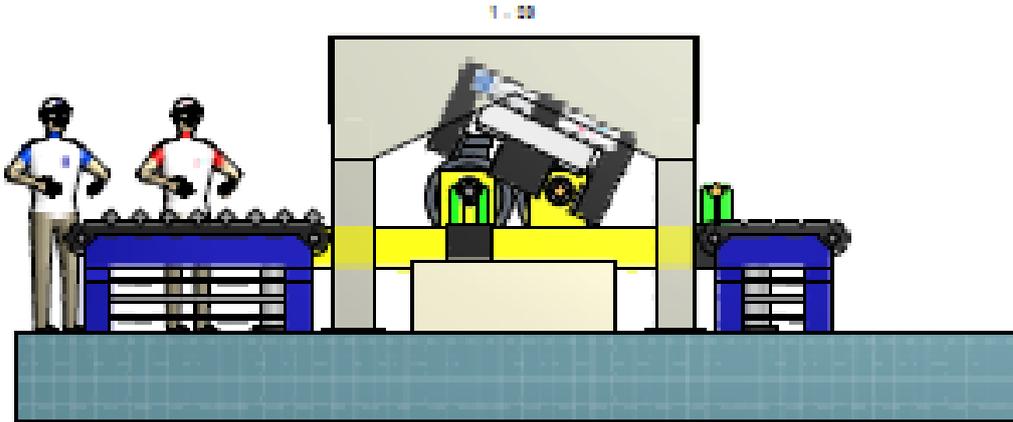


Bild 38: Verkipfung des Magneten zum Be- und Entladen

Der Ofen besitzt zwei Heizkammern, die alternierend bedient werden. Durch die Benutzung eines so genannten M-Jochs wird der magnetische Fluss einer HTS-Spule auf zwei Kammern gelenkt.

Der Ablauf ist folgendermaßen (verdeutlicht an Bild 38):

- Beenden der Heizens eines Werkstücks,
- Hochklappen des Jochs (Dauer 2 s),
- Greifer holt heißes Werkstück, Lösen der Klemmung (9 s),
- Ein zweiter Greifer legt kaltes Werkstück ein, Klemmen (8 s),
- Herunterklappen des Magneten und Beginn des Heizens durch Drehen des Bolzens im Feld (3 s).

Die verschiedenen Aktionen sind dabei teilweise parallel, um die Stillstandszeit des Ofens zu minimieren, so kann z. B. der Greifer mit dem kalten Werkstück schon kurz vor der Ladeposition warten.

Die Stillstandszeit bei dem vorgestellten Handlingskonzept beträgt 20 s.

3.2.3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In Bild 39 wurden die Erwärmungskosten einer HTS Anlage und einem konventionellen Induktionserwärmer dargestellt. Hierbei wurden die folgenden relevanten Parameter verwendet:

Parameter	Einheit	HTS-Anlage	konv. Induktionsanlage
Bauteilmasse	kg	31,6	
Bauteilabmessungen	mm	90 x 90 x 500	
Taktzeit	sec	132	20
Investitionskosten	€	1.500.000	700.000
Afa	a	15	
Zinsen	%	5	
Stromkosten	€/kWh	0,1	
Anlagenauslastung	h	3 Schichten bei 70% Lastlaufgrad	

Tabelle 45: Parameter Erwärmungskostenvergleich (Kosten und Taktzeit: Herstellerangaben)

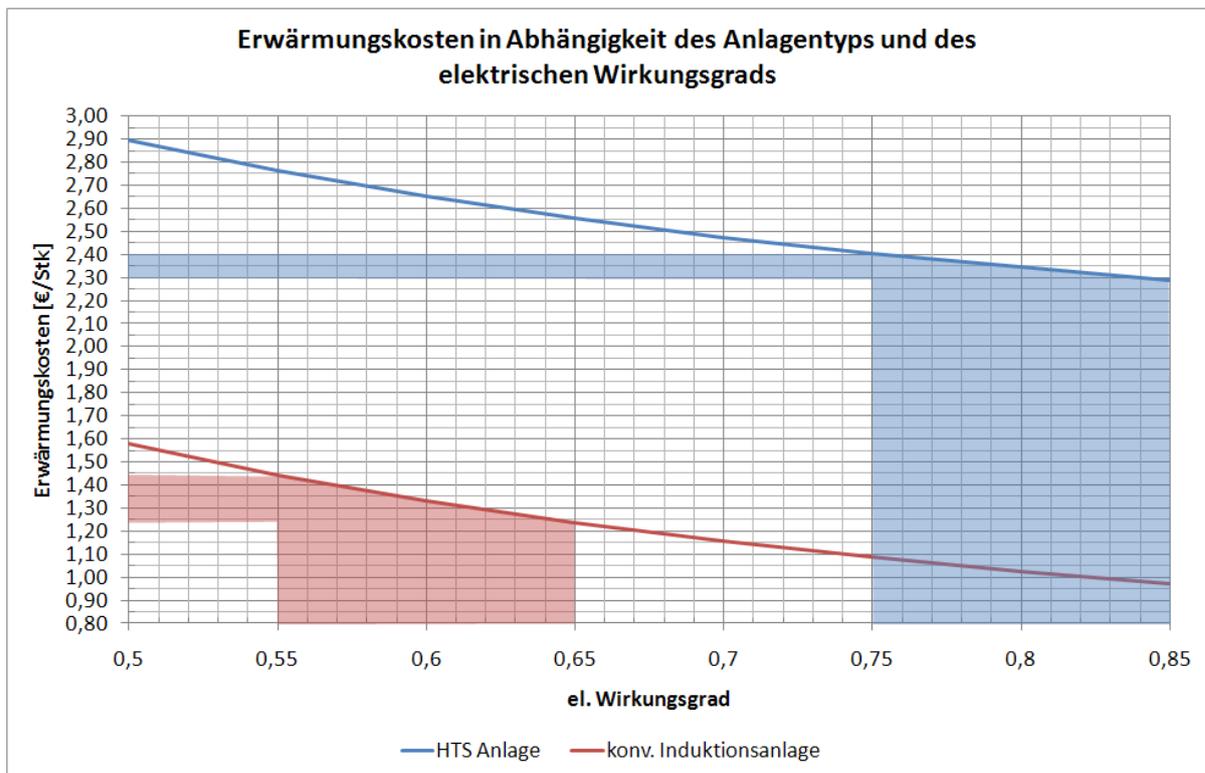


Bild 39: Vergleich Erwärmungskosten

Unter Berücksichtigung eines elektrischen Wirkungsgrads von 60% (\pm 5%) bei der konventionellen Induktionsanlage und 80% (\pm 5%) bei der HTS Anlage, ergeben sich Erwärmungskosten zwischen 1,24 und 1,44 €/Stück bei der konventionellen Induktionsanlage und zwischen 2,29 und 2,40 €/Stück bei der HTS Anlage.

Dieser Vergleich zeigt, dass die HTS Anlage zurzeit aus wirtschaftlicher Sicht einen klaren Nachteil gegenüber der konventionellen Induktionsanlage hat.

Es existieren allerdings Vorüberlegungen beim Hersteller der HTS-Anlage zur deutlichen Steigerung der Produktivität und somit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

3.2.4 Rückführung und Nutzung der Energie aus der Prozesswärme in den Produktionsprozess

3.2.4.1 Entwicklung und Bewertung eines Konzepts zur Übertragung gebündelter Energie auf das Vormaterial

Für die Erwärmung von Stahl, wird die in Bild 40 dargestellte Erwärmungsenergie (ohne Berücksichtigung von Verlusten bei der Erwärmung) benötigt.

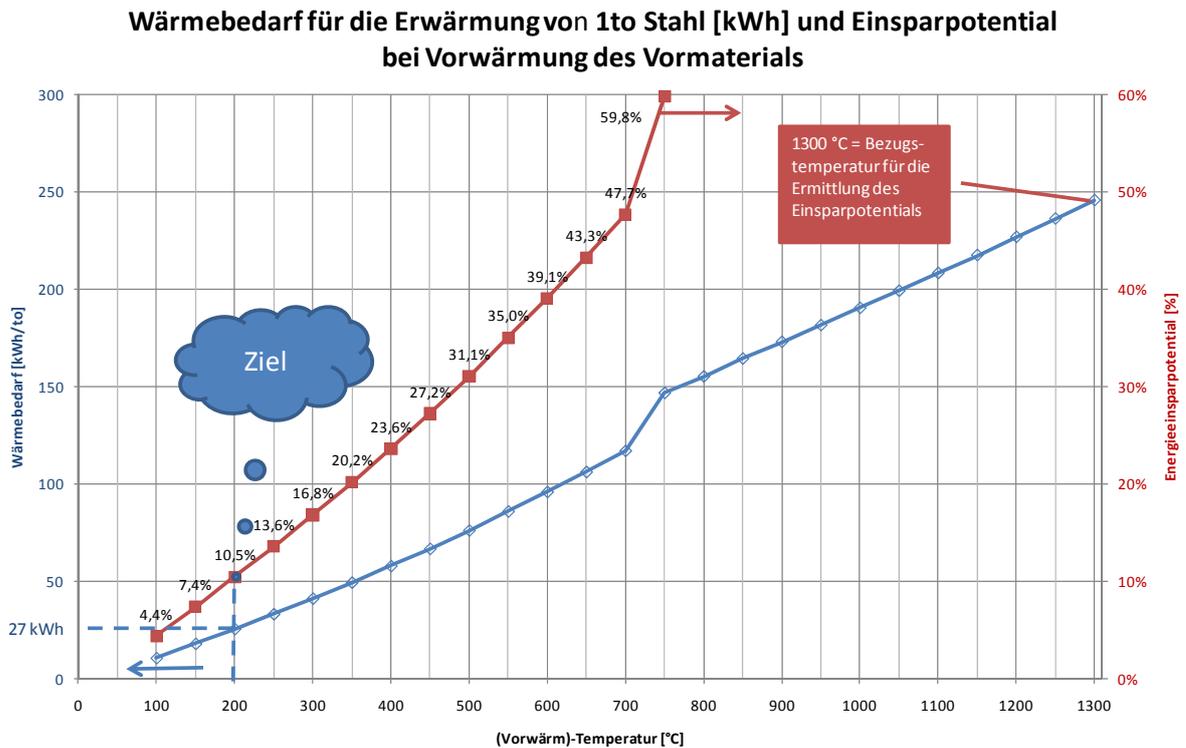


Bild 40: Wärmebedarf für die Stahlerwärmung

Eine Vorwärmung des Schmiedematerials auf 200 °C (473 K) mit Hilfe der vorhandenen Prozesswärme reduziert den notwendigen Energiebedarf um ca. 10%.

Modul 8: Vormaterialerwärmung

Die Erwärmung einer Vormaterialschüttung wurde mittels CFD Berechnung für einen Durchmesser und 2 Strömungsgeschwindigkeiten mit einem vereinfachten 2D Modell durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen:

- Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s wird 90% der Endtemperatur (426K) nach 4540 sec (76 min) erreicht. Die Temperaturdifferenz innerhalb der Schüttung beträgt dann 23K.
- 95 % der Endtemperatur (449K) werden nach 6660 sec (111 min) erreicht. Die Temperaturdifferenz innerhalb der Schüttung beträgt dann 14K (s. [Bild 41](#)).
- Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s wird 90% der Endtemperatur (426K) nach 1340 sec (22 min) erreicht. Die Temperaturdifferenz innerhalb der Schüttung beträgt dann 9K.
- 95 % der Endtemperatur (449K) werden nach 2040 sec (34 min) erreicht. Die Temperaturdifferenz innerhalb der Schüttung beträgt dann 6K (s. [Bild 42](#)).

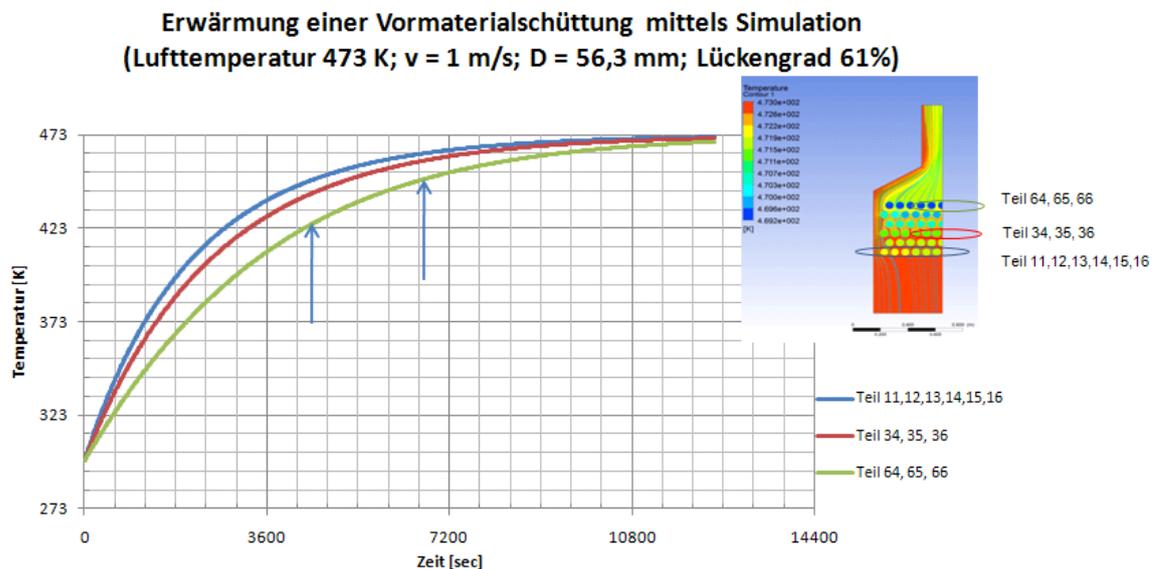


Bild 41: Erwärmung einer Vormaterialschüttung, $v = 1$ m/s

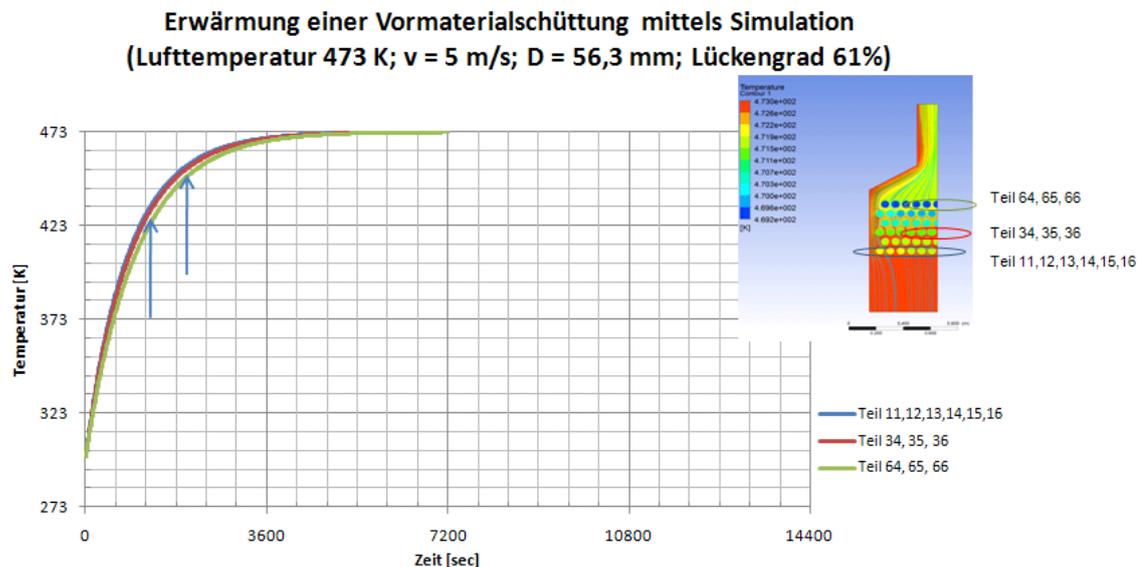


Bild 42: Erwärmung einer Vormaterialschüttung, $v = 5$ m/s

Da die Prozesswärme zur Vormaterialerwärmung nicht auf einem konstanten Temperaturniveau zur Verfügung steht, ist eine Homogenisierung der Materialabschnitte vor der weiteren induktiven Erwärmung notwendig, da ansonsten eine zusätzliche Temperaturstreuung am erwärmten Produkt auftritt (s. Bild 43).

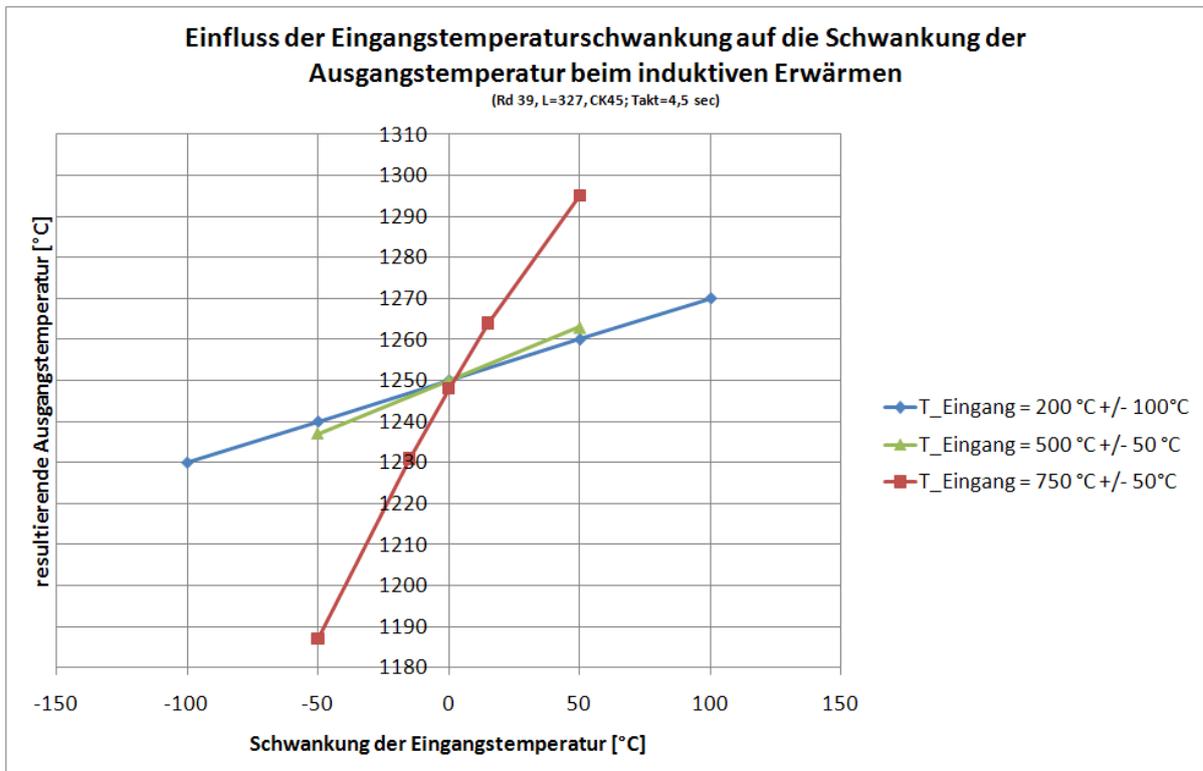


Bild 43: Einfluss der Eingangstemperaturschwankung beim induktiven Erwärmen auf die Ausgangstemperatur

Zur Homogenisierung der Vorwärmung können verschiedene Wege gewählt werden. So kann zum einen eine einzelne Induktionsspule eingesetzt werden, die nach vorheriger Temperaturmessung das Material auf eine vorgegebene „Zwischentemperatur“ erwärmt.

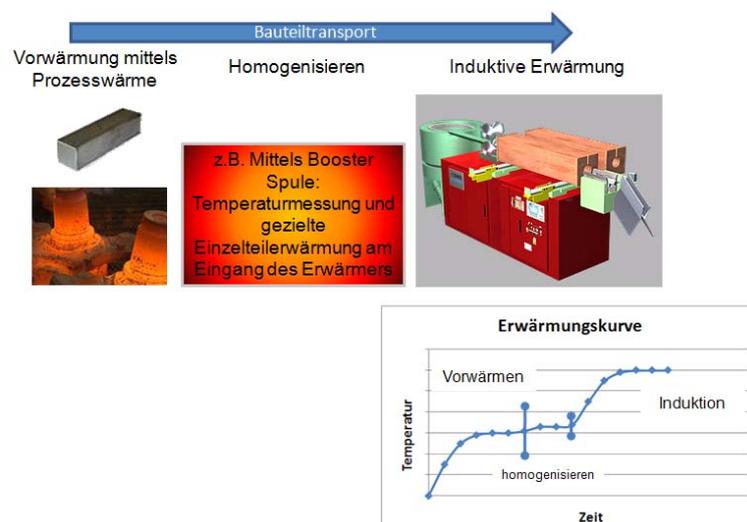


Bild 44: Vormaterialerwärmung und Homogenisierung

Zum anderen ist eine Homogenisierung der Vorwärmtemperatur auch mittels Gaserwärmung möglich. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, dass die Erwärmungszeit

gering ist. Dies kann erreicht werden, wenn der Wärmeübergangskoeffizient hoch ist, was wiederum bedingt, dass eine hohe Auftreffgeschwindigkeit des heißen Luftstroms (Prallstrahl) erfolgt.

Diese Phänomene werden heute bereits beim „Jet-Heating“ ausgenutzt. Wird eine solche Technik zur Homogenisierung der Vorwärmtemperatur genutzt, bietet sich eine gleichzeitige Erhöhung der „Zwischentemperatur“ kurz unter Curie-Temperatur an, da der Primärenergiebedarf bei einer Gaserwärmung deutlich geringer ist als bei einer auf Strom basierenden Erwärmung (s. Bild 45).

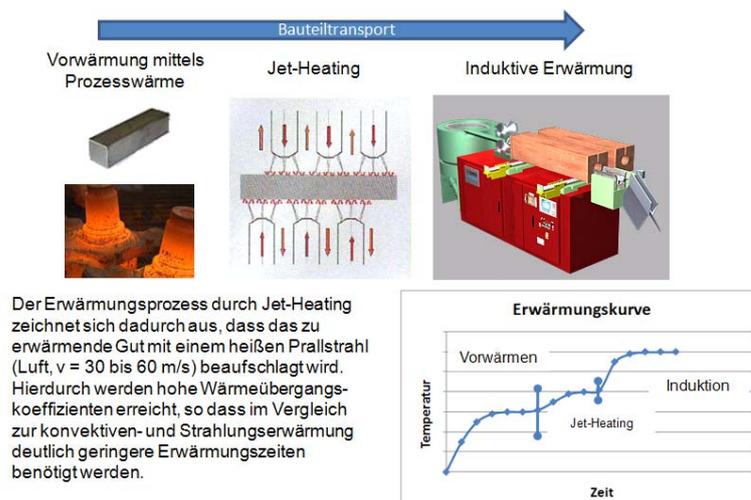


Bild 45: Jet-Heating

Zum Ende der Projektlaufzeit konnte durch die projektbegleitende Literaturlauswertung eine ähnliche Technologie für die Stangenerwärmung von Aluminium identifiziert werden [ext2009]. Deutliche Unterschiede zu der hier vorgeschlagenen Technologie sind:

- Erwärmung von Aluminium statt Stahl
- Stangenerwärmung statt Einzelstücke
- Zuführung von kalten Stangen statt vorerwärmter Einzelstücke
- Integrierter Erwärmer, bestehend aus gegenseitig geregelter Gas- und Induktionserwärmung statt 2 autarker Erwärmer, bestehend aus Jet-Heating- und Induktionserwärmung mit getakteter Übergabe.

3.2.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ein wirtschaftlicher Vergleich der heutigen Erwärmung und einer Erwärmungsstrategie mit einer Vormaterialvorwärmung auf 200°C mittels Prozesswärme, anschließender Homogenisierung und Temperaturerhöhung mittels Jet-Heating auf 600°C und abschließender induktiven Erwärmung auf Endtemperatur zeigt Bild 46.

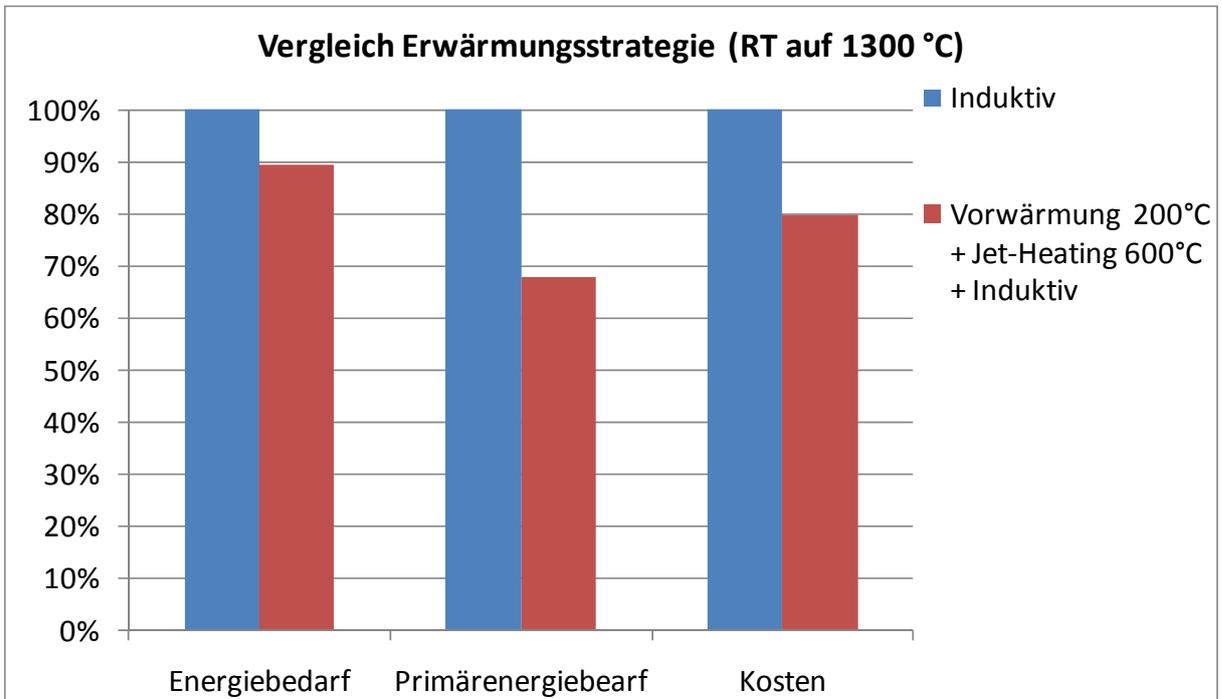


Bild 46: Wirtschaftlichkeitsvergleich bei Materialvorwärmung

Fazit:

- Der Energiebedarf reduziert sich um ca. 11,4%
- Auf Grund des Einsatzes von Gas (ist bereits Primärenergieträger) beim Jet-Heating reduziert sich der Primärenergiebedarf auf ca. 68%
- Da für die Vorwärmung auf 200°C keine Brennstoffkosten anfallen und Gas (für Jet-Heating) preiswerter ist als Strom, reduzieren sich die Erwärmungskosten um 20% (ohne Berücksichtigung der Investitionskosten)

3.2.5 Energie- und CO₂ Bilanz

In Bild 47, Bild 48 und Bild 49 sind die Energiebilanz, Primärenergieeinsparung und die mögliche CO₂ Reduktion unterschiedlicher Sammel- und Nutzungsvarianten dargestellt.

Erwärmungsenergie	Primärenergiebedarf	Wandlung der Primärenergie Kraftwerk	Erwärmer	Prozesswärme	Umformprozess	Modul zur Energie Bündelung	Energieumwandler / -nutzung	Nutzenergie
	kwh/to	η _{Kraftwerk}		kwh/to				
100 % Strom	1212	Deutscher Energiemix 33,0%	400 induktiv 60,0%	240	Schmieden 68,0%	163 Grat+BY+Kiste -> Luft 35,0%	57 ORC 10,0%	6 Strom 2,4%
100 % Strom	1212	Deutscher Energiemix 33,0%	400 induktiv 60,0%	240	Schmieden 68,0%	163 Grat+BY+Kiste -> Wasser 76,0%	124 LWS 90,0%	112 Wärme 46,5%
10 % Abwärme (bis ca. 200 °C) + 90 % Strom	1091 Abw. Strom	Abwärme Deutscher Energiemix 33,0%	0 Abwärme induktiv 60,0%	240	Schmieden 68,0%	163 Grat+BY+Kiste -> Luft 35,0%	57 Material-Vorwärmung 47,0%	27 Wärme 11,2%
10 % Abwärme (bis ca. 200 °C) + 30 % Gas (bis ca. 600°C) + 60 % Strom	830 Gas + Abw. Strom	Gas + Abw. Deutscher Energiemix 33,0%	103 Jet-Heating induktiv 70,0% 60,0%	240	Schmieden 68,0%	163 Grat+BY+Kiste -> Luft 35,0%	57 Material-Vorwärmung 47,0%	27 Wärme 11,2%

Bild 47: Energiebilanz unterschiedlicher Nutzungswege

Energieträger	Nutzung der Restenergie	Primärenergiebedarf	Primärenergieeinsparung	Gesamttonnage to / a	Primärenergieeinsparung Deutschland	
		kWh / to	to Material		GWh / a	%
100 % Strom	Umwandlung in Strom	1212	17,1	3.120.000	53	1,4%
100 % Strom	LWS	1212	112		348	9,2%
10 % Abwärme (bis ca. 200 °C) + 90 % Strom	Materialvorwärmung	1091	121		378	10,0%
10 % Abwärme (bis ca. 200 °C) + 30 % Gas (bis ca. 600°C) + 60 % Strom	Materialvorwärmung	830	382		1.192	31,5%

Bild 48: Primärenergiereduktion

Energieträger	Nutzung der Restenergie	Netto-Energiebedarf			CO2 Emission				Gesamttonnage Deutschland to / a	CO2 Reduktion (3)	
		Strom	Gas	Abwärme	Strom (1)	Gas (2)	Abwärme	Gesamt		%	
100 % Strom	Umwandlung in Strom	394			235			235	3.120.000	10.622	1,4%
100 % Strom	LWS	400	-112		238	-30	0	209		92.295	12,4%
10 % Abwärme (bis ca. 200 °C) + 90 % Strom	Material-vorwärmung	360		27	215		0	215		74.381	10,0%
10 % Abwärme (bis ca. 200 °C) + 30 % Gas (bis ca. 600 °C) + 60 % Strom	Material-vorwärmung	240	103	27	143	27	0	170		212.481	28,6%

(1) 0,596 g CO2/kWh

(2) 0,265 g CO2/kWh

(3) heutige CO2 Emission für die Erwärmung der Gesamttonnage = 743.808 to CO2 / a (bei 100 %iger Erwärmung mit Strom)

LWS = Latentwärmespeicher

Bild 49: CO2 Reduktion

- Die Variante zur Umwandlung der Restenergie in elektrischen Strom birgt zwar das geringste Einsparpotential, ist aber auf Grund der Flexibilität und Wertigkeit der Energieform für die Massivumformung interessant.
- Eine weitere Nutzung der thermischen Energie durch Zwischenspeicherung in einem mobilen Latentwärmespeicher zeigt gute Potentiale hinsichtlich
 - Primärenergieeinsparung und
 - möglicher CO2 Reduktion
- Eine Energierückführung in den Prozess (Vormaterialerwärmung) mit gleichzeitiger Temperaturerhöhung und –homogenisierung durch einen Jet-Heating Prozess zeigt bezüglich
 - Primärenergieeinsparung und
 - möglicher CO2 Reduktion
das höchste Potential

4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Bereits während der Projektlaufzeit erfolgte die Verbreitung von Zwischenergebnissen in nachfolgender Weise:

- Fachaufsatz in der Zeitschrift Schmiede Journal 3/2010
- Bericht im IMU-Arbeitskreis Schmiedeleiter 2009 u. 2010
- Bericht im IMU-Ausschuss Forschung u. Technik 2009 u. 2010
- Bericht im WSM-Arbeitskreis Energie 2010

In 2011 ist die Verbreitung der Vorhabensergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen:

- IMU/VDMA-Fachtagung „Ressourceneffizienz in der Massivumformung“ am 3./4. Mai 2011 in Hagen
- Präsentation der Ergebnisse in der IMU-Faktendatenbank, wo sich die Unternehmen der Branche via Internet informieren können
- Präsentation der Ergebnisse zur Materialreduzierung IMU-Arbeitskreis Schmiedeleiter am 12.5.2011
- Fachaufsatz in der Zeitschrift Schmiede Journal Herbst 2011

Darüber hinaus werden die erarbeiteten Lösungsansätze in dem vom BMBF geförderten Vorhaben „Erhöhung der Energieeffizienz in der Massivumformung (ENERMASS)“ in einzelnen Betrieben als Demonstratoren getestet.

5 Fazit

Durch das Projekt sollten Ansätze entwickelt werden, um den Primärenergiebedarf und die CO₂ Emission bei der Herstellung von Umformteilen zu reduzieren. Dazu wurden 2 Wege verfolgt:

1. Materialreduzierung (Reduzierung des Materialüberschuss)
2. Steigerung der Energieeffizienz

Zu 1.: Die Materialreduzierung hat für die Reduzierung der Primärenergie und die CO₂ Emission eine große Hebelwirkung, weil nicht verbrauchtes Material weder erzeugt noch im Umformbetrieb erwärmt werden muss. Im Rahmen des Projektes wurde ein repräsentatives Teilespektrums (RTS) auf Grundlage einer entwickelten Formenordnung in geeignete Ordnungsklassen überführt und hinsichtlich optimaler Verfahrenswege und Werkzeugtechnologien im Sinne einer Benchmark bewertet. Auf dieser Grundlage wurde eine Potentialabschätzung durchgeführt mit dem Ergebnis, dass das RTS ein erwartetes Optimierungspotential von 803 to/a Stahl hat, was einer Primärenergiereduzierung von 6,87 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 1.271 to/a entspricht. Hochgerechnet auf die Branche Massivumformung ergibt sich ein erwartetes Einsparpotential von 106.080 to/a Stahl, was einer Primärenergiereduzierung von 908 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 167.967 to/a entspricht. Für die Übertragung in die Praxis konnte eine Verfahrens- und Technologieregel abgeleitet werden, die den Umformbetrieben hilft, die o.g. Potentiale zu heben. Die Umsetzbarkeit wird derzeit dadurch eingeschränkt, weil oftmals die erforderlichen Fertigungseinrichtungen in den Betrieben fehlen.

Zu 2.: Zur Steigerung der Energieeffizienz wurden im Rahmen des Projektes 3 Wege verfolgt: Sammlung und Leitung von Prozessenergie, Umwandlung von Prozessenergie in elektrischen Strom, alternative Erwärmung auf Basis der HTS-Technologie und Rückführung von Prozessenergie in den Prozess.

Bei der Sammlung und Leitung von Prozessenergie konnte auf Grundlage von Strömungsversuchen und CFD-Berechnungen verschiedene Energiesammelmodule entwickelt und bewertet werden mit dem Ergebnis, dass von der abgreifbaren Prozesswärme (ca. 240 kWh/to) ca. 24 bis 52 % gesammelt und einer Nutzung zugeführt werden können.

Für die Umwandlung von gesammelter Prozessenergie in elektrischen Strom wurden die Konzepte Stirling-Motor, ORC-Verfahren und thermoelektrische Generatoren (TEG) untersucht und technologisch sowie wirtschaftlich bewertet. Aufgrund der erreichbaren Prozesswärmemetemperatur, des Wirkungsgrades der Wandlersysteme (ca. 5 bis 10% der zugeführten Energie), der Anlagenkosten und der derzeitigen Stromkosten ist keines der Systeme derzeit sinnvoll einsetzbar. Aufgrund der rasanten Entwicklung der TEG's bzgl. Kosten und Wirkungsgrad bieten diese Systeme allerdings für die Massivumformung ein Potential für die Zukunft.

Für die alternative Nutzung der thermischen Energie, wurden mobile Latentwärmespeicher betrachtet. Diese Art der thermischen Zwischenspeicherung ist unter heutigen

Bedingungen bereits wirtschaftlich. Die Prozesswärme könnte mit einem Anteil von bis zu 46% einer erneuten Nutzung zugeführt werden. Das entspricht einem theoretischen Einsparpotential an Primärenergie von 348 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 92.295 to/a.

Für die alternative Erwärmung von Stahl auf Basis der HTS-Technologie wurden Messungen an einer bestehenden Anlage und theoretische Berechnungen durchgeführt sowie ein Anlagenlayout für die Stahlerwärmung entwickelt und bewertet. Trotz des besseren Wirkungsgrades gegenüber der induktiven Erwärmung ist das HTS- Erwärmungsverfahren aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten und der sehr langen Taktzeit für Stahlwerkstoffe derzeit keine wirtschaftlich darstellbare Alternative zur induktiven Erwärmung. Ein Vorteil der HTS-Technologie ist seine Schnelligkeit, wegen der kurzen Verweildauer des einzelnen Werkstücks im Ofen ist mit weniger Zunderbildung zu rechnen.

Bei der Rückführung von Prozessenergie in den Prozess zur Vormaterialerwärmung wurde ein Durchströmungsmodul mit anschließender Temperaturhomogenisierungsstrecke (und gleichzeitiger Temperaturerhöhung mit Gas) auf Basis der Jet-Heating-Technologie entwickelt und bewertet, mit dem Ergebnis, dass von der rückführbaren Prozesswärme ca. 50% genutzt werden kann. Das entspricht zusammen mit der Ausgleichsstrecke einem theoretischen Einsparpotential an Primärenergie von 1.192 GWh/a und einer CO₂-Reduzierung von 212.481 to/a.

Weitere zukünftige und für notwendig erachtete Arbeiten sind in erster Linie die Umsetzung der Projektergebnisse in die Praxis.

Bei den Ergebnissen zu 1. sind die Unternehmen der Branche Massivumformung gehalten die Umsetzung auf ihre Produkte voranzutreiben.

Die erfolversprechenden Ergebnisse zu 2. aus der Wissensphase des DBU-Projektes werden in einer Anwendungsphase des BMBF-Projektes (Erhöhung der Energieeffizienz in der Massivumformung) umgesetzt, indem Demonstratoren entwickelt, konstruiert und gebaut werden, und dann in praktischen Versuchen in Betrieben der Massivumformung eingesetzt und bewertet.

Darüber hinaus ergeben sich weitere zukünftige und für notwendig erachtete Arbeiten im Umfeld der thermoelektrischen Generatoren (TEG`s). Diese bieten prinzipiell die Möglichkeit, Wärme in elektrische Energie umzuwandeln. Um einen optimalen Wirkungsgrad zu erreichen, muss die Prozessenergie -abhängig vom Aufbau des TEG- bei einer definierten und weitgehend konstanten Temperatur zur Verfügung stehen. Der sinnvolle Einsatz von TEG`s 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 Heißeite der TEG`s sehr begrenzt (bei Überschreitung einer maximalen Temperatur werden die TEG zerstört). Massivumformprozesse haben diese Eigenschaft nicht, weil

- es sich um taktgebundene Stückgutprozesse handelt,
- nach jedem gefertigten Los der Prozess für das Rüsten des nächsten Betriebsauftrages unterbrochen werden muss,
- die Prozesse unplanmäßigen Störungen zwischen 20-30% unterliegen,
- die Temperatur der Umformteile sehr hoch ist, so dass sich ein direkter oder ein Strahlungskontakt mit den TEG`s verbietet.

Aus diesen Gründen sind TEG`s zur Prozessenergienutzung in Massivumformprozessen zunächst eher ungeeignet. Dieses Problem könnte umgangen werden durch „Isotherm-Transformatoren“. Die Eigenschaften der angedachten Isotherm-Transformatoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie instationäre Temperaturverhältnisse und ein hohes Temperaturniveau auf der Prozessseite in eine nahezu konstante Temperatur und angepasstem Temperaturniveau auf der TEG-Seite umwandeln. Die Innovation dieses Entwicklungsansatzes liegt darin, dass TEG`s in Prozessen zum Einsatz kommen können, für die sie bis heute nicht bzw. nur sehr bedingt geeignet sind, und dadurch die Umwandlung von Prozesswärme in elektrische Energie auch bei instationären Prozessen mit hohem Temperaturniveau möglich wird.

6 Literaturverzeichnis

- [ext2009] Gebrauchsmusterschrift; extrutec GmbH; AZ 20 2008 012 597.9; Vorrichtung zur Erwärmung stangenartiger Werkstücke
- [IA88] *Schmiedetechnische Mitteilungen*; Industrieanzeiger, Jahrgang 110/1988, Nr. 5 (19.01.88), Nr. 11 (15.03.88) und Nr. 41 (24.05.88)
- [Schl08] Schleder, Frank: *Stirlingmotoren*; Vogel Buchverlag; 3. Auflage 2008
- [Schm88] 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 [IA88]
- [Spies57] Spies, K.: *Eine Formenordnung für Gesenkschmiedestücke*; Werkstatttechnik und Maschinenbau 47, 1957, 201 - 205
- [VDI06] *VDI Wärmeatlas*; 10. Auflage 2006
- [Wag01] Wagner, Walter: *Strömung und Druckverluste*; Vogel Buchverlag; 5. Auflage 2001

DBU-Energieeffizienz (Teilproj. Materialreduzierung)

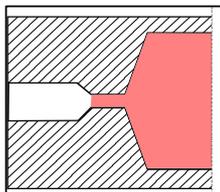
Firma: _____
 Datum: _____
 Bearbeiter: _____

Pos.	Parameter	Einheit	Ausprägungen/ Bemerkung	Beispiel	Artikel 1		
1	Artikeldaten						
1.1	Teileart		Bezeichnung	Flansch			
1.2	Artikelnummer			4711			
1.3	Zeichnungsnummer		Zeichnungen beifügen	4711-xyz-123			
1.4	Gewicht Schmiede-Fertigteil ⁽¹⁾	kg		2,00			
1.5	Oberfläche Schmiede-Fertigteil	mm ²		100.203			
1.6	Gewicht Hüllkörper ⁽²⁾	kg		2,80			
1.7	Feingliedrigkeitsfaktor ⁽²⁾		Angabe der numerischen Größe (z. B. 0,73) nicht der Klassen-einteilung S1...S4!	0,71			
1.8	Produktionsmenge		Stück / a	50.000			
1.9	Laufzeit / Lebensdauer	a		6			
2	Halbzeug						
2.1	Werkstoff ⁽³⁾			42CrMo4			
2.2	Querschnittsform						
2.2.1			rund	x			
2.2.2			Vierkant				
2.3	Art der Trennung						
2.3.1			kalt geschert	x			
2.3.2			warm geschert				
2.3.3			gesägt				
2.4	Querschnitt (Durchmesser / Breite)	mm	numerisch	40,00			
2.4.1	Toleranz Querschnitt +/- ⁽⁴⁾	mm	numerisch	+/- 0,1			
2.5	Länge	mm	numerisch	300,00			
2.5.1	Toleranz Länge +/- ⁽⁴⁾	mm	numerisch	+/- 0,3			
2.6	Masse	kg	numerisch	2,944			
2.6.1	Toleranz Masse +/- ⁽⁴⁾	kg	numerisch	+/- 0,02			
3	Bauteilgeometrie						
3.1	Klassifizierung nach Spies		Angabe nur wenn Klassifizierung vorhanden.	NN			
3.2	Klassifizierung nach FOS (Formenordnung nach Schmieder)			NN			
4	Stadienfolge / Umformstufen		bitte Bilder beifügen	Reihenfolge	Anzahl (wenn nicht 1)	Reihenfolge	Anzahl (wenn nicht 1)
4.1	Walzen						
4.1.1			Querkeilwalzen				
4.1.2			Reckwalzen				
4.2	Stauchen / Biegen						
4.2.1			Stauchen zur Formänderung	1			
4.2.2			Stauchen zum Entzndern				
4.2.3			Biegen				
4.2.4			Sonstiges				
4.3	Vorformen						
4.3.1			Vorformgavur 1	2	2		
4.3.2			Vorformgavur 2				
4.3.3			Vorformgavur 3				
4.3.4			Vorformgavur 4				
4.4	Fertigformen			3			
4.5	Nachformen						
4.5.1			Kalibrieren				
4.5.2			Abgraten	4			
4.5.3			Lochen				
4.5.4			Biegen				
4.5.5			Sonstiges				

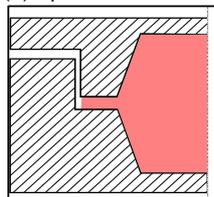
DBU-Energieeffizienz (Teilproj. Materialreduzierung)

Pos.	Parameter	Einheit	Ausprägungen/ Bemerkung	Beispiel	Artikel 1
5	Werkzeugauslegung bzgl. Grat				
5.1	Offene Gratbahn ⁽⁵⁾			x	
5.2	Sperrkasten/Tauchgravur ⁽⁶⁾				
5.3	Sonstige Gratbremsen				
6	Prozess				
6.1	Art des Erwärmers				
6.1.1			induktiv	x	
6.1.2			konduktiv		
6.1.3			Gas		
6.2	Art des Hauptumformaggregats				
6.2.1			Oberdruckhammer		
6.2.2			Gegenschlaghammer		
6.2.3			Spindelpresse		
6.2.4			Hydraulikpresse		
6.2.5			Exzenterpresse	x	
6.2.6			Kurbelpresse		
6.2.7			Keilpresse		
6.2.8			Hatebur		
6.2.9			Sonstige		
6.3	Teile pro Gravur (Nutzen, Mehrfachgravur)		numerisch	1	
6.4	Auswerfer				
6.4.1			innerhalb der Gravur	x	
6.4.2			außerhalb der Gravur		
6.5	Automatisierungsgrad des Prozesses				
6.5.1			manuell	x	
6.5.2			teilweise automatisiert		
6.5.3			voll automatisiert		
6.6	Griffelement für Handling/Transport				
6.6.1			Bauteil selbst	x	
6.6.2			Zangenende		
6.6.3			Grat		
6.6.4			Sonstiges		
6.7	Ausschussrate ⁽⁷⁾	%	numerisch	3,00	
7	Grat				
7.1	Gratgewicht ohne Lochen	kg	numerisch	0,930	
7.2	Gewicht Lochtaler	kg	numerisch		
7.3	Gratdicke Fertigform	mm	numerisch	5,0	
7.4	Gratausprägung		bitte Bild beifügen		

- (1) fertig geschmiedetes Teil ohne Zunder und ohne mech. Bearbeitung
 (2) Es genügt die Angabe eines der beiden Werte
 (3) Normbezeichnung, bei Sondermaterial chem. Zusammensetzung beifügen
 (4) Eigene Messungen/Toleranzvorgaben, keine Normwerte
 (5) Offene Gratbahn



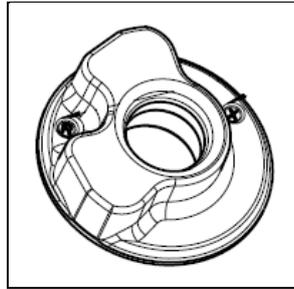
- (6) Sperrkasten/Tauchgravur



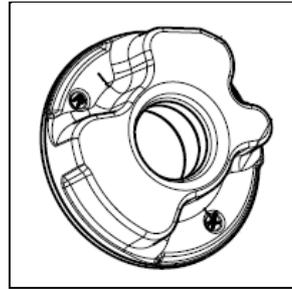
- (7) Schmiede u. Endfertigung u. Reklamationen



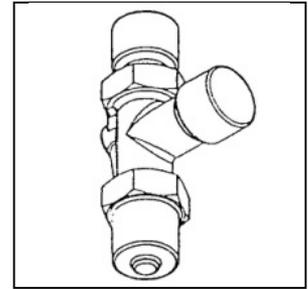
Firma 1
1 Artikel 1
MWG: 0,483



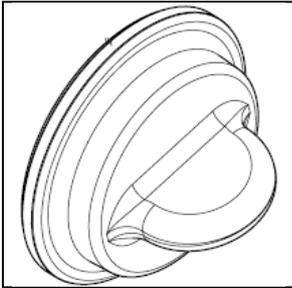
Firma 1
6 Artikel 6
MWG: 0,849



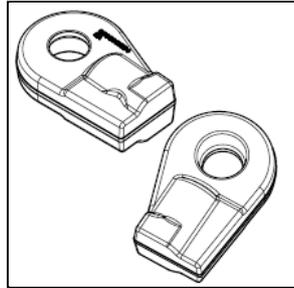
Firma 1
11 Artikel 11
MWG: 0,748



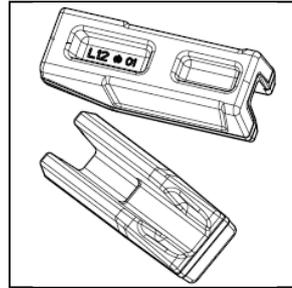
Firma 1
16 Artikel 16
MWG: 0,616



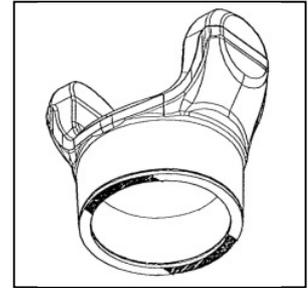
Firma 1
2 Artikel 2
MWG: 0,810



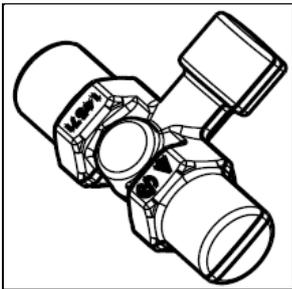
Firma 1
7 Artikel 7
MWG: 0,685



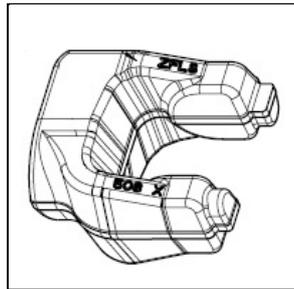
Firma 1
12 Artikel 12
MWG: 0,778



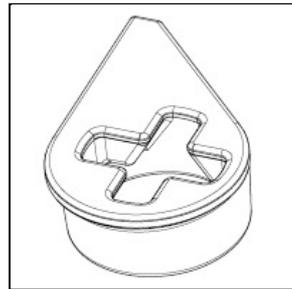
Firma 1
17 Artikel 17
MWG: 0,790



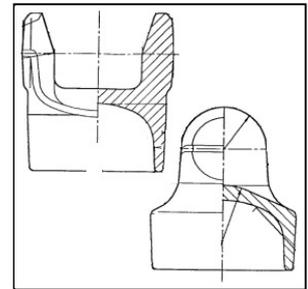
Firma 1
3 Artikel 3
MWG: 0,509



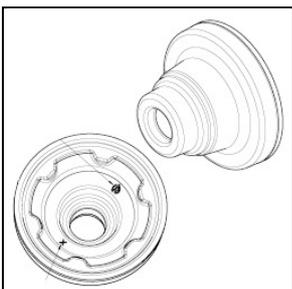
Firma 1
8 Artikel 8
MWG: 0,688



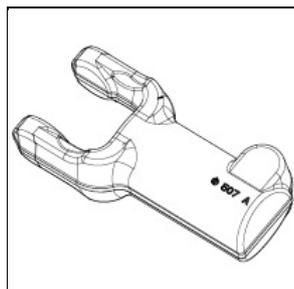
Firma 1
13 Artikel 13
MWG: 0,643



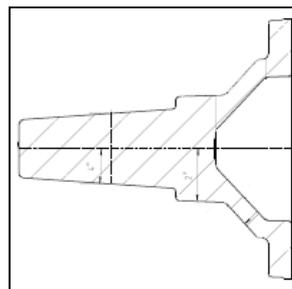
Firma 1
18 Artikel 18
MWG: 0,757



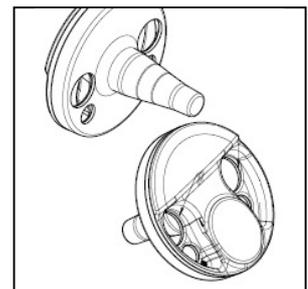
Firma 1
4 Artikel 4
MWG: 0,786



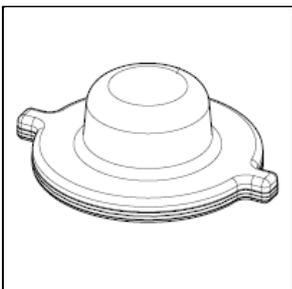
Firma 1
9 Artikel 9
MWG: 0,696



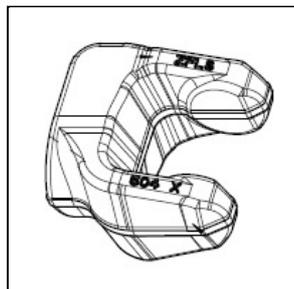
Firma 1
14 Artikel 14
MWG: 0,798



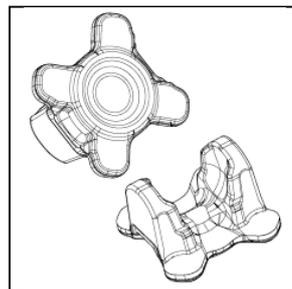
Firma 1
19 Artikel 19
MWG: 0,843



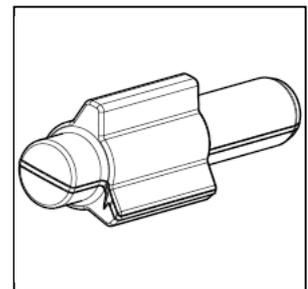
Firma 1
5 Artikel 5
MWG: 0,844



Firma 1
10 Artikel 10
MWG: 0,647

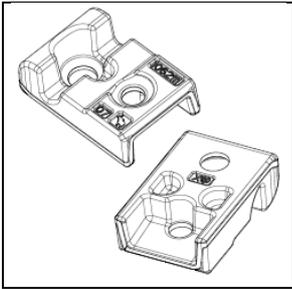


Firma 1
15 Artikel 15
MWG: 0,711

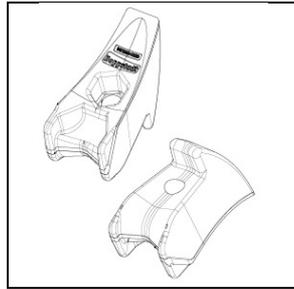


Firma 1
20 Artikel 20
MWG: 0,810

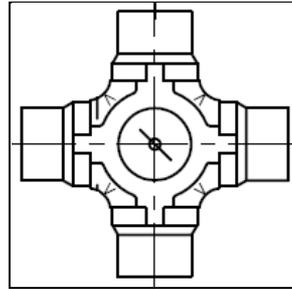
Bauteilübersicht



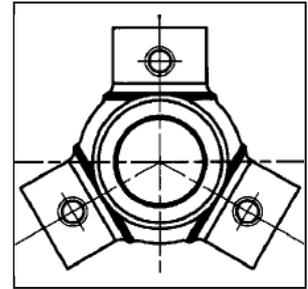
Firma 1
21 Artikel 21
MWG: 0,702



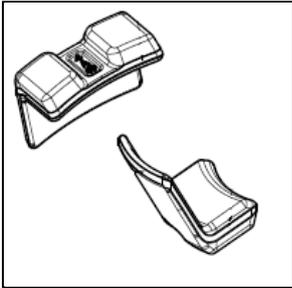
Firma 1
26 Artikel 26
MWG: 0,735



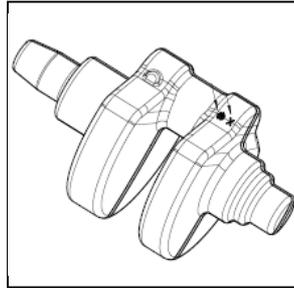
Firma 2
31 Artikel 3
MWG: 0,859



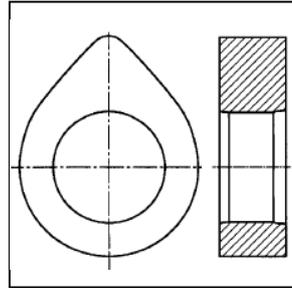
Firma 2
36 Artikel 8
MWG: 0,797



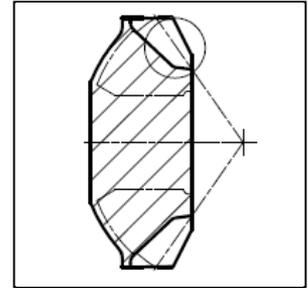
Firma 1
22 Artikel 22
MWG: 0,608



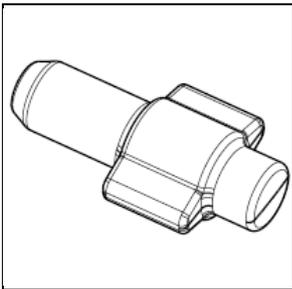
Firma 1
27 Artikel 27
MWG: 0,709



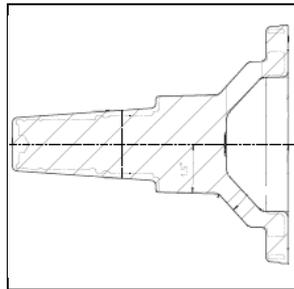
Firma 2
32 Artikel 4
MWG: 1,000



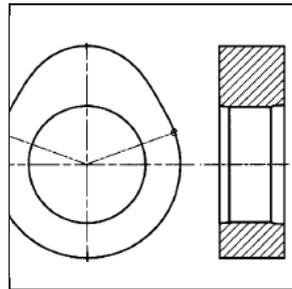
Firma 2
37 Artikel 9
MWG: 0,826



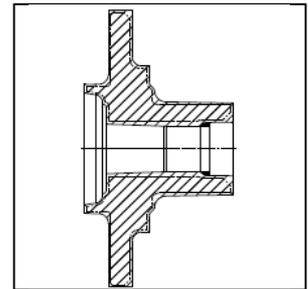
Firma 1
23 Artikel 23
MWG: 0,733



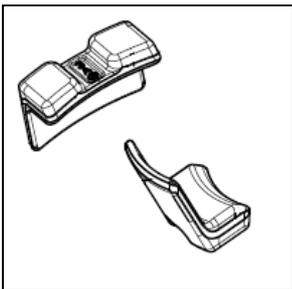
Firma 1
28 Artikel 28
MWG: 0,815



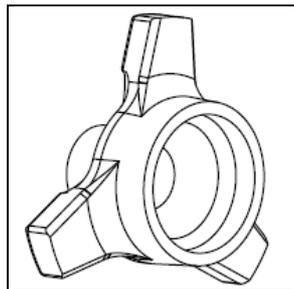
Firma 2
33 Artikel 5
MWG: 1,000



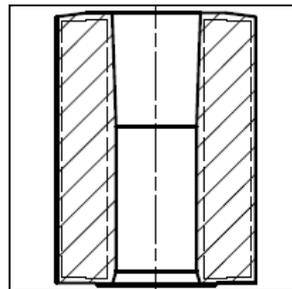
Firma 2
38 Artikel 10
MWG: 1,000



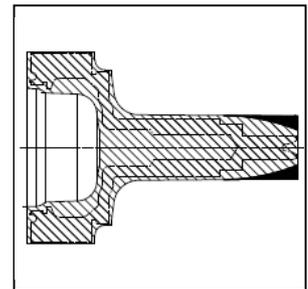
Firma 1
24 Artikel 24
MWG: 0,641



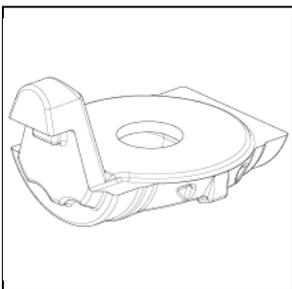
Firma 2
29 Artikel 1
MWG: 0,841



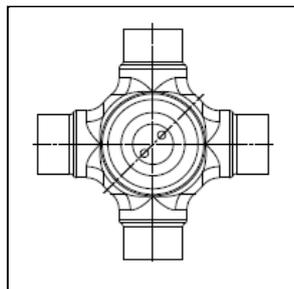
Firma 2
34 Artikel 6
MWG: 1,000



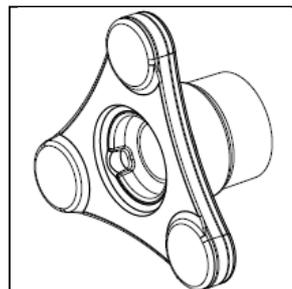
Firma 2
39 Artikel 11
MWG: 0,940



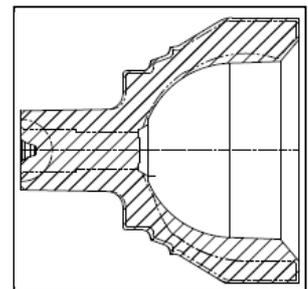
Firma 1
25 Artikel 25
MWG: 0,806



Firma 2
30 Artikel 2
MWG: 0,882

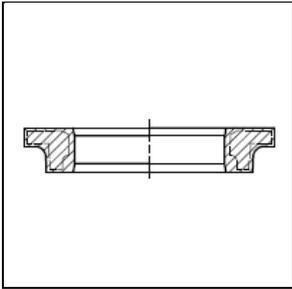


Firma 2
35 Artikel 7
MWG: 0,877

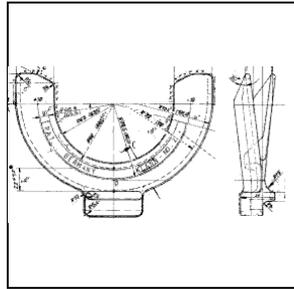


Firma 2
40 Artikel 12
MWG: 1,000

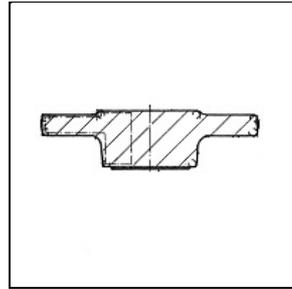
Bauteilübersicht



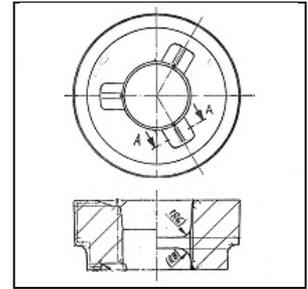
Firma 2
41 Artikel 13
MWG: 1,000



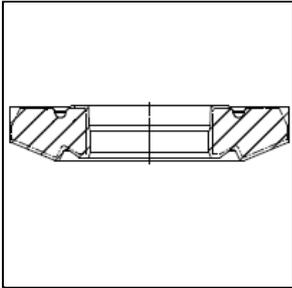
Firma 3
46 Artikel 1
MWG: 0,453



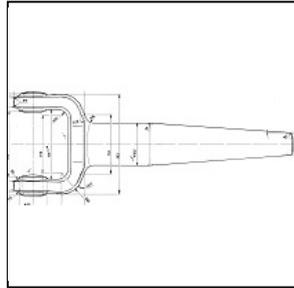
Firma 3
51 Artikel 6
MWG: 0,959



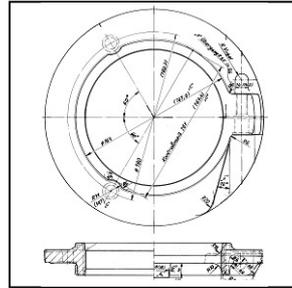
Firma 3
56 Artikel 11
MWG: 0,869



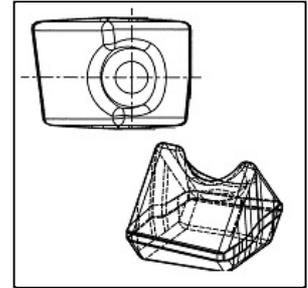
Firma 2
42 Artikel 14
MWG: 1,000



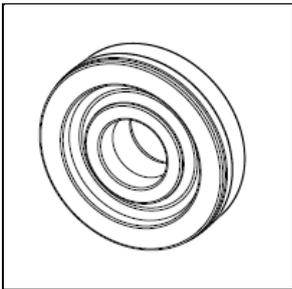
Firma 3
47 Artikel 2
MWG: 0,775



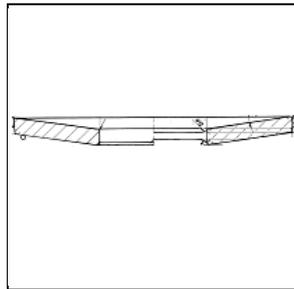
Firma 3
52 Artikel 7
MWG: 0,737



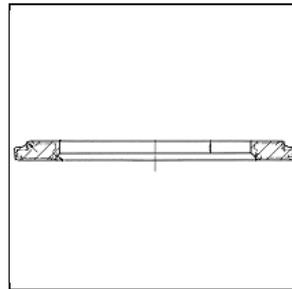
Firma 3
57 Artikel 12
MWG: 0,690



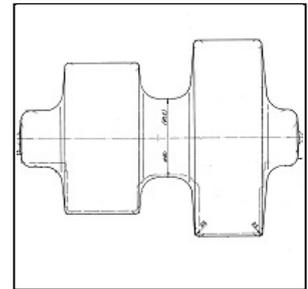
Firma 2
43 Artikel 16
MWG: 0,904



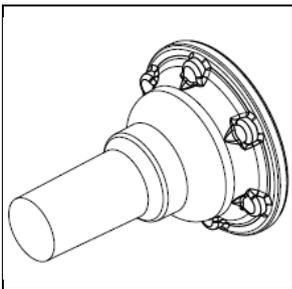
Firma 3
48 Artikel 3
MWG: 0,756



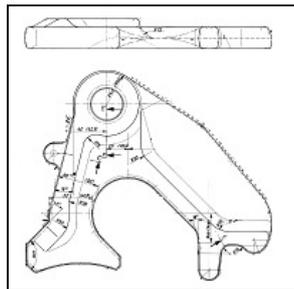
Firma 3
53 Artikel 8
MWG: 0,623



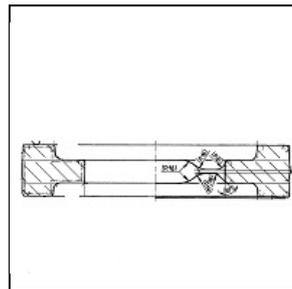
Firma 3
58 Artikel 13
MWG: 0,899



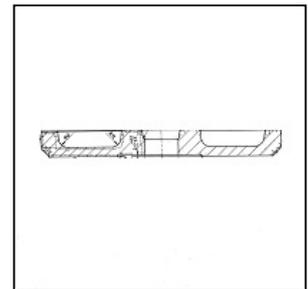
Firma 2
44 Artikel 17
MWG: 0,914



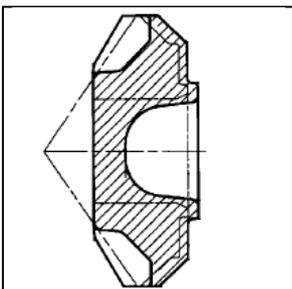
Firma 3
49 Artikel 4
MWG: 0,700



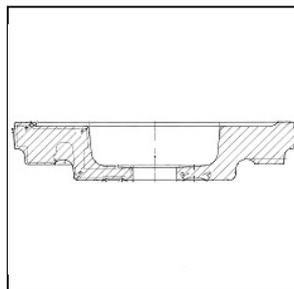
Firma 3
54 Artikel 9
MWG: 0,883



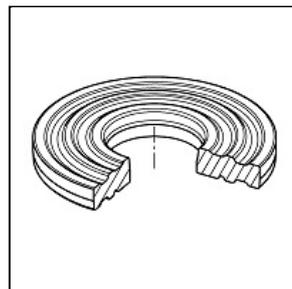
Firma 3
59 Artikel 14
MWG: 0,906



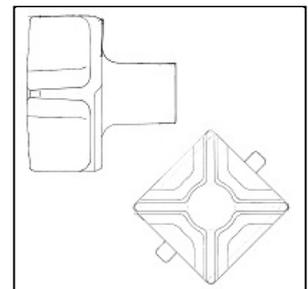
Firma 2
45 Artikel 18
MWG: 0,927



Firma 3
50 Artikel 5
MWG: 0,907

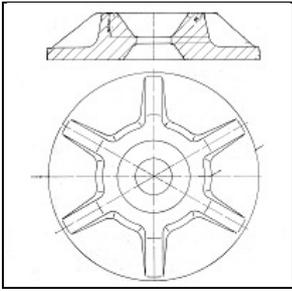


Firma 3
55 Artikel 10
MWG: 0,866

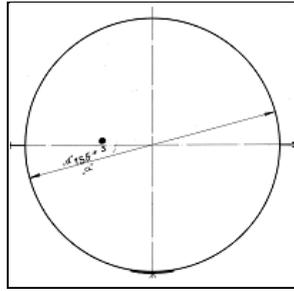


Firma 3
60 Artikel 15
MWG: 0,825

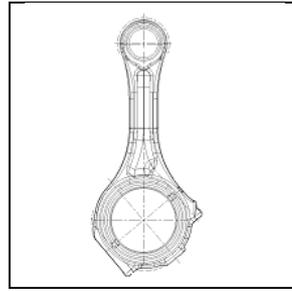
Bauteilübersicht



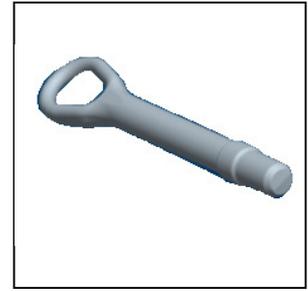
Firma 3
61 Artikel 16
MWG: 0,913



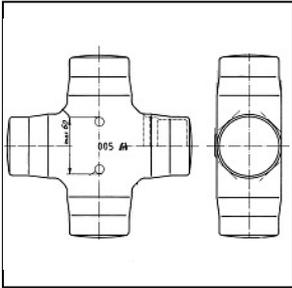
Firma 3
66 Artikel 21
MWG: 0,963



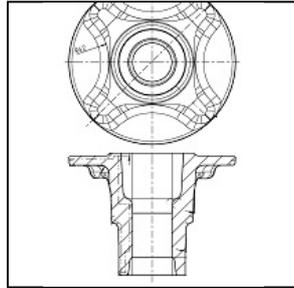
Firma 4
71 Artikel 3
MWG: 0,758



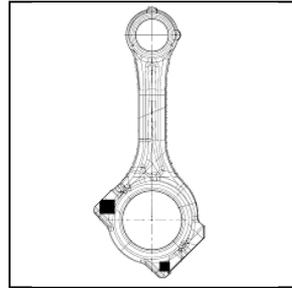
Firma 6
87 Artikel 3
MWG: 0,787



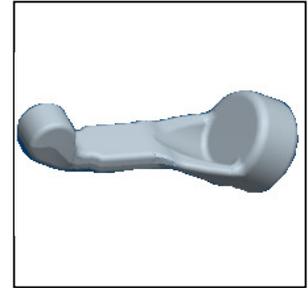
Firma 3
62 Artikel 17
MWG: 0,875



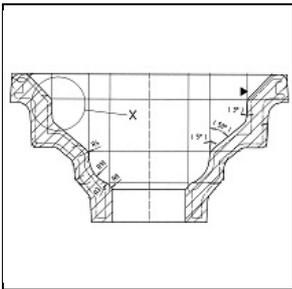
Firma 3
67 Artikel 22
MWG: 1,000



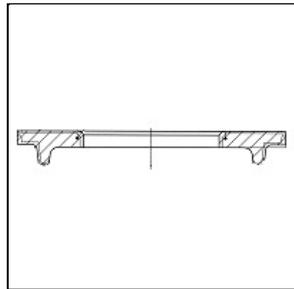
Firma 4
72 Artikel 7
MWG: 0,774



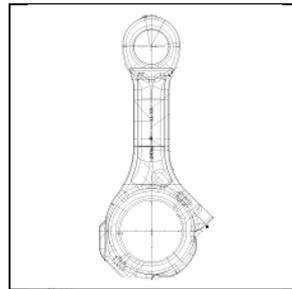
Firma 6
88 Artikel 4
MWG: 0,501



Firma 3
63 Artikel 18
MWG: 0,765



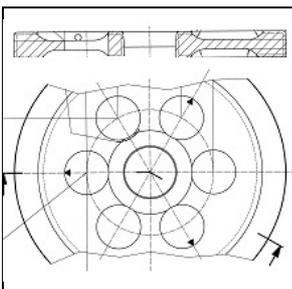
Firma 3
68 Artikel 23
MWG: 1,000



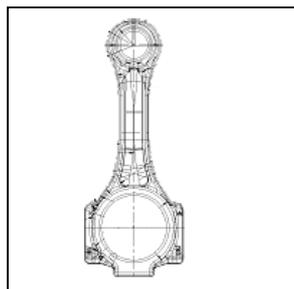
Firma 4
73 Artikel 8
MWG: 0,823



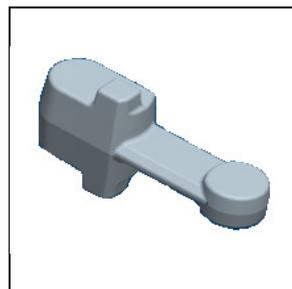
Firma 6
89 Artikel 5
MWG: 0,556



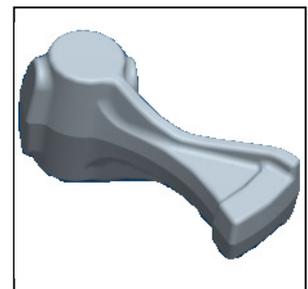
Firma 3
64 Artikel 19
MWG: 0,896



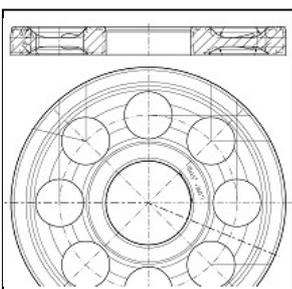
Firma 4
69 Artikel 1
MWG: 0,780



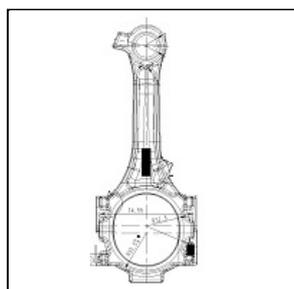
Firma 6
85 Artikel 1
MWG: 0,805



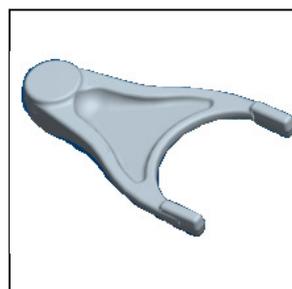
Firma 6
90 Artikel 6
MWG: 0,508



Firma 3
65 Artikel 20
MWG: 0,825



Firma 4
70 Artikel 2
MWG: 0,680



Firma 6
86 Artikel 2
MWG: 0,590



Firma 6
91 Artikel 7
MWG: 0,660

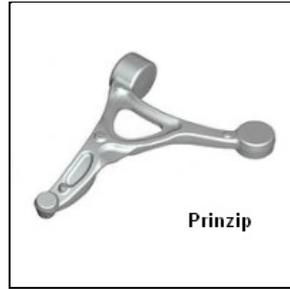
Bauteilübersicht



Firma 7
92 Artikel 1
MWG: 0,864



Firma 7
97 Artikel 6
MWG: 0,758



Firma 7
102 Artikel 11
MWG: 0,541



Firma 7
93 Artikel 2
MWG: 0,856



Firma 7
98 Artikel 7
MWG: 0,717



Firma 7
103 Artikel 12
MWG: 0,669



Firma 7
94 Artikel 3
MWG: 0,893



Firma 7
99 Artikel 8
MWG: 0,684



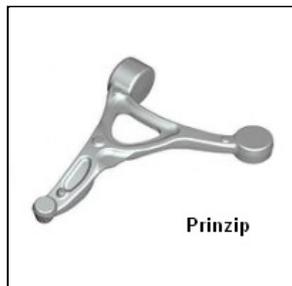
Firma 7
95 Artikel 4
MWG: 0,803



Firma 7
100 Artikel 9
MWG: 0,773

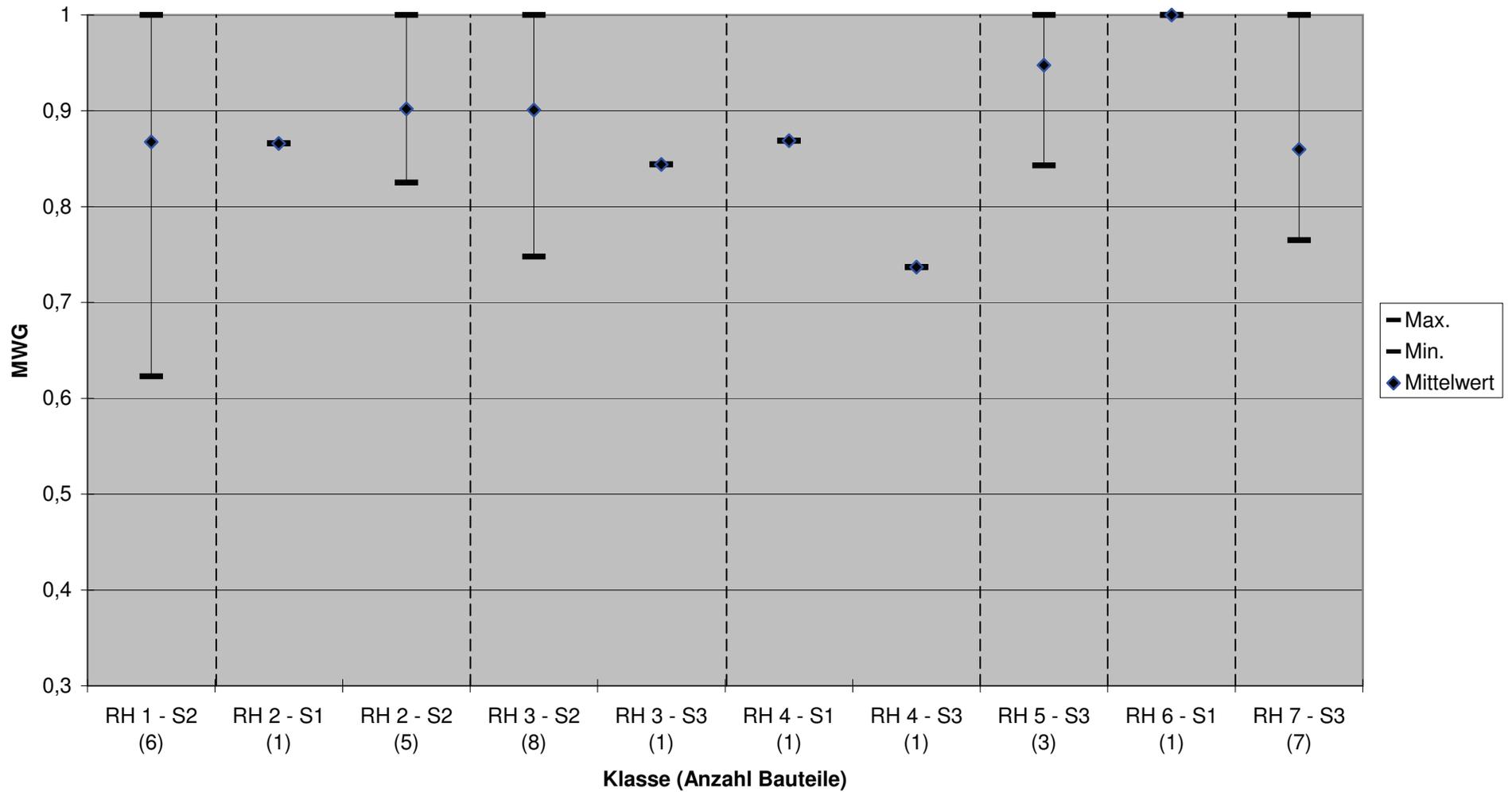


Firma 7
96 Artikel 5
MWG: 0,833

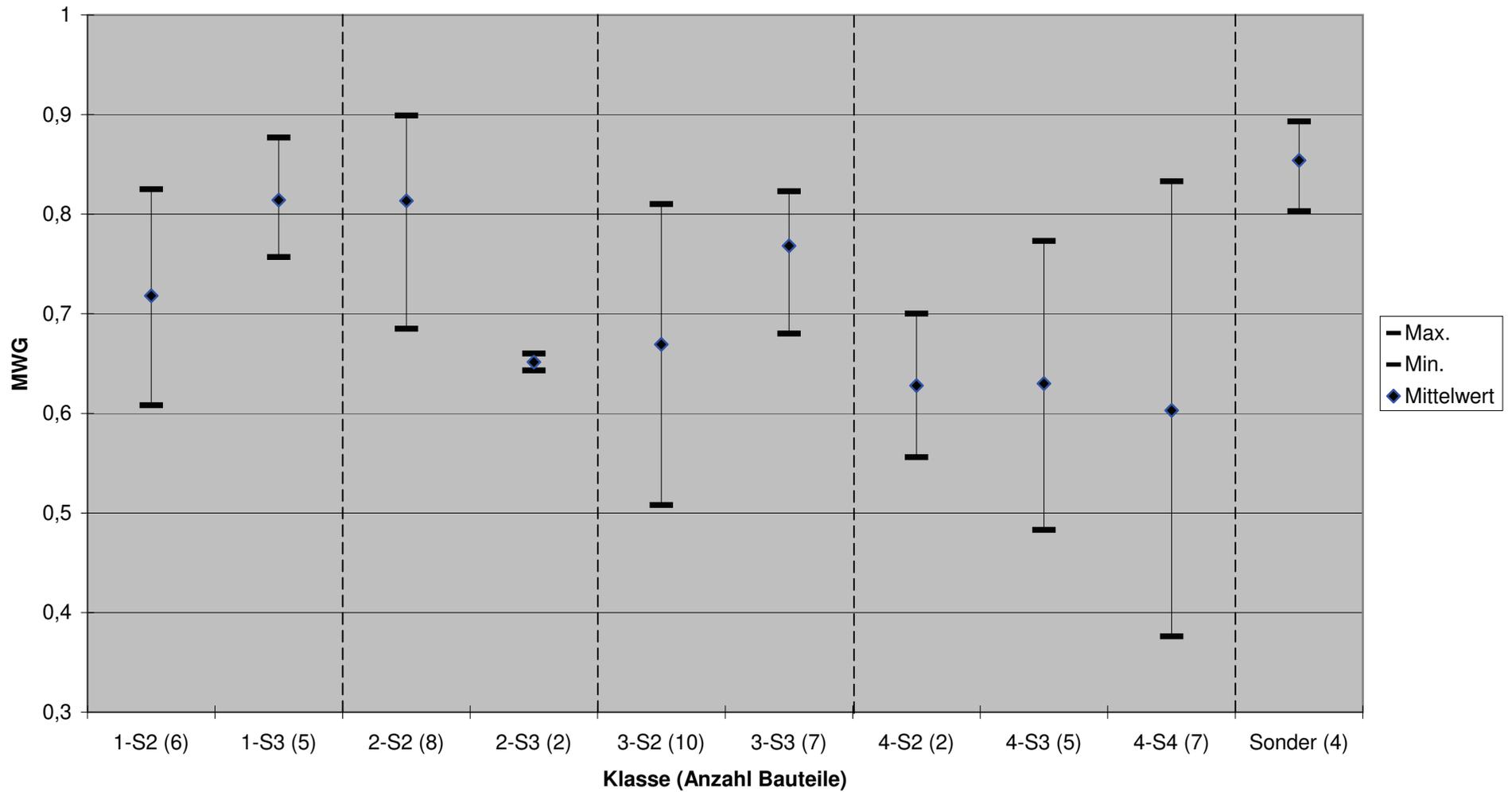


Firma 7
101 Artikel 10
MWG: 0,376

Verteilung MWG, rotationssymmetrische Bauteile Ansatz 8: Stoffflusskomplexität x Feingliedrigkeitsgruppe



Verteilung MWG, Fassonteile
Ansatz 5: Schwierigkeit nach Spies x Feingliedrigkeitsgruppe



Verfahrensregel für die Materialreduzierung Anwendung und Beispiele

1. Einleitung

Im Teilprojekt Materialreduzierung wurde auf der Basis eines repräsentativen Teilspektrums von 92 Bauteilen und einer entwickelten Formenordnung ein (Benchmark-)Vergleich der eingesetzten Verfahren u/o Werkzeugtechnologien durchgeführt. Für jede Klasse wurden die in Bezug auf den Materialeinsatz optimalen Verfahrenswege und Werkzeugkonzepte abgeleitet und in einer Verfahrensregel zusammengefasst. Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Anwendung der Verfahrensregel zur Materialreduzierung beschrieben und an zwei Beispielen erläutert.

2. Ziel

Ziel ist es, für ein gegebenes Bauteil eine geeignete und in der Praxis bereits bewährte Verfahrens- u/o Werkzeugtechnologie mit einem hohen Materialwirkungsgrad abzuleiten.

3. Vorgehensweise

Folgende Schritte sind auszuführen:

1. Unterscheidung rotationssymmetrisches Teil vs. Fassenteil
2. Feingliedrigkeitsgruppe ermitteln
3. Für rotationssymmetrische Bauteile: Stoffflusspriorität ermitteln
4. Für Fassonteile: Punkte nach Spies ermitteln
5. Klasse ermitteln
6. Ableiten der Verfahrens- und Werkzeugtechnologie

3.1. *Rotationssymmetrisches Teil vs. Fassenteil*

Ein Bauteil gilt als rotationssymmetrisch, wenn es entweder im strengen geometrischen Sinn oder im Wesentlichen, d.h. bis auf geringfügige Nebenformelemente, rotationssymmetrisch ist und die Rotationsachse parallel zur Schmiederichtung liegt. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, handelt es sich per Definition um ein Fassenteil.

3.2. *Feingliedrigkeitsgruppe*

Aus der Masse des Hüllkörpers m_{HK} und der Masse des Fertigteils m_{FT} wird der Feingliedrigkeitsfaktor S nach folgender Formel berechnet:

$$S = \frac{m_{FT}}{m_{HK}}$$

Daraus leitet sich die Feingliedrigkeitsgruppe ab:

- S1 für $0,63 < S \leq 1$
- S2 für $0,32 < S \leq 0,63$
- S3 für $0,16 < S \leq 0,32$
- S4 für $0 < S \leq 0,16$

3.3. Stoffflusspriorität (für rotationssymmetrische Teile)

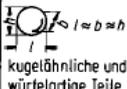
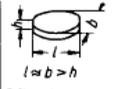
Für rotationssymmetrische Bauteile wird die Komplexität des Stoffflusses aus einem priorisierten Klassifizierungsschema abgeleitet. Dabei sind für das Bauteil die Richtung (Vorwärts-, Rückwärts- und Querfließen) und die Priorität (1 = hohe Priorität bis 3 = niedrige Priorität) des Stoffflusses zu beurteilen und eine Komplexitätsklasse aus der folgenden Tabelle abzuleiten:

Klasse	Stoffflusspriorität		
	1	2	3
RH 1	Q		
RH 2	Q		V
RH 3	Q	R	
	Q	V	
RH 4	Q	V	R
	Q	R	V
RH 5	V	Q	
RH 6	V	R	
RH 7	V	R	Q

Stofffluss:
Q = Querfließen
V = Vorwärtsfließen
R = Rückwärtsfließen

3.4. Punkte nach Spies (für Fassonteile)

Für Fassonteile ist eine Punktzahl nach Spies zu ermitteln. Aus der Form und den Abmessungen des Bauteils, sowie Art und Lage der Nebenformelemente wird zunächst die Klasse für das Bauteil (das Feld innerhalb der Matrix) in der folgenden Abbildung bestimmt:

Formenklasse 1 gedrungene Form  kugelhähnliche und würtelartige Teile	Untergruppe:	101 ohne Nebenform- elemente	102 mit einseitigen Nebenformelementen	103 mit umlaufenden Nebenformelementen	104 mit einseitigen und umlaufenden Neben- formelementen	Punkte			
						1			
Formenklasse 2 Scheibenform  Teile mit runden, quadratischen und ähnlichen Umrissen Kreuzteile mit kurzen Armen, Gestauchte Köpfe an Langformen (Flansche, Ventilteller usw.)	Untergruppe:	ohne Nebenform- elemente	mit Nabe	mit Nabe und Loch	mit Rand (Ringe)	mit Rand und Nabe	2		
	Formengruppe:	21 Scheibenform mit einseitigen Nebenform- elementen	211 	212 	213 	214 		215 	
		22 Scheibenform mit zweiseitigen Nebenform- elementen	222 	223 	224 	225 			
Formenklasse 3 Langform  Teile mit ausgeprägter Längsachse Längengruppen: 1 kurze Teile $l < 3b$ 2 halb lange Teile $l = 3 \dots 8b$ 3 lange Teile $l = 9 \dots 16b$ 4 sehr lange Teile $l > 16b$ (Ziffern der Längengruppen werden mit Schrägstrich angehängt; z.B. 334/4)	Untergruppe:	ohne Nebenform- elemente	mit symmetrisch zur Achse des Hauptformelements liegenden Nebenformelementen	mit offenen oder geschlossenen Gabelungen	mit unsymmetrisch zur Achse des Hauptformelements liegenden Nebenformelementen	mit zwei oder mehr verschiedenen Nebenformelementen ähnlicher Größe	3		
	Formengruppe:	31 Hauptformelement mit gerader Längsachse	311 	312 	313 	314 		315 	
			32 Längsachse des Hauptformelements in einer Ebene gekrümmt	321 	322 	323 	324 	325 	4
			33 Längsachse des Hauptformelements in mehreren Ebenen gekrümmt	331 	332 	333 	334 	335 	

Anschließend folgt man den diagonal verlaufenden Feldern mit gleichem Hintergrundmuster nach rechts bis zur Punktspalte und entnimmt dort den Punktwert (1 bis 4).

3.5. Klasse

Die Klasse wird gebildet aus dem Kreuzprodukt der Stoffflusskomplexität und der Feingliedrigkeitsgruppe.

Für rotationssymmetrische Bauteile ergibt sich die Stoffflusskomplexität aus dem Klassifizierungsschema zur Priorisierung des Stoffflusses (RH 1 bis RH 7). Zusammen mit der Feingliedrigkeitsgruppe (S1 bis S4) ergeben sich theoretisch 28 Klassen (RH 1 - S1 bis RH 7 - S4).

Für Fassonteile entspricht die Stoffflusskomplexität der Schwierigkeit nach Spies (Punkte 1 bis 4). Zusammen mit der Feingliedrigkeitsgruppe (S1 bis S4) ergeben sich theoretisch 16 Klassen (1-S1 bis 4-S4).

3.6. Verfahrens- und Werkzeugtechnologie

Mit der für das Bauteil ermittelten Klasse können mit Hilfe der folgenden Tabelle optimierte Verfahrens- und Werkzeugtechnologien gefunden werden:

	Klasse	MWG (netto)		Nutzen		Verfahren Vorform										Verfahren Fertigform			
		Min.	Max.	Einfach	Mehrfach	Walzen		Stauchen			Fließpress	Gesenk-schmieden				Gesenk-schmieden			
						REWA	QKW	Parallel	Formstauchen offen	Formstauchen geschlossen		Offenes Gesenk	Gratbremse	Sperkasten	Geschlossenes Gesenk	Offenes Gesenk	Gratbremse	Geschlossenes Gesenk	
Rotationssymmetrische Teile	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		
Fassonteile	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, ...)											

* Nur 1 bzw. 2 Teile in der Formengruppe -> begrenzt aussagefähig

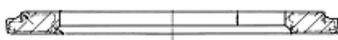
(X) Alternative Verfahren

Die Tabelle ist Ergebnis des (Benchmark-)Vergleichs der Verfahren u/o Werkzeugtechnologien auf der Grundlage des repräsentativen Teilspektrums und der entwickelten Formenordnung. Jede Zeile der Tabelle steht für eine Klasse. Die Spalten repräsentieren die Verfahrens- und Werkzeugtechnologien. Eine mit X markierte Spalte besagt, dass die betreffende Verfahrens- bzw. Werkzeugtechnologie beim Klassenbesten zum Einsatz kam und damit auch für das Bauteil verwendet werden sollte. Mit (X) markierte Spalten stehen für alternative Verfahren.

4. Beispiele

4.1. Rotationssymmetrisches Bauteil

Für rotationssymmetrische Bauteile soll die Vorgehensweise am Beispiel des folgenden Bauteils (Artikel 53) veranschaulicht werden:



Das Bauteil ist (streng) rotationssymmetrisch und die Rotationsachse liegt parallel zur Hauptschmiederichtung, daher ist es ein **rotationssymmetrisches Teil**.

Aus dem Bauteilgewicht von 1,700 kg und dem Gewicht des Hüllkörpers von 3,520 kg ergeben sich ein Feingliedrigkeitsfaktor von 0,483 und damit die **Feingliedrigkeitsgruppe S2**.

Der Stofffluss ist mit Priorität 1 ein Querfließen, was der Komplexitätsklasse RH 1 entspricht. Zusammen mit der Feingliedrigkeit ergibt sich eine Eingruppierung in **Klasse RH 1 – S2**.

Die ermittelte Klasse legt die Zeile (gelb markiert) in der Verfahrensmatrix fest, wie das Bild zeigt:

	Artikel		Verfahren														
	Artikel	MWG	Nutzen		Walzen		Stauchern			Fließpress	Gesenschiedern			Gesenschiedern			
			Einfach	Mehrfach	REWA	QKW	Parallel	Formstauern offen	Formstauern geschlossen	Rückwärtsfließpressen	Offenes Gesenk	Gratbremse	Sperkassen	Geschlossenes Gesenk	Offenes Gesenk	Gratbremse	Geschlossenes Gesenk
IST	53	0,62	X				X				X				X		
Klassenbesten	42	1,00	X				X							X			X

Optimiertes Verfahren für Artikel 53 (abgeleitet vom Klassenbesten)

	Teileklassen			Verfahren														
	Klasse	Min.	Max.	Nutzen		Walzen		Stauchern			Fließpress	Gesenschiedern			Gesenschiedern			
				Einfach	Mehrfach	REWA	QKW	Parallel	Formstauern offen	Formstauern geschlossen	Rückwärtsfließpressen	Offenes Gesenk	Gratbremse	Sperkassen	Geschlossenes Gesenk	Offenes Gesenk	Gratbremse	Geschlossenes Gesenk
Rotationsymmetrische Teile	RH 1 - S2	0,62	1,00	X				X							X			X
	RH 2 - S1 *	0,87	0,87	X				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
Fassontteile	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		
	4-S4	0,38	0,83		X		(X)			X			X				X	
	Sonder	0,80	0,89						X				X					X
				Spezielle Artikelgruppen (Baggerzähne, Kolben, ...)														

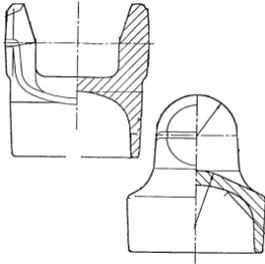
Dieser Klasse kann als optimiertes Verfahren (abgeleitet vom Klassenbesten) für das Bauteil entnommen werden:

- Nutzen einfach
- Verfahren Vorform: Parallelstauern, Gesenschiedern im geschlossenen Gesenk
- Verfahren Fertigform: Gesenschiedern im geschlossenen Gesenk

Der obere Abschnitt der Tabelle zeigt: Der Hauptunterschied im Vergleich zu den ursprünglich eingesetzten Verfahrens- und Werkzeugtechnologien (dunkelblaue Zeile „IST“) ist die Anwendung geschlossener Gesenke. Außerdem ist das mögliche Potential in Bezug auf den Materialwirkungsgrad erkennbar (Spalte „MWG“).

4.2. Fassonteil

Für Fassonteile soll die Vorgehensweise am Beispiel des folgenden Bauteils (Artikel 18) veranschaulicht werden:



Das Bauteil ist nicht rotationssymmetrisch und daher ein **Fassonteil**.

Aus dem Bauteilgewicht von 0,650 kg und dem Gewicht des Hüllkörpers von 2,600 kg ergeben sich ein Feingliedrigkeitsfaktor von 0,250 und damit die **Feingliedrigkeitsgruppe S3**.

Bei der Klassifizierung nach Spies führen die Hauptabmessungen von 70,00 mm, 64,00 mm und 73,00 mm zu einer Eingruppierung in Formenklasse 1 (gedrungene Form). Art und Lage der Nebenformelemente führen nach Spies zur Klasse 104. Daraus ergibt sich eine Punktezahl von 1.

Zusammen mit der Feingliedrigkeit ergibt sich eine Eingruppierung in **Klasse 1 – S3**.

Die ermittelte Klasse legt die Zeile (gelb markiert) in der Verfahrensmatrix fest, wie das Bild zeigt:

	Artikel	MWG
IST	18	0,76
Klassenbesten	35	0,88

Nutzen	Verfahren Vorform							Verfahren Fertigform							
	Einfach	Mehrfach	Walzen		Stauchen		Fließpress	Gesekschmieden							
			REWA	QKW	Parallel	Formstauchen offen	Formstauchen geschlossen	Rückwärts-fließpressen	Offenes Gesek	Gratbremse	Sperrkasten	Geschlossenes Gesek	Offenes Gesek	Gratbremse	Geschlossenes Gesek
	X								X					X	
	X					X				X				X	

Optimiertes Verfahren für Artikel 18 (abgeleitet vom Klassenbesten)

	Teileklassen		
	Klasse	Min.	Max.
Rotationsymmetrische Teile	RH 1 - S2	0,62	1,00
	RH 2 - S1 *	0,87	0,87
	RH 2 - S2	0,83	1,00
	RH 3 - S2	0,75	1,00
	RH 3 - S3 *	0,84	0,84
	RH 4 - S1 *	0,87	0,87
	RH 4 - S3 *	0,74	0,74
Fassontteile	RH 5 - S3	0,84	1,00
	RH 6 - S1 *	1,00	1,00
	RH 7 - S3	0,77	1,00
	1-S2	0,61	0,83
	1-S3	0,76	0,88
	2-S2	0,69	0,90
	2-S3 *	0,64	0,66
	3-S2	0,51	0,81
	3-S3	0,68	0,82
	4-S2 *	0,56	0,70
4-S3	0,48	0,77	
4-S4	0,38	0,83	
Sonder	0,80	0,89	

Nutzen	Verfahren Vorform							Verfahren Fertigform							
	Einfach	Mehrfach	Walzen		Stauchen		Fließpress	Gesekschmieden							
			REWA	QKW	Parallel	Formstauchen offen	Formstauchen geschlossen	Rückwärts-fließpressen	Offenes Gesek	Gratbremse	Sperrkasten	Geschlossenes Gesek	Offenes Gesek	Gratbremse	Geschlossenes Gesek
X					X							X			X
X					X							X		X	
X					X							X			X
X					X				X					X	
X					X				X		X			X	
X					X		X					X			X
X					X			X							X
X					X			(X)				(X)			X
X					X		X			X			X		
X					X				X				X		
X	(X)	(X)			X								X		
X		X			X				X				X		
X			(X)	(X)	X				X				X		
X			(X)			X			X					X	
						X				X					X

Dieser Klasse kann als optimiertes Verfahren (abgeleitet vom Klassenbesten) für das Bauteil entnommen werden:

- Nutzen einfach
- Verfahren Vorform: Formstauchen geschlossen, Gesekschmieden mit Sperrkasten
- Verfahren Fertigform: Gesekschmieden mit Gratbremse

Der obere Abschnitt der Tabelle zeigt: Der Hauptunterschied im Vergleich zu den ursprünglich eingesetzten Verfahrens- und Werkzeugtechnologien (dunkelblaue Zeile „IST“) ist ein Verzicht auf Mehrfachnutzen, eine zusätzliche Vorformstufe (geschlossenes Formstauchen), sowie ein Sperrkasten beim Gesekschmieden in der Vorform. Außerdem ist das mögliche Potential in Bezug auf den Materialwirkungsgrad erkennbar (Spalte „MWG“).

**Pflichtenheft
für die
Erwärmung und das Handling
von
Gesens Schmiedeteilen aus Stahl**

1. Einleitung

Im Folgenden sind die Anforderungen für die Erwärmung von Schmiedematerial beschrieben.

2. Anforderungen

2.1. *Erwärmungstemperatur*

Es müssen Erwärmungstemperaturen bis 1340°C möglich sein. Die Solltemperatur muss stufenlos eingestellt werden können.

2.2. *Zulässige Temperaturstreuung*

Die Temperaturstreuung s (Standardabweichung) darf nicht größer sein als:

- 2 K innerhalb eines Bauteils
- 4 K innerhalb einer Charge (maximal 1 Schicht)

2.3. *Durchwärmung*

Der Temperaturunterschied vom Kern zur Oberfläche darf 5 K nicht überschreiten.

2.4. *Materialabmessungen / -querschnitte*

Es muss sowohl Rundmaterial als auch Vierkantmaterial mit den hier beschriebenen Bedingungen erwärmt werden können. Die folgenden Materialabmessungen sollen einen groben Überblick der heute verwendeten Materialabmessungen aufzeigen:

	Min	Max	Bemerkungen
Länge	25 mm	650 mm	
Durchmesser	15 mm	120 mm	bei Rundmaterial
Kantenlänge	30 mm	120 mm	bei Vierkantmaterial
Gewicht	< 0,1 kg	60 kg	

Um das gesamte Spektrum abdecken zu können, sind unterschiedliche Leistungsklassen von Erwärmungsanlagen zulässig.

Die Vormaterialstangen sind in der Regel 6 - 9m lang. Die Querschnittstoleranz und Abweichungen von der Geradheit sind nach DINEN 10059 bzw. 10060 (Warmgewalzte Vierkantstäbe aus Stahl für allgemeine Verwendung bzw. Warmgewalzte Rundstäbe aus Stahl) festgelegt.

Im Folgenden sind einige Beispielwerte angegeben:

VK Seitenlänge a [mm]	Grenzabmaß [mm]		RD Durchmesser d [mm]	Grenzabmaß Normal [mm]
15 – 25	± 0,5		16 - 25	± 0,5
26 – 39	± 0,6		26 - 35	± 0,6
40 – 54	± 0,8		36 - 50	± 0,8
55 – 99	± 1,0		52 - 80	± 1,0
100 – 109	± 1,3		85 - 100	± 1,3
110 – 129	± 1,5		105 - 120	± 1,5
130 – 150	± 1,8		125 - 160	± 2

2.5. *Stahlqualitäten*

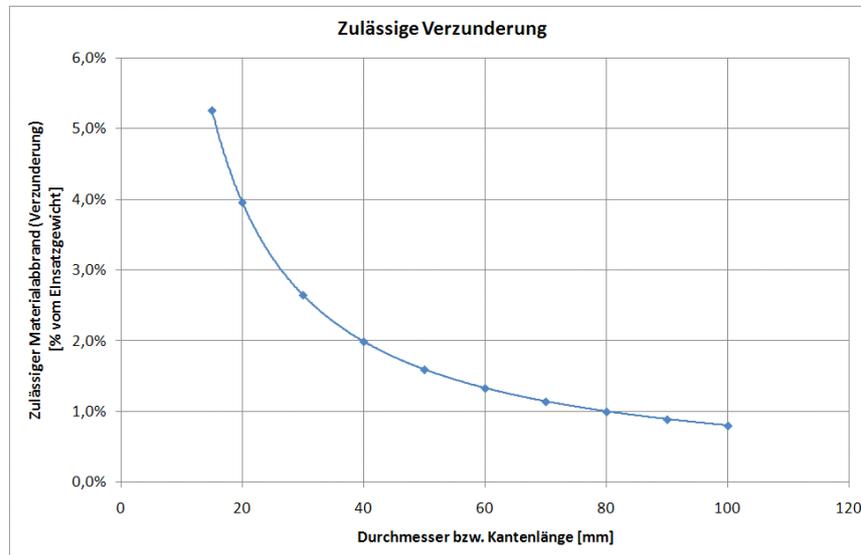
Im Rahmen der Untersuchungen sollen die heute in der Warmmassivumformung üblichen unlegierten und legierten Stähle (auch Edelstähle) betrachtet werden.

Typische Beispiele hierzu sind:

- St37
- 36MnVS4
- C45
- Ck 22
- 42CrMo4
- X5CrNiMo 18 12

2.6. Zulässige Verzunderung

Das Material darf bei der Erwärmung nicht zu stark verzundern, da dies negative Auswirkungen auf die Bauteilqualität und die Werkzeugstandmengen hat. Ideal wäre zunderfreies Material. Mindestens sind jedoch folgende Grenzen einzuhalten:



Die angegebenen Grenzen entsprechen einer maximal zulässigen Zunderschichtdicke von 0,2 mm.

2.7. *Erwärmungszeit / Taktzeit*

Schmiedelinien laufen in Abhängigkeit Umformaggregates und des Automatisierungsgrads in unterschiedlichen Taktzeiten. Die folgende Tabelle dient hier der groben Orientierung:

Typ	Taktzeit von[sec]bis [sec]	Bemerkungen
manuell bediente Schmiedepresse	10	25	
manuell bedienter Schmiedehammer	8	20	
voll automatisierte Schmiedepresse	2	20	
voll automatisierter Schmiedehammer	4	6	
Hatebur	0,3	1,2	

Nach Ablauf der angegebenen Taktzeiten muss ein neu erwärmtes Teil zur Verfügung stehen.

2.8. *Ofendurchsatz*

Aus den angegebenen Materialabmessungen und Taktzeiten ergeben sich die notwendigen Durchsatzmengen für einen Erwärmer (im oberen Bereich werden heute Materialdurchsätze von 5 bis 9 to / h realisiert). Zur Abdeckung des gesamten Teile-Spektrums sind unterschiedliche Leistungsklassen zulässig.

2.9. *Teilehandling*

Das Teilehandling darf nicht zu einer zu großen lokalen Abkühlung führen. Die lokale Oberflächentemperatur darf folgende Grenze nicht unterschreiten:

Solltemperatur – 8 °C

2.10. Umgebungsbedingungen

In einem Betrieb der Massivumformung herrschen raue Umgebungsbedingungen, die im Folgenden näher spezifiziert sind:

- Lufttemperatur ca. 10 °C – 40 °C
- Erschütterungen, Vibrationen
- Staub
- Magnetische Felder durch Induktionsspulen möglich
- Grafit
- Zunder

2.11. Aufstellung

Die Zeit zwischen dem Ende der Erwärmung und dem Beginn der Umformung muss gering sein. Daraus folgt, dass der Aufstellort des Erwärmers in der Nähe des Schmiedeaggregats erfolgen muss.