

Untersuchungen zum gratlosen Gesenkschmieden
von Kurbelwellen

An der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. (FH) Axel Specker
geboren am 14.06.1974 in Emstek

2009

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach

Tag der Promotion: 26. Januar 2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH. Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens, dem geschäftsführenden Gesellschafter des IPH und Leiter des IFUM - Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Leibniz Universität Hannover - gilt mein Dank für die Anregungen bei der Anfertigung der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt den Kollegen am IPH, insbesondere den Kollegen der Abteilung Prozesstechnik, die mich während der Erstellung der Arbeit durch ihr großes Engagement unterstützt haben. Ausdrücklich danke ich den Kollegen Dirk Faikosch, Achim Schott und Kathrin Telkamp für ihre wertvollen Anregungen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Partnerin Carmen Lanfer für ihre Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Hannover, im Januar 2009

Axel Specker

Kurzfassung

Das gratlose near-net-shape-Gesenkschmieden mit anschließender Kaltkalibrierung - das so genannte Präzisionsschmieden - bietet für bestimmte Formklassen eine Möglichkeit, den Materialeinsatz beim Gesenkschmieden bei einer gleichzeitigen Prozesskettenverkürzung zu verringern. Durch den Wegfall des Gratanteils, der bis zu 35 Prozent der Einsatzmasse betragen kann, birgt das Verfahren das Potenzial, die Wettbewerbsfähigkeit umformender Produktionsverfahren zu steigern. Das Präzisionsschmieden eignet sich insbesondere für große Stückzahlen und zeichnet sich durch geringe Bauteiltoleranzen, durch die Endkonturnähe des Schmiedeteils sowie durch eine Reduzierung des Energieeinsatzes aus. Bisher hat sich das Verfahren für rotationssymmetrische Bauteile industriell etabliert.

Für die Bauteilklasse der Langteile wie zum Beispiel Pleuel oder Gabelschlüssel wurde das Verfahren des gratlosen Gesenkschmiedens in Forschungsvorhaben untersucht; Kleinserien konnten erfolgreich geschmiedet werden. Für schmiedetechnisch anspruchsvollere PKW-Kurbelwellen sind Grundlagenuntersuchungen zur technischen Gestaltung der Schmiedeprozesskette durchgeführt worden. Hierbei waren insbesondere die eingesetzten mehrdirektionalen Vorformverfahren Gegenstand der Untersuchungen. Bei der Werkzeug- und Prozessentwicklung dieser innovativen Vorformtechnologie ist eine Vielzahl technologischer und geometrischer Einstellparameter zu berücksichtigen, deren Wechselwirkungen bisher nicht untersucht wurden.

Um die wirtschaftlichen und technologischen Vorteile des mehrdirektionalen Vorformens auch für andere Kurbelwellengeometrien nutzbar zu machen, wird in dieser Arbeit eine Verfahrenscharakterisierung dieser Technologie mithilfe der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Basis der Untersuchungen sind Forschungen zur Entwicklung einer Werkzeug- und Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle und deren Erprobung in praktischen Versuchen. Bezüglich der Stadienfolge ist die Prozessfähigkeit vor allem von der geometrischen Genauigkeit der Vorformen abhängig, da sie wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Fertigformteils haben.

Die entwickelte Prozesskette zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle besteht aus drei Umformschritten:

- Massenverteilung durch Voll-Quer-Fließpressen,
- Querschnittsvorbildung durch mehrdirektionales Vorformen und
- Fertigschmieden durch gratloses Gesenkschmieden.

Die FEM-gestützte Parameterstudie dient der Verfahrenscharakterisierung des mehrdirektionalen Vorformverfahrens und ermöglicht eine Übertragung der Methode auf mehrhubige Kurbelwellen.

Schlagwörter: gratloses Gesenkschmieden, Kurbelwelle, Vorformung, FEM

Abstract

Flashless near-net-shape drop forging followed by a cold calibration step - also known as precision forging - offers, for certain form classes, reduced process cycle times by eliminating the flash removal process. Eliminating this process - a process that can use up to 35 percent of raw materials - makes the precision forging process potentially more competitive for form-changing manufacturing techniques. Precision forging is especially useful in manufacturing large quantities, distinguishing itself by rendering accuracy and near net-shape qualities highly achievable.

Research projects examining the flashless drop forging of flat long pieces (such as connecting rods or fork wrenches) demonstrated that small batches could be forged with high precision. For more technically demanding long pieces such as automobile crank shafts, basic research into the technical design of the forging process was carried out, focusing particularly on the innovative preform procedures employed. A multitude of technological and geometrical parameters must be taken into account when developing the tools and processes for these so-called multidirectional preform operations. These parameters interact with one another in often complex ways.

In order to take advantage of the economic and technological advantages of multidirectional forging for other crankshaft geometries, a simulation-based analysis of process parameters for a multidirectional preforming of crankshafts is described in this thesis. This study is based on investigations in which a tool and stage sequence for the flashless production of a one-cylinder crankshaft is developed and then tested in practice. With regards to the stage sequence, the process capability depends primarily on the geometric accuracy of the preform because of its impact on the quality of the final piece.

The process chain for the flashless drop forging of a one-cylinder crankshaft consists of three development steps:

- distribution of mass via transverse impact extrusion of a solid part,
- preforming via a multidirectional tool and
- flashless drop forging in a closed die.

The FEM-based parameter study built enables one to establish performance parameters from which the process limits of the developed multidirectional preforming techniques can be derived, facilitating a possible transfer of the techniques to multi-stroke crankshafts.

Keywords: flashless drop forging, crankshaft, preforming, FEM

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Gesenkschmieden - Stand der Wissenschaft	3
2.1	Auslegung von Stadienfolgen zum Gesenkschmieden	3
2.2	Simulation von Warmumformprozessen mit Finite-Elemente-Methoden.....	4
2.3	Konventionelles Gesenkschmieden - Formpressen von Stahl mit Grat	6
2.3.1	<i>Gesenkschmieden von Kurbelwellen</i>	7
2.3.2	<i>Schmiedeverfahren zur Herstellung von Kurbelwellen</i>	8
2.4	Präzisionsschmieden - Formpressen von Stahl ohne Grat	11
2.4.1	<i>Bauteilspektrum</i>	13
2.4.2	<i>Werkzeug- und Maschinentechologie</i>	14
2.5	Schmiedeprozesse mit mehrfach wirkenden Umformstempeln	20
2.6	Verkürzung von Prozessketten durch gratloses Gesenkschmieden	23
3	Problemstellung und Zielsetzung	24
4	Verfahrensentwicklung des gratlosen Gesenkschmiedens von Kurbelwellen	26
4.1	Randbedingungen für den Entwicklungsprozess	26
4.1.1	<i>Funktionsdaten und Modellierung der Kurbelwellengeometrie</i>	27
4.1.2	<i>Analyse der Kurbelwellengeometrie</i>	28
4.1.3	<i>Zentrale Prozesskräfte bei gratlosen Gesenkschmiedeprozessen</i> ..	30
4.1.4	<i>FEM-Analysen</i>	30
4.2	Prozessauslegung.....	31
4.2.1	<i>Fertigschmieden durch gratloses Gesenkschmieden</i>	32
4.2.2	<i>2. Vorformoperation: Mehrdirektionales Vorformen</i>	33
4.2.3	<i>1. Vorformoperation: Voll-Quer-Fließpressen</i>	37
4.2.4	<i>Ableitung der Rohteilgeometrie</i>	40
4.2.5	<i>FEM-Analyse des Fertigschmiedens</i>	41
4.2.6	<i>Faserverlauf und Mittenseigerung der Einzylinderkurbelwelle</i>	44
4.3	Ergebnisse der Verfahrensentwicklung.....	45

5	Entwicklung der Werkzeugtechnologie für das gratlose Gesenkschmieden von Kurbelwellen	47
5.1	Anforderungen und Funktionsstruktur der Werkzeuge	47
5.2	Werkzeug für das Voll-Quer-Fließpressen.....	48
5.2.1	<i>Werkzeugaufbau</i>	49
5.2.2	<i>Werkzeugkinematik</i>	50
5.3	Werkzeug für das mehrdirektionale Vorformen	51
5.3.1	<i>Werkzeugaufbau</i>	52
5.3.2	<i>Werkzeugkinematik</i>	54
5.3.3	<i>Auslegung des Keilantriebs zur Schubumformung</i>	55
5.4	Werkzeug für das gratlose Gesenkschmieden	59
5.4.1	<i>Werkzeugaufbau</i>	60
5.4.2	<i>Werkzeugkinematik</i>	62
6	Experimentelle Untersuchungen	63
6.1	Versuchsaufbau und -durchführung	63
6.2	Umformversuche zum Voll-Quer-Fließpressen.....	64
6.3	Umformversuche zum mehrdirektionalen Vorformen	68
6.4	Umformversuche zum gratlosen Gesenkschmieden	70
6.5	Untersuchungsergebnisse	72
6.5.1	<i>Maßtoleranzen</i>	73
6.5.2	<i>Gefügebeschaffenheit</i>	75
6.5.3	<i>Verschleißverhalten der Werkzeuge</i>	76
6.6	Gestaltungshinweise für mehrdirektionale Schmiedewerkzeuge.....	80
7	Verfahrenscharakterisierung des mehrdirektionalen Vorformens	82
7.1	Definition von Modellgeometrien	83
7.2	Numerische Analysen.....	86
7.2.1	<i>Prozessparameter</i>	86
7.2.2	<i>Werkzeugmodell zur Ermittlung der Prozessgrenzen</i>	89
7.2.3	<i>Justierung numerischer Einflussgrößen</i>	91
7.2.4	<i>Statistische Versuchsplanung</i>	92
7.3	Ergebnisse.....	94

8	Zusammenfassung und Ausblick	100
9	Literaturverzeichnis	102
10	Anhang	109

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α	[°]	Keilwinkel
β	[°]	Gleitflächenwinkel
A_0	[mm ²]	Querschnittsfläche der Anfangsgeometrie
A_1	[mm ²]	Querschnittsfläche der Endgeometrie
A_P	[mm ²]	Pleuellagerquerschnittsfläche entlang Bauteil-x-Achse
A_{PG}	[mm ²]	passiver Gravurbereich
A_{ST}	[mm ²]	projizierte Stempelfläche
A_W	[mm ²]	Kurbelwangenquerschnittsfläche entlang Bauteil-x-Achse
A_{W1}	[mm ²]	Querschnittsfläche der 1. Vorform entlang der x-Achse
A_{W2}	[mm ²]	Querschnittsfläche der 2. Vorform entlang der x-Achse
b	[mm]	Kurbelwangenbreite
d	[mm]	Kurbelwangendicke
d_H	[mm]	Hauptlagerdurchmesser
d_P	[mm]	Pleuellagerdurchmesser
F_A	[N]	Keilantriebskraft
f	[1]	am finiten Element angreifende Kräfte
F_C	[N]	Schließkraft
F_F	[N]	Stauchkraft
F_G	[N]	Gesamtumformkraft
F_P	[N]	Presskraft des Aggregats
F_R	[N]	Reibkraft in Stempelgleitführung
F_S	[N]	Stößelkraft
F_T	[N]	Schubumformkraft
F_U	[N]	Stempelkraft
h	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient
h_S	[mm]	Stößelweg
h_W	[mm]	Kurbelwangenhöhe
K	[1]	Elementsteifigkeitsmatrix

Formelzeichen

k_f	[MPa]	Fließspannung
l_R	[mm]	Rohteillänge
m	[1]	Reibfaktor
p_i	[MPa]	Gesenkinnendruck
R_F	[1]	Verhältniszahl: F_P / F_G
R_K	[mm]	Kantenverrundung durch Abrasion
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
T_O	[°C]	Ofentemperatur
T_S	[°C]	Bauteiltemperatur
u	[mm]	Überschneidung
u	[1]	Knotenverschiebung
v_S	[mm/s]	Stößelgeschwindigkeit
v_T	[mm/s]	Tangentialgeschwindigkeit
w_H	[mm]	Hauptlagerbreite
w_P	[mm]	Pleuellagerbreite
μ	[1]	Reibzahl
ρ	[mm]	Kerbradius
σ_m	[MPa]	Mittlere Hauptspannung
σ_N	[MPa]	Normalspannung
σ_V	[MPa]	Vergleichsspannung nach von Mises
$R_{M,W}$	[MPa]	Warmzugfestigkeit
φ	[1]	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	[1/s]	Umformgeschwindigkeit
φ_V	[1]	Vergleichsformänderung
φ_G	[1]	Grenzumformgrad
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
ΔV	[%]	Volumendifferenz
s_F	[mm]	Stauchweg beim mehrdirektionalen Schmieden
s_T	[mm]	Schubumformweg beim mehrdirektionalen Schmieden

Abkürzungen

Zeichen	Bezeichnung
CAD	Computer-Aided-Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite-Elemente-Methode
IPH	Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
MDWZ	Mehrdirektionales Schmiedewerkzeug
OT	Oberer Totpunkt
PKW	Personenkraftwagen
UT	Unterer Totpunkt
VDI	Verband Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

Die in den vergangenen Jahren stark gestiegenen Rohstahlkosten und die Globalisierung der Märkte, mit der ein erhöhter Kostendruck einhergeht, hat für Stahl verarbeitende Unternehmen die Notwendigkeit einer automatisierten Fertigung bei gleichzeitig optimiertem Werkstoffeinsatz zur Folge [Ame08]. In Unternehmen, in denen die Fertigung und die eingesetzten Herstellverfahren bereits ein Höchstmaß an Effizienz besitzen, weisen innovative Fertigungsverfahren, beispielsweise durch den Wegfall zeit- und kostenintensiver Zerspanprozesse, weiteres Kosteneinsparpotenzial auf [BRS05].

Durch Massivumformverfahren hergestellte Stahlprodukte werden aufgrund ihres ununterbrochenen und beanspruchungsgerechten Faserverlaufs vor allem für hoch beanspruchte und dynamisch stark belastete Bauteile verwendet. Typische Einsatzgebiete sind der Automobil- und Turbinenbau (Fahrwerks- und Antriebskomponenten, Turbinenschaufeln). Durch neuere Verfahrensentwicklungen der Massivumformung wie beispielsweise das Präzisionsschmieden wird der Forderung nach einer möglichst effizienten Werkstoffnutzung bei mindestens gleich bleibender Produktqualität Rechnung getragen. Der Prozess des Präzisionsschmiedens besteht aus einem oder mehreren Vorformschritten, dem Fertigschmieden durch gratloses Gesenkschmieden sowie dem abschließenden Kaltkalibrieren. Das Präzisionsschmieden zeichnet sich gegenüber dem konventionellen Gesenkschmieden durch eine erhöhte Bauteilgenauigkeit und Endkonturnähe aus. Diese Eigenschaften können je nach Bauteilgeometrie zu einer verkürzten Prozesskette und einer Reduzierung des Energieeinsatzes führen, so dass nur noch eine abschließende Hartfeinbearbeitung notwendig ist [DB07].



Bild 1.1: Präzisionsgeschmiedete Bauteile des IPH und IFUM

Grundlegend für die Entwicklung des Verfahrens war sein hohes wirtschaftliches Potenzial in Bezug auf mögliche Materialeinsparungen und die Verkürzung der Prozesskette. Der zielgerichtete Einsatz des Präzisionsschmiedens ist neben der Anzahl und Art der notwendigen Vorformoperationen von der Werkzeugstandzeit abhängig. Werkzeuge zum Präzisionsschmieden sind hohen tribologischen und thermomechanischen Belastungen ausgesetzt, die zum vorzeitigen Ausfall der Werkzeuge durch Verschleiß führen können. Parallel zur Weiterentwicklung der Werkzeugtechnologie wurden spezielle, auf die Präzisionsschmiedetechnologie angepasste mechanische Schmiedepressen entwickelt, die durch neue Antriebskonzepte eine Senkung der Druckberührzeit sowie eine Reduzierung des Verschleißes erzielen [BDS06, Wit05].

Das Präzisionsschmieden von Langteilen mit einem Länge(l)-zu-Breite(b)-Verhältnis von $l \geq 3 \cdot b$ wurde in umfangreichen Grundlagenuntersuchungen anhand von Beispielbauteilen wie PKW-Pleuel und Handwerkzeugen entwickelt [Bro99]. Den - im Gegensatz zu rotationssymmetrischen Bauteilen - erhöhten Werkzeuganforderungen durch die asymmetrischen, komplexen Stempelgeometrien sowie durch die stark unterschiedliche Massenverteilung entlang der Bauteillängsachse wurde durch die Entwicklung innovativer Vorformverfahren, wie beispielsweise das mehrdirektionale Vorformen, begegnet [Müs02, BRS05].

Das Präzisionsschmieden stark komplexer Bauteile wie Kurbelwellen stellt eine weitere Entwicklungsstufe des Verfahrens dar. In Voruntersuchungen wurde eine Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden von einzelnen Kurbelwellenelementen in der Prozesskette des Präzisionsschmiedens entwickelt [Alt06]. Hierbei lag der Fokus insbesondere auf der schmiedetechnischen Herstellung geeigneter Vorformen für das gratlose Schmieden.

Bedingt durch den steten Wechsel von Hauptlagern, Gegengewichten und Pleuellagern in der Kurbelwellengeometrie entstehen starke Masseschwankungen entlang der gebogenen Hauptlängsachse, die durch konventionelle Vorformverfahren nur unzureichend abgebildet werden können. Die in der Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Kurbelwellen eingesetzten Vorformverfahren haben daher die Aufgabe, eine möglichst präzise Massenverteilung und Querschnittsvorbildung bereits vor dem gratlosen Gesenkschmieden herzustellen.

Die Technologie des mehrdirektionalen Vorformens erfüllt die genannten Anforderungen an ein geeignetes Vorformverfahren, sie ist jedoch für komplexe Kurbelwellengeometrien bislang nicht untersucht worden. Deshalb wird in dieser Arbeit das mehrdirektionale Vorformverfahren in einer gratlosen Schmiedeprozesskette für eine Einzylinderkurbelwelle exemplarisch untersucht. Die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf weitere Kurbelwellengeometrien wird im Rahmen einer Verfahrenscharakterisierung erforscht.

2 Gesekschmieden - Stand der Wissenschaft

Nach DIN 8583-4 kann das Gesekformen/Gesekschmieden als Untergruppe der Gruppe des Druckumformens in die Umformverfahren *Formpressen mit Grat* und *Formpressen ohne Grat* unterteilt werden (vgl. Bild 2.1). Typische Merkmale des Formpressens mit Grat - also des konventionellen Gesekschmiedens - sind Gesekformen mit teilweise umschlossenem Werkstück, wobei überschüssiges Material in den Gratspalt fließt. Das Formpressen ohne Grat zeichnet sich durch Gesekformen mit ganz umschlossenem Werkstück aus, bei dem der Werkstückwerkstoff nicht in den Grat abfließen kann [DIN8583, DB07]. Weitere Grundverfahren des Druckumformens sind das Walzen und Freiformen als Verfahren, die insbesondere zur Vorformung von Gesekschmiedeteilen eingesetzt werden.

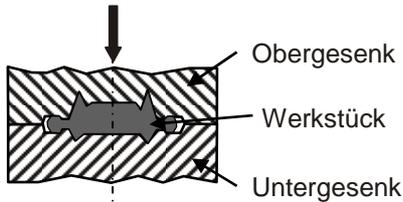
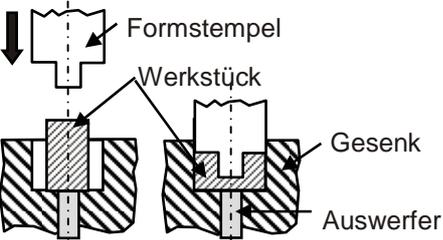
Grundverfahren	Umformverfahren	Darstellung	Merkmale
Schmieden	Formpressen mit Grat		Gesekformen mit ganz umschlossenem Werkstück, wobei überschüssiger Werkstoff durch den Gratspalt abfließt
	Formpressen ohne Grat		Gesekformen mit ganz umschlossenem Werkstück, kein Werkstoff kann abfließen

Bild 2.1: DIN 8582 - Grundverfahren der Massivumformung: Schmieden [DB07]

2.1 Auslegung von Stadienfolgen zum Gesekschmieden

Die Stadienfolge einer Schmiedeprozesskette besteht in der Regel aus einer oder mehreren Vorformen sowie dem Fertigteil. In den Vorformschritten erfolgt die Massenverteilung und Querschnittsvorbildung, in der Fertigformung wird die Endgeometrie des Schmiedeteils hergestellt. Nachgelagerte Prozesse wie das Lochen oder Kaltkalibrieren finden in separaten Schritten statt.

Die Auslegung von Stadienfolgen zum Gesekschmieden geschieht in den drei Schritten [Mat91, Sto97]:

- Entwurfsphase (verfahrensgerechte Schmiedeteilgestaltung),
- Analysephase (Entwicklung/Optimierung der Werkzeughohlformen und der Vorformen des Bauteils) und

- Versuchsphase (Werkzeugkonstruktion und -fertigung, Versuchsdurchführung).

Das Festlegen der Abfolge der einzelnen Umformschritte (Entwurfsphase) basiert auf Richtlinien zur Gestaltung von Schmiedeteilen, beispielsweise nach DIN 7523-2 [DIN752]. Als methodischer Ansatz wird im Allgemeinen das Top-Down-Verfahren eingesetzt, bei dem ausgehend vom Fertigteil die Stadienfolge bis zum Ausgangsquerschnitt rückwärtsgerichtet entwickelt wird. Für die Festlegung der Geometrien werden die Massenverteilungsschaubilder und Mittenlinienverläufe der Geometrien analysiert und mithilfe von Finite-Elemente-Stoffflusssimulationen weiterentwickelt. Ziel dieser Analysephase ist eine möglichst genaue Annäherung an eine fehlerfrei schmiedbare Stadienfolge. Im letzten Schritt werden in praktischen Versuchen die entwickelte Stadienfolge verifiziert und die zur Herstellung notwendigen Werkzeuge eingefahren (Versuchsphase).

Das Halbzeug wird im Allgemeinen aus gewalztem Stab- oder Knüppelmaterial hergestellt und kann durch Scheren, Brechen oder Sägen gefertigt werden. Das Scheren hat sich für die Halbzeugherstellung, bei der eine hohe erreichbare Mengenleistung im Vordergrund steht, etabliert. Da beim Formpressen ohne Grat eine hohe Volumenkonstanz erforderlich ist, wird zum Erreichen der Maß- und Formgenauigkeit das Sägen zur Herstellung der Halbzeuge eingesetzt [DB07]. Weiterhin wird das Sägen zur Halbzeugherstellung für vollautomatische Schmiedelinien eingesetzt, da eine hohe Reproduzierbarkeit der Abschnitlänge und Schnittflächenqualität eine wesentliche Voraussetzung für die Prozesssicherheit ist [KC02].

2.2 Simulation von Warmumformprozessen mit Finite-Elemente-Methoden

Die numerische Analyse von Umformprozessen erfolgt aufgrund ihrer komplexen mathematischen Problemstellung häufig mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM). Die FEM ist ein mathematisches Verfahren zur numerischen Lösung partieller Differentialgleichungen. Das dem FEM-Verfahren zugrunde liegende Prinzip ist die Umwandlung des mathematischen Problems in ein algebraisches System von Differentialgleichungen. Die Gesamtstruktur des Systems wird dabei durch ein Berechnungsmodell ersetzt, welches aus einer Vielzahl kleiner Teilgebiete (finite Elemente) besteht. Dadurch eignet sich die FEM zur Berechnung einer Vielzahl physikalisch-technischer Aufgabenstellungen, wie zum Beispiel für elastische und plastische Deformationen, Temperaturverteilungen oder magnetische Ströme. In der Simulation von Warmumformprozessen wird sie vor allem zur Berechnung des Stoffflusses sowie der Spannungs-, Temperatur- und Formänderungsverteilungen eingesetzt [DB07, Wie04].

Das Steifigkeitsverhalten des jeweiligen Modells wird über die Steifigkeitsmatrizen der Elemente beschrieben. Unter Beachtung der Steifigkeitsbedingungen zwischen den Elementen wird eine Gesamtsteifigkeitsmatrix \underline{K} aufgestellt. Daraus entsteht unter Berücksichtigung der gewählten Randbedingungen und Belastungen ein nicht-lineares Gleichungssystem der Form $[\underline{K}](u) \cdot [\underline{u}] = [\underline{f}]$. Die Lösung dieser Gleichung

ergibt eine Näherung für den wirklichen Verschiebungszustand. Aus dem Formänderungszustand lässt sich dann der Spannungszustand berechnen [Gra03].

Die Abbildung von Warmumformprozessen erfordert häufig eine thermisch-mechanisch gekoppelte Berechnung, da hohe Temperaturgradienten zwischen dem Werkstück und den Werkzeugen bzw. der Umgebung vorliegen und zusätzlich eine Temperaturabhängigkeit der Stoffgrößen vorliegt. Durch die Modellierung thermisch-mechanisch gekoppelter Prozesse können sowohl stationäre und instationäre als auch lineare und nicht lineare Wärmeübertragungsprobleme gelöst werden. Die Rechenzeiten zur Lösung der resultierenden nichtlinearen Gleichungssysteme nimmt mit einer steigenden Zahl finiter Elemente exponentiell zu, da umformtechnische Anwendungen durch große Formänderungen, nichtlineares Materialverhalten und instationäre Temperaturfelder gekennzeichnet sind [Fra99].

Für die Simulation von Warmumformprozessen ist es erforderlich, die maßgeblichen Einflussgrößen und Randbedingungen zu beachten. Wichtige Einflussgrößen sind:

- die Fließspannung,
- die thermischen Randbedingungen und
- die Reibung.

Für Umformsimulationsprogramme wird die Fließspannung des Werkstoffs in Abhängigkeit der Umformparameter (Umformgrad φ , Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Temperatur T) vorgegeben. Die Formulierung der Fließkurve kann dabei auf Basis experimenteller Daten, mittels eines mathematischen Ansatzes oder durch eine physikalische Beschreibung der Fließkurve erfolgen. Das Temperaturfeld im Werkstück ist bei Warmumformprozessen sowohl instationär als auch inhomogen. Es wird im Wesentlichen durch die Anfangstemperatur, die Wärmeabgabe an die Umformwerkzeuge und die Umgebung sowie die dissipative Erwärmung während der Umformung bestimmt. Die Bauteiltemperatur ist daher eine wichtige Einflussgröße, da sie ihrerseits die Fließspannung des Werkstücks beeinflusst [Gra03].

Für die Abbildung der Reibung werden hauptsächlich das Coulomb'sche Reibgesetz oder das Reibfaktormodell verwendet, welche jeweils einen zu bestimmenden Koeffizienten (Reibzahl μ bzw. Reibfaktor m) enthalten. Ein Nachteil dieser Ansätze ist, dass die Reibzahl bzw. der Reibfaktor nur über die Reibfläche gemittelte Werte darstellen und somit der Komplexität der im Prozess auftretenden Reibung nicht gerecht werden. Neuere Ansätze berücksichtigen die Zustände in der Zwischenschicht zwischen Werkstück und Werkzeug. Größen wie die Reibschubspannung, die Kontaktnormalspannung sowie die relative Gleitgeschwindigkeit werden dabei als lokal veränderliche Parameter betrachtet und zur Formulierung eines neuen Reibgesetzes verwendet [DAS02].

Die gängigen Programmsysteme zur Modellierung von Warmumformprozessen können nach der Wahl des verwendeten Stoffgesetzes unterteilt werden. Stoffgesetze dienen der Beschreibung des Fließverhaltens des Werkstoffs und stellen eine Beziehung zwischen dem Formänderungs- und dem Spannungszustand her. Die Wahl des

Stoffgesetzes wirkt sich stark auf die Aussagekraft der Simulationsrechnung aus. Grundsätzlich kann für Schmiedevorgänge

- ein starr-plastisches,
- ein visko-plastisches,
- ein elastisch-plastisches oder
- ein visko-elastisch-plastisches Stoffgesetz

angewendet werden [Gra03].

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Software *Forge3* nutzt für die Simulation von Warmumformprozessen das visko-plastische Stoffgesetz nach *NORTON* und *HOFF*, welches auch Geschwindigkeitseffekte berücksichtigt. Bei thermisch-mechanisch gekoppelten Berechnungen wird neben der Verwendung des visko-plastischen Stoffgesetzes für den Werkstückwerkstoff das Werkzeug mit einem elastischen Stoffgesetz modelliert [Tra08]. Als Elementtyp werden sowohl für das Werkstück als auch für die Werkzeuge Tetraeder verwendet.

Die Genauigkeit der numerischen Lösung wird in erheblichem Maße von der Elementqualität der vernetzten Strukturen beeinflusst. Bei starker Elementverzerrung wird die Lösung ungenauer. Während der numerischen Berechnung erfolgt daher beim Einsatz kommerzieller Softwarepakete ein so genanntes Remeshing, bei dem die auftretenden Netzverzerrungen - bedingt durch die großen plastischen Verformungsgrade - durch eine periodische Neuvernetzung aufgehoben werden. Die Zustandsvariablen des alten Netzes werden dabei auf das neue Netz übertragen, wobei die äußere Kontur des Werkstücks erhalten bleibt [DB07].

Wesentliche Aspekte beim Einsatz der FEM in dieser Arbeit sind:

- die Optimierung der Stadienfolge und des Werkstoffflusses durch die Variation der Einflussgrößen und Geometrien sowie
- die Berechnung des erforderlichen Kraft- und Energiebedarfs.

2.3 Konventionelles Gesensschmieden - Formpressen von Stahl mit Grat

Das Gesensschmieden von Stahl wird üblicherweise in einem Temperaturbereich von 900 °C - 1.250 °C durchgeführt (Warm schmieden). Die Werkstücktemperatur bestimmt die Fließspannung k_f und die Eigenschaften der Schmiedestücke; Spannungen und Umformkräfte können somit herabgesetzt werden. Verglichen mit konkurrierenden Verfahren wie beispielsweise dem Sintern oder Gießen weisen Schmiedeteile hervorragende mechanische Eigenschaften, porenfreie Gefüge und zum Teil einbaufertige Funktionsflächen auf [DB07, LM77].

Bedingt durch die hohen Prozesstemperaturen und die mechanischen Beanspruchungen finden sowohl im Werkstück als auch im Werkzeug Vorgänge statt, die zum Werkzeugausfall und am Werkstück zu geringer Maßhaltigkeit und Oberflächengüte führen. Am Werkstück kommt es je nach Legierungszusammensetzung bei Temperaturen ab ca. 730 °C zu einer starken Zunahme der Oxidmenge an der Oberfläche

der Bauteile. Das Ausmaß dieser Zunderbildung bestimmt zusammen mit der Schrumpfung die maßliche Toleranz und Oberflächenbeschaffenheit des Schmiedestücks [CHS03, DB07].

Die Prozesskette beim Gesensschmieden setzt sich aus den Arbeitsgängen Abscheren, Erwärmen, Vorformen, Fertigschmieden und Abgraten/Lochen zusammen. Das Rohteil wird dabei in einer oder mehreren Vorformoperationen soweit an die Fertigteilgeometrie angenähert, dass das Fertigteil mit möglichst geringem Gratanteil hergestellt werden kann. Nachgelagerte Prozesse wie Strahlen oder eine evtl. Wärmebehandlung schließen sich an das Abgraten an. Der Gratanteil für Bauteile mit einer Masse zwischen ein und 100 kg beträgt je nach Formenklasse (vgl. Anhang A4: Formenordnung nach SPIEß) zwischen zehn und 50 Prozent der Fertigteilmasse [Lan88]. Zum Schmieden wird das Rohteil auf eine Umformtemperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffs erwärmt. Nach der Vorformung folgt im Allgemeinen das Fertigschmieden auf dem gleichen Umformaggregat. Nachdem die Fließspannung des Werkstoffs überschritten ist, füllt der Werkstoff die Fertigteilgravur; überschüssiges Material fließt in den Gratspalt ab. Der Grat hat beim konventionellen Gesensschmieden die Aufgabe, den Materialfluss so zu steuern, dass die Formfüllung der Gravur sichergestellt wird. Dies wird durch die Behinderung des Materialflusses und den sich dadurch aufbauenden Gesenkinnendruck erreicht [Hus03].

2.3.1 Gesensschmieden von Kurbelwellen

Kurbelwellen werden zum Beispiel in Hubkolbenmotoren eingesetzt und wandeln die lineare Bewegung der Kolben in eine regelmäßige, rotierende Bewegung um. Die Kurbelwelle gilt als eines der am höchsten belasteten Bauteile im Motorenbau. Sie besteht aus Haupt- und Pleuellagern, die durch Kurbelwangen verbunden sind. Die Hauptlager stützen die Kurbelwelle im Motorblock. Die Pleuellager tragen die Pleuellstangen. Die Kurbelwangen gleichen Masseungleichgewichte aus. Der Zapfen und der Flansch der Kurbelwelle werden mit dem Zahnrad für die Ventilsteuerung bzw. mit dem Schwungrad verbunden [Thy05]. Auf Bild 2.2 ist schematisch den Aufbau einer Einzylinderkurbelwelle dargestellt.

Neben der am weitesten verbreiteten gießtechnischen Herstellung werden Kurbelwellen für kompaktere Motoren mit hoher Leistungsdichte auch durch Schmieden hergestellt. Für PKW- und LKW-Kurbelwellen liegen die Anteile an geschmiedeten Kurbelwellen in den USA bei ca. 5 Prozent, in Europa bei ca. 40 Prozent und in Japan bei ca. 75 Prozent [van08].

Für geschmiedete Kurbelwellen werden neben den zumeist legierten Vergütungsstählen sukzessiv ausscheidungshärtende Stähle mit ferritsch-perlitischem Gefüge (AFP-Stähle) eingesetzt, die mikrolegierte Stähle mit Zugfestigkeiten R_m von 750 bis 1.000 MPa sind. Die aufwändige Wärmebehandlung der Schmiederohteile kann auf diese Weise entfallen [Rae06].

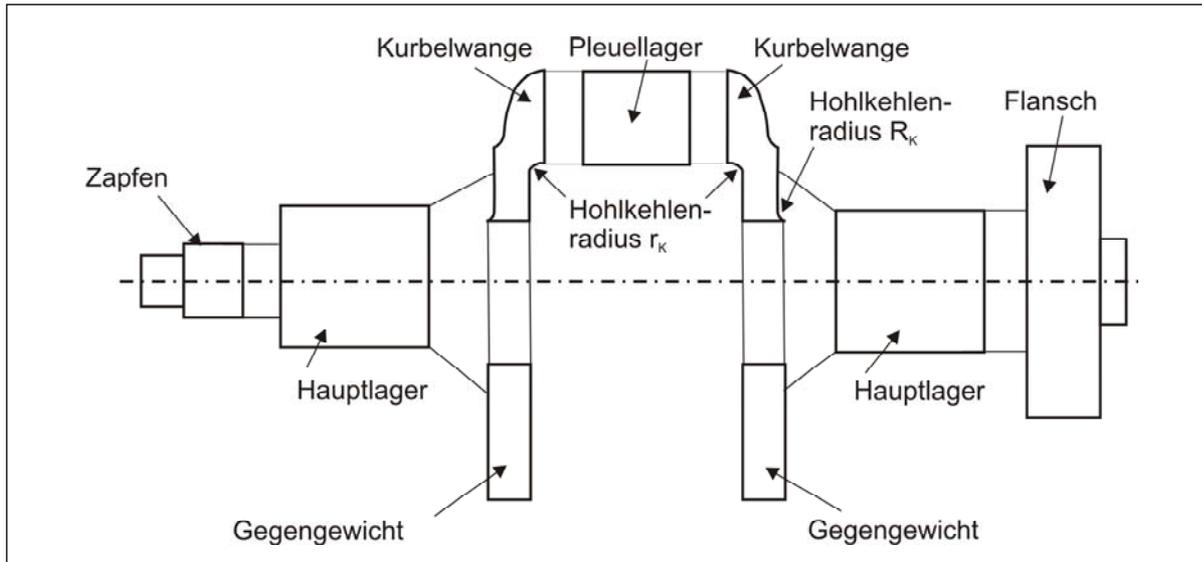


Bild 2.2: Schematischer Aufbau einer Einzylinderkurbelwelle

2.3.2 Schmiedeverfahren zur Herstellung von Kurbelwellen

Überschreiten die Anforderungen an die (Schwing-)Festigkeit die Grenzen gegossener Kurbelwellen, werden zumeist geschmiedete Kurbelwellen eingesetzt. Gegenüber der gusstechnischen Herstellung bietet die schmiedetechnische Herstellung von Kurbelwellen den Vorteil, dass die Kurbelwellen steifer sind und dynamisch höher belastbar sind. Ferner weisen gegossene Kurbelwellen eine größere Streuung bei der Beanspruchbarkeit durch größere Gefüge-Inhomogenitäten auf [Bas06]. Zur schmiedetechnischen Herstellung von Kurbelwellenrohlingen werden folgende Verfahren angewendet [Bas07]:

- Einzelhubschmieden: basierend auf dem Hub-für-Hub-Verfahren oder dem sequentiellen Umformen in horizontaler und vertikaler Richtung (TR-Verfahren) [RWH03], Einsatz für größere Kurbelwellen von drei m bis 12 m
- Freiformschmieden: Anwendung für Prototypen und Einzelstücke aller Größen
- Hammergesensschmieden: Anwendung für Kurbelwellen bis 2,5 t Rohgewicht und 4,2 m Länge für kleine und mittlere Stückzahlen.
- Pressgesensschmieden: Anwendungsbereich für PKW - und LKW-Kurbelwellen bei größeren Stückzahlen

Bei der herkömmlichen Herstellung von PKW-Kurbelwellen durch Pressgesensschmieden wird mit einem Masseüberschuss von bis zu 30 Prozent gearbeitet. Das überschüssige Material fließt zum größten Teil in den Gratanteil; ein geringerer Teil des Masseüberschusses ist bedingt durch das so genannte Aufmaß: Dieses zusätzliche Material an Kurbelwangen, Haupt- und Pleuellagern verbleibt bis zur anschlie-

ßenden Zerspanung am Schmiederohling, um die geforderten Oberflächenqualitäten und Maßtoleranzen herstellen zu können. Bild 2.3 zeigt die Stadienfolge zum Schmieden einer Dreizylinderkurbelwelle. Der notwendige Masseüberschuss führt zu einem Nachbearbeitungsaufwand durch Abgraten und die spanende Weichbearbeitung.

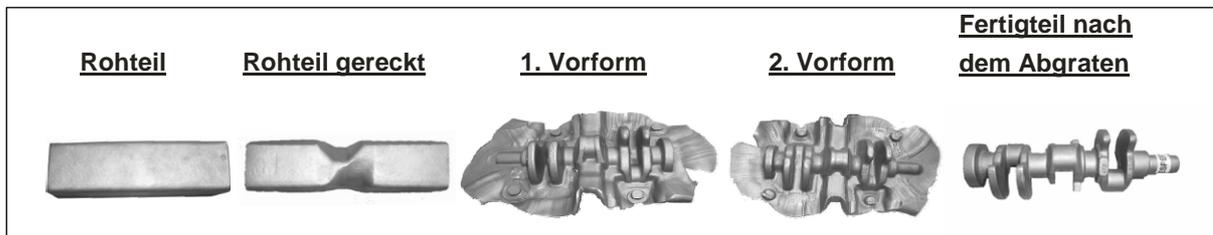


Bild 2.3: Stadienfolge zum konventionellen Schmieden einer Dreizylinderkurbelwelle mit drei Umformvorgängen und einem Abgratprozess [DaimlerChrysler]

Beanspruchbarkeit von Kurbelwellen

Die Kurbelwelle muss die während des Motorbetriebs entstehenden Belastungen dauerhaft ertragen können. Die Betriebsbelastung besteht aus einer Biege- und einer dazu phasenungleichen Torsionsbelastung, wodurch ein mehrachsiger Spannungszustand erzeugt wird. Die Torsionsbelastung resultiert aus dem Nutzdrehmoment, das sich durch Aufsummieren der Drehkräfte der einzelnen Zylinder ergibt. Das Nutzdrehmoment wird überlagert durch die Momente der Drehkraftschwankungen während eines Arbeitsspiels sowie die Belastung durch die Kurbelwellenverformung infolge von Drehschwingungen. Die dynamische Beanspruchbarkeit der Kurbelwelle kann zum einen über Prüfstandsversuche (Aufnahme von Bauteilwöhlerdiagrammen für Biege- und Torsionsbelastungen) ermittelt werden, zum anderen wird sie auf Basis empirisch hergeleiteter Formeln berechnet. Diese Formeln basieren im Wesentlichen auf Ergebnissen von Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Kurbelwellen und oder Werkstoffproben. Neben den empirisch ermittelten Formeln werden aktuell rechnergestützte Festigkeitsberechnungen eingesetzt [KF06].

Faserverlauf und Seigerungen bei geschmiedeten Kurbelwellen

Der Werkstoff von geschmiedeten Kurbelwellen weist aufgrund des verwendeten Strang- oder Blockgusses als Ausgangsmaterial einen Faserverlauf sowie je nach Legierungszusammensetzung Seigerungszone auf. Diese werkstofflichen Eigenschaften können auf die Bauteilfestigkeit geschmiedeter Kurbelwellen Einfluss ausüben.

Unter Seigerungen versteht man die Entmischung einer anfänglich gleichmäßig zusammengesetzten Schmelze. Begleitelemente und Einschlüsse werden vor der Erstarrungsfront hergedrängt und in der Restschmelze angereichert. Die Bildung und Ausprägung von Seigerungen ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise dem Kohlenstoffgehalt der Schmelze, der Gießtechnik zur Herstellung

des Vormaterials (Block- oder Strangguss) und dem Verformungsgrad des gewalzten Vormaterials [Sah99].

Ein so genannter Faserverlauf entsteht, wenn beim Umformen des Vormaterials Mikroseigerungen und nicht metallische Einschlüsse wie Oxide und Sulfide mitverformt werden und sich zu einer zeiligen Struktur parallel zur Hauptumformrichtung anordnen. Wesentliche Einflussgrößen auf die Faserausbildung sind der Reinheitsgrad der Schmelze, der Umformgrad sowie die Umformtemperatur eines Prozesses [GS89]. Der Einfluss der Fasern/Faserlage wurde vor allem für dynamische Belastungen zum Beispiel im Dauerschwingversuch nachgewiesen. Die Gefügezeiligkeit führt zu Unterschieden in den mechanischen Eigenschaften eines Bauteils, wenn längs oder quer zur Faser (Zeiligkeit) des Stahles geprüft wird. So kann die Kerbschlagzähigkeit in Flachstahl bei Wechsel der Probenlage (von längs zu quer zur Faser) im ungünstigsten Fall auf ein Zehntel ihres Basiswertes zurückgehen. Schwingfestigkeitsuntersuchungen an gekerbten Probestäben, die spanend und durch Gesenkschmieden hergestellt wurden, haben eine fast zehnpromtente Verbesserung der Biegefestigkeit bei den geschmiedeten Proben ergeben [DR82, Dit02]. Bei der Konstruktion von Kurbelwellen wird eine Störung des Faserverlaufs ebenfalls berücksichtigt. Findet eine Unterbrechung der Fasern - beispielsweise ein Abgrat- oder Zerspanprozess - statt, so wird je nach Höhe der Biegebeanspruchung eine Verringerung der Biegewechselfestigkeit zwischen zwei und 20 Prozent kalkuliert [Met73]. Dies hat zur Folge, dass Kurbelwellen aufgrund des gestörten Faserverlaufs größer dimensioniert werden müssen. Die Technologie des gratlosen Gesenkschmiedens kann ob ihres Vorteils durch den ungestörten Faserverlauf dazu beitragen, eine Verringerung der Bauteilmasse zu erzielen.

Untersuchungen an geschmiedeten Kurbelwellen zeigen, dass in der Schmelze entstandene Mittenseigerungen einen nachweislichen Einfluss auf die Bauteileigenschaften bei schwingender Beanspruchung haben. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn diese Mittenseigerungen durch das Verschmieden an die Oberfläche des Schmiedeteils treten [Kne94]. Bedingt durch die Auswirkungen von Seigerungen und Faserverlauf auf die Bauteilfestigkeit wird bei der Herstellung geschmiedeter Bauteile angestrebt, das Auftreten von Seigerungen durch die Verwendung modifizierter Stahllegierungen zu vermeiden. Bei der Auslegung der Stadienfolge für Kurbelwellen wird ferner versucht, die Mittenseigerungszone den Sprüngen der Längsachse des Bauteils folgen zu lassen. Dies gelingt allerdings nicht vollständig.

Durch das Abgraten oder den nachgelagerten Zerspanprozess kommt es stellenweise zur „Freilegung“ der Seigerungszone, d. h. Seigerungszone des Vormaterials treten an die Bauteiloberfläche. Dieser Effekt tritt bei konventionell geschmiedeten Kurbelwellen an der Gratnaht und spanend bearbeiteten Flächen auf, wodurch die mechanischen Bauteileigenschaften negativ beeinflusst werden. Beim gratlosen Gesenkschmieden kann die Mittenseigerungszone durch geeignete Vorformoperationen so umgelenkt werden, dass sie über das gesamte Schmiedeteil annähernd in

der Mitte des Querschnitts verbleibt. Die Freilegung der Seigerungszone kann zudem durch den Wegfall des Abgratprozesses nahezu ausgeschlossen werden [SM04].

2.4 Präzisionsschmieden - Formpressen von Stahl ohne Grat

Das Verfahren des Präzisionsschmiedens ist analog zum Genauschmieden eine Sondervariante des Formpressens ohne Grat. Durch Präzisionsschmieden können Schmiedeteile mit einer hohen Genauigkeit und Endkonturnähe gefertigt werden, die sonst nur durch spanende Bearbeitungsgänge erreicht werden. In Kombination mit einer Kaltprägeoperation können so ISO-Toleranzklassen zwischen IT 8 bis IT 11 erzeugt werden, wohingegen das konventionelle Gesensschmieden ISO-Toleranzklassen von IT 14 bis IT 16 erzielt (vgl. Tabelle 2.1) [NN95, MB99].

Umformverfahren	ISO-Toleranz (IT) entsprechend DIN ISO 286 Teil 1											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Gesensschmieden										■	■	■
Genauschmieden				■	■	■	■					
Präzisionsschmieden	■	■	■	■	■	■						
Kaltfließpressen	■	■	■	■	■	■						
Halbwarmfließpressen				■	■	■	■					
Warmfließpressen					■	■	■	■	■	■	■	■
Maßprägen		■	■	■	■	■	■					

Durch Sondermaßnahmen und in Ausnahmefällen erreichbar
 Mit herkömmlichen Fertigungseinrichtungen erreichbar

Tabelle 2.1: Erzielbare Genauigkeiten bei unterschiedlichen Massivumformverfahren [NN95]

Das Präzisionsschmieden stellt hohe Anforderungen sowohl an die Werkzeug- und Maschinentechologie als auch an die Auslegung der Stadienfolge. Folgende Bedingungen müssen beim Präzisionsschmieden erfüllt werden [DB07, WW97, Beh97]:

- sorgfältige Werkzeugauslegung und Fertigung; die Fertigungsgenauigkeit soll mindestens die ISO-Toleranzklasse IT 8 erfüllen,

- hohe Geometrie- und Volumengenauigkeit des Rohteils ($\Delta V = \pm 0,5$ Prozent),
- genaue Temperaturführung des Werkzeugs,
- genaue Rohtelerwärmung ($\Delta T = \pm 5$ K),
- Vermeiden von Zunderbildung durch Schnellerwärmung der Rohteile bzw. Erwärmen unter Schutzgas,
- präzise Werkzeug- und Stößelführung,
- hohe Prozessstabilität,
- Einsatz der Prozesssimulation,
- genaue Bauteilpositionierung im Werkzeug sowie
- verfahrensangepasste Auslegung der Stadienfolge.

Werden diese Anforderungen berücksichtigt, können durch das Präzisionsschmieden im Vergleich zum konventionellen Schmieden folgende Vorteile erzielt werden [DBB96]:

- Wegfall des Arbeitsschritts Entgraten,
- Reduzierung des Einsatzgewichtes,
- engere Toleranzen sowie,
- geringere Oberflächenrauigkeiten.

Im Vergleich zu Prozessketten beim konventionellen Schmieden (vgl. Abschnitt 2.3) bestehen bei Präzisionsschmiedeprozessketten die wesentlichen Unterschiede in der Verkürzung der Prozesskette durch den Wegfall des Abgratprozesses und in der Anwendung unterschiedlicher Vor- und Fertigformtechnologien. Nach dem Präzisionsschmieden von komplexen Funktionselementen und einem eventuellen Reinigungsprozess erfolgt oftmals eine Kaltkalibrierung, um die geforderte Form- und Maßgenauigkeit zu erzielen. Das Kaltkalibrieren dient weiterhin dazu, Oberflächenverbesserungen zu erzielen und die aus der Wärmebehandlung entstandenen Härteverzüge zu korrigieren [WW97, BDS06]. Eine weitere Formgebung erfolgt dabei nicht mehr.

Wirtschaftliche Einsparpotenziale ergeben sich vor allem durch effiziente Materialausnutzung und einen verringerten Zerspanaufwand. Bei der Herstellung rotations-symmetrischer Bauteile (zum Beispiel Zahnräder, Kegelhäder) können durch das Präzisionsschmieden die Durchlaufzeiten um bis zu 40 Prozent reduziert werden; eine signifikante Reduzierung der Herstellkosten ist somit realisierbar. In einer von der Industrie und dem IFUM - Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Leibniz Universität Hannover - durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde für präzisionsgeschmiedete, schräg verzahnte Zahnräder gegenüber spanend hergestellten Zahnrädern ein Einsparpotenzial von bis zu 25 Prozent der Herstellkosten nachgewiesen. Für komplexe Langteile wie Kurbelwellen wird ein Einsparpotenzial von bis zu 20 Prozent veranschlagt [De99].

Der Faserverlauf gratlos geschmiedeter Bauteile wird analog zu konventionell geschmiedeten Bauteilen durch eine definierte Rohteilausrichtung im Gesenk mit dem Hauptkraftfluss unter Belastung in Übereinstimmung gebracht. Im Gegensatz zu gratlos geschmiedeten Bauteilen verlaufen allerdings bei konventionell geschmiedeten Werkstücken diese Fasern nicht nur durch das Werkstück, sondern auch durch den Grat und werden beim anschließenden Abgratprozess durchtrennt. Die festigkeitsfördernden Auswirkungen eines nicht unterbrochenen Faserverlaufes sind aus vergleichenden Untersuchungen von gespannten und konventionell geschmiedeten Zahnrädern bekannt [TS07]. Bei präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern kann die Zahnfußfestigkeit um bis zu 15 Prozent höher sein als bei ausschließlich gespannten Zahnrädern [Ste99].

Insbesondere beim Präzisionsschmieden von Langteilen kommt der Massenverteilung durch Vorformschritte eine besondere Bedeutung zu, da die zumeist ausgeprägten Querschnittsunterschiede entlang der Bauteillängsachse reproduzierbare, massegenaue Geometrien mit engen Volumentoleranzen erfordern [RML04, LM77]. Generell kommen zur Vorformung Walz- und Stauchprozesse infrage, die jedoch neben der Schmiedeanlage die Nutzung einer Walzmaschine erfordern; aufgrund des hohen Rüstaufwands und der starren Verkettung reduziert sich die Flexibilität der Prozesskette [Hus03]. Der Entwurf der Vorformen geschieht durch die Erstellung von Massenverteilungsschaubildern. Darauf basierend werden anschließend FEM-Simulationen zur detaillierten Analyse der einzelnen Umformprozesse durchgeführt. Ziel der Massenverteilungsanalyse ist es, die Vorformen so zu gestalten, dass geringe Fließwege in der Fertigformung und damit ein möglichst gleichmäßiger Werkzeugverschleiß erzielt wird. Dadurch kann eine optimale Gravurfüllung bei geringen Umformkräften und Gesenkbelastungen der Präzisionsschmiedestufe gewährleistet werden [BRS04].

Analog zum konventionellen Schmieden wird das Formfüllungsverhalten beim gratlosen Gesensschmieden durch verschiedene Prozessparameter beeinflusst. Die Fließspannung k_f des Werkstoffs ist abhängig vom Umformgrad φ , von der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$, dem Werkstoff und der Schmiedetemperatur T_S . Insgesamt zielt die Formgebung in mehreren Stufen darauf ab, eine hohe Werkzeugstandzeit, gute Oberflächengüten und enge Toleranzen zu erreichen sowie Schmiedefehler zu vermeiden.

2.4.1 Bauteilspektrum

Aktuell wird die Präzisionsschmiedetechnologie im industriellen Umfeld ausschließlich für rotationssymmetrische Bauteile eingesetzt. Sowohl vergleichsweise einfache Kegelräder als auch Zahnräder mit Hinterschneidungen und Monoblockgangräder mit hinterstellter Kupplungsverzahnung werden mit diesem Verfahren bereits in großen Stückzahlen hergestellt [LBG05, GZ99]. Die Übertragbarkeit der Technologie auf Langteile wurde anhand von Beispielgeometrien (Pleuel, Handwerkzeuge und elementare Kurbelwellengeometrien) untersucht (vgl. Bild 2.4) [DBB96, DB00].

BROß hat die Anwendbarkeit eines zweistufigen Werkzeugsystems für das Präzisionsschmieden eines Pleuels mit den Qualität steigernden Werkstückmerkmalen nachgewiesen. Mit diesem Verfahren und Werkzeugsystem wurden die Grundlagen für eine ökonomische Serienschmiedung eines Pleuels mit konstanter Masse und Massenverteilung unter ökologischen Gesichtspunkten gelegt [Bro99].

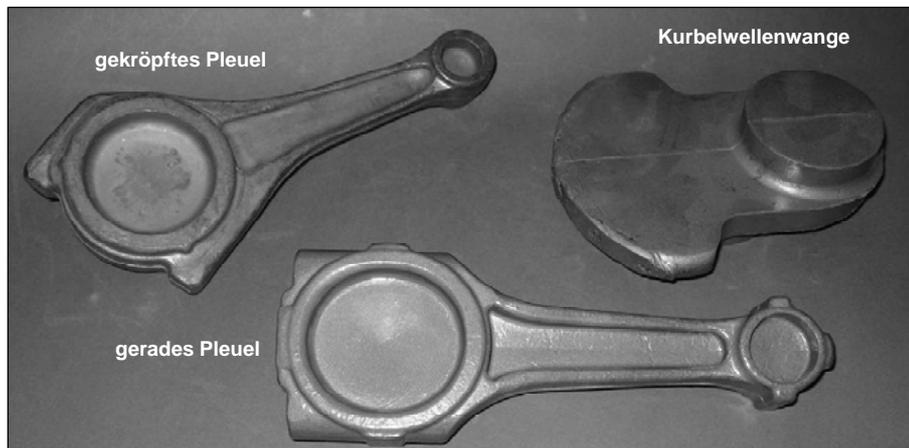


Bild 2.4: Gratlose geschmiedete Langteile [IPH]

ALTMANN hat unter Verwendung eines Optimierungsalgorithmus mithilfe von FEM-Analysen die beim gratlosen Gesensschmieden von Kurbelwellen wichtigen Vorformverfahren grundlegend untersucht. Die entwickelte Methode der Werkzeuggeometrieoptimierung kann dazu genutzt werden, die Belastungen der Schmiedewerkzeuge zu reduzieren. Insbesondere durch die Verringerung der Druckberührzeit in hoch belasteten Gesenkbereichen und durch die Reduzierung der Fließwege im geschlossenen Gesenk konnte der Verschleiß der Fertigformstufe aufgrund der Optimierung der Vorformgeometrie verringert werden. Als Demonstrator diente ein Kurbelwangelement mit jeweils einem halben Pleuel- und Hauptlager (vgl. Bild 2.5) [Alt06].

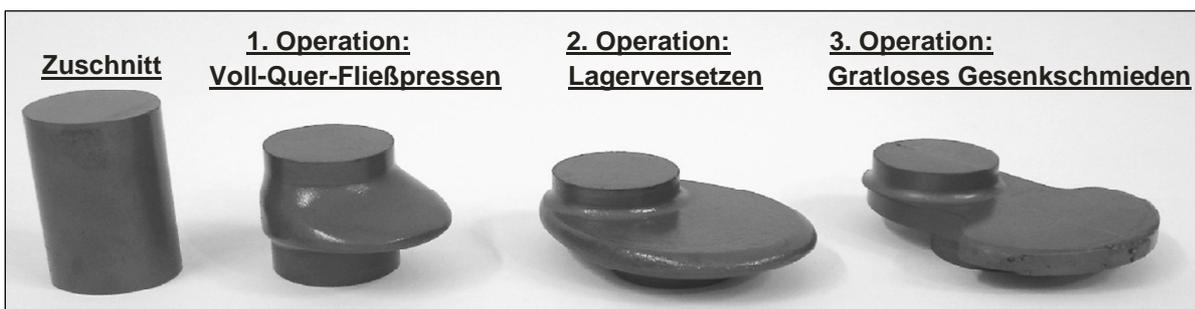


Bild 2.5: Gratlos geschmiedete Stadienfolge der Elementarzelle einer PKW-Kurbelwelle

2.4.2 Werkzeug- und Maschinentechologie

Der wesentliche Unterschied zwischen den Verfahren des Präzisionsschmiedens und konventionellen Schmiedens mit Grat besteht in der Anwendung deutlich unter-

schiedlicher Werkzeugsysteme [BDS06, BRS05]. Sowohl die eingesetzten Werkzeuge zur Vorformung als auch zur Fertigformung heben sich hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Kinematik von denen des konventionellen Gesensschmiedens ab. Wesentliche Unterschiede sind:

- der Einsatz von Schließmechanismen zum Aufbringen der Schließkraft,
- der steigende Komplexitätsgrad durch eine erhöhte Anzahl von Werkzeugteilen,
- Relativbewegungen zwischen Werkzeugkomponenten,
- der teilweise Einsatz mehrdirektionaler Vorformwerkzeuge (für Langteile) und
- die Möglichkeit zur Erzeugung von Hinterschneidungen.

Grundsätzlich kann zwischen Werkzeugen zum Präzisionsschmieden von rotations-symmetrischen Bauteilen und von Langteilen unterschieden werden. Für rotations-symmetrische Bauteile stehen zwei verschiedene Werkzeugsysteme mit unterschiedlichen Schließmechanismen zur Fertigformung zur Verfügung (Bild 2.6):

- Präzisionsschmieden ohne vorheriges Schließen der Werkzeuge und
- Präzisionsschmieden mit vorherigem Schließen der Werkzeuge.

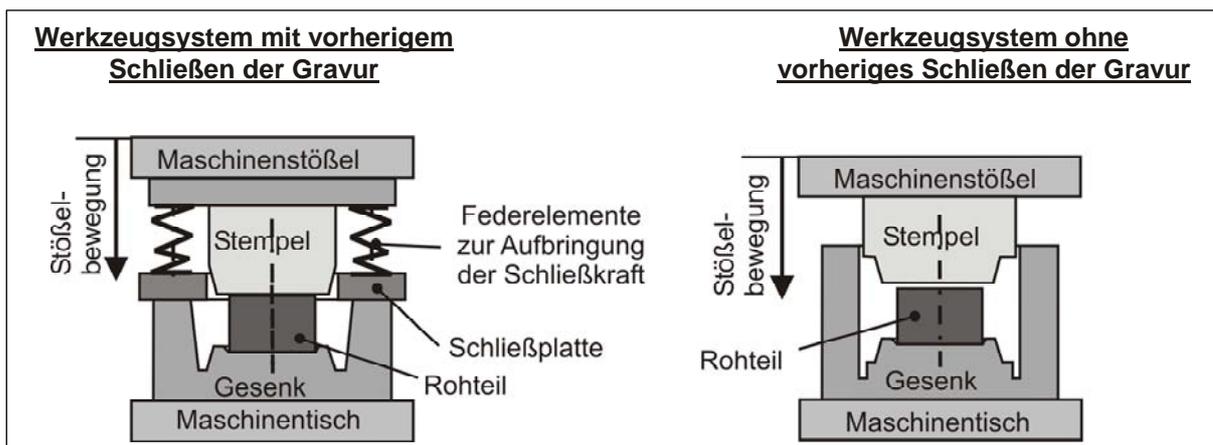


Bild 2.6: Werkzeugsysteme zum Präzisionsschmieden mit unterschiedlichen Schließmechanismen

Die Verriegelung der Gesenkhälften während der Umformung kann auf zwei Arten realisiert werden:

Die werkzeugseitige Methode durch den Einsatz von Energiespeichersystemen wie Teller- oder Gasdruckfedern (vgl. Bild 2.6) hat den Vorteil, dass einfach wirkende Pressen ohne Umbaumaßnahmen für das Präzisionsschmieden eingesetzt werden können [Pol98].

Das maschinenseitige Verschließen der Gesenkhälften kann prinzipiell sowohl durch Energiespeichersysteme als auch durch mechanische oder hydraulische Verschließmechanismen erfolgen. Am Markt befindliche Präzisionsschmiedepressen nutzen einen Energiespeicher in Form von Gasdruckfedern zur Verriegelung der Werkzeuge. Die Gasdruckfedern sind im Stößelaufbau integriert und erlauben das

Aufbringen von Schließkräften. Weiterhin verfügen diese Pressen zum Teil über modifizierte Antriebe, um eine Senkung der Druckberührzeit und damit einhergehend eine Senkung des Werkzeugverschleißes zu erzielen [DB99b, Wit04]. Maschinenseitige Lösungen sind weniger flexibel und erfordern eine anfänglich hohe Investition in den Umbau bzw. Neukauf eines für das Präzisionsschmieden geeigneten Pressenaggregats.

Bild 2.7 stellt die Stößelkinematik einer konventionellen Kurbelpresse und die einer Präzisionsschmiedepresse im Vergleich dar. Durch den Einsatz eines speziellen Antriebssystems wird die Stößelkinematik der Präzisionsschmiedepresse so modifiziert, dass der Stößel im oberen Totpunkt (OT) eine geringere Geschwindigkeit als im unteren Totpunkt (UT) aufweist. Durch die Reduzierung der Druckberührzeit verringert sich der Wärmeeintrag in das Schmiedewerkzeug und führt zu einer Reduzierung der thermischen Werkzeugbelastung.

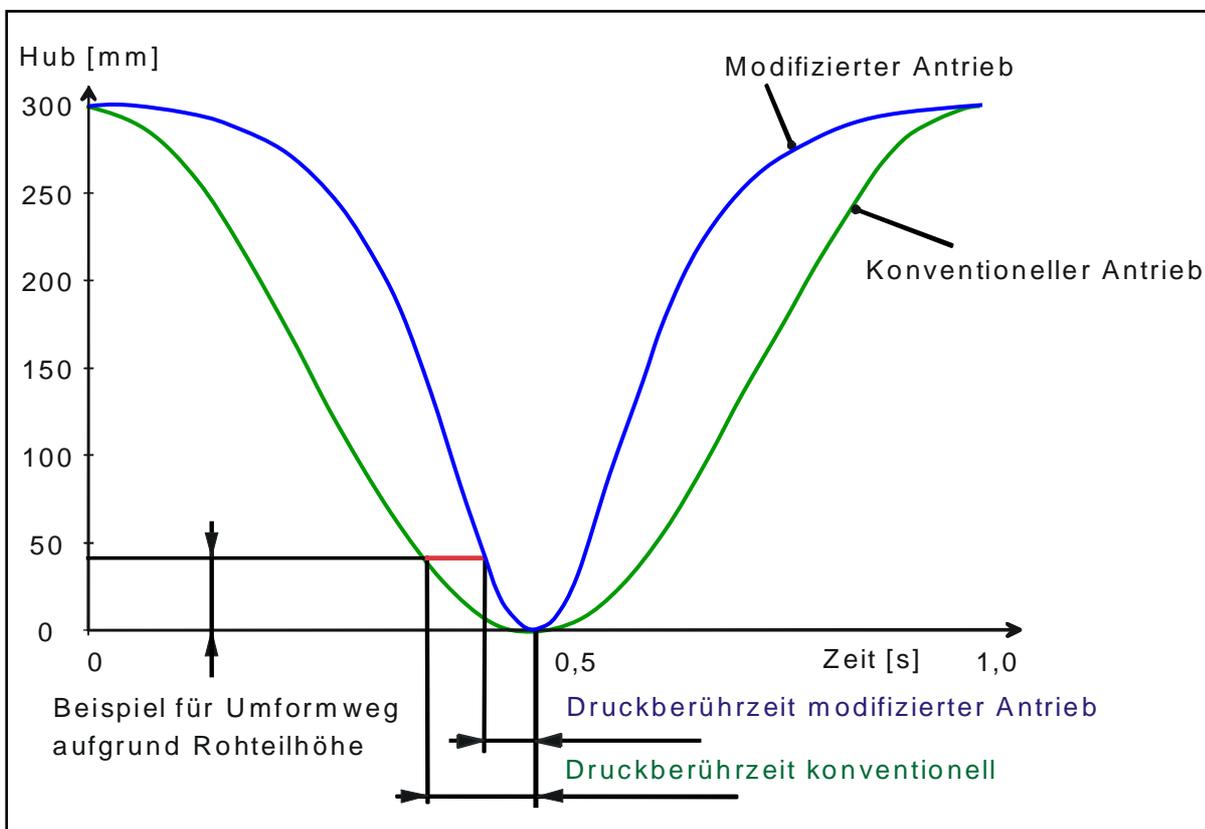


Bild 2.7: Senkung der Druckberührzeit beim Präzisionsschmieden durch Einsatz eines modifizierten Antriebs [nach BDS06]

Bei Präzisionsschmiedewerkzeugen wirken sich Masseschwankungen direkt auf die Formfüllung und damit auf die Bauteilqualität aus. Nur geringe Volumenschwankungen von $\pm 0,5$ Prozent sind für die Rohteile zulässig [DTW92]. Während ein zu geringes Rohteilvolumen zu unvollständiger Formfüllung und damit zu Ausschussproduktion führt, tragen zu große Rohteilmassen zu einem stark ansteigenden Gesenkinenddruck bei, der die Gesenke zerstören kann. Zur Vermeidung von Werkzeugbruch

durch Masseüberschuss sind geometriebasierte und werkzeugseitige Methoden entwickelt worden:

Beim Einsatz Geometrie basierter Lösungen werden Ausgleichsräume für überschüssiges Material geschaffen. Diese müssen sich in Bauteilbereichen befinden, die entweder anschließend spanend bearbeitet werden oder ohne Funktion bleiben.

Werkzeugseitige Lösungen basieren auf dem Einsatz eines hydraulischen Freischaltzylinders. Hierbei wird der Kraftfluss vom Stößel über das Werkzeugsystem auf das Oberwerkzeug über eine hydraulische Überlastsicherung geführt. Übersteigt der Druck im Hydrauliksystem einen eingestellten Wert, öffnet sich ein Überdruckventil, und der Kraftfluss wird unterbrochen (vgl. Bild 2.8).

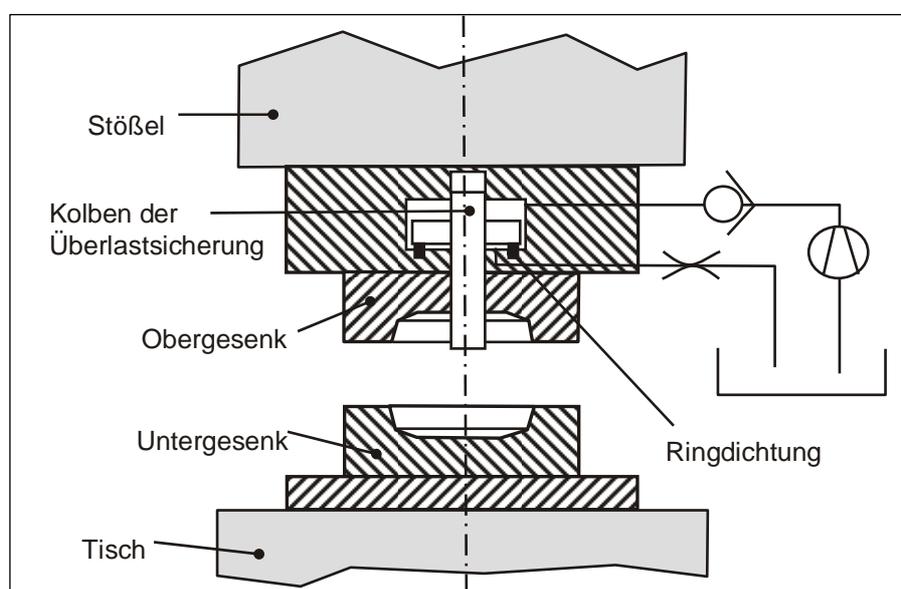


Bild 2.8: Hydraulische Überlastsicherung nach dem System der Firma Hydro-tool [BHH04]

Neben dem Einsatz von Freischaltvorrichtungen unterscheiden sich Werkzeuge zum Präzisionsschmieden in ihrem Aufbau in einigen weiteren Punkten von konventionellen Schmiedewerkzeugen. Bild 2.9 zeigt den schematischen Aufbau eines Werkzeugsystems mit schwimmender Matrize zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern [BDR04]. Das Werkzeug ist modular aufgebaut und besteht aus Ober- und Unterstempel, Gesenk und Federelementen. Zur Umformung wird ein Rohrabchnitt in das Gesenk eingelegt und liegt auf dem Unterstempel auf. Durch die Abwärtsbewegung des Stößels setzt der Oberstempel auf der schwimmenden Matrize auf und schließt die Werkzeuggravur. Die Federelemente halten die Gravur bei der weiteren Abwärtsbewegung des Stößels geschlossen. Durch die Stößelbewegung wird das Schmiedgut in die Gravur gepresst, das Material beginnt zu fließen und füllt den Hohlraum aus. Nach der Umformung fährt der Stößel nach oben, und die schwimmende Matrize bewegt sich durch die Federkraft in ihre Ausgangslage zurück. Schließlich wird das Zahnrad ausgeworfen.

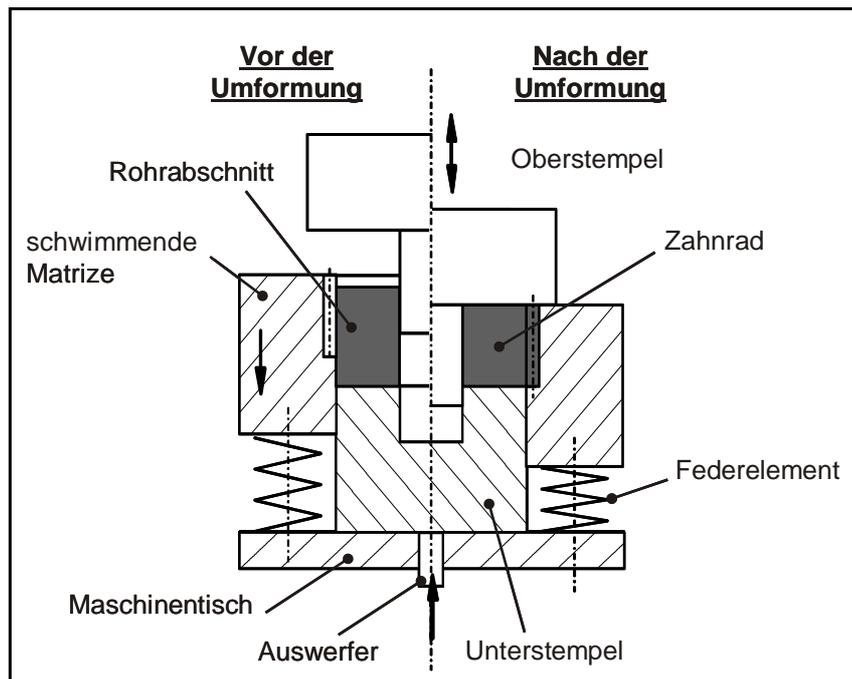


Bild 2.9: Werkzeugsystem mit schwimmender Matrize zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern nach [BDR04]

Die Auslegung der Teilungsfuge ist für die Gestaltung von Gesenken ohne Gratspalt wesentlich, um einerseits die Funktion des Werkzeugs trotz wechselnder Temperaturzustände sicherstellen zu können. Andererseits ist die Gestaltung der Gratspalte wichtig, um in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie das Fließverhalten des Materials zu begünstigen. Grundsätzlich können Führungs- und Schließspalte voneinander getrennt oder nicht getrennt ausgeführt werden (vgl. Bild 2.10). Weiterhin kann bei der Gestaltung der Teilungsfuge nach der Lage der Fuge unterschieden werden. Sie kann sich oberhalb oder unterhalb des größten Schmiedeteilquerschnitts befinden [Bro99].

Bei der Übertragung des Prinzips des gratlosen Gesenkschmiedens auf Langteile steigen im Vergleich zu rotationssymmetrischen Bauteilen die Prozessanforderungen hinsichtlich bestimmter Aspekte. Dazu zählen:

- die Gewährleistung einer exakten Einlegeposition,
- die Erzeugung einer reproduzierbaren Vorform sowie
- eine genaue Massenverteilung in den Vorformoperationen [BDR04, HK03].

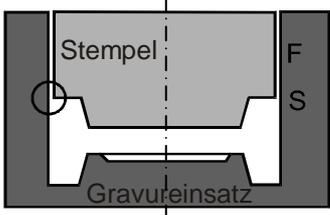
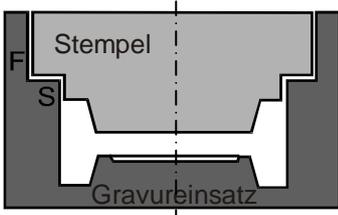
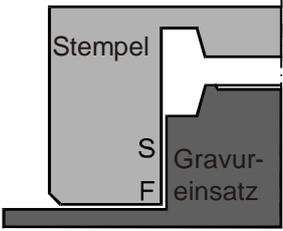
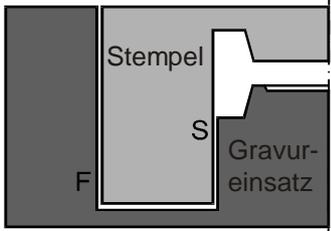
Teilfuge oberhalb des größten Schmiedestückquerschnitts		
Teilfuge unterhalb des größten Schmiedestückquerschnitts		
F= Führungsspalt S= Schließspalt	Führungs- und Schließspalt nicht voneinander getrennt	Führungs- und Schließspalt voneinander getrennt

Bild 2.10: Grundsätzlicher Aufbau von Schmiedegesenken ohne Gratspalt [Lan77]

Bild 2.11 stellt die Umsetzung des Prinzips des gratlosen Gesenkschmiedens von Langteilen am Beispiel eines Werkzeugs zur Herstellung eines Pleuels dar. Das Werkzeugprinzip besteht aus Ober- und Unterwerkzeug mit insgesamt drei Hauptbaugruppen: Obere und unterer Aufbau zur Realisierung der Relativbewegung zwischen Grund- und Druckplatten, Obergesenk mit einem oder mehreren Oberstempeln und Untergesenk mit wiederum einem oder mehreren Unterstempeln.

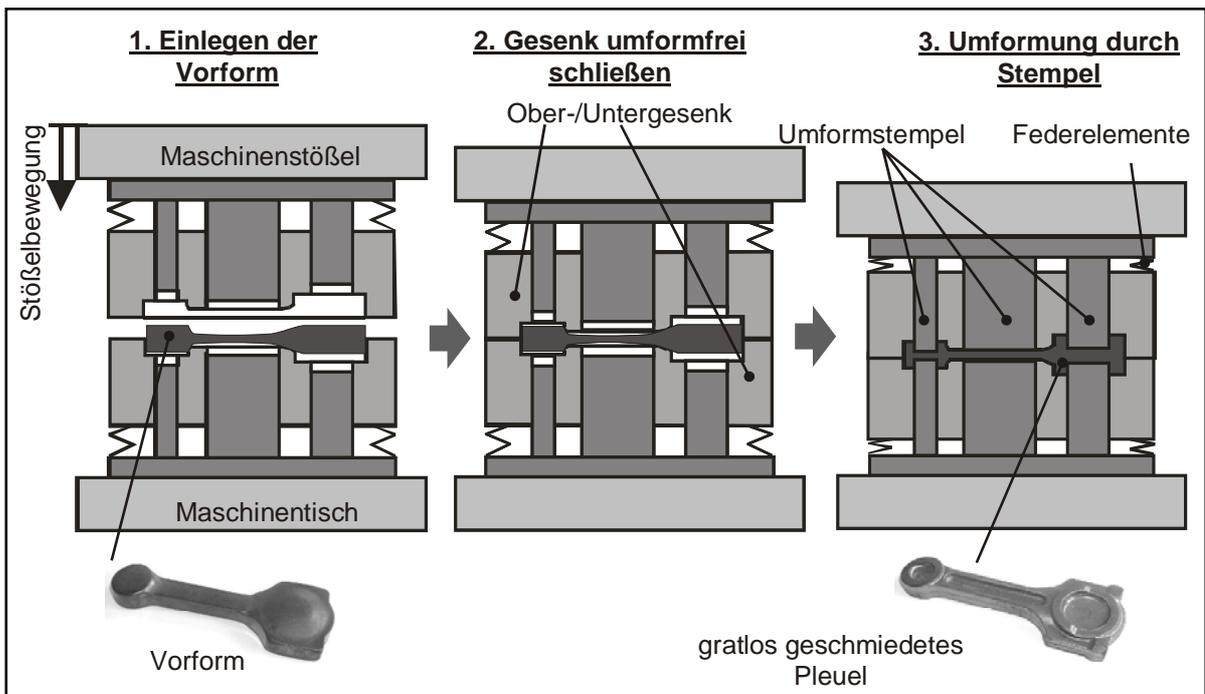


Bild 2.11: Beispiel für das gratlose Gesenkschmieden von Langteilen: Pleuel

Durch die gegenläufige Bewegung der formgebenden Stempel in vertikaler Richtung wird das in der Höhe überschüssige Material in die beiden horizontalen Raumrichtungen gepresst. Die gegenläufigen Stempelbewegungen können aufgrund des Werkzeugaufbaus mit unterschiedlicher Umformgeschwindigkeit erfolgen. Diese stellen sich nach dem Prinzip des gleichmäßigen Umformwiderstandes selbstregelnd ein. Die Federn zwischen den oberen und unteren Grund- und Druckplatten halten die schwimmend gelagerten Matrizen während des Umformvorgangs gegen den steigenden Gesenkinnendruck gegeneinander verschlossen. Das Auswerfen des im Gesenk verbleibenden Bauteils geschieht nach der Umformung durch die Stempel.

2.5 Schmiedeprozesse mit mehrfach wirkenden Umformstempeln

Um einen Ressourcen schonenden Schmiedeprozess zu realisieren, werden in der Praxis häufig Walz- oder Stauchoperationen zur Massenverteilung eingesetzt. Die erreichbaren Querschnittsreduktionen bzw. Masseanhäufungen in der Mitte oder an den Enden der Bauteile sind in vielen Fällen ausreichend für eine Fertigformung mit geringem Gratanteil. Sie führen jedoch bei flachen Langteilen (Pleuel, Turbinenschaufel) teilweise zu einem erhöhten Gratanteil in bestimmten Bereichen der Geometrie. Mit mehrdirektionalen Schmiedeprozessen mit zwei oder mehr aktiven Stempel-Bewegungsrichtungen kann das zu erzielende Formspektrum von geschmiedeten Vorform- und Fertigteilen erweitert werden [Pah95]. Systeme dieser Art sind in Schmiedebetrieben zumeist nur als Einzelanlagen vorhanden.

Grundsätzlich können im Gesenkschmiedebereich Systeme unterschieden werden, die die zusätzlichen Antriebe maschinenseitig oder werkzeugseitig bereitstellen (vgl. Bild 2.12). Im industriellen Umfeld kommen im Wesentlichen maschinenseitige Lösungen zum Einsatz. Diese führen in vertikaler Richtung eine Werkzeugklemmbewegung aus, die die horizontal geteilten Werkzeuge öffnet und schließt. Waagrechtstauchmaschinen werden für die umformtechnische Konturierung von Stangenmaterial eingesetzt. Außerdem ist die Herstellung von Hinterschneidungen und Höhlungen sowie vergleichsweise geringe Schrägen möglich. Dadurch entstehen bei bestimmten Schmiedestücken geringere Bearbeitungskosten, allerdings sind die Maschinen- und Werkzeugkosten höher als beim Schmieden mit Hämmern und Pressen [LM77].

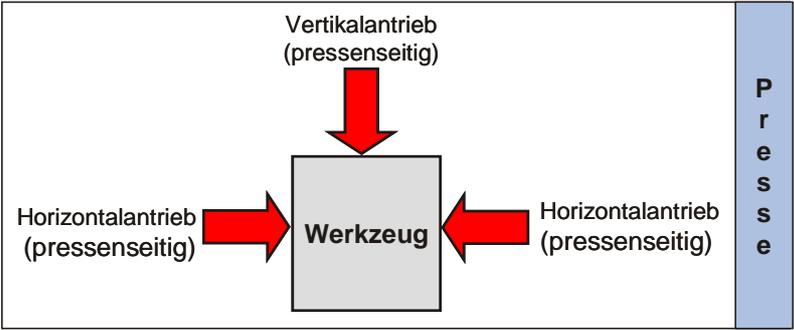
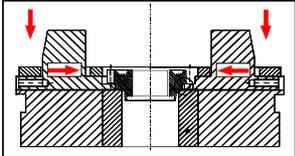
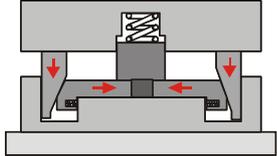
mehrdirektionale Schmiedeprozesse		
Prozess	Formen von Hinterschneidungen, Hohlpressen	Vorformen
Zusatzantrieb	Multi-RAM-Pressen	Waagrecht-Stauchmaschinen
Maschinenseitig		
Werkzeugseitig	 <p>Werkzeugsysteme zur Hinterschneiderzeugung</p>	 <p>Mehrdirektional wirkende Vorformwerkzeuge für Langteile</p>

Bild 2.12: Systematisierung bekannter mehrdirektionaler Schmiedeprozesse und Antriebslösungen

Für die Herstellung von geschmiedeten Armaturen und Verschraubungen aus Kupfer und Messing kommen schon seit Längerem zusätzliche Horizontalantriebe in Multi-Ram-Pressen zum Einsatz, bei denen nach Abschluss der vertikalen Umformung aus mehreren horizontalen Richtungen Dorne in die noch geschlossene Gravur einfahren und Material aus den späteren Bohrungen bis zur vollständigen Gravurfüllung verdrängen. Durch das Hohlpressen werden der Materialeinsatz und die spanende Nachbearbeitung erheblich reduziert.

Werkzeugseitige Lösungen werden für das Schmieden kleinerer Bauteile und geringer Stückzahlen eingesetzt, da diese Lösungen kostengünstiger und flexibler als maschinenseitige Lösungen sind. Sie sind einsetzbar, solange die erforderlichen Umformkräfte und -wege in horizontaler Richtung gering sind.

Können bestimmte Vorformgeometrien, beispielsweise Zweigelenke und Monoblockgangräder mit hinterstellter Kupplungsverzahnung, aus technologischen Gründen nicht mit konventionellen Vorformverfahren hergestellt werden, werden die Werkzeuge aus Segmenten mit mehreren Bewegungsrichtungen aufgebaut [LBG05]. Um die erforderlichen mehrdimensionalen Umformbewegungen zu erzeugen, sind verschiedene Methoden wie zum Beispiel Kniehebellösungen, hydraulische Antriebe oder Keilgetriebe bekannt. Die Methode der Kraftumlenkung mittels Keilschiebern ist dabei

besonders verbreitet. Aufbauend auf der VDI-Richtlinie 3386 [vgl. VDI90] wurden für rotationssymmetrische Bauteile wie auch für Langteile mehrdirektionale Schmiedewerkzeuge entwickelt, bei denen die horizontale Umformbewegung aus der vertikalen Stößelbewegung abgeleitet wird [BRS05].

Bei der Entwicklung solcher Keilschieberwerkzeuge sind folgende Randbedingungen zu beachten [Alt06]:

- Die Gegenkraft der Antriebskeile muss kraftneutral im Werkzeug abgefangen werden, da der Stößel Querkräfte nur im begrenzten Umfang aufbringen kann.
- Die Selbsthemmung der Keile muss vermieden werden.
- Die Keile müssen nach der Arbeitsbewegung wieder in Ausgangsposition zurück fahren, um Kollisionen zu vermeiden.

Für rotationssymmetrische Bauteile wurden Verfahren entwickelt, mit denen schräg verzahnte PKW-Gangräder in einem zweistufigen Umformprozess präzisionsgeschmiedet werden können [Dre02]. Der Hinterschnitt wird dabei durch ein modular aufgebautes Werkzeug mit keilgetriebenen Schieberelementen eingebracht [DD01]. Weiterhin wurden Werkzeugkonzepte zum mehrdirektionalen Vorformen von Langteilen mittels Keilschieberwerkzeugen entwickelt [RML04, SFK00, Alt06]. Bild 2.13 zeigt ein Werkzeugkonzept zum mehrdirektionalen Vorformen eines Langteils.

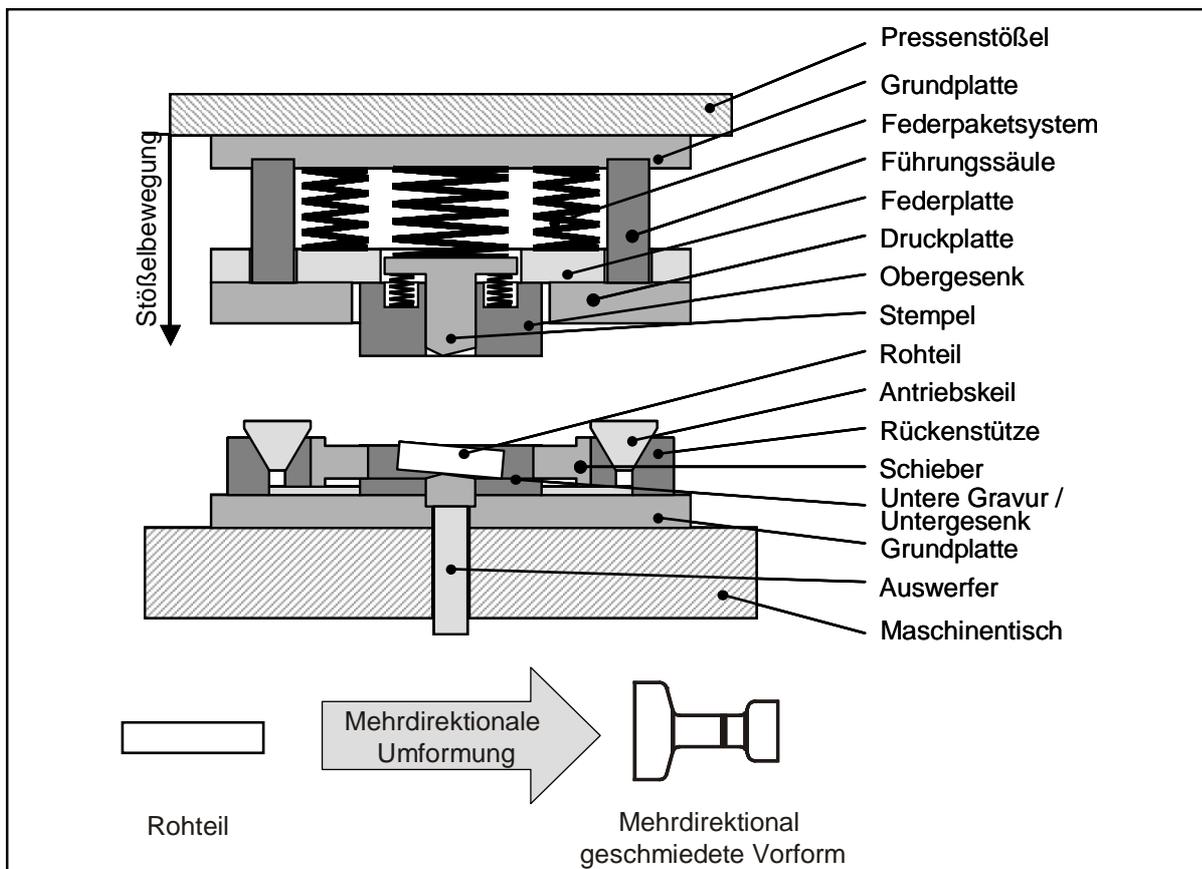


Bild 2.13: Prinzipskizze eines mehrdirektionalen Schmiedewerkzeugs zur Herstellung eines Langteils

2.6 Verkürzung von Prozessketten durch gratloses Gesensschmieden

Aufgrund der reduzierten Bearbeitungsaufmaße an den Funktionsflächen besteht beim Präzisionsschmieden je nach Bauteilgeometrie die Möglichkeit, eine Verkürzung der Schmiedeprozesskette zu erreichen.

Bei einfacher bis mittlerer geometrischer Bauteilkomplexität kann die Endgeometrie von Präzisionsschmiedeteilen ohne einen spanenden Fertigungsschritt durch eine Hartfeinbearbeitung hergestellt werden. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit, die Wärmebehandlung nach dem Schmieden ohne eine Zwischenerwärmung direkt aus der Schmiedewärme als integrierte Wärmebehandlung durchzuführen [BKR05, DB99a]. Durch die Integrierte Wärmebehandlung entfallen Schritte wie beispielsweise Zwischenlagerungen oder eine Wiedererwärmung zur anschließenden Wärmebehandlung.

Bild 2.14 stellt die Gegenüberstellung einer konventionellen und einer durch Präzisionsschmieden verkürzten Schmiedeprozesskette dar. Durch den Wegfall der Prozessschritte Entgraten und Spanen kann ökonomisches Potenzial für die Herstellung von Schmiedeteilen entstehen. Neben den genannten Einsparmöglichkeiten ergeben sich weitere wirtschaftliche Vorteile des Präzisionsschmiedens durch den Wegfall der Erwärmung und des Recyclings des Gratanteils.

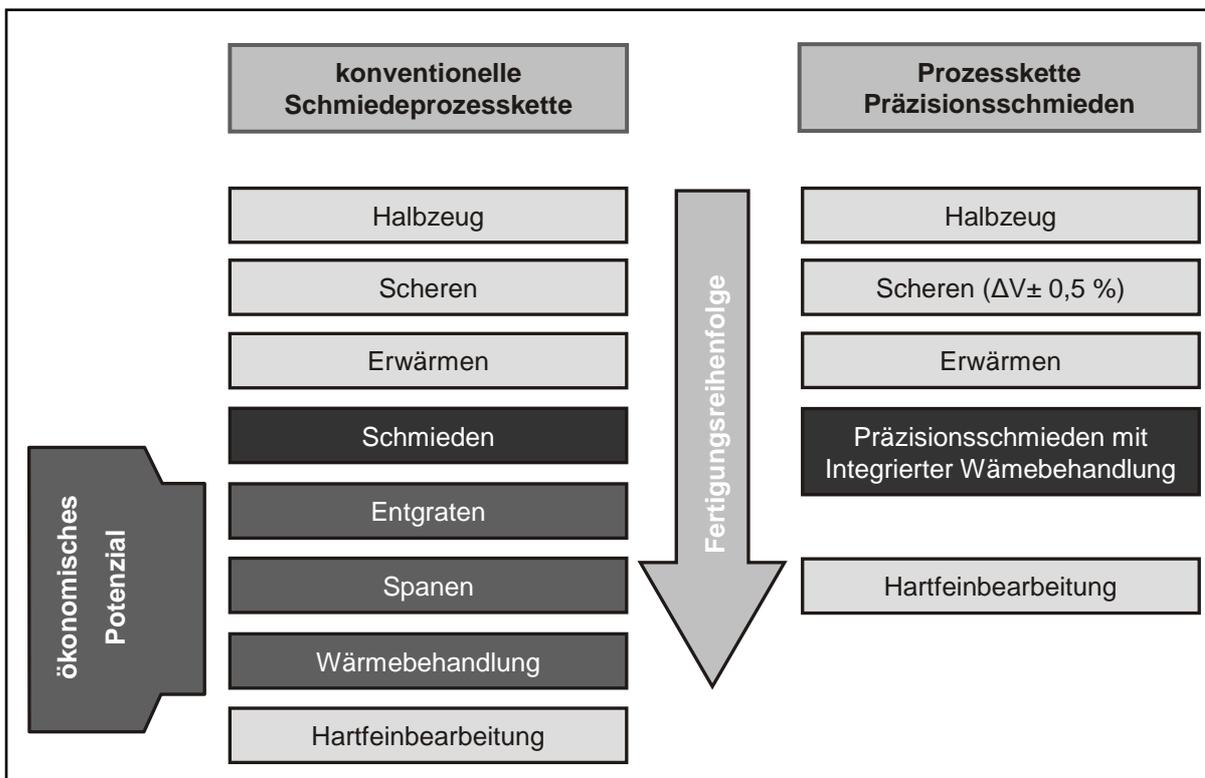


Bild 2.14: Vergleich einer konventionellen Prozesskette mit einer Präzisionsschmiedeprozesskette

3 Problemstellung und Zielsetzung

Prozessketten zum Präzisionsschmieden weisen gegenüber konventionellen Schmiedeprozessketten Vorteile seitens der schonenden Nutzung von Ressourcen auf, sie stehen für die industrielle Anwendung aktuell jedoch noch nicht für die Bauteilklasse der Kurbelwellen zur Verfügung. Die ungleichmäßige Massenverteilung entlang der Bauteillängsachse, Asymmetrien und die dünnen Rippenkörper von Kurbelwellen schränken den Einsatz dieses Schmiedeverfahrens für die Massenherstellung ein. Kurbelwellen bieten sich daher als Demonstrator zur Erforschung der Verfahrensgrenzen des Präzisionsschmiedens an. Durch ihren modularen Aufbau kann der Komplexitätsgrad der untersuchten Werkzeug- und Stadienfolgen zum Präzisionsschmieden gezielt beeinflusst werden. Ein Modul einer Kurbelwelle besteht aus einer Kurbelwange, einem Gegengewicht sowie aus je einem halben Haupt- und Pleuellager. Theoretisch können durch Aneinanderreihung dieser Module Kurbelwellen für Motoren mit beliebiger Zylinderzahl hergestellt werden.

Das Spektrum präzisionsschmiedbarer Bauteile wird neben der Geometrie des Schmiedeteils durch die jeweilige Werkzeug- und Anlagentechnik festgelegt. In Abhängigkeit vom Bauteil kann die Gestaltung der Vorformgeometrien werkzeugtechnologischen Beschränkungen unterliegen. Bezogen auf Kurbelwellengeometrien resultieren diese Beschränkungen vor allem aus den bisher zur Verfügung stehenden Vorformverfahren, da mit ihnen eine genaue Massenverteilung und Querschnittsvorbildung zum Präzisionsschmieden nur unzureichend hergestellt werden kann. Aktuell besteht daher erheblicher Forschungsbedarf, um das Präzisionsschmieden von Kurbelwellen gegenüber einer konventionellen Herstellung wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen. Dies trifft vor allem auf die Weiterentwicklung geeigneter Vorformverfahren zu.

Das mehrdirektionale Vorformverfahren ist grundsätzlich geeignet, um die geforderte Querschnittsvorbildung für Kurbelwellenvorformen herzustellen [Alt06]. Das untersuchte Verfahren basiert auf der Kombination einer horizontalen und vertikalen Umformung des Schmiedeguts innerhalb einer Umformoperation. Dadurch können Vorformen mit einer spezifischen Massenverteilung und einer der Endkontur angenäherten Querschnittsvorbildung erzeugt werden. Die Übertragung und Verifikation der Methode des mehrdirektionalen Vorformens anhand einer beispielhaften Kurbelwellengeometrie ist bisher nicht erfolgt. Ferner fehlt eine Charakterisierung anhand von werkzeug- und werkstückseitigen Merkmalen, um das Potenzial der Vorformmethode für weitere Langteilgeometrien bewerten zu können.

Ziel der Arbeit ist es daher, im Rahmen einer Prozesskette zum Präzisionsschmieden die Werkzeug- und Stadienfolge zum gratlosen Schmieden beispielhaft für eine Einzylinderkurbelwelle zu entwickeln und in praktischen Versuchen zu verifizieren (Bild 3.1). Die Untersuchungen basieren auf Forschungsergebnissen zum gratlosen Gesenkschmieden eines elementaren Kurbelwellen-Moduls und dienen als Grundlage

für das Präzisionsschmieden komplexerer Geometrien wie beispielsweise Zwei- oder Dreizylinderkurbelwellen.

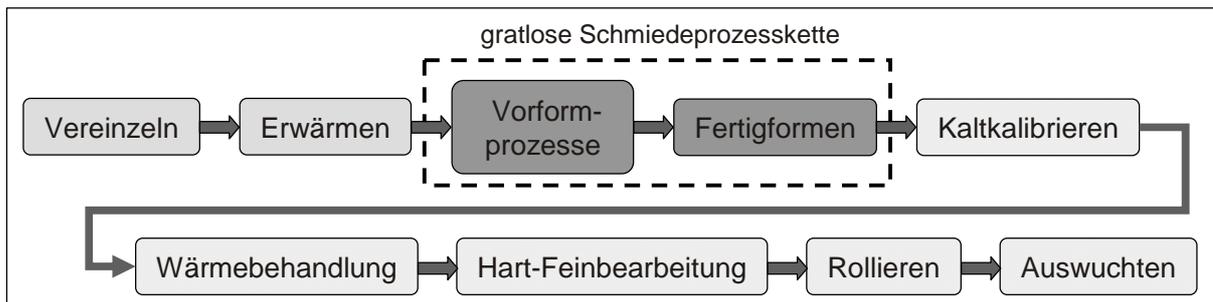


Bild 3.1: Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Kurbelwellen

Die Stadienfolge besteht aus einer Vorformoperation durch Voll-Quer-Fließpressen im geschlossenen Gesenk, einer mehrdirektionalen Vorformoperation und dem Fertigschmieden durch gratloses Gesenkschmieden. Nachgelagerte Operationen der Prozesskette zum Präzisionsschmieden (Kaltkalibrierung, Wärmebehandlung etc.) werden nicht betrachtet. Die Geometrie der untersuchten Einzylinderkurbelwelle besteht aus zwei Haupt- und einem Pleuellager sowie den Gegengewichten und Kurbelwangen. Ausgehend von der Fertigteilegeometrie erfolgt die Entwicklung der Stadienfolge in einem iterativen, rückwärts gerichteten Prozess.

In einem parallelen Entwicklungsprozess wird die Werkzeugtechnologie zur Abformung der Stadienfolge abgeleitet. Dazu werden die drei Schmiedewerkzeuge mithilfe von FEM-Analysen entwickelt und hinsichtlich einer fehlerfreien, gratlosen und endkonturnahen Herstellung der Einzylinderkurbelwelle optimiert. Die Festlegung der Anzahl der Vorformschritte und die Auswahl der Vorformverfahren geschehen unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik.

Bei der Entwicklung der Werkzeugtechnologie bildet das Werkzeug zum mehrdirektionalen Vorformen der 2. Vorform einen Schwerpunkt in den Untersuchungen. Während des mehrdirektionalen Vorformens werden in zeitlich gesteuerter Abfolge das Pleuellager um den Betrag des Kurbelhubs normal zur Hauptlängsachse versetzt sowie die Kurbelwange und Hauptlager entlang der Hauptlängsachse gestaucht. Aufgrund der Komplexität des Werkzeugs wird ein FEM-Prozessmodell aufgebaut, um die Wechselwirkungen der Einflussgrößen bestimmen zu können. Nach der Auslegung der gratlosen Schmiedeprozesskette wird die generelle Machbarkeit des Verfahrens anhand praktischer Versuche verifiziert.

Abschließend wird eine Verfahrenscharakterisierung des mehrdirektionalen Vorformens durchgeführt, um anhand von werkzeug- und werkstückspezifischen Kenngrößen den Nachweis der Anwendbarkeit des entwickelten Vorformverfahrens für andere Kurbelwellengeometrien zu führen.

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist es, das Spektrum präzisionsschmiedbarer Bauteile um Kurbelwellengeometrien zu erweitern und Grundlagen für die Verfahrensauslegung mehrdirektionaler Vorformoperationen zu erarbeiten.

4 Verfahrensentwicklung des gratlosen Gesenkschmiedens von Kurbelwellen

Gegenstand dieses Kapitels sind die Entwicklung einer Stadienfolge zur Herstellung von Einzylinderkurbelwellen durch gratloses Gesenkschmieden und die Ableitung der dazu notwendigen Werkzeugprinzipien. Die Auslegung des mehrstufigen Umformprozesses geschieht mithilfe von Massenverteilungsanalysen und der FEM.

4.1 Randbedingungen für den Entwicklungsprozess

Die Randbedingungen für die Entwicklung der gratlosen Schmiedeprozesskette werden durch die zur Verfügung stehenden Anlagen und die Anforderungen an das fertige Schmiedeteil bestimmt. Um ein breites Einsatzgebiet des Verfahrens in der Industrie zu erschließen, ist es erforderlich, dass die zu entwickelnden Werkzeugsysteme auf einfach wirkenden Pressen einsetzbar sind. Folgende verfahrensbedingte Randbedingungen müssen bei der Auslegung der Stadienfolge und der Analyse der Geometrien berücksichtigt werden:

Randbedingung 1: Es wird vorausgesetzt, dass die Stadienfolge gratfrei geschmiedet wird. Dies ist zwingend notwendig, um fehlerfreie Bauteile herstellen zu können. Gratbehaftete Vorformstufen müssten vor dem gratlosen Gesenkschmieden entgratet werden. Die geforderte Volumenkonstanz wäre dadurch nicht erzielbar, da der Abgratprozess hohen Prozessschwankungen unterliegt.

Randbedingung 2: Für die Auslegung der Stadienfolge werden die Vorformverfahren Recken/Breiten, Fließpressen und Stauchen nach DIN 8582 sowie in diesem Rahmen zu entwickelnde Sonderverfahren berücksichtigt [DIN8582]. Die Reproduzierbarkeit der Vorformgeometrien muss gewährleistet sein.

Randbedingung 3: Die größte Umformung muss in den Vorformoperationen stattfinden. Im Fertigschmiedeprozess erfolgt nur mehr eine geringe Massenverteilung, um die geforderten Toleranzen des Bauteils herstellen zu können (vgl. Abschnitt 2.4).

Randbedingung 4: Die Schmiedeteile müssen exakt und reproduzierbar in die Gravuren eingelegt werden können, um eine unvollständige Formfüllung der Gravur zu vermeiden. Bei der Gestaltung der Geometrien muss daher eine einfache „Positionierung“ der Bauteile in die Schmiedewerkzeuge gewährleistet werden.

Randbedingung 5: Die Hohlform, die in den Umformstufen mit geschlossenem Gesenk ohne bewegliche Werkzeugelemente entsteht (diese Elemente befinden sich in ihrer Passivstellung), muss einen ausreichenden Raum für das erforderliche Gesamtvolumen in der entsprechenden Massenverteilung zur Verfügung stellen. Ziel ist es, ein umformfreies Schließen des Werkzeugs sicherzustellen.

4.1.1 Funktionsdaten und Modellierung der Kurbelwellengeometrie

Die Verfahrensentwicklung und die experimentellen Untersuchungen zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle werden anhand einer vereinfachten Kurbelwellengeometrie durchgeführt, deren Hauptmaße von einer PKW-Dreizylinderkurbelwelle abgeleitet werden (Bild 4.1, links).

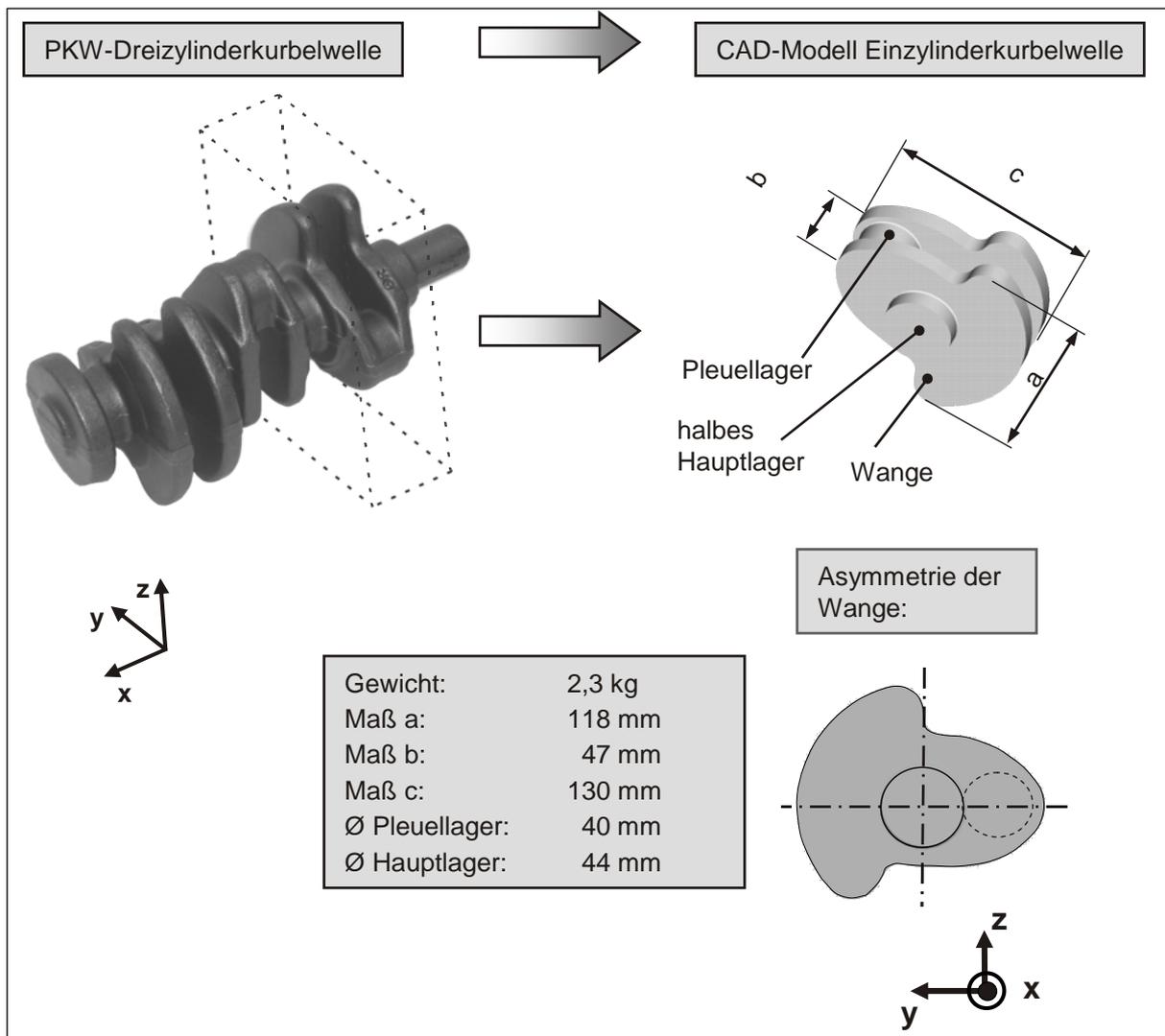


Bild 4.1: Ableitung der Geometrie der Einzylinderkurbelwelle von einer PKW-Dreizylinderkurbelwelle

Die für die Untersuchungen verwendete Kurbelwellengeometrie besteht aus zwei Kurbelwangen, einem Pleuellager und je Kurbelwange einem halben Hauptlager. Das gewählte Bauteil weist in der xy-Ebene eine Symmetrieebene auf. In der yz-Ebene ist keine Symmetrieebene vorhanden, da die Kurbelwangengeometrie in dieser Ebene eine Asymmetrie im Bereich der Gegengewichte aufweist (vgl. Bild 4.1, rechts). Nebenformelemente wie Zapfen und Flansch werden nicht in die Untersuchungen einbezogen, da die Untersuchungen dem Nachweis der grundlegenden Anwendbarkeit des gratlosen Gesenkschmiedens auf PKW-Kurbelwellen dienen.

4.1.2 Analyse der Kurbelwellengeometrie

Zum Entwurf der Abfolge der Umforscheite wird eine Analyse der Massenverteilung der Einzylinderkurbelwelle durchgeführt. Dabei wird die Massenverteilung entlang der Bauteillängsachse (x-Achse) untersucht. Die Betrachtung dient der schmidegerechten Massenverteilung innerhalb der Stadienfolge und hat das Ziel, geeignete Vorfornverfahren zu identifizieren.

Die Kurbelwellengeometrie lässt sich auf die zwei miteinander kombinierten Grundformen Zylinder und Scheibe zurückführen. Die Lagerstellen bestehen aus Zylindern mit zwei unterschiedlichen Abmessungen, die Kurbelwangen bestehen aus flachen Scheiben mit einer Asymmetrie in einer Ebene und schroffen Querschnittswchseln. Die ausgeprägten Querschnittsunterschiede zwischen diesen Grundformen führen zu einem stark inhomogenen Werkstofffluss und Formfüllungsverhalten.

Bild 4.2 stellt die spezifische Masse der Einzylinderkurbelwelle entlang der Bauteillängsachse dar. Die Analyse zeigt, dass die Massenverteilung bedingt durch den schroffen geometrischen Wechsel von Hauptlager bzw. Pleuellager zu den Kurbelwangen sehr ungleichmäßig ist. Wie bei Stadienfolgenauslegungen üblich, wird daher angestrebt, dass ausgehend vom Rohteil eine stufenweise Annäherung an die Massenverteilung des Fertigteils erreicht wird.

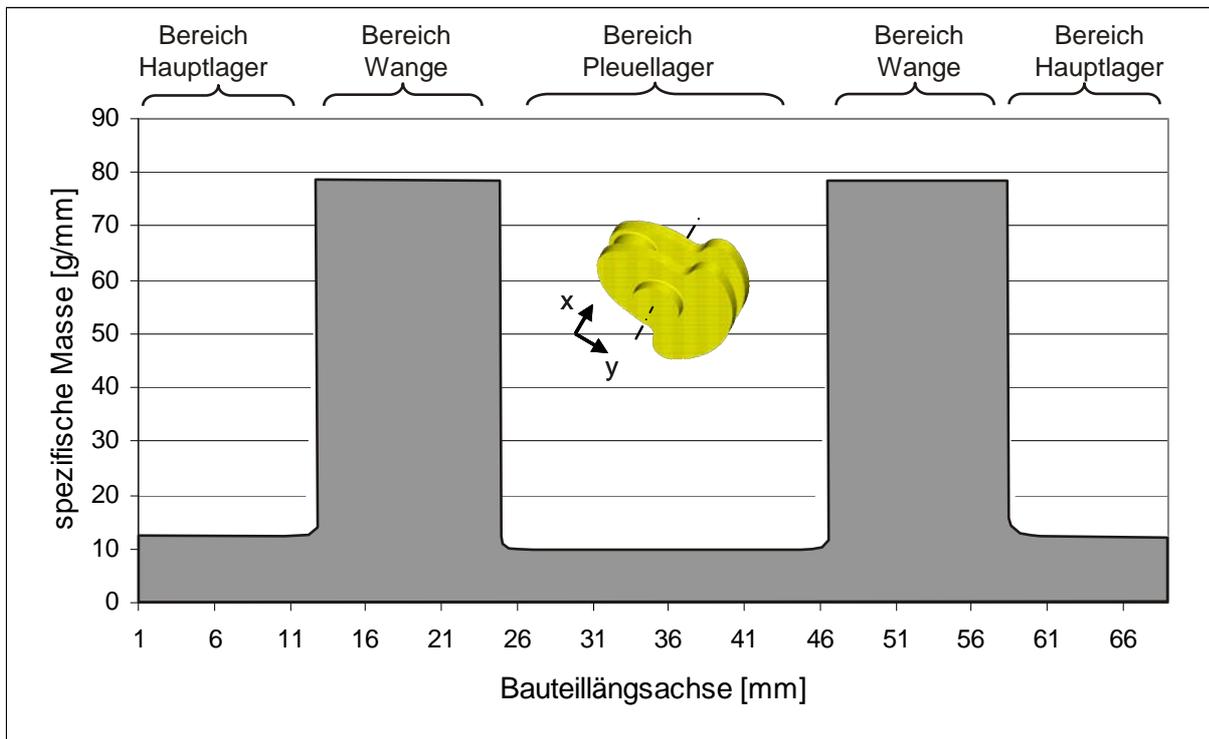


Bild 4.2: Massenverteilungsdigramm der Einzylinderkurbelwelle projiziert auf die xy-Ebene

Die hier gezeigte Massenverteilung kann gleichzeitig als Querschnittsdiagramm des Bauteils verstanden werden. Um die jeweiligen Querschnittsflächen zu berechnen, ist die Division der spezifischen Masse durch die Werkstoffdichte ($\rho_{\text{Stahl}} = 7,85 \text{ kg/dm}^3$)

durchzuführen. Auf Basis dieser Überlegung kann berechnet werden, dass der maximal auftretende Querschnittsunterschied zwischen Kurbelwange (A_W) zu Pleuellager (A_P) $A_W / A_P = 8$ beträgt. Nach LANGE [Lan88] ist je Vorformoperation eine maximal zulässigen Querschnittsänderung von $A_0 / A_1 \leq 3$ bis 5 zulässig.

Aus dem errechneten maximalen Querschnittsunterschied und den im folgenden Abschnitt definierten Randbedingungen (vgl. Abschnitt 4.3) lässt sich ableiten, dass die Stadienfolge mindestens zwei Vorformoperationen erfordert. Als Rohteil wird ein Knüppelabschnitt verwendet. Aufgrund dieser Analyse und den zur Verfügung stehenden Anlagen wird die Entwicklung einer dreistufigen Stadienfolge mit zwei Vorformstufen und einer Fertigformung geplant. Dabei dient die erste Vorformstufe der Massenverteilung, die zweite Vorformstufe der Querschnittsvorbildung. Nachfolgend werden die zwei benötigten Vorformstufen als 1. Vorform und 2. Vorform bezeichnet.

Um beim gratlosen Gesenkschmieden eine vollständige Formfüllung der Gravur zu erreichen, ist eine geeignete Verteilung der Kraftereinleitungsflächen am Schmiedeteil notwendig. Das Fertigteil wird dazu nach BROß [Bro99] durch eine geometrische Bauteilanalyse in die folgenden zwei Bereiche unterteilt:

- Bearbeitungsbereiche (Geometrielemente, die spanend nachbearbeitet werden müssen) und
- Kraftereinleitungsbereiche (Geometrielemente, die aufgrund ihrer Lage und Gestalt die Einleitung der Umformkraft ermöglichen).

Die restlichen Werkstückbereiche werden als „passive Bereiche“ bezeichnet und durch der Gesenkgravur abgebildet.

In Bild 4.3 sind die Bearbeitungs- und Kraftereinleitungsbereiche an dem skizzierten Fertigteil gekennzeichnet.

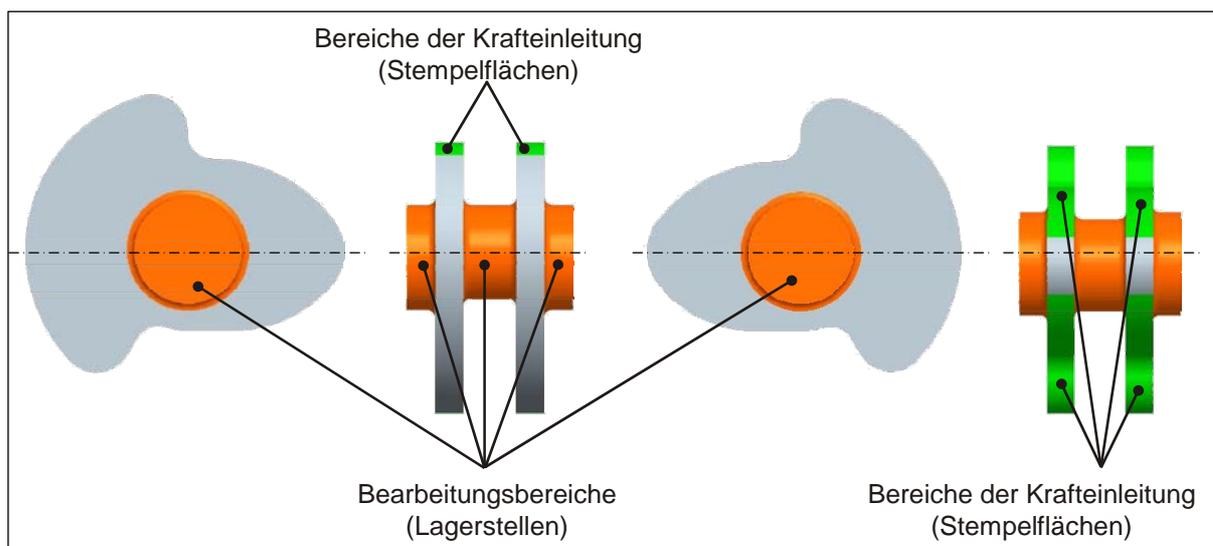


Bild 4.3: Analyse der Kurbelwellengeometrie

An der gratlos geschmiedeten Kurbelwelle werden die Lagerstellen sowie die angrenzenden Hohlkehlradien durch schleifende Zerspanung weiterbearbeitet. Die

gekennzeichneten Bereiche für die Krafteinleitung werden genutzt, um durch vier Umformstempel die Umformkraft aufzubringen. Es können 46 Prozent (Obergesenk) bzw. 37 Prozent (Untergesenk) der projizierten Fläche für die Krafteinleitung genutzt werden.

4.1.3 Zentrale Prozesskräfte bei gratlosen Gesenkschmiedeprozessen

Für gratlose Gesenkschmiedeprozesse mit vorherigem Schließen der Werkzeuge setzt sich die Stoßelkraft F_S (Gesamtpresskraft) aus der Schließkraft F_C , den Stempelkräften F_U und Gleitreibungskräften F_R in Maschine und Werkzeug zusammen. Überschreitet die Summe dieser Kräfte die Presskraft F_P des Aggregats findet der Umformprozess nur unvollständig statt. Die Gleitreibungskräfte entstehen durch den verfahrenstypischen Werkzeugaufbau für gratlose Gesenkschmiedeoperationen, indem der Umformstempel im Gesenk durch Gleitlager geführt wird.

$$F_S = F_C + F_U + F_R \leq F_P \quad (1)$$

Die Höhe der notwendigen Schließkraft ist abhängig von der Schmiedeteilgeometrie. Geometrien mit einer großen horizontalen Querschnittsfläche und somit großer projizierter Stempelfläche benötigen bei gleicher Umformkraft geringere Schließkräfte als Bauteile mit kleinerer projizierter Stempelfläche. Mit Formel 2 aus der VDI-Richtlinie 3176 [VDI86] kann dieser Zusammenhang dargestellt werden:

$$p_i = \frac{F_U}{A_{ST}} - k_f \quad (2)$$

Hierbei ist p_i der Werkzeuginnendruck, k_f die Fließspannung des Werkzeugwerkstoffs, F_U die Stempelkraft und A_{ST} die Fläche des umformenden Stempels. Für Umformungen im geschlossenen Gesenk ist ein durch die zunehmende Formfüllung verhältnismäßig starker Anstieg der Schließkraft zum Ende des Umformvorgangs kennzeichnend.

4.1.4 FEM-Analysen

Die FEM-Analysen werden im Vorfeld der Versuche durchgeführt, um das Formfüllungsverhalten der Geometrien zu optimieren und den Aufwand der praktischen Versuche zu minimieren. Hierfür wird je ein Simulationsmodell für die zwei Vorformstufen und die Fertigformung erstellt, das die Form gebenden Werkzeugkomponenten abbildet.

Für die Untersuchungen wird das Stoffflusssimulationsprogramm *Forge3* der Firma *Transvalor* genutzt. Die einzustellenden Simulationsparameter wie Reibwerte (μ , m) und der Wärmeübergangskoeffizient (h) werden während der gesamten Entwicklungsdauer konstant gehalten und leiten sich aus Untersuchungen zur Optimierung der FEM für die Schmiedeprozessauslegung ab [BRA03]. Um die Modellgröße zu reduzieren, wird die yz-Ebene (vgl. Bild 4.1) als Symmetrieebene genutzt. Aufgrund

der Bauteilgeometrien werden dreidimensionale Modelle verwendet. Zur Analyse der Werkzeugbelastungen werden thermisch-mechanisch gekoppelte Simulationen eingesetzt.

Die Bewertung der numerischen Simulationen erfolgt anhand der bauteilbezogenen Kriterien

- Umformgrad und
- Formfüllungsverhalten/Faltenbildung

sowie der werkzeugbezogenen Kriterien

- Presskraft,
- Gravurlast und
- Schließkraft.

Durch die genaue räumliche Erfassung der Belastungsgrößen stehen durch die FEM-Analysen Validierungsdaten zur Verfügung, die im später durchgeführten Realversuch nicht bestimmbar sind. Weiterhin wird überprüft, ob der notwendige Kraftbedarf von den vorhandenen Schmiedeaggregaten aufgebracht werden kann. Mithilfe der Simulationen werden Informationen zum Werkstoffverhalten im Bauteilinneren gewonnen, die messtechnisch nicht oder nur unter großem Aufwand erfassbar wären. Hierzu zählen die Spannungs- und Temperaturverteilung im Schmiedeteil, die wiederum direkten Einfluss auf die Werkzeugbelastung haben.

Für die Auslegung der Stadienfolge werden die Werkzeuge hinsichtlich ihrer Komplexität reduziert und ausschließlich formgebende Elemente modelliert. Die Modellierung der Stempel der Werkzeuge zur Vor- und Fertigformung bedarf einer gesonderten Vorgehensweise, da die Stempel zur Gewährleistung einer fehlerfreien Führung in den Gravurdurchbrüchen konstruktiv mit einer Spielpassung von 0,05 mm zum Gravurdurchbruch ausgelegt werden. Für die FEM stellt sich dieser Spalt aufgrund der endlichen Größen der finiten Elemente und der numerischen Ungenauigkeit bei der Kontaktfindung als problematisch dar. Für die Simulationen werden die Werkzeuge daher soweit modifiziert, dass sie sich an den Kanten minimal durchdringen. Damit kann der numerische Effekt der Elemententartung verhindert werden, bei dem während der Simulation Knoten in die Werkzeugzwischenräume dringen und die Simulation unterbrochen wird.

4.2 Prozessauslegung

Die Auslegung der Stadienfolge der Einzylinderkurbelwelle wird gemäß der *Top-Down-Methode* durchgeführt. Dabei wird ausgehend vom Fertigteil die Stadienfolge rückwärtsgerichtet bis zum Rohteil ausgelegt (vgl. Bild 4.4).

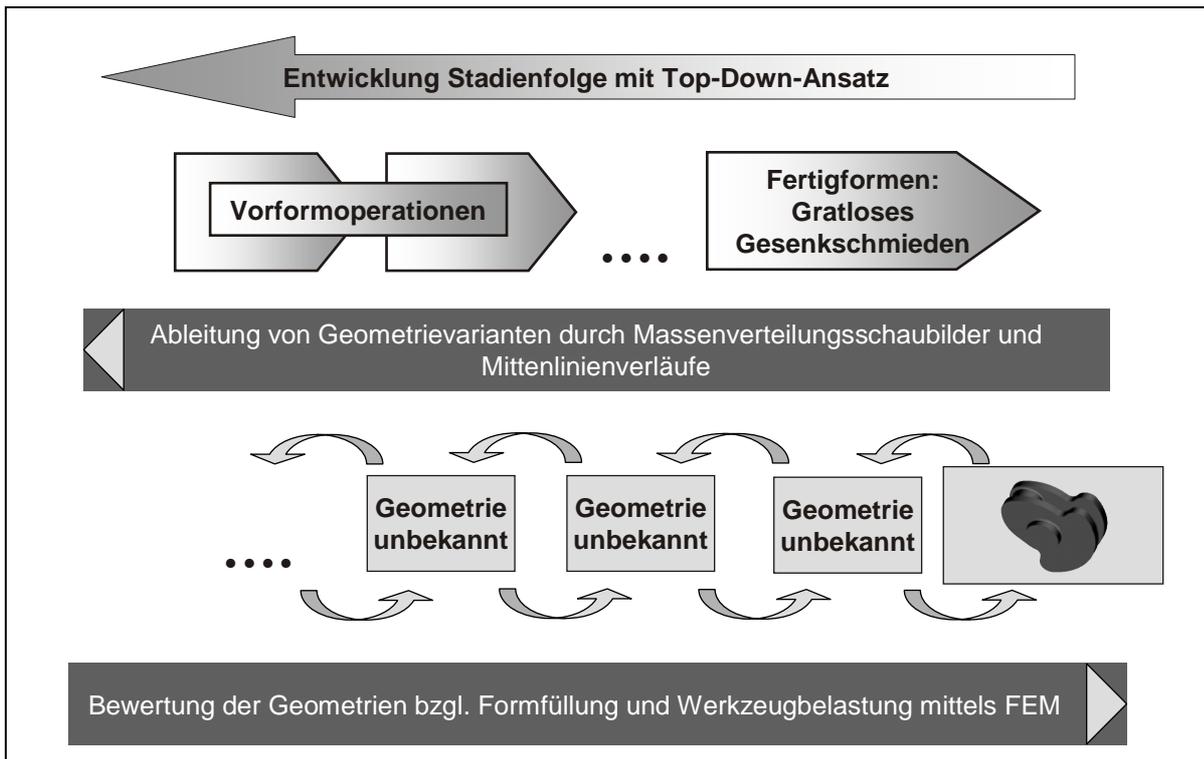


Bild 4.4: Ansatz zur Entwicklung einer gratlosen Schmiedeprozesskette für eine Einzylinderkurbelwelle nach der Top-Down-Methode

Bei der Auslegung der Stadienfolge ist zu beachten, dass aufgrund der Mehrstufigkeit des Schmiedeprozesses und der langen Fließwege eine stete Wärmeabfuhr vom Schmiedeteil in die Werkzeuge stattfindet. Um den Energieverlust der Bauteile während des Schmiedens zu begrenzen, wird die Anzahl der Vorformstufen daher möglichst gering gehalten. Die Ableitung der Vorformstufen auf Basis des Fertigteils erfolgt anhand der von Mathieu vorgestellten Methode zur Auslegung von Stadienfolgen [Mat91]. Darin wird neben der Analyse der Massenverteilung der Mittenlinienverlauf des Bauteils verwendet, um eine geeignete Vorform abzuleiten. Der Verlauf beschreibt den Versatz des Schwerpunktes aus einer angenommenen Mittellinie an einem betrachteten Querschnitt. Als Ergänzung zum Massenverteilungsschaubild, das die Masse eines Körpers entlang einer definierten Richtung beschreibt, gibt der Mittenlinienverlauf Auskunft über die Lage der Masse im angewendeten Koordinatensystem. Mithilfe der Informationen aus dem Massenverteilungsschaubild und dem Mittenlinienverlauf ist es möglich, die Güte der Querschnittsvorbildung zu beurteilen.

4.2.1 Fertigschmieden durch gratloses Gesenkschmieden

Das Formfüllungsverhalten und die Werkzeugbelastungen im Fertigschmiedeschritt sind neben weiteren Einflussgrößen insbesondere von der Güte der Massenverteilung der 2. Vorform abhängig. Kurze Fließwege während des gratlosen Gesenk-

schmiedens begünstigen eine gleichmäßige Formfüllung und führen zu einer Verringerung der thermisch-mechanischen Werkzeugbelastung.

Die Geometrie der Einzylinderkurbelwelle weist in der yz-Ebene eine Asymmetrie der Kurbelwangen auf (vgl. Bild 4.1). Um eine vollständige Formfüllung beim gratlosen Gesenkschmieden zu gewährleisten, ist es notwendig, dass die Vorformgeometrie diese Asymmetrie bereits berücksichtigt. Ziel der nachfolgend beschriebenen Vorformentwicklung ist es daher, dass der Mittenlinieverlauf und die Massenverteilung des Fertigteils möglichst genau durch die Vorform abgebildet werden.

Das Werkzeug zum gratlosen Gesenkschmieden der Einzylinderkurbelwelle basiert auf dem in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Prinzip. Dieses Werkzeugprinzip wird auf die Bauteilgeometrie der Einzylinderkurbelwelle übertragen und weiterentwickelt. Bild 4.5 stellt das Werkzeugprinzip dar.

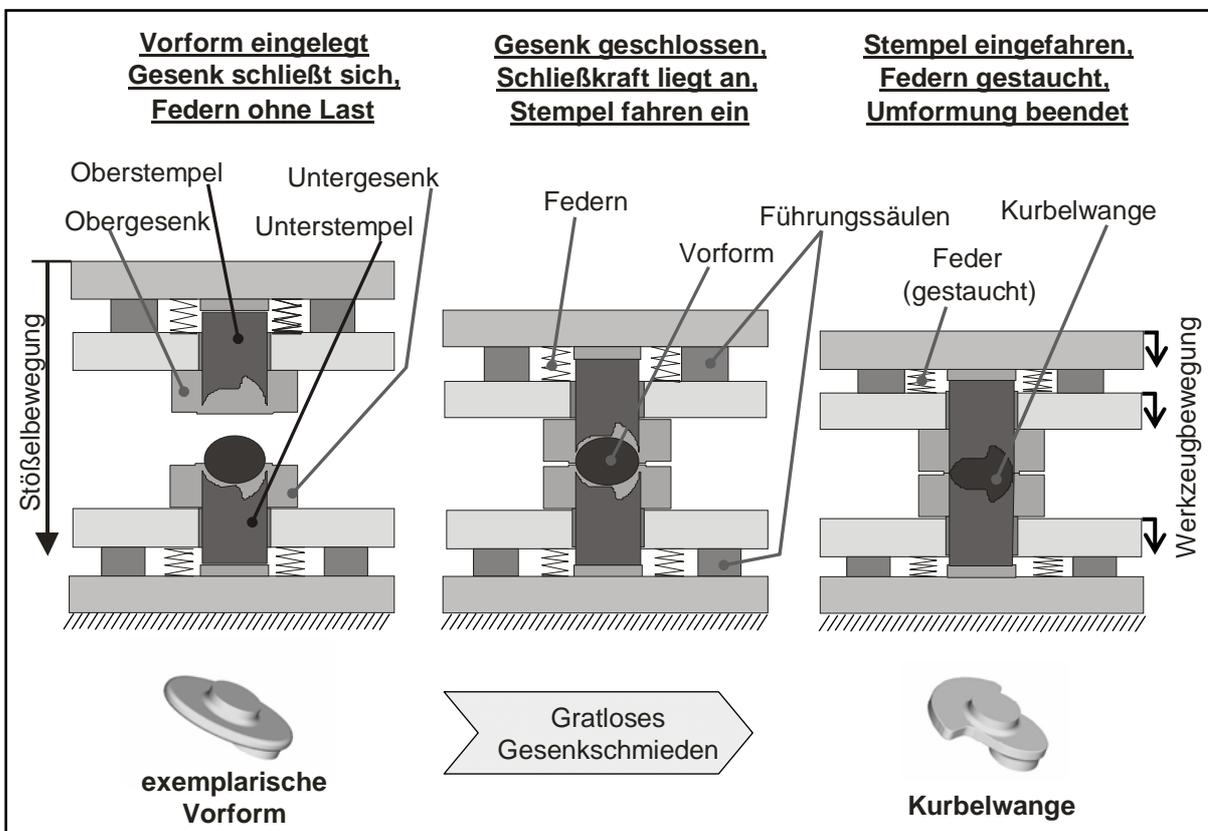


Bild 4.5: Werkzeugprinzip zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle

4.2.2 2. Vorformoperation: Mehrdirektionales Vorformen

Aufbauend auf dem Massenverteilungsschaubild des Fertigteils (vgl. Bild 4.3) wird die Geometrie der 2. Vorform entworfen. Dabei werden die in Abschnitt 4.3 dargestellten Vorüberlegungen berücksichtigt. Beim Entwurf der Vorformgeometrie wird vorausgesetzt, dass das Werkzeug zur Fertigformung der Einzylinderkurbelwelle nach dem vorgestellten Prinzip zum gratlosen Gesenkschmieden von Langteilen geeignet ist (vgl. Bild 4.5). Die Vorformgeometrie muss daher gratfrei hergestellt

werden und über eine für das gratlose Gesenkschmieden notwendige Massenverteilung verfügen. Wie im Folgenden ausführlicher beschrieben wird, kommt aufgrund der geforderten Eigenschaften sowie der Fertigformgeometrie als Vorformverfahren einzig das mehrdirektionale Vorformen in Frage.

Ausgehend von einer einfachen symmetrischen 2. Vorform wird in einem iterativen Prozess eine optimierte Vorformgeometrie hergeleitet. In Bild 4.6 wird das Ergebnis der Entwicklungsphase verwendet, um die Massenverteilung der 2. Vorform gegenüber der Massenverteilung des Fertigteils zu bewerten.

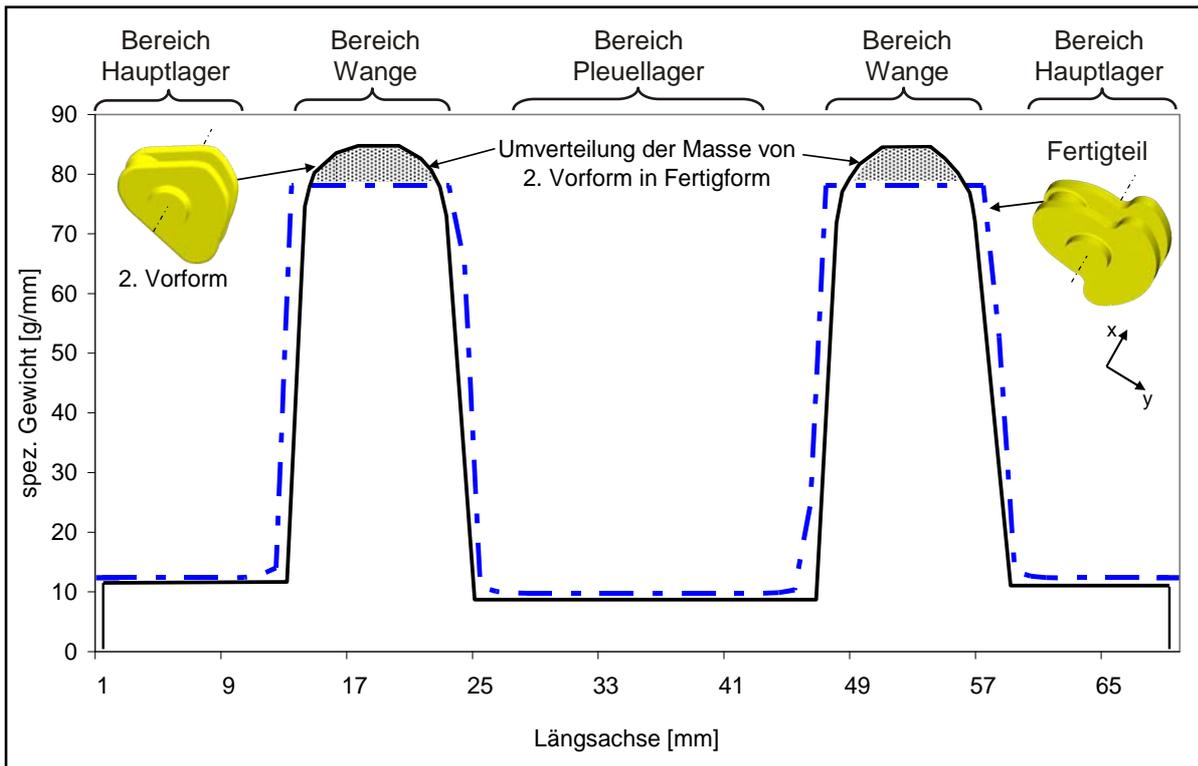


Bild 4.6: Darstellung der Massenverteilung der Einzylinderkurbelwelle und der 2. Vorform projiziert auf die xy-Ebene

Im Vergleich macht deutlich, dass die Massenverteilung der Vorform die definierten Randbedingungen 3 (geringe Massenverteilung beim Fertigschmieden) und 4 (Positionierbarkeit der Vorform) erfüllt (vgl. Abschnitt 4.1). Die 2. Vorform weist abgesehen von den Kurbelwangen in allen Bereichen ein geringeres spezifisches Gewicht als das Fertigteil auf. Dies ist zum einen notwendig, um sie umformfrei im Gesenk positionieren zu können und zum anderen, um das Schließen des Gesenks ohne Umformung zu gewährleisten. Während der Umformung zum Fertigteil wird durch das Einfahren von Stempeln die Massenverteilung des Fertigteils erreicht, indem die Masse aus den grau unterlegten Bereichen der Massenverteilungskurve umverteilt wird.

Im nächsten Schritt wird der Mittellinienverlauf des Fertigteils hergeleitet und dem Mittellinienverlauf der 2. Vorform gegenübergestellt. Der Mittellinienverlauf wird aus den Schwerpunkten der Inkrementalscheiben berechnet, die das Schmiedeteil senk-

recht zur Projektionsebene durchschneiden. Für die untersuchte Einzylinderkurbelwelle wird die xy -Ebene für die Darstellung verwendet, da die Geometrie in dieser Ebene den höchsten Komplexitätsgrad aufweist.

Bild 4.7 stellt den Mittenlinienverlauf des Fertigteils sowie der entwickelten 2. Vorform als Schwerpunktdiagramm entlang der x -Achse dar. Die Hauptlagerachse bildet die Bezugsachse. Der Pleuellagerversatz ist bereits in der 2. Vorformstufe vollständig angelegt. Daher decken sich im Bereich des Pleuellagers sowie der Hauptlager die Mittenlinienverläufe vollständig. Im Bereich der Kurbelwangen erklären sich Abweichungen entlang der x -Achse aus den unterschiedlichen Kurbelwangenbreiten der Vor- und Fertigform. Die Kurbelwangenbreite der 2. Vorform ist schmaler als die des Fertigteils, um die 2. Vorform in die Gravur zum Fertigschmieden einlegen zu können.

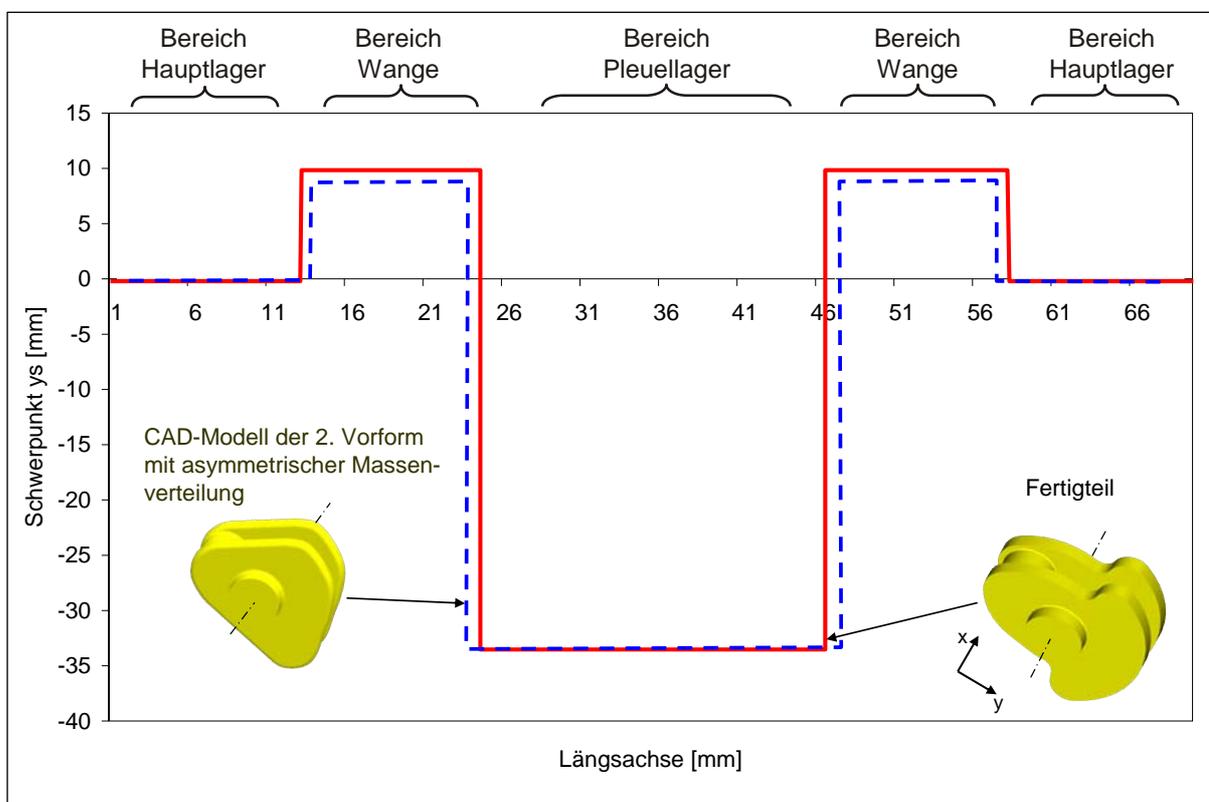


Bild 4.7: Mittenlinienverlauf der Einzylinderkurbelwelle und des CAD-Modells der 2. Vorform in der xy -Ebene, Hauptlagerachse als Schwerpunktnulllinie

Der Mittenlinienverlauf der 2. Vorform kann aufgrund der Bauteilgeometrie nicht durch herkömmliche, einachsige Vorformverfahren wie beispielsweise Stauchen und Schubumformen oder durch Fließpressverfahren hergestellt werden. Durch folgende Merkmale führen diese herkömmlichen Umformverfahren nicht zu einer geeigneten Kombination von Massenverteilung und Mittenlinienverlauf:

- geringe Wangendicke

- große Querschnittsflächen der zwei Wangen im Vergleich zur restlichen Geometrie
- Asymmetrie der Wangen (vgl. Abschnitt 4.1.1)
- ausgeprägter Versatzes der Mittellinie in positive und negative Richtung gegenüber der Nulllinie (bedingt durch den Kurbelhub)

Der für Kurbelwellen charakteristische Sprung des Mittellinienverlaufes kann unter der Forderung einer gratlosen Schmiedeprozesskette demnach nur durch eine Kombination der Verfahren Stauchen und Schubumformen in einer mehrdirektionalen Vorformung erreicht werden (vgl. Abschnitt 2.5) [Alt06].

Das Werkzeugprinzip zum mehrdirektionalen Vorformen einer Einzylinderkurbelwelle muss die genannten Merkmale der Bauteilgeometrie berücksichtigen. Nachfolgend wird die Entwicklung eines geeigneten mehrdirektionalen Werkzeugprinzips dargestellt.

Ableitung des Werkzeugprinzips für die 2. Vorformung

Um die geforderte Vorformgeometrie herzustellen, wird ein mehrdirektionaler Vorformprozess eingesetzt. Dabei wird eine zunächst unbekannte 1. Vorform gleichzeitig in zwei Raumrichtungen umgeformt. Das Werkzeugprinzip ist in Bild 4.8 dargestellt.

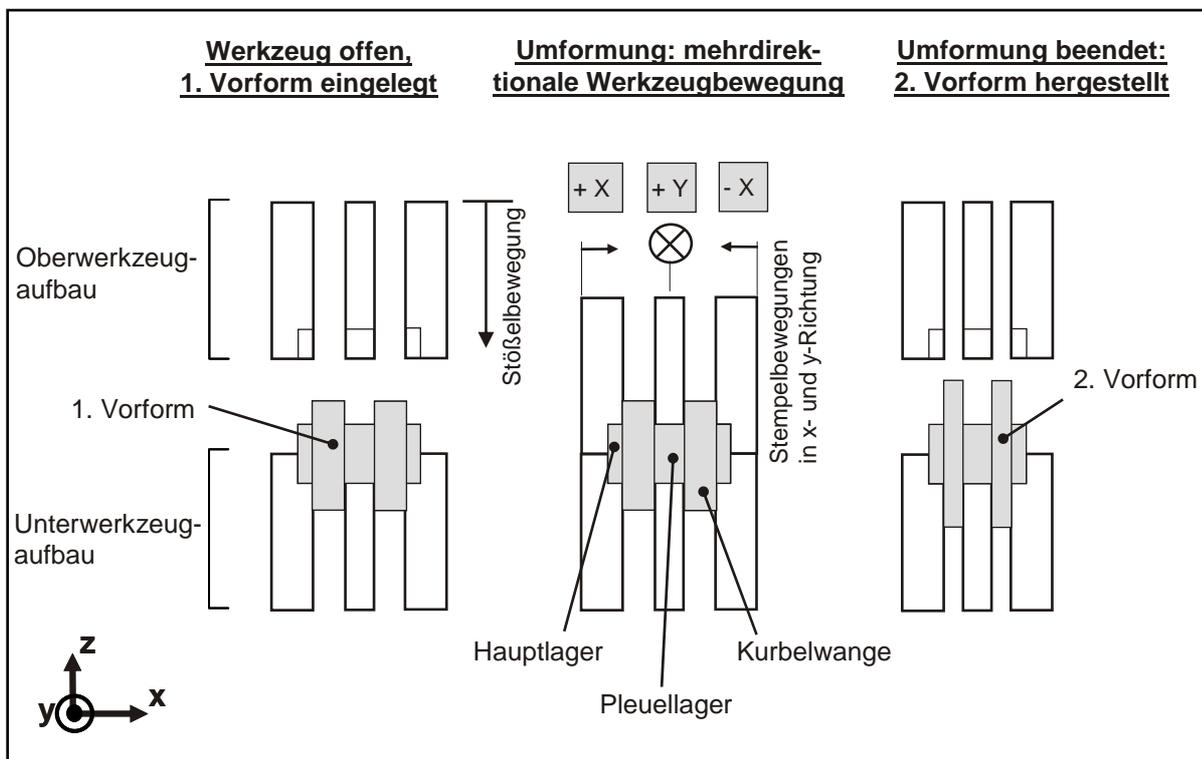


Bild 4.8: Mehrdirektionales Werkzeugprinzip zur Herstellung der 2. Vorform der Einzylinderkurbelwelle

Die Umformung erfolgt entlang der x-Achse durch ein Anstauchen des Rohteils. Durch dieses axiale Anstauchen wird Werkstückwerkstoff für die Schubumformung in y-Richtung zur Herstellung des Lagerversatzes bereitgestellt. Die Kurbelwangenge-

ometrie wird dabei durch Freiformen zwischen den Werkzeugkomponenten gebildet. Insofern stellt die Gestalt der 1. Vorform während der Entwicklung der 2. Vorformgeometrie eine wichtige Einflussgröße dar, weil die Ausformung der Kurbelwangen von der Massenverteilung in der 1. Vorform abhängig ist. Der Aufbau des mehrdirektionalen Werkzeugs und dessen Funktion wird in Abschnitt 5.3 detailliert beschrieben.

4.2.3 1. Vorformoperation: Voll-Quer-Fließpressen

Ziel der ersten Vorformung ist die Erzeugung einer geeigneten Ausgangsgeometrie für die zweite Vorformstufe. Analog zur Entwicklung der 2. Vorform wird die 1. Vorform durch Variantenrechnungen mittels FEM-Analysen ausgelegt. Um eine gratfreie Umformung zu ermöglichen, muss die 1. Vorform bereits ausgebildete, zylindrische und gratfreie Lagerstellen (Haupt- und Pleuellager) aufweisen. Weiterhin muss in der 1. Vorformstufe bereits die Asymmetrie der Kurbelwangenform berücksichtigt werden, um später eine optimale Massenverteilung durch das mehrdirektionale Vorformen realisieren zu können.

Unter diesen Randbedingungen wird die in Bild 4.9 dargestellte Geometrie ermittelt. Die 1. Vorform besitzt wangenförmig ausgestellte, asymmetrische Geometrieelemente und zylindrisch ausgeformte Lagerstellen. Der Längenunterschied der beiden Vorformen von ca. 60 Prozent wird für das nachfolgende mehrdirektionale Vorformen und das darin stattfindende axiale Anstauchen zur Stoffanhäufung vorgehalten.

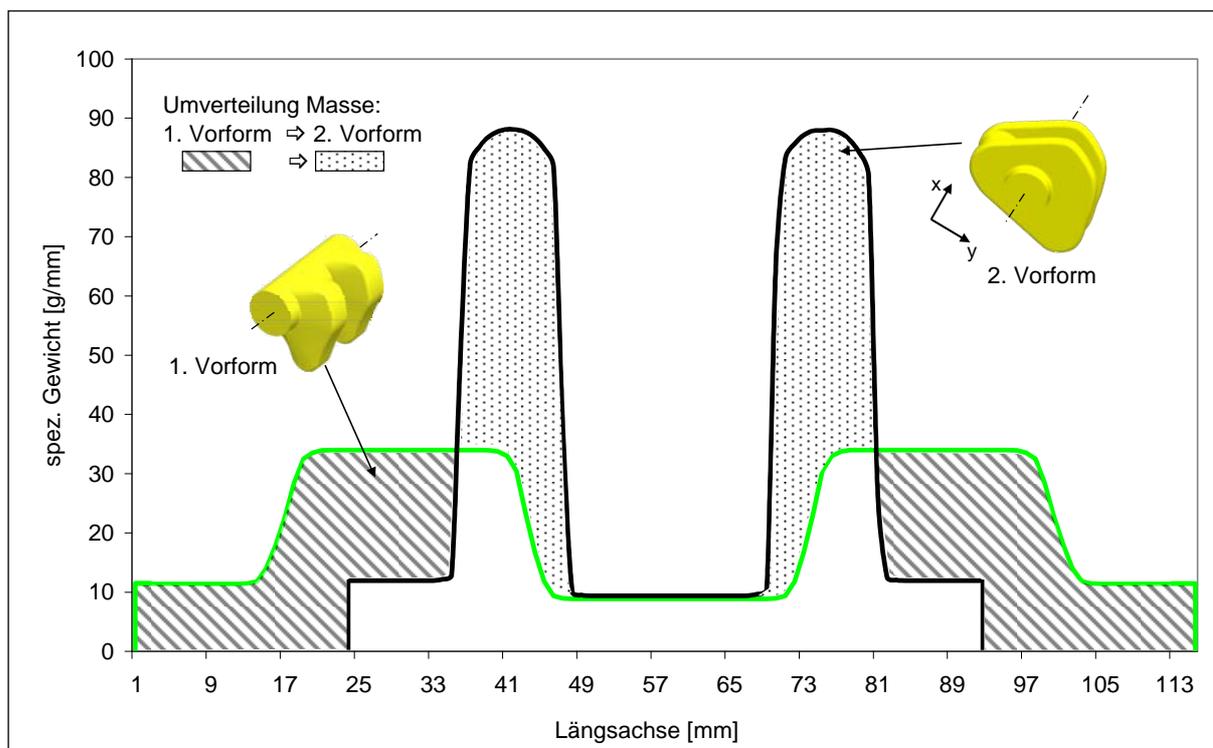


Bild 4.9: Massenverteilung der Vorformen und Darstellung der umzuverteilenden Masse im mehrdirektionalen Vorformschritt projiziert auf die xy-Ebene

Der in Bild 4.9 schraffiert dargestellte Bereich kennzeichnet die Masse, die im mehrdirektionalen Vorformschritt in den gepunktet dargestellten Bereich der 2. Vorformgeometrie umverteilt wird. Unter Beachtung der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik weist die entwickelte 1. Vorformgeometrie eine gute Querschnittsvorbildung auf und genügt den festgelegten Randbedingungen. Der maximale Querschnittsunterschied zwischen 1. Vorform (A_{W1}) und 2. Vorform (A_{W2}) tritt im Bereich der Kurbelwangen auf. Er beträgt $A_{W1} / A_{W2} = 3$ und liegt somit im technisch realisierbaren Bereich.

In Bild 4.10 sind die Mittellinienverläufe der 1. und 2. Vorform dargestellt. Die Mittellinie der 1. Vorform weist bereits den charakteristischen Verlauf der 2. Vorform auf, der durch die wechselnden Schwerpunkte des Hauptlagerbereichs, Kurbelwangenbereichs und Pleuellagerbereichs entsteht. Auf diese Weise sind bereits im Mittellinienverlauf der 1. Vorform die Schwerpunkte des Pleuellagers (Richtung -y) und der Kurbelwangen (Richtung +y) auf den gegenüberliegenden Seiten der Schwerpunktnulllinie (Hauptlagerachse) ausgeprägt. Die fehlerfreie Umformung der 1. Vorform wurde durch FEM-Analysen überprüft.

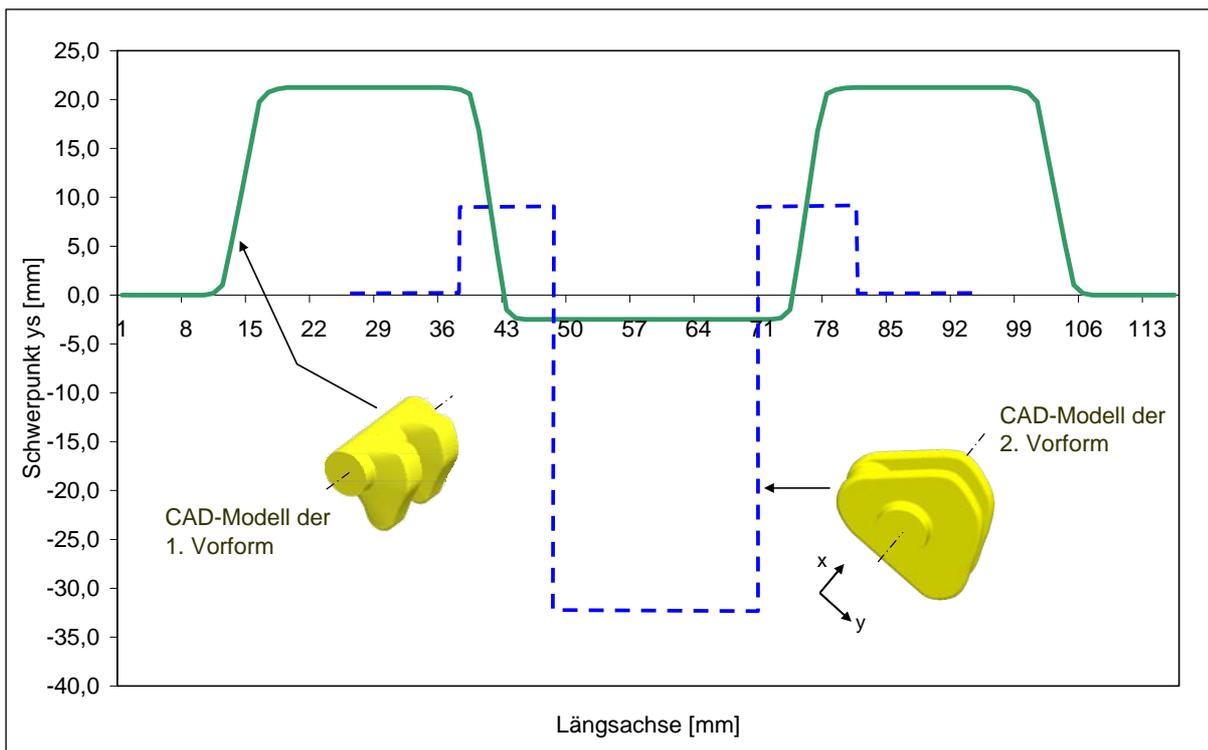


Bild 4.10: Mittellinienverläufe der zwei Vorformen in der xy-Ebene, Hauptlagerachse als Schwerpunktnulllinie

Ableitung des Werkzeugprinzips für die 1. Vorformung

Gemäß Randbedingung 1 (Gratfreiheit der gesamten Stadienfolge) wird die 1. Vorform im geschlossenen Gesenk geschmiedet, um die Gratfreiheit des Bauteils sicherzustellen. Innerhalb des Herstellungsverfahrens müssen die Forderung nach einem ununterbrochenen Faserverlauf sowie eine hohe reproduzierbare Maß- und

Formgenauigkeit der 1. Vorform berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Forderungen und der Komplexität der Bauteilgeometrie wird das Verfahren des Voll-Quer-Fließpressens nach DIN 8583-6 zur Herstellung der 1. Vorform herangezogen. Mit diesem Verfahren können Vollkörper mit beliebigem Vollprofil in der gewünschten Qualität erzeugt werden.

Während des Voll-Quer-Fließpressens fließt der Werkstoff quer zur Wirkrichtung des Stempels und wird in einer geschlossenen Matrice unter Wirkung der Umformkraft in die formgebende Werkzeuggravur gepresst. Um die 1. Vorform nach dem Umformen entnehmen zu können, muss das Werkzeug eine horizontale Teilungsebene aufweisen. Die Gravur des Werkzeugs ist dazu so geteilt, dass an der Vorform keine Hinterschnitte entstehen. Die Gesenkhälften werden vor Beginn der Umformung geschlossen und unter Wirkung einer Schließkraft F_C zusammen gehalten. Bild 4.11 zeigt das Werkzeugprinzip des Voll-Quer-Fließpressens zur Herstellung der Vorform sowie die Verteilung von passiven Flächen und Kräfteinleitungsflächen in einer Projektion auf die xy-Ebene.

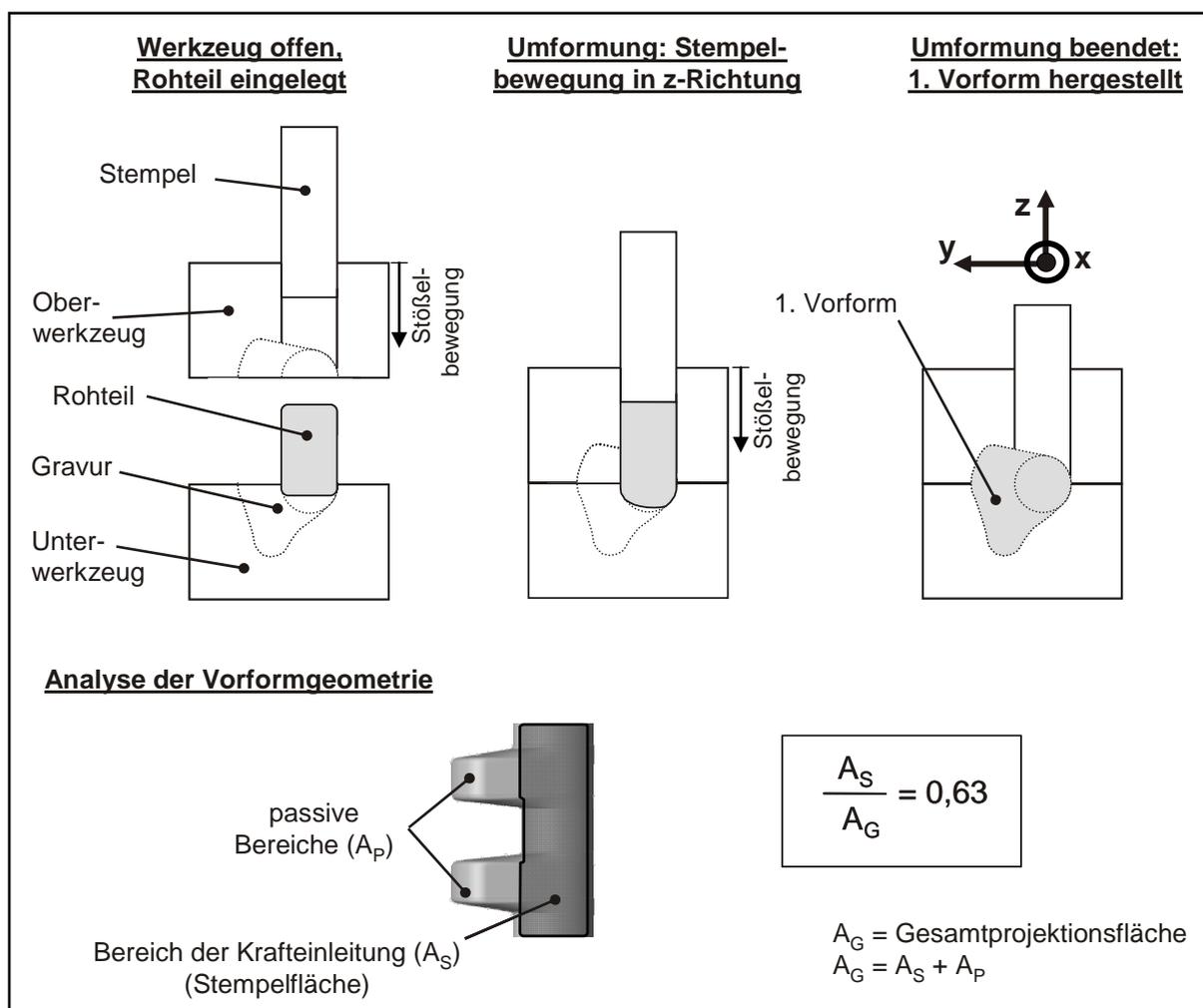


Bild 4.11: Werkzeugprinzip zum Voll-Quer-Fließpressen der Vorform, Analyse des Kräfteinleitungsbereichs

Die Krafteinleitungsfläche beinhaltet zu einem Großteil die Flächen der Haupt- und Pleuellagerstellen sowie einen geringen Teil der Kurbelwangengeometrie. Die Fläche nimmt ca. 63 Prozent der Gesamtprojektionsfläche ein. Sie steht somit in einem guten Verhältnis zum passiven Flächenanteil und begünstigt die Formfüllung der Gravur.

4.2.4 Ableitung der Rohteilgeometrie

Die Form- und Oberflächenbeschaffenheit der Schmiedrohteile beim gratlosen Gesenkschmieden stellen wichtige Einflussgrößen in Bezug auf das Schmiedeergebnis dar. Neben den Volumenschwankungen, die es zu vermeiden gilt, kann eine homogene Formfüllung und eine gute Positionierbarkeit des Rohteils im Gesenk beispielsweise durch deformierte Flächen oder Sägegrate beeinträchtigt werden. Die gewählte Rohteilgeometrie und das zur Herstellung gewählte Verfahren sind insofern von Bedeutung für den Aufbau der gesamten Prozesskette.

Bereits bei der Bestimmung der Form der Rohteilgeometrie muss der gewünschte Faserverlauf des Fertigteils berücksichtigt werden, da insbesondere die für Kurbelwellen wichtige Biegewechselfestigkeit vom Faserverlauf abhängig ist [Lan88]. Weiterhin ist die Rohteilgeometrie in ihren maßlichen Dimensionen durch die Abmaße der 1. Vorform in zwei Raumrichtungen festgelegt. Um das Rohteil in das Unterwerkzeug sicher einlegen zu können, entscheidet die schmalste Breite der Vorformgeometrie über die Breite des Rohteils (Maß in x-Richtung). Bei der untersuchten Kurbelwellengeometrie stellt das Pleuellager dieses begrenzende Maß dar. Die Rohteillänge (Maß in y-Richtung) wird bestimmt durch die Länge der Vorform abzüglich eines Betrags zur Gewährleistung der Positionierbarkeit (vgl. Abschnitt 4.3). Da die 1. Vorform im geschlossenen Gesenk hergestellt wird, kann das benötigte Volumen somit im Gravurhohlraum des Stempels (z-Richtung) vorgehalten werden. In Bild 4.12 wird das Massenverteilungsschaubild des Rohteils und der 1. Vorform dargestellt.

Die schraffiert dargestellte Masse des Rohteils wird während des Voll-Querfließpressens in die Vorform überführt (gepunktet dargestellte Bereiche). Aus diesen Randbedingungen ergibt sich eine rechteckige Rohteilgeometrie mit den in Bild 4.15 gezeigten Abmaßen. Zur Verbesserung der Standsicherheit wird das Rohteil an den Kanten entlang der x-Achse mit Radien versehen. Die gewählte rechteckige Rohteilgeometrie stellt die einzige Möglichkeit dar, das benötigte Volumen im Gravurraum unterzubringen; bei der Wahl alternativer Querschnitte wie beispielsweise eines Rundmaterials könnte die benötigte Masse nicht im Gravurraum bereitgestellt werden.

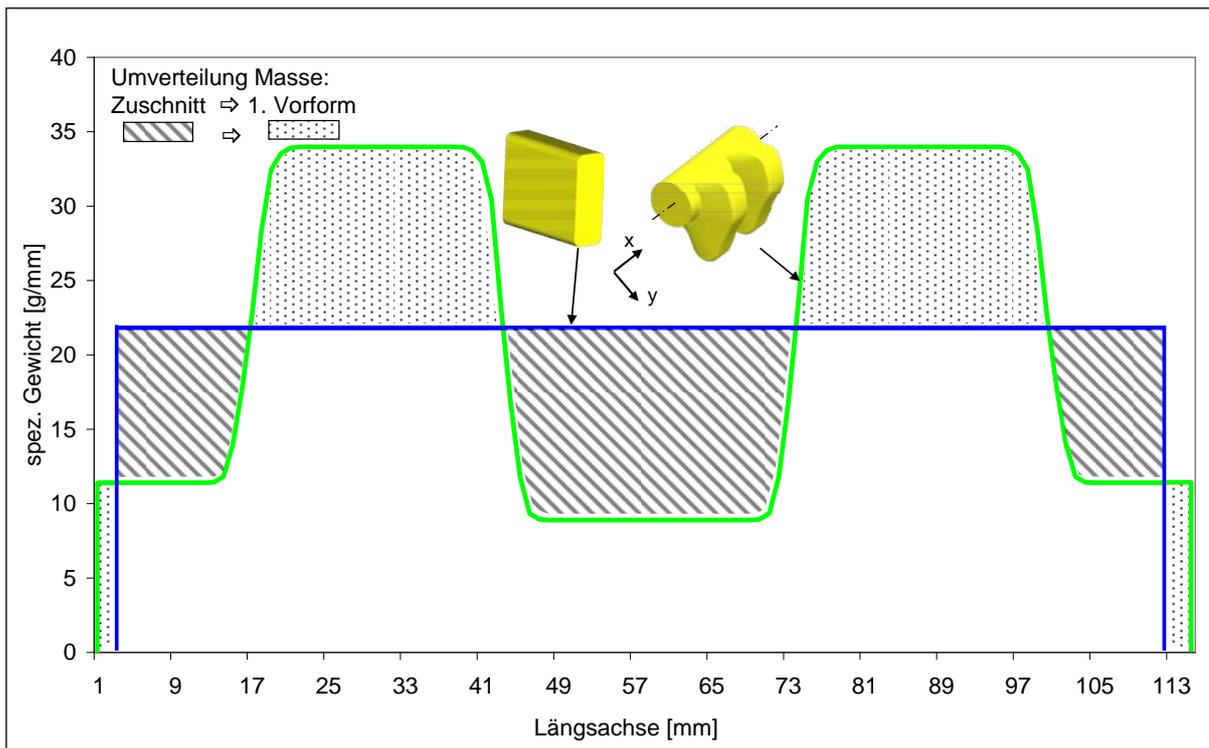


Bild 4.12: Massenverteilungsschaubild des Rohteils und der Vorform im Vergleich projiziert auf die xy-Ebene

4.2.5 FEM-Analyse des Fertigschmiedens

Die Analysephase der Verfahrensentwicklung des mehrdirektionalen Vorformens ermöglicht Rückschlüsse auf die Auswirkungen des Verfahrens auf das gratlose Gesenkschmieden. Hierbei wird insbesondere der Einfluss der Vorformgeometrie auf das Formfüllungsverhalten sowie die thermisch-mechanischen Werkzeugbelastungen analysiert.

In den durchgeführten FEM-Simulationen werden ausschließlich die Belastungen der formgebenden Werkzeugkomponenten analysiert. Eine darüber hinausgehende Analyse der elastischen Deformationen anderer Werkzeugkomponenten wird aufgrund der Größenbeschränkung des FEM-Modells nicht durchgeführt. Im numerischen Modell werden die thermoelastischen Werkstoffdaten des verwendeten Werkzeugstahls verwendet.

Bild 4.13 stellt den Vergleich der Druckberührzeit durch unterschiedliche Vorformgeometrien dar. Durch die asymmetrische 2. Vorform wird gegenüber einer symmetrischen 2. Vorform eine Verkürzung der Druckberührzeit um 15 Prozent realisiert. Dadurch können die thermische Werkzeugbelastung des Fertigschmiedewerkzeugs und somit der Werkzeugverschleiß reduziert werden.

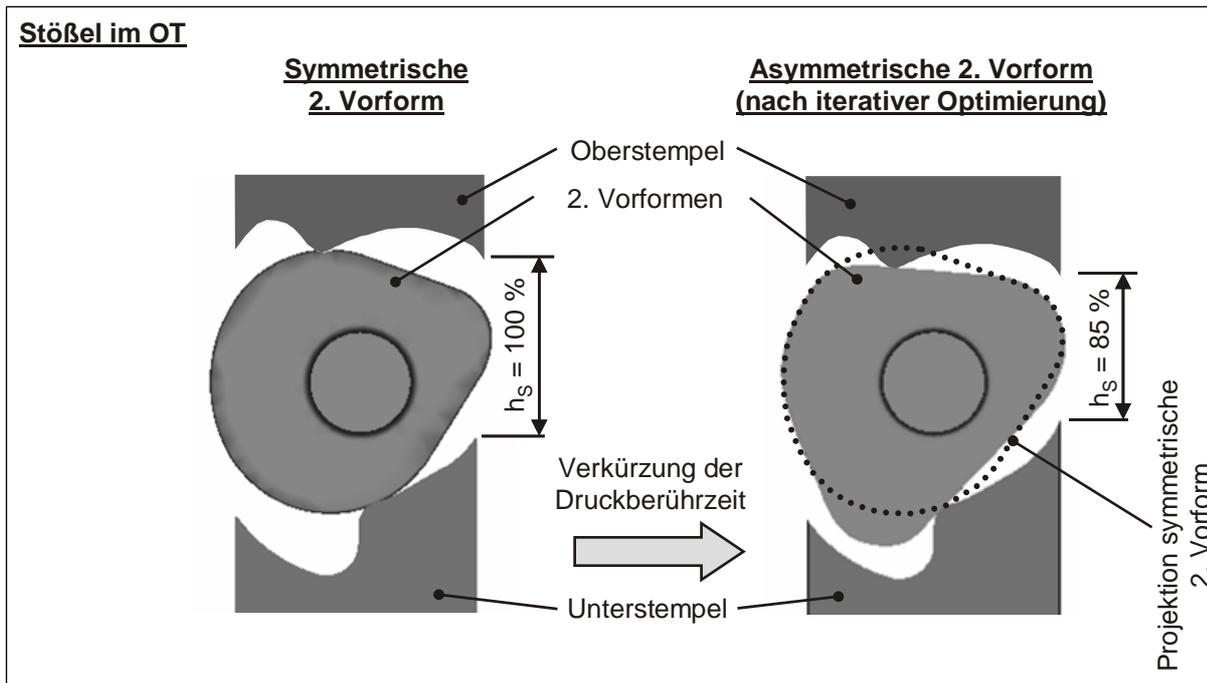


Bild 4.13: 2. Vorformgeometrie vor und nach den Iterationsschleifen; Ergebnis der Analyse der Druckberührzeit des Fertigschmiedeschritts

Weiterhin kann durch die asymmetrische Gestaltung der 2. Vorform das Formfüllungsverhalten gegenüber einer symmetrischen Vorform signifikant verbessert werden. Bild 4.14 stellt die Formfüllung der symmetrischen und der optimierten asymmetrischen 2. Vorform 2 mm vor Erreichen des unteren Totpunkts (UT) der Presse einander gegenüber. Die asymmetrische Vorform ist zu diesem Zeitpunkt weitgehend gleichmäßig gefüllt.

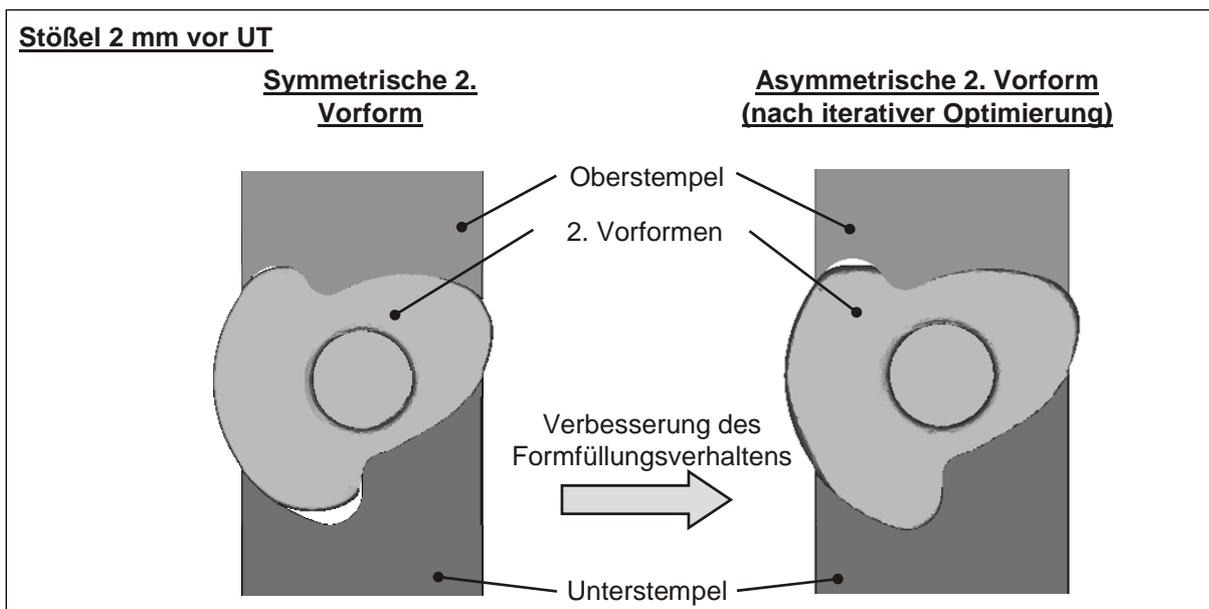


Bild 4.14: Analyse des Formfüllungsverhaltens des Fertigschmiedeschritts aufgrund unterschiedlicher Vorformen

In Bild 4.15 sind die numerisch ermittelten Spannungen (v. Mises Vergleichsspannung) und Temperaturen des vergleichsweise am höchsten belasteten Obergesenks der Fertigschmiedestufe unter Verwendung einer symmetrischen und einer asymmetrischen 2. Vorform dargestellt.

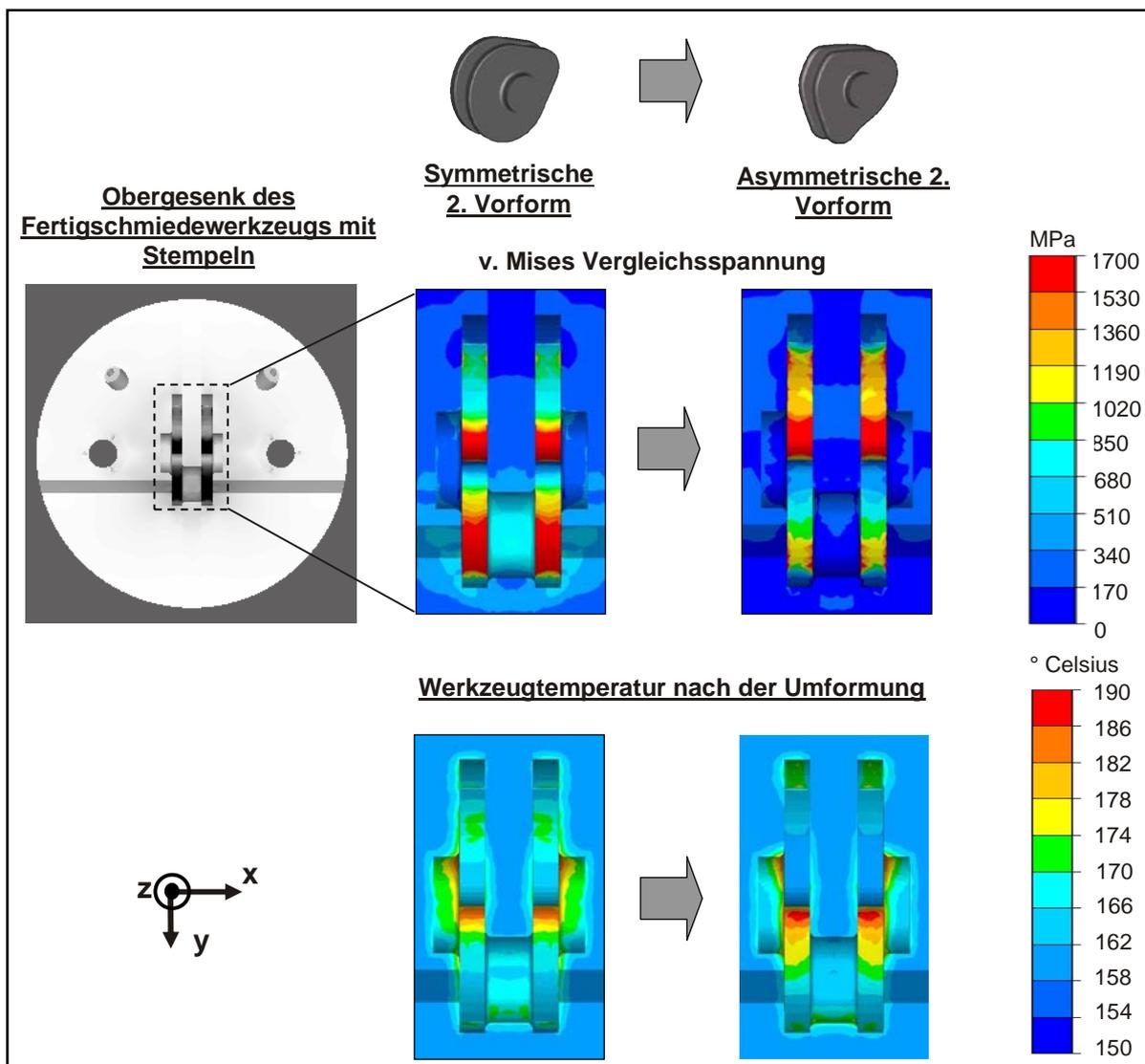


Bild 4.15: Vergleich der mechanischen und thermischen Belastungen des Fertigschmiedewerkzeugs vor und nach der Optimierung der 2. Vorform

Die Analysen werden jeweils zum Zeitpunkt der kompletten Formfüllung der Gravur durchgeführt und sind somit vergleichbar. Bei der asymmetrischen Vorformvariante werden die mechanischen Gravurbelastungen insbesondere im Pleuellagerbereich und im Bereich der Kurbelwangen um 300 bzw. 400 MPa reduziert. Die partiell auftretenden Maximalspannungen von 1.700 MPa im Kerbereich des Werkzeugs werden durch die Optimierung ebenfalls reduziert, können jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Aufgrund des geringen flächenmäßigen Anteils dieser hoch belasteten Bereiche an der Gravur kann diese Belastung akzeptiert werden, da die fertigungsbedingten Radien in der FEM-Analyse nicht berücksichtigt wurden.

Der Einfluss der Geometrieoptimierung der Vorform auf die Werkzeugoberflächentemperaturen fällt gering aus. Zwar können insbesondere an den Lagerstellen des Werkzeugs nach der Optimierung geringere Temperaturen festgestellt werden. Die Unterschiede sind jedoch so gering, dass ein Einfluss auf die thermische Werkzeugbeanspruchung nicht signifikant ist. Die geringen Auswirkungen der Optimierung auf die Werkzeugoberflächentemperatur lassen sich durch eine Betrachtung der Druckberührzeit erklären. Auf diese Weise sinkt durch die veränderte Vorformgeometrie zwar die Druckberührzeit analog zum Stempelweg um 15 Prozent. Legt man aber die in den Versuchen verwendeten Prozessparameter zu Grunde, sinkt die absolute Druckberührzeit lediglich um ca. 0,02 s. Dieser geringe zeitliche Unterschied erklärt die geringen Auswirkungen auf die Werkzeugtemperatur. Die Ergebnisse der FEM-Analyse fließen in die in Kapitel 5 beschriebene Werkzeugentwicklung ein.

4.2.6 Faserverlauf und Mittenseigerung der Einzylinderkurbelwelle

Um die Lage der Mittenseigerungszone und den Faserverlauf der Stadienfolge zu ermitteln, werden sie in einem numerischen Simulationsmodell nachgebildet. Das aus zweidimensionalen Netzen bestehende Analogiemodell ermöglicht die Verfolgung der Lageverschiebung der beiden die Bauteilfestigkeit beeinflussenden Merkmale (vgl. Bild 4.16).

Dabei zeigt sich, dass die Mittenseigerungszone dem Mittellinienverlauf (örtlicher Schwerpunkt) in guter Näherung folgt. Dies ist insbesondere auf das mehrdirektionale Vorformen zurückzuführen, das die Umlenkung der Mittenseigerungszone wesentlich beeinflusst. Die Lage der Mittenseigerungszone im Fertigteil zeigt, dass es an keiner Stelle zu einer Freilegung der Seigerung kommt. Auswirkungen der Seigerungszone auf die Bauteilfestigkeit der Einzylinderkurbelwelle sind somit nicht zu erwarten. Der untersuchte Faserverlauf zeigt keine Auffälligkeiten. Durch das mehrdirektionale Vorformen kommt es zu einer Streckung der Fasern und damit einhergehend zu einer Verzerrung des anfänglich homogenen Verlaufs. Die Auswertung lässt aber keine Faltenbildung im Bauteilinneren erkennen. Das abschließende gratlose Gesenkschmieden hat nur wenig Einfluss auf die Ausbildung des Faserverlaufs, da hier hauptsächlich ein Formstauchen in vertikaler Richtung (z-Achse) erfolgt.

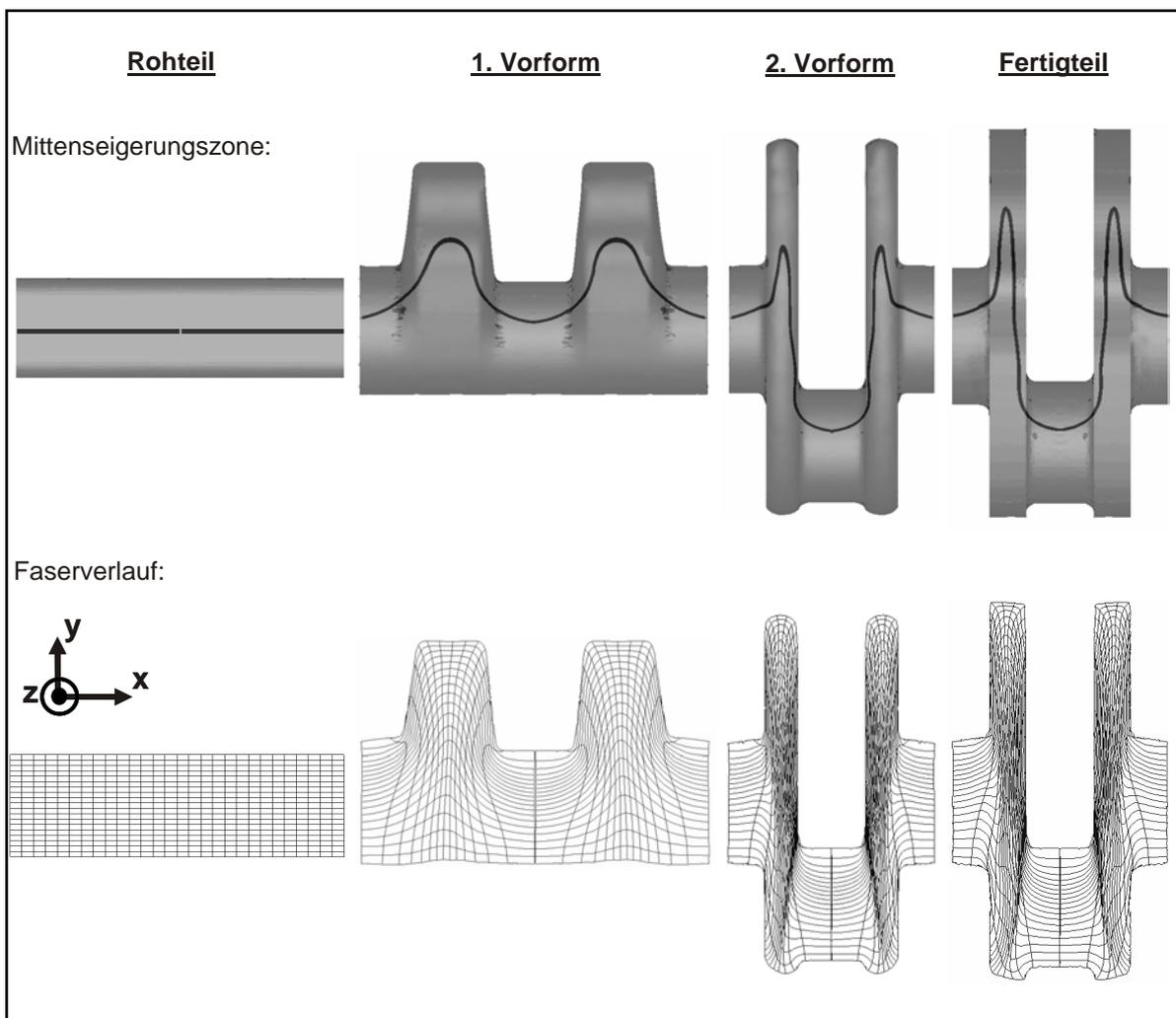


Bild 4.16: Mittenseigerungszone und Faserverlauf einer gratlos geschmiedeten Einzylinderkurbelwelle aus der FEM-Analyse

4.3 Ergebnisse der Verfahrensentwicklung

Als Beispielbauteil für die Verfahrensentwicklung wurde eine von einer PKW-Kurbelwelle abgeleitete Einzylinderkurbelwelle ohne Nebenformelemente gewählt (vgl. Absatz 4.1.1). Das entwickelte Verfahren zum gratlosen Gesenkschmieden beinhaltet eine dreistufige Stadienfolge und wendet die drei Warmumformverfahren

- Voll-Quer-Fließpressen,
- mehrdirektionales Vorformen und
- gratloses Gesenkschmieden

zur Herstellung der Stadienfolge an. Die Vorgehensweise in der Entwicklungsphase orientiert sich am *Top-Down-Ansatz*, nach dem die Verfahrensauslegung vom gewünschten Endergebnis ausgehend beginnt. In Bild 4.17 sind für die Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle die identifizierten Umformverfahren sowie die Hauptmaße der Geometrien dargestellt.

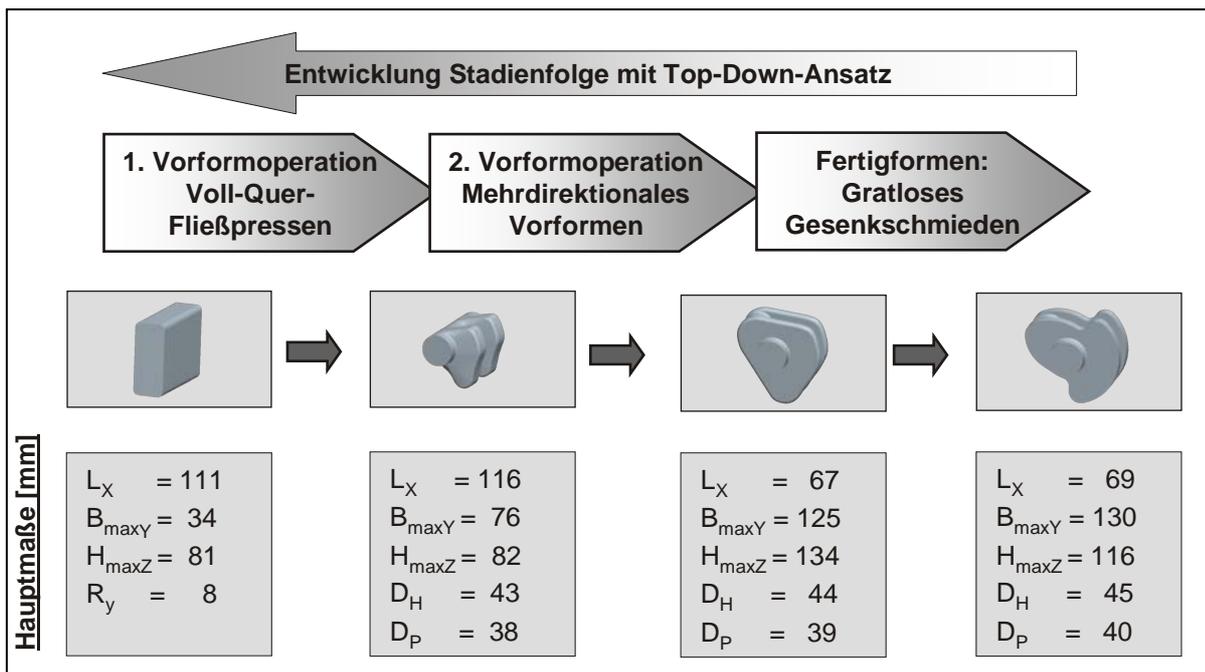


Bild 4.17: Ergebnis der Verfahrensentwicklung zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle

Aus den durchgeführten Variantenrechnungen mithilfe der FEM resultiert eine Stadienfolge, die die in Abschnitt 4.1 aufgestellten Randbedingungen vollständig erfüllt. Die mechanischen Gesenkelastungen, die Auswertung der Kraft-Wegverläufe und des Werkstoffflusses der entwickelten Stadienfolge lassen eine fehlerfreie Herstellung der Umformstufen erwarten.

Im nachfolgenden Kapitel wird auf Basis der dargestellten Untersuchungsergebnisse die Entwicklung der Schmiedewerkzeuge beschrieben.

5 Entwicklung der Werkzeugtechnologie für das gratlose Gesenkschmieden von Kurbelwellen

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der drei Umformwerkzeuge zum gratlosen Schmieden einer Einzylinderkurbelwelle beschrieben. Dabei stehen die jeweilige Werkzeugkinematik sowie Analysen der Anforderungen an das jeweilige Werkzeug im Fokus der Untersuchungen.

5.1 Anforderungen und Funktionsstruktur der Werkzeuge

Die stufenarme, gratfreie umformtechnische Herstellung einer Einzylinderkurbelwelle stellt hohe Anforderungen an die Auslegung der Werkzeugfolge. Die Werkzeuge müssen hohe Kräfte aufnehmen und robust gegenüber Prozesseinflüssen des Schmiedeprozesses (zum Beispiel hohe Temperaturen, Verschmutzung durch Zunder und Schmierstoffablagerungen) sein. Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktionsweise der Werkzeugfolge beschrieben. Bei der Entwicklung werden die in Bild 5.1 dargestellten Anforderungen berücksichtigt.

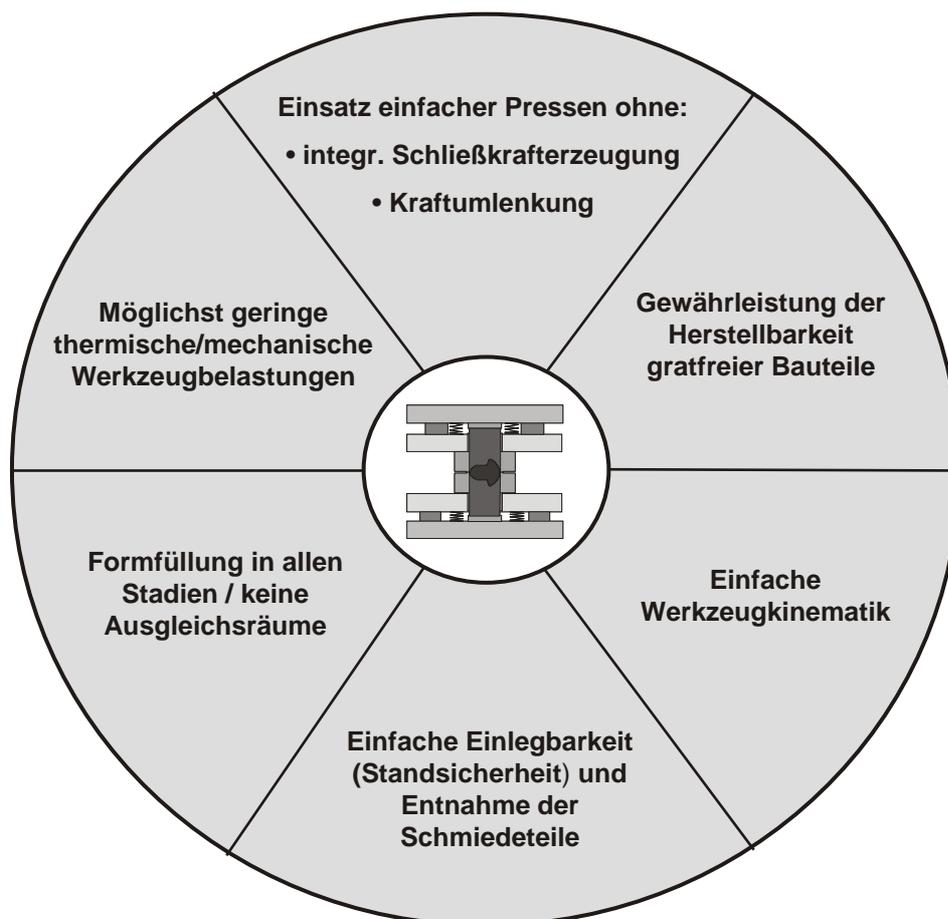


Bild 5.1: Anforderungen für die Werkzeuge der Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle

Da für die experimentellen Untersuchungen einfach wirkende Pressen ohne pressenseitige Verriegelungssysteme zur Aufbringung der Schließkraft zur Verfügung stehen, wird die Schließkraft durch einmalig verwendbare zylindrische Stababschnitte aus Aluminium aufgebracht. Diese Stauchkörper werden zwischen Gesenk und Pressentisch bzw. Pressenstößel positioniert [Alt06]. Durch den Pressenhub während des Schmiedens werden die Stauchkörper verformt; die dazu notwendige Kraft steht als Schließkraft zur Verfügung. Die Geometrie der Stauchkörper kann bezüglich der jeweils notwendigen Schließkraft angepasst werden. Alternative Systeme wie Gasdruckfedern bzw. Tellerfedern kommen bei den hier entwickelten Werkzeugen aufgrund des begrenzten Presseneinbauraums nicht infrage.

Die Modellierung der drei Gesenkgravuren berücksichtigt ein konstantes Aufmaß, welches die Schrumpfung des Werkstücks, die Werkzeugdehnungen und das Bearbeitungsaufmaß beinhaltet. In den Umformwerkzeugen mit Stempeln als formgebenden Elementen wird der Spalt zwischen den Stempeln und den Gravurdurchbrüchen konstruktiv auf umlaufend 0,05 mm eingestellt. Aufgrund des großen Einflusses der Vorformgeometrien auf das Schmiedeergebnis wird eine Formfüllung der Gravuren angestrebt.

Nach BROß [Bro99] ergeben sich für ein Werkzeug zum kostenlosen Gesenkschmieden folgende Hauptfunktionen:

- Schließen und Zuhalten bzw. Verriegeln der Gesenke,
- Positionieren und Zentrieren der Gesenke,
- Führen der beweglichen Werkzeugelemente während der Umformung,
- Armieren und Befestigen der Gesenkeinsätze,
- Einleiten der Umformkraft und
- Ausstoßen des Werkstücks.

Abgesehen von der Bereitstellung der Umformenergie und der Schließkraft, die direkt über den Maschinenstößel zur Verfügung stehen, sind maschinenseitig folgende Funktionen zu erfüllen:

- das Spannen und Positionieren des Werkzeugsystems und
- das Antreiben des Ausstoßers.

5.2 Werkzeug für das Voll-Quer-Fließpressen

In der ersten Schmiedeoperation erfolgt die Massenverteilung durch das Ausformen zweier exzentrisch angeordneter Unwuchten am Schmiedeteil. Die Lage der Unwuchten entspricht der späteren Position der Gegengewichte der Kurbelwelle. Weiterhin werden die zwei Hauptlager und das Pleuellager mit einem zum Endmaß reduzierten Durchmesser vorgeformt, um das Schmiedeteil in die nächste Umformstufe einlegen zu können. Die Asymmetrie der Kurbelwange in der yz-Ebene wird bereits in dieser ersten Umformstufe berücksichtigt.

5.2.1 Werkzeugaufbau

Zur Herstellung des Querfließpressteils wird ein Werkzeug entwickelt, das unter reproduzierbaren Bedingungen hohe Kräfte aufnehmen kann. Das Werkzeugsystem zur Vorformung muss folgenden Anforderungen genügen:

- zeitliche Trennung von „Werkzeug schließen“ und „Umformen“,
- reproduzierbares und prozesssicheres Einlegen des Rohteils,
- geringe elastische Deformationen der formgebenden Werkzeugelemente und
- Ausstoßen des Bauteils ohne Beeinflussung der gefertigten Geometrie.

Das entwickelte Werkzeug besteht aus den Hauptkomponenten Ober- und Untergesenk, Stempel, Druckplatte, Grundplatten sowie der Auswerfergruppe (Bild 5.2).

Der Werkzeugaufbau ermöglicht das Verschließen von Obergesenk und Untergesenk durch eine Relativbewegung zwischen dem Obergesenk und dem Stempel. Der Stempel ist an der oberen Grundplatte befestigt, während das Obergesenk an der Druckplatte befestigt ist. Die Säulen führen die oberen zwei Werkzeugebenen zueinander und lassen dadurch eine Relativbewegung zwischen Stempel und Gesenk zu. Ein horizontaler Versatz zwischen Ober- und Unterwerkzeug wird mit einer formschlüssigen Verbindung durch zwei Führungsbolzen ausgeschlossen. Die ebene Teilungsfuge des Gesenks erlaubt ein spaltfreies Verschließen der Gravur ohne Hinterscheidungen. Führungs- und Schließspalt im Obergesenk sind nicht voneinander getrennt. Die Temperierung der Gesenkhälften und des Stempels erfolgt mittels elektrischer Heizpatronen.

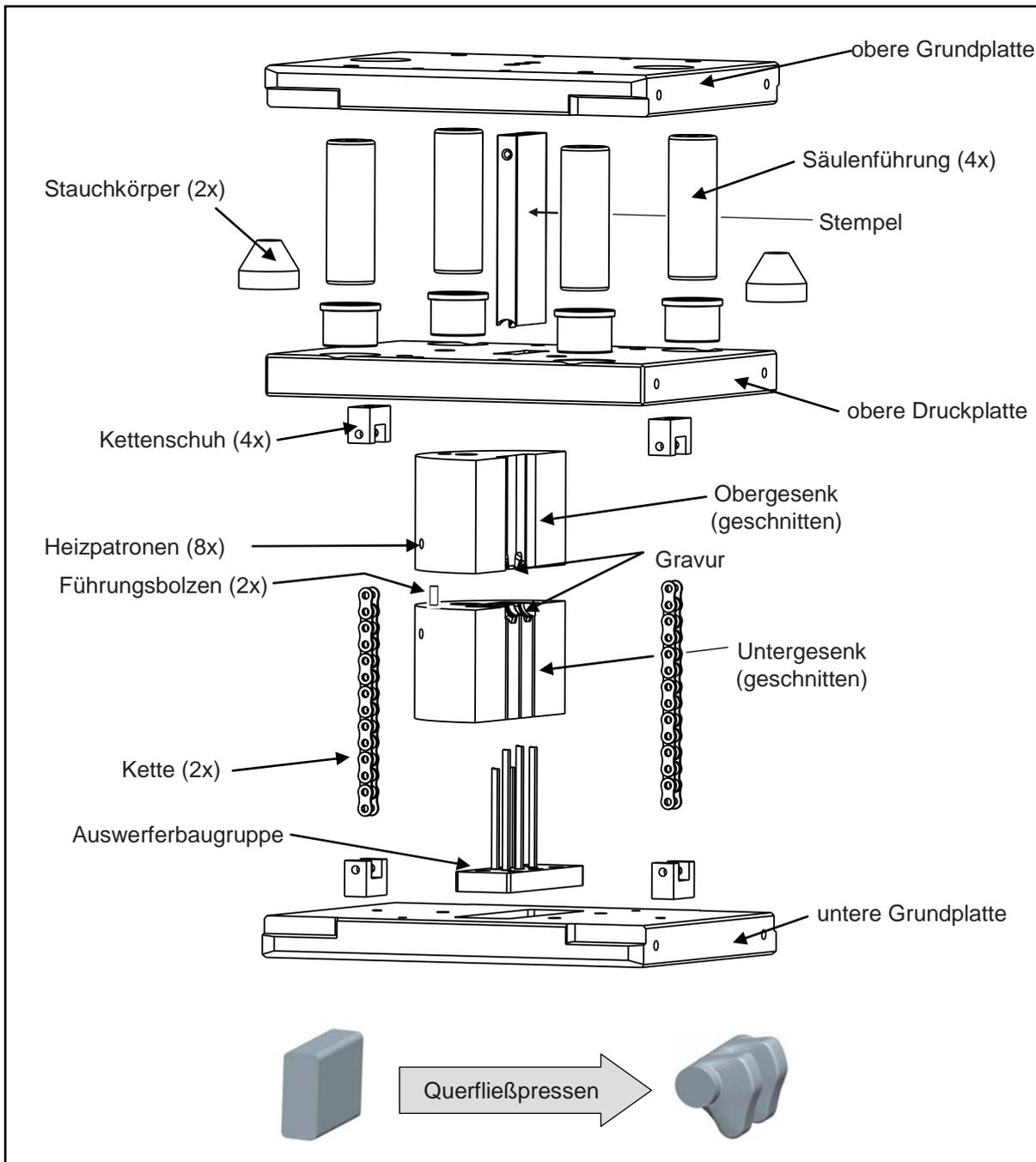


Bild 5.2: Vorformwerkzeug zur Massenverteilung für das gratlose Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle (Schnittdarstellung)

5.2.2 Werkzeugkinematik

Nach dem Einlegen des Rohteils und dem Auslösen des Pressenhubs werden zunächst die beiden Gesenkhälften zusammengefahren und bilden mit dem Umformstempel einen geschlossenen Hohlraum. Zwei Stauchkörper zwischen oberer Grundplatte und Druckplatte bringen die Schließkraft auf. SO entsteht ein kraftschlüssig geschlossenes Gesenk. Eine Umformung findet durch den Schließvorgang nicht statt. Auf diese Weise wird verhindert, dass Material zwischen die beiden Gesenk-

hälften fließt. Nach dem Schließen der Gesenke fährt der Oberstempel durch die Stößelbewegung weiter nach unten und verdrängt das Material bis zur vollständigen Formfüllung der Matrize. Die Stauchkörper halten dabei die Gravur gegen den steigenden Gesenkinnendruck geschlossen. Abschließend wird der Stempel durch das Auffahren der Presse aus dem Werkzeug zurückgezogen, die beiden Gesenkhälften werden geöffnet und die 1. Vorform wird ausgestoßen.

Dazu wird die Auswerferbaugruppe durch den Tischauswerfer der Presse nach Beendigung der Umformung kurzzeitig angehoben und ermöglicht das Entnehmen des Querfließpressteils. Anschließend drücken Federpakete die Auswerfergruppe in die Ausgangsstellung zurück. Die Oberflächen der fünf Auswerfer bilden im eingefahrenen Zustand einen Teil der Gesenkgravur. Die zwei Ketten als Verbindung zwischen der Druckplatte und der unteren Grundplatte dienen dem Absenken der Druckplatte beim Auffahren des Stößels nach dem Umformprozess.

5.3 Werkzeug für das mehrdirektionale Vorformen

Am IPH wurden in der Vergangenheit zahlreiche Untersuchungen zum mehrdirektionalen Vorformen von Langteilen durchgeführt [DBB96, Doe00], sowie verschiedene Werkzeugsysteme entwickelt und erprobt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird hier ein mehrdirektionales Werkzeugsystem entwickelt, mit dem durch Querschnittsvorbildung die 2. Vorform hergestellt werden kann. Diese Geometrie entspricht bereits weitgehend der Geometrie des Fertigteils der Einzylinderkurbelwelle.

Zur Beschreibung mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge wird folgende Definition festgelegt:

Mehrdirektionale Schmiedewerkzeuge sind Vorrichtungen, die eine gleichzeitige oder zeitlich gesteuerte Umformung eines Vormaterials bzw. einer Vorform in mindestens zwei Raumrichtungen erlauben und aufgrund ihres Werkzeugaufbaus eine Wandlung der Stößelkraft in voneinander unabhängige, gerichtete Umform- und Schließkräfte ermöglicht.

Im mehrdirektionalen Vorformschritt erfolgt eine gleichzeitige Stauch- und Schubumformoperation der 1. Vorform in mehrere Raumrichtungen. Das Werkzeug staucht die 1. Vorform in Richtung der Hauptlängsachse des Bauteils (Stoffanhäufung) und versetzt zeitgleich das Pleuellager in orthogonaler Richtung zur Hauptlängsachse um den Betrag des Kurbelhubs (Schubumformung). Der Umformvorgang wird im partiell geschlossenen Gesenk durchgeführt; lediglich die Lagerstellen des Schmiedeteils sind während des Prozesses umschlossen. Die Form der Kurbelwange bildet sich durch die gleichzeitige Stoffanhäufung und Schubumformung zwischen planen Werkzeugflächen aus und ist u. a. abhängig von

- der Geometrie der ersten Vorform,
- den Reibparametern,
- der Temperatur vom Werkzeug- und Werkstückwerkstoff und
- der Umformgeschwindigkeit.

Nur durch eine genaue Steuerung der beschriebenen Umformbewegungen führt die mehrdirektionale Vorformoperation zur gewünschten Geometrie. Eine Abweichung vom Bewegungsablauf ergäbe Schmiedefehler bzw. nicht verwendbare Vorformgeometrien durch Einschnürungen oder Falten.

5.3.1 Werkzeugaufbau

Mit dem entwickelten Werkzeug kann die quer zur Stößelrichtung ablaufende Vorformoperation auf einer einfach wirkenden Presse durchgeführt werden. Das Werkzeugkonzept erlaubt eine Bewegung der vertikalen und horizontalen Stempel bzw. Schieber sowie eine Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung in horizontale Schieberbewegungen (Bild 5.3). Die horizontale Matrizonteilung ermöglicht eine direkte Ableitung der Schließbewegung von der Stößelbewegung. Die Entkoppelung der einzelnen Bewegungen durch Stauchkörper sowie die Umlenkung der Umformkraft durch Keilgetriebe hat sich in bereits durchgeführten Untersuchungen bewährt [Alt06].

Im Hinblick auf die Entwicklung mehrdirektionaler Vorformoperationen mehrhübiger Kurbelwellen wird das Werkzeug so konstruiert, dass der radiale Achsversatz zwischen Haupt- und Pleuellager nicht in der horizontalen Ebene durchgeführt wird, sondern in einer um 30° zur Horizontalen geneigten Ebene. Auf diese Weise kann eine Anforderung von mehrdirektionalen Vorformoperationen für mehrhübige Kurbelwellen mit einem Kröpfswinkel $\neq 180^\circ$ auf ihre Umsetzbarkeit hin untersucht werden. Die Kröpfungen von Kurbelwellen dieses Typs werden zumeist durch das nach dem Schmieden stattfindende Verdrehen der Haupt- und Pleuellager in ihre endgültige Position (Twisten) hergestellt. Das mehrdirektionale Vorformen kann dazu genutzt werden, diesen Prozessschritt zu eliminieren. Aufgrund dieser Besonderheit ergibt sich ein für Keilgetriebe vergleichsweise komplexer Aufbau, der einer genauen Auslegung der Keilwinkel bedarf.

Die Funktionsweise des Werkzeugs kann wie folgt beschrieben werden (vgl. Bild 5.3): Durch die vertikale Stößelbewegung bewegt sich der obere Gesenkaufbau entlang der z-Achse. Säulenführungen (2) erlauben eine Relativbewegung im Obergesenk, durch die ein Verschließen von Ober- und Untergesenk während des Umformprozesses ermöglicht wird. Die eingeleitete Stößelkraft wird über axiale Keilgetriebe (3) und radiale Keilgetriebe (4) auf die formgebenden Werkzeugelemente in Ober- und Untergesenk übertragen. Stauchkörper (5) zwischen oberer Grundplatte und Druckplatte bringen die Schließkraft auf. Das Pleuellager wird von zwei Werkzeugkomponenten (6) umschlossen, welche in Ober- bzw. Untergesenk geführt werden.

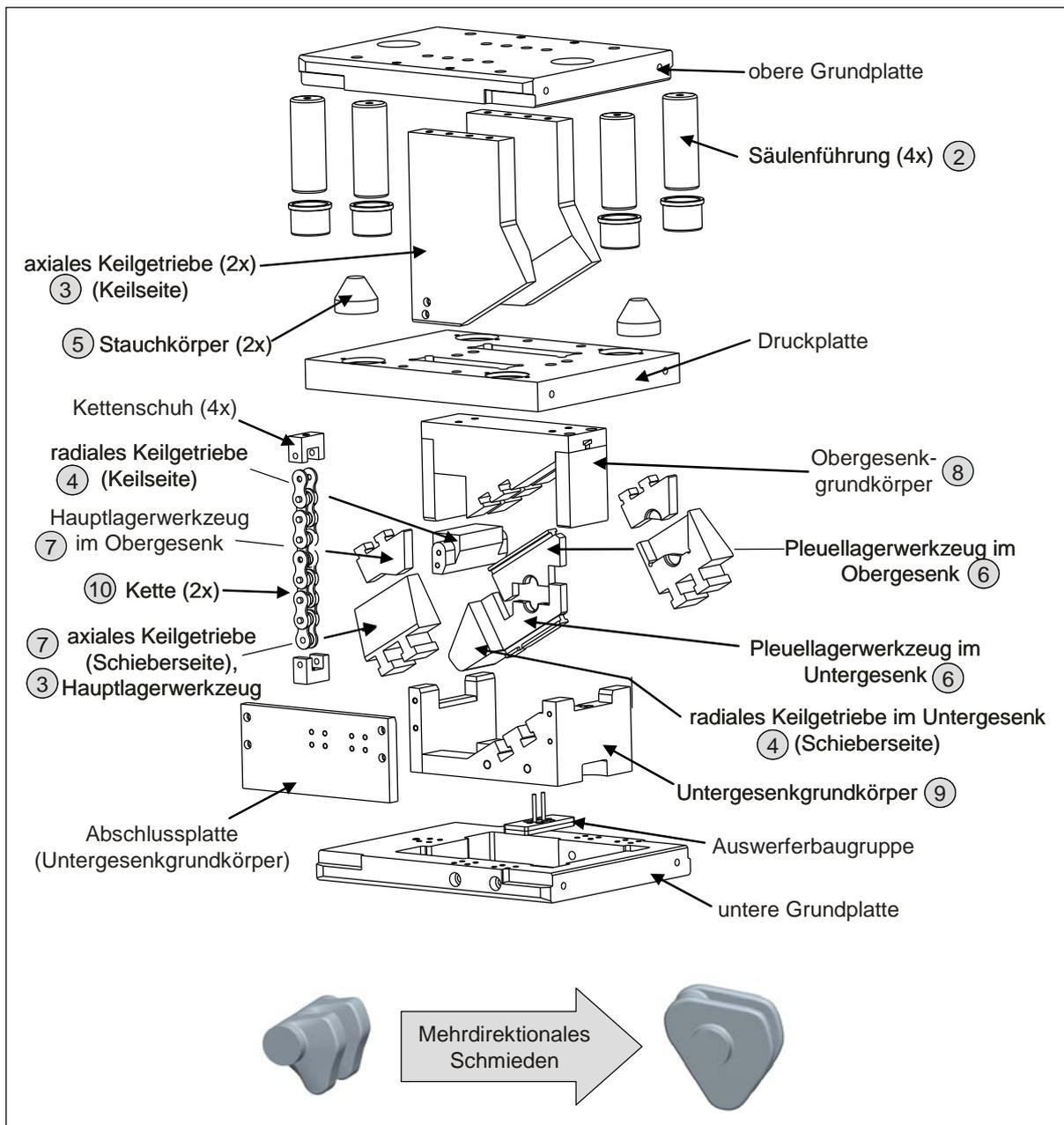


Bild 5.3: Werkzeugsystem zum mehrdirektionalen Vorformen der 2. Vorform der Einzylinderkurbelwelle

Der Antrieb zum Versatz des Pleuellagers erfolgt über das radiale Keilgetriebe (4). Die formgebenden Werkzeugkomponenten zur Stoffanhäufung in axialer Richtung (7) umschließen das Schmiedeteil an den zwei Hauptlagerstellen. Die Unwuchten befinden sich zwischen den drei formgebenden Werkzeugplatten und werden während des Schmiedevorgangs in axialer Richtung gestaucht. Sämtliche beweglichen Werkzeugkomponenten werden in dem Ober- bzw. Untergesenkgrundkörper (8,9) durch Gleitführungen geführt. Analog zum Werkzeug für das Voll-Quer-Fließpressen dienen Gliederketten (10) zwischen der Druckplatte und der unteren Grundplatte zur Reposi-

tionierung des Obergesenkgrundkörpers nach dem Umformvorgang. Die Entnahme des Schmiedeteils erfolgt durch das Ausfahren der Auswerfer.

Die Kontaktflächen der Keilgetriebe werden zur Verschleißreduzierung lasergehärtet. An den hoch belasteten Gleitflächen der Keilgetriebe werden Flachleisten aus Mehrstoffbronze angebracht. Die Temperierung des Gesenks erfolgt mittels elektrischer Heizpatronen.

5.3.2 Werkzeugkinematik

In Bild 5.4 wird die Kinematik der Werkzeugkomponenten dargestellt. Der Untergesenkgrundkörper (Linie D) ist unbeweglich und führt die unteren Komponenten des Werkzeugs. Der Obergesenkgrundkörper (Linie A) bewegt sich durch die Stößelabwärtsbewegung nach unten und verharrt während der Umformung zum Aufbringen der Schließkraft auf dem Untergesenkgrundkörper.

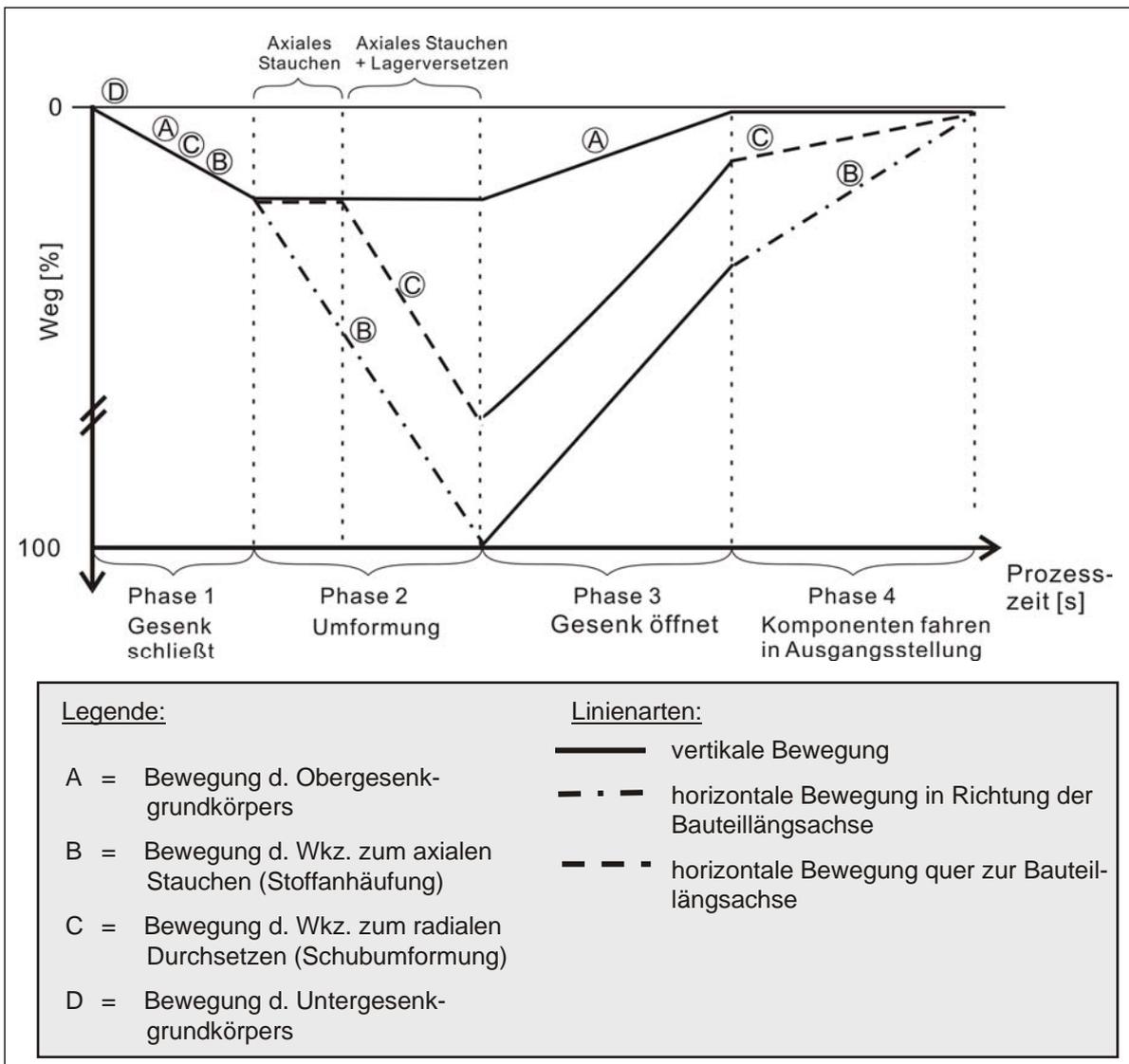


Bild 5.4: Kinematik wichtiger Komponenten des mehrdirektionalen Schmiedewerkzeugs der Einzylinderkurbelwelle

Die Keilseiten des axialen und radialen Keilgetriebes im Obergesenkaufbau (Linien B und C) fahren in Relativbewegung zum Obergesenkgrundkörper nach unten und treiben die Schieberseiten der Getriebe an.

Nach dem Aufsetzen des Obergesenkgrundkörpers auf das Untergesenk bewegen sich die axial wirkenden Werkzeugkomponenten (angetrieben durch den axialen Antrieb) in Richtung der Kurbellagerachse und führt die axiale Stauchbewegung aus. Die radial wirkenden Werkzeugkomponenten bewegen sich zur selben Zeit (angetrieben durch den radialen Keilantrieb) quer zur Kurbellagerachse und führen die Bewegung zum Versetzen des Pleuellagers aus. Der axiale Hub ist aufgrund der Länge des Stauchweges größer als der radiale Hub zum Pleuellagerversatz.

Damit die Bewegung aller Werkzeugkomponenten zur gleichen Zeit endet, werden für den axialen und radialen Antrieb unterschiedliche Keilwinkel errechnet. Dadurch ergibt sich eine ungleiche Geschwindigkeit der axial und radial wirkenden Werkzeugkomponenten. Nach dem Durchlaufen des unteren Totpunkts bewegt sich der Obergesenkgrundkörper wieder nach oben. Abschließend erfolgt die manuelle Repositionierung der Werkzeugkomponenten im oberen Totpunkt.

5.3.3 Auslegung des Keilantriebs zur Schubumformung

Ziel der Auslegung des Keilantriebs ist die Ermittlung des bezogen auf den Kraftbedarf optimalen Keilwinkels. Dabei wird berücksichtigt, dass das Werkzeug zwei weitere Keilgetriebe zur Umformung der 2. Vorform in axialer Richtung besitzt. Reibkräfte, die in anderen Teilen des Werkzeugs auftreten und damit indirekt den Wirkungsgrad des Werkzeugs beeinflussen, werden durch entsprechende Annahmen bei der Berechnung berücksichtigt.

In Bild 5.5 werden die numerisch ermittelten Prozesskräfte zum mehrdirektionalen Vorformen der 2. Vorform mit logarithmischer Skala dargestellt. Die Schubumformkraft zum Durchsetzen des Pleuellagers ist mit ca. 310 kN im Vergleich zur Stauchkraft mit ca. 4.300 kN vergleichsweise gering. Der unregelmäßige Anstieg der Schließkraft lässt sich durch die stark zunehmende Stauchkraft zu Beginn des Prozesses erklären: Durch das Anstauchen kommt es in den Lagerstellen zu einer Vergrößerung der Lagerdurchmesser, was wiederum zu einem steigenden Gesenkinnenndruck führt. Der zeitlich verzögerte Anstieg der Schubumformkraft ist durch eine sequentielle Krafteinleitung in die zwei unterschiedlichen Keilgetriebe zu erklären; vor Beginn der Schubumformung findet eine geringfügige Stauchung der Vorform statt, um durch die Stoffanhäufung genügend Material für die Schubumformung an den Wirkstellen zur Verfügung zu stellen.

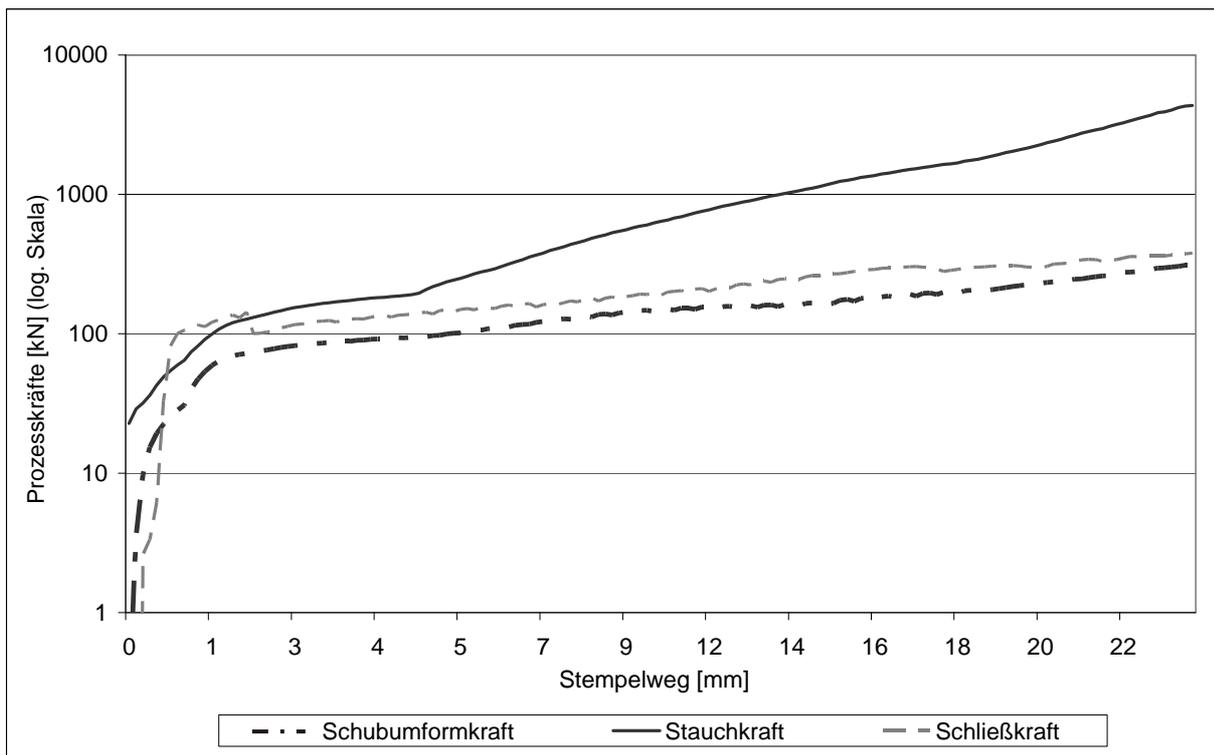


Bild 5.5: Mehrdirektionales Vorformen: numerisch ermittelte Prozesskräfte

Aus der numerischen Auslegung der 2. Vorform sind somit folgende Prozesskräfte bekannt:

- Schubumformkraft (Schubumformung): $F_{Tmax} = 310 \text{ kN}$
- Schließkraft: $F_{Cmax} = 380 \text{ kN}$
- Stauchkraft (Stoffanhäufung): $F_{Fmax} = 4.300 \text{ kN}$

Als Umformaggregat soll eine ölhydraulische Presse mit einer max. Presskraft F_{Pmax} von 12.500 kN verwendet werden. Dabei wird unter Berücksichtigung der Prozesssicherheit sowie einem angenommenen Wirkungsgrad der Presse von 80 Prozent die maximale Presskraft des Aggregats mit $F_{Pmax} = 10.000 \text{ kN}$ angenommen.

Anhand dieser Daten lassen sich die optimalen Keilwinkel für die Keilantriebe zur Stoffanhäufung und Schubumformung errechnen. Dazu wird zunächst die notwendige Gesamtkraft F_G zur Umformung des Bauteils ohne die Berücksichtigung von Reibungseinflüssen berechnet:

$$F_G = F_{Tmax} + F_{Cmax} + F_{Umax} \quad (3)$$

$$F_G = 310 \text{ kN} + 380 \text{ kN} + 4.300 \text{ kN}$$

$$F_G \approx 5.000 \text{ kN}$$

Demnach werden lediglich 50 Prozent der zur Verfügung stehenden Presskraft des Aggregats für die Umformung benötigt. Der Einsatz einer möglichst großen Presskraft bietet den Vorteil, dass sich bei der Auslegung der Keilgetriebe der maximal

mögliche Keilwinkel einstellt. Dies führt zu einer ausgewogenen Verteilung der Stütz- und Reibkräfte.

Daher soll die Presskraft des Aggregats mit $F_{Pmax} = 10.000 \text{ kN}$ vollständig genutzt werden. Auf dieser Basis errechnet sich die für die Schubumformung zur Verfügung stehende Antriebskraft nach:

$$F_A = F_{Tmax} \times (F_{Pmax} / F_G) \quad (4)$$

$$F_A = 310 \text{ kN} \times 2$$

$$F_A = 620 \text{ kN}$$

In Bild 5.6 werden die am Keilgetriebe zur Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung wirkenden Kräfte unter Berücksichtigung der Reibverhältnisse dargestellt.

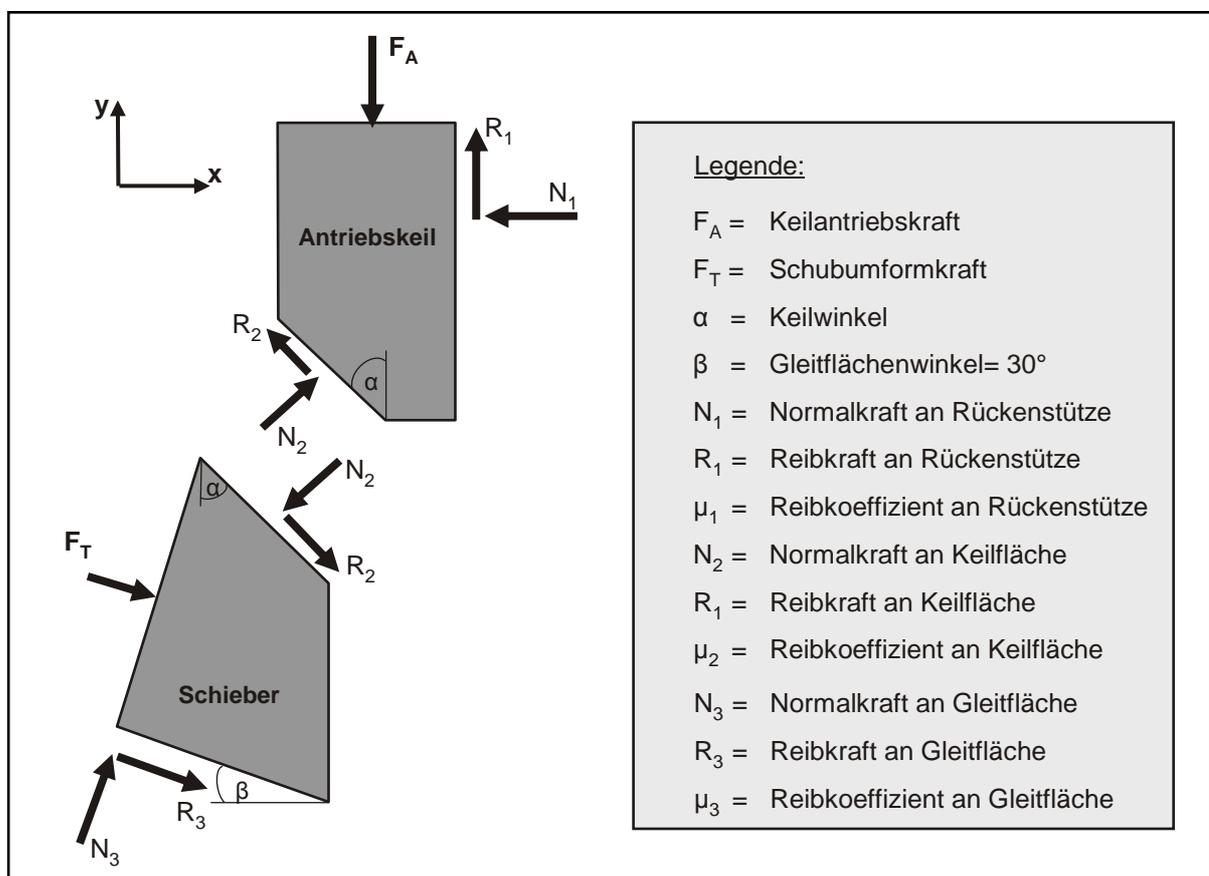


Bild 5.6: Darstellung der am Keilgetriebe wirkenden Kräfte

Aufbauend auf der Arbeit von HUSTEDT [Hus03] kann die Auslegung des Keilwinkels α unter Beachtung der oben angegebenen Anforderungen erfolgen. Der hier als Gleitflächenwinkel bezeichnete Winkel $\beta = 30^\circ$ wird für die Betrachtung als fix angenommen, da er die durch den Kröpfungswinkel hervorgerufene Kippung der Schubumformrichtung gegenüber der horizontalen Ebene darstellt.

Durch Aufstellen des Kräftegleichgewichts am Antriebskeil in y-Richtung ergibt sich:

$$F_A = R_1 + N_2 \sin \alpha + R_2 \cos \alpha \quad (5)$$

Durch Aufstellen des Kräftegleichgewichts am Antriebskeil in x-Richtung ergibt sich:

$$N_1 = N_2 \cos \alpha - R_2 \sin \alpha \quad (6)$$

Mit $R_1 = \mu_1 N_1$ und $R_2 = \mu_2 N_2$ ergibt sich durch Einsetzen von (6) in (5):

$$F_A = N_2 ((\mu_1 + \mu_2) \cos \alpha + (1 - \mu_1 \mu_2) \sin \alpha) \quad (7)$$

Durch Aufstellen des Kräftegleichgewichts am Schieber in x-Richtung ergibt sich:

$$F_T \cos \beta = N_2 \cos \alpha - R_2 \sin \alpha - R_3 \cos \beta - N_3 \sin \beta \quad (8)$$

Mit $R_3 = \mu_3 N_3$ ergibt sich durch Einsetzen in (8):

$$F_T \cos \beta = N_2 (\cos \alpha - \mu_2 \sin \alpha) - N_3 (\mu_3 \cos \beta + \sin \beta) \quad (9)$$

Durch Aufstellen des Kräftegleichgewichts am Schieber in y-Richtung ergibt sich:

$$N_2 \sin \alpha + R_2 \cos \alpha = -F_T \sin \alpha + N_3 \cos \beta - R_3 \sin \beta \quad (10)$$

Mit $R_2 = \mu_2 N_2$ und $R_3 = \mu_3 N_3$ ergibt sich durch Einsetzen in (10):

$$N_2 (\sin \alpha + \mu_2 \cos \alpha) = -F_T \sin \alpha + N_3 (\cos \beta - \mu_3 \sin \beta) \quad (11)$$

Durch Umstellen nach N_3 erhält man: (12)

$$N_3 = N_2 \frac{\sin \alpha + \mu_2 \cos \alpha}{\cos \beta - \mu_3 \sin \beta} + F_T \frac{\sin \beta}{\cos \beta - \mu_3 \sin \beta}$$

Durch Einsetzen von (12) in (11) erhält man durch trigonometrische Vereinfachungen und Additionstheoreme:

$$F_T = N_2 (\cos (\alpha + \beta) (1 - \mu_2 \mu_3) - \sin (\alpha + \beta) (\mu_2 + \mu_3)) \quad (13)$$

Durch Einsetzen von (9) in (13) erhält man schließlich: (14)

$$F_T = F_A \frac{\cos (\alpha + \beta) (1 - \mu_2 \mu_3) - \sin (\alpha + \beta) (\mu_2 \mu_3)}{(\mu_1 + \mu_2) \cos \alpha + (1 - \mu_1 \mu_2) \sin \alpha}$$

Zur Berechnung des optimalen Keilwinkels werden übliche Gleitreibungskoeffizienten für die Reibpaarung Stahl-Stahl angenommen. So werden für μ_1 und μ_2 der Wert $\mu_{1,2} = 0,08$ und für μ_3 der Wert $0,15$ angenommen. Der an der Gleitfläche 3 höhere

Wert für μ_3 wird gewählt, da es aufgrund von Verschmutzungen im Betrieb zu Verunreinigungen der Gleitfläche kommen kann, die zu einer höheren Reibung führen können. Der für die oben genannten Randbedingungen optimale Keilwinkel α lässt sich nun iterativ durch Verwendung der Formel (14) sowie die hergeleiteten Werte für μ_1 bis μ_3 und F_A bestimmen. Dabei ist es das Ziel, dass die zur Verfügung stehende Schubumformkraft größer ist als die numerisch ermittelte erforderliche Schubumformkraft $F_{T_{\max}} = 310 \text{ kN}$.

In Bild 5.7 wird der Verlauf der Schubumformkraft über den Keilwinkel mit den zuvor hergeleiteten Parameterwerten abgebildet. Unter den aufgezeigten Randbedingungen kann demnach die erforderliche Schubumformkraft mit einem Keilwinkel von $\alpha \leq 30^\circ$ erreicht werden. Da bereits eine Sicherheit bei der Annahme der zur Verfügung stehenden Presskraft eingerechnet wurde, kann der Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ für die Schubumformung zur Versetzung des Pleuellagers gewählt werden.

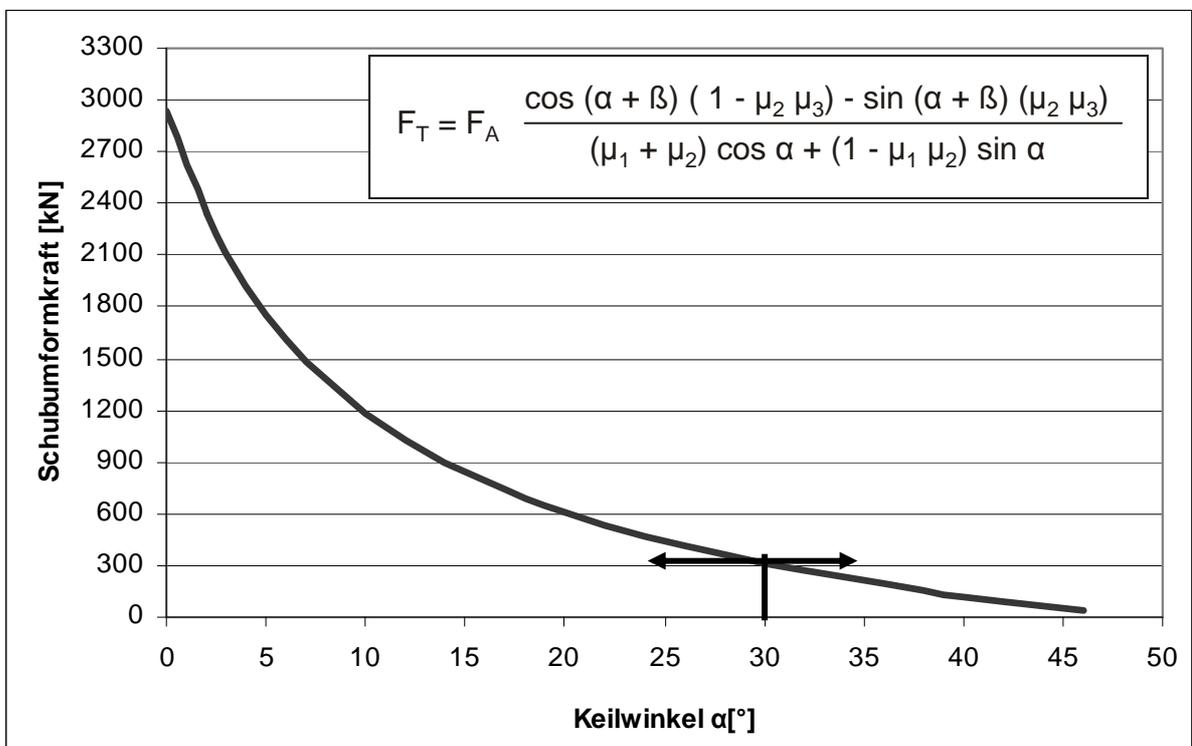


Bild 5.7: Kraftverlauf der Schubumformkraft zum Versatz des Pleuellagers bei konstanter Antriebskraft und Gleitflächenwinkel von 30°

5.4 Werkzeug für das gratlose Gesenkschmieden

Beim abschließenden gratlosen Gesenkschmieden findet die Fertigformung des Bauteils statt. Die Formfüllung der Matrize wird durch die gegenläufige Umformbewegungen der vier Stempel in vertikaler Richtung erreicht. Dabei wird Masse aus der Kurbelwangenhöhe in die Lagerstellen und die Breite der Kurbelwangen überführt. Die gegenläufigen Stempelbewegungen können aufgrund des Werkzeugaufbaus mit

unterschiedlicher Geschwindigkeit erfolgen. Diese stellen sich nach dem Prinzip des gleichmäßigen Umformwiderstandes selbstregelnd ein.

5.4.1 Werkzeugaufbau

Das Werkzeug besteht aus Ober- und Unterwerkzeug mit den vier Hauptbaugruppen (Bild 5.8):

- obere Grundplatte als Schnittstelle zum Maschinenstößel,
- Obergesenk mit Druckplatte,
- Untergesenk mit Druckplatte und
- untere Grundplatte als Schnittstelle zum Maschinentisch.

Die Einleitung der Umformkraft in die 2. Vorform erfolgt über die vier auf den Druckplatten fixierten Ober- und Unterstempel. Weiterhin sind auf den zwei Grundplatten Säulenführungen befestigt, die die Entkoppelung von Grundplatte und Ober- bzw. Untergesenk ermöglichen. Dadurch wird eine Relativbewegung zwischen den Stempeln und den Gesenken erreicht, die die Einleitung der Schließkraft auf das Gesenk ermöglichen. Die Säulenführungen nehmen zudem im Prozess entstehende Querkräfte auf und leiten sie in die Maschine.

Die Schließkraft wird über je zwei Aluminium-Stauchkörper aufgebracht, die zwischen den Grund- und Druckplatten positioniert werden. Die Temperierung des Gesenks erfolgt mittels elektrischer Heizpatronen. Zwischen Ober- und Untergesenk befinden sich Zentriervorrichtungen, die eine versatzfreie Ausrichtung der Gesenkhälften ermöglichen. Die beidseitig der Gesenke als Verbindung der Druckplatten vorhandenen Ketten sorgen nach dem erfolgten Schmiedevorgang für das Anheben bzw. Absenken des Unter- und Obergesenks. Das Auswerfen der in einer Gesenkhälfte verbleibenden Einzylinderkurbelwelle geschieht über das Auspressen aus der Gravur durch die Stempel. Die einstufige Teilung der Gesenke erlaubt unter Einstellung des Schließdrucks durch die Stauchkörper ein spaltfreies Verschließen der Gravur. Ein Führungs- und Schließspalt tritt lediglich an den beweglichen Werkzeugelementen zwischen Umformstempeln und Gravur auf.

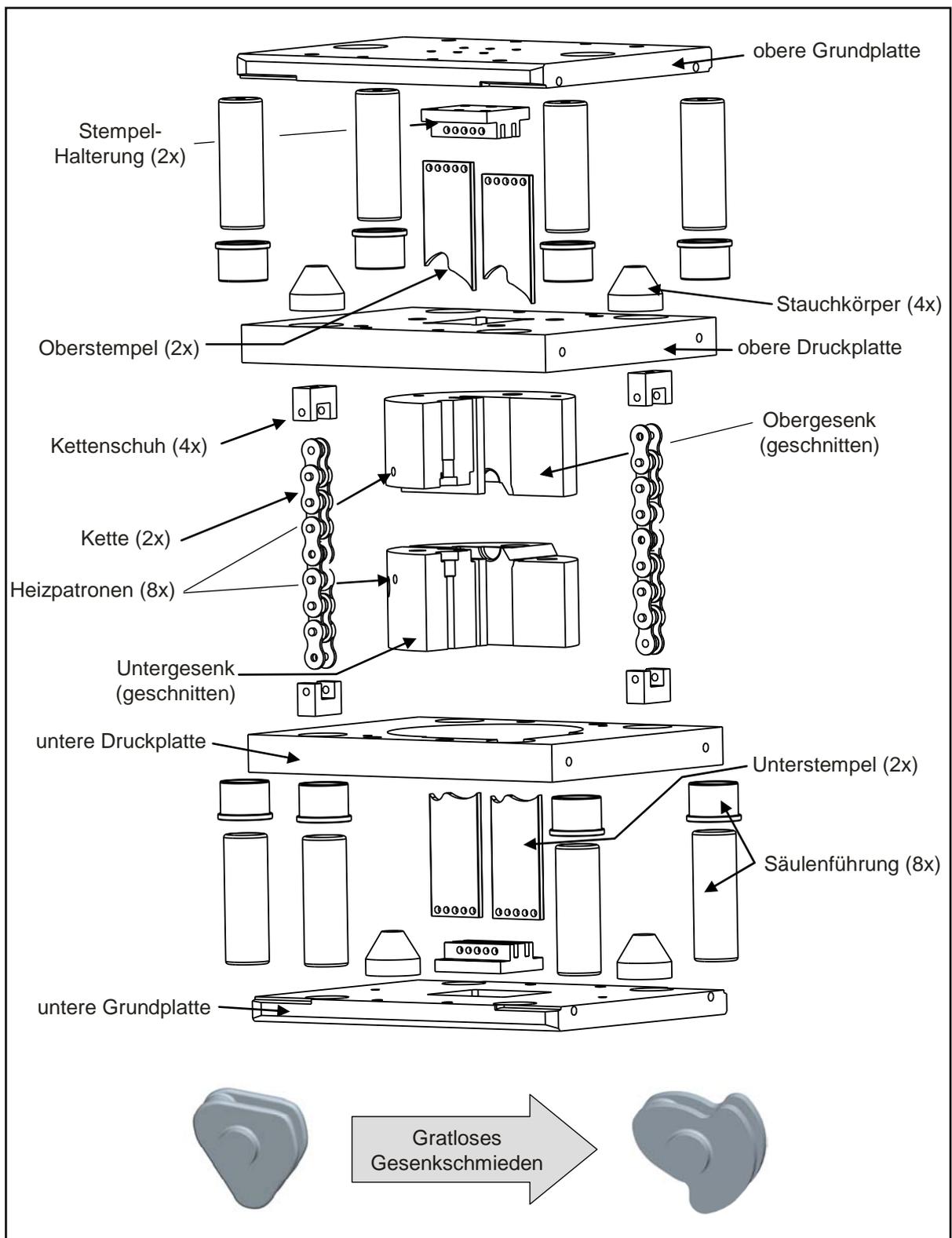


Bild 5.8: Werkzeugsystem zum gratlosen Gesenkschmieden der Einzylinderkurbelwelle

5.4.2 Werkzeugkinematik

Die Kinematik des gratlosen Gesenkschmiedewerkzeugs lässt sich wie im Diagramm (Bild 5.9) dargestellt beschreiben: In der ersten Phase fährt die Presse nach dem Auslösen des Schmiedehubs nach unten, wobei die Gesenkhälften durch die Stauchkörper gegeneinander verschlossen werden (Phase 1). Anschließend bewegen sich die Gesenke und der obere Stempel weiter abwärts und formen dabei das Schmiedegut bis zum Erreichen des unteren Totpunkts (UT) um (Phase 2).

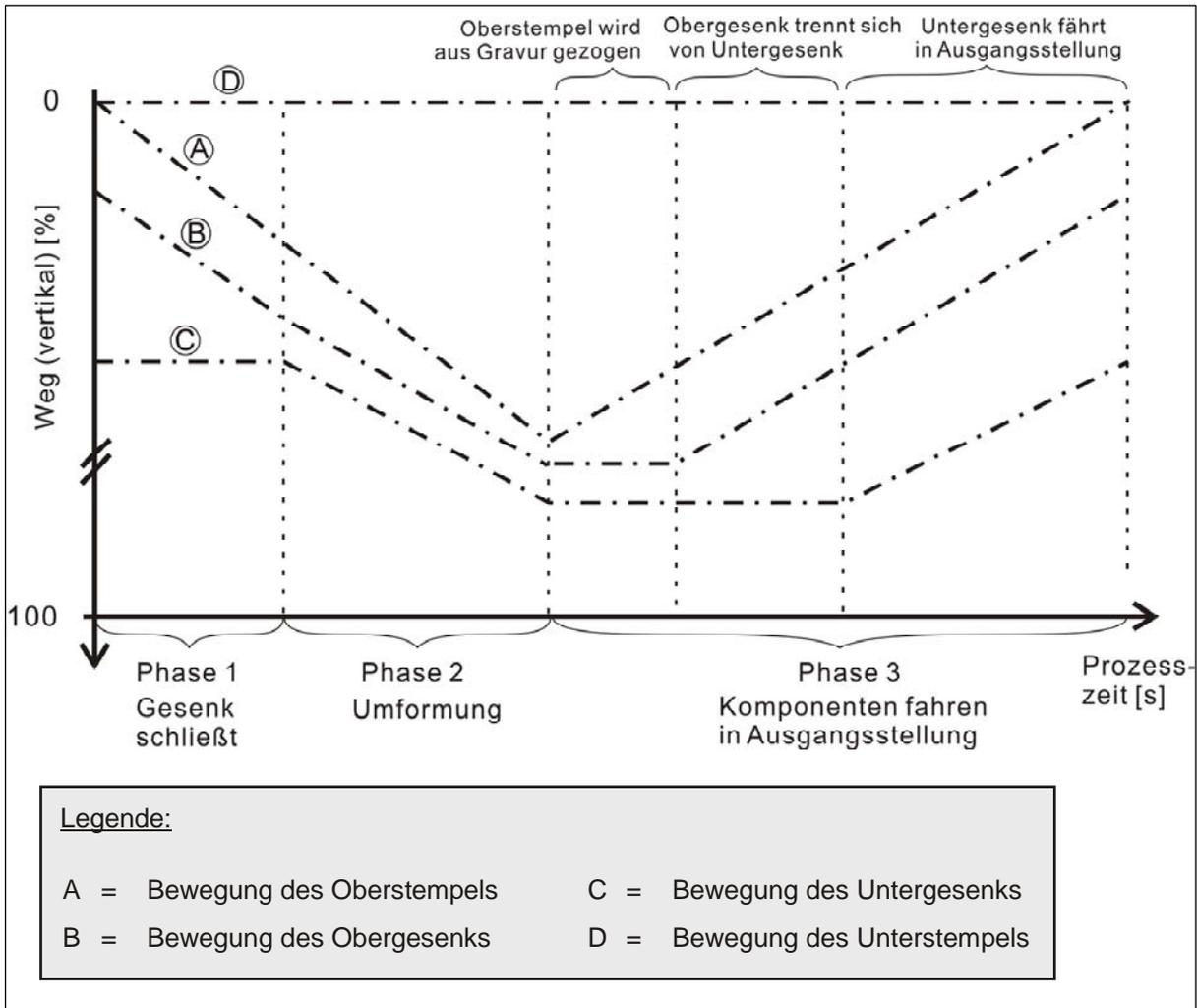


Bild 5.9: Kinematik der Werkzeugkomponenten zum gratlosen Gesenkschmieden der Einzylinderkurbelwelle

Nach der Umformung bewegen sich der Stößel und die an ihm befestigten Oberstempel aufwärts (Phase 3). Durch die an den Druckplatten befestigten Gliederketten trennt sich abschließend das Ober- vom Untergesenk, sodass sich das Werkzeug wieder in Ausgangsstellung befindet. Im nachfolgenden Schritt erfolgt das Ausstoßen des Fertigteils durch die Stempel.

6 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle erfolgen unter Laborbedingungen in den Versuchsfeldern des IPH und des IFUM. Nach der Realisierung des Werkzeugsystems, das die Fertigung und Herstellung aller Werkzeugelemente sowie die Montage beinhaltet, wird ein grundlegender Funktionstest der Werkzeuge und Anlagen durchgeführt. Im Folgenden werden der Versuchsaufbau sowie die Durchführung der Versuche beschrieben.

6.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau sieht vor, die drei entwickelten Umformwerkzeuge hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit zur Herstellung einer gratlos geschmiedeten Einzylinderkurbelwelle zu untersuchen. Weiterhin wird die geschmiedete Stadienfolge anhand des numerischen Prozessmodells überprüft und die Bauteilqualität der Schmiedeteile bewertet. Während der Versuche werden einzelne Prozesskräfte messtechnisch erfasst.

Für die Versuchsdurchführung werden folgende Anlagen genutzt:

- Voll-Quer-Fließpressen und gratloses Gesenkschmieden: direkt angetriebene Spindelpresse mit 100 kJ Arbeitsvermögen,
- mehrdirektionales Vorformen: ölhdraulische Presse mit einer maximalen Stößelkraft von 12.500 kN,
- elektrischer Kammerofen zur Erwärmung der Bauteile,
- Kühlschmiereinrichtung,
- Pyrometer,
- Thermografiekamera und
- Kraft- und Wegmesssensoren.

Die technischen Daten der Schmiedeaggregate sind den Anhängen A1 und A2 zu entnehmen.

Die direkt angetriebene Spindelpresse ist aufgrund ihrer Funktionsweise und ihrer Kennliniencharakteristik gut für gratlose Gesenkschmiedeprozesse geeignet, da - anders als bei weggebundenen Pressen - eine Überlastung des Antriebs ausgeschlossen ist. Um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten, wird der Stößel im unteren Umkehrpunkt auf feste Anschläge gefahren. Für das mehrdirektionale Vorformen wurde eine ölhdraulische Presse eingesetzt. Dieser Pressentyp bietet für das mehrdirektionale Vorformen den wesentlichen Vorteil, dass eine gleichmäßige Kraft zu jedem Zeitpunkt der Umformung zur Verfügung steht. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Stößelgeschwindigkeit zu wählen und den Schmiedeprozess zu jedem Zeitpunkt zu unterbrechen.

Für die Versuche wird ein für Kurbelwellen üblicher Werkstoff C45 (Werkstoff-Nr. 1.0503) verwendet [Bas06]. Die im Rahmen der Versuchsdurchführung verwendeten Rohteile weisen Masseschwankungen von max. $\pm 0,1$ Prozent auf.

Alle formgebenden Werkzeugkomponenten werden aus Warmarbeitsstahl (Werkstoff-Nr. 1.2367) hergestellt und im vergüteten Zustand verwendet. Der gewählte Härtebereich von 52 + 2 HRC lässt eine ausreichende Härte bei guter Zähigkeit erwarten.

Als Gesenkschmierstoff wird eine Wasser/Graphit-Suspension Typ Delta F31 (Firma Acheson) verwendet und über eine Sprühpistole aufgebracht. Durch die Integration elektrischer Heizelemente in die Schmiedewerkzeuge kann die Temperaturverteilung im Werkzeug schon vor dem Anlauf der Prozesse so eingestellt werden, dass sich die Spaltmaße bereits bei der Schmiedung der ersten Bauteile im tolerierten Bereich befinden. Eine Stirngratbildung kann insofern ausgeschlossen werden.

Die Oberflächentemperatur der Werkzeuge wird durch regelmäßige Thermografieaufnahmen überwacht. Die Bauteiltemperatur wird über die Ofentemperatur eingestellt. Bedingt durch den sehr kurzen Transportweg im Versuchsbetrieb und die relativ große Bauteilmasse entspricht die Ofentemperatur annähernd der Schmiedetemperatur. Die genaue Einlegeposition der Rohteile und Vorformen wird mit Zentrierhilfen sichergestellt.

Die drei Umformwerkzeuge müssen aufgrund der zur Verfügung stehenden Ausstattung nacheinander in die Schmiedepressen eingebaut werden. Daher sind zwei Zwischenerwärmungen notwendig. Die Werkstücke werden zur Verringerung der Verzunderung nacheinander unter Schutzgasatmosphäre auf eine Temperatur von 1.250 °C erwärmt, geschmiedet und in Sand abgekühlt. Nach Abschluss der jeweiligen Versuchsreihe erfolgen ein Umbau der Werkzeuge und anschließend eine weitere Versuchsreihe mit den wiedererwärmten Werkstücken. Der Bauteiltransfer sowie Kühlung als auch Schmierung werden manuell gehandhabt.

6.2 Umformversuche zum Voll-Quer-Fließpressen

Die Verifikation der Voll-Quer-Fließpressoperation (vgl. Abschnitt 5.2) wird mit einer einfach wirkenden, energiegebundenen Spindelpresse durchgeführt. Zur Prozessüberwachung wird die Stempelkraft über die am Stempel angebrachte DMS aufgezeichnet (Bild 6.1).

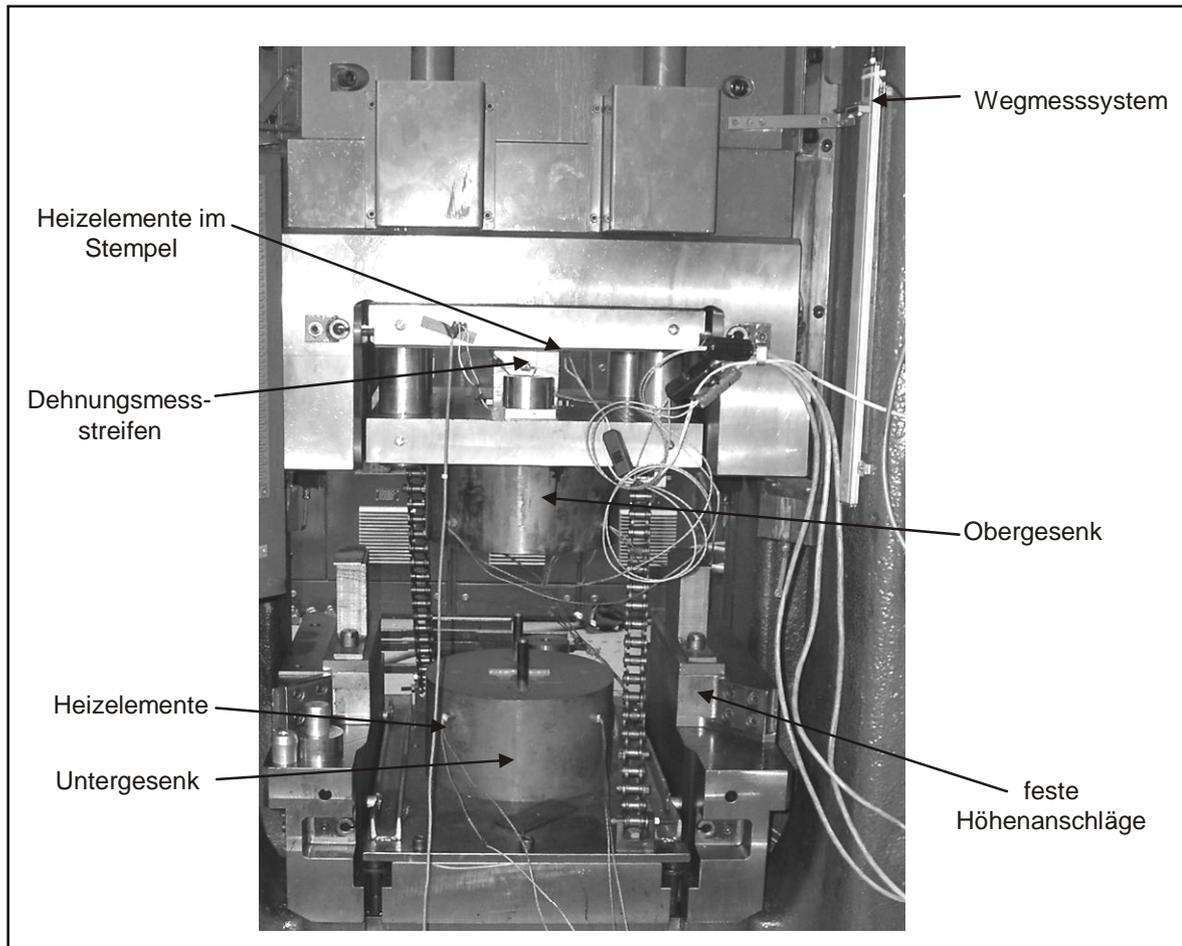


Bild 6.1: Versuchsaufbau zum Voll-Quer-Fließpressen der 1. Vorform der Einzylinderkurbelwelle

In Bild 6.2 ist das Schmiedeergebnis der Umformversuche des Voll-Quer-Fließpressens abgebildet. Bei der visuellen Kontrolle der geschmiedeten Bauteile können keine Schmiedefehler wie beispielsweise Risse oder oberflächliche Falten festgestellt werden. Die am Schmiedeteil erkennbare Naht entsteht durch die Abbildung der Teilungsebene des Werkzeugs. Diese Naht hat in ihrer Dimension allerdings eine so geringe Ausprägung, dass diese Formabweichung nicht zu einer Beeinträchtigung des Bauteils während der nächsten Schmiedeschritte führt. Die Formfüllung der Matrize erfolgt weitgehend vollständig; an den geschmiedeten Bauteilen tritt keine Gratbildung auf.

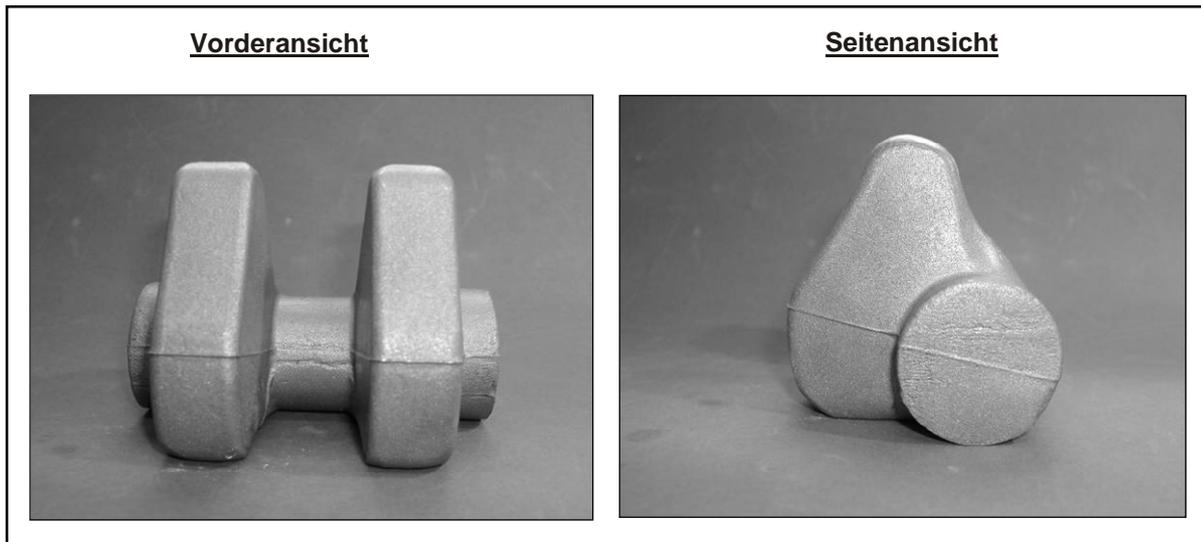


Bild 6.2: Gratlos geschmiedete 1. Vorform, Werkstoff-Nr. 1.0503, Schmiedetemperatur 1.250 °C, sandgestrahlt

Bild 6.3 stellt die messtechnisch und numerisch ermittelten Prozesskräfte beim Voll-Quer-Fließpressen dar. Die Schließkraft und Stößelkraft können aufgrund des Versuchsaufbaus (Aufbringen der Schließkraft durch Stauchkörper) bzw. der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik nicht gemessen werden und sind daher nur aus der FEM-Analyse bekannt.

Die Kraftverläufe der gemessenen und der numerisch ermittelten Stempelkraft steigt auf einen Betrag von ca. 1.900 kN bzw. 1.600 kN an. Die numerisch errechnete Schließkraft bewegt sich während des gesamten Umformprozesses auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau bei einem Maximalwert von ca. 250 kN. Wie für Schmiedeoperationen im geschlossenen Gesenk üblich, steigen die Kräfte zum Ende des Umformvorgangs aufgrund des Anstiegs des Gesenkinnendrucks durch die zunehmende Formfüllung und den damit einhergehenden erhöhten Fließwiderstand an. Der beim Stempelweg von 5 mm erkennbare Wendepunkt in der Stößelkraftkurve liegt in der ab diesem Zeitpunkt abfallenden Schließkraft begründet, die sich nach Formel 1 direkt auf die Stößelkraft auswirkt.

In der FEM-Analyse zeigt sich, dass der zu Beginn auftretende Stauchvorgang das Anschmiegen des Werkstückmaterials an die Wandung des Gravurdurchbruchs im Obergesenk bewirkt. Die resultierende Druckspannung im Durchbruch erzeugt durch die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug eine Reibungskraft in vertikaler Richtung, die die Wirkung der Schließkraft unterstützt (vgl. Bild 6.4). Aufgrund der Vernachlässigung der Gleitreibungskräfte bei der Ermittlung des experimentell ermittelten Kraftverlaufs zeigt sich das beschriebene Phänomen im Kraft-Wegverlauf durch einen gleich bleibend geringen Kraftverlauf der Schließkraftkurve.

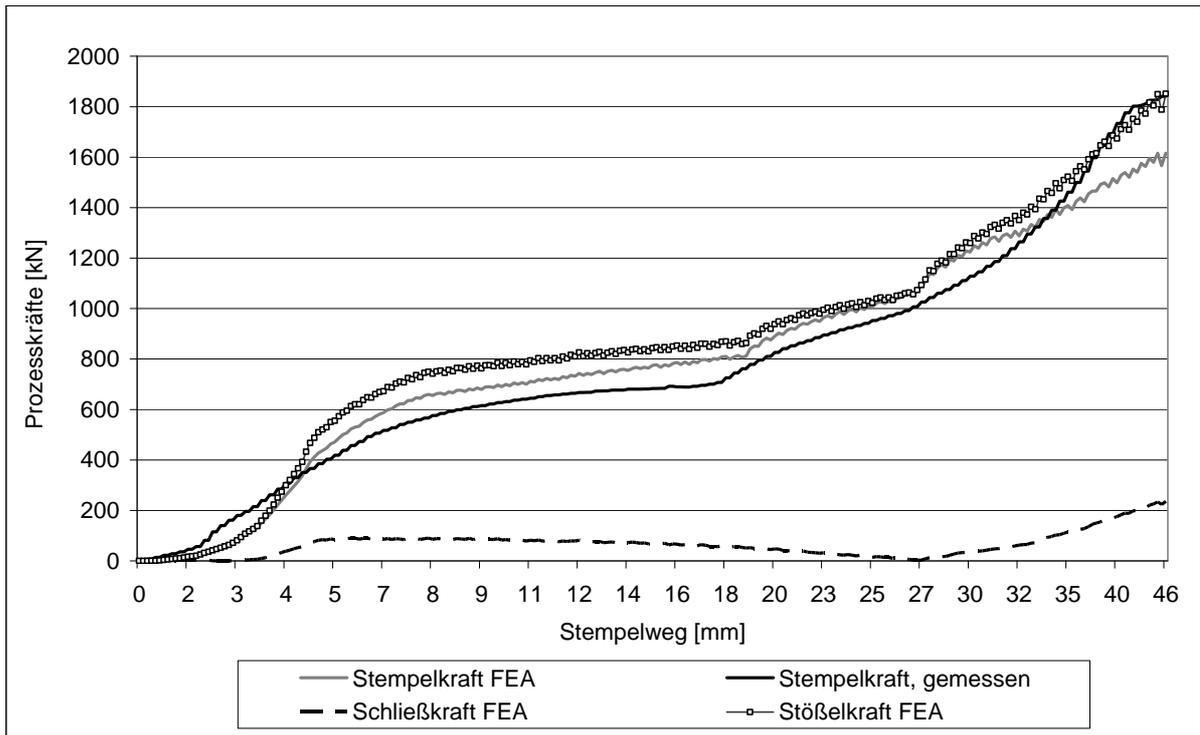


Bild 6.3: Prozesskräfte beim Voll-Quer-Fließpressen, Spindelpresse, Werkstoff-Nr. 1.0503, Schmiedetemperatur 1.250 °C

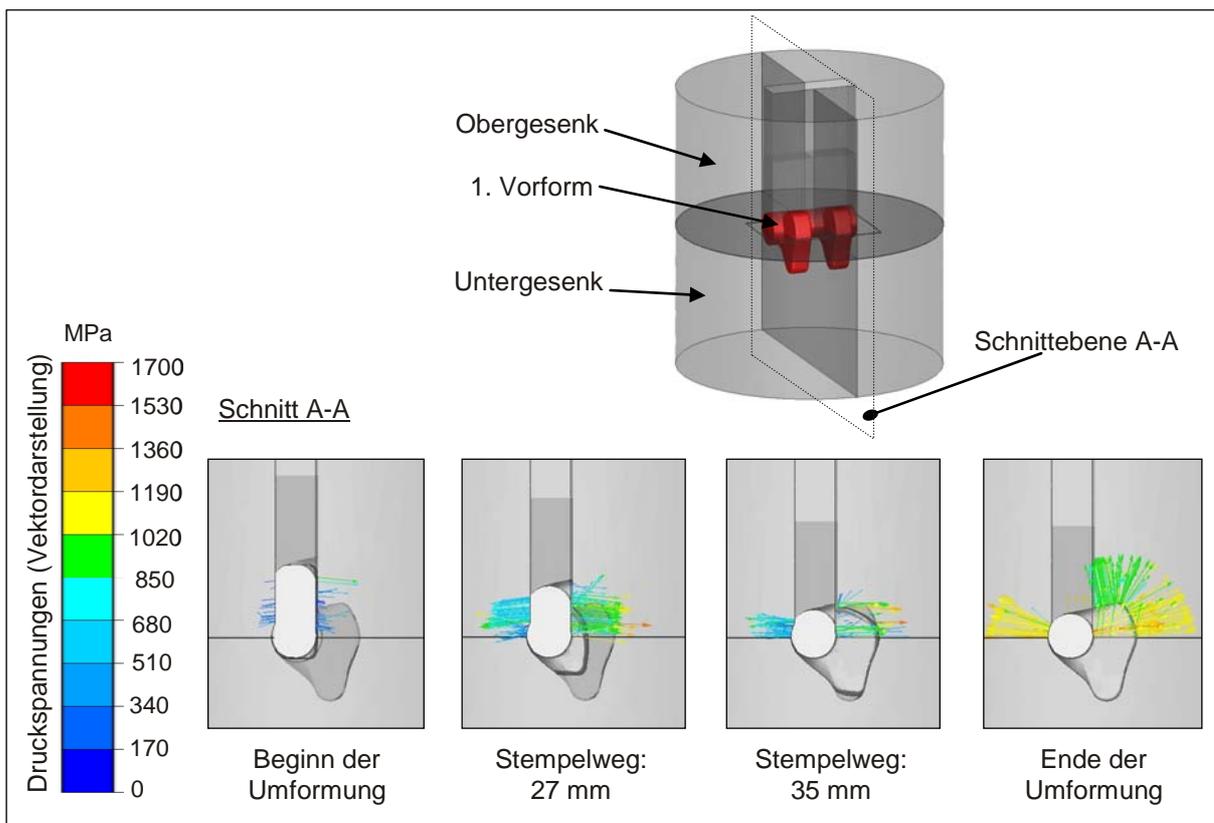


Bild 6.4: FEM-Analyse: Druckspannungen an Stempeldurchbruch und Matrize des Oberwerkzeugs in Vektordarstellung

6.3 Umformversuche zum mehrdirektionalen Vorformen

Die Versuchsschmiedungen mit dem mehrdirektionalen Schmiedewerkzeug erfolgen auf einer hydraulischen Presse mit einer maximalen Presskraft von 12,5 MN (Pres-sendaten siehe Anhang A2). Die Bauteile wurden im Kammerofen auf 1.250 °C erwärmt und anschließend mit einer Stößelgeschwindigkeit von 30 mm/s geschmiedet. Bild 6.5 bildet das montierte mehrdirektionale Werkzeug in Ober- und Unterwerkzeug getrennt sowie im eingebauten Zustand während der Versuchsschmiedungen ab.

Zur Verschleißreduzierung wurden die Kontaktflächen der Keilantriebe und Gleitführungen vor jedem Umformvorgang mit einem Hochleistungsschmierstoff (Molybdändisulfid) behandelt. Diese Schmierpaste zeichnet sich durch einen gegenüber Graphit deutlich geringeren Reibungskoeffizienten aus ($\mu = 0,05$ bis $0,095$). Weiterhin weist Molybdändisulfid bei ansteigendem Normaldruck einen abnehmenden Reibungskoeffizienten bei guter Temperaturfestigkeit auf. Nach dem manuellen Einlegen der 1. Vorform und dem Auslösen des Pressenhubs erfolgt das mehrdirektionale Vorformen. Nach der Entnahme wird die 2. Vorform in Sand abgekühlt.

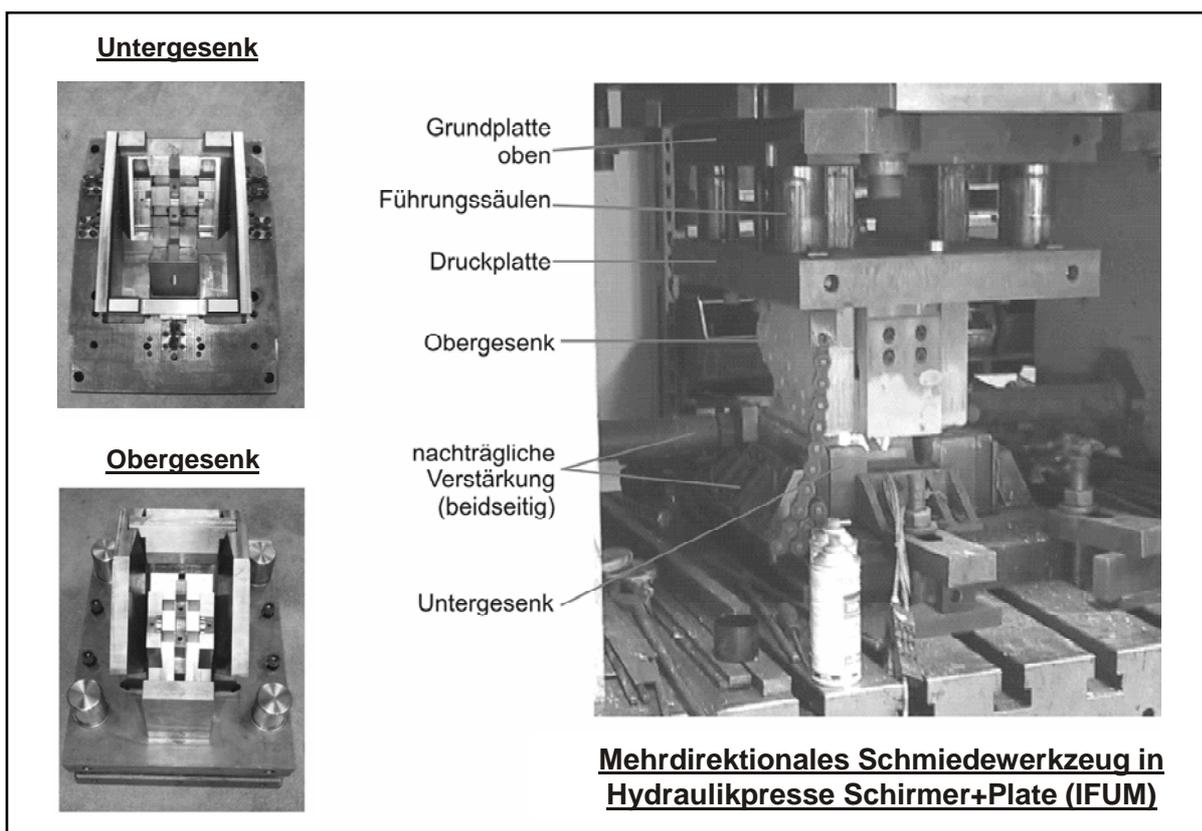


Bild 6.5: Ansicht des getrennten Ober- und Untergesenks des mehrdirektionalen Schmiedewerkzeugs und des Gesamtwerkzeugs im eingebauten Zustand

Aufgrund der Komplexität der Werkzeugbewegungen im mehrdirektionalen Schmiedewerkzeug, der Vielzahl der beweglichen Werkzeugkomponenten sowie der auftretenden thermischen Lasten kann das Anbringen von Kraftmessgliedern im Kraftfluss nicht realisiert werden. Ein Musterbauteil der Schmiedeversuche ist auf Bild 6.6 zu sehen. Die 2. Vorform konnte ohne visuell feststellbare Schmiedefehler geschmiedet werden.

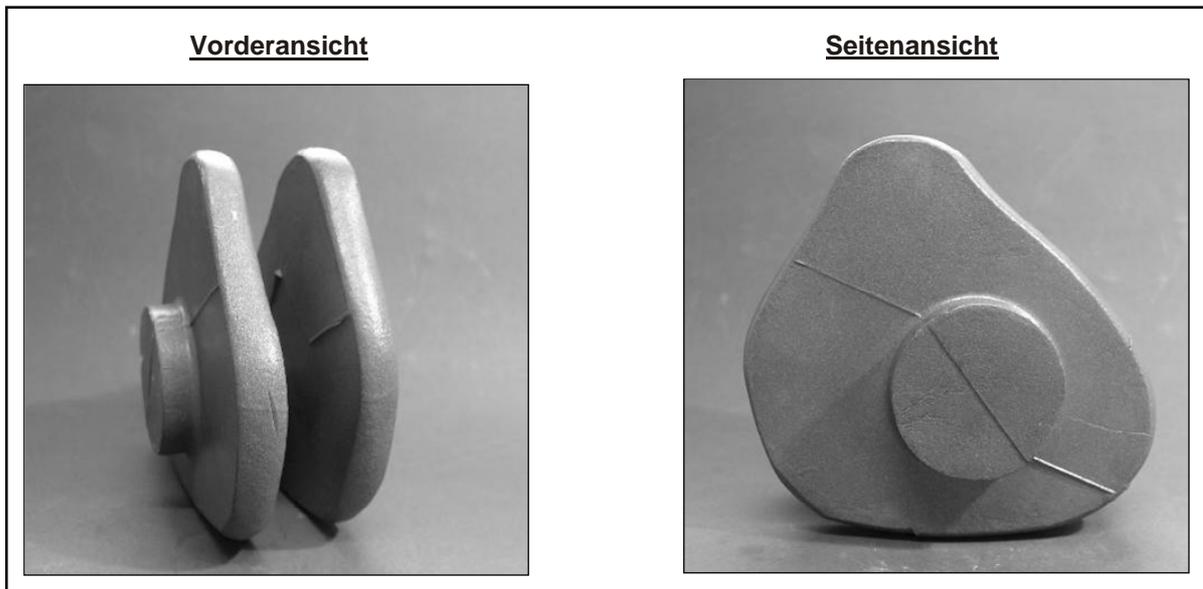


Bild 6.6: Musterbauteil einer mehrdirektional geschmiedeten 2. Vorform einer Einzylinderkurbelwelle, Werkstoff-Nr. 1.0503, Schmiedetemperatur 1.250 °C, Stößelgeschwindigkeit 30 mm/s

In Bild 6.7 wird eine Gegenüberstellung des Kurbelwangenquerschnitts einer mehrdirektional geschmiedeten 2. Vorform und des Ergebnisses der zuvor durchgeführten FEM-Analyse dargestellt. Die Kurbelwangengeometrie des geschmiedeten Bauteils wird mit einem 3D-Koordinatenmessgerät erfasst. Dazu werden Messpunkte an den Kurbelwangen des Bauteils aufgenommen und anschließend in einem CAD-System zu einem Kurvenzug verbunden. Bei der Analyse der Kurbelwangengeometrien zeigt sich, dass die Querschnittsflächen der numerisch ermittelten Kurbelwangenform von der Kurbelwangenform der geschmiedeten Bauteile um ca. 15 Prozent abweichen. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die eingestellten Simulationsparameter (Bauteiltemperatur, Reibungskoeffizienten, Wärmeübergangskoeffizient) von den realen Umformbedingungen abweichen. Während des Abschmiedens der Vorformen zeigt sich, dass es zu elastischen Dehnungen nicht formgebender Werkzeugkomponenten kommt. Daher kann angenommen werden, dass ein weiterer Grund für die Formabweichungen in den elastischen Werkzeugdehnungen liegt.

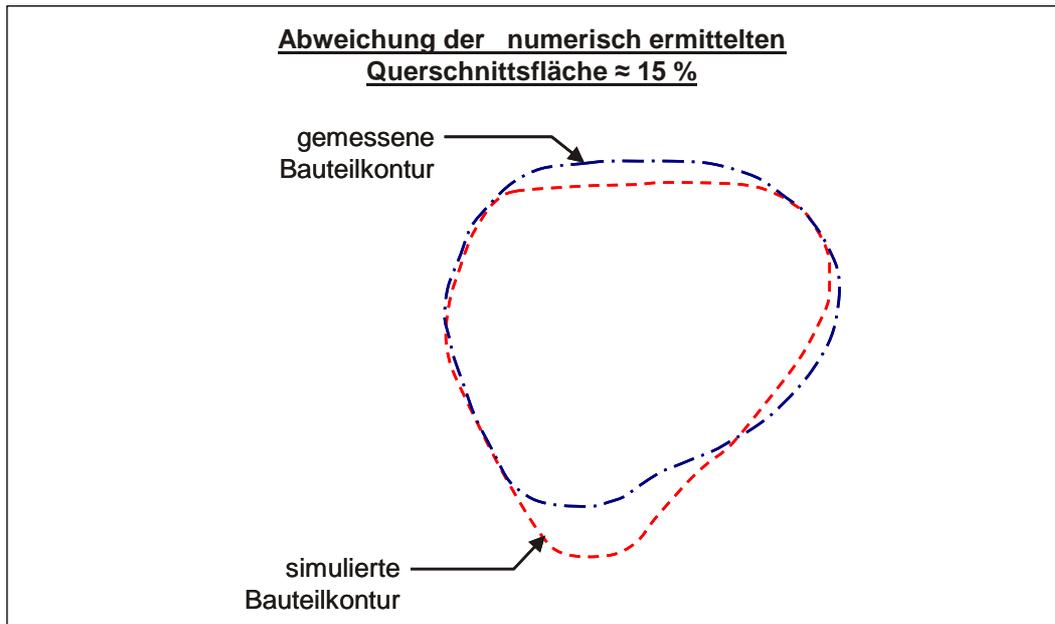


Bild 6.7: Querschnittsvergleich von geschmiedeter und numerisch ermittelter Kurbelwangenform der 2. Vorform, Werkstoff-Nr. 1.0503, Schmiedetemperatur 1.250 °C, Stößelgeschwindigkeit 30 mm/s

Die bisherigen Versuche erbringen den Nachweis einer grundsätzlichen Funktionsfähigkeit des Verfahrens des mehrdirektionalen Schmiedens von Vorformen für Einzylinderkurbelwellen. Abhängig vom eingesetzten Pressenaggregat ergeben sich aufgrund des Verfahrens des mehrdirektionalen Vorformens im Vergleich zum konventionellen Schmieden vergleichsweise lange Druckberührzeiten von bis zu zwei Sekunden. Trotz der langen Druckberührzeiten ist in erster Linie der Einsatz einer hydraulischen Presse mit vergleichsweise niedrigen Stößelgeschwindigkeiten für dieses Verfahren geeignet, da die Pressenkinematik und die Presskraft wegabhängig einstellbar sind.

6.4 Umformversuche zum gratlosen Gesenkschmieden

Die Versuchsschmiedungen zum gratlosen Gesenkschmieden werden mit der bereits beschriebenen Spindelpresse durchgeführt. Während der Versuchsschmiedungen werden die Stempelkräfte mithilfe von DMS ermittelt, die im Kraftfluss zwischen Stempel und Stempelaufnahme auf den Grundplatten von Ober- bzw. Unterstempel des Werkzeugs angeordnet sind. Um Ungleichmäßigkeiten durch Reibungseinflüsse zwischen den oberen und unteren Stempeln anzeigen zu können, werden auf jedem der vier Stempel DMS appliziert.

Nach der erneuten Erwärmung in einer Schutzgasatmosphäre wird die 2. Vorform in das Unterwerkzeug eingelegt und der Schmiedevorgang ausgelöst. Durch die bei jedem Aufwärm- und Abkühlvorgang auftretende Verzunderung der Schmiedeteile kommt es trotz des Einsatzes von Schutzgas und speziellen Abdeckungen zu Zunderbildung, die zu einer unvollständigen Formfüllung der Gravur führen.

Diese Massenverluste sind im Wesentlichen durch die Art der Versuchsdurchführung bedingt, da das sequenzielle Abschmieden und die notwendige Zwischenabkühlung und Wiedererwärmung der Schmiedeteile eine genaue Vorhersage des sich einstellenden Massenverlustes durch Zunder nicht zulässt.

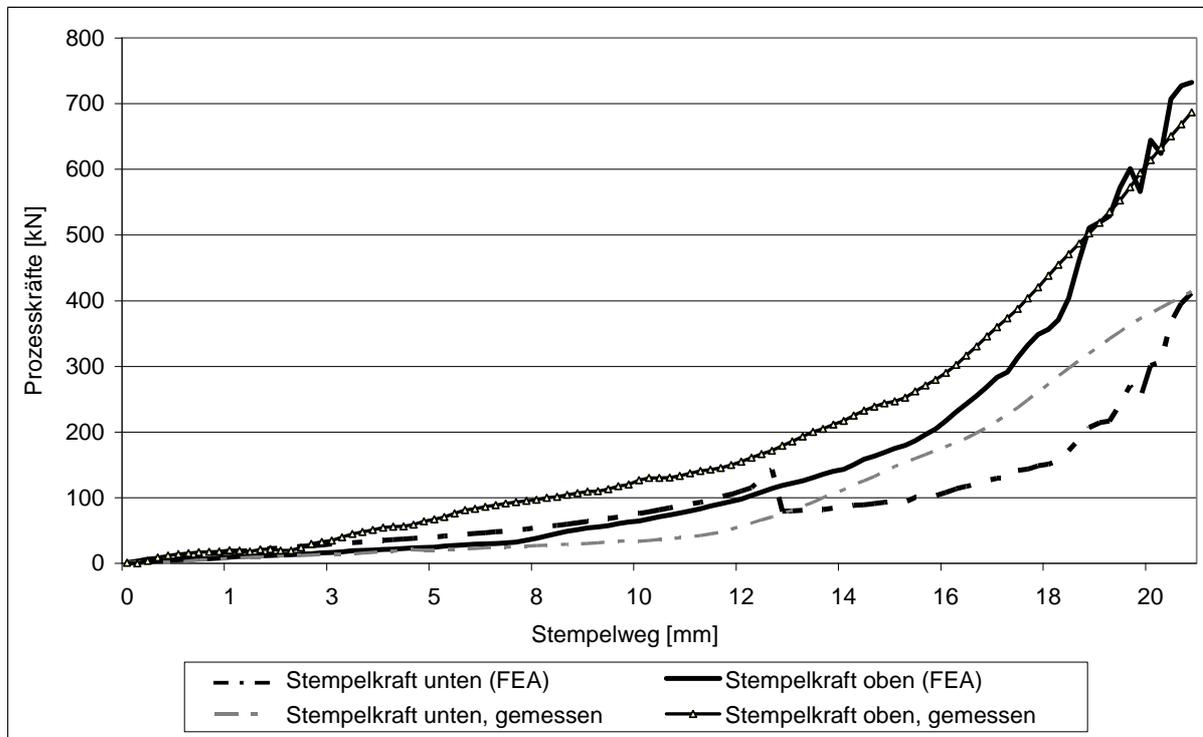


Bild 6.8: Vergleich messtechnisch und numerisch ermittelter Prozesskräfte beim gratlosen Schmieden der Einzylinderkurbelwelle auf einer Spindelpresse, Werkstoff-Nr. 1.0503, Schmiedetemperatur 1.250 °C

Bild 6.8 zeigt den Vergleich zwischen den in den Versuchen aufgezeichneten Stempelkräften und den numerisch ermittelten Stempelkräften. Die Auswertung zeigt unter anderem, dass die Kräfte der zwei Oberstempel größer sind als die der Unterstempel. Diese Beobachtung ergibt sich aufgrund der unterschiedlich langen Umformwege der Ober- und Unterstempel. Der Umformweg des Unterstempels beträgt ca. 13 mm, der des Oberstempels ca. 21 mm. Der Kraft-Weg-Verlauf der numerisch ermittelten unteren Stempelkraft weist aus diesem Grund bei einem Stempelweg von ca. 13 mm einen Sprung auf, der das Ende der Umformbewegung des Unterstempels markiert.

Betrachtet man den Umformprozess vor diesem Hintergrund, wird deutlich, dass die Formfüllung der Matrize vornehmlich durch das Einfahren der Oberstempel erzielt wird. Während der Unterstempel bereits seine Endposition erreicht hat, bewegt sich der Oberstempel weiter abwärts und verdrängt den Werkstückwerkstoff bis zur Formfüllung der Matrize. Da die höchsten Umformkräfte verfahrensbedingt am Ende der Umformung auftreten, lassen sich so die höheren Stempelkräfte an den Oberstempeln erklären. Der Anstieg der Kraft im Unterstempel nach dem Erreichen seiner

Endposition liegt in den weiter steigenden Umformkräften des Oberstempels begründet, die durch das Werkstück indirekt auf die Unterstempel übertragen werden und ihn mit Kraft beaufschlagen.

Die Abweichungen in den Kraftverläufen zwischen gemessenen und numerisch ermittelten Stempelkräften lassen sich auf die in der FEM-Analyse nicht berücksichtigte Reibkräfte in den verschiedenen Führungen (Säulenführungen, Gleitführungen der Stempel) des Werkzeugs zurückführen.

6.5 Untersuchungsergebnisse

Die praktischen Versuche konnten den Nachweis der Funktionsfähigkeit einer durchgängig gratlosen Schmiedeprozesskette zur Herstellung von Einzylinderkurbelwellen erbringen und verifizieren somit die entwickelte Werkzeug- und Stadienfolge (Bild 6.9).

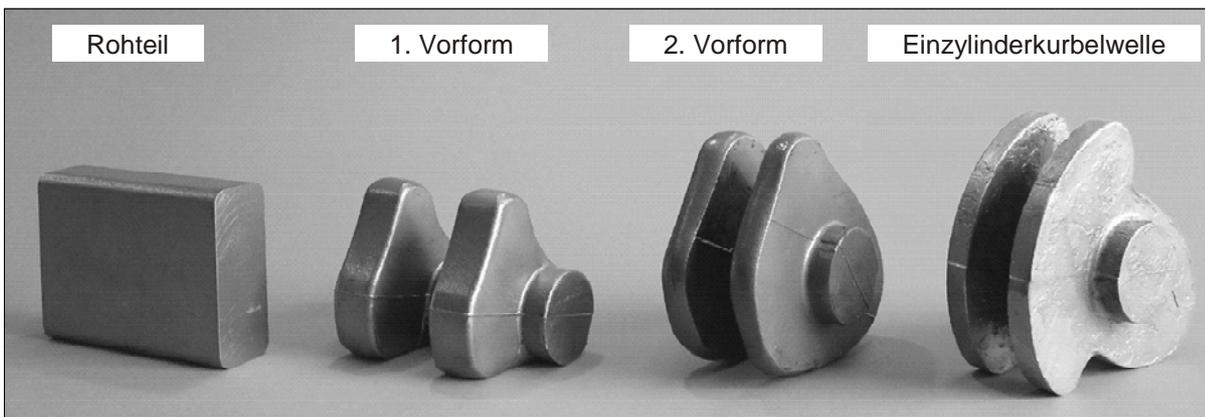


Bild 6.9: Stadienfolge der gratlos geschmiedeten Einzylinderkurbelwelle

Da die gewünschte Geometrie der 2. Vorform in den Schmiedeversuchen nur mit eingeschränkter Genauigkeit hergestellt werden kann (vgl. Abschnitt 6.3), weisen die Fertigteile Schmiedefalten im Bereich der Hohlkehradien auf (Bild 6.10). Es ist davon auszugehen, dass die Falten auf die Abweichung der Massenverteilung der geschmiedeten 2. Vorform von der numerischen ermittelten Vorformgeometrie zurückzuführen sind. Darüber hinaus kann ein weiterer Grund für die Faltenbildung eine Abweichung der Parameter der FEM-Analyse (Bauteiltemperatur, Reibungskoeffizienten, Wärmeübergangskoeffizient) von den realen Umformbedingungen sein.

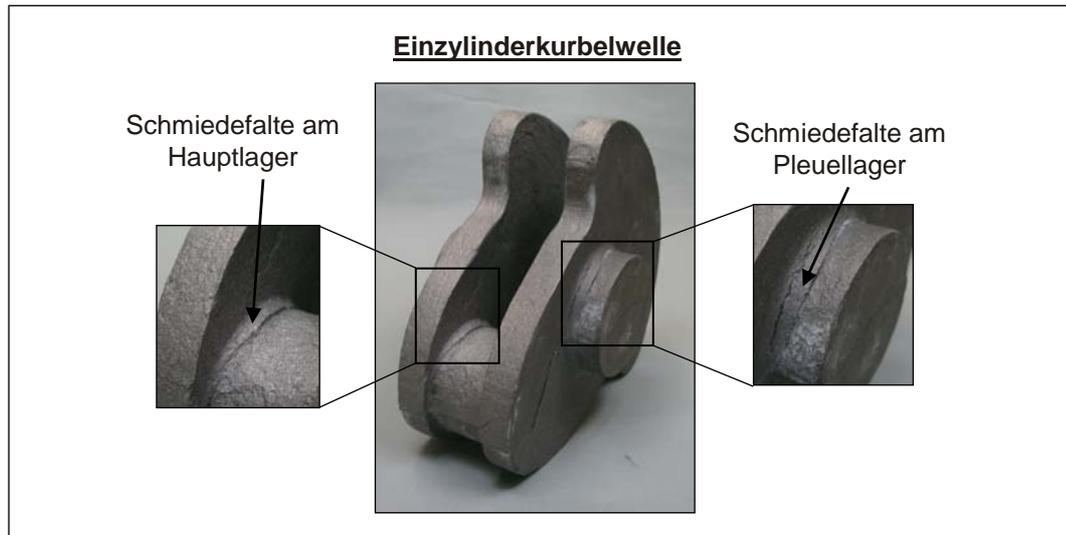


Bild 6.10: Schmiedefalten im Bereich der Hohlkehradien an gratlos geschmiedeter Einzyylinderkurbelwelle

6.5.1 Maßtoleranzen

Mithilfe eines optischen 3D-Digitalisierers werden aus Musterbauteilen digitale Modelle von drei geschmiedeten Einzyylinderkurbelwellen erstellt. Für den folgenden geometrischen Vergleich wird das CAD-Modell der Einzyylinderkurbelwelle unter Berücksichtigung der Schwindung als Referenzgeometrie gewählt. Bild 6.11 stellt die flächenhafte Abweichung des digitalen Modells von der Referenzgeometrie dar. Zur Ermittlung der angegebenen Abweichungen werden die Musterbauteile mithilfe der digitalisierten Daten gemessen und eine mittlere Abweichung an den fünf Messstellen berechnet.

Grundsätzlich können Maßabweichungen bei Gesenkschmiedeprozessen aus

- der elastischen Gesenkaufweitung,
- dem elastischen Werkstoffverhalten sowie der
- Werkstückschrumpfung beim Abkühlen resultieren [OB98].

Da die Untersuchungen vornehmlich den Fokus auf die Verifizierung der gratlosen Schmiedeprozesskette legen, wird bei den experimentellen Untersuchungen auf eine für den industriellen Einsatz notwendige Kaltkalibrierung der Bauteile verzichtet [Gie06, Pah95].

Die gemessenen Bauteile weisen verhältnismäßig große Abweichungen vom Nennmaß (ISO-Toleranzklasse IT 13 bis IT 15) auf. Es ist davon auszugehen, dass durch eine abschließende Kaltkalibrierung die Bauteiltoleranzen vermutlich auf IT 8 bis IT 10 verringert werden können. Maßnahmen, die zu einer Verringerung der gemessenen Toleranzen beim gratlosen Gesenkschmieden führen können, könnten sein:

- eine Werkzeugkorrektur zum Ausgleich lokal unterschiedlicher Temperaturverteilung im Schmiedeteil und

- die Berücksichtigung der elastischen Werkzeugdehnung.

Die durch FEM-Analysen ermittelten elastischen Werkzeugdehnungen betragen in Achsrichtung des Bauteils (x-Achse) bis zu 0,4 mm sowie in y-Richtung bis zu 0,2 mm. Diese Dehnungen führen zu Maßabweichungen am Schmiedeteil, die ebenfalls für die Einhaltung geringerer maßlicher Toleranzen berücksichtigt werden müssen.

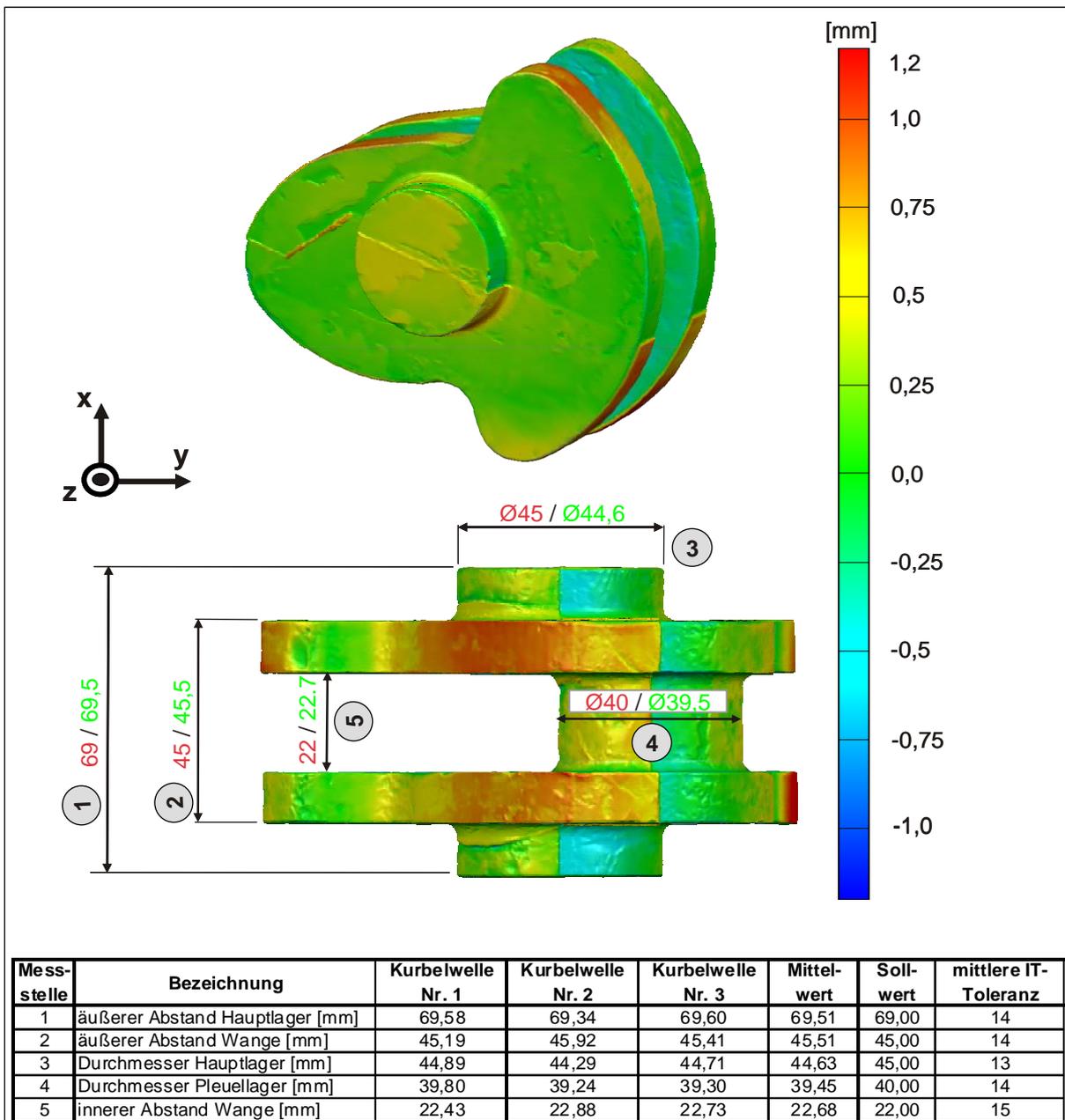


Bild 6.11: Hauptmaße gratlos geschmiedeter Einzylinderkurbelwellen (gemittelt)

Die Werkzeugkorrektur zur Kompensation der lokal differierenden Auskühlraten wird notwendig, da in der Gravur unterschiedlich lange Kontaktzeiten vorliegen. Für die Einhaltung geringerer maßlicher Toleranzen müssen diese Abweichungen konstruk-

tiv berücksichtigt werden, um die unterschiedliche Bauteilschrumpfung in den jeweiligen Bereichen zu kompensieren.

Die in den Versuchen erzielten Toleranzen sind nicht als Grenzen des Verfahrens anzusehen, da sich neben der grundsätzlich notwendigen Werkzeugkorrektur die manuelle Versuchsdurchführung aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen wie Temperatur, Gesenkinnendruck sowie die Wiedererwärmung der Bauteile etc. nachteilig auf die Maßgenauigkeit auswirken kann.

6.5.2 Gefügebeschaffenheit

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik und der Dimensionen der drei Schmiedewerkzeuge müssen die Schmiedeteile wie beschrieben zwischen den einzelnen Umformstufen abgekühlt und nach dem Umbau der Werkzeuge im Kammerofen wiedererwärmt werden. Das Gefüge des verwendeten Werkstoffs reagiert auf dieses mehrmalige Abkühlen und Wiedererwärmen mit Grobkornbildung. Metallografische Untersuchungen zeigen diese Gefügeveränderung bereits großflächig an der 2. Vorform (vgl. Bild 6.12).

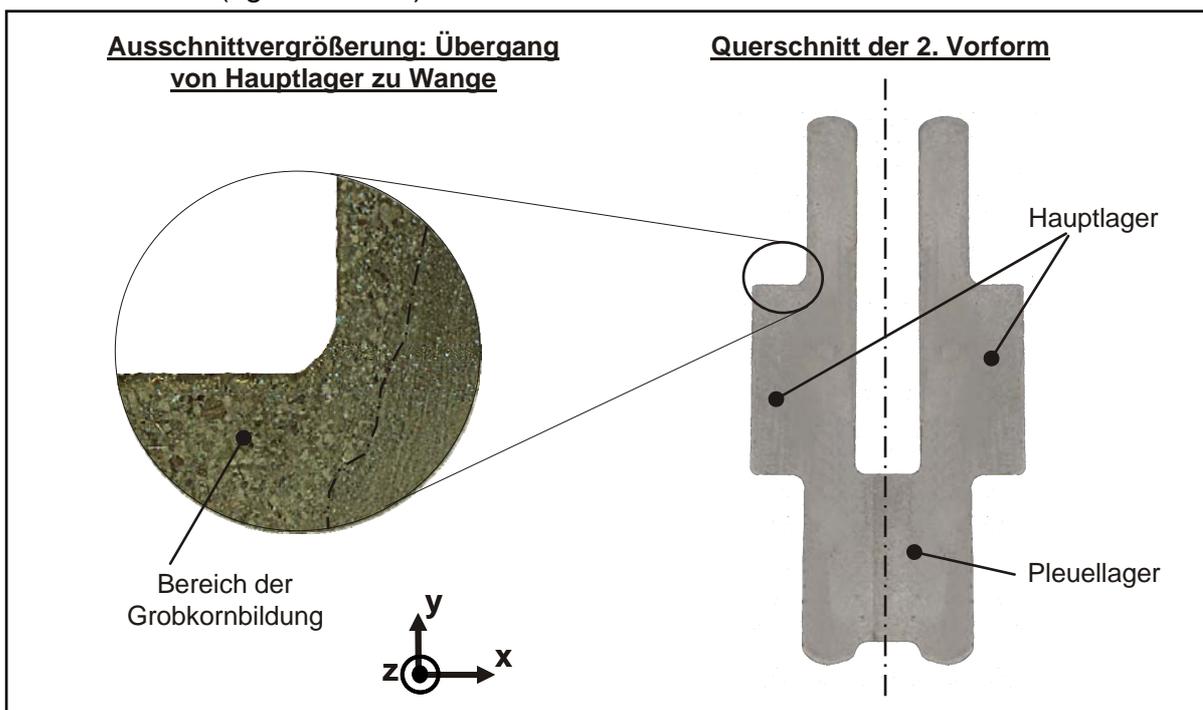


Bild 6.12: Grobkornbildung in den Randbereichen der 2. Vorform durch zweimaliges Erwärmen auf Schmiedetemperatur, Werkstoff-Nr. 1.0503, Schmiedetemperatur 1.250 °C

Weiterführende Untersuchungen der Bauteile zur Gefügezusammensetzung erweisen sich insofern nicht als notwendig. Eine mögliche Lösung dieser Problematik besteht in der Verkettung mehrerer Schmiedeaggregate, da dadurch die Wiedererwärmung der Bauteile entfallen kann.

6.5.3 Verschleißverhalten der Werkzeuge

Aufgrund der Ausrichtung der Arbeit beruhen die Untersuchungen auf einer begrenzten Anzahl geschmiedeter Bauteile. Zu Beginn der Untersuchungen werden 120 Rohteile hergestellt. Trotz der vergleichsweise geringen Anzahl kann durch FEM-Analysen und eine optische Untersuchung der Werkzeuggravuren eine erste qualitative Aussage zum Verschleißverhalten und zu Ausfallursachen der einzelnen Werkzeuge getroffen werden.

Werkzeug zum Voll-Quer-Fließpressen

Aus Untersuchungen zum Voll-Quer-Fließpressen rotationssymmetrischer Bauteile ist bekannt, dass sowohl die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück als auch die Radien, an denen der Werkstoff in die Matrize fließt (Matrizenauslaufradius), wesentlichen Einfluss auf den Kraftbedarf und damit indirekt auf das Verschleißverhalten des Werkzeugs haben [Sch87]. Die Höhe der Umformkraft (Stempelkraft F_U) ist neben der Fließspannung weiter abhängig von der geforderten Werkstückgeometrie sowie dem Verhältnis von Werkstückquerschnitt zu Werkstückhöhe.

Am 1. Vorformwerkzeug ist aufgrund der Bauteilgeometrie kein Matrizenauslaufradius vorhanden. Das Material fließt daher im Obergesenk am Stempeldurchbruch an einer scharfen Kante in den Gravurhohlraum ein (vgl. Bild 6.13, oben). In dem im Bild gekennzeichneten Bereich findet das Einfließen des Materials statt. In den experimentellen Untersuchungen zeigt sich zudem, dass der Matrizenauslaufbereich am Obergesenk einem erhöhten abrasiven Verschleiß unterliegt. Nach 120 Schmiedungen ist eine deutliche Kantenverrundung ($R_K \approx 1,2 \text{ mm}$) des ursprünglich scharf ausgeführten Matrizenauslaufbereichs zu beobachten.

Trotz dieser Verschleißerscheinung am Oberwerkzeug können die Bauteile für die weitere Stadienfolge verwendet werden, da die durch den Verschleiß auftretende geringfügige Geometrieabweichung in einem für die folgenden Umformoperationen unkritischen Kurbelwangenbereich des Bauteils liegt. Nach dem Fertigschmieden kann diese Geometrieabweichung nicht mehr nachgewiesen werden und verursacht keine Schmiedefehler. Eine Umgestaltung des Oberwerkzeugaufbaus zugunsten eines größeren Matrizenauslaufradius ist verfahrensbedingt nicht möglich, da aufgrund der definierten Randbedingungen (vgl. Abschnitt 4.1) eine gratfreie Vorformung notwendig ist.

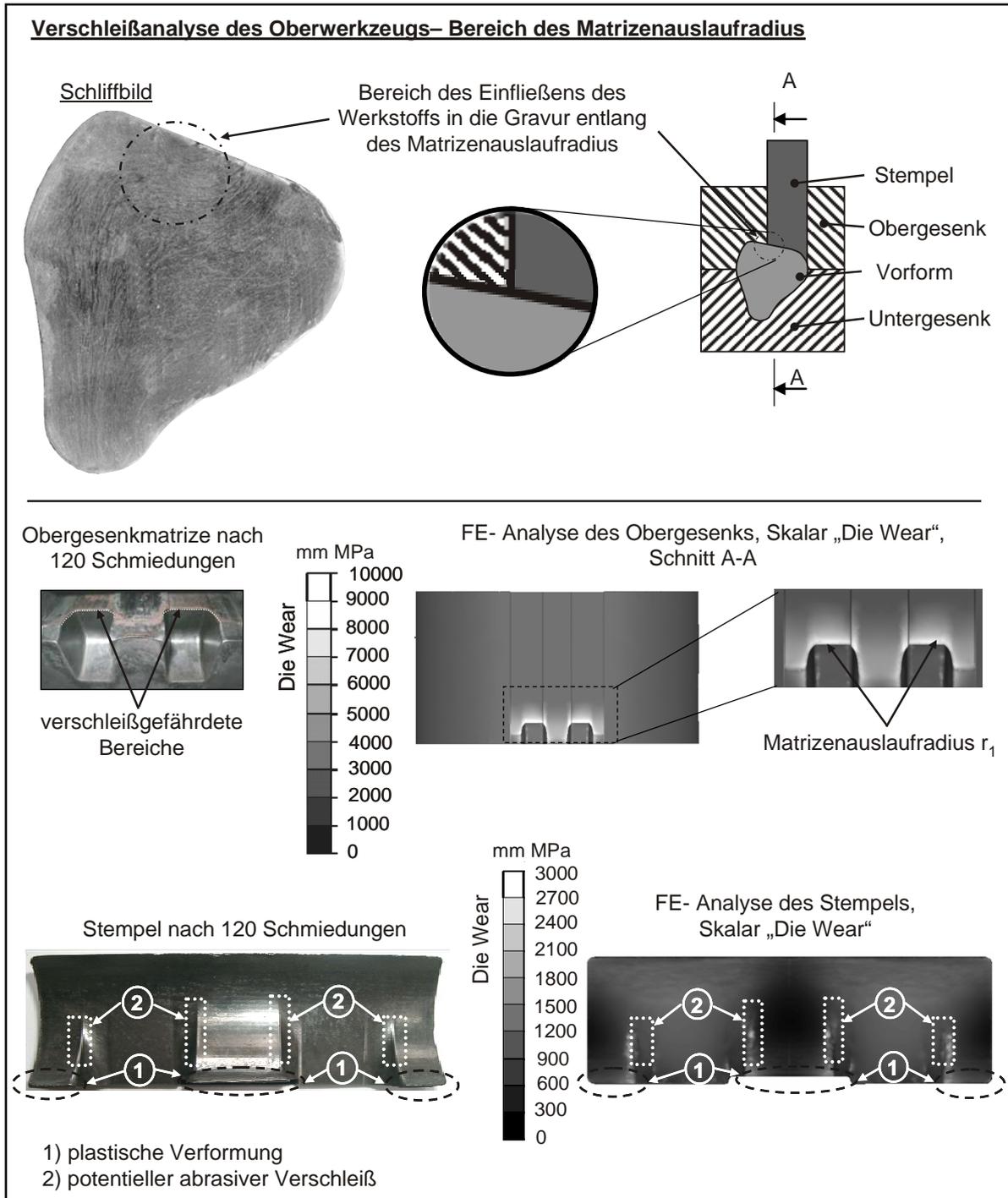


Bild 6.13: Werkstofffluss und Verschleißanalyse des 1. Vorformwerkzeugs im Bereich des Matrizenauslaufradius, Darstellung der Ergebnisse der FEM-Analyse jeweils am Ende des Umformvorgangs

Die Auswertung zeigt, dass die Ergebnisse der FEM-Verschleißanalyse mit den Befunden aus den experimentellen Untersuchungen übereinstimmen. Das für die Untersuchungen genutzte FEM-Programm *Forge3* verwendet zur qualitativen Analyse des Werkzeugverschleißes eine skalare Größe „Die Wear“, die sich aus der zeitlichen Integration des Produktes aus Normalspannung σ_N und Tangentialgeschwindigkeit v_T errechnet:

$$\int_0^t (\sigma_N \cdot v_T) dt \quad (15)$$

Der Skalar stellt somit ein qualitatives Kriterium für abrasiven Verschleiß dar; sonstige Verschleißphänomene werden in dieser Größe nicht berücksichtigt. Der Stempel zeigt nach den durchgeführten Schmiedungen keine Anzeichen abrasiven Verschleißes. Auffällig sind jedoch begrenzte Zonen plastischer Verformung. Bedingt durch die Form des Querfließpressteils ergeben sich im Kantenbereich des Stempels scharf zulaufende Querschnitte, die einer hohen thermomechanischen Belastung unterliegen (vgl. Bild 6.13, unten).

Werkzeug zum mehrdirektionalen Vorformen

Aufgrund der einfachen Werkzeuggeometrie sowie der relativ geringen Anzahl der geschmiedeten Teile lassen sich an den formgebenden Werkzeugkomponenten des mehrdirektionalen Schmiedewerkzeugs keine der üblichen Verschleißarten feststellen. Die Gleitbahnen der beweglichen Werkzeuteile zeigen ebenfalls keinen sichtbaren Verschleiß. Während der ersten Schmiedungen ist jedoch an den Keilabtriebsflächen (Schieber, vgl. Bild 5.3) ein abrasiver Verschleiß durch die für Keilgetriebe üblichen hohen Flächenpressungen festzustellen. Die Gleitflächen des Schiebers werden daraufhin oberflächennah bis zu einer Tiefe von ca. 0,8 mm lasergehärtet. Die durch das Laserhärten entstehenden Verzüge der Werkzeugoberfläche sind minimal und für die Ergebnisbewertung zu vernachlässigen. Der abrasive Verschleiß der Gleitflächen kann durch diese Maßnahme erfolgreich gestoppt werden.

Ein bezüglich der Werkzeugstandzeit kritischer Aspekt beim Einsatz des Werkzeugs zum mehrdirektionalen Vorformen ist der bedingt durch lange Kontaktzeiten hohe Wärmestrom vom Werkstück in das Werkzeug. Da die formgebenden Werkzeuteile zum einen beweglich auf den Grundkörpern von Ober- bzw. Untergesenk geführt werden und weiterhin eine vergleichsweise geringe Masse aufweisen, wird eine schnelle Wärmeableitung innerhalb des Werkzeugaufbaus behindert. Die langen Druckberührzeiten führen zu einer unzulässig starken Erhöhung der Werkzeuggrundtemperatur. Eine Möglichkeit, die eingetragene Energie zukünftig aus dem Werkzeug abzuführen, besteht im Einsatz eines Temperiergerätes für Schmiedewerkzeuge [Müs02].

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das mehrdirektionale Schmiedewerkzeug hinsichtlich seines abrasiven Verschleißverhaltens im Kontaktbereich mit dem Schmiedeteil im Vergleich zu den zwei weiteren untersuchten Werkzeugen als unkritisch anzusehen ist. Aufgrund des Werkzeugaufbaus entstehen im Gravurbereich keine Spannungsspitzen, da das Material durch einfaches Anstauchen umgeformt wird. Somit wird dem Werkstückwerkstoff die Möglichkeit gegeben, die hohen Spannungen durch plastisches Fließen abzubauen. Die notwendigen Umformkräfte fallen dadurch gering aus.

Werkzeug zum gratlosen Gesenkschmieden

Im Fertigschmiedeschritt findet nur eine geringe Massenverteilung innerhalb der Gravur statt. Eine FEM-Analyse der - im Vergleich zum restlichen Werkzeug - am höchsten belasteten Oberstempel zeigt im Bereich des Übergangs von der Kurbelwange zum Gegengewicht einen abrasiven Verschleißbereich an (vgl. Bild 6.14 links). Nach 100 Schmiedungen kann im angezeigten Bereich kein abrasiver Verschleiß festgestellt werden (vgl. Bild 6.14, rechts).

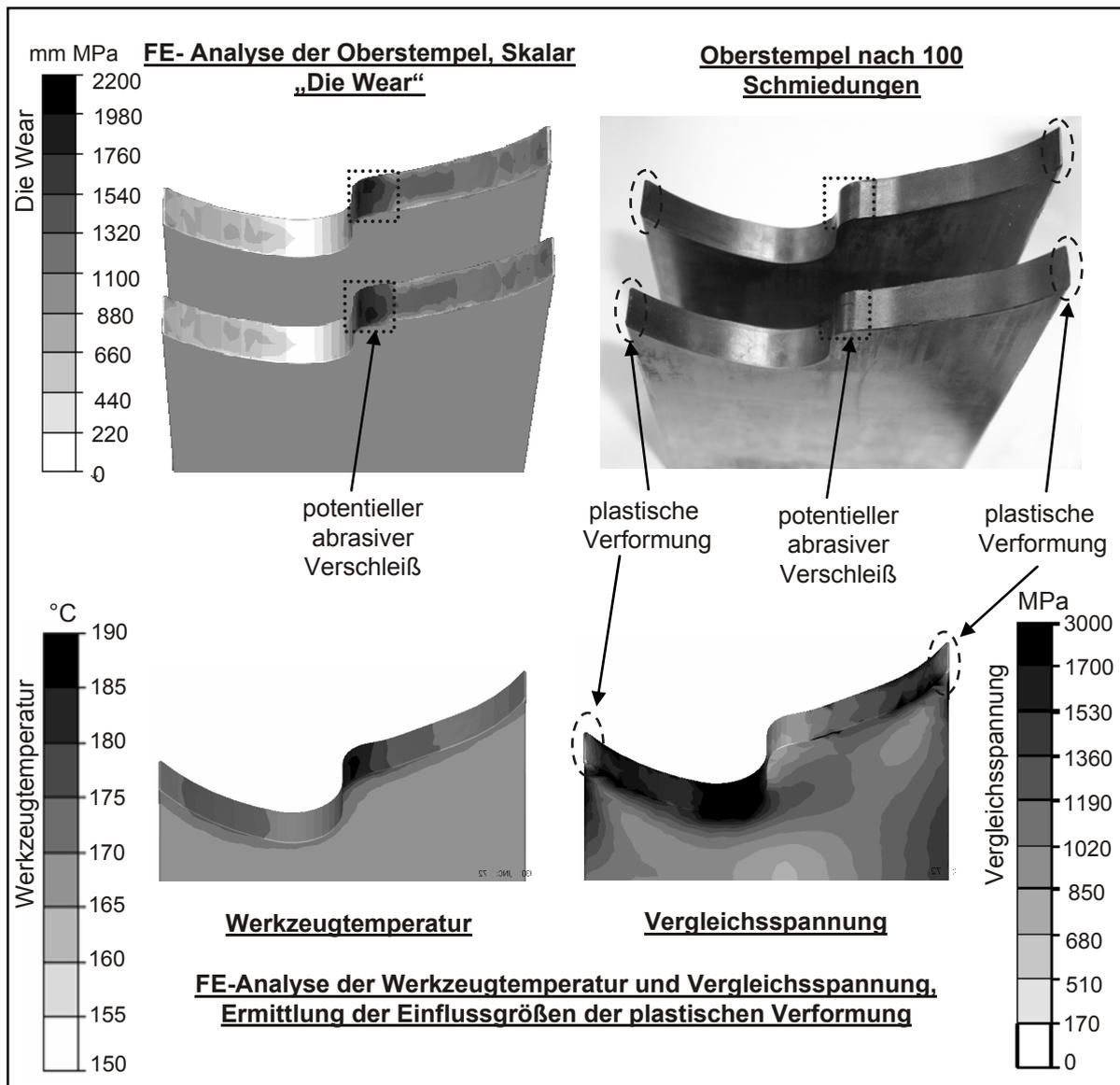


Bild 6.14: Verschleißanalyse des Fertigschmiedewerkzeugs, Darstellung der FEM-Analyse-Ergebnisse jeweils am Ende des Umformvorgangs

Nach 30 Schmiedungen weisen die Randbereiche der Stempelgeometrie Zonen plastischer Verformung auf. Es wird daher mithilfe einer thermisch-mechanisch gekoppelten FEM-Analysen untersucht, ob dieser Verformung eine thermische oder eine mechanische Überlastung zugrunde liegt. In Bild 6.14 (unten) werden die ther-

mische und mechanische Werkzeugbelastung der dritten Umformstufe nach dem gratlosen Gesenkschmieden dargestellt. Die thermische Analyse bestätigte, dass im vornehmlichen Kontaktbereich des Werkzeugs (Mittbereich des Stempels) mit dem Werkstück eine um maximal 27 K höhere Werkzeugtemperatur vorliegt als vor der Umformung. Grund für dieses Ergebnis ist der intensive Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, der über die Druckberührzeit von ca. 0,1 s einen starken Wärmeaustausch hervorruft. Die zwei Kantenbereiche indes weisen nur eine um ca. 15 K erhöhte Oberflächentemperatur auf. Die Anlasstemperatur des verwendeten Werkzeugstahl 1.2367 liegt bei der eingesetzten Härte bei 600 °C.

Trotz Berücksichtigung der zyklisch-thermischen Belastung durch mehrfache Schmiedungen kann aufgrund der maximalen Stempeltemperatur von ca. 190 °C eine bleibende Entfestigung der Stempelkantenbereiche durch Werkzeugtemperaturen oberhalb der Anlasstemperatur des Werkzeugwerkstoffs ausgeschlossen werden. Die Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen bietet eine Erklärung für die festgestellten plastischen Verformungen. Obwohl die Kantenbereiche im Vergleich zum restlichen Stempelquerschnitt mit max. 800 MPa relativ gering belastet werden, sorgen die Spannungen aufgrund der filigranen Geometrie dieser Werkzeugbereiche für eine plastische Deformation. Bei der Analyse muss weiterhin der Werkzeugaufbau berücksichtigt werden: Die identifizierten Bereiche dienen neben ihrer Funktion als formgebendes Werkzeugelement gleichzeitig als Abdichtung des Gratspalts zwischen Obergesenk und Stempel. An der Stempelkante herrschen demnach Gleitreibungskräfte, die in Verbindung mit einer kaum vermeidbaren Verschmutzung der Gleitflächen durch Zunderrückstände zu den plastischen Verformungen führen können.

6.6 Gestaltungshinweise für mehrdirektionale Schmiedewerkzeuge

Die Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, lassen allgemeingültige Aussagen für die Gestaltung mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge zu. Folgende Gestaltungshinweise dienen der Übertragung des Vorformverfahrens auf andere Anwendungsfälle:

Führungs- und Schließspalte im Werkzeug

- Konstruktive Maßnahmen zur Einstellung des Führungsspaltmaßes, zum Beispiel durch Stellschrauben und einstellbare Leisten, sind vorzusehen.
- In Bereichen mit vergleichsweise hohen Normalspannungen ist die Anzahl der Spalte so gering wie möglich zu halten.
- Das Spaltmaß zwischen beweglichen, formgebenden Komponenten ist aufgrund der Gratbildungsgefahr auf maximal 0,05 mm auszulegen.
- Werden asymmetrisch geformte Werkzeugkomponenten eingesetzt, führt die Wärmeausdehnung des Werkzeugs beim Schmieden zu einer ungleichmäßig starken Änderung der Spaltmaße. Die Höhe der Wärmeausdehnung sowie die „Warmgeometrie“ wichtiger Werkzeugkomponenten müssen zur Sicherstellung einer präzisen Werkzeugführung bestimmt werden.

Auslegung von Werkzeugkomponenten

- Die Anzahl beweglicher Komponenten ist weitestgehend gering zu halten.
- Eine Deformation der Werkzeugkomponenten ist hinsichtlich der resultierenden Spaltmaßvergrößerung durch ausreichende Dimensionierung zu minimieren.
- Ist eine entsprechende Dimensionierung der Komponenten nicht möglich, ist die Deformation durch eine dynamisch wirkende Nachstellung auszugleichen.
- Anschläge für bewegliche Komponenten sind so dicht wie möglich an die Wirk-/Arbeitsfläche der Komponenten zu legen, um die Auswirkungen der elastischen Verformung des Werkzeugs gering zu halten.
- Der Verschmutzung der Reibflächen von Umlenkgetrieben durch Zunder ist vorzubeugen. Dies kann durch Kapselung, Abstreifer, schräge oder runde Horizontalführungen sowie den Einsatz von Druckluft erfolgen.

Einzelfunktionen des Werkzeugs

- Für die zeitliche Entkopplung der vertikalen und horizontalen Umformbewegungen sind Gasdruckfedern vorzuziehen, da sie prozessabhängig eingestellt werden können.
- Steht für eine horizontale Umformung kein zweiter pressenseitiger Antrieb zur Verfügung, kann werkzeugseitig ein Umlenkgetriebe vorgesehen werden.
- Als konstruktive Lösungen für werkzeugseitige Umlenkgetriebe eignen sich Keilgetriebe bei hohen Umformkräften und Kniehebellösungen bei großen Umformwegen.
- Anzahl und Lage der Auswerfer sind auf das Prinzip des mehrdirektionalen Umformens so abzustimmen, dass Werkzeugbewegungen nicht behindert werden.
- Bestehen am Bauteil Hinterschneidungen, müssen bewegliche Werkzeugkomponenten nach der Umformung in ihrer Endposition verriegelt werden, um eine umformfreie Entnahme des Bauteils zu ermöglichen. Erst danach soll das Rücksetzen der beweglichen Werkzeugkomponenten in ihre Startposition auf feste Anschläge erfolgen.
- Bedingt durch den mehrteiligen Aufbau mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge muss der Wärmeabfuhr aus dem Werkzeug besonderes Augenmerk geschenkt werden. Ausreichende Temperierungsmöglichkeiten durch abgestimmte Kühlkonzepte sind vorzusehen.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Realisierung einer gratlosen Schmiedeprozesskette für Kurbelwellen neben dem Komplexitätsgrad der Bauteilgeometrie auch durch die zur Verfügung stehende Werkzeugtechnologie bestimmt wird. Die Vorformschritte und die dazu notwendigen Werkzeuge sind in einer gratlosen Schmiedeprozesskette wichtig, um eine genaue Massenverteilung und Querschnittsvorbildung zum gratlosen Gesenkschmieden gewährleisten zu können. Vor diesem Hintergrund soll im folgenden Kapitel eine Charakterisierung des mehrdirektionalen Vorformverfahrens für das Schmieden von Kurbelwellen erfolgen, um dessen Prozessgrenzen aufzuzeigen und die mit dieser Methode herstellbaren Kurbelwellen-Vorformgeometrien zu definieren.

7 Verfahrenscharakterisierung des mehrdirektionalen Vorformens

Ziel der Untersuchungen in diesem Kapitel ist die Charakterisierung des mehrdirektionalen Vorformverfahrens für Kurbelwellen und die Ermittlung der Prozessgrenzen anhand von bauteil- und werkzeugspezifischen Merkmalen. Dazu werden umfangreiche FEM-Analysen durchgeführt.

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Untersuchungen belegen die Machbarkeit der mehrdirektionalen Vorformung für Kurbelwellen. Im Folgenden sollen bauteil- und werkzeugspezifische Prozessgrenzen anhand der Merkmale

- Grenzumformgrad des Bauteils in einer Operation,
- Formfüllung der Haupt- und Pleuellagerstellen,
- Schmiedefehler (Falten) im Schmiedeteil,
- Vergleichsspannungen an der Werkzeugoberfläche und
- herstellbare Kurbelwellen-Vorformgeometrien

für das mehrdirektionale Vorformverfahren ermittelt werden.

Die Verfahrenscharakterisierung wird anhand von abstrahierten Kurbelwellengeometrien durchgeführt, um die Untersuchungsergebnisse auch auf andere Kurbelwellentypen anwenden zu können. Unter Berücksichtigung der ermittelten Prozessgrenzen und weiterer bauteilspezifischer Parameter (Geometrie der formgebenden Werkzeugkomponenten, Prozesskräfte, Kinematik etc.) kann so eine Beurteilung der Anwendbarkeit des mehrdirektionalen Vorformverfahrens für das jeweilige Schmiedeteil erfolgen. Die genannten bauteilspezifischen Parameter haben wesentlichen Einfluss auf den jeweiligen Werkzeugaufbau (zum Beispiel Antriebsart, Führungssysteme, Realisierung der Relativbewegungen) und müssen jeweils bauteilabhängig ausgewählt werden.

Grundlage der Verfahrenscharakterisierung ist die Definition eines entsprechenden Gültigkeitsbereiches. Die hierfür festzulegenden Randbedingungen beschreiben die zugrunde gelegte Werkzeugkinematik und ergänzen die Definition mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge zur Warmmassivumformung in Abschnitt 5.3:

1. Die Bewegung der formgebenden Werkzeugteile (vgl. Bild 5.3, Keilgetriebe) beginnt und endet zum jeweils gleichen Zeitpunkt.
2. Die Länge der Umformbewegung zur Schubumformung und zum Anstauchen des Bauteils ist aufgrund der Bauteilgeometrie unterschiedlich.
3. Die Geschwindigkeiten der Werkzeugteile zur Schubumformung und zum Anstauchen des Bauteils werden als konstant angenommen; die Höhe dieser zwei Geschwindigkeiten ist unterschiedlich, um den Randbedingungen 1 und 2 zu genügen.

- Die Bewegungsvektoren der formgebenden Werkzeugteile befinden sich in einem geradlinigen, orthogonalen Koordinatensystem und sind kollinear zu den Bauteilhauptachsen.

7.1 Definition von Modellgeometrien

Zur Verfahrenscharakterisierung werden vier Modellgeometrien generiert, die auf einer abstrahierten Kurbelwellengeometrie basieren. Die Modellgeometrien sollen dabei in ihrer geometrischen Gestalt neue Entwicklungen aktueller Kurbelwellentypen berücksichtigen. Daher wurde eine PKW-Kurbelwelle vom Typ V8-Splitpin (Firma ThyssenKrupp) zur Definition der Hauptmaße

- Pleuellagerdurchmesser,
- Pleuellagerbreite,
- Hauptlagerbreite,
- Hauptlagerdurchmesser und
- Kurbelwangenhöhe

der Modellgeometrien gewählt (vgl. Bild 7.1).

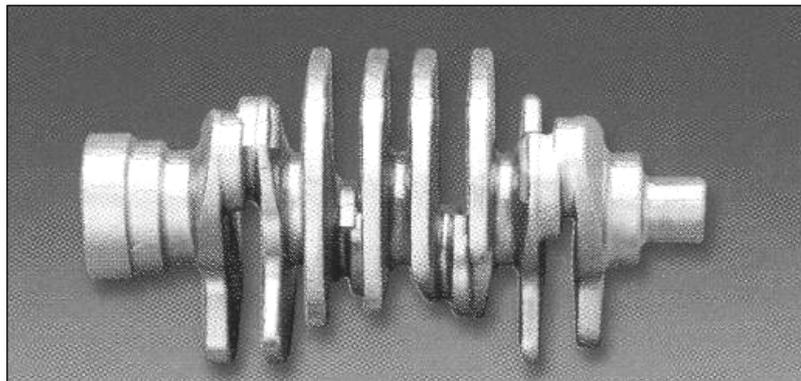


Bild 7.1: PKW-Kurbelwelle (V8-Splitpin, Firma ThyssenKrupp)

Die V8-Splitpin-Kurbelwelle zeichnet sich durch geringe Kurbelwangendicken und Lagerbreiten aus und stellt daher hohe Anforderungen an die in den Vorformstufen stattfindende Massenverteilung. Im Rahmen der Verfahrenscharakterisierung werden Hauptmaße dieser Kurbelwellengeometrie durch Verhältnisformeln nach METTIG [Met73] parametrisiert, um die Modellgeometrien herzuleiten. Die Hauptmaße der Kurbelwelle werden dazu unterschieden in

- fixe Hauptmaße (abgeleitet von der V8-Splitpin-Kurbelwelle) und
- parametrisierte Hauptmaße (vgl. Bild 7.2).
- Durch die Verwendung der Verhältnisformeln wird eine qualifizierte Verfahrenscharakterisierung des mehrdirektionalen Vorformens für Langteile der Formengruppe 32 möglich.

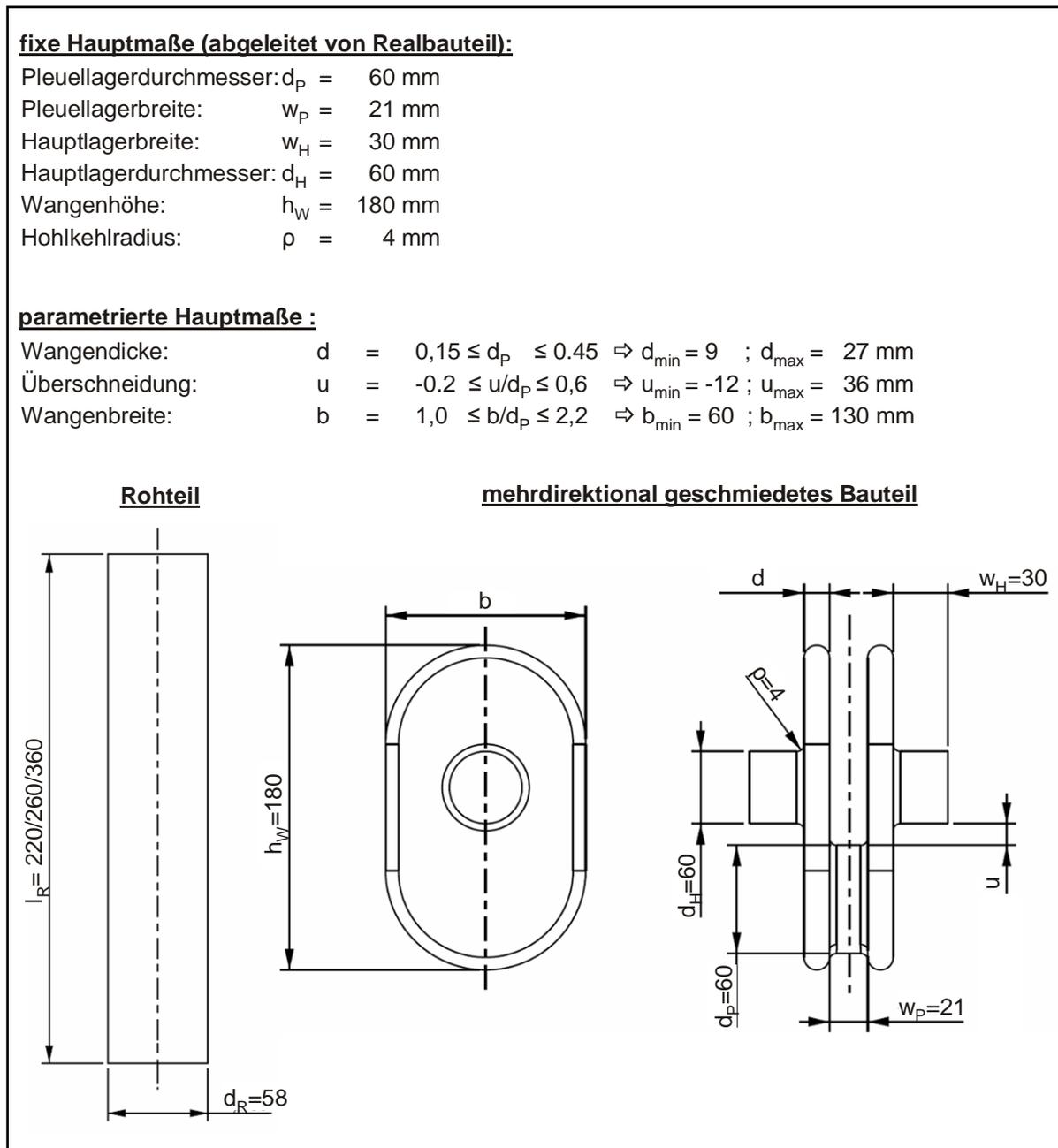


Bild 7.2: Generische Modellgeometrie zur Definition der Hauptmaße einer abstrahierten Pleuellager-Vorform

Die parametrisierten Hauptmaße

- Pleuellagerdicke und
- Überschneidung von Pleuellager- und Pleuellager (vgl. Bild 7.2)

werden durch die Verhältnisformeln variiert, um vier Modellgeometrien abzuleiten, die in Bezug auf übliche Pleuellagergeometrien extreme Ausprägungen darstellen. Hierdurch werden in der Praxis übliche Pleuellagergeometrien in den Untersuchungen berücksichtigt.

METTIG beschreibt die Überschneidung als die Überdeckung von Pleuellager und Hauptlager (vgl. Bild 7.2, rechts). Die Kurbelwangenbreite stellt sich in Abhängigkeit von der Kurbelwangendicke und Überschneidung durch Anstauchen zwischen den Stauchplatten ein und kann durch die Kinematik der formgebenden Werkzeugkomponenten beeinflusst werden.

Die Modellgeometrien unterscheiden sich neben den parametrisierten Hauptmaßen durch die in den Voruntersuchungen festgelegte Rohteillänge. Zur Bestimmung der Rohteillänge wurden die notwendigen Kriterien

- vollständige Formfüllung der Hohlkehlraden und
- Unterschreiten der maximal Wangenhöhe von 180 mm

herangezogen. Der Vormaterialdurchmesser wird auf Basis des Durchmessers der kleinsten Lagerstelle festgelegt. Tabelle 7.1. gibt einen Überblick über die vier generierten Modellgeometrien.

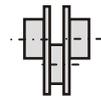
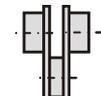
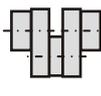
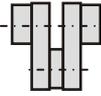
Modell-Nr.	Vormateriallänge	Kurbelwangen-dicke	Über-schneidung	Schematische Darstellung (xy-Ebene)
1	220 mm	9 mm	-12 mm	
2	220 mm	9 mm	36 mm	
3	260 mm	27 mm	-12 mm	
4	360 mm	27 mm	36 mm	

Tabelle 7.1: Ausgewählte Hauptmaße der vier Modellgeometrien

Für die Untersuchungen wird ein zylindrischer Stangenabschnitt als Rohteilgeometrie gewählt. Die Verwendung eines einfachen Stangenabschnitts engt die mit einem mehrdirektionalen Schmiedewerkzeug herstellbare Massenverteilung ein. Die zu erreichende Änderung der Massenverteilung erweitert sich entsprechend, wenn vor dem mehrdirektionalen Vorformen weitere Operationen (beispielsweise Walzen) durchgeführt werden. Um die Komplexität der Untersuchungen zu begrenzen, wird auf die Betrachtung solcher Stadienfolgen verzichtet.

7.2 Numerische Analysen

Die numerische thermisch-mechanisch gekoppelte FEM-Analyse bietet die Möglichkeit der Bewertung von Wirkzusammenhängen, die im Werkstoffinneren ablaufen und somit nicht oder nicht vollständig durch Realversuche erfasst werden können.

7.2.1 Prozessparameter

Zur Ermittlung der Prozessgrenzen werden Werkzeug und Bauteil spezifische Parameter herangezogen, die zentrale Prozessmerkmale beschreiben. Prozessparameter werden nach BEHRENS unterschieden in [Beh97]:

- Messgrößen,
- Kenngrößen und
- Einstellgrößen.

Anhand der numerisch berechneten Kenngrößen kann eine Bewertung des mehrdirektionalen Vorformprozesses erfolgen. Über- oder unterschreitet eine Kenngröße den festgelegten Wert, ist bezüglich der variierten Einstellgröße die Prozessgrenze erreicht. Bezogen auf die FEM-Analysen stellen die Kenngrößen berechnete Größen dar, die im Post-Processing-Interface zur Auswertung der Simulation zur Verfügung stehen. Folgende Kenngrößen werden im Rahmen der numerischen Simulationen betrachtet:

Kenngröße 1 - Vergleichsspannung σ_V im Werkzeug: Überschreitet die Vergleichsspannung des Werkzeugwerkstoffs seine Fließspannung (gewählt: Werkstoff-Nr. 1.2367, Warmzugfestigkeit $R_{M,W} = 1.350$ MPa [Bud07]), tritt eine plastische Deformation des Werkzeugs auf. Deformationen führen zu Formabweichungen am Schmiedeteil bzw. zu Werkzeugversagen.

Kenngröße 2 - Vergleichsformänderung ϕ_V : Die Vergleichsformänderung eignet sich für die Beschreibung mehrachsiger, großer plastischer Formänderungsvorgänge. Durch die Vergleichsformänderung wird der Formänderungszustand unterschiedlicher Werkstücke vergleichbar. Nach VDI-Richtlinie 3137 [VDI76] wird die bis zum Bauteilversagen erreichte maximale Vergleichsformänderung als Grenzformgrad ϕ_G bezeichnet. Der Grenzformgrad ist eine Maßzahl für die maximale Formänderung bis zum Werkstoffversagen (Formänderungsvermögen). Im Allgemeinen gilt, dass die Grenzformänderung höchstens gleich dem Formänderungsvermögen des Werkstoffs sein kann; in den meisten Fällen ist sie geringer [KK06, KW99]. Das Formänderungsvermögen ist nach LANGE [Lan02] neben den genannten Einflussgrößen Umformgeschwindigkeit, Bauteiltemperatur und Werkstoff weiterhin abhängig von der Geometrie des Systems. Dazu zählen die Gestalt und absolute Größe des Werkstücks sowie die Art der Kraffteinleitung (Wechselwirkung zwischen Werkstück und Werkzeug).

Eine genaue Bestimmung des Grenzformgrads ist aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren schwierig und ohne experimentelle Versuche nicht präzise möglich. Für den Werkstückwerkstoff C45 wird der Grenzformgrad für Verfahren der Massiv-

umformung nach [Hir01] mit $\varphi_G \approx 5$ angegeben. Aufgrund der Neuartigkeit des Verfahrens des mehrdirektionalen Vorformens und der Gestaltabhängigkeit des Grenzumformgrads wird ein um 30 Prozent geringerer Vergleichsumformgrad ($\varphi_G = 3,5$) als maximale tolerierter Vergleichsumformgrad definiert.

Kenngröße 3 - Schmiedefehler: Das Auftreten von Falten oder Stichen im mehrdirektionalen Umformprozess wird als Fehler definiert.

Kenngröße 4 – Formfüllung: Unter Formfüllung versteht man das vollständige Ausfüllen der Gesenkmatrix mit dem Werkstückwerkstoff durch äußere Kräfte zur Überwindung der Fließspannung des Werkstoffs. Eine unvollständige Formfüllung kann zu Schmiedefehlern oder Maßfehlern der Endform führen. Die Formfüllung gilt als vollständig, wenn die Lagerstellen sowie die Hohlkehlradien (vgl. Bild 3.2) ausgeformt sind.

Die Kenngrößen *Stauchkraft* F_F und *Schubumformkraft* F_T werden herangezogen, um näherungsweise die Größe des Pressenaggregats über die Stößelkraft F_S zu bestimmen. Dazu werden nach HUSTEDT [Hus03] die Keilantriebskräfte F_A der drei im Modellwerkzeug eingesetzten Keilgetriebe nach Formel 16 bzw. 17 ermittelt:

$$F_{A\text{Stoffanhäufung}} = \frac{F_F}{2} \frac{\mu_1 + \mu_2 + (1 - \mu_1 \mu_2) \tan \alpha}{1 - (\mu_2 \mu_3) - (\mu_2 + \mu_3) \tan \alpha} \quad (16)$$

$$F_{A\text{Schubumformung}} = F_T \frac{\mu_1 + \mu_2 + (1 - \mu_1 \mu_2) \tan \alpha}{1 - (\mu_2 \mu_3) - (\mu_2 + \mu_3) \tan \alpha} \quad (17)$$

Zur Berechnung der Stößelkraft F_S wird überschlägig unter Vernachlässigung weiterer Reibeinflüsse (Werkzeug- und Maschinenführungen) Formel 18 verwendet:

$$F_S = 2 F_{A\text{Stoffanhäufung}} + F_{A\text{Schubumformen}} \quad (18)$$

Es werden übliche Gleitreibungskoeffizienten $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,08$ für die Reibpaarung Stahl-Stahl angenommen. Der Keilwinkel α wird für die Berechnung mit $\alpha = 30^\circ$ festgelegt (vgl. Abschnitt 5.3.3).

Die Einstellgrößen eines Schmiedeprozesses zeichnen sich nach BEHRENS dadurch aus, dass sie sich an dem Schmiedeaggregat, bzw. der vorgeschalteten Erwärmungseinheit explizit einstellen lassen [Beh97]. Sie lassen sich durch Aufteilen des Fertigungsprozesses in die Teilsysteme Rohteil, Erwärmung und Maschine unterteilen. Zu den Einstellgrößen des untersuchten mehrdirektionalen Vorformprozesses zählen

- die Bauteiltemperatur T_S und
- die Stößelgeschwindigkeit v_S .

In Bild 7.3 wird die Aufteilung der Prozessparameter in parametrisierte Hauptmaße, Einstellgrößen und Kenngrößen zusammengefasst.

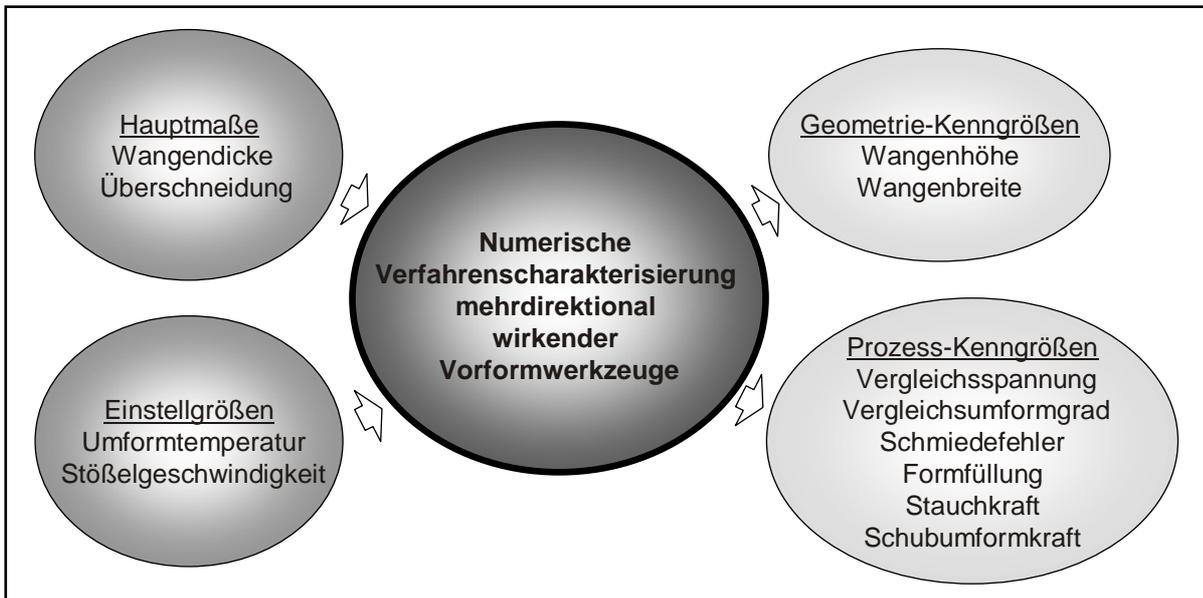


Bild 7.3: Parametrisierte Hauptmaße, Einstellgrößen und Kenngrößen zur Verfahrenscharakterisierung mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge

Fehlerabschätzung

Die verwendeten Mess- und Kenngrößen werden nach jedem Simulationsdurchlauf im Post-Processing User-Interface erfasst. Zur quantitativen Ermittlung der Kenngrößen Vergleichsspannung, Vergleichsumformgrad und Schmiedefehler stellt das Programm *Forge3* Farbskalen zur Verfügung, die durch den Farbvergleich zwischen Skala und Bauteileinfärbung die Bestimmung der Größe des jeweiligen Messwerts ermöglicht. Durch die visuelle Auswertung entstehen zufällige Messabweichungen, da die Qualität der Auswertung von der Erfahrung des Anwenders abhängt. Weiterhin beeinflusst die persönliche Einschätzung des Anwenders über die Signifikanz örtlich begrenzt auftretender Maxima die Messwernerfassung.

Um den Fehlereinfluss zu minimieren, wird ein standardisiertes Vorgehen zur Ermittlung der Kenngrößen *Vergleichsspannung* und *Vergleichsumformgrad* angewendet. Dazu wird der Skalierungsbereich für jede Kenngröße festgelegt und vereinbart, dass eine Anzeige auf weniger als zehn zusammenhängenden finiten Elementen nicht in die Bewertung einfließt. Dadurch wird dem Phänomen der Knotenentartung und damit einhergehenden lokal überhöhten Anzeigewerten der Kenngröße begegnet. Für die Kenngröße *Vergleichsspannung* lässt sich durch dieses Vorgehen der Fehler auf ± 25 MPa eingrenzen. Dies entspricht einem prozentualen Fehler von ca. 5 Prozent. Der Fehler beim Ablesen des Vergleichsumformgrads wird auf $\pm 0,2$ Einheiten geschätzt. Darüber hinaus gehende Differenzen des Vergleichsumformgrads innerhalb einer Gruppe können durch die iterative Berechnungsmethode der FEM erklärt werden. Für die Anzeige von Schmiedefehlern gilt, dass das Programm ledig-

lich auf das Vorhandensein eines Schmiedefehlers verweist, aber keine Quantifizierung zulässt. Eine Programmanzeige eines Schmiedefehlers fließt demnach in jedem Fall als vorhandener Fehler in die Auswertung ein.

Die Kenngrößen *Kurbelwangenhöhe* und *-breite* werden durch Vermessung des Modells im Pre-Processing User-Interface ermittelt. Dazu werden vier Ebenen definiert, die durch eine programminterne Routine als Messebenen genutzt werden können. Durch Abstandsmessung zwischen jeweils zwei Ebenen können die zwei Maße bis auf drei Nachkommastellen genau gemessen werden. Die Messmethode ist damit präzise, die Richtigkeit und damit die Zuverlässigkeit dieses Messverfahrens ist abhängig von der gewählten Netzgröße sowie weiteren Faktoren wie zum Beispiel der vorliegenden Netzverzerrung. Eine Einschätzung der Fehlergröße ist daher schwierig. Legt man die verwendete Netzgröße von 2,5 mm zugrunde, kann der Messfehler auf < 10 Prozent geschätzt werden.

7.2.2 Werkzeugmodell zur Ermittlung der Prozessgrenzen

Die Geometrie des numerischen Werkzeugmodells basiert auf den in Abschnitt 5.3 beschriebenen Werkzeugkonturen. Die Simulationen werden mit dem in den Voruntersuchungen genutzten Programm *Forge3* thermisch-mechanisch gekoppelt durchgeführt. Das Modell wird in seiner Komplexität soweit reduziert, dass die Funktion der Formgebung erfüllt ist; Weitere Werkzeugfunktionen wie beispielsweise die der Kraftwandlung in den Keilschiebern werden nicht modelliert (vgl. Bild 7.4). Die Untersuchungen werden mittels eines generischen Simulationsmodells durchgeführt, welches eine schnelle Veränderung der Einstellparameter zulässt. Die Kenngrößen können durch das Post-Processing-Interface einfach und schnell ausgelesen werden.

Das Modell besteht aus sechs rechteckigen Werkzeugteilen, von denen je drei die formgebenden Komponenten des Oberwerkzeugs bzw. des Unterwerkzeugs repräsentieren. Die Komponenten enthalten Geometrielemente, die der Formgebung der Hauptlager bzw. des Pleuellagers dienen. Die Formgebung der wangenförmigen Elemente geschieht durch Stoffanhäufung zwischen den mehrdirektional beweglichen Werkzeugbacken als Freiformen zwischen zwei ebenen Stauchplatten.

Die Simulation des mehrdirektionalen Vorformens erfolgt entsprechend den experimentellen Untersuchungen in einer Stufe, wobei die Bewegung der formgebenden Werkzeugteile stets zur gleichen Zeit beginnt und endet. Dies hat zur Folge, dass sich die Werkzeuge mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen, da sich die zurückzulegenden Wege zum Anstauchen und Schubumformen zum Teil deutlich unterscheiden. Dieser Umstand wird in der Programmierung der Werkzeugkinematik berücksichtigt.

Aufgrund der Bauteilsymmetrie in zwei Ebenen besteht die Möglichkeit, die Größe des Werkzeugmodells unter Nutzung einer Symmetrieebene ohne Informationsverlust zu halbieren. Zur Berechnung der Reibung wird das kombinierte Zwischenschichtgesetz nach Shaw angewendet, bei dem das Coulomb'sche Reibgesetz und das Reibfaktorgesetz zur Beschreibung der Reibung kombiniert werden.

Die in den vorangegangenen Untersuchungen verwendeten Werkstoffe für Werkzeug (X 38 Cr Mo V 5-3, Werkstoff-Nr. 1.2367) und Werkstück (C45, Werkstoff-Nr. 1.0503) werden beibehalten.

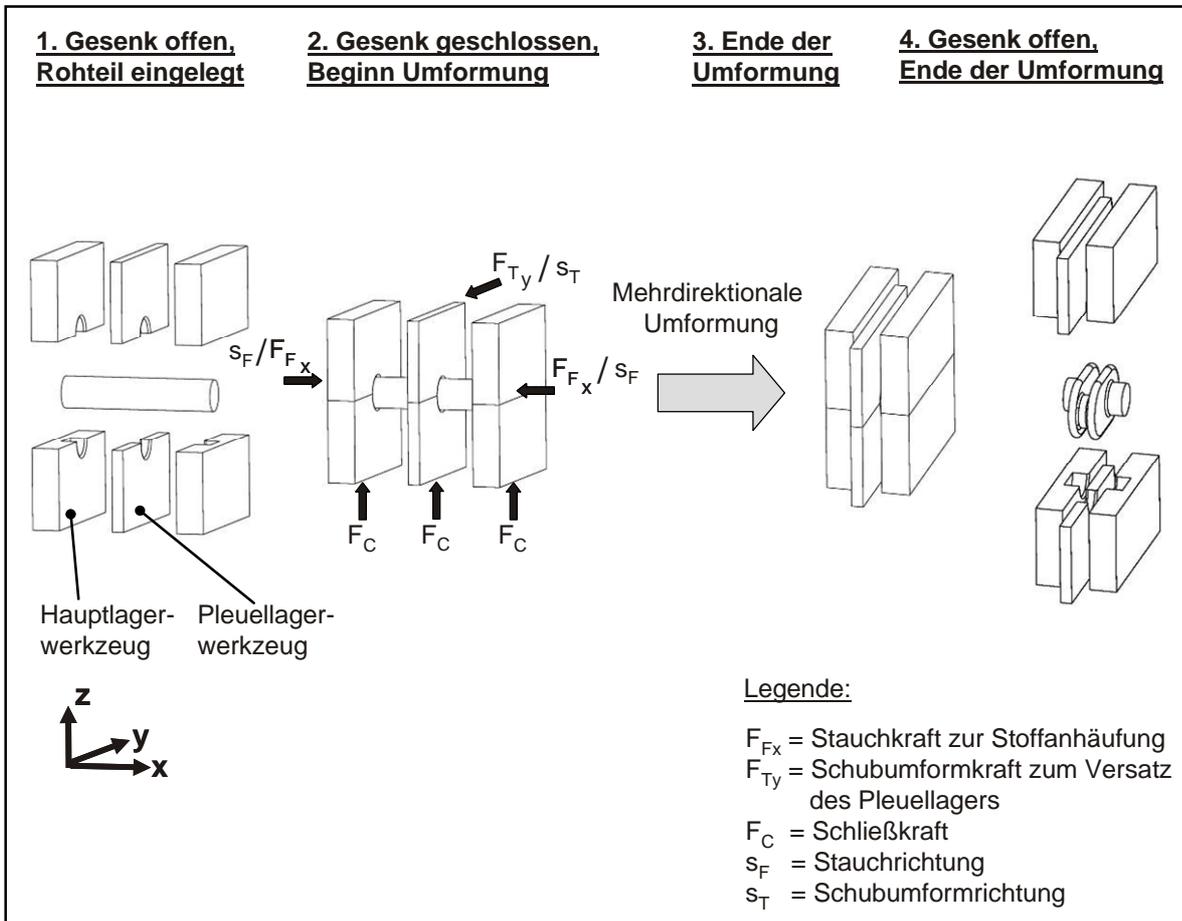


Bild 7.4: Virtuelles Werkzeugmodell zur numerischen Ermittlung der Prozessgrenzen mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge, Darstellung der mehrdirektionalen Werkzeugbewegungen

Werkstoffmodelle und Modellumfang der numerischen Simulation

Das Werkzeug wird mit einem linear-elastischen Werkstoffmodell, das Werkstück mit dem starr-plastischen Werkstoffmodell mit Ratenabhängigkeit und Verfestigung auf Basis der Fließspannungsgleichung nach Hensel-Spittel berechnet. Der Einfluss des Maschinenverhaltens wie beispielsweise der Einfluss der Führungssysteme im Werkzeug oder des dynamischen Auffederungsverhaltens des Werkzeugs, wird im Prozessmodell nicht abgebildet, da diese Größen nicht unmittelbar zur Prozessgrenzenermittlung erforderlich sind.

Kinematik

Die virtuellen Werkzeugbewegungen werden von den zuvor definierten Randbedingungen 1 bis 4 festgelegt. Diese Randbedingungen fließen in die Versuchsplanung in Form von unterschiedlich gestaffelten Werkzeugbewegungen ein. Durch die lineare Vorschubbewegung der Werkzeugmodelle stehen die Umformkräfte und die Ver-

gleichsspannung mit der momentanen Werkzeugposition in fester Relation und können nach Abschluss der Simulation ohne weitere Transformation ausgewertet werden.

7.2.3 Justierung numerischer Einflussgrößen

Bei der Untersuchung der mehrdirektional geschmiedeten 2. Vorform der Einzylinderkurbelwelle zeigte sich, dass zur Steigerung der Aussagegenauigkeit der FEM-Analyse eine Anpassung der relevanten Simulationsparameter notwendig ist (vgl. Abschnitt 6.3). Zudem sollten neben der Aufnahme realer Prozessdaten (Thermografieaufnahmen der Werkstückoberflächentemperaturen) folgende Parameter iterativ optimiert werden:

- Reibkoeffizienten μ , m und
- Wärmeübergangskoeffizient h .

Zur Justierung der Parameter wird die simulierte Bauteilgeometrie mit den in den Versuchsschmiedungen hergestellten Bauteilen hinsichtlich ihrer Kurbelwangenkontur verglichen. Die Kurbelwangenkontur ist als Bezug für die Justierung der Simulationsparameter insbesondere deshalb geeignet, weil sie Einfluss auf die Prozessfähigkeit des Fertigschmiedeschritts hat: Hat die Kurbelwangengeometrie nicht die erforderliche Form, verhindert dies das umformfreie Schließen des Fertigschmiedewerkzeug. In Bild 7.5 sind die ursprünglich genutzten Simulationsparameter den geänderten Parametern nach der Justierung gegenübergestellt.

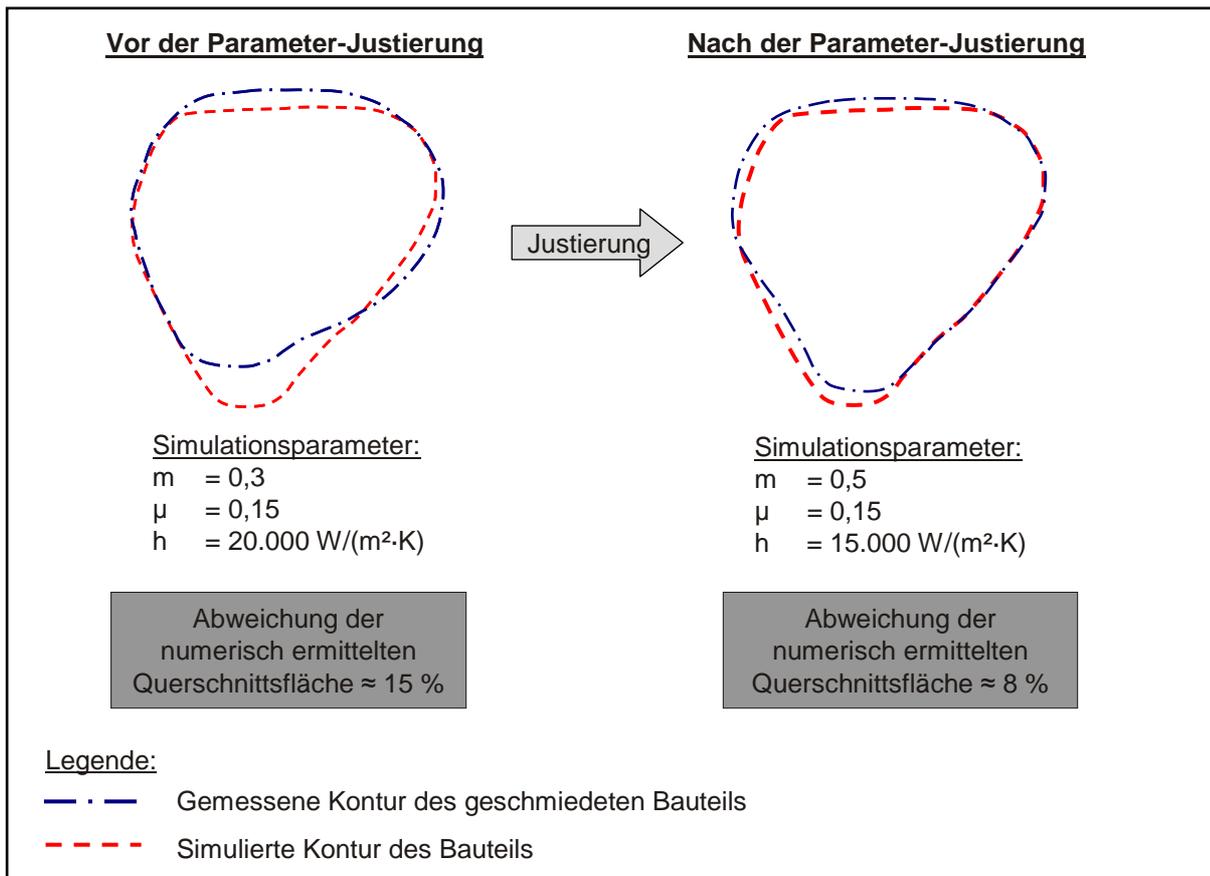


Bild 7.5: Justierung numerischer Prozessparameter zur Erhöhung der Übereinstimmung zwischen Realbauteil und Simulation, Werkstoff-Nr. 1.0503 (Einstellgrößen: $v_s = 30 \text{ mm/s}$; $T_0 = 1.250 \text{ °C}$)

Die Kontur des geschmiedeten Bauteils wurde durch Vermessung mit einem 3D-Koordinatenmessgerät ermittelt. Die Kontur des simulierten Bauteils wurde in einem CAD-System in einen Linienzug überführt und der geschmiedeten Kontur gegenübergestellt. Durch die Parameter-Justierung konnte die Abweichung der numerisch ermittelten Kontur von der gemessenen Kontur von 15 Prozent auf 8 Prozent reduziert werden. Die verbleibende Abweichung der Konturen von 8 Prozent ist auf Prozessschwankungen (Volumenschwankungen durch Abbrand) und Maschinen- und Werkzeugeinflüsse (elastische Werkzeugdehnungen, Führungsspiel) während der Durchführung der praktischen Versuche zurückzuführen. Die ermittelten Parameterwerte werden für die im folgenden Abschnitt durchgeführten Versuche genutzt.

7.2.4 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung wird zur Prozessgrenzenbestimmung eingesetzt, um mittels systematischer Parametervariation Erkenntnisse zu den jeweils untersuchten Einflussgrößen zu gewinnen. Die Grundlagen zum Verständnis und zur Vorgehensweise in der statistischen Versuchsplanung haben beispielsweise MONTGOMERY und SCHEFFLER beschrieben [Mon05, Sch001]. Mittels FEM-Analysen werden die Einflussparameter gezielt und voneinander unabhängig variiert. Dadurch ist jede

Parameterkombination prinzipiell abbildbar. Störgrößen, wie sie im Realprozess auftreten, werden im gewählten Prozessmodell nicht abgebildet. Stochastische Einflüsse können somit ausgeschlossen werden.

In den geplanten Experimenten werden den in Tabelle 7.2 dargestellten Einstellgrößen unterschiedliche Ausprägungen zugewiesen, ein Simulationslauf durchgeführt und die Kenngrößen aufgezeichnet. Die Zuweisung der jeweiligen Ausprägung der variierten Einstellgrößen wird im Versuchsplan dargestellt und wird auf Grundlage der in Abschnitt 7.2.1 dargestellten Vorüberlegungen abgeleitet. Wiederholungen der einzelnen Simulationsläufe entfallen aufgrund der nicht berücksichtigten stochastischen Einflüsse.

Bei der Planung von Simulationsexperimenten kann nach WANG und KRÜGER u. a. die One-by-One-Faktor-Methode als Verfahren der statistischen Versuchsplanung eingesetzt werden [Wan95, Krü00]: Diese - auch Sensitivitätsanalyse genannte Methode - stellt eine Möglichkeit dar, Abhängigkeitsverhältnisse zu untersuchen. Nach VDI3633/3 [VDI97] wird in der Sensitivitätsanalyse nur jeweils ein einzelner Parameter während eines Simulationslaufs verändert; alle anderen Parameter bleiben konstant. Wechselwirkungen werden dabei bewusst vermieden. Die Sensitivitätsanalyse eignet sich für die Ermittlung der Prozessgrenzen, da ein einfacher Versuchsplan aufgestellt werden kann, um die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Kenngrößen zu untersuchen. Der Aufwand der Untersuchungen hängt stark von der Anzahl der Ausprägungen der Parameter ab. Gemäß der Zielsetzung der Untersuchungen kann eine Reduktion der Anzahl der Ausprägungen vorgenommen werden, die dessen ungeachtet zu aussagekräftigen Ergebnissen führt.

Parameter	Varianten	Ausprägung
Stößelgeschwindigkeit	4	100 mm/s; 200 mm/s 300 mm/s; 400 mm/s
Überschneidung	2	-12 mm, 36 mm
Umformtemperatur	2	1.150 °C, 1.250 °C
Kurbelwangendicke	2	9 mm, 27 mm
Versuchsplan	32 Simulationen	

Tabelle 7.2: Versuchsplan zur Ermittlung der Prozessgrenzen mehrdirektionaler Schmiedewerkzeuge

7.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der FEM-Analysen dargestellt. Dazu werden die Einstellgrößen, das Ergebnis der Stoffflussanalyse sowie die berechneten Mess- und Kenngrößen für jede Modellgeometrie tabellarisch dargestellt und beschrieben. Der Übersichtlichkeit halber werden lediglich die jeweils ermittelten maximalen Mess- und Kenngrößen dargestellt. Eine detaillierte tabellarische Übersicht aller Simulationsergebnisse wird in Anhang A3 gegeben.

Modellgeometrie 1

Modellgeometrie 1 (Kurbelwangendicke 9 mm, Überschneidung -12 mm) bildet in der Seitenansicht durch die Ausformung von Kurbelwange und Gegengewicht eine nahezu runde Querschnittsgeometrie aus (Bild 7.6). Ungünstig erscheint hier die hinter dem Hauptlager angehäuften Masse der Kurbelwange. Das Fertigteil einer Kurbelwelle weist in diesem Bereich keine Masse auf, weshalb bei einer konventionellen Schmiedeprozesskette in diesem Bereich ein hoher Gratanteil entstünde. Die maximale Kurbelwangenhöhe von 161 mm liegt unterhalb des vom Realbauteil abgeleiteten Maximalwertes.

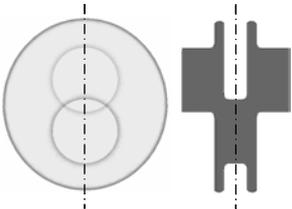
<u>Modellgrößen</u>		<u>Stoffflussanalyse</u>		<u>Geometrie-Kenngrößen</u>	
Wangendicke	9 mm	Seitenansicht (transparent)	Draufsicht	max. Wangenbreite	152 mm
Überschneidung	-12 mm			max. Wangenhöhe	161 mm
				<u>Prozess-Kenngrößen</u>	
				max. Vergleichsspannung	900 MPa
				max. Vergleichsumformgrad	3,3
				Schmiedefehler	Nein
				max. Stauchkraft	8.000 kN
				max. Schubumformkraft	52 kN
				Stößelkraft	≈ 5.900 kN
<u>Einstellgrößen</u>					
Umformtemp.	1.150-1.250°C				
Stößelgeschw.	100-400 mm/s				

Bild 7.6: Untersuchungsergebnisse der FEM-Analyse für Modellgeometrie 1

Die maximale Kurbelwangenbreite bildet sich durch Freiformen im Werkzeug aus und beträgt ca. 152 mm. Die Maße der Kurbelwangenbreiten und Kurbelwangenhöhen streuen um den Mittelwert 151,9 mm bzw. 160,7 mm lediglich um 0,1 Prozent. Eine signifikante Abhängigkeit der beiden Maße von den untersuchten Einstellgrößen ist aus den Simulationen nicht ableitbar. Unter der Voraussetzung der Volumenkonstanz des umgeformten Materials sowie einer gleich bleibenden Werkzeugkinematik beeinflussen die Einstellgrößen zwar die Spannungen in Schmiedeteil und Werkzeug, nicht aber die Formausprägung des Werkstücks in signifikanter Weise. Hier ist zu vermuten, dass die in den Simulationen konstant gehaltenen Reibwerte eine wesentliche Einflussgröße auf die Werkstückform darstellen.

Die maximal ermittelte Vergleichsformänderung $\varphi_{V,max} = 3,3$ liegt unterhalb des definierten Grenzumformgrads von $\varphi_G = 3,5$. Der Bereich der höchsten Vergleichsform-

änderung ist vergleichsweise klein und befindet sich am Hohlkehradius des Pleuellagers (vgl. Bild 7.7 links). In der Kurbelwange schwankt die Vergleichsformänderung zwischen 1.5 und 2.4. Die maximale Vergleichsspannung $\sigma_{V,max}$ von ca. 900 MPa liegt ebenfalls unterhalb der definierten Grenzen von $R_{M,W} = 1.350$ MPa und wird am Pleuellagerwerkzeug im Bereich des Hohlkehradius detektiert (vgl. Bild 7.7 rechts). Aufgrund der zur Umformung notwendigen Schubumformkraft $F_{TY,max}$ von 50 kN und der sich überlagernden Stauchkraft $F_{FX,max}$ von 8.000 kN wird dieser Werkzeugbereich am stärksten belastet. Eine Verringerung der Rohteiltemperatur von 1.250 °C auf 1.150 °C führt im Durchschnitt zu einer um ca. 25 Prozent höheren Vergleichsspannung am Pleuellagerwerkzeug. Eine Erhöhung der Stößelgeschwindigkeit von 100 mm/s auf 400 mm/s bewirkt bei einer Bauteiltemperatur von 1.150 °C einen Anstieg der Vergleichsspannung um ca. 13 Prozent. Die Stößelkraft steigt bei einer Reduzierung der Bauteiltemperatur auf 1.150 °C um durchschnittlich 20 Prozent. Diese Ergebnisse sind durch die proportionale Abhängigkeit der Fließspannung von der Umformgeschwindigkeit und der Umformtemperatur zu erklären.

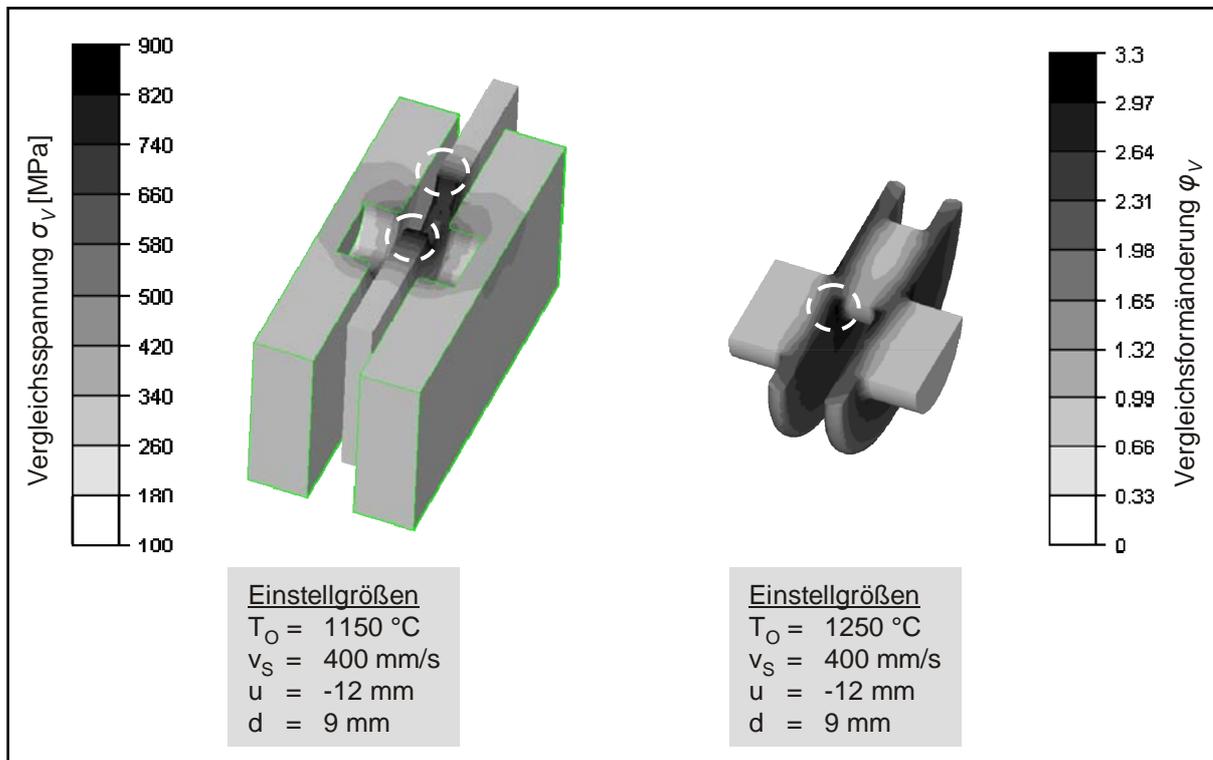


Bild 7.7: Berechnete maximale Vergleichsspannung und maximaler Vergleichsumformgrad für Modellgeometrie 1

Die Simulationen zeigen, dass die Modellgeometrie 1 mit vollständiger Formfüllung der Hohlkehradien fehlerfrei hergestellt werden kann. Eine plastische Deformation der Matrize ist aufgrund der errechneten Vergleichsspannungen nicht zu erwarten.

Kritisch sind in diesem Zusammenhang die hohen Druckberührzeiten bei den untersuchten Stößelgeschwindigkeiten von 100 mm/s bzw. 200 mm/s zu bewerten. Übliche Druckberührzeiten betragen je nach Maschinenbauart und Prozess zwischen

0,5 s und 500 ms [Bir08]. Somit stellen die hier errechneten Zeiten von 0,6 s und 0,3 s Werte dar, die mit einer Zunahme der erforderlichen Umformkraft, starken thermomechanischen Beanspruchungen des Werkzeugs und damit mit einem erhöhten Werkzeugverschleiß einhergehen. Insbesondere für die mehrteilig aufgebauten mehrdirektionalen Schmiedewerkzeuge stellen die hohen Druckberührzeiten ein Problem dar, da der Wärmestrom im Werkzeug durch den mehrteiligen Aufbau behindert wird. Dies kann im kontinuierlichen Prozess zu erheblichen Temperaturspitzen im Werkzeug führen. Insofern lässt sich feststellen, dass höhere Umformgeschwindigkeiten günstig für mehrdirektionale Vorformprozesse sind. Diese Feststellung trifft ebenfalls auf die im Folgenden analysierten Modellgeometrien zu. Für ihre Stoffflusssimulation werden zum Teil Druckberührzeiten von bis zu 1,1 s ermittelt (vgl. Versuch Nr. 25). In dieser Parameterkonstellation wird der starke Wärmeeintrag vermutlich zum Werkzeugausfall durch unzulässig hohe thermische Lasten führen.

Modellgeometrie 2

Modellgeometrie 2 (Kurbelwangendicke 9 mm, Überschneidung 36 mm) hat in der Seitenansicht eine elliptische Form. Die Kurbelwangenhöhe von 178 mm entspricht der des referenzierten Realbauteils (Bild 7.8). Ein signifikanter Einfluss der Umformtemperatur und der Stößelgeschwindigkeit auf die untersuchten Maße Wangenbreite und Wangenhöhe ist nicht erkennbar.

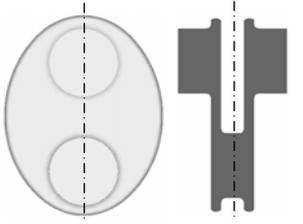
Modellgrößen		Stoffflussanalyse		Geometrie-Kenngrößen	
Wangendicke	9 mm	Seitenansicht (transparent)	Draufsicht	max. Wangenbreite	140 mm
Überschneidung	36 mm			max. Wangenhöhe	178 mm
				Prozess-Kenngrößen	
				max. Vergleichsspannung	780 MPa
				max. Vergleichsumformgrad	3,1
				Schmiedefehler	Nein
				max. Stauchkraft	7.700 kN
				max. Schubumformkraft	190 kN
				Stößelkraft	≈ 5.600 kN
Einstellgrößen					
Umformtemp.	1.150-1.250°C				
Stößelgeschw.	100-400 mm/s				

Bild 7.8: Untersuchungsergebnisse der FEM-Analyse für Modellgeometrie 2

Die errechneten Vergleichsspannungen im Pleuellagerwerkzeug sind im Vergleich zu Modellgeometrie 1 im Mittel um ca. 17 Prozent niedriger. Dies lässt sich mit der unterschiedlichen Kinematik zur Herstellung der beiden Modellgeometrien erklären: Durch die Erhöhung des Schubumformweges (96 mm statt 48 mm) verringert sich der Einfluss der Stauchkraftkomponente auf die mechanische Belastung des Hohlkehlradius am Pleuellagerwerkzeug. Durch die erhöhte Schubumformkraft $F_{TY,max}$ von 190 kN verringern sich die Druckspannungen im Werkzeug, da das Werkstückmaterial durch den erhöhten Schubumformweg nun stärker in radiale Richtung fließt. Die Stößelkraft nimmt mit steigender Stößelgeschwindigkeit bei einer Bauteiltemperatur von 1.150 °C um 7 Prozent zu. Die Druckberührzeiten erhöhen sich im Vergleich zu

Modellgeometrie 1 durch den größeren Schubumformweg weiter. Erst ab einer Stößelgeschwindigkeit von 300 mm/s werden Werte unterhalb von 0,5 s erreicht. Hohe Druckberührzeiten führen zu einer hohen thermomechanischen Werkzeugbelastung. Zusätzlich kühlt das Schmiedeteil bedingt durch seine Geometrie in Verbindung mit höheren Prozesszeiten stärker aus. Diese Auskühlung würde in der Fertigformstufe zu unerwünschten Effekten wie beispielsweise steigenden Werkzeugbelastungen und damit einhergehenden Maßabweichungen am Schmiedeteil führen.

Die ermittelte maximale Vergleichsformänderung $\varphi_{V,max}$ von 3,1 weicht nur wenig von den Werten für Modellgeometrie 1 ab. In den FEM-Simulationen zu Modellgeometrie 2 wurden keine Schmiedefehler festgestellt. Die Formfüllung ist nach den angelegten Kriterien vollständig.

Modellgeometrie 3

Modellgeometrie 3 (Kurbelwangendicke 27 mm, Überschneidung -12 mm) unterscheidet sich durch ihre gedrungene Form deutlich von Modellgeometrie 1 und 2 (Bild 7.9). Durch die große Kurbelwangendicke entsteht eine Vorformgeometrie mit einem ausgeformten Pleuellagerversatz. Die Simulation ergibt eine maximale Kurbelwangenhöhe von 114 mm bei einer maximalen Kurbelwangenbreite von 100 mm bei einer geringen Streuung der Werte. Die resultierende Geometrie ist aufgrund des wenig ausgeprägten Gegengewichtes unüblich für PKW- oder LKW-Motoren. Für Motoren, in denen die Dynamik eine untergeordnete Rolle spielt (zum Beispiel im Schiffsmotorenbau), werden solche Kurbelwellenformen allerdings eingesetzt [KF06].

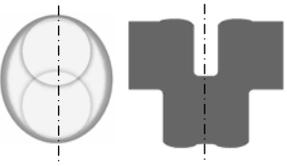
<u>Modellgrößen</u>		<u>Stoffflussanalyse</u>		<u>Geometrie-Kenngrößen</u>	
Wangendicke	27 mm	Seitenansicht (transparent)	Draufsicht	max. Wangenbreite	100 mm
Überschneidung	- 12 mm			max. Wangenhöhe	114 mm
				<u>Prozess-Kenngrößen</u>	
				max. Vergleichsspannung	360 MPa
				max. Vergleichsumformgrad	2,5
				Schmiedefehler	Nein
				max. Stauchkraft	1.800 kN
				max. Schubumformkraft	48 kN
				Stößelkraft	≈ 1.300 kN
<u>Einstellgrößen</u>					
Umformtemp.	1.150-1.250°C				
Stößelgeschw.	100-400 mm/s				

Bild 7.9: Untersuchungsergebnisse der FEM-Analyse für Modellgeometrie 3

Die Vergleichsspannung von $\sigma_{V,max} = 360$ MPa und die Vergleichsformänderung $\varphi_{V,max} = 2,5$ liegen unterhalb der definierten zulässigen Grenzwerte. Der Bereich der höchsten Vergleichsspannungen liegt wie bei Modellgeometrie 1 und 2 an dem den Hohlkehlradius formenden Übergang von Pleuellager zu Kurbelwange. Die im Vergleich zu Modellgeometrie 1 und 2 geringen Werte für σ_V sind auf die größere Kurbelwangendicke zurückzuführen. Diese führt aufgrund der geringeren Auskühlung und des kleineren Vergleichsumformgrads zu einer Reduzierung der Fließspannung.

gen des Materials. Eine Verringerung der mechanischen Werkzeugbelastung ist die Folge.

Die nötigen Stauch- und Schubumformkräfte sind aufgrund des geringen Umformgrads mit $F_T = 50 \text{ kN}$ und $F_F = 1.800 \text{ kN}$ erheblich kleiner als für die Modellgeometrien 1 und 2. Eine Verringerung der Bauteiltemperatur um 100 K führt zu einer Zunahme der Umformkräfte um durchschnittlich 23 Prozent. Eine Erhöhung der Stößelgeschwindigkeit von 100 mm/s auf 400 mm/s bewirkt eine Zunahme der Umformkräfte unabhängig von der Bauteiltemperatur um ca. 18 Prozent.

Die Formfüllung der Modellgeometrie ist vollständig; Schmiedefehler wie Falten oder Stiche können nicht detektiert werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die mehrdirektionale Vorformung der Modellgeometrie 3 ohne Einschränkungen möglich ist. Die Druckberührzeiten zwischen 0,15 s und 0,6 s sind bei den langsameren Stößelgeschwindigkeiten in ähnlicher Weise wie bei den Modellgeometrien 1 und 2 als kritisch zu bewerten.

Modellgeometrie 4

Für Modellgeometrie 4 (Kurbelwangendicke 27 mm, Überschneidung 36 mm) wurde eine Vormateriallänge von 360 mm gewählt (Bild 7.10). Die Kurbelwangenhöhe beträgt 160 mm; die Kurbelwangenbreite beträgt 110 mm. Dabei schwanken die Werte in Abhängigkeit von Stößelgeschwindigkeit und Bauteiltemperatur nur unwesentlich und sind somit im Sinne einer Beurteilung der Einflussgrößen nicht bewertbar. Der im Vergleich zu Modellgeometrie 3 erhöhte Kurbelradius führt in Verbindung mit der gewählten Vormateriallänge zu einer ovalen Bauteilgeometrie mit ausgeprägten Kurbelwangen.

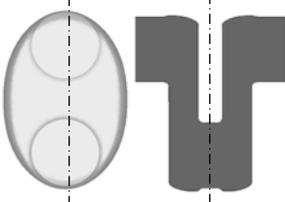
<u>Modellgrößen</u>		<u>Stoffflussanalyse</u>		<u>Geometrie-Kenngrößen</u>	
Wangendicke	27 mm	Seitenansicht (transparent)	Draufsicht	max. Wangenbreite	110 mm
Überschneidung	36 mm			max. Wangenhöhe	160 mm
				<u>Prozess-Kenngrößen</u>	
				max. Vergleichsspannung	360 MPa
				max. Vergleichsumformgrad	2,3
				Schmiedefehler	Nein
				max. Stauchkraft	2.900 kN
				max. Schubumformkraft	84 kN
				Stößelkraft	≈ 2.100 kN
<u>Einstellgrößen</u>					
Umformtemp.	1.150-1.250°C				
Stößelgeschw.	100-400 mm/s				

Bild 7.10: Untersuchungsergebnisse der FEM-Analyse für Modellgeometrie 4

Die Vergleichsspannung und die Vergleichsformänderung von $\sigma_{V,max} = 360 \text{ MPa}$ und $\varphi_{V,max} = 2,3$ liegen unterhalb der definierten zulässigen Grenzwerte. Ein direkter Vergleich mit Modellgeometrie 3 hinsichtlich der nötigen Umformkräfte ist aufgrund der erhöhten Vormateriallänge nicht möglich. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich der relative Einfluss der Stößelgeschwindigkeit und der Bauteiltemperatur auf die

Stößelkraft und die Vergleichsspannung analog zu Modellgeometrie 3 verhält. Beispielsweise steigt bei einer Erhöhung der Stößelgeschwindigkeit von 100 mm/s auf 400 mm/s die benötigte Stößelkraft ebenfalls um ca. 17 Prozent an. Die Formfüllung der Modellgeometrie ist vollständig; Schmiedefehler wurden nicht detektiert.

Schlussfolgerung

Die Simulationsergebnisse lassen darauf schließen, dass sich mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten mehrdirektionalen Werkzeugsystem Kurbelwellen-Vorformgeometrien mit änderbaren Massenverteilungen fehlerfrei herstellen lassen. Bei keiner der Modellgeometrien wurden die zur Prozessgrenzenermittlung festgelegten Obergrenzen der Kenngrößen Vergleichsspannung, Vergleichsumformgrad, Schmiedefehler und Formfüllung erreicht.

Der Einfluss unterschiedlich hoher Stößelgeschwindigkeiten und Rohteiltemperaturen auf die resultierende Bauteilgeometrie ist nur gering ausgeprägt. Die ermittelten Werte variieren für die Kurbelwangenhöhe der unterschiedlichen Modellgeometrien in einer Gruppe um weniger als ein Prozent. Die mechanischen Werkzeugbelastungen sind erwartungsgemäß stark abhängig von der Rohteiltemperatur. Die Werte für die Vergleichsspannung im Werkzeug steigen daher durch eine Reduzierung der Rohteiltemperatur je nach Modellgeometrie zwischen 20 und 27 Prozent an. Eine Zunahme der Stößelgeschwindigkeit (von 100 auf 400 mm/s) führt zu einer Erhöhung der Umformkraft zwischen sechs und 19 Prozent und ist abhängig von der jeweiligen Modellgeometrie.

Die Anwendung der mehrdirektionalen Vorformtechnologie beschränkt sich nicht auf einhübrige Kurbelwellen: Das entwickelte Werkzeugsystem eignet sich ebenfalls für eine Vorformung weiterer Bauteile der Formengruppe 33 wie zum Beispiel Zwei- oder Vierzylinderkurbelwellen. Beim Schmieden solcher Langteile erhöht sich der Komplexitätsgrad des Verfahrens in Bezug auf den Werkzeugaufbau. Hier besteht die konstruktive Aufgabe darin, Führungen und Antriebe der einzelnen Werkzeugkomponenten in das Gesamtkonzept des Werkzeugs so zu integrieren, dass eine ausreichende Werkzeugsteifigkeit vorhanden ist und die vorgesehene Kinematik der Werkzeugkomponenten erfolgen kann.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette Gesenkschmieden ist im besonderen Maße von der Anzahl und Art der Prozessschritte sowie der Höhe des Materialnutzungsgrads abhängig. Insbesondere durch die in den letzten Jahren stark gestiegenen Rohstahlpreise stellen die Materialkosten, die bis zu 50 Prozent der Herstellkosten eines Schmiedeteils ausmachen, eine wichtige Einflussgröße für die Wettbewerbsfähigkeit von Schmiedeunternehmen dar. Die Werkzeug- und Stadienfolge einer Prozesskette Gesenkschmieden ist derjenige Prozessabschnitt, der das größte wirtschaftliche Potenzial durch einen erhöhten Materialnutzungsgrads birgt.

Die Methode des Präzisionsschmiedens führt durch den Wegfall des Gratanteils zu einer Verkürzung der Schmiedeprozesskette und somit zur Reduzierung von Kosten und Produktionszeit. Obwohl sich in der Industrie das Präzisionsschmieden für rotationssymmetrische Bauteile bereits in Teilbereichen etablieren konnte, besteht für das gratlose Gesenkschmieden längsorientierter Teile, insbesondere hinsichtlich möglicher Vorformprozesse, Entwicklungsbedarf. Hierbei ist der Einsatz der FEM zur Auslegung von Werkzeugkomponenten und zur Formfüllungsanalyse unabdingbar.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde ein Konzept für eine Werkzeug- und Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden einer Einzylinderkurbelwelle mithilfe von FEM-Analysen entwickelt und in praktischen Versuchen unter Laborbedingungen prototypisch erprobt. Die Stadienfolge besteht aus drei Umformstufen: In der 1. Vorformoperation werden durch Voll-Quer-Fließpressen im geschlossenen Gesenk zwei exzentrisch angeordnete Unwuchten sowie die zylindrischen Haupt- und Pleuellagerstellen geformt. Die 2. Vorform wird durch eine mehrdirektionale Schmiedeoperation hergestellt, in der sie durch gleichzeitiges Anstauchen und Schubumformen in einen geeigneten Querschnitt zum gratlosen Gesenkschmieden überführt wird. Im letzten Prozessschritt, dem Fertigschmieden, erhält das Bauteil seine abschließende Form. Hierbei erfolgt lediglich eine geringe Massenverteilung bis zur vollständigen Formfüllung der Gravur.

Die vorgestellte Stadienfolge beinhaltet ein neuartiges, mehrdirektionales Vorformverfahren und ermöglicht das gratlose Schmieden von Einzylinderkurbelwellen. Es zeigte sich, dass der Formfüllungsgrad des Fertigteils stark von der Geometrie der mehrdirektional geschmiedeten Vorform abhängt und durch eine endgeometrienaher Vorformgebung eine Reduzierung der thermomechanischen Werkzeugbelastungen der Fertigschmiedestufe erreicht werden kann. Die mehrdirektional hergestellte Vorformgeometrie ist dabei direkt von der Gestalt der vorhergehenden Vorform abhängig, da sich die Kurbelwangengeometrie des Schmiedeteils aufgrund des mehrdirektionalen Werkzeugsystems durch Freiformen zwischen den Stauchplatten ausbildet.

Die bedingt durch den Versuchsaufbau notwendige Wiedererwärmung der Vorformen zwischen den Schmiedungen verursachte trotz der Temperierung in einer Schutzgasatmosphäre eine starke Verzunderung der Bauteile. Deshalb wurden beim gratlo-

sen Gesenkschmiedeverfahren vergleichsweise große Toleranzen von IT 13 bis IT 15 erreicht. Durch eine Prozessautomatisierung in Kombination mit einer Kaltkalibrierung sind jedoch bessere Qualitätsstufen erreichbar.

Einzyylinderkurbelwellen, die der Formengruppe der Langteile mit gekrümmter Längsachse in einer Ebene zugeordnet werden, zeichnen sich durch große Querschnittsunterschiede entlang ihrer Längsachse aus. Daher war bei der Auslegung der Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden der Einzyylinderkurbelwelle ein neues Vorformverfahren zu entwickeln. Dieses mehrdirektionale Vorformprinzip kann grundsätzlich auch für die volumengenaue Vorformung von Langteilen der gleichen Formklasse eingesetzt werden. Um das Anwendungsgebiet dieser speziellen Umformwerkzeuge genauer zu definieren und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kurbelwellengeometrien zu ermöglichen, ist es erforderlich, bauteilspezifische Verfahrensgrenzen zu definieren.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde daher das Verfahren des mehrdirektionalen Vorformens am Beispiel abstrahierter Kurbelwellengeometrien durch FEM-Analysen charakterisiert. Dazu wurden prozessspezifische Kenngrößen aus numerischen Berechnungsgrößen abgeleitet. Die Hauptmaße der vier Versuchsgeometrien wurden von einer realen Kurbelwellengeometrie abgeleitet und durch praxisnahe Verhältnisformeln variiert. Die auf diese Weise definierten Modellgeometrien stellen hinsichtlich ihrer Abmessungen Ausprägungen gebräuchlicher Kurbelwellengeometrien dar und lassen daher eine Übertragung der Ergebnisse auf industriell relevante Kurbelwellenbauformen zu. Die FEM-Analysen zeigen, dass durch das hier entwickelte mehrdirektionale Schmiedewerkzeug ein breites Spektrum grundsätzlich geeigneter Kurbelwellenvorformen herstellbar ist. Die simulierten Vorformgeometrien bilden aufgrund der Verwendung eines zylindrischen Stangenabschnitts als Rohteil im Vergleich zu realen Kurbelwellen einfache elliptische Kurbelwellenquerschnitte aus. Um komplexere Querschnitte zu realisieren, bedarf es weiterer Vorformstufen zur Massenverteilung vor dem mehrdirektionalen Vorformschritt.

Ziel weiterer Untersuchungen sollte es daher sein, Nebenformelemente wie beispielsweise Zapfen und Flansch in die Stadienfolge zum gratlosen Gesenkschmieden von Kurbelwellen zu integrieren. Weiterhin sind Methoden zur Berücksichtigung von Masseschwankungen zu entwickeln, die eine weitere Reduzierung der Werkzeugbelastungen ermöglichen, dabei jedoch nicht zu einer Prozesskettenverlängerung durch nachgelagerte, zusätzliche Zerspanprozesse führen.

Wenn diese Erweiterungen gewährleistet sind, können die wirtschaftlichen Vorteile des Verfahrens zum gratlosen Schmieden von Kurbelwellen zukünftig industriell genutzt werden und zur Entwicklung Ressourcen schonender Schmiedeprozessketten beitragen.

9 Literaturverzeichnis

- [Adl01] Adlof, W.: Neuere Entwicklung bei geschmiedeten Kraftfahrzeug-Kurbelwellen. In: Schmiede-Journal, Ausgabe: 09, (2001), S. 14-17.
- [Adl94] Adlof, W.: Wer an Leichtbau denkt, kommt an einer Stahlkurbelwelle nicht vorbei. Kurbelwellen für Straßenfahrzeug-Motoren. In: Schmiede-Journal, Ausgabe: 03/94, (1994), S. 13-16.
- [Adl98] Adlof, W.: Substitution mit Schmiedeteilen. In: Konferenz-Einzelbericht: VDI-Berichte, Ausgabe: 1382, (1998), S. 161-181.
- [Alt06] Altmann, H. C.: Beitrag zum Präzisionsschmieden von Kurbelwellen. Dissertation Universität Hannover, Garbsen, PZH-Verlag, Hannover 2006.
- [Ame08] Ameling, D.: Ressourceneffizienz - Stahl ist die Lösung: Effizienz- und Klimavorsorgestrategien. http://www.stahl-online.de/medien_lounge/Hintergrundmaterial/BDSVJahrestagungBerkin.pdf, 7.1.2008.
- [Bas07] Basshuysen, R. v.: Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 4th ed. Vieweg, Wiesbaden 2007.
- [Bas06] Basshuysen, R. v.; Schäfer, F.: Lexikon Motorentchnik: der Verbrennungsmotor von A - Z. 2. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2006.
- [BDR04] Behrens, B.; Doege, E.; Reinsch, S.: Precision forging processes for high-duty automotive components. In: Journal of Materials Processing Technology, Ausgabe: 185, (2004), S. 139-146.
- [BDS06] Behrens, B.; Dähndel, H.; Schmidt, I.: Präzisionsschmieden - aktueller Stand und Perspektiven. In: UKD, Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Bamberg: TU Darmstadt, (2006), S. 67-78.
- [Beh97] Behrens, B.: Entwicklung eines automatisierten Präzisionsschmiedeprozesses mit integrierter Qualitätsprüfung. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997.
- [Beh05] Behrens, B.: Zwischenbericht und Fortsetzungsantrag zum Sonderforschungsbereich 489: „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteilen“. Band 2, Teilprojekt B2, Antragszeitraum 2003-2005.
- [BHH04] Behrens, B.; Hornhardt, C.; Huskic, A.: Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder. Werkzeugkonzept für das Präzisionsschmieden von Zahnrädern aus gescherten Stangenabschnitten. In: wt Werkstattstechnik online, Ausgabe: 94, (2004), S. 644-647.
- [Bir08] Birkert, K.: Vorlesungsskript Umformende Fertigungsverfahren, Fachhochschule Heilbronn (2008).

- [BKR05] Bernard, M.; Krause, C.; Reimche, W.: Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder durch integrierte Wärmebehandlung. In: HTM - Härtereitechnische Mitteilungen, Ausgabe: 60, (2005), S. 284-292.
- [BRA03] Behrens, B.; Reinsch, S.; Alasti, M.: Optimierte Anwendung der Finite-Elemente-Methode in der Schmiedeprozessauslegung. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), (2003), S. 1-134.
- [Bro99] Broß, G.: Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden von PKW-Pleueln. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 1999.
- [BRS05] Behrens, B.; Reinsch, S.; Specker, A.: Further development in the precision forging technology for high duty automotive parts. In: Konferenz-Einzelbericht: TMS Annual Meeting, 134, MPMD Global Innovations Symposium, San Francisco 2005.
- [BRS04] Behrens, B. A.; Reinsch, S.; Specker, A.: Further development of flashless forging operations for flat long pieces. Weiterentwicklung des Präzisionsschmiedeverfahrens für flache lange Bauteile. Konferenz-Einzelbericht: ESDA, Engineering Systems Design and Analysis, Biennial Conference, Manchester, 2004.
- [Bud07] Buderus Gesenkstähle: Fertigungstechnologie, Eigenschaften, Anwendungen. http://www.buderus-steel.com/edelstahl/images/Bud_GesStahl_2006_de.pdf, 10.09.2007.
- [CHS03] Czichos, H.; Habig, K.; Santner, E.: Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß. 2. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2003.
- [DAS02] Doege, E.; Alasti, M.; Schmidt, J. R.: Ein innovatives Verfahren zur Charakterisierung der Reibung und des Wärmeübergangs beim Präzisionsschmieden. Ausgabe: Zeitschriftenaufsatz: UTF science * Band 3, Heft IV, (2002), S. 4-8.
- [DB00] Doege, E.; Bohnsack, R.: Closed die technologies for hot forging. In: Journal of Materials Processing Technology, Ausgabe: 98/2, (2000), S. 165-170.
- [DB02] Dähndel, H.; Barnert, L.: Verringerung der Druckberührzeiten beim Präzisionsschmieden durch ein hydraulisches Überlastsystem. In: Schmiedejournal, Ausgabe: 03/02, (2002), S. 24-25.
- [DB07] Doege, E.; Behrens, B.: Handbuch Umformtechnik. Springer-Verlag, Berlin [u.a.] 2007.
- [DB99a] Doege E.; Behrens B.-A.: Development of an automated precision forging process with integrated quality assurance. In: Production Engineering. Re-

- search and Development, Berlin: Wiss. Gesellsch. f. Produktionstechnik (WGP), Ausgabe: 6, (1999), S. 47-50.
- [DB99b] Doege E.; Bohnsack R.: Press concept for the future in precision forging. Konferenz-Einzelbericht: ICTP, Internat. Conf. on Technology of Plasticity, 1999.
- [DBB96] Doege, E.; Brüning, J.; Broß, G.: Technologieentwicklung zum Präzisions-schmieden von Langteilen. Development of a flashless forging technology for long forgings. In: Umformtechnik, Ausgabe: 30, (1996), S. 152-154.
- [DD01] Doege, E.; Dreyer, G.: Präzisionsschmieden komplexer Antriebsbauteile Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von PKW-Gangrädern. In: wt Werkstattstechnik online, Ausgabe: 91, (2001), S. 615-620.
- [De99] Doege, E.; et al.: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile, DFG, Sonderforschungsbereich 1761, Erstantrag. 1999.
- [DIN8583] DIN 8583-4: Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 4: Gesenkformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. (Hrsg.): Deutsches Institut für Normung, Ausg. 2003-09.
- [DIN8582] DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. (Hrsg.): Deutsches Institut für Normung, Ausg. 2003-09.
- [DIN752] DIN 7523-2:1986-09: Schmiedestücke aus Stahl; Gestaltung von Gesenkschmiedestücken; Bearbeitungszugaben, Seitenschrägen, Kantenrundungen, Hohlkehlen, Bodendicken, Wanddicken, Rippenbreiten und Rippenkopfradien. (Hrsg.): Beuth-Verlag, Ausg. 1986-09.
- [Dit02] Dittmann, J.: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von geschmiedeten Bauteilen. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.
- [Doe00] Doege, E.: Untersuchung zur Auslegung von geschlossenen Schmiedege-senken mit beweglichen, mehrfachwirkenden Umformstempeln, DFG-Bericht, Förderkennz. DO 190/119-1 bis 119-2. 2000.
- [DR82] Doege, E.; Rupp, D. M.: Gute Werkstoffausnutzung durch Schmieden. Einflussgrößen auf die Dauerschwingfestigkeit bei der Herstellung von Schmiedeteilen. In: Industrie Anzeiger, Ausgabe: 104, (1982), S. 27-31.
- [Dre02] Dreyer, G.: Untersuchungen zur Herstellung von komplexen Antriebsbau-teilen durch Präzisionsschmieden. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.

- [DTW92] Doege, E.; Thalemann, J.; Weber, F.: Hot forging of precision parts. Schmieden von Präzisionsteilen. In: Journal of Materials Processing Technology, Ausgabe: 35, (1992), S. 469-481.
- [Fra99] Franzke, M.: Zielgrößenadaptierte Netzdiagnose und -generierung zur Anwendung der Finite-Element-Methode in der Umformtechnik. Als Ms. Auflage, Shaker-Verlag, Aachen 1999.
- [Gie06] Gies, C.: Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE. Dissertation Universität Kassel, Kassel Univ. Press-Verlag, Kassel 2006.
- [Gra03] Grass, H.: 3D-FEM-Umformsimulation und Gefügeentwicklung eines Motorpleuels. Dissertation Universität Aachen, Shaker-Verlag, Aachen 2003.
- [GS89] Golze, N.; Schoch, H.: Faserverlauf beeinflusst Dauerfestigkeit. In: Industrie Anzeiger, Ausgabe: 111, (1989), S. 28-30.
- [GZ99] Gutmann, P.; Zitz, U.: Leicht und hochbelastbar: Präzisionsgeschmiedete Getriebeteile. In: Umformtechnik, Ausgabe: 33, (1999), S. 16-18.
- [Heg03] Hegenscheidt, M.: Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme. VDI-Verlag, Düsseldorf 2003.
- [Hir01] Hirschvogel-Umformtechnik GmbH Denklingen, L.: Massivumformtechniken für die Fahrzeugindustrie: Verfahren, Werkstoffe und Entwicklung. Verl. Moderne Industrie-Verlag, Landsberg/Lech 2001.
- [HK03] Hustedt, P.; Kohlstette, J.: Präzisionsschmieden - Einsatzgebiet und Potenziale. Innovative Verformtechniken ermöglichen die Erweiterung der Präzisionsschmiedetechnik auf komplexe Langteile. 2003.
- [Hus03] Hustedt, P.: Modular aufgebaute Vorformwerkzeuge für das Schmieden von Langteilen. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 2003.
- [Jan02] Dittmann, J.: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von geschmiedeten Bauteilen. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.
- [KC02] Korek, H.; Conrad, S. A.: Vollautomatische Schmiedelinie für Kurbelwellen im 7,5-Sekunden-Takt. Ausgabe: Zeitschriftenaufsatz: forum. Technische Mitteilungen, ThyssenKrupp, (2002), S. 23-27.
- [KF06] Köhler, E.; Flierl, R.: Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 4. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2006
- [KK06] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4: Umformen. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006.

- [Kne94] Kneller, J.: Einfluss des Umformgrades von Stranggussmaterial auf die Eigenschaften von gesenkgeschmiedeten Kurbelwellen. Dissertation Universität Aachen, 1994.
- [Krü00] Krüger, T.: Nutzungssteigerung verketteter Produktionssysteme. VDI-Verlag, Düsseldorf 2000.
- [KW99] Kopp, R.; Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik. 2. Auflage, Mainz-Verlag, Aachen 1999.
- [Lan02] Lange, K.: Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Bd. 1: Grundlagen. 2. Aufl. Auflage, Springer-Verlag, Berlin [u.a.] 2002.
- [Lan88] Lange, K.: Massivumformung. 2., völlig Neubearb. Auflage, Springer-Verlag, Berlin [u.a.] 1988.
- [LBG05] Laackman, B.; Bläßer, U.; Gröbel, C.: Aktuelle Technologien für die industrielle Präzisionsumformung. In: Konferenz-Einzelbericht: Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Ausgabe: 18, (2005), S. 169-179.
- [LM77] Lange, K.; Meyer-Nolkemper, H.: Gesenkschmieden. Springer-Verlag, Berlin u.a. 1977.
- [Mat91] Mathieu, H.: Ein Beitrag zur Auslegung von Stadienfolgen beim Gesenkgeschmieden mit Grat. Dissertation Universität Univ. Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.
- [MB99] Mannel, U.; Bohnsack, R.: Präzisionsschmiedeanlage als flexible und komplette Fertigungszelle. Konferenz-Einzelbericht: Umformtechnisches Kolloquium, Hannover, 1999.
- [Met73] Mettig, H.: Die Konstruktion schnelllaufender Verbrennungsmotoren. de Gruyter-Verlag, Berlin [u.a.] 1973.
- [Mon05] Montgomery, D. C.: Design and analysis of experiments. 6. Auflage, Wiley-Verlag, Hoboken, NJ 2005.
- [Müs00] Müssig, B.: Bauteilgerechte Temperaturführung erhöht die Reproduzierbarkeit. In: Maschinenmarkt, Würzburg, Ausgabe: 106, (2000), S. 48-51.
- [Müs02] Müssig, B.: Temperierung von Schmiedewerkzeugen zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit. Dissertation Universität Univ. Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.
- [NN95] N.N.: Schmiedeteile - Gestaltung - Anwendung - Beispiele. Hrsg: Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung-Verlag, Hagen 1995.
- [OB98] Ou, H.; Balendra, R.: Finite-Elemente-Simulation der Elastizität von Gesenken zum Genauschmieden von Tragflügelteilen. In: Journal of Materials Processing Technology, Ausgabe: 76, (1998), S. 56-61.
- [Pah95] Pahnke, M.: Flexible Schmiedeanlagen. Flexible forging plant. In: Stahl und Eisen, Ausgabe: 115, (1995), S. 61-64.

- [PB70] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung., 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1970.
- [Pol98] Polley, W. G.: Untersuchungen zum Gravurfüllungsverhalten beim Präzisions schmieden von Aluminiumknetlegierungen. Dissertation Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998.
- [Rae06] Raedt, H. W.: Leichtbau durch Massivumformung. In: Automobiltechnische Zeitschrift - ATZ, Ausgabe: 108, (2006), S. 40-43.
- [RML04] Reinsch, S.; Meyer, E.; Lau, P.: Massenverteilung auf neuen Wegen. Mehrdirektional wirkende Werkzeugsysteme. New ways in mass distribution. Multidirectional operating tool system. In: wt Werkstattstechnik online, Ausgabe: 94, (2004), S. 495-499.
- [RWH03] Rut, T.; Walczyk, W.; Harabasz, W.: Implementation of the improved TR-method of forging crankshafts. In: Konferenz-Einzelbericht, Ausgabe: IFM, Internat. Forgemasters Meeting, (2003), S. 416-422.
- [Sah99] Sahm, P. R.: Schmelze, Erstarrung, Grenzflächen. Vieweg-Verlag, Braunschweig 1999.
- [Sch001] Scheffler, E.: Statistische Versuchsplanung und -auswertung: eine Einführung für Praktiker. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim [2001].
- [Sch87] Schaetzle, W.: Querfließpressen eines Flansches oder Bundes an zylindrischen Vollkörpern aus Stahl. Dissertation Universität Univ. Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin 1987.
- [SM04] Specker, A.; Meyer, E.: Qualität fährt am längsten. In: phi, Produktionstechnik Hannover informiert, Ausgabe: 1/2004, (2004), S. 6-7.
- [Spi57] Spieß, K.: Eine Formenordnung für Gesenkschmiedestücke. In: Werkstattstechnik und Maschinenbau, Ausgabe: 47, (1957), S. 201-205.
- [Ste99] Stegemann, D.: Forschergruppe Do 190/92 Präzisionsumformung von schrägverzahnten Zahnrädern, Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung - Teilprojekt VI: Prüfung der Technologischen Eigenschaften von präzisionsumgeformeten Zahnrädern. In: Abschlussbericht, (1999), S. 1-31.
- [Sto97] Stockter, R.: Entwicklung eines rechnerunterstützten Systems zur Schmiedewerkzeugkonstruktion. Dissertation Universität Univ. Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997.
- [Thy05] ThyssenKrupp-Gerlach GmbH: Kraftfahrzeug-Kurbelwellen. 2. Auflage, Verl. Moderne Industrie-Verlag, Landsberg/Lech 2005.
- [Tra08] Transvalor: The reference simulation tool for 2D and 3D bulk metal forming processes. http://www.transvalor.com/forge_gb.php, 7.2.2008.
- [TS07] Telkamp, K.; Stonis, M.: Gratloses Endformen von Bauteilen mit ausgeprägter Längsachse. In: Maschinenmarkt, (2007), S. 22-24.

- [van08] van Basshuysen, R. Motorlexikon.de - Herstellung von Kurbelwellenrohlingen. <http://motorlexikon.de/?l=3994>, 3.3.2008.
- [VDI76] VDI-Richtlinie 3137: Begriffe, Benennungen, Kenngrößen des Umformens. (Hrsg.): VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Ausg. 1976-01.
- [VDI86] VDI-Richtlinie 3176: Vorgespannte Presswerkzeuge für das Kaltumformen. (Hrsg.): VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Ausg. 1986-10.
- [VDI90] VDI-Richtlinie 3386: Keiltriebe in Stanzerei-Großwerkzeugen. (Hrsg.): VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Ausg. 1990-11.
- [VDI97] VDI 3633/3: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung. (Hrsg.): VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, Ausg. 1997-12.
- [Wan95] Wang, Y.: Methode für die simulationsunterstützte Optimierung am Beispiel von Montagesystemen. Hanser-Verlag, München [u.a.] 1995.
- [WH99] Wambach, S.; Haats, J.: Leichtbau im Kurbeltrieb durch geschmiedete Komponenten. In: Umformtechnik, Ausgabe: 33, (1999), S. 18-22.
- [Wie04] Wienströer, M.: Prozesssimulation der Stadienfolge beim Schmieden mittels Rückwärtssimulation. Dissertation Universität Hannover, PZH-Verlag, Hannover 2004.
- [Wit04] Wittig, A.: Neuentwicklungen in der Massivumformung. Konferenz-Einzelbericht: Hannover Kolloquium, Garbsen: PZH Produktionstechn. Hannover Kolloquium, 2004.
- [Wit05] Wittig, A.: Hochgeschwindigkeitsschmieden - SpeedFORGE mit DualDrive als neue Produktionsalternative. Konferenz-Einzelbericht: MATINFO Werkstoff-Informationsgesellschaft: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Fellbach, 2005.
- [WW97] Westerkamp, C.; Weißmann, G.: Präzisionsumformung - eine Schlüsseltechnologie für die Antriebstechnik. In: VDI-Z Integrierte Produktion, Ausgabe: 139, (1997), S. 72-74.

10 Anhang

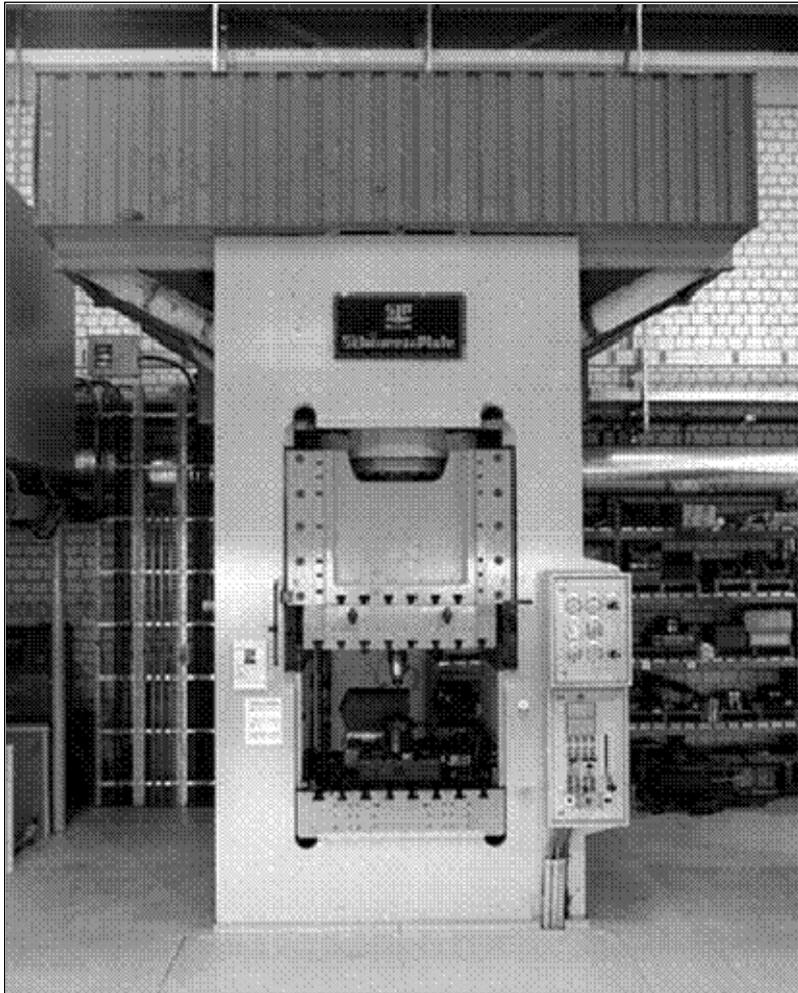
A1 Direkt angetriebene Spindelpresse zur Herstellung der Vor- und Fertigform



Technische Daten der Spindelpresse:

Bruttoarbeitsvermögen bei 380 mm Hub	100 kJ
Presskraft, dauernd zulässig	11.000 kN
Höchstkraft	14.000 kN
max. Stößelhub	450 mm
min. Stößelhub	150 mm
Werkzeugeinbauraum mit Kassette	500 mm x 700 mm x 450 mm
max. hydraulische Kraft des Tischauswerfers	100 kN
max. hydraulische Kraft des Stößelauswerfers	50 kN
max. Hub des Tischauswerfers	200 mm
max. Hub des Stößelauswerfers	40 mm

A2 Ölhydraulische Presse zur Herstellung der 2. Vorform



Technische Daten der Hydraulischen Presse:

max. Stößelkraft	12.500 kN
max. Rückzugkraft	1.375 kN
max. Betriebsdruck	315 bar
Einbauhöhe (bei Hub oben)	1.250 mm
Stößelhub	500 mm
Tisch- und Stößelfläche	1.250 mm x 1.250 mm
max. Pressgeschwindigkeit	28 mm/s

A3 Versuchsplan zur Verfahrenscharakterisierung mehrdirektionaler Schmiedeprozesse

Vers.-Nr.	Wangendicke [mm]	Rohteillänge [mm]	Stößelgeschw. [mm/s]	Überschneidung [mm]	Rohteiltemperatur [°C]	Umformgrad	Druckbe-rührzeit [s]	Wkz.-Temp [ΔT]	Schubum-formkraft [kN]	Stauchkraft [kN]	Stößelkraft [kN]	Vergleichs-spannung [Mpa]	Wangen-höhe [mm]	Wangen-breite [mm]
1	9	220	100	-12	1.150	3,1	0,60	180	48	7.488	5.466	800	160,7	151,8
2	9	220	100	-12	1.250	3,1	0,60	200	36	5.812	4.243	650	160,9	152,0
3	9	220	200	-12	1.150	3,1	0,30	90	52	7.532	5.498	900	160,5	152,0
4	9	220	200	-12	1.250	3,1	0,30	100	40	5.972	4.360	650	160,7	152,0
5	9	220	300	-12	1.150	3,1	0,20	50	52	7.796	5.691	900	160,8	151,8
6	9	220	300	-12	1.250	3,2	0,20	60	40	6.172	4.506	650	160,6	152,0
7	9	220	400	-12	1.150	3,1	0,15	40	52	8.020	5.855	900	160,7	151,8
8	9	220	400	-12	1.250	3,3	0,15	40	40	6.172	4.506	650	160,6	152,0
9	9	220	100	36	1.150	3,1	0,96	280	160	7.380	5.389	750	178,4	138,4
10	9	220	100	36	1.250	2,9	0,96	300	124	5.780	4.220	550	178,8	138,6
11	9	220	200	36	1.150	2,9	0,48	150	172	7.380	5.389	750	177,6	139,4
12	9	220	200	36	1.250	3,1	0,48	160	132	5.736	4.188	550	177,9	139,2
13	9	220	300	36	1.150	2,8	0,32	100	180	7.548	5.512	750	177,3	139,6
14	9	220	300	36	1.250	2,9	0,32	110	140	5.840	4.264	550	177,5	139,4
15	9	220	400	36	1.150	2,8	0,24	70	188	7.676	5.605	780	177,2	139,6
16	9	220	400	36	1.250	2,5	0,24	80	144	5.968	4.358	550	177,2	139,4
17	27	260	100	-12	1.150	2,2	0,62	180	44	1.504	1.098	320	113,9	99,0
18	27	260	100	-12	1.250	2,2	0,62	200	36	1.160	847	240	113,9	99,2
19	27	260	200	-12	1.150	2,5	0,31	80	44	1.632	1.192	320	113,9	98,8
20	27	260	200	-12	1.250	2,1	0,31	90	32	1.252	914	240	113,9	98,8
21	27	260	300	-12	1.150	2,1	0,20	30	44	1.716	1.253	360	113,9	98,6
22	27	260	300	-12	1.250	2,0	0,20	50	32	1.316	961	280	113,9	98,8
23	27	260	400	-12	1.150	2,0	0,15	20	48	1.776	1.297	360	113,9	98,6
24	27	260	400	-12	1.250	2,1	0,15	30	36	1.380	1.008	270	113,9	98,8
25	27	360	100	36	1.150	2,2	1,12	210	72	2.492	1.820	320	160,0	110,0
26	27	360	100	36	1.250	2,2	1,12	320	56	1.924	1.405	270	159,9	110,2
27	27	360	200	36	1.150	2,2	0,56	110	76	2.672	1.951	351	160,3	110,0
28	27	360	200	36	1.250	2,2	0,56	120	60	2.072	1.513	280	160,3	110,0
29	27	360	300	36	1.150	2,2	0,37	70	80	2.812	2.054	340	160,4	110,0
30	27	360	300	36	1.250	2,2	0,37	110	60	2.160	1.577	270	160,4	110,0
31	27	360	400	36	1.150	2,3	0,28	70	84	2.880	2.103	360	160,3	110,0
32	27	360	400	36	1.250	2,2	0,28	80	64	2.244	1.639	270	160,4	110,0

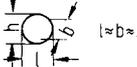
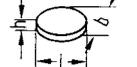
Modellgeometrie 1

Modellgeometrie 2

Modellgeometrie 3

Modellgeometrie 4

A4 Formenordnung für Gesenkschmiedestücke nach [Spi57]

<p>Formenklasse 1 gedrungene Form</p>  <p>$l \approx b \approx h$</p> <p>kugelhähnliche und würfelfartige Teile</p>	<p>Untergruppe</p>	<p>101 ohne Nebenform- elemente</p> 	<p>102 mit einseitigen Nebenformelementen</p> 	<p>103 mit umlaufenden Nebenformelementen</p> 	<p>104 mit einseitigen und umlaufenden Nebenformelementen</p> 	
<p>Formenklasse 2 Scheibenform</p>  <p>$l > b > h$</p> <p>Teile mit runden, quadratischen und ähnlichen Umrissen, Kreuzteile mit kurzen Armen, Gestauchte Köpfe an Langformen (Flansche, Ventilteller usw.)</p>	<p>Untergruppe</p> <p>Formengruppe</p>	<p>ohne Nebenform- elemente</p>	<p>mit Nabe</p>	<p>mit Nabe und Loch</p>	<p>mit Rand (Ringe)</p>	<p>mit Rand und Nabe</p>
<p>31 Hauptform- element mit gerader Längsachse</p> <p>32 Längsachse des Hauptform- elements in einer Ebene gekrümmt</p> <p>33 Längsachse des Hauptform- elements in mehreren Ebenen gekrümmt</p> <p>Teile mit ausgeprägter Längsachse</p> <p>Längengruppen:</p> <p>1 kurze Teile $l < 3b$</p> <p>2 halblange Teile $l = 3 \dots 8b$</p> <p>3 lange Teile $l = 8 \dots 16b$</p> <p>4 sehr lange Teile $l > 16b$</p> <p>(Ziffern der Längengruppen werden mit Schrägstrich angehängt; z.B. 334/4)</p>	<p>21 Scheibenform mit einseitigen Nebenform- elementen</p> <p>22 Scheibenform mit zweiseitigen Nebenform- elementen</p>	<p>211</p>  <p>222</p>  <p>311</p>  <p>321</p>  <p>331</p> 	<p>212</p>  <p>223</p>  <p>312</p>  <p>322</p>  <p>332</p> 	<p>213</p>  <p>224</p>  <p>313</p>  <p>323</p>  <p>333</p> 	<p>214</p>  <p>225</p>  <p>314</p>  <p>324</p>  <p>334</p> 	<p>215</p>  <p>315</p>  <p>325</p>  <p>335</p> 

Lebenslauf

Name: Axel Specker

Geburtsdatum: 14.6.1974

Geburtsort: Emstek

Schulbildung:

1981 - 1985 Grundschole, Emstek

1985 - 1987 Orientierungsstufe, Emstek

1987 - 1991 Realschole Unsere Lieben Frauen, Cloppenburg

1991 - 1994 Technisches Gymnasium, Cloppenburg

Wehrersatzdienst:

1994 - 1995 Caritas Werkstatt Cloppenburg

Ausbildung:

1995 - 1998 Ausbildung zum Industriemechaniker, Fachrichtung Maschinen- und Systemtechnik

Studium:

09/98 - 03/02 Europäisches Maschinenbaustudium an der Fachhochschule Osnabrück und Sheffield Hallam University, GB

Studienabschluss: Dipl.-Ing. (FH) und B.Eng. (Hons)

studienbegleitend: Stipendiat der Prof. Dr. Koepchen-Studienstiftung der RWE Energie AG

Praktika in verschiedenen Industrieunternehmen

Berufstätigkeit:

12/02 - 11/07 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

08/06 - 11/07 Leiter der Abteilung Prozesstechnik am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

01/07 - 11/07 Prokurist und stellvertretender Geschäftsführer des IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

seit 04/08 Entwicklungsingenieur Massivumformverfahren, Schaeffler KG