

# **Modular aufgebaute Vorformwerkzeuge für das Schmieden von Langteilen**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Peter Hustedt  
geboren am 9.10.1969 in Einbeck

2003

1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Eckart Doege
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Hans Kurt Tönshoff
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Peter Wiendahl
Tag der Promotion:	4. November 2002

## Kurzzusammenfassung

Die Prozesskette *Gesenkschmieden* wird ganz wesentlich durch die Stadienfolge bestimmt, in der die Anzahl und Art der erforderlichen Umformschritte festgelegt wird. Die Annäherung der Ausgangsform an die Endform über Masseverteilung und Querschnittsvorbildung ist dabei insbesondere für Langteile von Bedeutung. Die dazu erforderlichen Vorformoperationen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Schmiedeteils, den Gratanteil sowie den Gesenkverschleiß.

Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl für das konventionelle Gesenkschmieden als auch für das Präzisionsschmieden von Langteilen neuartige Vorformkonzepte entwickelt und erprobt. Gesamtziel ist es dabei, Schmiedeunternehmen Verfahren zur Verfügung zu stellen, die eine flexible Herstellung einer auf den jeweiligen Fertigformprozess abgestimmten Zwischenform ermöglichen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein modular aufgebautes Werkzeugsystem zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen entwickelt und an einer Beispielgeometrie erprobt. Das grundlegende Konzept des Werkzeugsystems beruht auf einer Segmentierung des formgebenden Werkzeugs in einzelne Basisgeometrien. Durch den modularen Aufbau des Systems lässt sich der Einsatzbereich eines einzelnen Werkzeugs auf die Vorformung für mehrere Bauteile erweitern. Das System besteht aus verschiedenen Segmenten, die sich in einem speziellen Spannsystem zur Vorformung verschiedener Bauteile einer Teilefamilie flexibel anordnen und befestigen lassen. Mit Hilfe von FEM-Analysen sowie durch eine prototypische Realisierung eines modular aufgebauten Vorformwerkzeugs wird gezeigt, dass eine Segmentierung des Vorformwerkzeugs technisch machbar ist. Zum Abschluss des ersten Teils dieser Arbeit wird beispielhaft ein segmentiertes Vorformwerkzeug für eine Teilefamilie konzipiert.

Im Gegensatz zum konventionellen Schmieden ist beim Präzisionsschmieden von Langteilen eine Vorformung zur Masseverteilung und Querschnittsvorbildung zwingend erforderlich. Im zweiten Teil der Arbeit wird daher ein Vorformkonzept für das Präzisionsschmieden von Langteilen entwickelt, das über mehrdirektional wirkende Umformstempel eine Masseverteilung und Querschnittsvorbildung in einem Arbeitshub der Umformmaschine ermöglicht. Das Werkzeugprinzip sieht dabei sowohl eine horizontale als auch eine vertikale Umformung vor.

Zur Auslegung eines mehrdirektional wirkenden Vorformwerkzeugs werden ebenfalls FEM-Simulationen genutzt. Zum Nachweis der technischen Machbarkeit wird für das entwickelte, mehrdirektionale Vorformverfahren für das Präzisionsschmieden von Langteilen ebenfalls ein Versuchswerkzeug konstruiert und für eine Erprobung gefertigt. Die Ergebnisse der Erprobung zeigen, dass mit dem entwickelten, mehrdirektionalen Vorformverfahren pleuelähnliche Zwischenformen in einem Arbeitshub der Umformmaschine herstellbar sind. Aufbauend auf den Ergebnissen der Erprobung wird zum Abschluss des zweiten Teils dieser Arbeit mit Hilfe der FEM gezeigt, dass sich das entwickelte, mehrdirektionale Vorformverfahren auf die Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln übertragen lässt.

Schlagnvorte: Vorformverfahren, Gesenkschmieden, Präzisionsschmieden

## **Abstract**

The process chain for hot forging is primarily defined by the design of the forming stages in which the number and nature of the necessary forming steps is set up. The step-by-step transformation of the initial shape of the workpiece into its final form through mass distribution and pre-forming of sections is of particular importance for long pieces. The required pre-forming operations have a significant influence on workpiece quality, amount of flash and die wear.

Within the scope of this thesis, new pre-forming technologies for conventional hot forging as well as for flashless precision forging processes have been developed and tested. It is the aim of this work to improve the availability of suitable technologies, which enable forging companies to have flexible production of pre-forming geometries adapted to the final forming process.

In the first section of this thesis a modular tool system is developed and tested, which allows for flexible pre-forming in conventional hot forging processes of long pieces. The tool concept is based upon segmentation of the forming tools into separate basic geometries. The range of applications of one tool can therefore accomplish pre-forming for several workpieces. The system consists of different segments, which are fixed in a special clamping system. The arrangement of segments is made flexible to meet the pre-forming requirements of different workpieces within one part family. With the help of finite element calculations as well as the construction of a prototype the technical feasibility of a segmented pre-forming tool is proven. The sample layout of a modular tool system for a part family closes this section.

In opposition to the conventional hot forging process, mass distribution and pre-forming of sections is required in the precision forging of long pieces. Therefore the second section of this thesis deals with the design of a pre-forming tool for the precision forging of long pieces. Due to multi-directional action of the dies the mass distribution and the pre-forming of sections can take place during a single working stroke of the forming machine.

As before, a prototype model of a multi-directional pre-forming tool for the precision forging of long pieces is designed and built with the help of finite element computations to prove the technical feasibility of the design. The results show that the developed tool allows for production of an exemplary pre-forming geometry similar to connecting rods, in one working stroke of the forming machine. Finally a finite element analysis is carried out to confirm the applicability of the developed pre-forming technology for the pre-forming of connecting rods.

Keywords: preforming, drop forging, precision forging



---

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Doege, dem geschäftsführenden Gesellschafter des IPH und Leiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover, gilt mein besonderer Dank für die Anregungen und die Unterstützung bei der Anfertigung der Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff, dem geschäftsführenden Gesellschafter des IPH, für die Übernahme des Korreferates und das damit entgegengebrachte Interesse an dieser Thematik. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-P. Wiendahl danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

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 stark entlastet haben. Hervorheben möchte ich hier meine Kollegen Jörg Kohlstette und Eckard Meyer sowie Kathrin Telkamp und Steffen Reinsch. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Kollegen des IFUM Dr.-Ing. Samer Abdelfattah, Frank Meiners und Claus Silbernagel. Herrn Hans Dieter Gunga, dem Vorsitzenden des Arbeitskreises „Flexible Vorformung“ danke ich für seine wertvollen Hinweise.

Danken möchte ich auch meinen Eltern, die mir meine Ausbildung und damit die Grundlage für meine heutige Arbeit ermöglicht haben.

Wenn auch an letzter Stelle genannt, gilt mein größter Dank jedoch meiner Frau Sabine und meinen Kindern. Ohne ihre Unterstützung und ihr Verständnis wäre die Erstellung dieser Arbeit kaum möglich gewesen. Aus diesem Grund widme ich diese Arbeit mit großer Dankbarkeit meiner Familie.

Hannover, im Juli 2003

Peter Hustedt

---

Für Sabine, Pauline und Floriane

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Ausgangssituation und Problemstellung</b> .....	<b>3</b>
2.1 Ausgangssituation .....	3
2.1.1 Situation der deutschen Gesenkschmieden .....	3
2.2 Verfahren des Gesenkschmiedens.....	4
2.2.1 Konventionelles Gesenkschmieden .....	5
2.2.2 Schmieden im geschlossenen Gesenk .....	7
2.2.3 Präzisionsschmieden .....	9
2.2.3.1 Werkzeugkonzept zum Präzisionsschmieden von rotationssymmetrischen Bauteilen .....	10
2.2.3.2 Werkzeugkonzept zum Präzisionsschmieden von Langteilen .....	11
2.3 Problemstellung .....	13
2.3.1 Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen.....	13
2.3.2 Vorformung für das Präzisionsschmieden von Langteilen.....	13
<b>3. Zielsetzung und Aufgabenstellung</b> .....	<b>14</b>
3.1 Konventionelles Schmieden von Langteilen .....	14
3.2 Präzisionsschmieden von Langteilen.....	14
<b>4. Stand der Technik</b> .....	<b>16</b>
4.1 Vorformverfahren.....	16
4.1.1 Einordnung der Vorformung in den Umformprozess .....	16
4.1.2 Ziele der Vorformung.....	18
4.1.3 Freiformverfahren zur Vorformung .....	19
4.1.3.1 Recken und Breiten .....	19
4.1.3.2 Stauchen und Anstauchen.....	20
4.1.4 Gesenkgebundene Verfahren zur Vorformung.....	21
4.1.4.1 Formrecken und Formstauchen.....	21
4.1.4.2 Anstauchen im Gesenk.....	22
4.1.4.3 Reckstauchen .....	22
4.1.5 Walzverfahren zur Vorformung.....	23
4.1.5.1 Reckwalzen .....	23
4.1.5.2 Querwalzen .....	25
4.1.5.3 Axial-Vorschub-Querwalzen .....	27
4.1.6 Knetverfahren zur Vorformung .....	28
4.1.6.1 Rundkneten .....	28

4.1.6.2 Axial-Radial-Umformen.....	29
4.1.7 Spalten als Sonderverfahren zur Vorformung .....	30
4.2 Schmiedewerkzeuge mit mehrfach wirkenden Umformstempeln .....	31
4.2.1.1 Verfahren zum Schmieden von Pkw-Gangrädern mit Hinterschnitt.....	31
4.2.1.2 Verfahren zum Schmieden eines Gleichlaufgelenks mit Hinterschnitt.....	32
<b>5. Entwicklung eines Konzepts zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen .....</b>	<b>33</b>
5.1 Grundkonzept der flexiblen Vorformung .....	33
5.2 Vorgehensweise bei der Konzeption und Entwicklung .....	34
5.3 Anforderungen und Funktionsstruktur .....	35
5.3.1 Anforderungen an das Konzept der flexiblen Vorformung.....	35
5.3.2 Funktionsstruktur des Werkzeugsystems.....	35
5.4 Konstruktion des flexiblen Vorformwerkzeugs .....	36
5.4.1 Segmentgestaltung .....	36
5.4.1.1 Grundform der Segmente .....	36
5.4.1.2 Querschnittsform der Segmente .....	39
5.4.1.3 Auslegung der Gesenkübergänge .....	40
5.4.1.4 Einfluss der Wärmedehnung auf die Gesenkteilung.....	43
5.4.2 Spannsystem.....	48
5.4.2.1 Lösungsprinzipien für ein Spannsystem .....	48
5.4.2.2 Zweiseitige Verspannung in einem Kastensystem.....	49
5.4.2.3 Verspannung mittels Zugstange .....	50
5.4.2.4 Höhenverstellung.....	51
5.4.3 Zusammenstellung ausgewählter Prinziplösungen .....	53
5.5 Erprobung des flexiblen Vorformkonzepts für das konventionelle Schmieden von Langteilen.....	53
5.5.1 Vorgehensweise bei der Erprobung .....	53
5.5.2 Beschreibung der Versuchsumgebung .....	54
5.5.3 Untersuchung des Einflusses der Segmentübergänge auf das Schmiedeergebnis.....	54
5.5.3.1 Verwendetes Versuchswerkzeug.....	54
5.5.3.2 Durchführung und Ergebnisse der Versuche.....	55
5.5.4 Untersuchung des Einflusses von segmentierten Werkzeugen auf die nachfolgende Umformstufe .....	57
5.5.4.1 Verwendete Versuchswerkzeuge .....	57
5.5.4.2 Durchführung und Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe .....	59

---

<b>6. Entwicklung eines Vorformkonzepts für das Präzisionsschmieden von Langteilen .....</b>	<b>63</b>
6.1 Grundkonzept zur mehrdirektionalen Vorformung .....	63
6.2 Anforderungen und Funktionsstruktur .....	65
6.2.1 Anforderungen.....	65
6.2.2 Funktionsstruktur.....	65
6.2.3 Realisierung des horizontalen Antriebs .....	65
6.2.4 Werkzeugkonzepte zur Steuerung der Umformbewegungen .....	66
6.2.4.1 Steuerung der Umformreihenfolge.....	66
6.2.4.2 Bewertung der Werkzeugkonzepte.....	68
6.2.4.3 Kinematische Entkopplung .....	69
6.3 Konzeption und Konstruktion des Vorformwerkzeugs .....	69
6.3.1 Beschreibung und Begründung der Beispielgeometrie .....	69
6.3.2 Festlegung der Umformreihenfolge .....	70
6.3.3 Beschreibung der Werkzeugkomponenten .....	74
6.3.3.1 Aufbau des Werkzeugs.....	74
6.3.3.2 Oberwerkzeug .....	76
6.3.3.3 Unterwerkzeug .....	76
6.3.3.4 Auslegung des Keilgetriebes .....	79
6.3.3.5 Realisierung der Umlenkung .....	82
6.3.3.6 Funktionsweise des Werkzeugs .....	84
6.4 Erprobung des Vorformverfahrens für das Präzisionsschmieden von Langteilen .....	84
6.4.1 Ziele und Vorgehensweise der Erprobung .....	84
6.4.2 Beschreibung der Versuchsumgebung .....	90
6.4.3 Bestimmung der maximal möglichen Querschnittsreduktion.....	91
6.4.3.1 Stempel mit ebener Kontaktfläche.....	91
6.4.3.2 Stempel mit angeschrägter Wirkfläche .....	92
6.4.3.3 Stempel mit angeschrägter Wirkfläche und eingebrachter Nut.....	93
6.4.3.4 Ergebnisse der Erprobung.....	95
<b>7. Anwendung und Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>96</b>
7.1 Flexibles Vorformwerkzeug für das konventionelle Schmieden von Langteilen .....	96
7.1.1 Beispielhafte Konzeption eines segmentierten Vorformwerkzeugs für eine Teilefamilie .....	96
7.1.2 Anwendungs- und Einsatzbereich .....	100
7.2 Vorformung für das Präzisionsschmieden von Langteilen .....	101

---

7.2.1 Beispiel für eine mögliche Übertragung des mehrdirektionalen Werkzeugprinzips auf die Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln.....	101
7.2.1.1 Anforderungen an die Zwischenform für ein präzisionsgeschmiedetes Pleuel.....	101
7.2.1.2 Simulation der Zwischenformherstellung.....	103
7.2.2 Beispielhafte Konzeption eines Werkzeugs zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Pleuel.....	106
<b>8. Zusammenfassung.....</b>	<b>113</b>
<b>9. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>115</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>122</b>

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

2-D	zweidimensional
3-D	dreidimensional
AS	Arbeitsschritt beim methodischen Konstruieren nach VDI 2221
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
FEM	Finite-Elemente-Methode
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover
IPH	Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
IT	ISO Grundtoleranz
NE-Metalle	Nichteisen-Metalle

### Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Benennung</u>
$\alpha$	[°]	Keilwinkel
$\alpha_T$	[W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\gamma_L$	[1/°C]	thermischer Längenausdehnungskoeffizient
$\varepsilon_{Th}$	[-]	thermische Dehnung
$\mu_1$	[-]	Reibkoeffizient an Rückenstütze
$\mu_2$	[-]	Reibkoeffizient an Keilfläche
$\mu_3$	[-]	Reibkoeffizient an Gesenkplatte
$\mu_G$	[-]	Gewindereibwert
$\mu_K$	[-]	Reibwert der Auflagefläche
$\sigma_i$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Gesenkinnendruck
$\sigma_{Th}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Flächenpressung durch thermische Dehnung
$\Delta l_{Schieber}$	[mm]	Auffederung des Schiebers
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	projizierte Fläche
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche des Ausgangsquerschnitts
$A_1$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche des Querschnitts nach der Vorformung
$A_{Auge}$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche im Bereich der Augen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Benennung</u>
$A_n$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche vor dem Walzstich
$A_{n+1}$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche nach dem Walzstich
$A_{Schaft}$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche im Schaftbereich
$A_{Schieber}$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche des Schiebers
$A_{Seg}$	[mm <sup>2</sup> ]	Segmentfläche
$b_{Auge}$	[mm]	Breite im Augenbereich
$b_{Schaft}$	[mm]	Breite im Schaftbereich
$b_{Schieber}$	[mm]	Breite des Schiebers
$d_0$	[mm]	Ausgangsdurchmesser
$d_1$	[mm]	Durchmesser nach der Vorformung
$d_2$	[mm]	Flankendurchmesser
$D_E$	[mm]	Außendurchmesser der Tellerfeder
$D_i$	[mm]	Innendurchmesser der Tellerfeder
$D_{Km}$	[mm]	Durchmesser der Auflage des Schraubenkopfes
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
$F$	[N]	Kraft
$F_A$	[N]	Antriebskraft je Antriebskeil
$F_{Feder}$	[N]	Federkraft
$F_{Federpaket}$	[N]	Kraft je Antriebskeil
$F_{Gas}$	[N]	Federkraft einer vorgespannten Gasdruckfeder
$F_{Horizontal}$	[N]	Umformkraft am horizontal wirkenden Schieber
$F_{Rück}$	[N]	vertikale Rückstellkraft
$F_{Steg}$	[N]	Umformkraft am vertikalen Stempel im Stegbereich
$F_{Teller}$	[N]	Federkraft einer vorgespannten Tellerfedersäule
$F_U$	[N]	Umformkraft
$F_V$	[N]	Vorspannkraft
$F_{Vertikal}$	[N]	vertikale Umformkraft
$F_{Vor}$	[mm]	Vorspannkraft eines Federpaketsystems
$H$	[mm]	Bauteilhöhe
$h_0$	[mm]	Ausgangshöhe
$h_1$	[mm]	Höhe nach der Vorformung



<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Benennung</u>
$h_{\text{Auge}}$	[mm]	Höhe im Augenbereich
$h_{\text{Schaft}}$	[mm]	Schafthöhe
$h_{\text{Schieber}}$	[mm]	Höhe des Schiebers
$I$	[-]	Anzahl der Tellerfedern
$k_f$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Fließspannung
$l(T)$	[mm]	Länge nach Erwärmung
$l(T_{Wz})$	[mm]	Länge bei Ausgangstemperatur
$l_{\text{Schieber}}$	[mm]	Länge des Schiebers
$M_A$	[Nm]	Anzugsmoment
$N$	[-]	Anzahl der Schrauben
$N_1$	[N]	Normalkraft an Rückenstütze
$N_2$	[N]	Normalkraft an Keiffläche
$N_3$	[N]	Normalkraft an Gesenkplatte
$P$	[mm]	Steigung des Gewindes
$Q$	[-]	Querschnittsreduktion
$Q_{\text{max}}$	[-]	maximal mögliche Querschnittreduktion
$r_{\text{Stempel}}$	[mm]	Stempelradius
$R_1$	[N]	Reibkraft an Rückenstütze
$R_2$	[N]	Reibkraft an Keiffläche
$R_3$	[N]	Reibkraft an Gesenkplatte
$S$	[mm]	empfohlener Federweg je Tellerfeder
$s_E$	[mm]	Entkopplungsweg
$s_F$	[mm]	Federweg
$s_{\text{Spalt}}$	[mm]	Spaltmaß zwischen Schieber und Stempel
$s_Y$	[mm]	Federweg zur Vorspannung
$T$	°C	Temperatur
$T$	[mm]	Werkzeugtiefe
$T_R$	[°C]	Rohteiltemperatur
$T_{Wz}$	[°C]	Werkzeugtemperatur
$v_x$	[m/s]	Geschwindigkeit der Schieber
$v_y$	[m/s]	Geschwindigkeit des Stößels / Stempelgeschwindigkeit

## 1. Einleitung

Nach über 100 Jahren industrieller Anwendung stellt die Massivumformung immer noch eines der wichtigsten Verfahren der Produktionstechnik dar. Gründe dafür liegen in der hohen Produktivität der Massivumformverfahren sowie der ausgezeichneten Festigkeitseigenschaften infolge des ungebrochenen und beanspruchungsgerechten Faserverlaufs. Schmiedeteile kommen daher bevorzugt als dynamisch hoch belastbare Sicherheitsbauteile, z.B. stark beanspruchte Komponenten in Motor, Getriebe, Fahrwerk und Lenkung, immer dort zum Einsatz, wo insbesondere Sicherheit, Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer gefordert sind (Bild 1.1). Weitere Vorteile der Technologie liegen in der hohen Prozesssicherheit, der guten Prüfbarkeit der Eigenschaften und der guten Recyclingfähigkeit der Werkstoffe [NN95, VIE98].



*Bild 1.1: Spektrum schmiedetechnisch hergestellter Bauteile [IDS02]*

Trotz dieser Vorteile steht die Technologie *Gesenkschmieden von Stahl* in permanenter Konkurrenz zu anderen Verfahren, wie Gießen, Sintern, Sinterschmieden oder Thixoforming. Sogar klassische Schmiedeteile wie Nockenwellen, Kurbelwellen und Pleuel unterliegen diesem Substitutionswettbewerb. Darüber hinaus besteht eine nicht zu unterschätzende Gefahr, dass Bauteile aus Stahl durch Bauteile aus NE-Werkstoffen wie Aluminium oder Magnesium substituiert werden [BRE99, GIL97, HIR98, HIR99, NN01, WEB93].

Neben der Konkurrenz- und Substitutionsgefahr aus technologischer Sicht müssen sich Gesenkschmiedeunternehmen veränderten Marktbedingungen stellen. Die weiterhin stattfindende Verkürzung der Entwicklungszeiten technischer Produkte ganz allgemein trifft auch die deutsche Schmiedeindustrie. Dies führt für die Schmiedeunternehmen dazu, dass neue Produkte in immer kürzerer Zeit auf den Markt gebracht werden

müssen. Die steigende Anzahl von Produktvarianten bei reduzierter Lebensdauer und Stückzahl des Endprodukts ist dabei charakteristisch für das sich wandelnde Verhalten der Abnehmerindustrie. Zusätzlich ergibt sich infolge der zunehmenden Globalisierung ein immer schärferer internationaler Wettbewerb [EIS99]. Unternehmen der Gesecksmiedeindustrie werden daher auch in Zukunft erhebliche Anstrengungen unternehmen müssen, um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. Durch die Einführung moderner Produktions- und Werkzeugkonzepte, den Einsatz hochautomatisierter Maschinen und verketteter Anlagen zur wirtschaftlichen Fertigung wird diesen veränderten Randbedingungen Rechnung getragen [BAY91, STE97].

Als Antwort auf die veränderten Marktanforderungen sind sowohl organisatorische als auch technische Veränderungen notwendig. Mit der Erhöhung der Fertigungstiefe der Schmieden, beispielsweise durch die Lieferung fertig bearbeiteter Komponenten oder Baugruppen, besteht für die Schmiedeunternehmen die Möglichkeit, sich gegenüber Billiganbietern auf dem globalen Markt durchzusetzen. Um die von der Fahrzeugindustrie geforderten hohen Stückzahlen bei niedrigen Kosten verwirklichen zu können, sind beispielsweise Übernahmen, Zusammenschlüsse oder zumindest partnerschaftliche Kooperationen denkbar [HIR00, KRE01].

Um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den Konkurrenten auf den Weltmärkten zu behaupten, müssen jedoch insbesondere die Stärken hinsichtlich Produktivität der Verfahren, Qualität der Erzeugnisse und Flexibilität der Produktionsanlagen kontinuierlich ausgebaut werden. Im Bereich der technologischen Weiterentwicklung ist neben der Erweiterung des Werkstoffbereichs um Leichtbauwerkstoffe sowie der Weiterentwicklung von Stahlwerkstoffen beispielsweise die Entwicklung der Präzisionsschmiedetechnik als Near-net-shape-Verfahren zu nennen. Durch die Annäherung der Schmiedeteilgeometrie an die Bauteilendform können häufig zeit- und kostenintensive Hartfeinbearbeitungsprozesse reduziert werden [BAL01].

Während das Präzisionsschmieden von rotationssymmetrischen Bauteilen aufgrund der symmetrischen Masseverteilung entlang der Rotationsachse eine einstufige Formgebung ermöglicht, ist die Übertragung dieser Technologie auf Langteile wesentlich aufwändiger. Um eine Formfüllung sicher gewährleisten zu können, ist beim Präzisionsschmieden von Langteilen neben volumengenauen Ausgangsformen eine Masseverteilung und Querschnittsvorbildung erforderlich.

Auch beim konventionellen Schmieden mit Grat erfordern komplexe Bauteile mit ausgeprägter Längsachse spezielle Vorformwerkzeuge. Diese sind jedoch nur bauteilspezifisch einsetzbar, so dass beispielsweise für eine variantenreiche Kleinserienfertigung eine große Anzahl von verschiedenen Vorformwerkzeugen hergestellt und bevorratet werden müssen.

Hier schließt die vorliegende Arbeit an. Am Beispiel von repräsentativen Langteilgeometrien werden sowohl für das konventionelle Schmieden mit Grat als auch für das Präzisionsschmieden modular aufgebaute Vorformkonzepte erarbeitet. Die entwickelten Vorformtechnologien sollen Schmiedeunternehmen in die Lage versetzen, eine an die jeweilige Fertigform angepasste Zwischenform bei erhöhter Flexibilität und reduzierten Werkzeugkosten herzustellen.

## 2. Ausgangssituation und Problemstellung

### 2.1 Ausgangssituation

#### 2.1.1 Situation der deutschen Gesenkschmieden

Die deutsche Gesenkschmiedeindustrie beschäftigte 2001 etwa 16.000 Mitarbeiter in ca. 120 Unternehmen, die mit wenigen Ausnahmen mittelständisch geprägt und zum Großteil in Familienbesitz sind. Etwa drei Viertel der Unternehmen beschäftigen weniger als 200 Mitarbeiter, lediglich 10 % der Unternehmen mehr als 400. Die Standorte liegen überwiegend in Nordrhein-Westfalen (75 %) und Baden-Württemberg (14 %). Die übrigen Schmieden (11 %) verteilen sich auf das übrige Bundesgebiet [VIE98, RUD00, IDS02].

Bild 2.1 gibt einen Überblick über die statistischen Kenngrößen der deutschen Gesenkschmiedeindustrie.

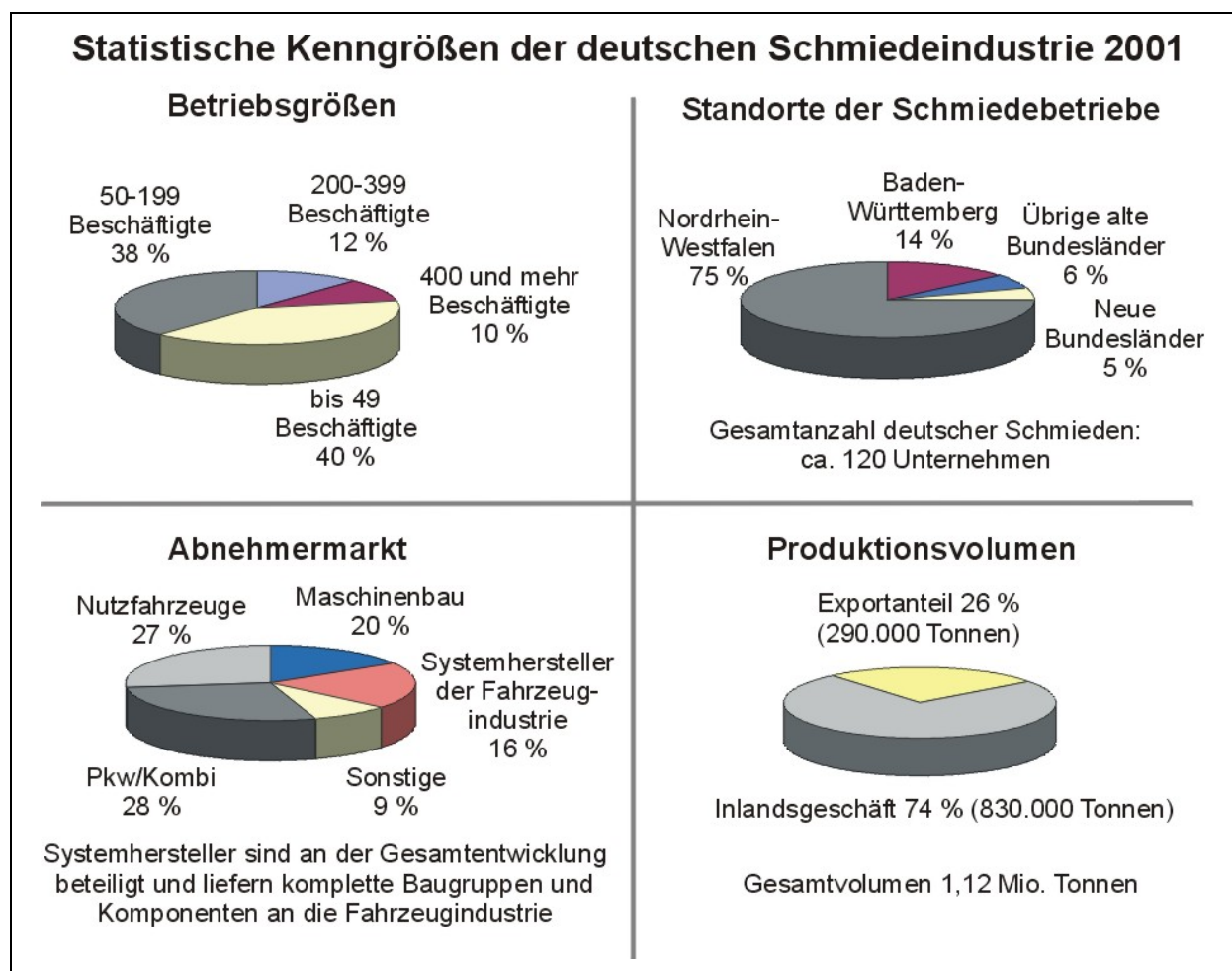


Bild 2.1: Statistische Kenngrößen der deutschen Schmiedeindustrie für das Jahr 2001 [IDS02]

Die Schmiedeindustrie ist Zulieferindustrie. Insgesamt 71 % der Schmiedeerzeugnisse entfallen auf die Fahrzeugindustrie und deren Systemhersteller. Systemhersteller sind an der Gesamtentwicklung des Fahrzeugs beteiligt und liefern komplette Baugruppen an die Fahrzeugindustrie, z.B. Getriebe (Getrag AG, ZF Friedrichshafen AG), Fahrwerkskomponenten (ZF Friedrichshafen AG) oder Einspritzsysteme (Robert Bosch AG). Damit zeigt sich die hohe Abhängigkeit der Schmiedeindustrie von den Entwicklungen der Fahrzeugindustrie [RUD00, WES97c, ZER97].

Das Produktionsvolumen aller in Deutschland tätigen Schmieden betrug im Jahr 2001 1,12 Mio. Tonnen. Durch die allgemeine Globalisierung der Fahrzeugindustrie und die zunehmende Verlagerung der Fahrzeugfertigung deutscher Firmen ins Ausland hat sich der Exportanteil der deutschen Schmieden in den letzten Jahren erhöht [RUD00, TUT99].

Die zunehmende Globalisierung des Beschaffungswesens, insbesondere bei den Hauptkunden der Schmiedeindustrie, hat jedoch dazu geführt, dass die deutsche Schmiedeindustrie in den letzten fünfzehn Jahren in eine zusätzliche Wettbewerbssituation geraten ist.

Vor dem Hintergrund dieser nationalen und internationalen Marktsituation werden die Schmiedeunternehmen in Zukunft stark gefordert sein, ihre Strukturen den veränderten Randbedingungen anzupassen und technologische Potenziale zu erschließen. Langfristig ist der Trend zu erkennen, dass sich der Markt für konventionelle, klassische Gesenkschmiedeteile zunehmend kompetenten Anbietern aus Schwellenländern zuwendet. In den Hochtechnologieländern Japan, USA sowie den Ländern der EU ist ein Trend zur Herstellung von komplexen und anspruchsvollen Bauteilen zu erkennen. Ziel ist es, die Bauteileigenschaften zu verbessern und gleichzeitig die Produktivität durch optimierte Produktionsprozesse zu steigern [VIE98].

Als Folge dieser Entwicklungen ergibt sich ein erhöhter Bedarf an innovativen und wertschöpfungssteigernden Fertigungsverfahren. Ein Beispiel hierfür sind die Entwicklungen auf dem Gebiet des Präzisionsschmiedens als Near-Net-Shape-Verfahren [BOH99b, DOE96c, GUT99a, SCH00, WES97a].

## 2.2 Verfahren des Gesenkschmiedens

Das Gesenkschmieden gehört nach DIN 8580 zur Hauptgruppe Umformen, unter der alle Fertigungsverfahren, die eine gezielte Änderung der Form, der Oberfläche und der Werkstoffeigenschaften eines Werkstücks unter Beibehaltung von Masse und Stoffzusammenhang zur Folge haben, zusammengefasst werden [BEI95].

Die Genauigkeiten, die durch die verschiedenen Massivumformverfahren erzielt werden können, sind in Bild 2.2 dargestellt.

Umformverfahren	ISO-Toleranzen (IT) entspr. DIN ISO 286 Teil 1											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Gesenkschmieden Schmiedegüten E und F nach DIN 7526												
Gesenkschmieden Genaus schmieden												
Gesenkschmieden Präzisionsschmieden												
Kaltfließpressen												
Halbwarmfließpressen												
Warmfließpressen												
Maßprägen (kalt)												

Mit herkömmlichen Fertigungseinrichtungen erreichbar
  Durch Sondermaßnahmen erreichbar, z.B. Kaltnachprägen

Bild 2.2: Erreichbare Genauigkeiten bei verschiedenen Massivumformverfahren [NN95]

Im Folgenden sollen die für diese Arbeit relevanten Verfahren *konventionelles Gesenkschmieden (Formpressen mit Grat)*, *Schmieden im geschlossenen Gesenk (Formpressen ohne Grat)* und *Präzisionsschmieden* näher beschrieben werden.

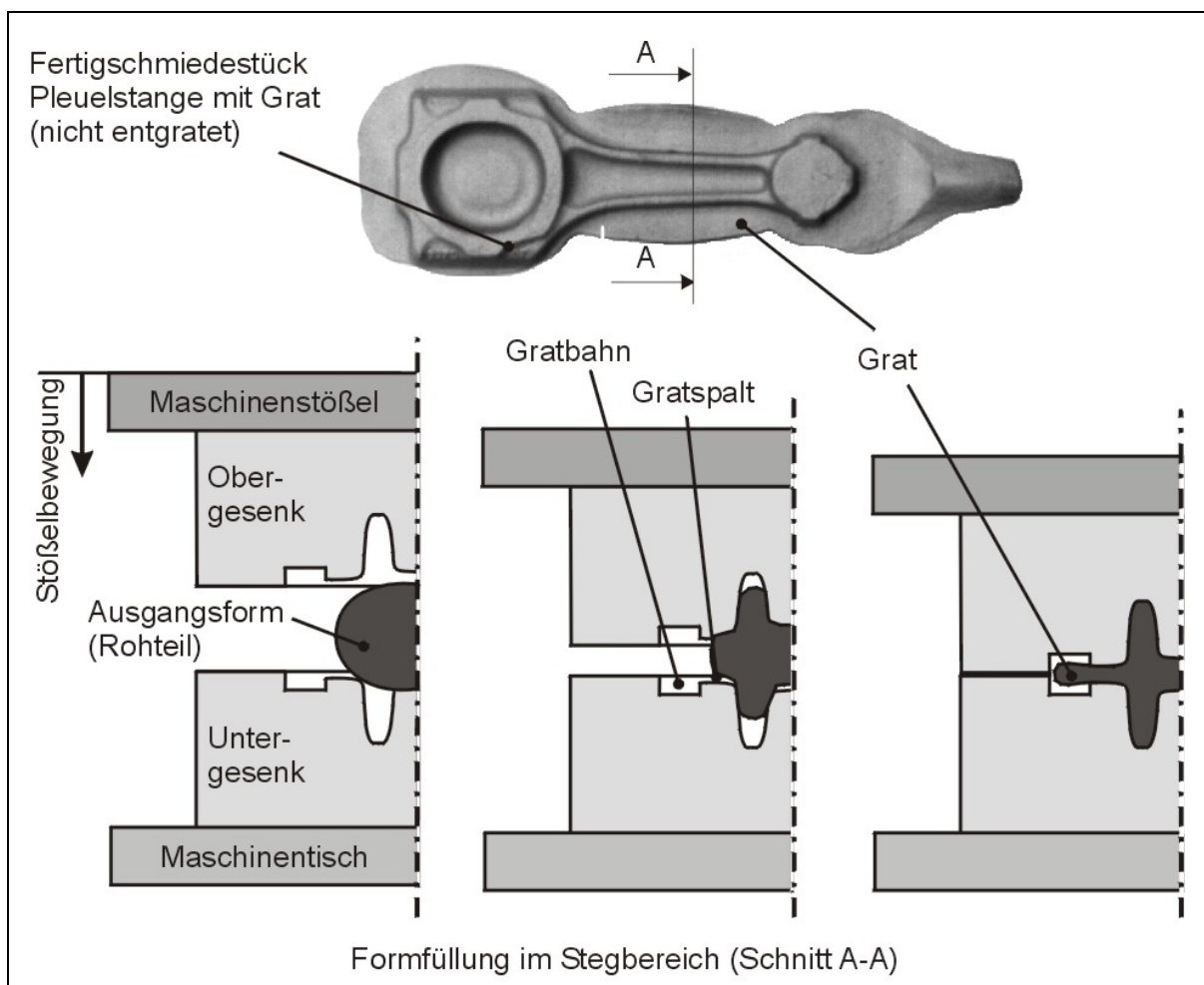
### 2.2.1 Konventionelles Gesenkschmieden

Nach DIN 8583 gehört das konventionelle Gesenkschmieden innerhalb der Hauptgruppe Umformen zu den Druckumformverfahren mit gegeneinander bewegten Formwerkzeugen, mit denen der Werkstoff des Werkstücks in eine bestimmte Richtung gedrückt wird [BEI95]. Die Herstellung der Bauteile erfolgt in Abhängigkeit der Komplexität in einem ein- oder mehrstufigen Prozess.

Der Arbeitsablauf beim konventionellen Gesenkschmieden setzt sich aus den Arbeitsgängen Abscheren, Erwärmen, Vorformen, Fertigschmieden, das aus den Grundvorgängen Stauchen, Breiten und Steigen besteht, und dem Abgraten zusammen (vgl. Bild 4.1). Das Rohteil muss dabei mit Hilfe geeigneter Vorformverfahren so an die Form des Fertigteils angenähert werden, dass eine sichere Formfüllung bei einem möglichst geringen Materialeinsatz erzielt werden kann.



Nach Erwärmung auf Umformtemperatur, die oberhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstückwerkstoffs liegt, und den Vorformoperationen erfolgt das Fertigschmieden im Gesenk unter Druck, welcher von der Umformmaschine über das formgebende i.d.R. zweigeteilte Gesenk auf das Werkstück ausgeübt wird. Dabei bewegt sich das Oberwerkzeug in vertikaler Richtung auf das Unterwerkzeug zu. Das Rohteil verändert beim Zufahren der Gesenkhälften seine Form und nähert sich der Gesenkhohlform (Gravur) an. Beim konventionellen Gesenkschmieden fließt das überschüssige Material des Rohteils über die Gratbahn in den Gratspalt (Bild 2.3). Dabei ist der Querschnitt des Gratspalts so gestaltet, dass der Materialfluss in diesem Bereich stark verlangsamt wird. Zudem kühlt sich das Material in diesem Bereich stark ab. Durch diese sogenannte Gratbremse erhöht sich der Druck im Gesenk, so dass die Hohlform vollständig gefüllt wird. Der Außengrat wird in einer dem Fertigschmieden nachgelagerten Arbeitsgang, dem Abgraten, entfernt. Beim konventionellen Schmieden schließen sich an den Schmiedeprozess die Wärmebehandlung sowie die spanende Bearbeitung an [BEI95, BRO99a, MAT91].



**Bild 2.3:** Formfüllungssequenz beim konventionellen Gesenkschmieden am Beispiel eines geschmiedeten Pleuels [nach MAT91]

## 2.2.2 Schmieden im geschlossenen Gesenk

Kennzeichnend für das Gesenkschmieden ohne Grat ist die Umformung im geschlossenen Gesenk, bei dem das Werkstück während der Umformung ganzseitig vom formgebenden Werkzeug umschlossen ist [LAN77]. Beim Schmieden im geschlossenen Gesenk kann zwischen Verfahren mit und ohne vorherigem Verschließen der Werkzeuge unterschieden werden (Bild 2.4). Bei den Verfahren ohne vorheriges Verschließen wird das Werkstück in das Gesenk eingelegt und die Umformung findet bereits während des Verschließens des Werkzeugs statt. Demgegenüber sehen Werkzeugprinzipien mit vorherigem Verschließen der Werkzeuge es vor, dass vor der eigentlichen Umformung die Gesenke umformfrei geschlossen werden und erst nach dem vollständigen Schließen der Werkzeuge die Umformung über Stempel eingeleitet wird. Die erforderliche Zuhaltkraft, die einem Öffnen des Gesenks entgegenwirkt, kann dabei beispielsweise über ein Federelemente aufgebracht werden.

Das Schmieden im geschlossenen Gesenk wird vornehmlich zum Herstellen von scheibenförmigen, rotationssymmetrischen Werkstücken, beispielsweise Kugellagerringe, Zahnradrohteile und Naben, genutzt, die durch eine einstufige Formgebung hergestellt werden können. Für das Schmieden im geschlossenen Gesenk sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen [DOE89, LAN77]:

- Volumengleichheit von erwärmter Ausgangs-, Zwischen und Endform oder die Anbringung von Ausgleichsräumen. Die Ausgleichsräume können dabei starr oder flexibel angelegt sein (Bild 2.4),
- genaue Positionierung im Schmiedewerkzeug, so dass die Achsen von Zwischen- und Endform übereinstimmen,

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens sind in Tabelle 2.1 gegenübergestellt:

Schmieden im geschlossenen Gesenk	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsparung von 10 – 30 % des Einsatzgewichtes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumenkonstanz von Ausgangs-, Zwischen- und Endform erforderlich</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wegfall des Arbeitsgangs Abgraten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exakte Masseverteilung (bei Langteilen) notwendig</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierte Umformkräfte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empfindlichkeit gegen Zentrierfehler</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserte mechanische Eigenschaften durch Wegfall des Gratansatzes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gefahr der Stirngratbildung an der Teilungsfuge</li> </ul>

*Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile des Schmiedens in geschlossenen Gesenk*



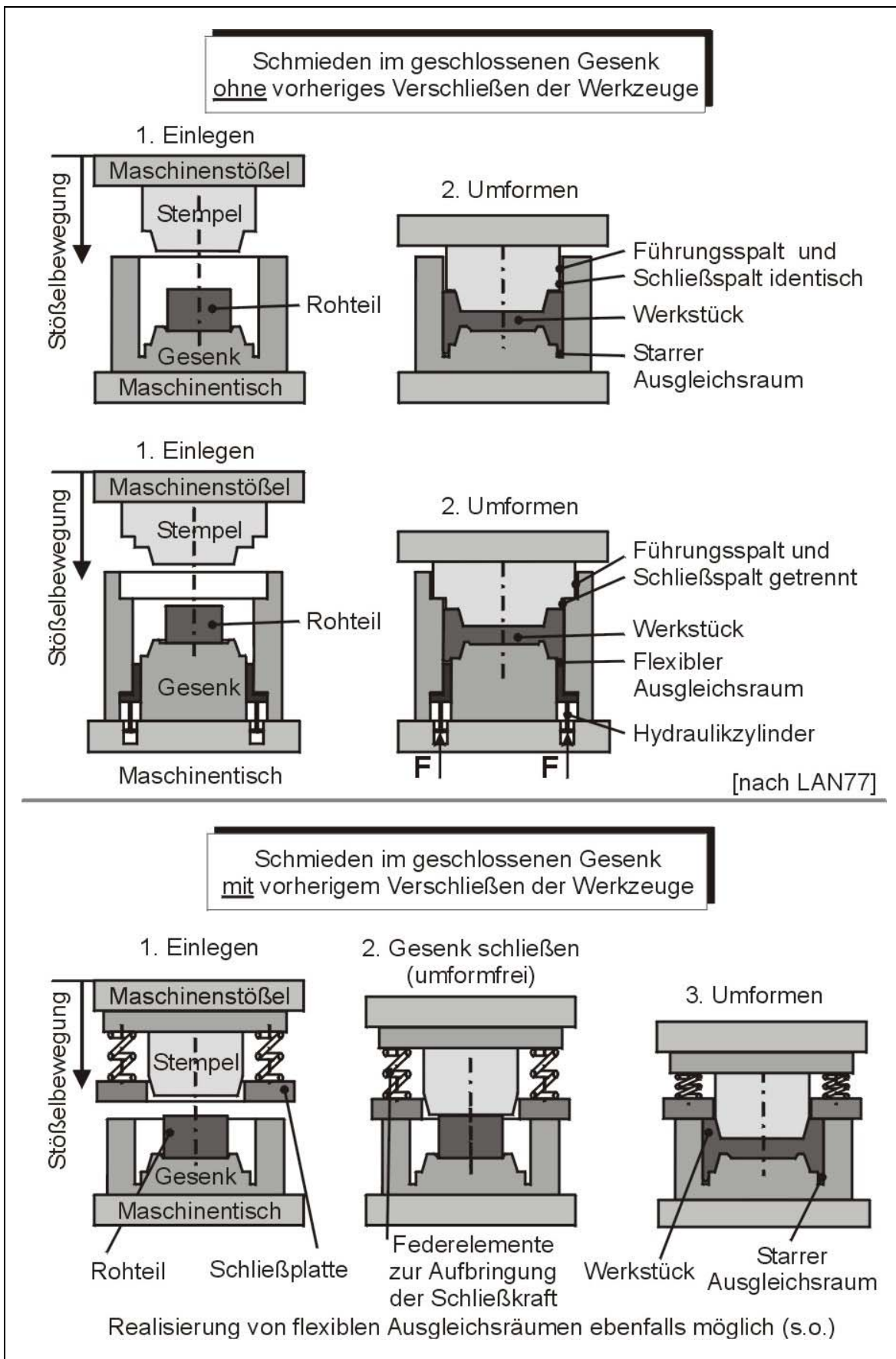


Bild 2.4: Werkzeugkonzepte zum Schmieden in geschlossenen Gesenk

### 2.2.3 Präzisionsschmieden

Das Präzisionsschmieden zielt auf die umformtechnische Herstellung von nahezu einbaufertigen, komplexen Funktionselementen [BAL01, GUT99a, GUT99b, KUD90]. Das Präzisionsschmieden wird im geschlossenen Gesenk ohne Ausgleichsräume durchgeführt. Während die zulässigen Toleranzen beim konventionellen Gesenkschmieden im Bereich IT 14-16 liegen, sind beim Präzisionsschmieden Toleranzen im Bereich von IT 8-9 möglich [NN95].

Zur Herstellung einbaufertiger, komplexer Funktionselemente wird das Präzisionsschmieden oft in Verbindung mit der Kaltumformung angewendet. Durch die Warmumformung erfolgt die wesentliche Formgebung. In der darauf folgenden Kaltumformung wird das Bauteil lediglich partiell umgeformt, auf die geforderte Maß- und Formgenauigkeit gebracht, Oberflächenverbesserungen erzielt und aus der Wärmebehandlung entstehende Härteverzüge korrigiert [WES97a].

Die hohen Genauigkeits- und Qualitätsanforderungen an präzisionsgeschmiedete Bauteile führen zwangsläufig zu erhöhten Anforderungen an den Schmiedeprozess [BAL01, CHI01, DOE96a, GAL93a, GAL93b, LAN77, WES97a]:

- Exakte Werkzeugauslegung und -fertigung,
- Verwendung volumengenauer Rohteile mit sauberer, fehlerfreier Oberfläche,
- eine an die Endform angepasste Masseverteilung und Querschnittsvorbildung insbesondere beim Schmieden von Langteilen,
- Einhaltung enger Temperaturtoleranzen für Werkzeug- und Werkstück. Vermeidung von Zunderbildung durch Schnellerwärmung,
- Entkopplung der Vorgänge *Werkzeug schließen* und *Umformung*,

Zusammenfassend lassen sich folgende Vorteile des Verfahrens nennen [DEA85, DOE96a, DOE96c, DOE98, GAL93a, GAL93b, GUT99a, GUT99b, HID90, TOM99, YOS99, ZER97, ZHA99]:

- Erhöhung der Genauigkeit gegenüber konventionell hergestellten Schmiedeteilen, Herstellung nahezu einbaufertiger Funktionsflächen,
- verringerter Zerspanaufwand durch reduziertes Bearbeitungsaufmaß (Net-Shape bzw. Near-Net-Shape-Technologie),
- Werkstoffeinsparung durch reduzierte Einsatzmasse (Wegfall des Grats),
- verkürzte Prozesskette bedingt durch die Einsparung des Abgratprozesses aufgrund des gratlosen Schmiedens.

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover (IFUM) sind Verfahren und Werkzeugsysteme zum Präzisionsschmieden von Ventildfedertellern [POL95], von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern [ADA90, BOH99a, WES97b], von Pkw-Gangrädern [DRE02] sowie von Gleichlaufgelenken mit Hinterschnitt [WIE95,

WIE96] realisiert worden, die nach der Umformung im geschlossenen Gesenk lediglich eine Hartfeinbearbeitung erfahren [TÖN93]. Die Übertragbarkeit des Präzisions-schmiedepinzips auf Langteile ist am IPH-Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH am Beispiel von Pleuel [BRO99a] sowie von Handwerkzeugen [IPH02] gezeigt worden. Bild 2.5 zeigt eine Auswahl von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen, die am IPH und am IFUM geschmiedet wurden.



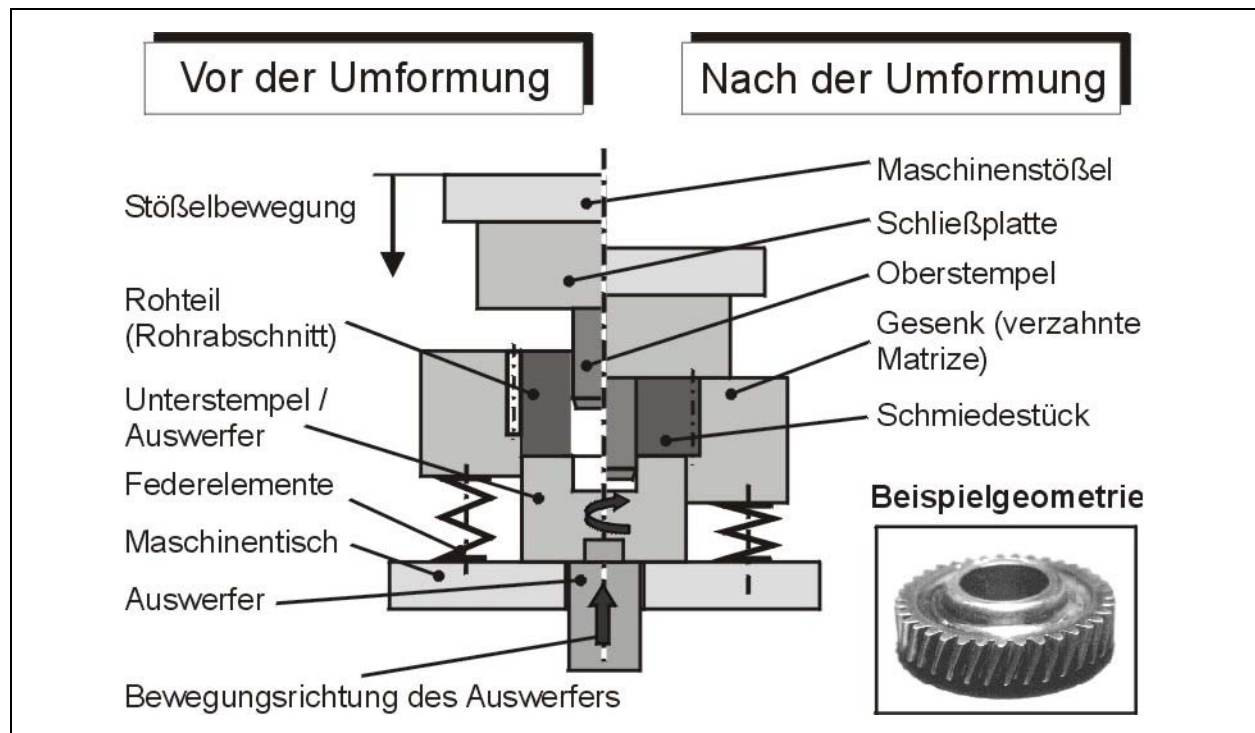
*Bild 2.5: Am IFUM und IPH präzisionsgeschmiedete Bauteile*

Nachfolgend werden exemplarisch sowohl für ein rotationssymmetrisches Bauteil (schrägverzahntes Zahnrad) als auch für ein Bauteil mit ausgeprägter Längsachse (Pleuel) Werkzeugkonzepte zum Präzisionsschmieden vorgestellt.

### 2.2.3.1 Werkzeugkonzept zum Präzisionsschmieden von rotationssymmetrischen Bauteilen

Das Werkzeug zum Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder (Bild 2.6) ist modular aufgebaut und besteht aus Ober- und Unterstempel sowie einer verzahnten Matrize. Der Unterstempel wird zugleich als Auswerfer genutzt. Zur Umformung wird das Rohteil (hier ein Rohrabschnitt) in das Gesenk (verzahnte Matrize) eingelegt und befindet sich dann auf dem Unterstempel. Mit der Abwärtsbewegung des Stößels setzt die Schließplatte des Oberstempels zunächst auf der Matrize auf und schließt damit das Werkzeug. Der Oberstempel bewegt die Matrize gegen die Kraft der Federelemente abwärts. Dabei werden die unter der Matrize angebrachten Federpakete komprimiert und bringen die erforderliche Schließkraft auf. Durch die Abwärtsbewegung des nun

geschlossenen Gesenks wird das Werkstück auf dem Unterstempel gestaucht, und der Werkstoff fließt radial in die verzahnte Gravur. Während des Stößelrückhubs bewegt sich die Matrize durch die Federenergie in ihre Ausgangslage zurück. Der Ausstoß des geschmiedeten Zahnrads erfolgt durch eine schraubenförmige Bewegung des Unterstempels [WES97b].



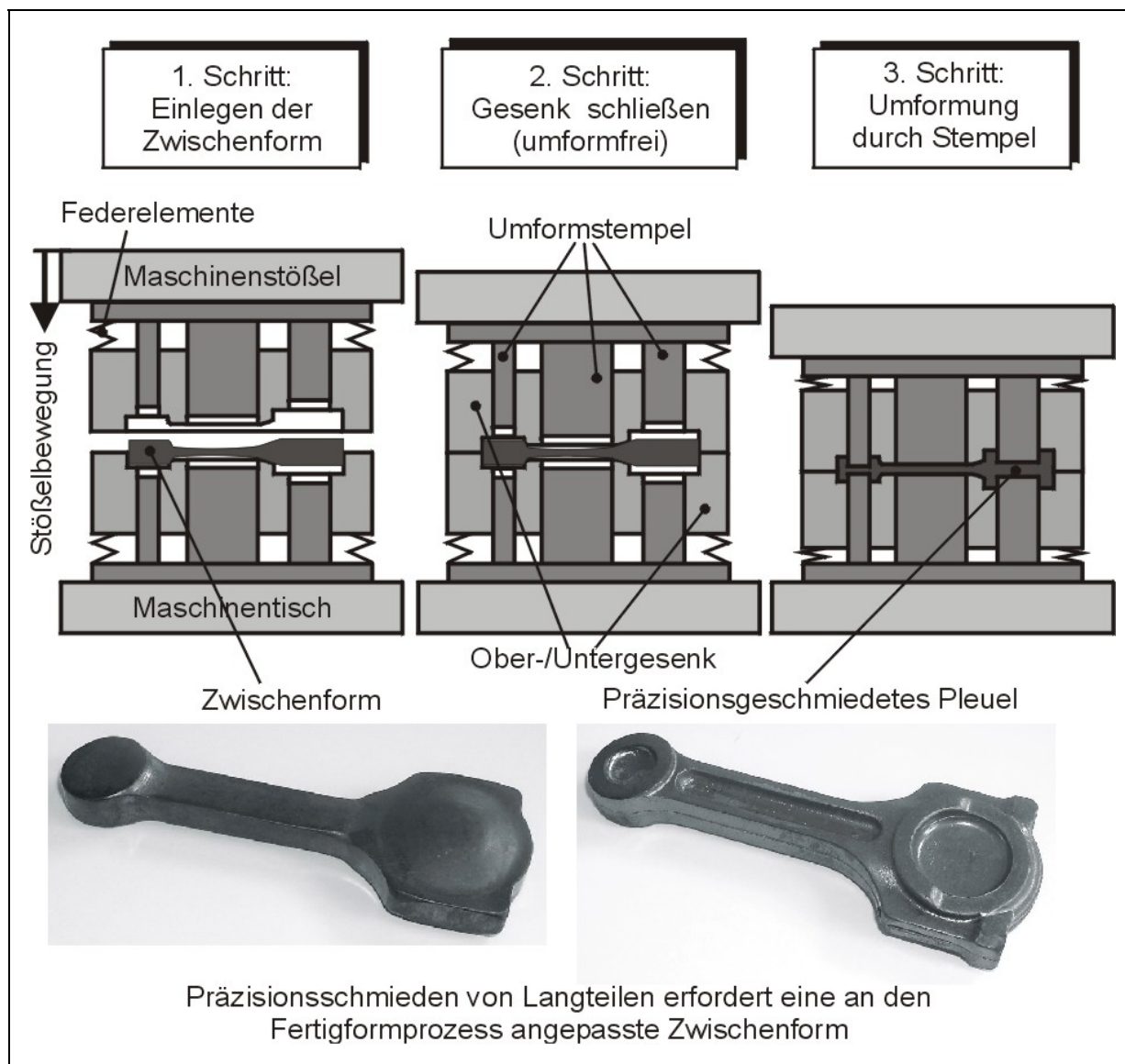
*Bild 2.6: Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden von rotationssymmetrischen Bauteilen mit feststehendem Stempel und Erzeugung der Schließkraft durch Feder Elemente am Beispiel schrägverzahnter Zahnräder [WES97b]*

### 2.2.3.2 Werkzeugkonzept zum Präzisionsschmieden von Langteilen

Bei der Übertragung des Prinzips des Präzisionsschmiedens auf Langteile sind im Vergleich zu rotationssymmetrischen Bauteilen zusätzliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Dazu zählen vor allem die Erzeugung einer reproduzierbaren Zwischenform sowie die Gewährleistung einer exakten Einlegeposition. Bei der Langteilmfertigung durch Präzisionsschmieden ist somit nicht nur die Konstanz der Gesamtmasse, sondern auch die Genauigkeit der Masseverteilung von besonderer Bedeutung [BRO99a, SCH00, SCH01].

Das am IPH entwickelte Werkzeugkonzept zum Präzisionsschmieden von Langteilen basiert auf einer zeitlichen Trennung der Vorgänge *Gesenk schließen* und *Umformung* (Bild 2.7).





**Bild 2.7:** *Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden von Langteilen mit feststehenden Stempeln und Erzeugung der Schließkraft durch Federelemente am Beispiel eines Pleuels [BRO99a]*

Nach dem umformfreien Schließen von Ober- und Untergesenk dringen Umformstempel in die Gravur ein. Die zur Formfüllung erforderliche Relativbewegung zwischen Stempel und Gravur wird durch die Entkopplung der Gesenkhälften von der Maschine mittels Federelemente erreicht, die zugleich die Gesenkschließkräfte bereitstellen. Zudem wird die Übertragung der Stößelkipfung und des Versatzes auf das Schmiedeteil verhindert und somit eine deutlich verbesserte Geometrie- und Gewichtstoleranz ermöglicht. Darüber hinaus kann auf einer einfach wirkenden Umformmaschine eine zweifach wirkende Umformung realisiert werden [BRO99a, SCH00, SCH01]. Andere Konzepte sehen eine hydraulische Verriegelung, ein Gelenkgetriebe oder den Einsatz von Multi-Stößeln vor, um die Entkopplung der Werkzeugbewegungen zu erzielen [YOS99].

## 2.3 Problemstellung

Je nach Produkt und Fertigungsstruktur liegt der Materialkostenanteil beim Gesenkschmieden zwischen 30 und 40 % [BRE99, ZER97]. Durch Optimierung des Vorformverfahrens lässt sich das Einsatzgewicht reduzieren, indem bereits in einem frühen Stadium der Fertigung eine Masseverteilung vorgenommen wird. Die Annäherung der Ausgangsform an die Endform über Masseverteilung und Querschnittsvorbildung (vgl. Bild 4.1) ist dabei insbesondere für Langteile von Bedeutung.

### 2.3.1 Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen

Beim konventionellen Schmieden von Langteilen besteht in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie u.U. die Möglichkeit, auf Kosten eines hohen Gratanteils sowie eines erhöhten Verschleißes des Fertigformwerkzeugs auf eine bauteilspezifische Vorformung zu verzichten.

Bei einer variantenreichen Fertigung mit geringen Stückzahlen (Klein- und Mittelserie) haben die Aufwendungen für vorwiegend bauteilspezifische Vorformwerkzeuge einen im Vergleich zur Massenfertigung hohen Stückkostenanteil. Gründe dafür liegen in dem erforderlichen Aufwand für Konstruktion und -fertigung, Bevorratung sowie Instandhaltung für die lediglich bauteilspezifisch einsetzbaren Vorformwerkzeuge [IPH97].

Teilweise vermeiden die Unternehmen dieses Investitionsrisiko und praktizieren lediglich einfache Stauchprozesse, die weniger der Vorformung, sondern primär der Rohteil-entzunderung dienen. Den Kostenvorteilen im Werkzeugbau stehen jedoch teilweise erheblich geringere Standmengen der Endformwerkzeuge und ein erhöhter Werkstoffeinsatz gegenüber [IPH97].

### 2.3.2 Vorformung für das Präzisionsschmieden von Langteilen

Das Präzisionsschmieden von Langteilen mit ausgeprägten Querschnittsunterschieden entlang der Bauteillängsachse, z.B. Pleuel, Lenkhebel oder Schraubenschlüssel, erfordert reproduzierbare, masseverteilte Zwischenformen mit engen Volumetoleranzen sowie einer endkonturnahen Querschnittsvorbildung (vgl. Bild 2.7).

Gegenwärtige Konzepte zur Herstellung der für das Präzisionsschmieden von Langteilen erforderlichen Zwischenform sehen einen Walz- mit anschließendem Stauchprozess vor. Dies führt dazu, dass für die Prozesskette *Präzisionsschmieden von Langteilen* zusätzlich zur Schmiedeanlage eine Walzmaschine benötigt wird, die aufgrund des hohen Rüstaufwands und der starren Verkettung, die Flexibilität wesentlich herabsetzen. Hinzu kommen die nicht zu vernachlässigenden Investitionskosten zur Beschaffung der Walzanlage.

Vor dem Hintergrund des internationalen Konkurrenz- und Preisdrucks sind die Unternehmen für den Ausbau ihrer Wettbewerbsfähigkeit auf Konzepte angewiesen, welche die Flexibilität bei der Herstellung von Zwischenformen sowohl für das konventionelle Schmieden als auch für das Präzisionsschmieden von Langteilen erhöhen.

### 3. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neuartige Vorformkonzepte für Bauteile mit ausgeprägter Längsachse zu entwickeln und deren grundsätzliche Anwendbarkeit an exemplarischen Bauteilgeometrien nachzuweisen (Bild 3.1).

#### 3.1 Konventionelles Schmieden von Langteilen

Für das **konventionelle Schmieden** von Langteilen soll ein modular aufgebautes Werkzeugsystem entwickelt und erprobt werden, dessen grundlegendes Konzept auf einer Segmentierung des formgebenden Werkzeugs in Basisgeometrien beruht (vgl. Bild 5.1). Durch die Möglichkeit zur variablen Anordnung der Basisgeometrien in einem geeigneten Spannsystem lässt sich der Einsatzbereich eines einzelnen Werkzeugs auf die Vorformung mehrerer Werkstücke erweitern. Im Einzelnen sollen folgende Teilziele erreicht werden:

- Flexibilisierung des Vorformprozesses,
- Ökonomische Vorformung für variantenreiche Klein- und Mittelserien sowie
- Reduzierung der bauteilspezifischen Werkzeugkosten

Zum Nachweis der technischen Machbarkeit soll ein modular aufgebautes Werkzeugsystem konstruiert und gefertigt werden. Darüber hinaus soll beispielhaft ein Segmentatz für eine Teilefamilie entwickelt werden.

#### 3.2 Präzisionsschmieden von Langteilen

Für das **Präzisionsschmieden** von Langteilen soll ein neuartiges Konzept zur Vorformung entwickelt werden, das die Herstellung der erforderlichen Zwischenform in einem Arbeitshub der Maschine ermöglicht.

Das zu Grunde liegende Werkzeugprinzip soll auf einem Umformwerkzeug mit mehrdimensional wirkenden Umformstempeln basieren, in dem die Masseverteilung und Querschnittsvorbildung der Ausgangsform durch eine horizontale und vertikale Umformung erfolgt (vgl. Bild 6.1). Die erforderliche horizontale Umformung (Schieberbewegung) soll dabei durch einen vertikal betätigten Keilantrieb erfolgen. Insgesamt sollen folgende Teilziele erreicht werden:

- Verkürzung der Prozesskette *Präzisionsschmieden* durch
- Masseverteilung und Querschnittsvorbildung in einem Arbeitshub der Umformmaschine.

Die versuchstechnische Realisierung zum Nachweis der technischen Machbarkeit soll an einer pleuelähnlichen Zwischenform erfolgen. Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf eine Zwischenform für ein präzisionsgeschmiedetes Pleuel soll abschließend mit Hilfe der FEM gezeigt werden.

Gesamtziel ist es, Schmiedeunternehmen Konzepte zur Vorformung von Langteilen zur Verfügung zu stellen, die eine flexible Herstellung einer auf den jeweiligen Fertigformprozess abgestimmten Zwischenform bei reduzierten Werkzeugkosten erlauben.

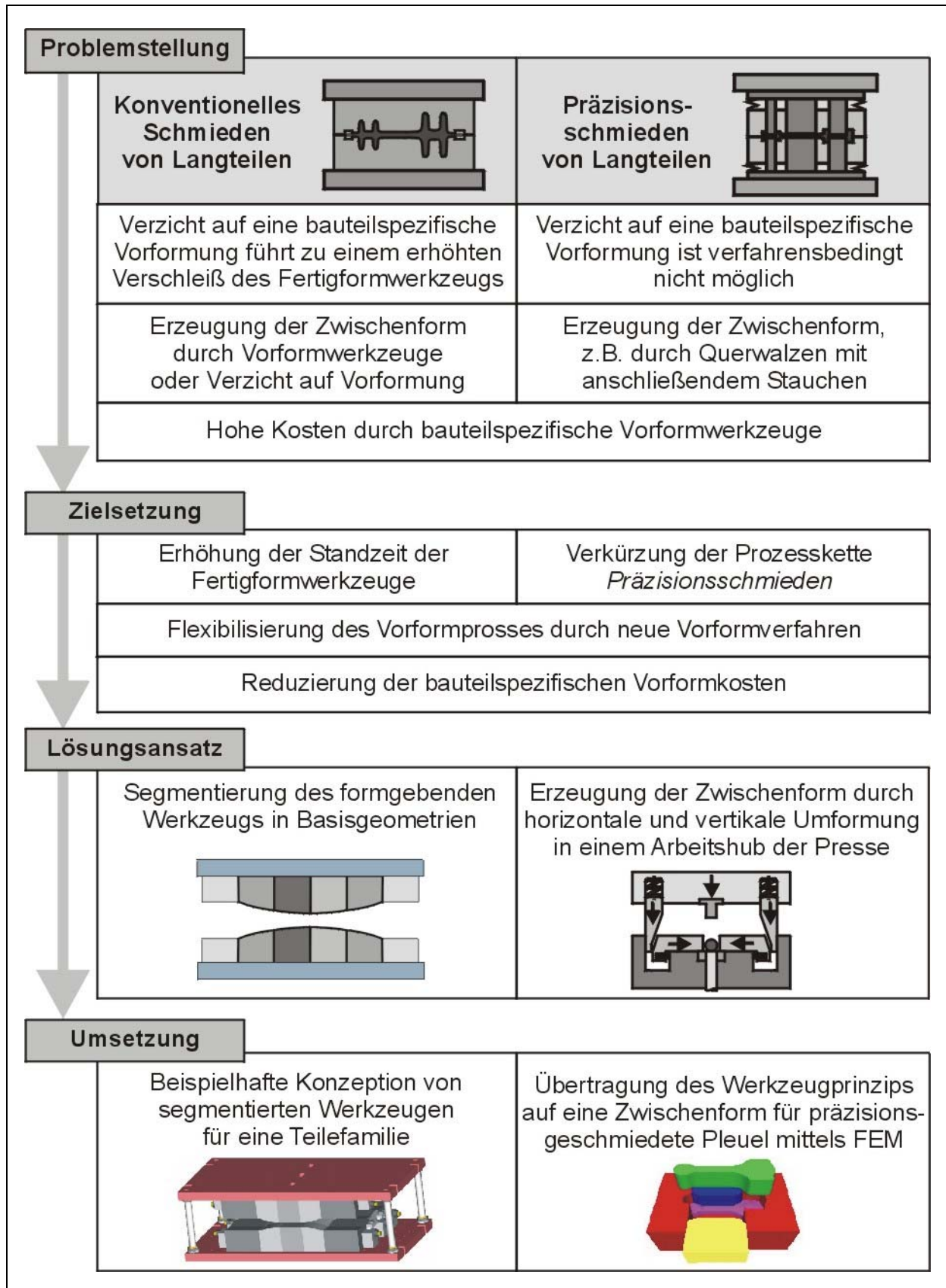


Bild 3.1: Zielsetzung und Aufbau der Arbeit



## 4. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik bezüglich Vorformverfahren für das Gesenkschmieden dargestellt. Nach der Einordnung der Vorformung in die Arbeitsvorgangsfolge beim Gesenkschmieden werden die industriell eingesetzten Vorformverfahren vorgestellt. Im zweiten Abschnitt des Kapitels wird der Stand der Technik bezüglich Schmiedewerkzeugen mit mehrfach wirkenden Umformstempeln dargelegt, da das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorformwerkzeug für das Präzisionsschmieden von Langteilen ebenfalls die Umformung mit mehrdirektional wirkenden Umformstempeln vorsieht (vgl. Bild 6.1).

### 4.1 Vorformverfahren

#### 4.1.1 Einordnung der Vorformung in den Umformprozess

Gesenkschmiedestücke mit ausgeprägten Querschnittsunterschieden entlang der Bauteillängsachse werden über ein oder mehrere Zwischenformen zum fertigen Werkstück geschmiedet (Bild 4.1). Es wird von einem *mehrstufigen Prozess* gesprochen [HUS01]. Das Rohteil stellt die Ausgangsform dar, die nach den Vorformstufen erreichte Form wird als Zwischen- oder Vorform bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Fertigungsschritte zur Erreichung der einzelnen Zwischenformen einheitlich der Begriff Vorformung, für das Ergebnis der Vorformstufen einheitlich der Begriff Zwischenform verwendet.

Als Halbzeuge werden Stäbe, Knüppel, Brammen oder Flacherzeugnisse eingesetzt. Die für das Schmiedestück erforderliche Ausgangsform wird durch Scheren, Brechen, Sägen oder Trennen hergestellt. Das Scheren hat sich dabei wegen des verlustfreien Trennvorgangs (keine Spanbildung) und der hohen Mengenleistung für die Herstellung der Ausgangsform durchgesetzt. Bei gescherten Rohteilen für das Präzisionsschmieden kann bei Querschnitten bis zu 100 x 100 mm eine Massengenauigkeit von  $\pm 0,5 \%$  erreicht werden [GAL93b].

Die Ausgangsform wird über Zwischenformen schrittweise der Endform angenähert. Zusammengefasst spricht man von einer Stadienfolge. Die grundlegenden Umformoperationen basieren auf folgenden Fertigungsschritten:

- Masseverteilung,
- Biegen oder Verdrehen und
- Querschnittsvorbildung [BUC97, MAT91, TOM99].

Durch die Masseverteilung soll der Werkstoff der Ausgangsform entlang der Hauptachse der Fertigform so verteilt werden, dass die Größe der Zwischenformquerschnitte denen des Fertigteils einschließlich des erforderlichen Gratquerschnitts entspricht. Die Masseverteilung hat die Aufgabe, den Materialfluss während der Fertigformung im Hinblick auf einen möglichst geringen Materialfluss entlang der Bauteillängsachse zu optimieren. Ziel ist es, dass in der Endformstufe im Wesentlichen ein Materialfluss senkrecht zur Bauteillängsachse stattfindet. Eine symmetrische Verteilung um die Längsachse in runder, vieleckiger oder rechteckiger Form reicht dabei häufig aus, eine

Übereinstimmung der Form von Fertigteilquerschnitt und Zwischenformquerschnitt ist nicht unbedingt gefordert.

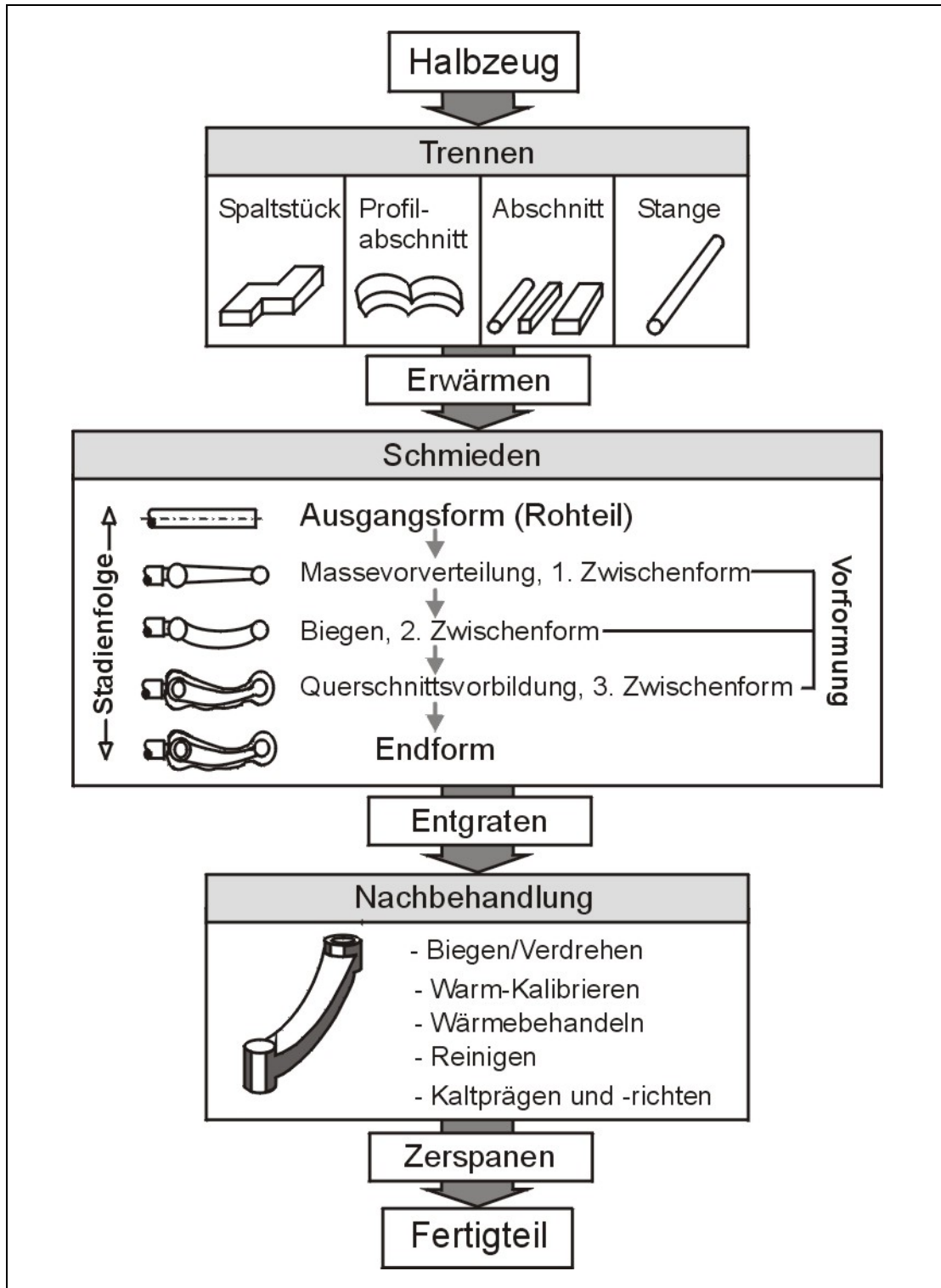


Bild 4.1: Arbeitsvorgangsfolge beim konventionellen Gesenkschmieden [BUC97]

Durch Biegen oder Verdrehen werden die Hauptachsen von Zwischen- und Endform zur Deckung gebracht. Üblicherweise erfolgt das Biegen nach der Masseverteilung. In Abhängigkeit der Geometrie des Fertigteils kann das Biegen aber auch nach der Querschnittsvorbildung bzw. der End- oder Fertigformung erfolgen.

Mit Hilfe der Querschnittsvorbildung erfolgt die Annäherung der Zwischenform an die Endform, indem die Querschnittsflächen der Zwischenform soweit denen der Endform angenähert werden, dass in der Endformung die geforderten Abmessungen erreicht werden können.

Bei der Auslegung eines Schmiedeprozesses ist die Festlegung der Stadienfolge und damit die Anzahl und Art der Vorformoperationen eine der wichtigsten Aufgaben. Zur Bestimmung einer optimalen Stadienfolge wird das Masseverteilungsschaubild (vgl. Bild 6.5) genutzt. Dieses lässt sich aus den CAD-Daten des Fertigschmiedeteils berechnen oder anhand der Zeichnung oder eines Musterstücks bestimmen, indem in regelmäßigen Abständen die Größe der senkrecht zur Längsachse der Endform liegenden Querschnitte ermittelt und über der Längsachse aufgetragen wird. Durch Anwendung von Glättungsroutinen, Anpassung an Verfahrensgrenzen des eingesetzten Vorformverfahrens sowie der Addition der erforderlichen Gratquerschnitte ergibt sich das Masseverteilungsschaubild der Zwischenform [BRO99a].

#### 4.1.2 Ziele der Vorformung

Ziel der Vorformung, die für das Schmieden im geschlossenen Gesenk und das Schmieden von Langteilen eine besondere Bedeutung hat, ist es, die Ausgangsform möglichst nah an die Endform des Werkstücks zu bringen. Darüber hinaus werden mit der Vorformung folgende weitere Ziele verfolgt [AKA94, KIM01, LAN77, TOM99, YOS99]

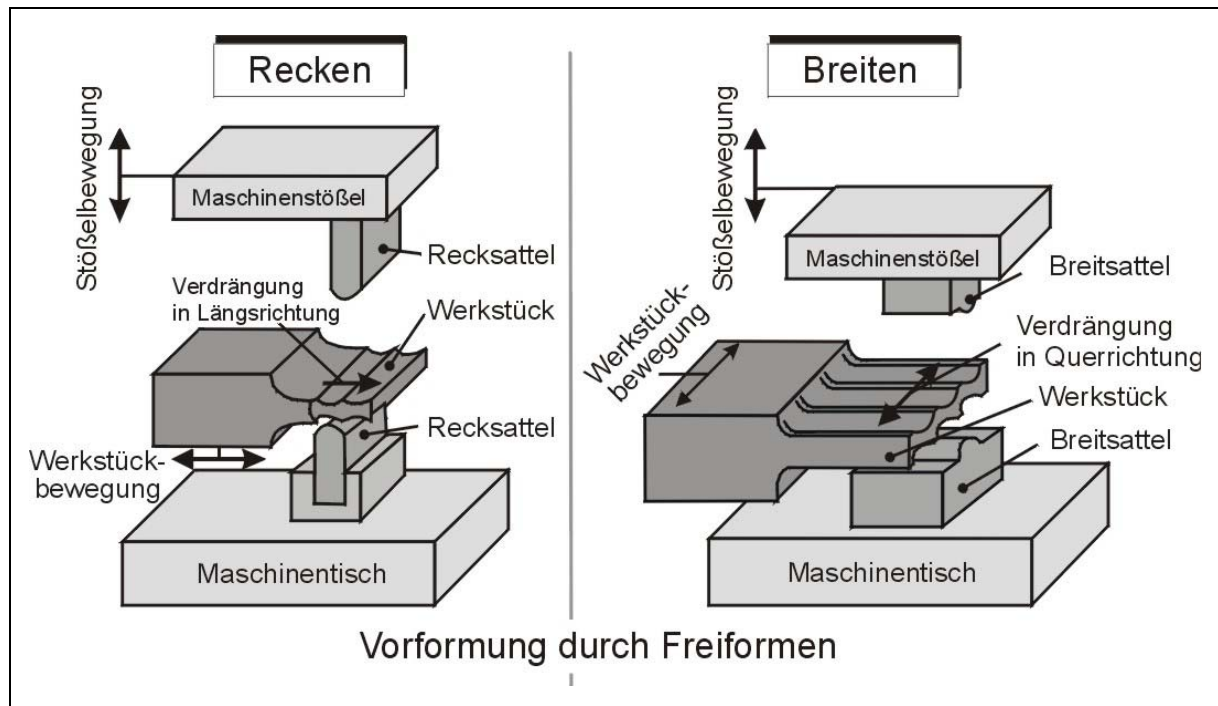
- Gewährleistung einer sicheren Formfüllung,
- Begünstigung des Materialflusses in den nachgelagerten Umformstufen, bei Langteilen soll ein Werkstofffluss in Richtung der Längsachse vermieden werden,
- Reduzierung der Umformkräfte,
- Standmengenerhöhung der Fertigformwerkzeuge durch Verschleißminimierung aufgrund verkürzter Fließwege sowie
- Erhöhung der Genauigkeit beim Schmieden im geschlossenen Gesenk.

Die Verfahren zur Vorformung von Langteilen werden der *Freiformung*, *Gesenkformung*, dem *Walzen* und dem *Kneten* zugeordnet. Darüber hinaus existieren einige Sonderverfahren zur Vorformung. Im Folgenden werden die in der Literatur beschriebenen Verfahren zur Vorformung von Langteilen vorgestellt.

### 4.1.3 Freiformverfahren zur Vorformung

#### 4.1.3.1 Recken und Breiten

*Recken* (Bild 4.2, links) und *Breiten* (Bild 4.2, rechts) sind schrittweise querschnittsvermindernde Umformungen zwischen nichtformgebundenen Reck- bzw. Breitsätteln. Die Verfahren gehören innerhalb der Druckumformverfahren zur Untergruppe Freiformen. Als Verfahren der Stoffverdrängung eignen sie sich zur Herstellung von quadratischen, rechteckigen oder polygonalen Querschnitten [LAN77, KOP87].



*Bild 4.2: Recken und Breiten als stoffverdrängende Vorformverfahren [nach KOP87]*

Kennzeichnend für das Recken ist die schrittweise Verdrängung in Längsrichtung des Ausgangsmaterials. Im Gegensatz dazu wird beim Breiten der Werkstoff überwiegend in Querrichtung verdrängt. Hinsichtlich der Querschnittsform der Ausgangsform gibt es keine Einschränkungen, so dass Rund-, Vierkant-, und Vielkantmaterialien verarbeitet werden können. Mit den Verfahren lassen sich Querschnittsveränderungen von  $A_0/A_1 > 4 \dots 5$  realisieren ( $A_0$ : Ausgangsquerschnittsfläche,  $A_1$ : Querschnittsfläche nach der Vorformung).

Das Recken und Breiten wird vor allem bei großen Gesenkschmiedeteilen angewendet. Wesentliche Vorteile sind die einfachen, universell verwendbaren, nicht formgebundenen Werkzeuge. Der Handhabung erfolgt i.d.R. manuell, so dass eine große Geschicklichkeit des Bedienpersonals bei der Positionierung des Werkstücks auf dem Umformsätteln erforderlich ist. Die daraus resultierende mangelhafte Reproduzierbarkeit der Zwischenformen ist speziell im Hinblick auf die Prozesssicherheit (Ausschussproduktion, Werkzeugüberbeanspruchung, etc.) als Hauptnachteil anzusehen. Aufgrund der geringen Stückleistung wird lediglich für kleine Stückzahlen eine wirtschaftliche Fertigung erreicht [LAN77, KOP87].

#### 4.1.3.2 Stauchen und Anstauchen

Wie das Recken gehört auch das *Stauschen* (Bild 4.3, links) nach DIN 8583 zur Untergruppe Freiformen. Während beim Recken lediglich eine partielle Umformung des Werkstücks stattfindet, wird beim Stauchen überwiegend das gesamte Werkstück umgeformt. Dabei wird eine Werkstückabmessung zwischen meist parallelen Wirkflächen (Stauchbahnen) vermindert, folglich die dazu senkrechten Abmessungen vergrößert. Im Gegensatz zum Recken und Breiten liegt die Werkstücklängsachse beim Stauchen als Verfahren zur Stoffanhäufung in Richtung der Werkzeugbewegung.

Gestaucht werden können alle Querschnittsformen (rund, viereckig, achteckig, vielkantig). Neben einer reinen Entzunderung wird das Stauchen überwiegend für scheibenförmige Bauteile eingesetzt. Gegenüber dem Recken lassen sich wesentlich größere bezogene Höhenänderungen realisieren ( $h_0/h_1 \approx 1 \dots 1,1$ ;  $h_0$  := Ausgangshöhe,  $h_1$  := Höhe nach dem Stauchen). Wegen der Gefahr des Ausknickens gilt bei schlanken Ausgangsgeometrien folgende Verfahrensgrenze: Schlankheitsgrad  $h_0/d_o \leq 2 \dots 2,5$  ( $h_0$  := Ausgangshöhe,  $d_o$  := Ausgangsdurchmesser).

Als *Anstauchen mit lokaler Erwärmung* (Bild 4.3, rechts) wird das örtliche Stoffanhäufen an einem Ende oder in der Mitte eines Stabs bezeichnet. Der Umformvorgang findet überwiegend in Waagrecht-Stauchmaschinen oder Elektro-Stauchmaschinen statt. Das Anstauchen wird beispielsweise zur Masseverteilung beim Schmieden von Motorventilen oder Hinterachswellen eingesetzt [LAN77].

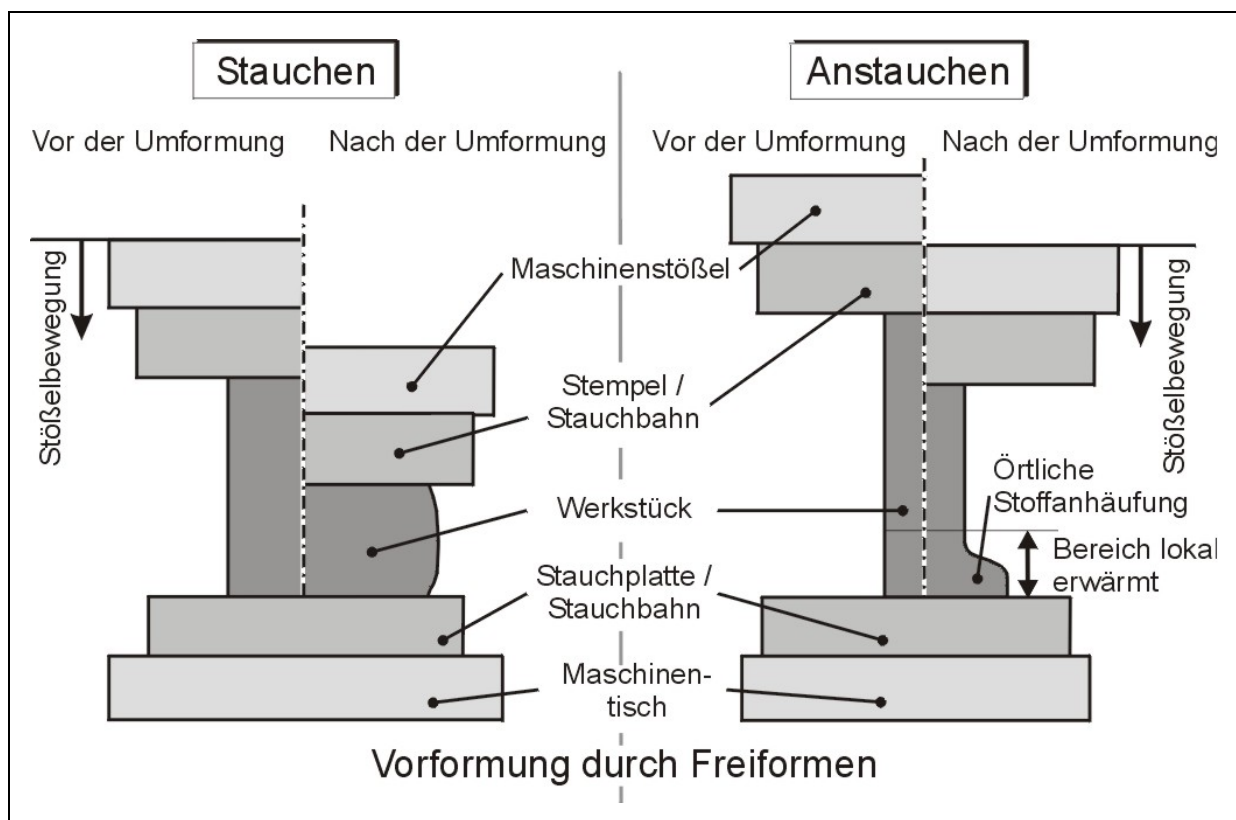


Bild 4.3: Stauchen und Anstauchen mit lokaler Erwärmung als stoffanhäufende Vorformverfahren [LAN77]

## 4.1.4 Gesenkgebundene Verfahren zur Vorformung

### 4.1.4.1 Formrecken und Formstauchen

*Formrecken* (Bild 4.4, oben) und *Formstauchen* (Bild 4.4, unten) gehören zu den Verfahren des Gesenkformens mit teilweise umschlossenem Gesenk. Die Verfahren werden eingesetzt, um ein Stoffverdrängen, überwiegend in Richtung der Bauteillängsachse, zu erzielen.

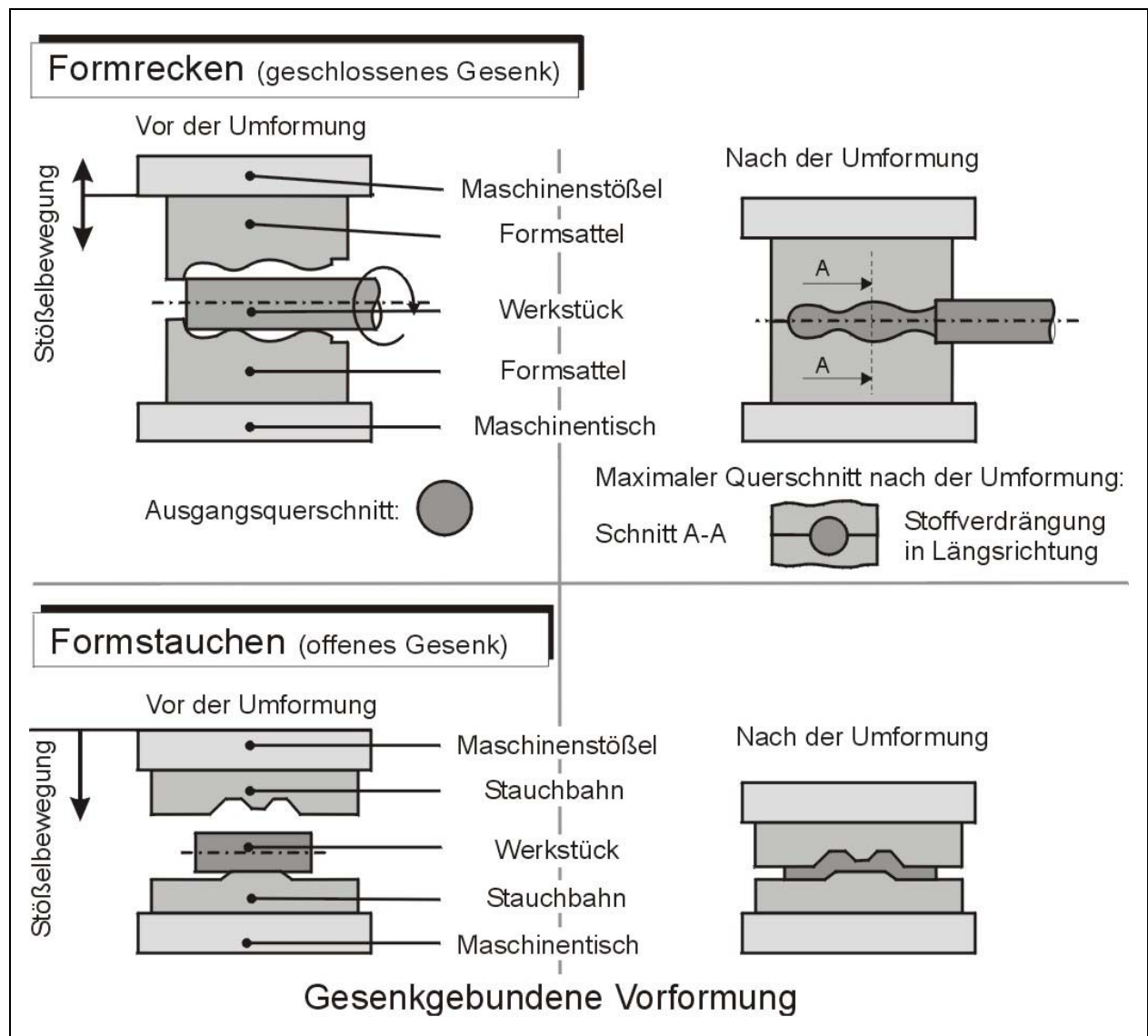


Bild 4.4: Formrecken und Formstauchen als stoffverdrängende Vorformverfahren [LAN77]

Formrecken ist Recken zwischen Formsätteln unter ständigem Drehen des Werkstücks um seine Längsachse. Im Vergleich zum Recken und Breiten als Freiformverfahren stellt die Masseverteilung durch Formrecken aufgrund der formgebenden Werkzeuge ein Verfahren dar, mit dem Vorformen erheblich einfacher und reproduzierbarer hergestellt werden können.

Formstauchen ist ein gratloses Stauchen zwischen Werkzeugen, die das Rohteil teilweise oder ganz umschließen. Im Gegensatz zum Formrecken findet keine Drehung des Werkstücks zwischen den einzelnen Umformungen statt [LAN77].

#### 4.1.4.2 Anstauchen im Gesenk

*Anstauchen im Gesenk* (Bild 4.5) gehört zu den Verfahren des Gesenkformens mit teilweise umschlossenem Gesenk und ermöglicht eine örtliche Stoffanhäufung. Dabei wird das Werkstück in formgebenden Werkzeugen, die das Rohteil teilweise oder ganz umschließen, gratlos gestaucht.

Hinsichtlich Schlankheitsgrad und Formenspektrum des Ausgangsmaterials gelten für das Anstauchen im Gesenk die Verfahrensgrenzen analog zum Stauchen (vgl. Bild 4.3) [LAN77].

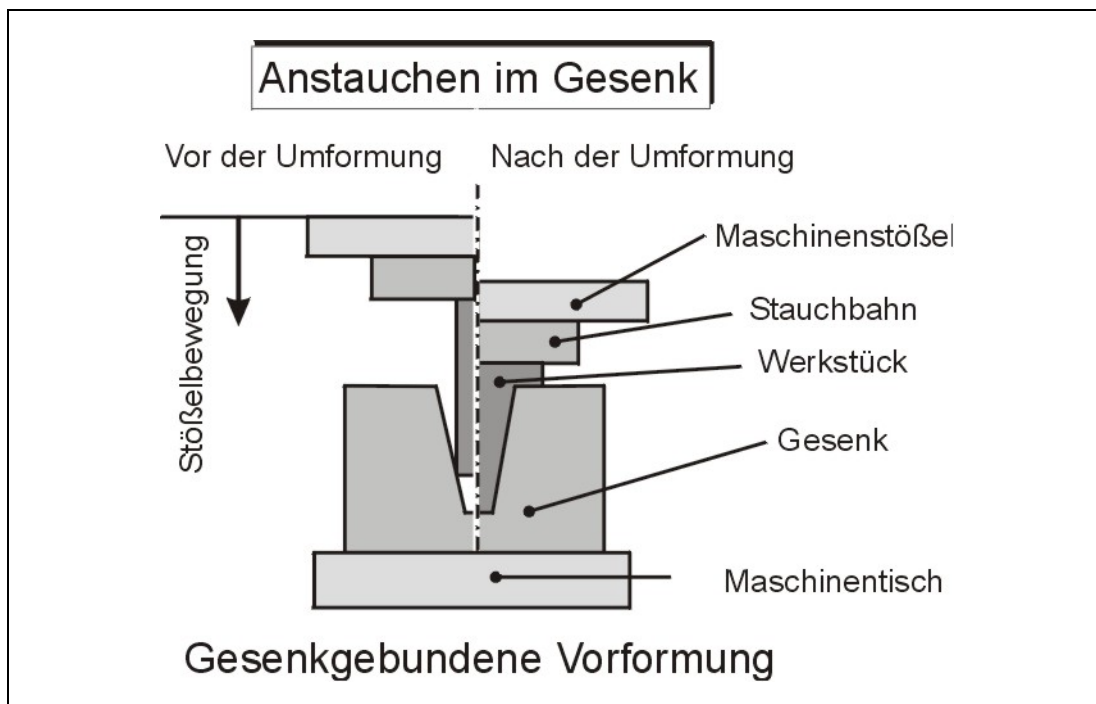


Bild 4.5: Anstauchen im Gesenk als stoffanhäufendes Vorformverfahren [LAN77]

#### 4.1.4.3 Reckstauchen

Das *Reckstauchen*, auch Rollen genannt (Bild 4.6), gehört zu den Verfahren mit teilweise umschlossenem Gesenk und ermöglicht eine Stoffverdrängung bei einer gleichzeitig geringfügigen Stoffanhäufung an benachbarten Stellen eines Werkstücks. Während beim Formstauchen überwiegend ein Stoffverdrängen in Richtung der Werkstücklängsachse stattfindet, erfolgt beim Reckstauchen darüber hinaus auch eine



Stoffanhäufung. Dies führt dazu, dass beim Recksstauchen der Bauteilquerschnitt der Zwischenform in bestimmten Bereichen größer ist als der der Ausgangsform.

Der Vorgang wird auf schnellschlagenden Hämmern u. U. auch in Exzenterpressen ausgeführt, wobei das Werkstück nach jedem Schlag um 90° gedreht wird [LAN77].

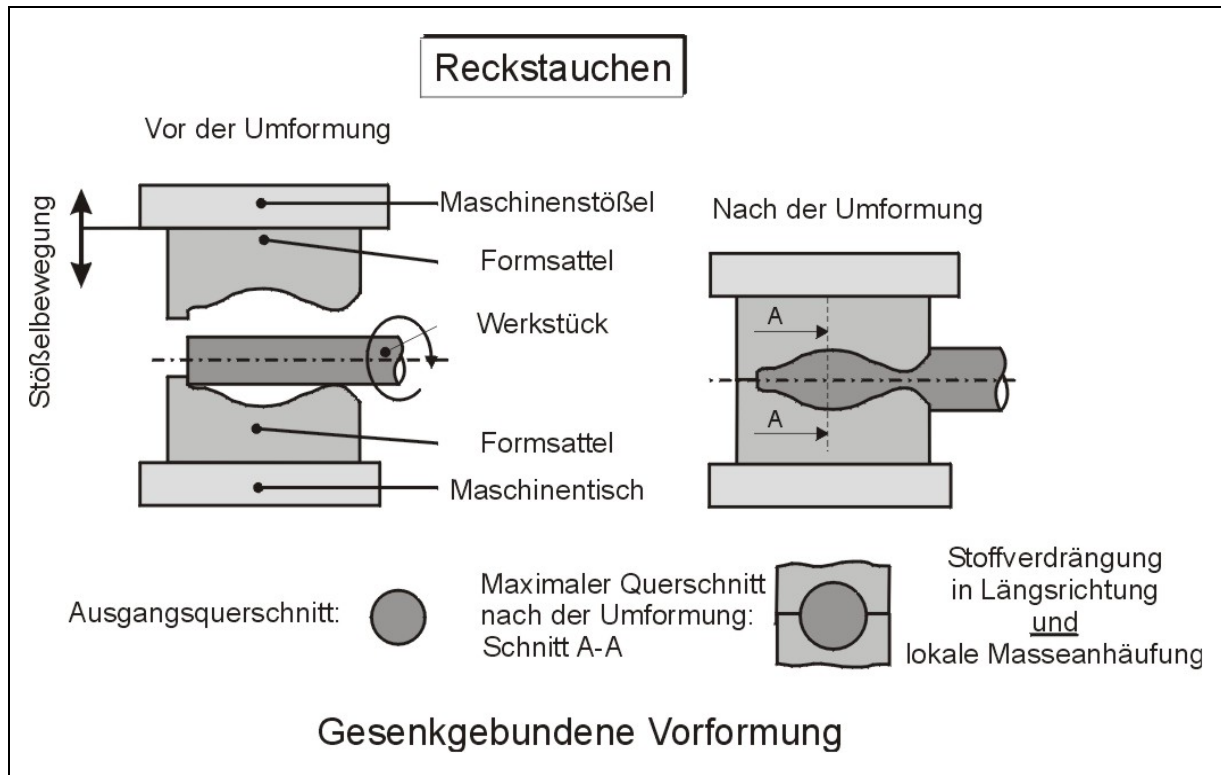


Bild 4.6: Reckstauchen als stoffanhäufendes und -verdrängendes Vorformverfahren [LAN77]

#### 4.1.5 Walzverfahren zur Vorformung

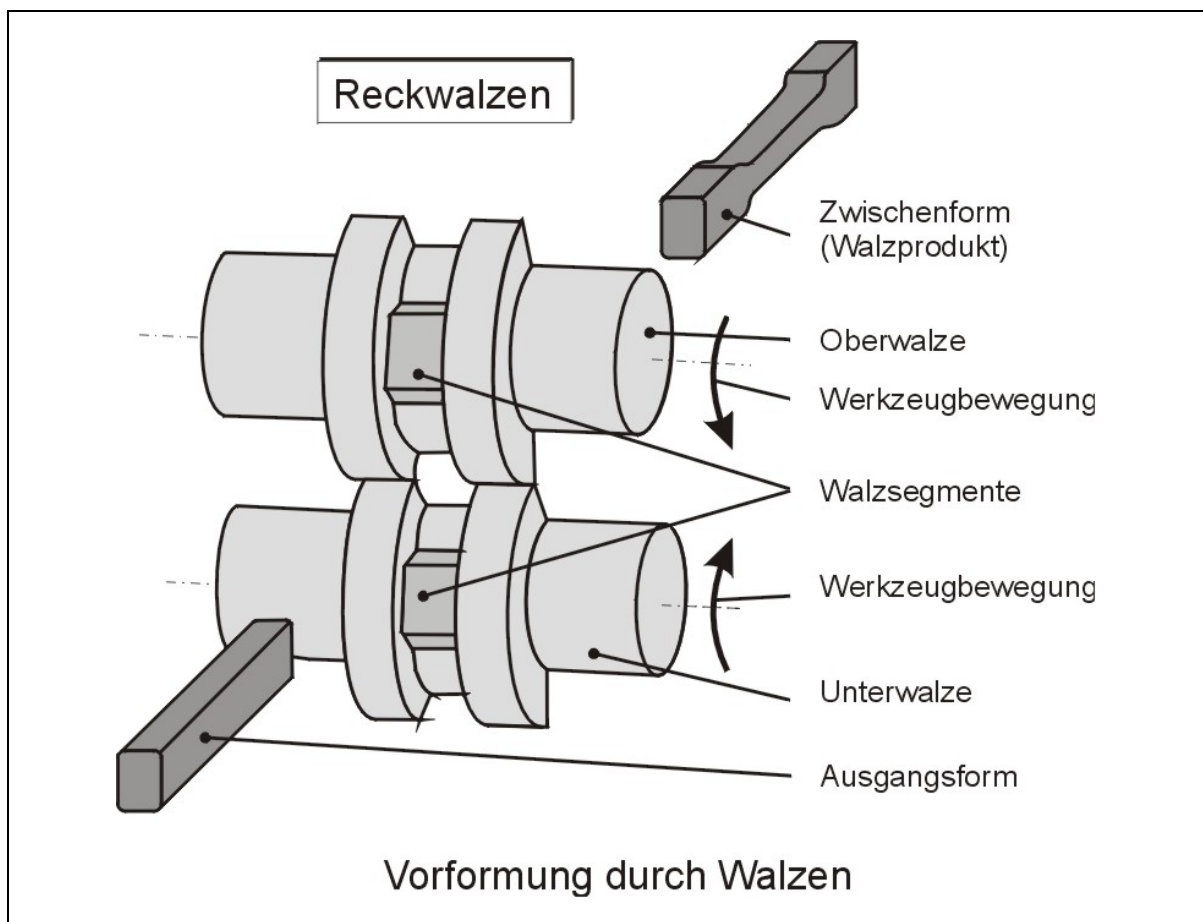
Die zuvor erläuterten Verfahren der gesenkungebundenen (Freiformen) und gesenkgebundenen Vorformverfahren werden aufgrund der geringen Mengenleistung hauptsächlich in der Klein- und Mittelserienfertigung eingesetzt. Im Bereich der Großserienfertigung werden zur Vorformung vornehmlich die Walzverfahren Reck- und Querwalzen eingesetzt. Aufgrund der kapitalintensiven Maschinen und Werkzeuge erfordert der wirtschaftliche Einsatz dieser Verfahren jedoch hohe Stückzahlen einer Großserienfertigung [BAC93, HER97a, HER97b].

##### 4.1.5.1 Reckwalzen

Das *Reckwalzen* (Bild 4.7) stellt ein weit verbreitetes Fertigungsverfahren zur Masseverteilung in der Großserienfertigung dar. Als stoffverdrängendes Vorformverfahren ist es grob vergleichbar mit dem Freiformschmieden, d.h. die Stoffverdrängung erfolgt



mit Werkzeugen, die nur teilweisen Formenzwang auf das umzuformende Material ausüben [DAI98, HER97a, HER97b, SPI57, SPI59].



*Bild 4.7: Werkzeugprinzip des Reckwalzens als stoffverdrängendes Vorformverfahren [nach SPI59]*

Reckwalzen dient dem Strecken von Ausgangsformen mit ausgeprägter Längsachse. Der Umformprozess ist ein Längswalzen in Walzwerkzeugen, deren Profil sich in Umfangsrichtung ändert. Im Gegensatz zum Querwalzen (vgl. Bild 4.8) liegt die Drehrichtung/-ebene der Walzen parallel zur Längsachse des Werkstücks. Das Reckwalzen kann alternativ im Rück- oder Durchlaufverfahren erfolgen. Für die bei der Herstellung von Zwischenformen üblichen Bauteillängen wird überwiegend das Rücklaufverfahren eingesetzt [CZE01, DAI98, SPI57, SPI59].

Die Gesamtumformung erfolgt in mehreren Schritten, den sog. Stichen. Zwischen den Stichen erfolgt eine Drehung des Werkstücks. Die übliche Anzahl der Walzstiche liegt zwischen 1 und 6. Die zur Materialverdrängung erforderlichen Werkzeuge der einzelnen Stiche (Umformstufen) sind als Segmente nebeneinander auf den Walzen angebracht. Herstellbar sind kreisförmige, ovale, quadratische, rechteckige oder rautenförmige Querschnitte mit stetigen und/oder sprunghaften Querschnittsänderungen. Erreichbare Querschnittsverhältnisse in einem Stich liegen i.d.R. bei  $A_n/A_{n+1} = 1,2 \dots 1,6$  ( $A_n$  := Fläche vor dem Walzstich,  $A_{n+1}$  := Fläche nach dem Walzstich) [SPI57, SPI59].

#### 4.1.5.2 Querwalzen

Das *Querwalzen* oder *Querkeilwalzen* (Bild 4.8) ist ein Verfahren zum Druckumformen von rotationssymmetrischen Rohteilen zwischen gegenläufig bewegten Walzwerkzeugen, die sich auf der Oberfläche des Werkstücks abwälzen.

Dabei werden wellenartige Ausgangsformen zwischen Flachbacken oder zwischen zwei bzw. drei Rundbacken geformt, deren Rotationsachsen mit der Werkstückachse parallel sind. Dazu greifen zwei keilförmige Werkzeuge gegenläufig in das Werkstück ein und erzeugen entsprechend der Werkzeugauslegung eine abgestufte Kontur. Durch den Werkzeugeingriff wird die Ausgangsform in Drehung versetzt. Die örtlichen Durchmesserreduzierungen werden durch radiales Einstechen bei axialem Werkstofffluss erzeugt [BAC93, ELS97, HER01, UMB95].

Beim Querwalzen kommen grundsätzlich zwei Verfahrensvarianten zur Anwendung:

- das Prinzip des Flachbacken-Querwalzens (Bild 4.8, links) und
- das Prinzip des Rundbacken-Querwalzens (Bild 4.8, rechts).

Aufgrund der überwiegenden Vorteile des Rundbacken-Querwalzens, insbesondere hinsichtlich der besseren Möglichkeit zur Automatisierung, ist dieses Prinzip industriell häufiger vertreten als das Flachbacken-Querwalzen.

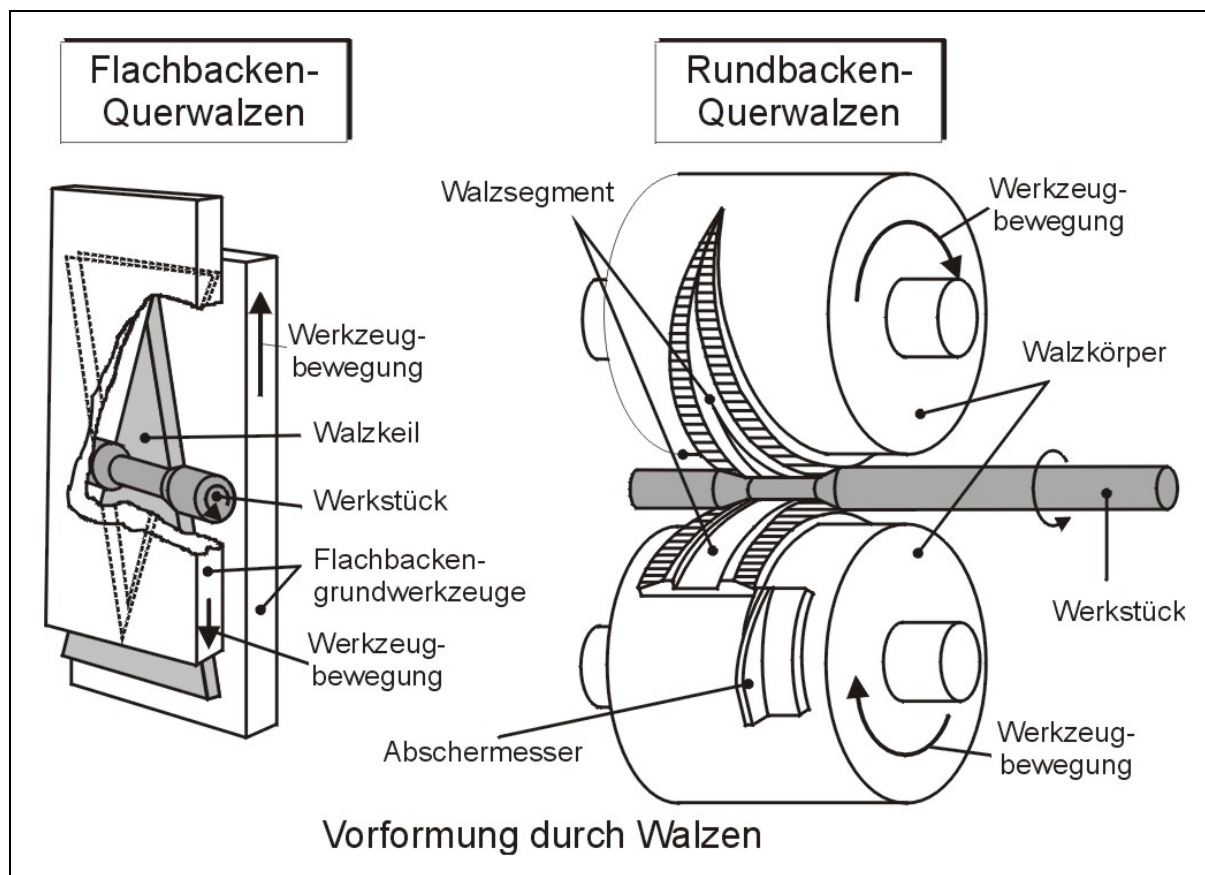


Bild 4.8: Werkzeugprinzipien zum Querwalzen als stoffverdrängende und stoffanhäufende Vorformverfahren [BAC93, ELS97, HER01, UMB95]

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der Verfahrensvarianten des Querwalzens.

	Vorteile	Nachteile
<b>Prinzip des Flachbacken-Querwalzens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfachere Werkzeuggestaltung und -auslegung</li> <li>• geringere Werkzeugkosten</li> <li>• höhere Prozesssicherheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringere Taktzeit durch umformfreien Rückhub</li> <li>• größere Maschinen bei gleichen Werkstückabmessungen</li> <li>• keine Verstellmöglichkeit des Walzbackenabstandes zum Ausgleich von Verschleiß an den formgebenden Keilen</li> </ul>
<b>Prinzip des Rundbacken-Querwalzens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höhere Taktzeit und damit größere Produktivität</li> <li>• kleinere Maschinen bei gleichen Werkstückabmessungen</li> <li>• Verstellmöglichkeit des Walzenabstandes (Nachsetzen) zum Ausgleich von Verschleiß an den formgebenden Keilen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Komplizierte Werkzeugauslegung</li> <li>• Höherer Aufwand bei der Werkzeugfertigung</li> </ul>

*Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile der Verfahrensvarianten des Querwalzens [BAC93, HER01, HER02, KOL95, LEI96, NEU99]*

Die Verfahrensgrenze des Querwalzens ist die Durchmesserreduzierung, die zwischen 16 und 58 % liegt. Besondere Werkzeugkonstruktionen erlauben Reduzierungen bis zu 75 %. Durch Aufwalzungen sind Durchmessererhöhungen von bis zu 13 % realisierbar [CLA95, HER02, KOL95, LEI96, NEU99, UMB95].

Die Vorteile der Verfahren liegen in folgenden Bereichen [BAC93, CHU00, ELS97, HER97b, HER02, LAN00, LEI96, MCD89, REN98]:

- hohe Form- und Lagegenauigkeit der Zwischenform,
- hohe Standmenge der Werkzeuge,
- Möglichkeit zur Integration in automatisierte Fertigungsabläufe sowie
- Umweltfreundlichkeit (kein Schmiermittel erforderlich).

Das Anwendungsspektrum des Querwalzens reicht von Zwischenformen für das anschließende Gesenkschmieden über Endformen, die abschließend lediglich noch spanabhebend zu bearbeiten sind, bis hin zu Fertigformen, bei denen es keiner weiteren Bearbeitung bedarf. Beispiele für Vorformteile sind Pleuel- und Doppelstangen, Querlenker, Nocken- und Kurbelwellen. Aufgrund der gut einstellbaren Masseverteilung eignet sich das Querwalzen für die Herstellung von Vorformen insbesondere für das Präzisionsschmieden [CHU00, CLA95, BAC93, HER01, NEU99, REN98, REN00]. Beispiel für eine Anwendung als Fertigformverfahren ist die Herstellung von Getriebewellen [HER01, HIR95, KOL95, LEI96, MEI93].

#### 4.1.5.3 Axial-Vorschub-Querwalzen

Das *Axial-Vorschub-Querwalzen* (Bild 4.9) ermöglicht eine flexible Vorformung für verschiedene Bauteile. Das Verfahrensprinzip basiert auf dem Querwalzen. Im Gegensatz zum Querwalzen erfolgt zusätzlich eine axiale Werkstückbewegung.

Die Flexibilität basiert auf der Möglichkeit zur axialen Werkstückbewegung bei gleichzeitig radialer Walzenzustellung. Durch eine geeignete Überlagerung dieser Bewegungen sind mit einem Walzensatz verschieden abgesetzte, rotationssymmetrische Werkstücke selbst mit kegeligen Übergängen realisierbar [EBE91, ROT97].

Beim Axial-Vorschub-Querwalzen wird ein rotationssymmetrisches Werkstück zwischen zwei oder drei gleichsinnig angetriebenen Walzen eingebracht. Die Drehbewegung ergibt sich nach Zustellung der radialen Walzen durch Reibungsschluss. Nach weiterer radialer Zustellung dringt das Walzwerkzeug in das Werkstück ein. Durch die Axialbewegung des Werkstücks kommt es zu einem Auswalzen. Wird während der Umformung die radiale Zustellung der Walzen verändert, entstehen kegelige Übergänge. Sprunghafte Absätze lassen sich durch Unterbrechung der axialen Vorschubbewegung bei gleichzeitig radialer Zustellung herstellen.

Hauptsächlich wird dieses Verfahren zur Herstellung von abgesetzten, rotationssymmetrischen Langformen eingesetzt. Da sich das Verfahren noch in der Erprobung befindet, sind industriell abgesicherte Verfahrensgrenzen noch nicht verfügbar.

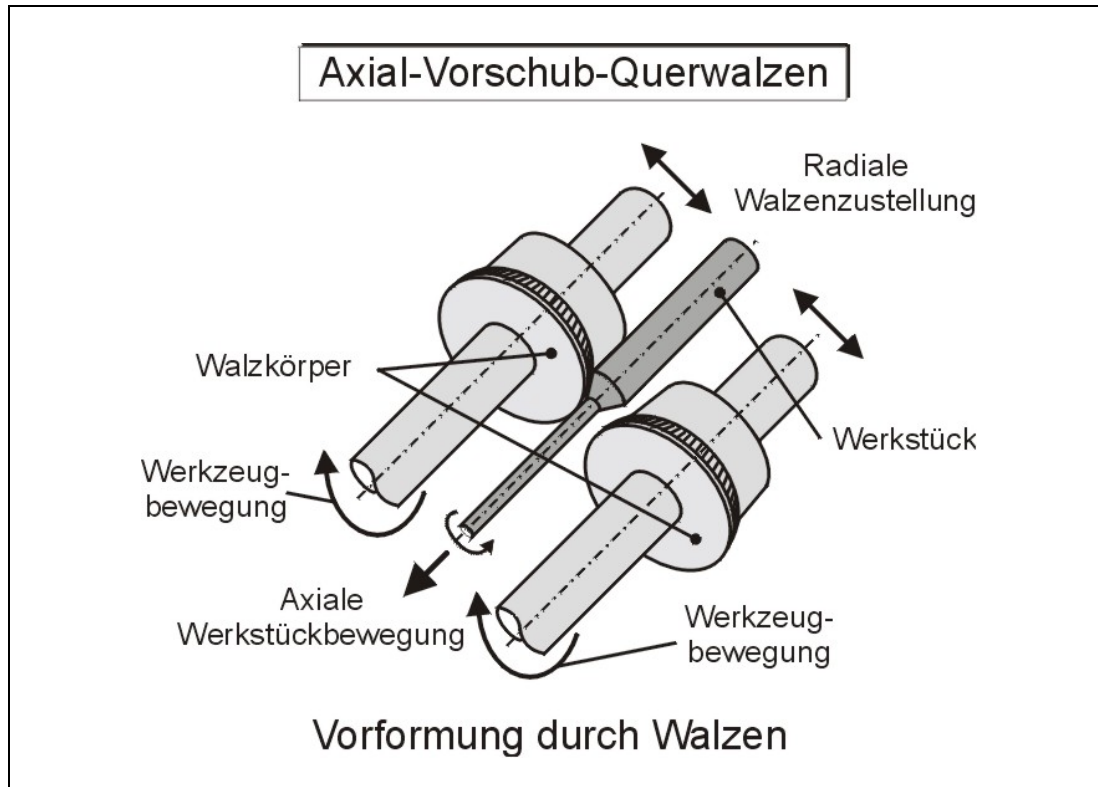


Bild 4.9: Prinzip des Axial-Vorschub-Querwalzens als stoffverdrängendes Vorformverfahren [EBE91]

## 4.1.6 Knetverfahren zur Vorformung

### 4.1.6.1 Rundkneten

Das *Rundkneten* (Bild 4.10) stellt ein Verfahren zur Querschnittsverminderung (Reduzierung) an Stäben und Rohren dar. Es handelt sich um ein inkrementelles Umformverfahren, bei dem die Umformung in Einzelschritten erfolgt. Dazu wird die Ausgangsform mit Hilfe von zwei bis acht gleichzeitig radial auf den Werkstückumfang wirkenden Werkzeugen (Knetbacken) gereckt. Der zu vermindern Querschnitt wird ganz oder zumindest teilweise von den Werkzeugen umschlossen, die relativ zum Werkstück umlaufen.

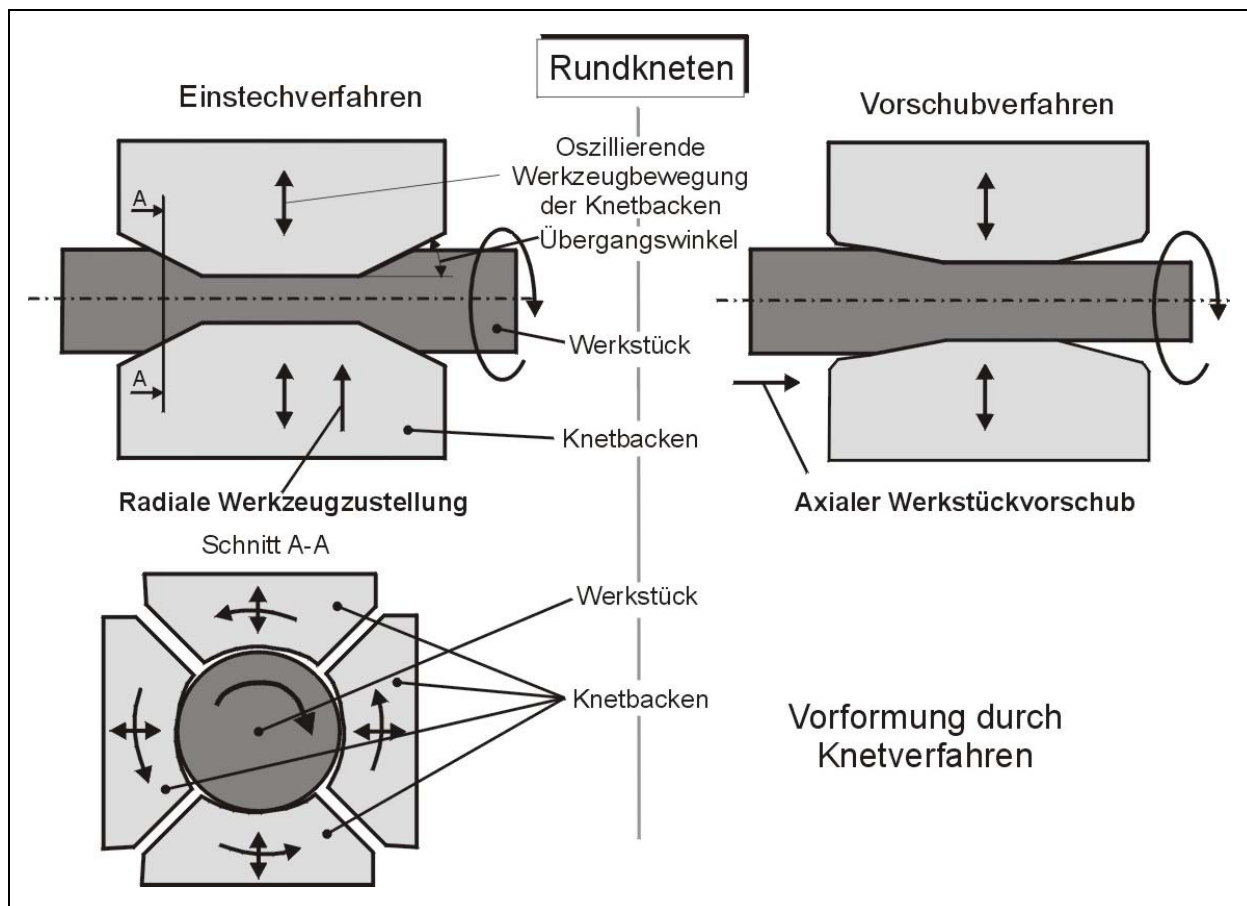


Bild 4.10: Prinzip des Rundknetverfahrens als stoffverdrängendes Vorformverfahren [MÜL97]

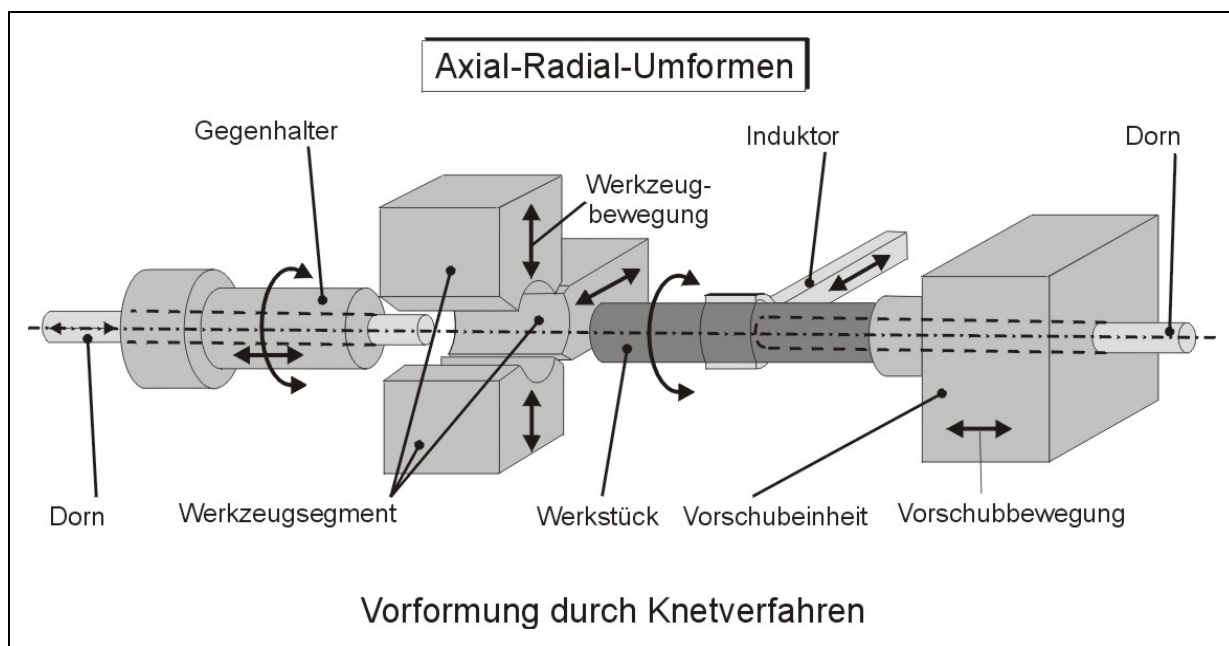
Es wird zwischen dem Vorschub- und dem Einstechverfahren unterschieden. Beim Vorschubrundkneten wird das Werkstück kontinuierlich in axialer Richtung durch oszillierende Werkzeuge bewegt, die abgesehen von der Oszillationsbewegung keine Radialbewegung durchführen. Im Gegensatz dazu ist das Prinzip des Einstechverfahrens durch eine zusätzlich überlagerte radiale Werkzeugzustellung gekennzeichnet und ermöglicht hohe Querschnittsreduzierungen bei Übergangswinkeln bis zu 90 Grad [LAN77, MÜL97, SIE97].

Um zu verhindern, dass Werkstoff in die Spalte zwischen den Knetbacken fließt, müssen sich Werkstück und Werkzeuge relativ zueinander drehen. Zusätzlich muss der Umformvorgang mit einer besonderen Schmierung versehen werden, um eine Gratbildung, an den entstehenden Spalten zu vermeiden, welche die Verfahrensgrenze des Rundknetens darstellt.

Der Bearbeitungsablauf, der mehrere Aufspannungen und wiederholtes Erwärmen erfordert, führt zu langen Bearbeitungszeiten. Die Verfahren des Rundknetens sind daher, auch aufgrund der kostenintensiven Maschinen, überwiegend Spezialanwendungen vorbehalten. Typische Anwendungen sind das Reduzieren von Querschnitten an Stäben und Rohren, die Herstellung von drehmomentübertragenden Wellen, von hochwertigen Speichen und Naben der Fahrradindustrie sowie Zwischenformen für Turbinenschaufeln. Mit Hilfe eines Innendorns ist die Herstellung von Hohlprofilen ebenfalls möglich [LAN00, MEI93, SIE97].

#### 4.1.6.2 Axial-Radial-Umformen

Eng mit dem Verfahren des Rundknetens verwandt ist das *Axial-Radial-Umformen*, auch *Stauchkneten* genannt (Bild 4.11). Mit diesem Verfahren lassen sich durch Kombination von axialem Stauchen und radialem Schmieden an Rohren partielle Stoffanhäufungen in Form von Wandverdickungen anbringen. Diese können axial jede beliebige Position einnehmen und sowohl in Richtung Rohrmitte als auch nach Außen erfolgen. Anwendungsgebiete sind Verdickungen an Hohlbauteilen zum Anwalzen von Verzahnungen, Anbringen von Gewinden oder zur Verstärkung von kritischen Durchmesserübergängen. Die verfahrensbedingt langen Bearbeitungszeiten führen dazu, dass der Anwendungsbereich auch für dieses Verfahren eher bei kleinen Losgrößen liegt [GRO01, LAN00, MÜL96, SCH91].



*Bild 4.11: Prinzip des Axial-Radial-Umformens als stoffverdrängendes Vorformverfahren, z.B. für Rohrabschnitte [MÜL97]*



### 4.1.7 Spalten als Sonderverfahren zur Vorformung

Ein Sonderverfahren der Masseverteilung, das in der Massivumformung traditionell erfolgreich eingesetzt wird, ist das Scherschneidverfahren *Spalten* (Bild 4.12). Die Zwischenform wird hier direkt vom Stangenmaterial oder aus dem gewalzten Band mit Hilfe eines Formschnittes verlustlos abgeschnitten. Das Material wird dabei senkrecht zur Werkzeugbewegung vorgeschoben [HAA64].

Wesentliche Vorteile des Verfahrens liegen in den geringen Investitionskosten für Werkzeug und Maschine, der hohen Produktivität sowie der Möglichkeit, das Spaltstück ohne Materialabfall herzustellen. Nachteilig wirkt sich aus, dass ein verlustfreies Abschneiden der Zwischenform bestimmte Breiten des Ausgangsmaterials erfordert. Werden zur Herstellung einer optimalen Zwischenform Sondermaße in der Breite des Ausgangsmaterials erforderlich, erhöhen sich die Kosten für das erforderliche Halbzeug.

Mit diesem Verfahren lassen sich stark unterschiedliche Werkstoffverteilungen erzielen. Anwendung findet dieses Verfahren hauptsächlich bei der Herstellung flacher Massenteile, z.B. Messer, Scheren, Zangen, Schraubenschlüssel [BRO77, HAA64, SCH00].

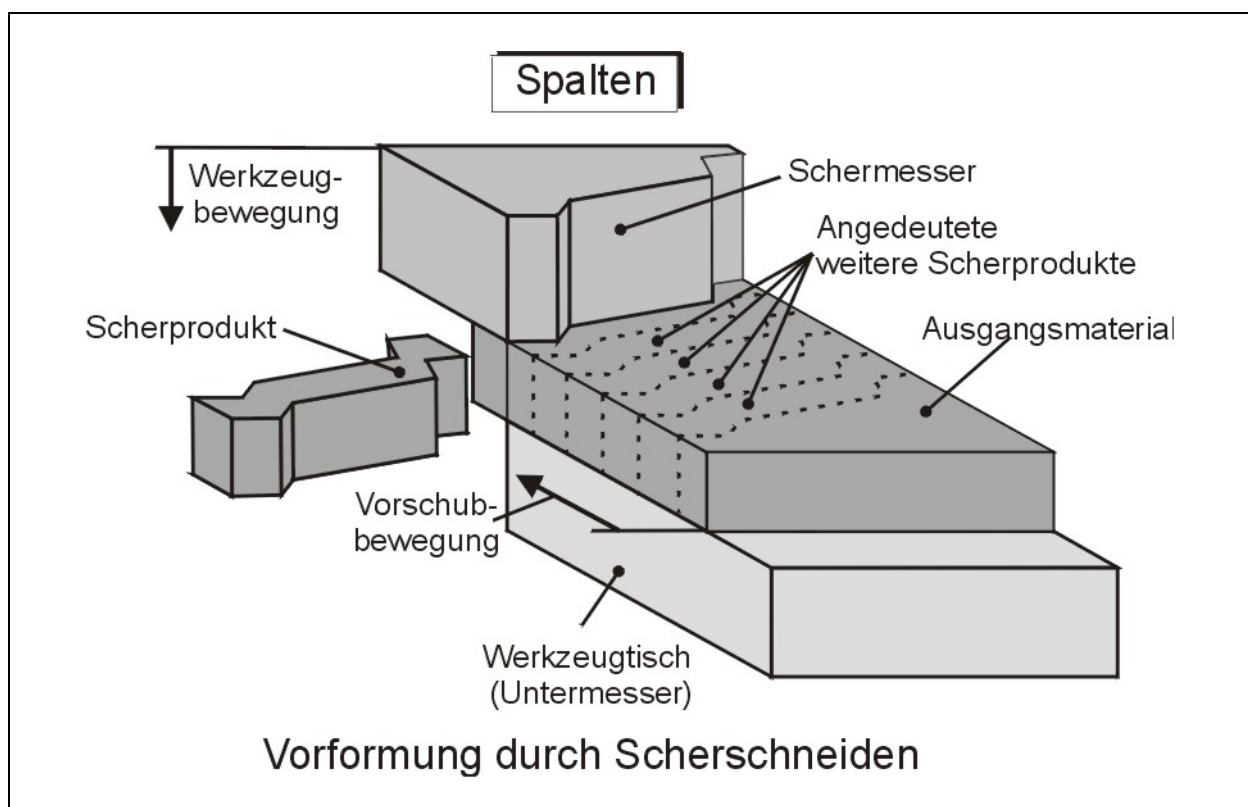


Bild 4.12: Herstellung von Zwischenformen durch Spalten [nach HAA64]

## 4.2 Schmiedewerkzeuge mit mehrfach wirkenden Umformstempeln

Im Folgenden werden Werkzeugkonzepte mit mehrfach wirkenden Umformstempeln vorgestellt, da das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorformwerkzeug für das Präzisionsschmieden von Langteilen ebenfalls die Umformung mit mehrdirektional wirkenden Umformstempeln vorsieht (vgl. Bild 6.1).

### 4.2.1.1 Verfahren zum Schmieden von Pkw-Gangrädern mit Hinterschnitt

Dreyer [DRE02] hat ein Verfahren zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern entwickelt (Bild 4.13). Das Verfahren basiert auf einem zweistufigen Umformprozess aus einer Umformwärme. In der ersten Umformstufe wird das Gangrad bis auf die Hinterschneidung im Bereich der Kupplungsverzahnung geschmiedet. Hierzu wird ein Werkzeugsystem verwendet, das auf dem in Bild 2.6 vorgestellten Werkzeugsystem basiert. Der Hinterschnitt wird in der zweiten Umformstufe durch ein modular aufgebautes Werkzeug eingebracht. Dazu werden sogenannte Schieber genutzt. Der Antrieb der Schieber erfolgt über Keile, die eine Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung in eine radiale Umformbewegung bewirken. Mit dem Eindringen der Schieber wird der Hinterschnitt lokal begrenzt in das Werkstück eingebracht, so dass nur Material aus dem Bereich der Hinterschneidungen verdrängt wird [DOE01, DRE02].

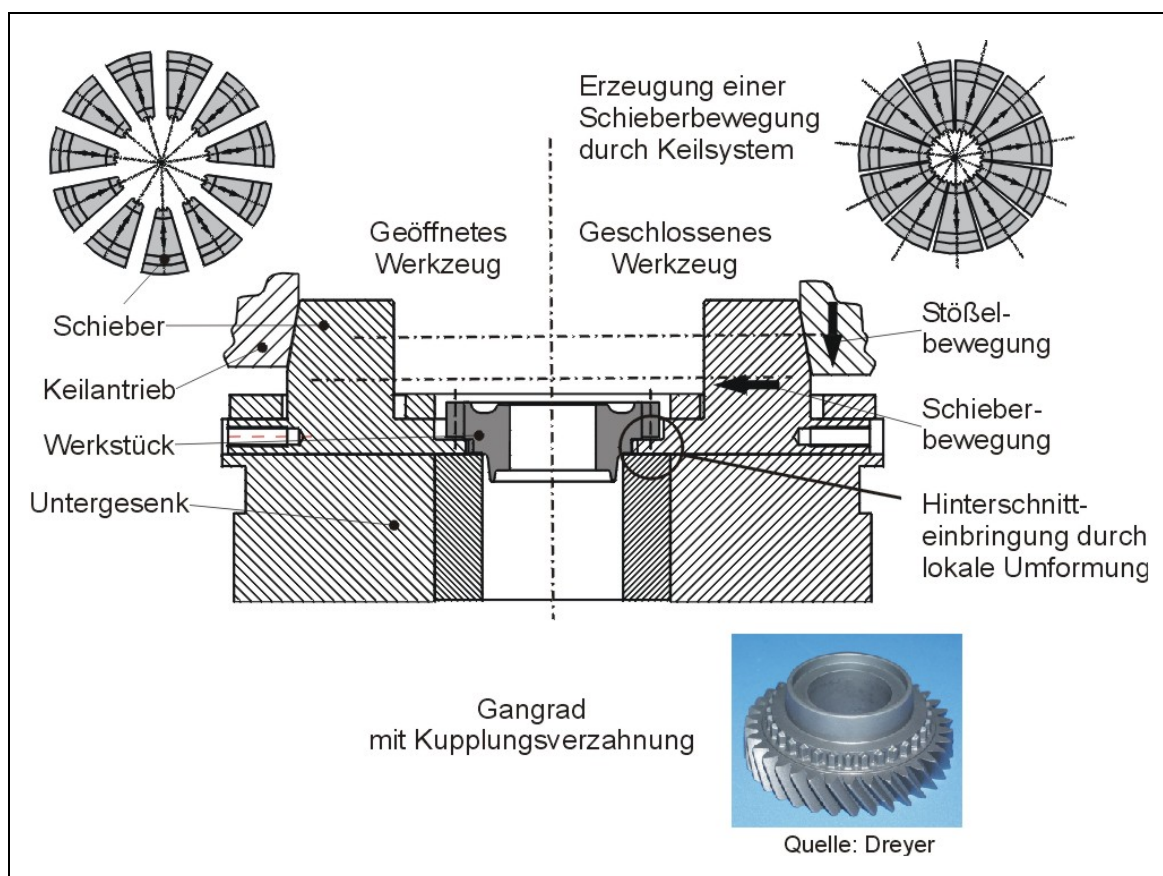


Bild 4.13: Werkzeugsystem zur Hinterschnitterzeugung bei Pkw-Gangrädern [DRE02]



#### 4.2.1.2 Verfahren zum Schmieden eines Gleichlaufgelenks mit Hinterschnitt

Wiesner [WIE96] hat ein Verfahren zum Präzisionsschmieden von hinterschnittenen Gleichlaufgelenkkörpern entwickelt (Bild 4.14). Im Vordergrund steht dabei die schmiedetechnische Fertigung des Hinterschnitts in den Kugel- und Käfiglaufbahnen des Gelenkkörpers. Das Verfahren sieht einen dreistufigen Umformprozess vor. Nach einem Fließpressprozess wird die Werkstückglocke in der zweiten Umformstufe bis auf den Hinterschnitt ausgeformt. In der dritten Umformstufe wird über eine spezielle Spreiztechnik der innere Hinterschnitt im Werkstück angebracht.

Das Verfahren zeigt, dass die Fertigung von Hinterschnitten durch spezielle Werkzeugkonstruktionen möglich ist. Die Realisierbarkeit von Hinterschnitten ist jedoch für jeden Anwendungsfall zu prüfen [DOE96b].

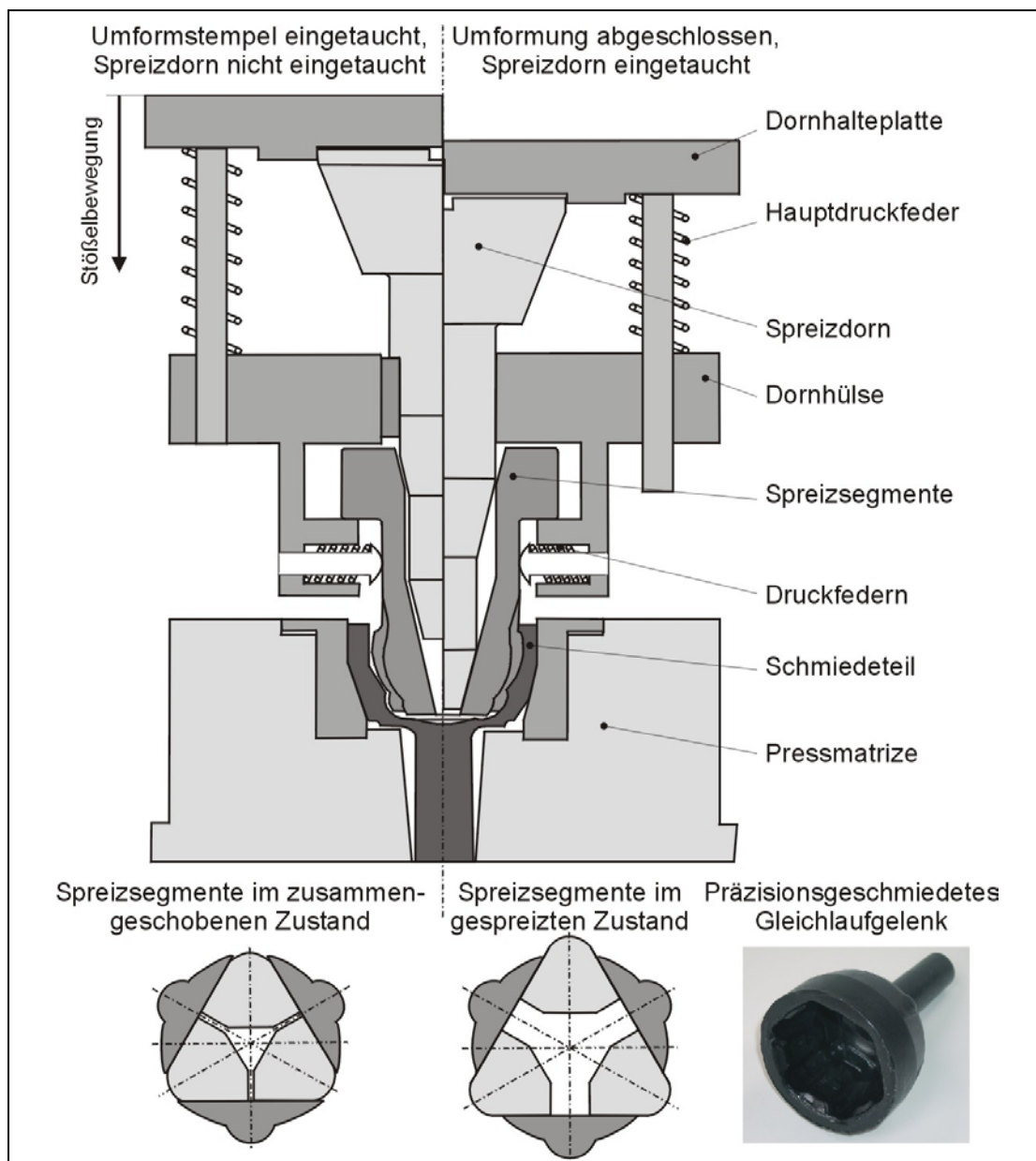


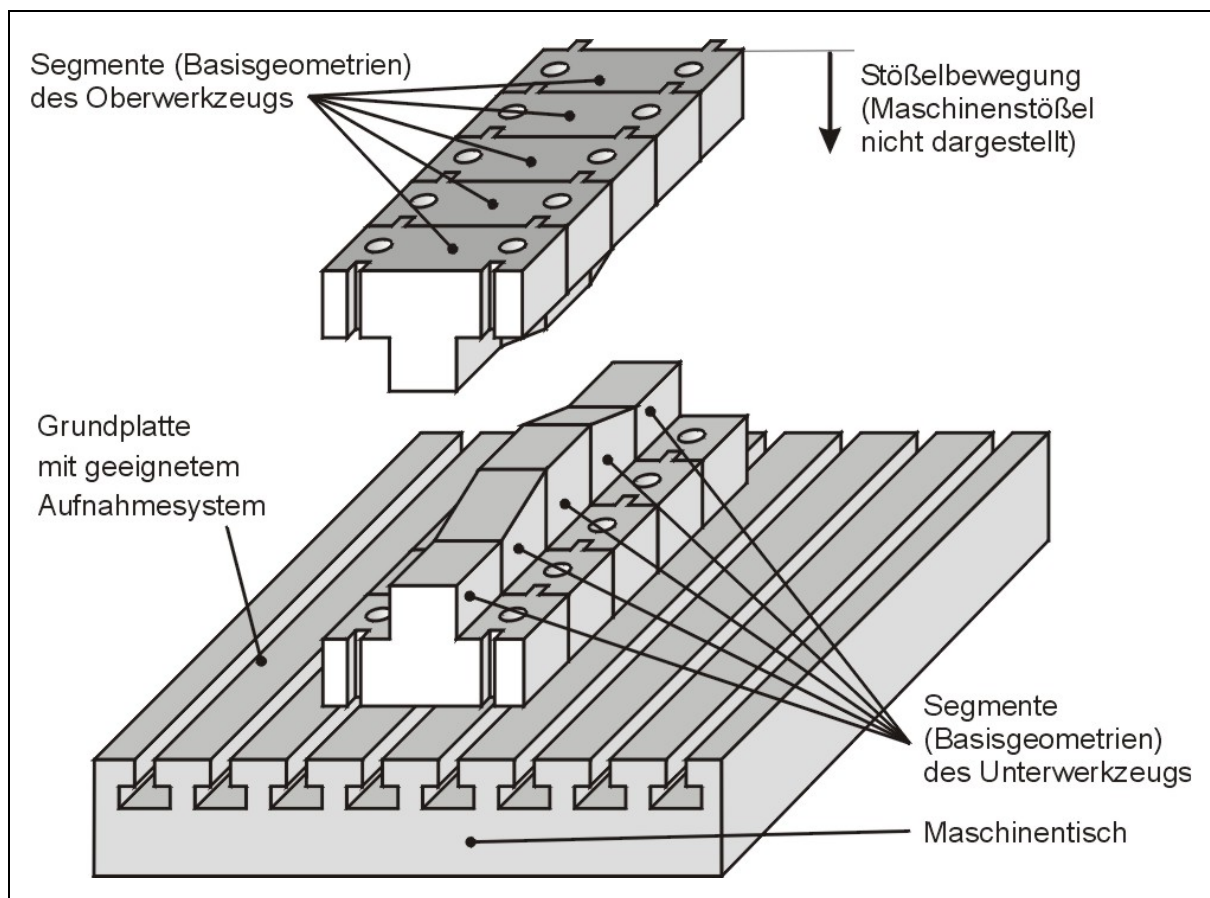
Bild 4.14: Werkzeugprinzip zum Präzisionsschmieden hinterschnittener Gleichlaufgelenke (3. Umformstufe) [WIE96]

## 5. Entwicklung eines Konzepts zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen

Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung und Erprobung eines Konzepts zur flexiblen Vorformung. Aufbauend auf einer Vorstellung des Grundkonzepts werden zunächst die Anforderungen an das Vorformkonzept dargestellt. Im Anschluss daran werden Teillösungen für einzelne Funktionen vorgestellt und bewertet. An die Konstruktion schließt sich die Erprobung des Werkzeugsystems an, mit der die grundsätzliche Anwendbarkeit des erarbeiteten Vorformkonzepts nachgewiesen wird.

### 5.1 Grundkonzept der flexiblen Vorformung

Das grundlegende Konzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen zeigt Bild 5.1. Ziel ist es, mit einer geringen Anzahl von Segmenten die Vorformung von mehreren Bauteilen einer Teilefamilie zu ermöglichen und somit die Flexibilität zu erhöhen und den Aufwand zur Herstellung von Vorformwerkzeugen zu reduzieren. Die Anordnung der Segmente erfolgt in einem geeigneten Spannsystem, das eine einfache und sichere Befestigung, Ausrichtung sowie Verspannung der Segmente gewährleistet.



*Bild 5.1: Grundkonzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen*

Das Werkzeugkonzept sieht dabei segmentierte Stauchbahnen wie beim Form- oder Reckstauchen (vgl. Bild 4.4) vor. In Abhängigkeit der Schmiedeteilgeometrie werden die Segmente so zusammengesetzt, dass die erforderliche Masseverteilung ggf. in mehreren Schritten erreicht wird.

Hauptanforderung an das Konzept der flexiblen Vorformung ist die Vermeidung einer Stirngratbildung an den Teilungsfugen zwischen den Segmenten. Öffnet sich eine Teilungsfuge während der Umformung, entsteht ein Spalt, in den Material eindringen kann. Ein so entstehender Stirngrat muss unbedingt vermieden werden, da er Schmiedefehler in der nachfolgenden Umformstufe hervorrufen kann. Durch eine geeignete Verspannung der Segmente untereinander muss daher sichergestellt werden, dass eine Öffnung der Teilungsfugen zwischen den Segmenten ausgeschlossen wird.

## 5.2 Vorgehensweise bei der Konzeption und Entwicklung

Die Vorgehensweise bei der Konzeption und Entwicklung orientiert sich an der VDI Richtlinie 2221 [VDI86], die eine allgemein anwendbare Methode zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte zur Verfügung stellt. Der Konstruktionsprozess wird dabei in sieben generelle Arbeitsschritte (Tabelle 5.1) unterteilt, die je nach Aufgabenstellung und Komplexität vollständig oder nur teilweise durchlaufen werden.

Nr.	Arbeitsschritt (AS)	Kapitel	Arbeitsergebnis
1	Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung	5.3.1	Anforderungsliste
2	Ermittlung von Funktionen und deren Strukturen	5.3.2	Funktionsstruktur
3	Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	5.4	Prinzipielle Lösung
4	Gliederung in realisierbare Module		Modulare Struktur
5	Gestaltung maßgeblicher Module	5.4.1 u. 5.4.2	Vorentwürfe
6	Gestaltung des gesamten Produkts	5.4.3	Gesamtentwurf
7	Ausarbeitung der Ausführungs- u. Nutzungsangaben	7.1	Produktdokumentation

*Tabelle 5.1: Arbeitsschritte beim methodischen Konstruieren nach VDI 2221 [VDI86]*

Aufbauend auf einer Zusammenstellung der Anforderungen an das der flexiblen Vorformung (AS 1) werden, ausgehend von der Gesamtfunktion des Werkzeugs, Teilfunktionen abgeleitet (AS 2). Für die einzelnen Teilfunktionen werden Lösungsprinzipien vorgestellt und bewertet (AS 3 und 4). Die Konstruktion eines prototypischen Werkzeugs erfolgt anschließend auf Basis der bewerteten Lösungsprinzipien (AS 5 und 6).

## 5.3 Anforderungen und Funktionsstruktur

### 5.3.1 Anforderungen an das Konzept der flexiblen Vorformung

Ausgehend von dem in Kapitel 5.1 vorgestellten Grundkonzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen ergeben sich Anforderungen an das Vorformwerkzeug, die sich gemäß Arbeitsschritt 1 des methodischen Konstruierens in folgender Anforderungsliste zusammenfassen lassen:

- Möglichkeit zur Segmentierung der Stauchbahnen, um mit einem Grundwerkzeug durch Austausch von Segmenten Zwischenformen für verschiedene Bauteile einer Bauteilkategorie herstellen zu können,
- Standardisierung von Segmenten, um mit einer möglichst geringen Anzahl von Segmenttypen eine maximale Anzahl von verschiedenen Bauteilen einer Bauteilkategorie vorformen zu können,
- Realisierung eines Spannsystems, das eine Öffnung der Teilungsfugen und damit die Bildung von Spalten an den Teilungsfugen ausschließt sowie
- universeller Einsatz auf möglichst vielen Pressentypen.

### 5.3.2 Funktionsstruktur des Werkzeugsystems

Die Anforderungsliste sowie die geforderte Gesamtfunktion *modularer Aufbau zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen durch Austausch von Segmenten* führt zu einer Funktionsstruktur (AS 2) mit folgenden, wesentlichen Teilfunktionen für das Vorformwerkzeug:

- Abbildung der formbildenden Geometrie (Stauchbahnen) mit Segmenten einer Bausteinbibliothek,
- einfache und sichere Befestigung, Ausrichtung und Verspannung der Segmente in einem Spannsystem.

Wesentliche Funktion der *Segmente* ist es, in geeigneter Kombination entsprechende Stauchbahnen zu ersetzen, die konventionell zur Masseverteilung eingesetzt werden. Geeignet auszulegen sind dabei die *Grundform und der Querschnitt der Segmente* und die *Gestaltung der Segmentübergänge* (vgl. AS 4, Tabelle 5.1).

Die Teilfunktion *Spannsystem* muss eine *sichere Befestigung, Ausrichtung und Verspannung* der Segmente sowie eine *Befestigung der segmentierten Stauchbahnen in der Umformmaschine* gewährleisten (vgl. AS 4, Tabelle 5.1). Darüber hinaus ist zu prüfen, ob eine Höhenverstellung der Segmente zum Ausgleich von unterschiedlich verschlissenen Segmenten sinnvoll ist und in das Verspannsystem integriert werden kann.

Beide Teilfunktionen müssen sich dabei in der Weise ergänzen, dass eine Öffnung der Teilungsfugen zwischen den Segmenten verhindert wird, um Fehler in den nachgelagerten Umformstufen auszuschließen.

## 5.4 Konstruktion des flexiblen Vorformwerkzeugs

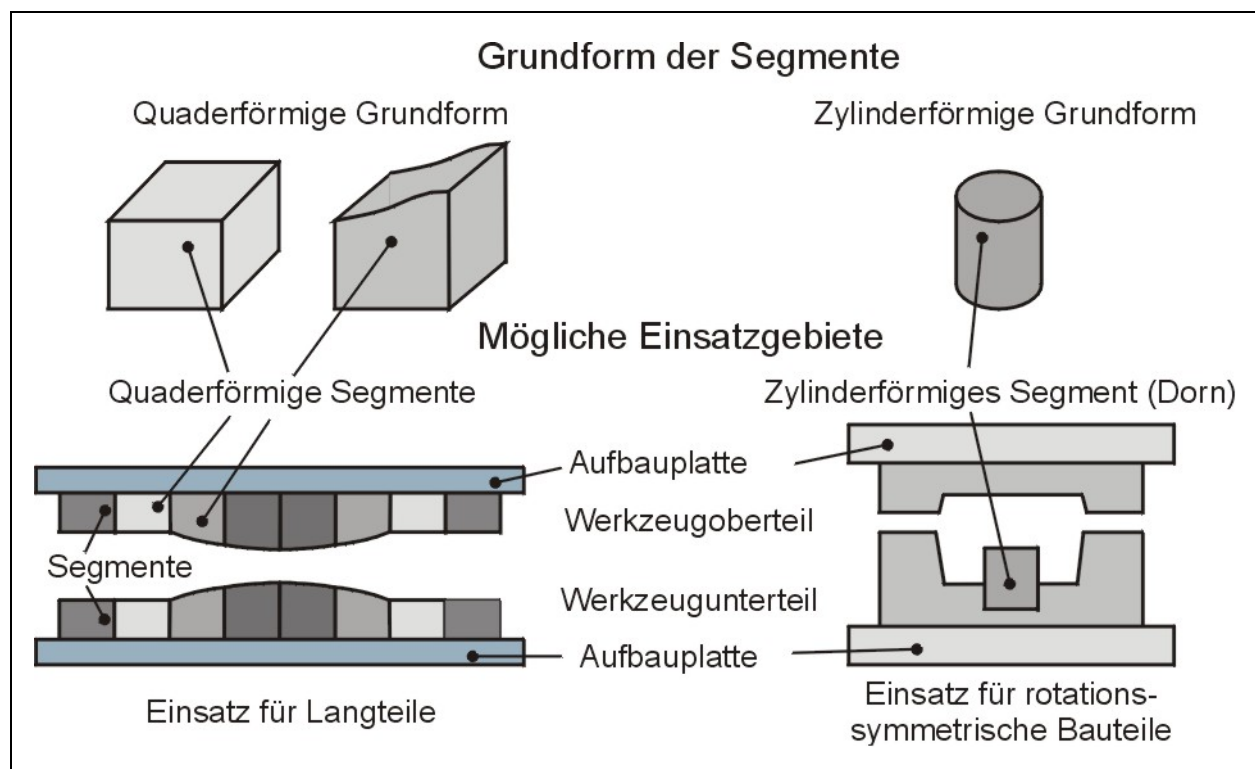
### 5.4.1 Segmentgestaltung

#### 5.4.1.1 Grundform der Segmente

Für die Grundform der Segmente kommen prinzipiell quader- oder zylinderförmige Geometrien in Betracht (Bild 5.2). Beide Grundformen lassen sich aus standardisierten Halbzeugen spanend herstellen.

Bei Gesenken für rotationssymmetrische Bauteile ist der Einsatz von Schrumpfverbänden, bei denen zylinderförmige Elemente, sogenannte Dorne, in ein Muttergesenk eingesetzt werden, Stand der Technik. Hier bietet sich der Vorteil, dass hochbelastete Gesenkbereiche einzeln ausgetauscht werden können. Darüber hinaus ist der Einsatz von besonders gehärteten oder beschichteten Werkstoffen im Werkzeug möglich.

Bei Werkzeugen für Geometrien mit ausgeprägter Längsachse (Langteile) bietet sich eine zylinderförmige Grundform jedoch nicht an. Zum einen erfordert die Kombination von mehreren zylinderförmigen Segmenten geeignete Verbindungselemente, die Wirtschaftlichkeit und Flexibilität stark einschränken. Zum anderen müssen zylinderförmige Segmente zeitintensiv ausgerichtet werden und erhöhen so die Rüstkosten. Darüber hinaus erhöht sich die Anzahl der Teilungsfugen durch die Notwendigkeit von Verbindungselementen.



*Bild 5.2: Mögliche Grundformen der Segmente eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen (links) und von rotationssymmetrischen Bauteilen (rechts)*

Segmente mit einer quaderförmigen Grundform bieten die Möglichkeit, die erforderliche Stauchbahn geeignet abzubilden. Darüber hinaus lässt die quaderförmige Grundform nur definierte Einbaumöglichkeiten zu und erleichtert damit den Zusammenbau des Vorformwerkzeugs erheblich.

Um mit einer definierten Anzahl von Segmenten durch geeignete Kombination Vorformwerkzeuge zur Masseverteilung zusammensetzen, bieten sich verschiedene Möglichkeiten der Anordnung. Dazu kann das Werkzeug sowohl senkrecht als auch parallel zur Längsachse und damit zur Fließrichtung des Werkstoffs geteilt werden. Eine Teilung senkrecht zur Fließrichtung des Material bietet fertigungstechnische Vorteile, wenn für die Kontur der Segmentoberfläche eine V-Form gewählt wird (vgl. Bild 5.4). Durch die zusätzliche Teilung ist jedoch neben einer Verspannung in Längsrichtung zusätzlich eine Verspannung senkrecht dazu erforderlich, die die Komplexität des Werkzeugs stark erhöht.

Anordnungen, die ein Einsetzen von quaderförmigen Segmenten in ein Muttergesenk vorsehen, werden von vornherein ausgeschlossen. Gründe dafür liegen in der erheblich reduzierten Flexibilität, dem hohen fertigungstechnischen Aufwand und der fehlenden Möglichkeit zu einem schnellen Segmentwechsel. Die wesentlichen Varianten zur Anordnung sind in Bild 5.3 dargestellt.

Da Vorformen für Langteile i.d.R. Symmetrien entlang der Längsachse aufweisen, bietet eine Teilung parallel zum Materialfluss, wie in Variante I vorgestellt, keine Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Verbreiterung des Einsatzbereichs. Die gestiegene Zahl der Teilungsfugen ist ein weiteres Argument gegen diese Variante. Für den Einsatz des flexiblen Vorformwerkzeugs wird daher eine Segmentierung nur senkrecht zum Materialfluss (Variante II) vorgenommen.

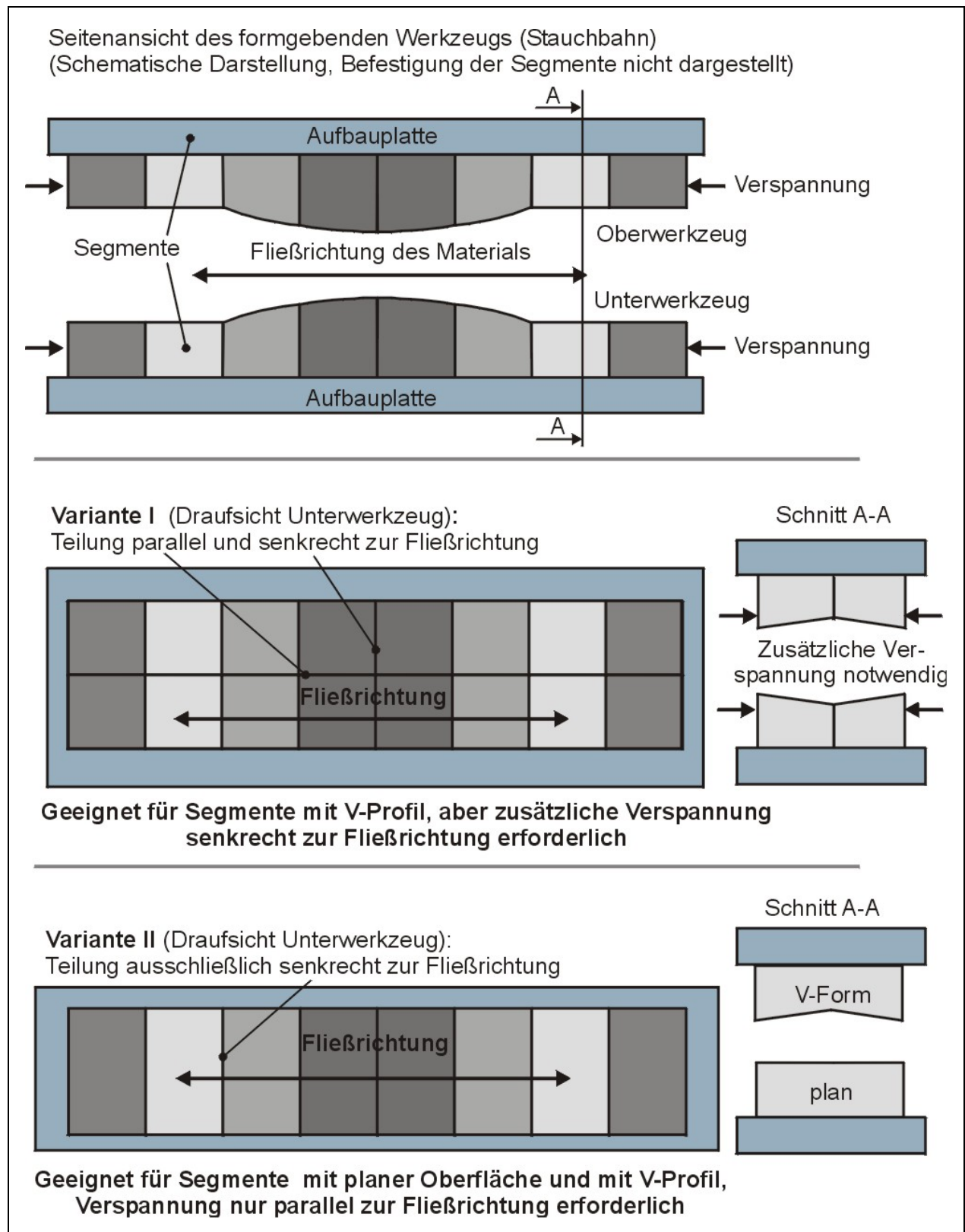


Bild 5.3: Varianten zur Anordnung der Segmente in einem modular aufgebauten Werkzeugsystem zur Vorformung von Langteilen



### 5.4.1.2 Querschnittsform der Segmente

Neben der Segmentgrundform muss die Querschnittsform der Segmente festgelegt werden. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die Kontur der Oberflächen plan oder v-förmig zu gestalten (Bild 5.4). Eine horizontal plane Kontur ist einfach zu fertigen. Darüber hinaus bietet eine plane Kontur weitere Vorteile hinsichtlich gleichmäßigem Verschleiß und einfacher Montage.

Die v-förmige Kontur erleichtert das Einlegen, da so eine Zentrierhilfe gegeben ist. Gleichzeitig wird der Verschleiß auf einen schmalen Bereich eingegrenzt. Ein außermittiges Einlegen kann durch eine V-Form der Segmente ausgeschlossen werden. Werden die Segmente nicht exakt ausgerichtet, kommt es jedoch zu Formfehlern infolge von Versatz durch die V-Form. Um ein Zentrieren des Werkstücks beim Einlegen in das Vorformwerkzeug zu ermöglichen, wird für die Kontur der Segmentoberseite des flexiblen Vorformwerkzeugs die V-Form gewählt.

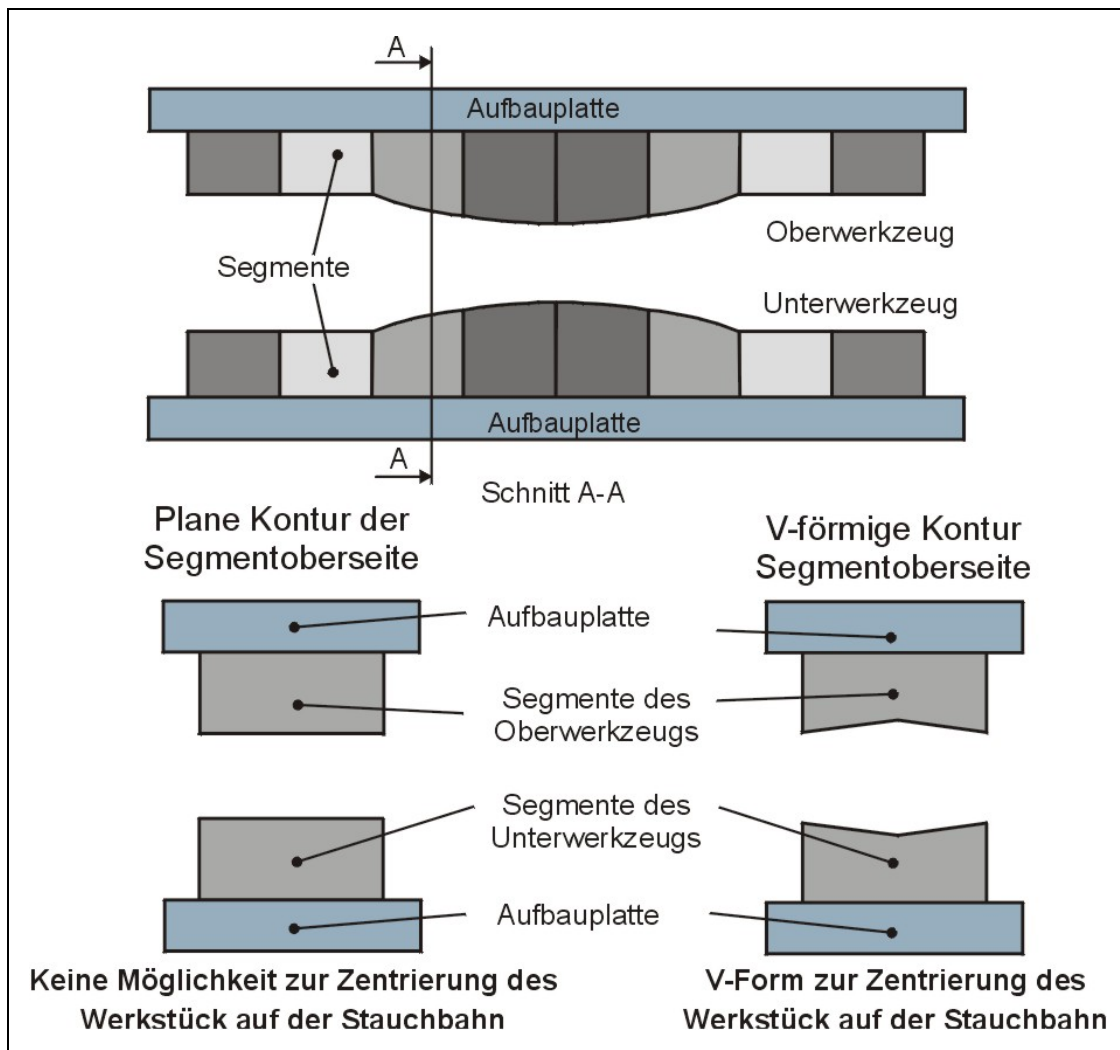


Bild 5.4: Mögliche Querschnitte der Segmente eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen



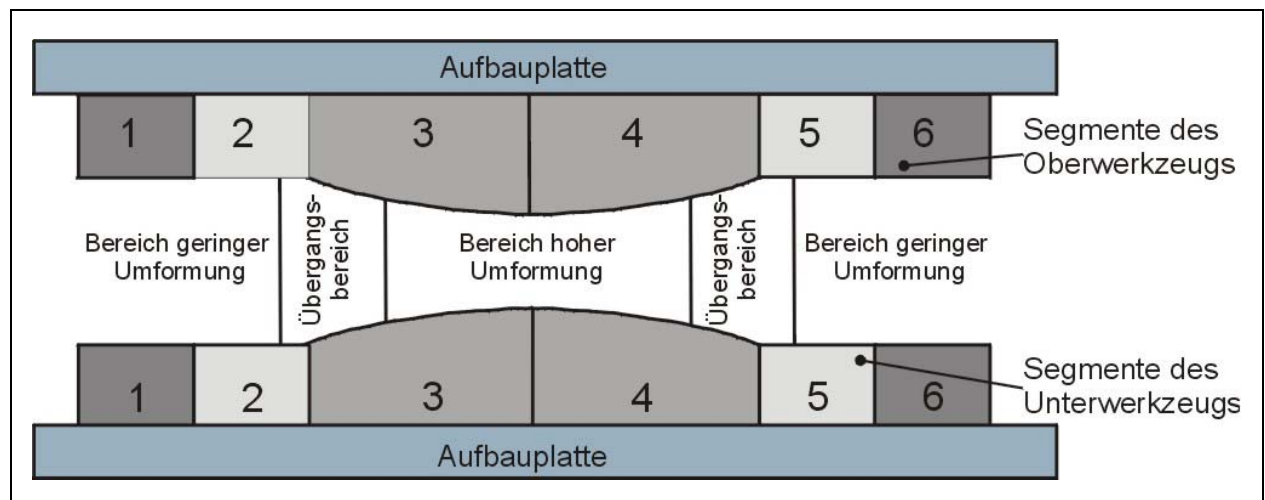
### 5.4.1.3 Auslegung der Gesenkübergänge

Einen wesentlichen Meilenstein bei der Entwicklung eines modularen Vorformwerkzeugs stellt die Auslegung der Gesenkübergänge dar, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Praxistauglichkeit des Werkzeugkonzepts hat. Ziel ist es, die Segmentübergänge so zu gestalten, dass eine Öffnung der Teilungsfugen verhindert wird.

Zur Auslegung der Segmentübergänge werden FEM-Analysen mit dem FEM-Programm MSC.SuperForge durchgeführt. Grundsätzlich bestehen folgende Möglichkeiten, die Segmentübergänge zu gestalten:

- „Stoß-Stoß“-Übergänge (entgratet und mit minimaler Fase versehen),
- einfache Kantenradien sowie
- Kombination aus Radien.

Die Auswirkungen der Gestaltung des Segmentübergangs ist abhängig von der Umformbelastung. Für das untersuchte Vorformwerkzeug ergeben sich zwei Bereiche geringer und ein Bereich hoher Umformung sowie zwei Übergangsbereiche (Bild 5.5).



*Bild 5.5: Übersicht über die Umformzonen in einem modular aufgebauten Werkzeugsystem zur Vorformung von Langteilen*

Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die untersuchten Segmentübergänge.

	Bereich geringer Umformung	Übergangsbereich	Bereich hoher Umformung	Übergangsbereich	Bereich geringer Umformung
	Übergang Segment 1-2	Übergang Segment 2-3	Übergang Segment 3-4	Übergang Segment 4-5	Übergang Segment 5-6
1	Stoß-Stoß (0,5 mm Fase)	Kantenradien (R5 - R5)	Kantenradien (R5 - R5)	Kantenradien (R8 - R8)	Kantenradien (R5 - R5)
2	Radienkombination (R5, R5 - R5, R5)	Radienkombination (R5, R5 - R5, R5)	Radienkombination (R5, R5 - R5, R5)	Kantenradien (R10 - R10)	Kantenradien (R10 - R10)
3	Kantenradien (R5 - R5)	Kantenradien (R10 - R10)	Radienkombination (R5, R2,5 - R2,5, R5)	Radienkombination (R5, R5 - R5, R5)	Radienkombination (R2, R2 - R2, R2)
4	Kantenradien (R10 - R10)	Kantenradien (R5 - R7)	Stoß-Stoß (0,5 mm Fase)	Radienkombination (R5, R5 - R2, R3)	Radienkombination (R5, R5 - R5, R5)

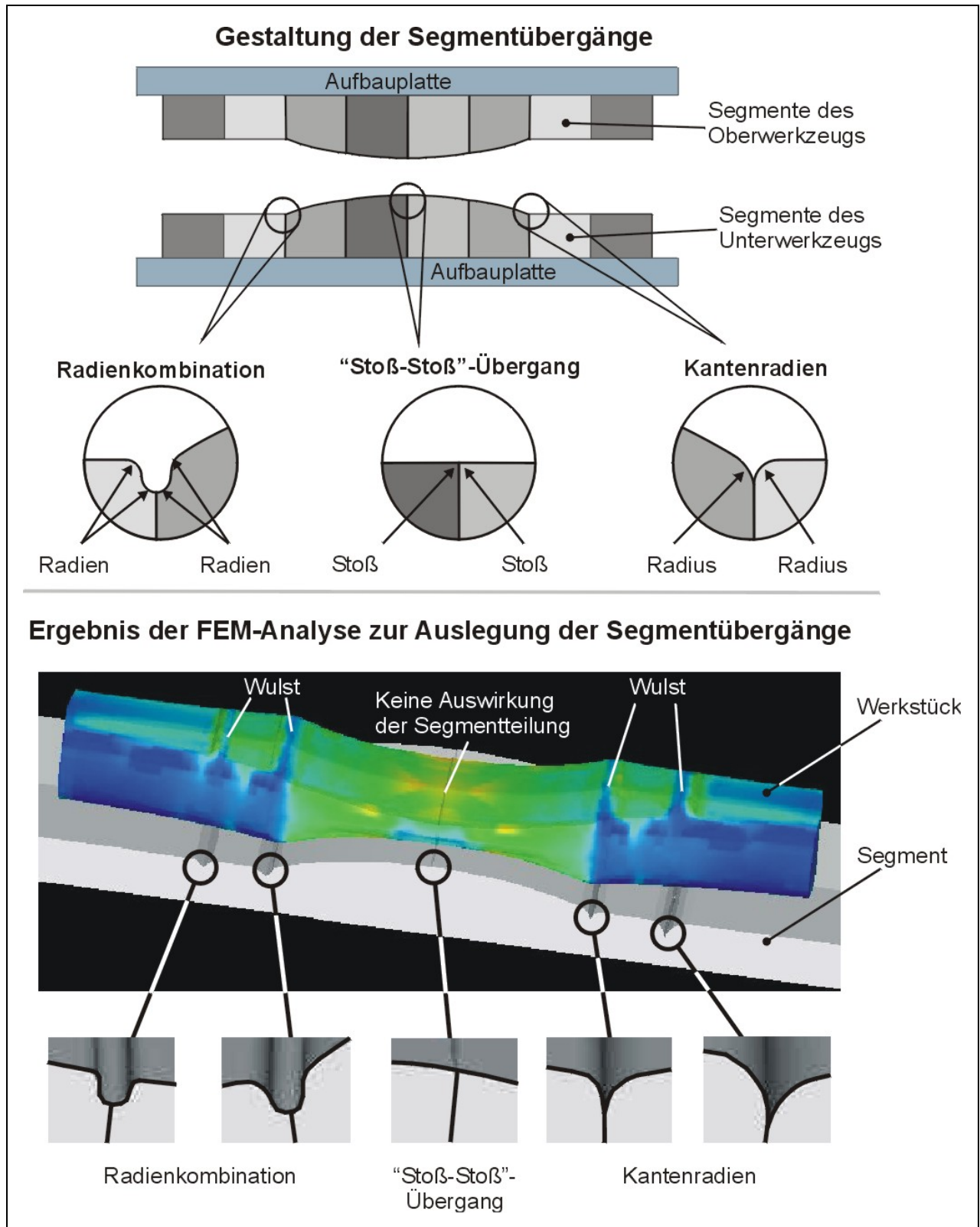
*Tabelle 5.2: In der FEM-Analyse untersuchte Varianten der Segmentgestaltung eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

Die wesentlichen Ergebnisse der FEM-Analyse sind in Bild 5.6 zusammengefasst. Die weiteren Ergebnisse der durchgeführten Simulationen befinden sich im Anhang (Bild A.1 - Bild A.4).

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich „Stoß-Stoß“-Übergänge unabhängig vom Grad der Umformbelastung nicht am Werkstück widerspiegeln. Auf Basis der Simulation kann daher davon ausgegangen werden, dass diese konstruktive Gestaltungsmöglichkeit nicht zu Schmiedefehlern in den nachgelagerten Stufen führen wird. Darüber hinaus lässt sich ein „Stoß-Stoß“-Übergang von allen drei Varianten am einfachsten fertigen, so dass diese konstruktive Gestaltung auch einen wirtschaftlichen Vorteil bietet.

Dagegen ist die Verwendung von einfachen Kantenradien, die in verschiedenen Größen möglich sind, nur im Bereich geringer Umformung sowie im Übergangsbereich möglich. Die Simulationsergebnisse zeigen in diesen Bereichen „Wulste“, die sich in den nachgelagerten Umformstufen weiterverarbeiten lassen. Die Gefahr einer Überlappung durch einen eingeschmiedeten Stirngrat ist aufgrund der relativ großen Breite bei geringer Höhe nicht gegeben. Im Bereichen hoher Umformung können sich jedoch Stirngrate bilden, die in nachfolgenden Schmiedeoperationen zu Schmiedefehlern führen können.

Demgegenüber sind Kombinationen aus Radien wesentlich aufwändiger in der Fertigung. Durch geeignete Kombinationen lassen sich zusätzlich Erhöhungen vor den Segmentübergängen („Schanzen“) realisieren, die den Materialfluss dahingehend beeinflussen sollen, dass das Material über den Segmentübergang „hinweg“ fließt. Die Simulationsergebnisse zeigen jedoch, dass insbesondere in Bereichen hoher Umformung sehr starke Wulste entstehen, die zu Fehlern in den nachfolgenden Stufen führen können.



*Bild 5.6: Ergebnisse der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

Die Möglichkeit zum Ausgleich von Höhenunterschieden (vgl. Bild 5.11) zwischen unterschiedlich verschlissenen Segmenten bietet alleinig die Verwendung von Kantenradien. Sowohl „Stoß-Stoß“-Übergänge als auch Radienkombinationen würden hier zu Absätzen führen, die zu Schmiedefehlern führen können.

#### 5.4.1.4 Einfluss der Wärmedehnung auf die Gesenkteilung

Neben der geometrischen Gestaltung der Segmentübergänge hat die Wärmedehnung des segmentierten Vorformwerkzeugs einen Einfluss auf die Verspannung der Werkzeugsegmente. Im stationären Betrieb des Vorformwerkzeugs beträgt die Temperatur an der Druckberührfläche des segmentierten Vorformwerkzeugs ca. 500°C und im Werkzeugkern ca. 150°C. Durch diese ungleichmäßige Temperaturverteilung kommt es zu einer Wärmedehnung, die an der Druckberührfläche größer ist als im Werkzeugkern und somit zu einer Erhöhung der Flächenpressung zwischen den Segmenten an der Druckberührfläche beiträgt.

Im Folgenden soll der Einfluss der Wärmedehnung quantitativ bestimmt werden. Dazu wird zunächst das Temperaturprofil des segmentierten Vorformwerkzeugs mit Hilfe des FEM-Programms MSC.SuperForge berechnet. Zur Bestimmung der Flächenpressung zwischen zwei Segmenten wird anschließend die Vorspannung der Segmente im Versuchswerkzeug rechnerisch bestimmt. Da die Gefahr einer Öffnung der Teilungsfugen im Bereich der größten Umformung am größten ist, erfolgt die Bestimmung der Flächenpressung im Bereich hoher Umformung zwischen den Segmenten 3 und 4 (vgl. Bild 5.5).

Für die FEM-Simulation des Temperaturprofils von segmentierten Vorformwerkzeugen im stationären Betrieb wurden folgende Parameter zu Grunde gelegt (Tabelle 5.3).

Parameter	Einstellung
Rohteiltemperatur	$T_R = 1250 \text{ °C}$
Ausgangstemperatur des Vorformwerkzeugs	$T_{Wz} = 150 \text{ °C}$
Wärmeübergangskoeffizient Rohteil und Vorformwerkzeug	$\alpha_T = 6.000 \text{ W/m}^2\text{K}$
Schmierung und Kühlung	Wasser-Graphit-Gemisch

*Tabelle 5.3: Parameter der Simulation zur Bestimmung des Temperaturprofils*

Bild 5.7 zeigt das Ergebnis der FEM-Simulation zur Bestimmung des Temperaturprofils in segmentierten Vorformwerkzeugen im stationären Betrieb. Die Temperatur an der Werkzeugoberfläche beträgt  $T_{Wz}(t = 0 \text{ mm}) = 495 \text{ °C}$ . Ab einer Werkzeugtiefe von  $t = 40 \text{ mm}$  liegt die Werkzeugtemperatur konstant bei  $T_{Wz}(t = 40 \text{ mm}) = 175 \text{ °C}$ .

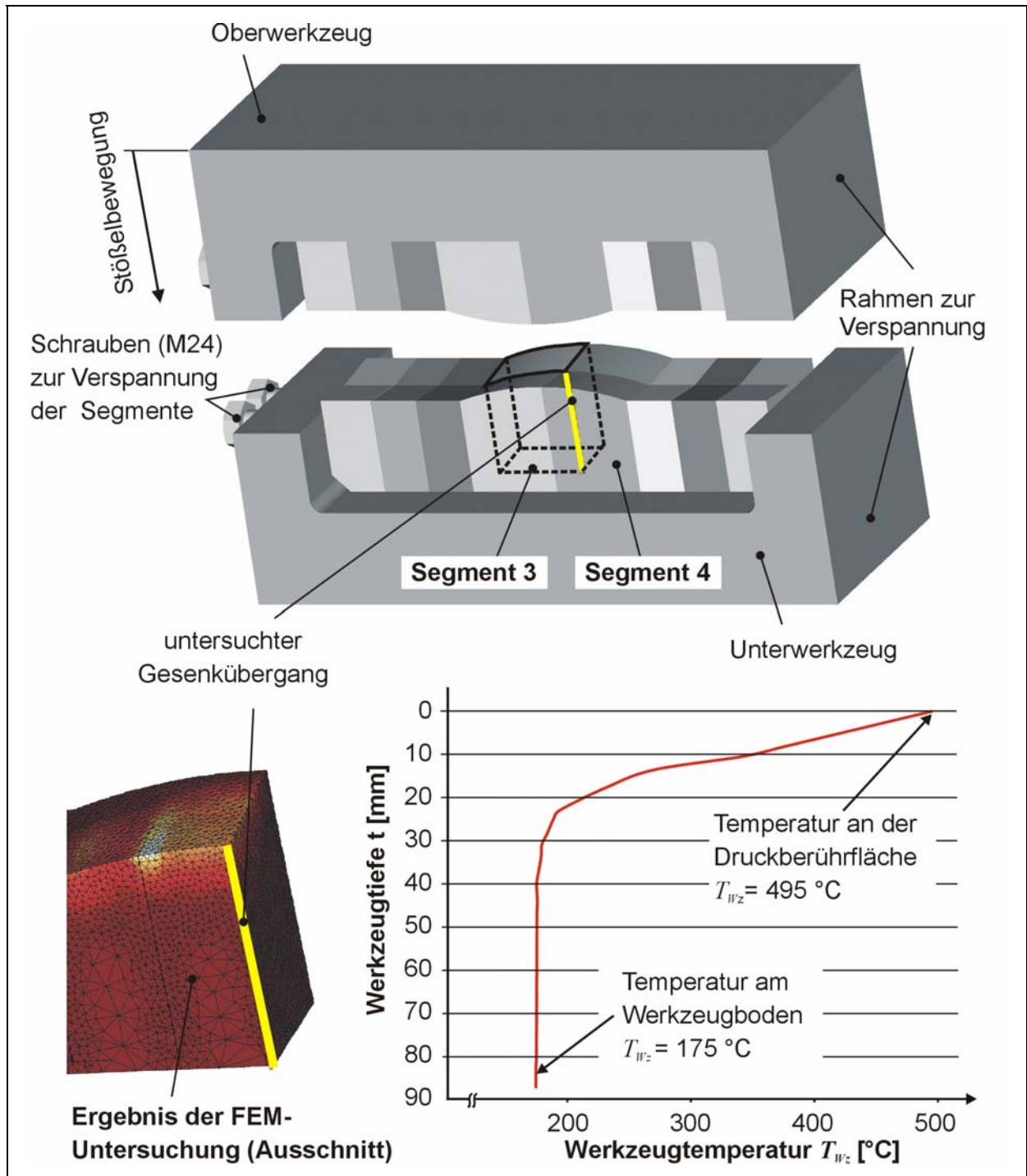


Bild 5.7: Ergebnis der FEM-Simulation zur Bestimmung des Temperaturprofils in segmentierten Vorformwerkzeugen

Für die aus der thermischen Dehnung der einzelnen Segmente resultierende Flächenpressung gilt [BEI95]:

$$\sigma_{Th}(T) = E \times \varepsilon_{Th}(T) \quad (\text{Formel 5.1})$$

mit  $\sigma_{Th}$  = Flächenpressung durch thermische Dehnung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $E$  = Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\varepsilon_{Th}(T)$  = thermische Dehnung [-]  
 $T$  = Temperatur [°C]

Für die thermische Dehnung gilt [BEI95]:

$$\varepsilon_{Th}(T) = \frac{l(T) - l(T_{Wz})}{l(T_{Wz})} \quad (\text{Formel 5.2})$$

mit  $l(T)$  = Länge nach Erwärmung [mm]  
 $l(T_{Wz})$  = Länge bei Ausgangstemperatur [mm]

Für die thermische Längenänderung gilt [BEI95]:

$$l(T) = l(T_{Wz}) \times [1 + \gamma_L \times (T - T_{Wz})] \quad (\text{Formel 5.3})$$

mit  $\gamma_L$  = thermischer Längenausdehnungskoeffizient [1/°C]

Durch Einsetzen von (5.2) und (5.3) in (5.1) ergibt sich:

$$\sigma_{Th}(T) = E \times \gamma_L \times (T - T_{Wz}) \quad (\text{Formel 5.4})$$

Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über die der Berechnung zu Grunde gelegten Werte für den thermischen Längenausdehnungskoeffizienten  $\gamma_L$  und den Elastizitätsmodul  $E$  im Temperaturintervall von 20 °C bis 500 °C für den verwendeten Warmarbeitsstahl 1.2344 (X40CrMoV5). Die für die Berechnung notwendigen Zwischenwerte von thermischem Längenausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul werden linear interpoliert [BÖH02].

Temperatur [°C]	Längenausdehnungskoeffizient $\gamma_L$ [°C <sup>-1</sup> ]	Elastizitätsmodul $E$ [Nmm <sup>-2</sup> ]
20	1	215.000
100	11,5 * 10 <sup>-6</sup>	208.500
200	12,0 * 10 <sup>-6</sup>	200.375
300	12,2 * 10 <sup>-6</sup>	192.250
400	12,5 * 10 <sup>-6</sup>	184.125
500	12,9 * 10 <sup>-6</sup>	176.000

Tabelle 5.4: Thermischer Längenausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul des Warmarbeitsstahl 1.2344 im Temperaturintervall von 20 °C bis 500 °C

An der Druckberührfläche des segmentierten Vorformwerkzeugs ( $t = 0 \text{ mm}$ ;  $T_{Wz} = 495^\circ\text{C}$ ) ergibt sich damit folgende, thermisch bedingte Flächenpressung:

$$\sigma_{Th} = 176.366 \frac{N}{\text{mm}^2} \times 12,88 \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}} (495 - 150)^\circ\text{C} = 785 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Im Kern des segmentierten Vorformwerkzeugs ( $t = 47 \text{ mm}$ ;  $T_{Wz} = 175^\circ\text{C}$ ) ergibt sich demgegenüber folgende, thermisch bedingte Flächenpressung:

$$\sigma_{Th} = 202.375 \frac{N}{\text{mm}^2} \times 11,88 \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}} (175 - 150)^\circ\text{C} = 61 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Die Segmente werden im Werkzeughalter durch zwei Schrauben M24, Festigkeit 10.9 (DIN EN ISO 4014) vorgespannt (vgl. Bild 5.10). Die Vorspannkraft der Schrauben lässt sich über das Anziehmoment der Schrauben bestimmen. Es gilt [BEI95]:

$$F_V \approx n \times \frac{M_A}{0,159 \times P + \mu_G \times 0,577 d_2 + \frac{D_{km}}{2} \times \mu_K} \quad (\text{Formel 5.5})$$

mit  $F_V$  = Vorspannkraft [N]  
 $n$  = Anzahl der Schrauben  
 $M_A$  = Anzugsmoment [Nm]  
 $P$  = Steigung des Gewindes [mm]  
 $d_2$  = Flankendurchmesser [mm]  
 $D_{km}$  = Durchmesser der Auflage des Schraubenkopfes [mm]  
 $\mu_G$  = Gewindereibwert [-]  
 $\mu_K$  = Reibwert der Auflagefläche der Schraube [-]

Das Reibmoment an der Auflagefläche entfällt, da die Schraubenköpfe am Werkzeughalter nicht anliegen. Da an der Einspannhilfe des Vorformwerkzeugs (vgl. Bild 5.12) halbkreisförmige Einsenkungen als Anpressfläche für die Spannschrauben vorhanden sind, kann das Reibmoment an der Anpressfläche vernachlässigt werden.

Für die Berechnung der Vorspannkraft werden folgende Werte zu Grunde gelegt:

$n$	=	2	2 Schrauben zur Vorspannung
$M_A$	=	400 Nm	Anzug mit Drehmomentschlüssel
$P$	=	3 mm	Metrisches Gewinde M24 nach DIN 13-19 [NN02]
$d_2$	=	22,05 mm	Metrisches Gewinde M24 nach DIN 13-19 [NN02]
$\mu_G$	=	0,16	Trockenreibung [BEI95]

Damit ergibt sich die Vorspannkraft von einer Schraube zu:

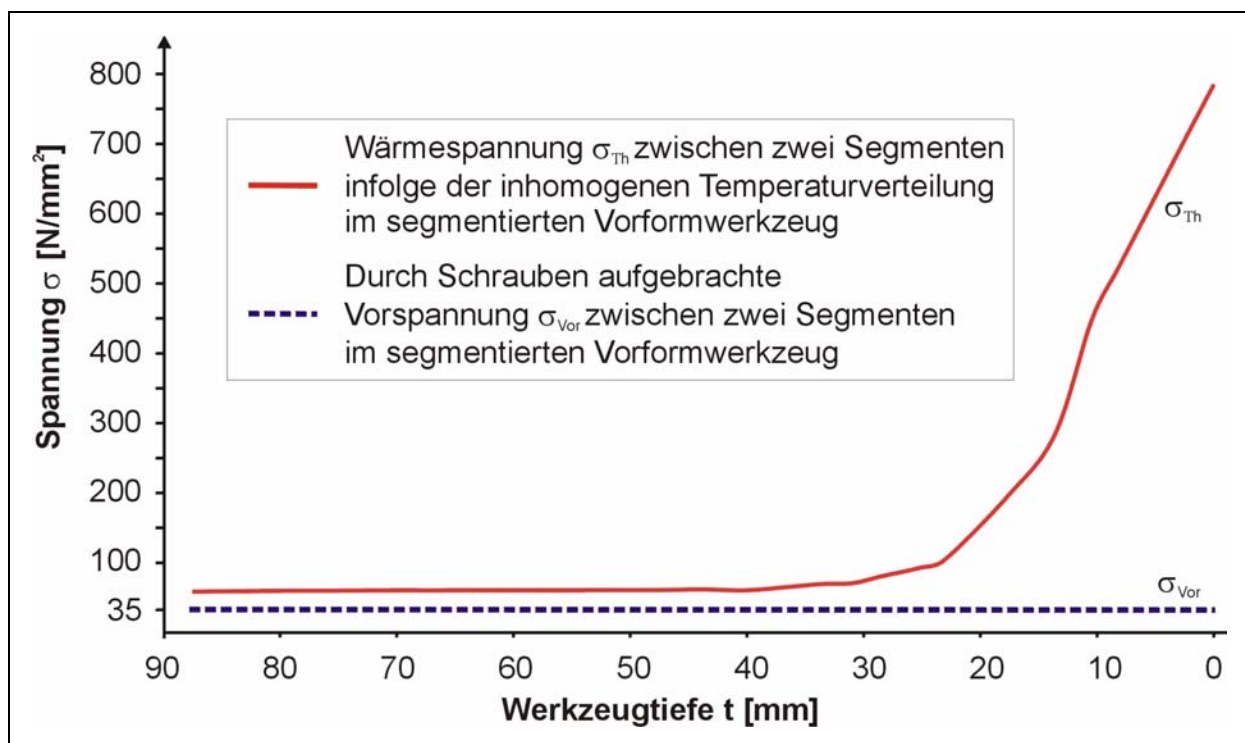
$$F_V \approx 2 \times \frac{400 \text{ Nm}}{0,159 \times 3 \text{ mm} + 0,16 \times 0,577 \times 22,05 \text{ mm}} = 318.388 \text{ N}$$

Unter der Annahme von ideal starren Segmenten und einer wirksamen Fläche von  $A_{Seg} = 9.000 \text{ mm}^2$  ergibt sich folgende Vorspannung:

$$\sigma_{Vor} = \frac{F_V}{A_{Seg}} \quad (\text{Formel 5.6})$$

$$\sigma_{Vor} = \frac{318.388 \text{ N}}{9.000 \text{ mm}^2} = 35,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bild 5.8 zeigt den Verlauf der Vorspannung  $\sigma_{Vor}$  und der thermisch bedingten Flächenpressung  $\sigma_{Th}$  über der Werkzeugtiefe von  $t = 0 \text{ mm}$  (Druckberührfläche) und  $t = 90 \text{ mm}$  (Werkzeugboden).



*Bild 5.8: Verlauf der Wärmespannung und der Vorspannung von segmentierten Vorformwerkzeugen für das konventionelle Schmieden von Langteilen*

Die Berechnung der thermisch bedingten Flächenpressung ergibt, dass resultierende Wärmespannung bereits 10 mm unter der Werkzeugoberfläche um die Hälfte zurückgeht. Um die ungleichmäßige Temperaturverteilung im segmentierten Vorformwerkzeug für eine zusätzliche Verspannung gegen eine Öffnung der Teilungsfugen zu nutzen, ist es zweckmäßig, die Teilungsfuge direkt an der Druckberührfläche des segmentierten Vorformwerkzeugs vorzusehen. Bei einer Gestaltung mit Kantenradien oder Radienkombinationen liegt die Teilungsfuge je nach verwendetem Radius zwischen 3 und 10 mm unter der Druckberührfläche, so dass die thermisch bedingte Flächenpressung nicht oder nicht in vollem Umfang genutzt werden kann.



In Tabelle 5.5 wird das Ergebnis der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge und der Berechnung der Wärmedehnung sowie die resultierenden Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten zusammengefasst.

Konstr. Gestaltung	Vorteile	Nachteile
Stoß-Stoß-Übergang	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz in Bereichen hoher Umformung möglich</li> <li>• Einfache und kostengünstige Fertigung</li> <li>• Zusätzliche Verspannung durch Wärmedehnung an der Werkzeugoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Ausgleich von unterschiedlich verschlissenen Segmenten möglich</li> </ul>
Kantenradien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache und kostengünstige Fertigung</li> <li>• Ausgleich von unterschiedlich verschlissenen Segmenten möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz nur in Bereichen geringer Umformung möglich</li> <li>• Wärmespannung nicht in vollem Umfang für zusätzliche Verspannung nutzbar</li> </ul>
Radienkombination	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begünstigung des Materialflusses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufwändige Fertigung</li> <li>• Kein Ausgleich von unterschiedlich verschlissenen Segmenten möglich</li> <li>• Wärmespannung nicht in vollem Umfang für zusätzliche Verspannung nutzbar</li> </ul>

*Tabelle 5.5: Zusammenfassende Bewertung zur Gestaltung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

## 5.4.2 Spannsystem

### 5.4.2.1 Lösungsprinzipien für ein Spannsystem

Ein industriell einsetzbares Verspannsystem muss im Wesentlichen folgenden Anforderungen genügen:

- einfache und sichere Befestigung, Ausrichtung und Verspannung der Segmente,
- Sicherung der Segmente im Werkzeugoberteil gegen Herausfallen sowie
- einfacher Aufbau, der eine schnelle Montage und Demontage zulässt.

Darüber hinaus sind weitere Anforderungen wie Unempfindlichkeit gegen Schmutz, Erwärmung und Erschütterung, Führung von Ober- und Untergesenk sowie der Möglichkeit zur Vorwärmung des Werkzeugs zu berücksichtigen. Auch die gesetzlichen Unfallverhütungsvorschriften (UVV) müssen beachtet werden. Des Weiteren muss geprüft

werden, ob die Integration einer Höhenverstellung der Segmente zum Ausgleich von unterschiedlich verschlissenen Segmenten in das Spannsystem sinnvoll ist.

Tabelle 5.6 gibt einen bewerteten Überblick über verschiedene Lösungsprinzipien für ein Spannsystem. Das Lösungsprinzip des Einschrumpfens ist rotationssymmetrischen Bauteilen vorbehalten und wird daher für rechteckige Segmente nicht betrachtet.

Lösungsprinzip	Vorteile	Nachteile
Spannpratzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kostengünstige Lösung</li> <li>• Hohe Flexibilität</li> <li>• Möglichkeit zum einfachen Austausch der Segmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Möglichkeit zur Verspannung in Längsrichtung</li> <li>• Nuten an den Segmenten erforderlich</li> </ul>
Zweiseitige Verspannung in einem Kastensystem (Muttergesenk, vgl. Bild 5.9)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichere Befestigung gegen Herausfallen</li> <li>• Hohe Flexibilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkter Einsatzbereich auf bestimmte Bauteilgrößen</li> <li>• Hohe Fertigungskosten durch enge Tolerierung der Segmente und großer Zerspanaufwand bei der Herstellung des Muttergesenks</li> </ul>
Verspannung mittels Zugstange (vgl. Bild 5.10)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kostengünstige Lösung</li> <li>• Sichere Befestigung gegen Herausfallen</li> <li>• Hohe Flexibilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchgangsbohrung für alle Segmente erforderlich</li> </ul>

*Tabelle 5.6: Lösungsprinzipien für ein Spannsystem eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

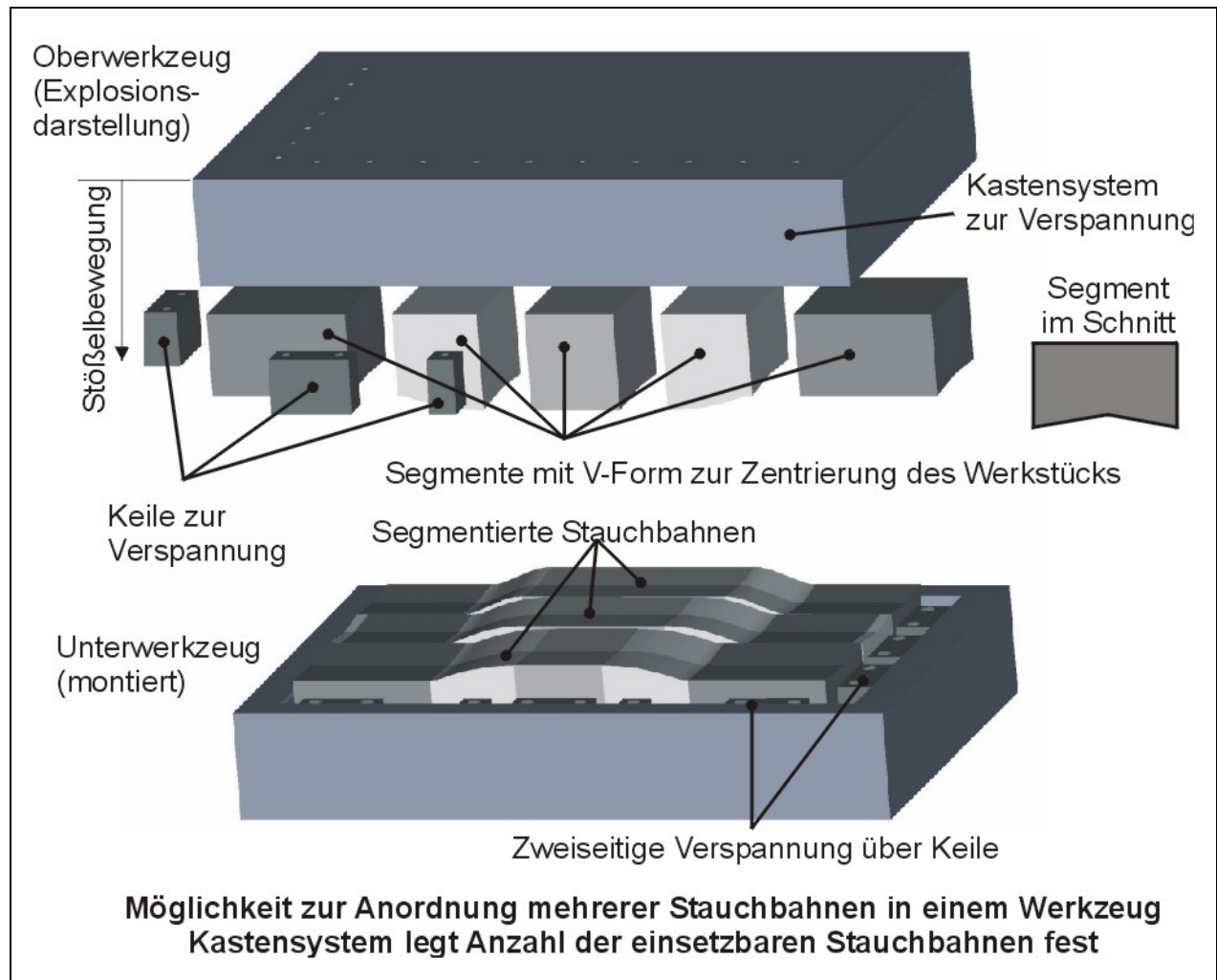
Die Befestigung mit *Spannpratzen* bietet keine Möglichkeit zur Verspannung in Längsrichtung. Die Aufbringung von Kräften in dieser Richtung ist jedoch erforderlich, um einer Aufhebelung der Teilungsfugen entgegenwirken zu können. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher in den folgenden Abschnitten die Lösungsprinzipien *Zweiseitige Verspannung in einem Kastensystem* und *Verspannung mittels Zugstange* detailliert vorgestellt und die jeweiligen Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen.

#### 5.4.2.2 Zweiseitige Verspannung in einem Kastensystem

Bild 5.9 zeigt eine Werkzeugvariante, bei der die einzelnen Segmente mit Hilfe von Keilen in einem Werkzeugkasten, der als Muttergesenk fungiert, verspannt werden. Grundsätzlich besteht bei dieser Variante die Möglichkeit, die für die Verspannung notwendigen Keilflächen am Muttergesenk oder an den Segmenten anzubringen. Unter dem Gesichtspunkt der Flexibilität und der universellen Einsetzbarkeit der Segmente bietet es sich jedoch an, die Keilflächen an das Muttergesenk anzubringen. Vorteile dieser Variante liegen in einer sicheren Verspannung, die jedoch nur bei einer eng tolerierten Fertigung der Segmente gewährleistet werden kann. Demgegenüber kann das Muttergesenk nur für bestimmte Bauteilgrößen eingesetzt werden, so dass es hier beträchtliche Einschränkungen hinsichtlich der Flexibilität gibt.

Als industriell einsetzbares Verspannsystem kommt dieses Lösungsprinzip nur dann in Betracht, wenn das Kastensystem als Schweißkonstruktion ausgeführt werden kann.

Eine spanende Fertigung würde aufgrund des enormen Material- und Zerspanungsaufwands die Fertigungskosten stark erhöhen und damit die Wirtschaftlichkeit des Vorformkonzepts erheblich einschränken.

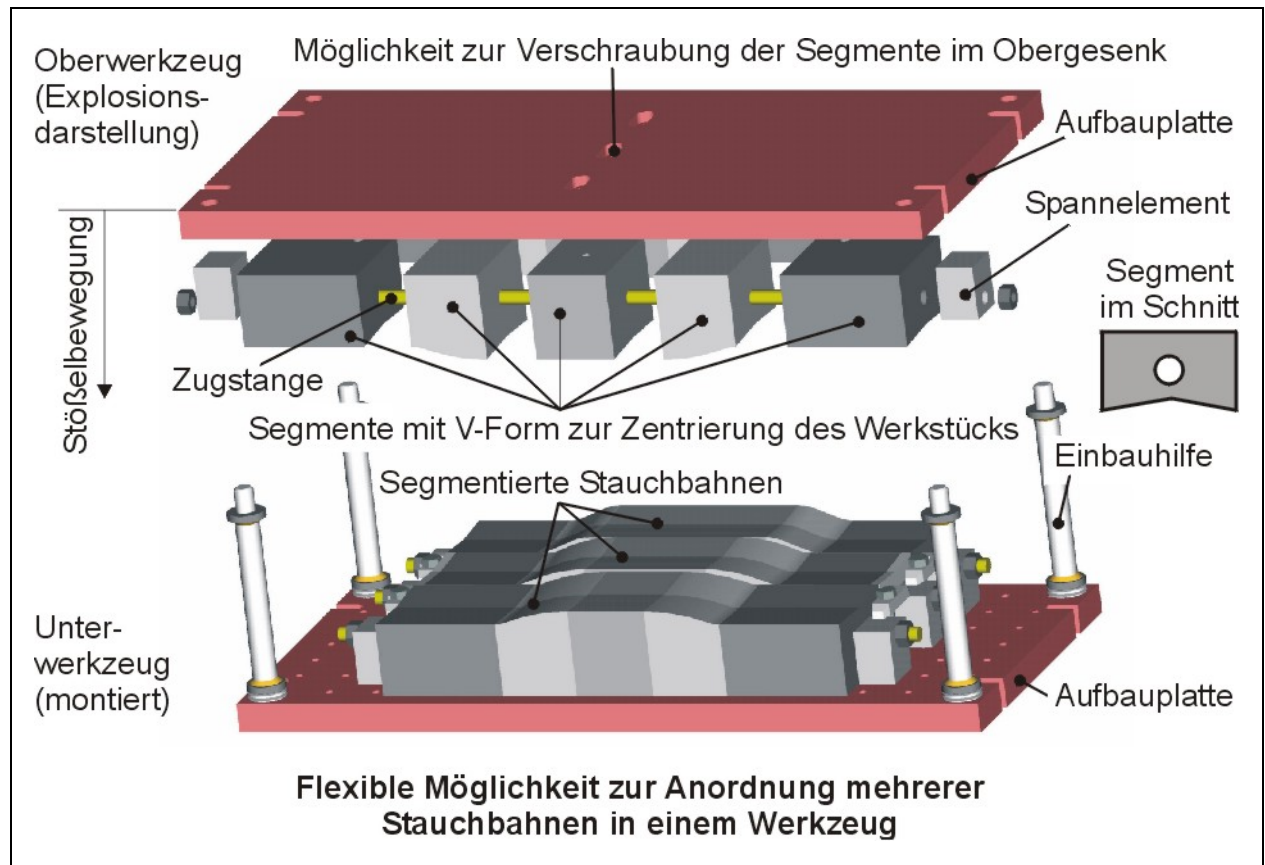


*Bild 5.9: Möglichkeit zur Verspannung mehrerer Segmente eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zu einer Stauchbahn in einem Kastensystem*

#### 5.4.2.3 Verspannung mittels Zugstange

Bild 5.10 zeigt das Lösungsprinzip, bei dem die Segmente mit Hilfe einer Zugstange miteinander verspannt werden. Die Zugstange ermöglicht eine sichere Verspannung, insbesondere eine Sicherung gegen Herunterfallen der Segmente aus dem Oberwerkzeug. Die Befestigung auf der Grundplatte, die dann in die Umformmaschine eingebaut wird, erfolgt über die Zugstange mit Hilfe von Spannelementen. Die Grundplatten sind damit die einzigen Elemente des Werkzeugsystems, die nur maschinenspezifisch eingesetzt werden können. Um ein „Durchhängen“ der Segmente im Obergesenk auszuschließen, werden die mittleren Elemente zusätzlich mit einer Schraube an der Grundplatte gesichert.

Diese Variante bietet gegenüber der zweiseitigen Verspannung in einem Kastensystem eine größere Flexibilität hinsichtlich der einsetzbaren Bauteilgrößen. Bezüglich der Montage ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zum Kastensystem. Beide Lösungsprinzipien erfordern beim Oberwerkzeug ggf. ein Ausbauen aus der Umformmaschine. Dagegen kann das Unterwerkzeug beim Austausch eines Segments in der Umformmaschine verbleiben und trägt durch verkürzte Rüstzeiten zur Wirtschaftlichkeit dieses Werkzeugsystems bei.



*Bild 5.10: Möglichkeit zur Verspannung mehrerer Segmente eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zu einer Stauchbahn mit einer Zugstange*

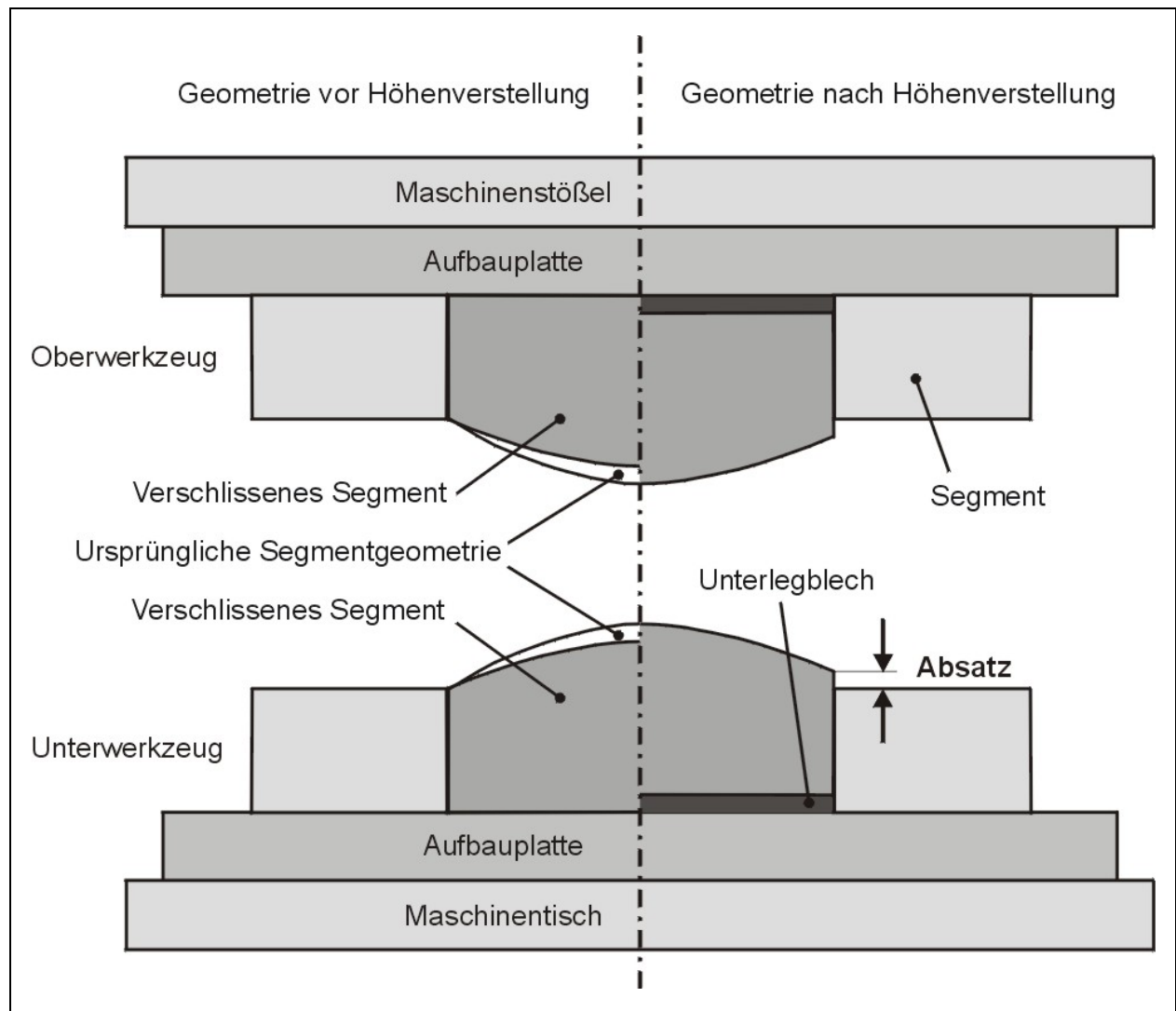
#### 5.4.2.4 Höhenverstellung

Der Ausgleich von Höhenunterschieden wird dann notwendig, wenn unterschiedlich stark verschlissene Segmente in einem Werkzeug kombiniert werden sollen (Bild 5.11). Zur Kompensation dieser Höhenunterschiede bieten sich folgende Lösungsprinzipien an:

- Verwendung von Unterlegblechen unterschiedlicher Dicke sowie
- Integration von schiefen Ebenen oder von Verstellmöglichkeiten über Keilsysteme in das Spannsystem.

Eine Höhenverstellung ermöglicht die Weiterverwendung von verschlissenen Segmenten ohne Nacharbeit. Diesem Vorteil stehen jedoch auch Nachteile gegenüber.

Das Hauptproblem der Höhenverstellung liegt darin, dass sich der Verschleiß i.d.R. ungleichmäßig ausbildet. Ungleichmäßiger Verschleiß kann jedoch durch eine einfache Höhenverstellung nicht ausgeglichen werden, da sich die Form der Gravur infolge des Verschleißes ändert und ein reines Anheben des verschlissenen Segments zu Absätzen führt (Bild 5.11).



*Bild 5.11: Bildung eines Absatzes zwischen zwei Segmenten beim Ausgleich von unterschiedlich verschlissenen Segmenten über eine Höhenverstellung (integrierte Höhenverstellung daher nicht sinnvoll)*

Die genannten Lösungsprinzipien zum Ausgleich von durch Verschleiß entstandenen Höhenunterschieden zwischen Segmenten erhöhen zudem die Komplexität des Werkzeugs. Mit zunehmender Komplexität steigen die Fertigungskosten und die Wirtschaftlichkeit des Werkzeugkonzepts wird reduziert. Zusätzlich ist zu beachten, dass Vorformwerkzeuge ohnehin nicht sehr eng toleriert werden. Aus den genannten Gründen wird auf eine Höhenverstellung verzichtet.

### 5.4.3 Zusammenstellung ausgewählter Prinziplösungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden für die Hauptfunktionen des flexiblen Vorformwerkzeugs für das konventionelle Schmieden von Langteilen verschiedene Lösungsprinzipien vorgestellt und bewertet. Auf die Auswahl der erforderlichen Nebenfunktionen wie Führung von Ober- und Untergesenk oder Vorwärmung soll im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert eingegangen werden. Tabelle 5.7 gibt einen Überblick über die für den Gesamtentwurf (vgl. Tabelle 5.1) gewählten Lösungsprinzipien für die einzelnen Teilfunktionen.

		Teilfunktion	Lösungsprinzip
<b>Hauptfunktionen</b>	Segmentgestaltung	Grundform	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quaderförmige Segmente</li> </ul>
		Querschnittsform der Segmente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• V-Form zur Zentrierung des Werkstücks auf dem segmentierten Werkzeug</li> </ul>
		Gesenkübergänge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rechtwinklige, entgratete Übergänge zwischen Segmenten (Stoß auf Stoß)</li> </ul>
		Ort der Gesenkteilung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teilung nur senkrecht zur Fließrichtung</li> </ul>
	Spannsystem	Befestigung, Ausrichtung und Verspannung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Befestigung mittels Zugstange in einem Spannsystem</li> </ul>
		Höhenverstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• entfällt, ggf. werden die Segmente im zusammengebauten Zustand nachgesetzt.</li> </ul>
<b>Nebenfunktionen</b>	Führung von Ober- und Untergesenk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung der Maschinenführungen ist für Vorformoperationen ausreichend</li> </ul>	
	Vorwärmung des Werkzeugs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorwärmung mittels Gasbrenner</li> </ul>	

Tabelle 5.7. *Ausgewählte Lösungsprinzipien für das modular aufgebaute Werkzeugkonzept zur Vorformung von Langteilen*

## 5.5 Erprobung des flexiblen Vorformkonzepts für das konventionelle Schmieden von Langteilen

### 5.5.1 Vorgehensweise bei der Erprobung

Nach der Realisierung des entwickelten Werkzeugsystems, welche die Fertigung aller Werkzeugelemente sowie die Montage beinhaltet, wird in diesem Abschnitt die Erprobung des flexiblen Vorformwerkzeugs beschrieben. Im Mittelpunkt steht dabei der Nachweis der technischen Machbarkeit.

Der Nachweis der technischen Machbarkeit für segmentierte Vorformwerkzeuge erfolgt an einem Beispielprozess, in dem ausgehend von Vierkant-Knüppelabschnitten durch mehrmalige Umformung Stoffanhäufungen an den Enden erzeugt werden. Die Erprobung gliedert sich in zwei Versuchsreihen:

- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Segmentübergänge auf das Schmiedeergebnis (Kapitel 5.5.3, Bild 5.13) sowie
- Untersuchung des Einflusses von segmentierten Vorformwerkzeugen auf die nachfolgende Umformstufe (Kapitel 5.5.4, Bild 5.17).

Im ersten Teil der Erprobung werden die Ergebnisse der FEM-Analysen (vgl. Kapitel 5.4.1.3, Bild 5.6) verifiziert. Hierzu werden die Übergänge zwischen den einzelnen Segmenten sowohl mit einfachen Kantenradien unterschiedlicher Größe auch mit einer 0,5 mm Fase ausgeführt. Auf den Einsatz von Radienkombinationen wird aufgrund der Simulationsergebnisse, die auf Schmiedefehler hindeuten, verzichtet.

Aufbauend auf den Ergebnissen des ersten Teils der Erprobung werden die Segmentübergänge für den zweiten Teil der Erprobung optimiert. Zur Untersuchung des Einflusses von segmentierten Vorformwerkzeugen auf nachfolgende Umformstufen werden die im segmentierten Werkzeug vorgeformten Werkstückproben in einem konventionellen Gesenk fertiggeschmiedet und auf Schmiedefehler untersucht.

Gesamtziel der im Rahmen der Erprobung durchgeführten Versuchsreihen ist der Nachweis der generellen Machbarkeit von segmentierten Vorformwerkzeugen. Dazu soll gezeigt werden, dass bei geeigneter Gestaltung der Segmentübergänge sowie des Verspannsystems ein Öffnen der Teilungsfugen ausgeschlossen ist und daher durch die Verwendung von segmentierten Vorformwerkzeugen keine Schmiedefehler in der nachgelagerte Umformstufen entstehen.

## **5.5.2 Beschreibung der Versuchsumgebung**

Der erste Teil der Erprobung des entwickelten Werkzeugsystems wurde in einem Unternehmen der deutschen Schmiedeindustrie auf einer mechanischen 315-Tonnen Kurbelpresse durchgeführt. Der zweite Teil der Erprobung erfolgte im Versuchsfeld des IPH auf einer einfach wirkenden Spindelpresse mit Direktantrieb der Firma Müller Weingarten (Typ PS 265). Diese energiegebundene Presse hat eine mittlere Motorleistung von 110 kW, ein Bruttoarbeitsvermögen von 100 kJ bei einem Hub von 380 mm und eine dauernd zulässige Presskraft bzw. Höchstpresskraft von 11.000 bzw. 14.000 kN. Der nutzbare Stößelhub beträgt 150 bis 450 mm und der Werkzeugeinbauraum bei eingesetzter Werkzeugwechsellkassette 500 x 700 x 450 mm.

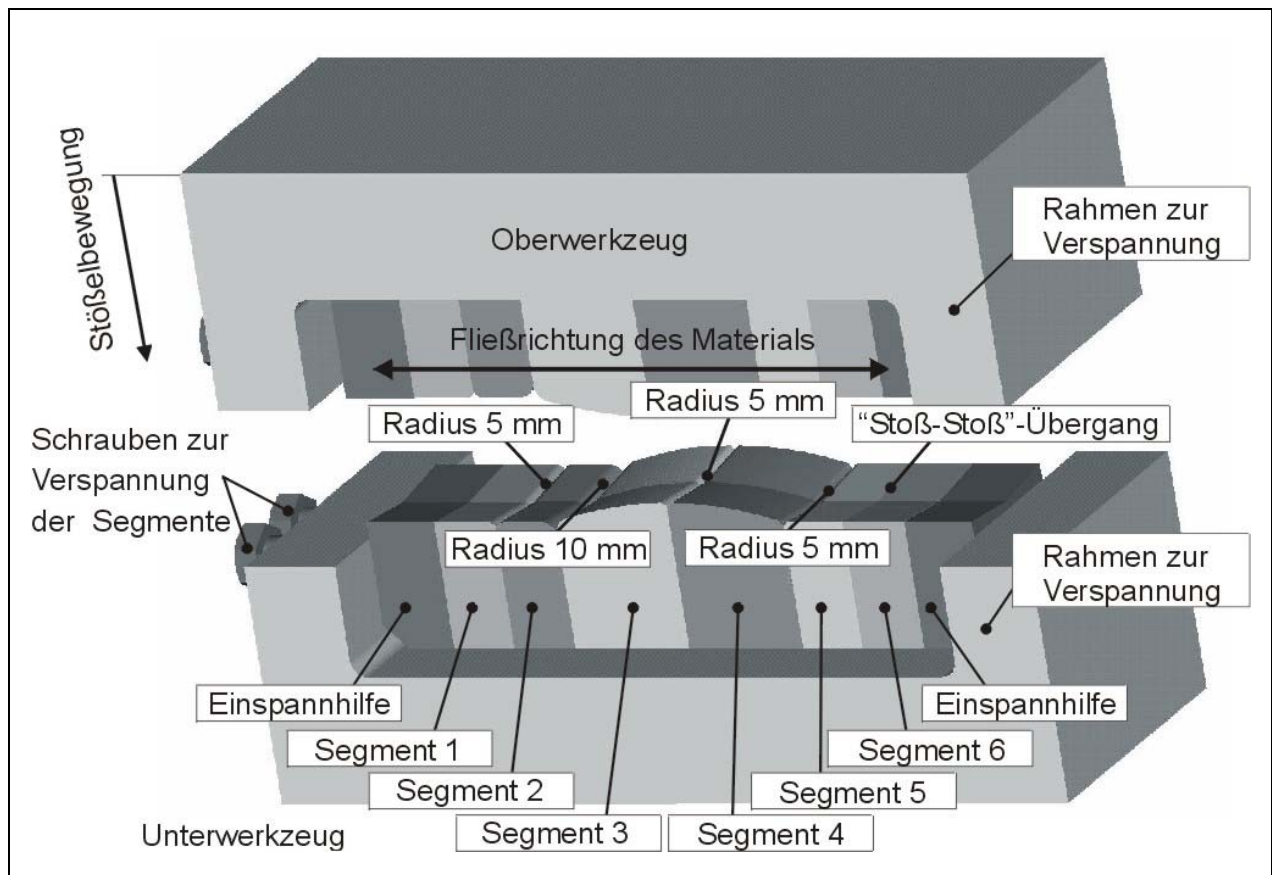
## **5.5.3 Untersuchung des Einflusses der Segmentübergänge auf das Schmiedeergebnis**

### **5.5.3.1 Verwendetes Versuchswerkzeug**

Bild 5.12 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Versuchswerkzeugs zur Masseverteilung. Die formgebende Stauchbahn wird durch jeweils sechs Segmente aus dem



Warmarbeitsstahl 1.2344 (X40CrMoV5-1) in Ober- und Unterwerkzeug realisiert. Hinzu kommen jeweils zwei Elemente, die als Einspannhilfen genutzt werden.



*Bild 5.12: Versuchswerkzeug zur Untersuchung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

Das gewählte Versuchswerkzeug ermöglicht eine Masseverteilung mit Stoffanhäufungen an den Enden sowie insgesamt eine Streckung der Ausgangsform. Durch den Einsatz unterschiedlicher Segmente lässt sich die Länge, der Ort sowie der Querschnitt der Einschnürung variieren. Beispielsweise lassen sich mit diesem Werkzeug Zwischenformen für Wellen herstellen (Bild 5.13).

### 5.5.3.2 Durchführung und Ergebnisse der Versuche

Die Versuche wurden auf einer mechanischen 315-Tonnen Kurbelpresse durchgeführt. Als Probenmaterial wurde folgende Rohteile verwendet:

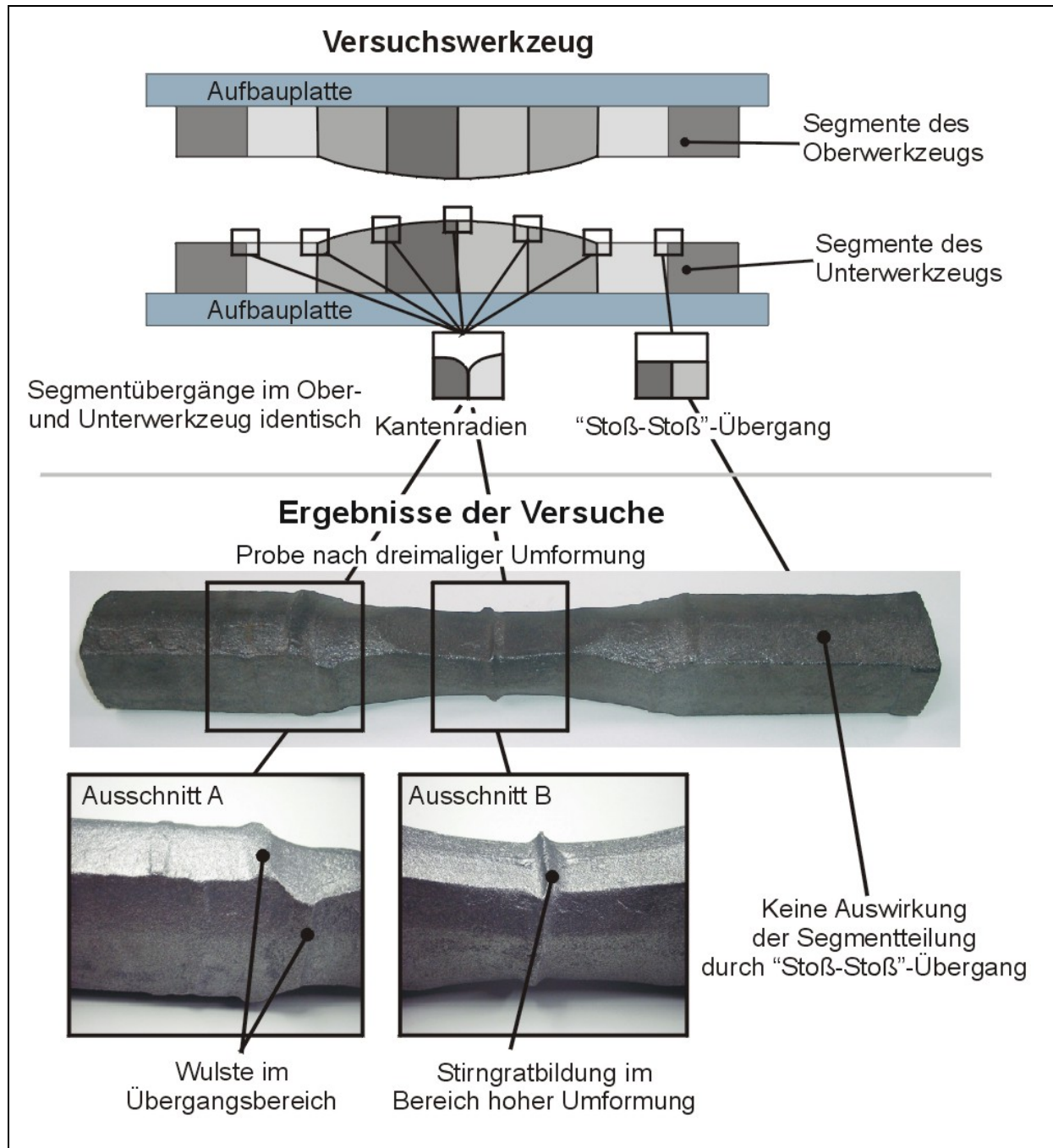
- Werkstückwerkstoff: C45
- Abmessungen: 50 x 50 mm Vierkant, 350 mm lang

Die Rohteile wurden in einem Kammerofen auf 1250° C erwärmt und nach Entnahme im segmentierten Vorformwerkzeug dreimal vorgeformt. Nach jeder Umformung erfolgte



eine Drehung des Werkstücks um 90°. Im Anschluss an die Vorformung wurden die Versuchsproben auf Schmiedefehler untersucht.

Bild 5.13 zeigt die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe. Die Verwendung von Kantenradien im Bereich großer Umformung führt zu einem nicht tolerierbaren Stirngrat, der in der nachfolgenden Umformstufe zu einem Schmiedefehler in Form einer Überlappung oder Faltenbildung führen kann.



*Bild 5.13: Ergebnisse der Untersuchung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen (Fazit: „Stoß-Stoß“-Übergang günstigste Gestaltungsvariante)*

Aus dem ersten Teil der Erprobung lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Segmentübergänge mit Kantenradien führen im Bereich hoher Umformung zu Stirngraten (Bild 5.13, Ausschnitt B). Da sich die Geometrie der Segmentübergänge auf der Probe deutlich abzeichnet und in den nachfolgenden Operationen zu Schmiedefehlern führen kann, ist in Bereichen hoher Umformung die Gestaltung der Segmentübergänge mit Kantenradien nicht möglich.
- Segmentübergänge mit Radien im Bereich geringer Umformung sowie im Übergangsbereich zeichnen sich am Werkstück in Form von Wulsten ab (Bild 5.13, Ausschnitt A). Aufgrund ihrer im Verhältnis zur Höhe großen Breite sind diese Wulste jedoch für den weiteren Schmiedeprozess tolerierbar. Das Werkstück wird bei jedem der durchgeführten drei Vorformungen gestreckt. Diese Streckung sowie die Drehung um 90 ° nach jedem Vorformschritt führt dazu, dass eine im ersten Vorformschritt aufgetretene Wulst im dritten Vorformschritt auf eine ungeteilte Wirkfläche trifft und so bereits während der Vorformung eliminiert wird. Da mit jedem Vorformschritt der Umformgrad kleiner wird, ist die nach dem letzten Vorformschritt verbleibende Wulst so gestaltet, dass sie in der nachfolgenden Fertigformung zu keinen Schmiedefehlern führt.
- „Stoß-Stoß“-Übergänge zeichnen sich nicht am Werkstück ab. Da dieser Übergang im Rahmen dieser Versuche lediglich im Bereich geringer Umformung realisiert wurde, muss im zweiten Teil der Erprobung gezeigt werden, dass auch im Bereich hoher Umformung „Stoß-Stoß“-Übergänge nicht zu Schmiedefehlern führen (vgl. Kapitel 5.5.4, Bild 5.17).
- Der Einfluss der Segmentübergänge ist im Wesentlichen auf den Bereich hoher Umformung begrenzt. Im Bereich geringer Umformung sowie im Übergangsbereich ist es von untergeordneter Bedeutung, wie der Segmentübergang gestaltet wird.

#### **5.5.4 Untersuchung des Einflusses von segmentierten Werkzeugen auf die nachfolgende Umformstufe**

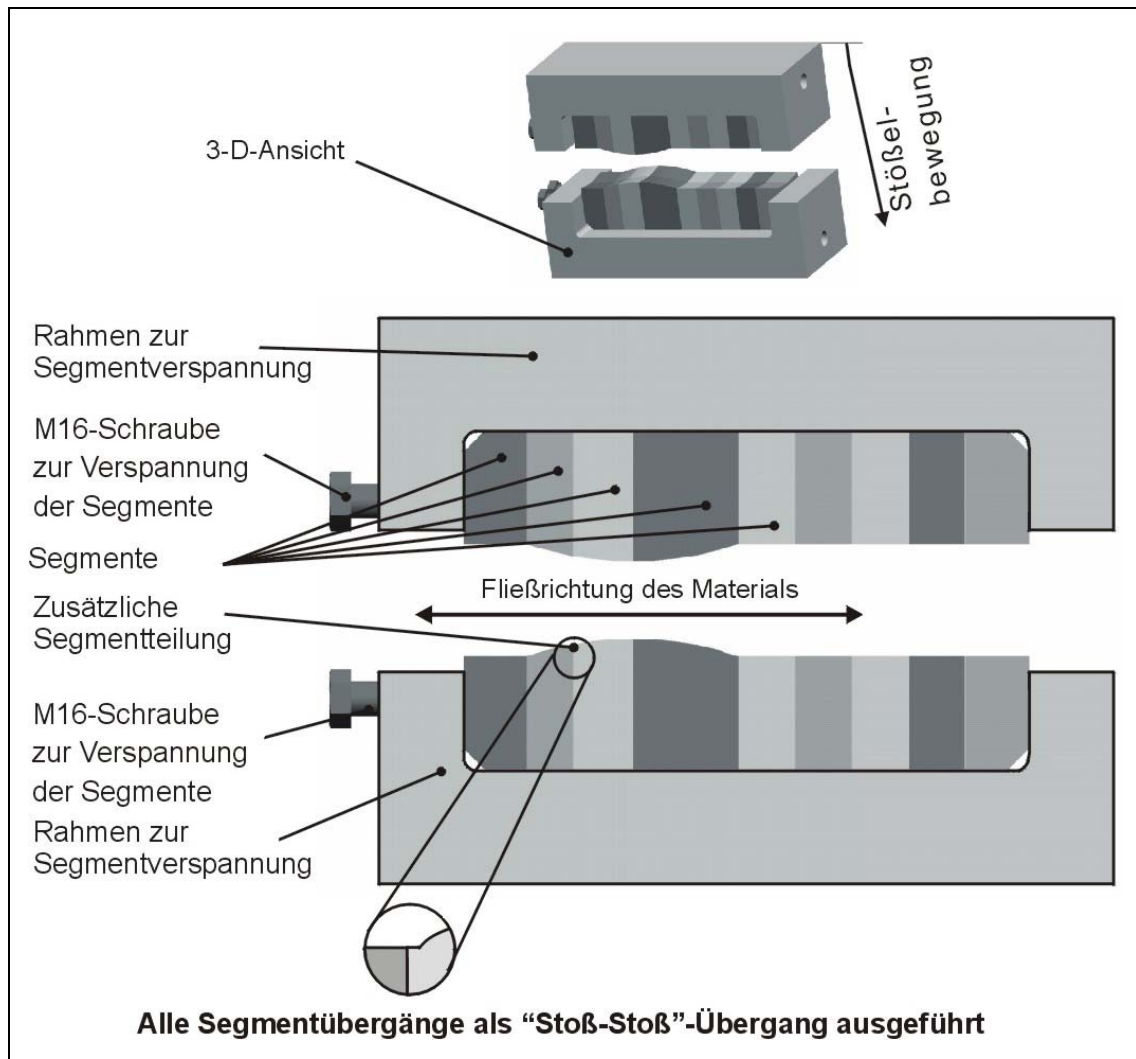
Da im Rahmen des ersten Teils der Erprobung ein „Stoß-Stoß“-Übergang lediglich im Bereich geringer Umformung angebracht war, muss im zweiten Teil der Erprobung gezeigt werden, dass ein derartig gestalteter Übergang unabhängig vom Umformgrad in allen Bereichen des Werkstücks möglich ist. Im Einzelnen werden in dieser Versuchsreihe folgende Ziele verfolgt:

- Bestimmung des Einflusses von „Stoß-Stoß“-Übergängen zwischen den Segmenten in allen Bereichen des Vorformwerkzeugs sowie
- Bestimmung des Einflusses der Teilung auf die nachfolgende Umformstufe.

##### **5.5.4.1 Verwendete Versuchswerkzeuge**

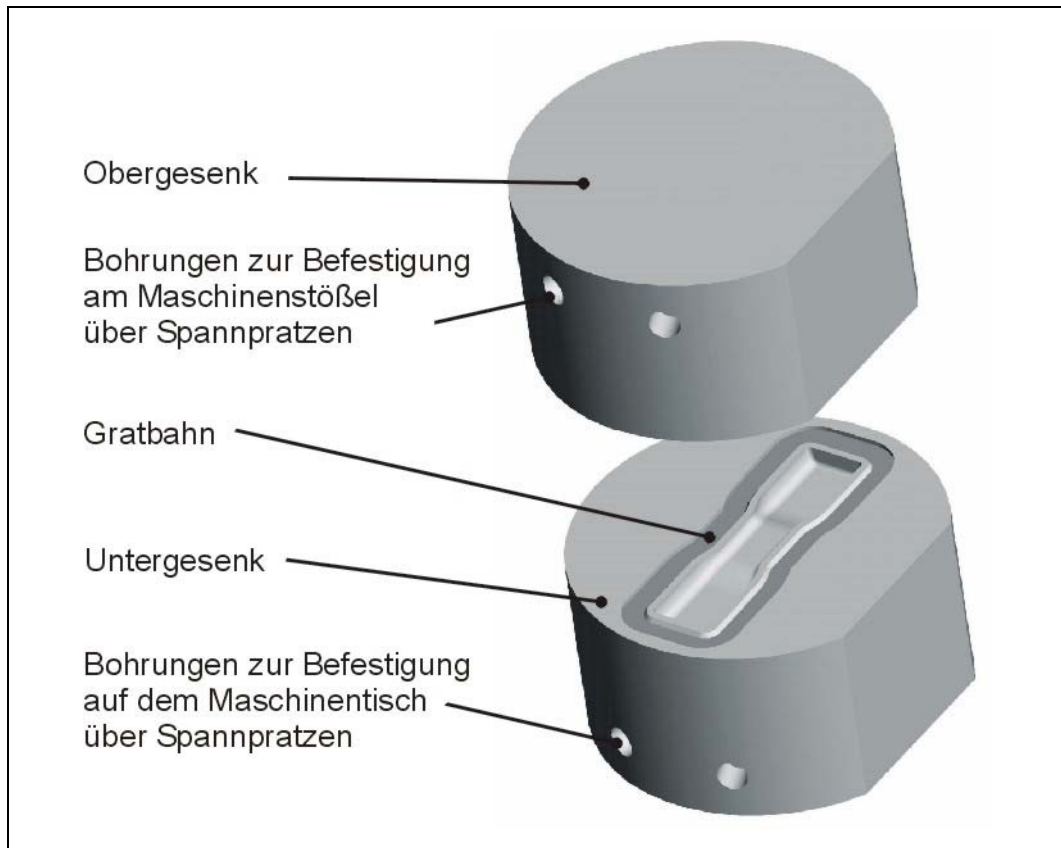
Für den zweiten Teil der Erprobung wurde das in Bild 5.12 vorgestellte Vorformwerkzeug weiterverwendet. Um den Einfluss von „Stoß-Stoß“-Übergängen auf das

Schmiedeergebnis beurteilen zu können, wurden zum einen „Stoß-Stoß“-Übergänge an allen Segmenten angebracht. Zum anderen wurde eine weitere Segmentteilung im Übergangsbereich angebracht. Auch dieser wurde zunächst als „Stoß-Stoß“-Übergang zwischen den Segmenten ausgeführt (Bild 5.14). Der erste Teil der Erprobung hat gezeigt, dass die Gestaltung der Segmentübergänge nur im Bereich hoher Umformung Einfluss auf das Schmiedeergebnis hat. Daher wurden für den zweiten Teil der Erprobung die Segmente im Rahmen zur Verspannung entsprechend umgestellt.



*Bild 5.14: Versuchswerkzeug zur Bestimmung des Einflusses von „Stoß-Stoß“-Übergängen zwischen den Segmenten eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

Um beurteilen zu können, ob die Werkzeugteilung in den Vorformstufen zu Schmiedefehlern in der nachfolgenden Umformstufe führt, ist es notwendig, mit einem segmentierten Vorformwerkzeug hergestellte Zwischenformen in einem konventionellen Schmiedewerkzeug fertig zu schmieden. Zu diesem Zweck wurde ein konventionelles Schmiedewerkzeug (Bild 5.15) konstruiert und gefertigt. Als Werkzeugstahl wurde der Warmarbeitsstahl 1.2365 (X32 CrMoV 3 3) verwendet.



*Bild 5.15: Konventionelles Schmiedewerkzeug zur Beurteilung des Einflusses von modular aufgebauten Werkzeugsystemen zur Vorformung von Langteilen auf die nachfolgende Umformstufe*

Die Auslegung des konventionellen Schmiedewerkzeugs zur Fertigformung erfolgt auf Basis der Schmiedeproben des ersten Teils der Erprobung. Ziel ist es dabei, den Umformprozess so zu gestalten, dass u.U. in den Vorformstufen entstehende Abbildungen der Werkzeugteilung in der Fertigform weiter umgeformt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den Einfluss der Werkzeugteilung abgesichert zu beurteilen.

#### 5.5.4.2 Durchführung und Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Die Untersuchungen wurden auf der eingangs beschriebenen Spindelpresse durchgeführt. Das Probenmaterial wurde im Vergleich zum ersten Teil der Erprobung lediglich in der Länge modifiziert:

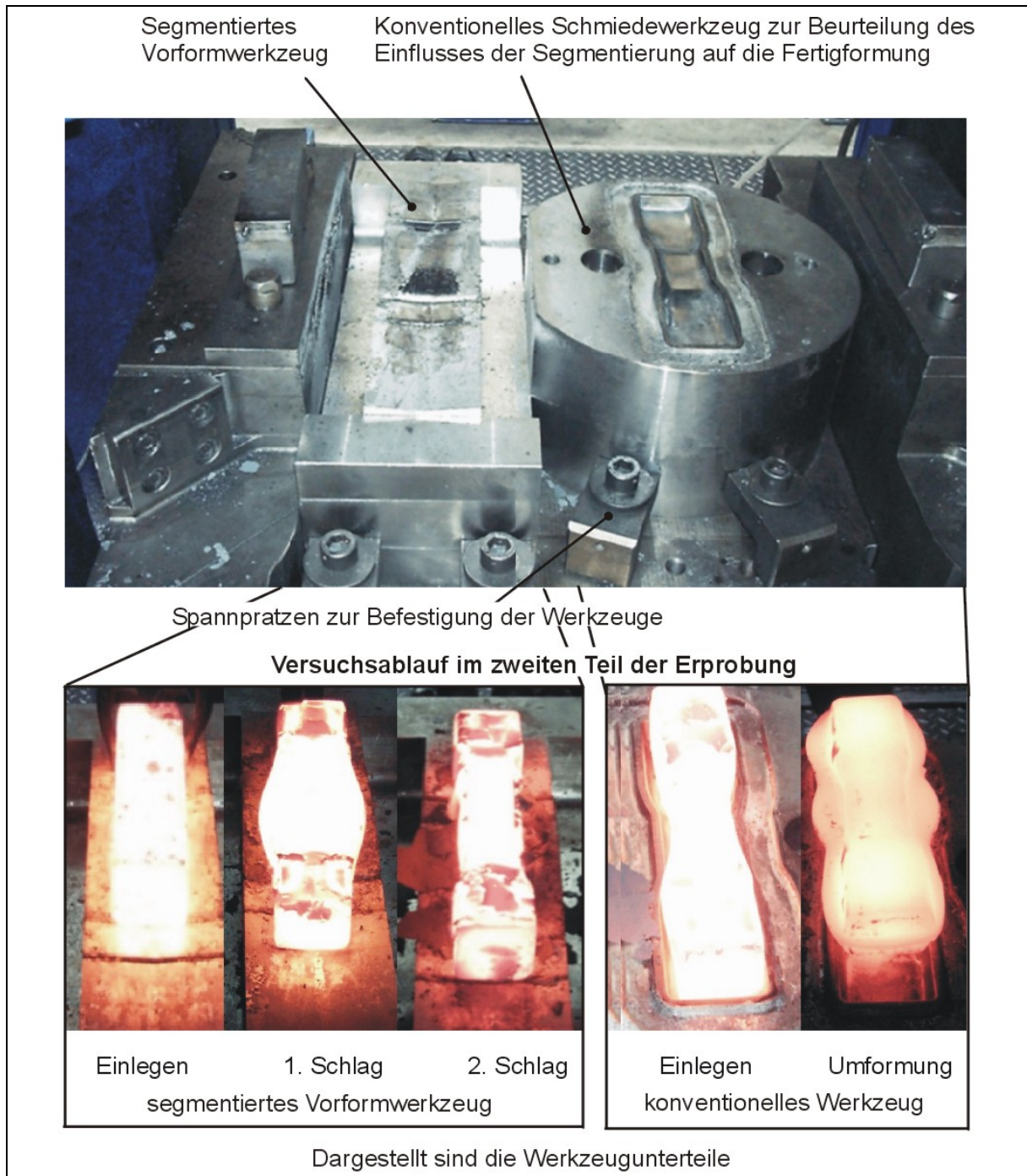
- Werkstückwerkstoff: C45
- Abmessungen: 50x50 mm Vierkant, 200 mm lang

Bild 5.16 zeigt den Versuchsaufbau. Die Proben wurden wiederum im Kammerofen auf 1250 °C erwärmt und nach der Entnahme zweimal vorgeformt. Nach dem ersten

Schlag erfolgt eine Drehung um 90°. Anschließend wurde die vorgedrückte Probe im konventionellen Schmiedewerkzeug fertig geschmiedet. Zur Beurteilung des Schmiedergebnisses wurden abschließend sowohl die Zwischenformen als auch die



fertigeschmiedeten Versuchsproben die Proben auf Schmiedefehler untersucht. Um den Einfluss der Segmentübergänge genau analysieren zu können, wurden sowohl Zwischenformen als auch fertiggeschmiedete Versuchsproben zusätzlich einer Rissprüfung unterzogen.



*Bild 5.16: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Einflusses von „Stoß-Stoß“-Übergängen zwischen den Segmenten eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

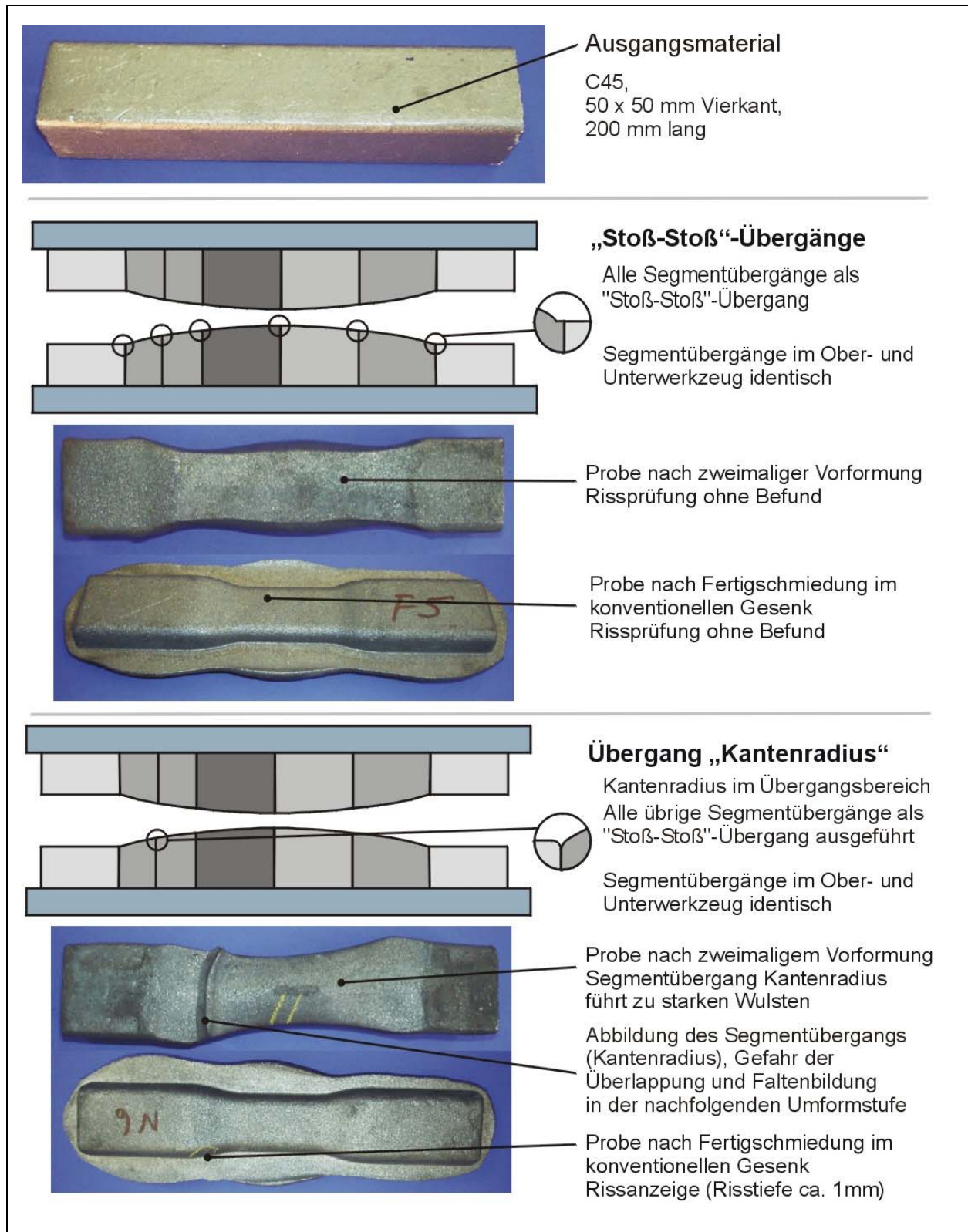
Nach ca. 100 Proben wurde der Segmentübergang an der zusätzlich angebrachte Teilung verändert. Anstelle eines „Stoß-Stoß“-Übergangs wurde an den jeweiligen Seg-

menten ein Kantenradius (R8) angebracht, um den Einfluss von Teilungen im Übergangsbereich genau beurteilen zu können.

Die Gestaltung der Segmentübergänge „Stoß-Stoß“ führt weder zu mit dem menschlichen Auge sichtbaren Fehlern, noch sind bei der Rissprüfung Schmiedefehler nachweisbar (Bild 5.17). Demgegenüber führt die Verwendung von Radien auch im Übergangsbereich zu Schmiedefehlern (Risstiefe ca. 1 mm). Der Segmentübergang *Kantenradius* zeichnet sich deutlich an der Versuchsprobe ab. Hier wirkt es sich nachteilig aus, dass infolge der Streckung und der Drehung des Werkstücks zwischen den Vorformstufen der Stirngrat nicht umlaufend ist. Dies führt zu einem schroffen Absatz, der den Schmiedefehler in der Fertigformung hervorruft.

Die Versuchsergebnisse liefern den Nachweis der technischen Machbarkeit eines geteilten Vorformwerkzeugs. Als Übergang zwischen den Segmenten erweist sich ein scharfkantiger Segmentübergang („Stoß-Stoß“) als besonders geeignet. Insgesamt lassen sich die Ergebnisse der Erprobung des entwickelten Werkzeugsystems wie folgt zusammenfassen:

- Eine Segmentierung der Stauchbahn von Vorformwerkzeugen ist technisch möglich.
- „Stoß-Stoß“-Übergänge sind unabhängig vom Umformgrad in allen Bereichen des Werkzeugs möglich.
- Im Bereich geringer Umformung ist die Gestaltung der Segmentübergänge von untergeordneter Bedeutung.



*Bild 5.17: Ergebnisse der Untersuchung zur Bestimmung des Einflusses von „Stoß-Stoß“-Übergängen (oben) und Übergang Kantenradius im Übergangsbereich (unten) zwischen den Segmenten eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*

## **6. Entwicklung eines Vorformkonzepts für das Präzisionsschmieden von Langteilen**

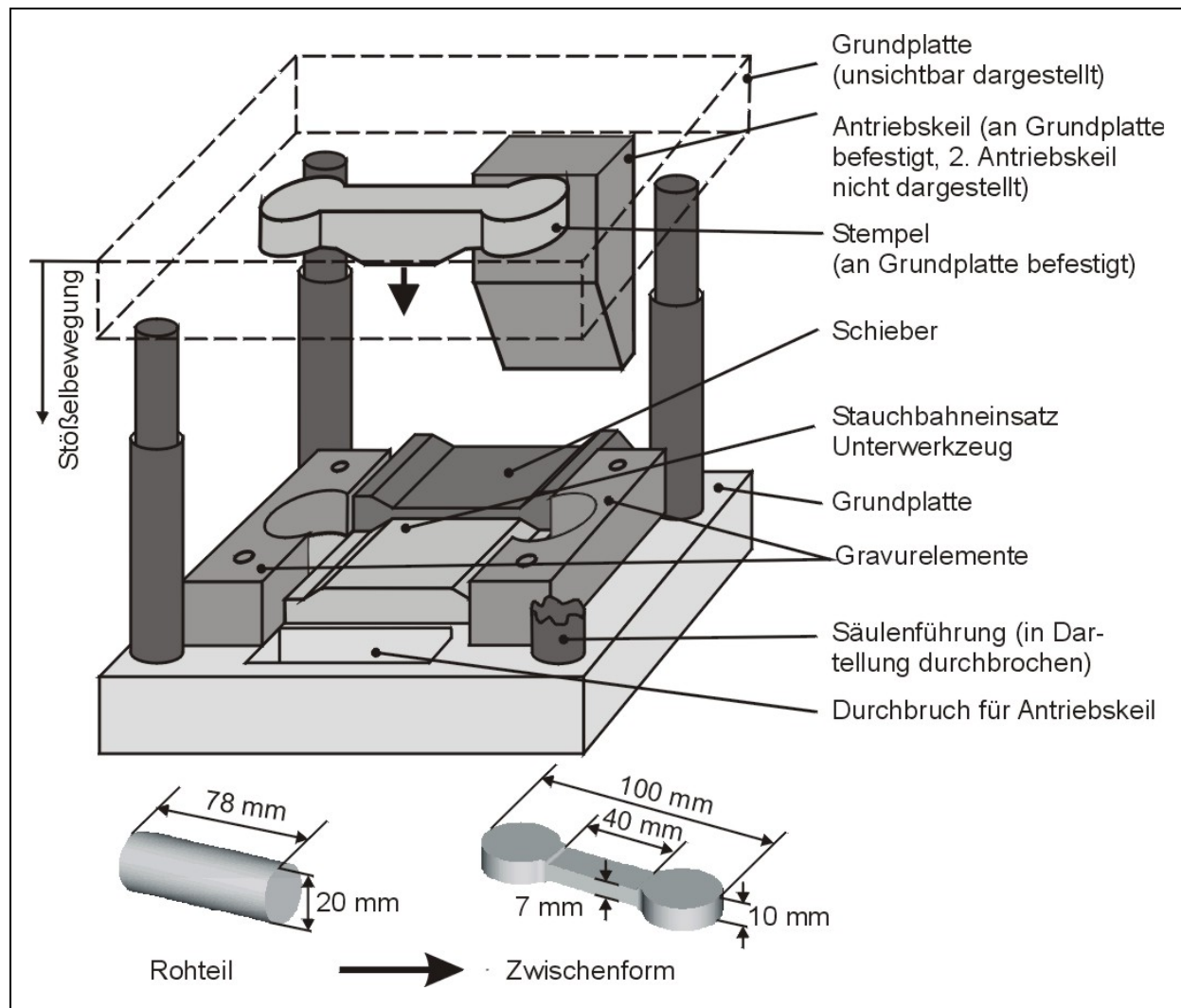
Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung und Erprobung eines Werkzeugprinzips zur Vorformung für das Präzisionsschmieden von Langteilen. Die Vorgehensweise bei der Entwicklung lehnt sich dabei ebenfalls an die VDI-Richtlinie 2221 [VDI86] an. Nach Vorstellung des zu Grunde liegenden Werkzeugprinzips und einer Aufstellung der Anforderungen an das Werkzeugkonzept werden Lösungsprinzipien für Teilfunktionen entwickelt und bewertet. Nach der Konstruktion und Auslegung eines prototypischen Werkzeugs erfolgt die Erprobung des entwickelten Verfahrens an einer pleuelähnlichen Zwischenform.

### **6.1 Grundkonzept zur mehrdirektionalen Vorformung**

Das Präzisionsschmieden von Langteilen erfordert volumengenaue Zwischenformen mit einer exakten Einsatzmasse sowie einer Masseverteilung und Querschnittsvorbildung in engen Grenzen. Gründe dafür liegen in der Forderung nach einem umformfreien Schließen der Gesenkhälften sowie dem nur noch geringen Umformgrad in der Fertigformstufe (vgl. Bild 2.7).

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Werkzeugkonzept zur Vorformung von Langteilen für das Präzisionsschmieden (Bild 6.1) beruht auf der Zusammenfassung der Arbeitsschritte Masseverteilung und Querschnittsvorbildung in einem Umformwerkzeug. Durch die Zusammenfassung dieser Arbeitsschritte lässt sich die Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Langteilen verkürzen. Ausgehend vom Rohteil wird die Zwischenform in einem Arbeitshub der Umformmaschine hergestellt. Dabei werden Masseverteilung und Querschnittsvorbildung durch eine horizontale und eine vertikale Umformung realisiert. Die horizontale Umformung erfolgt dabei über Schieber die über vertikal betätigte Keile angetrieben werden.





**Bild 6.1:** Grundkonzept zur mehrdirektionalen Vorformung für das Präzisionsschmieden von Langteilen

Analog zum Konzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen ist das Vorformwerkzeug zum Präzisionsschmieden modular aufgebaut. Durch den modularen Aufbau mit gegeneinander beweglichen Werkzeugelementen entstehen Teilungsfugen. Diese Teilungsfugen begünstigen jedoch Ungenauigkeiten, da die Arbeitstemperaturen beim Schmieden Wärmedehnungen verursachen. Nur durch ein ausreichendes Spiel kann ein Klemmen oder eine Kollision zwischen den beweglichen Elementen verhindert werden. Wird das Spiel zu groß gewählt, besteht die Gefahr einer Stirngratbildung durch u.U. in den entstehenden Spalt eindringenden Werkstoff (vgl. Bild 6.14). Aufgrund der erforderlichen Beweglichkeit der Werkzeugelemente ist eine Armierung oder Verspannung wie beim Konzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen jedoch nicht bzw. nur eingeschränkt möglich.

## 6.2 Anforderungen und Funktionsstruktur

### 6.2.1 Anforderungen

Vor dem Hintergrund des modularen Aufbaus mit gegeneinander beweglichen Werkzeugelementen ist bei der Auslegung besonderes Augenmerk auf einfachen Aufbau und Robustheit des Werkzeugs zu legen. Im Gegensatz zum Werkzeugkonzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen kommt den folgenden Anforderungen daher eine erhöhte Bedeutung zu:

- Führung von Ober- und Unterwerkzeug,
- Einsetzbarkeit des neuen Werkzeugkonzepts auf einfach wirkenden Umformmaschinen sowie
- Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzung, hohen Temperaturen und Erschütterungen trotz beweglicher Komponenten und erhöhten Genauigkeitsanforderungen.

Gemäß Arbeitsschritt 1 (AS 1) des methodischen Konstruierens werden darüber weitere Anforderung an das zu entwickelnde Vorformwerkzeug gestellt. Das neue Werkzeugkonzept soll eine Verkürzung der Prozesskette durch die Substitution der Teilprozesse *Walzen* und *Anstauchen* ermöglichen.

### 6.2.2 Funktionsstruktur

Aus den Anforderungen an das Werkzeugprinzip zur mehrdirektionalen Vorformung ergibt sich die Funktionsstruktur (vgl. AS 2) mit folgenden, wesentlichen Teilfunktionen:

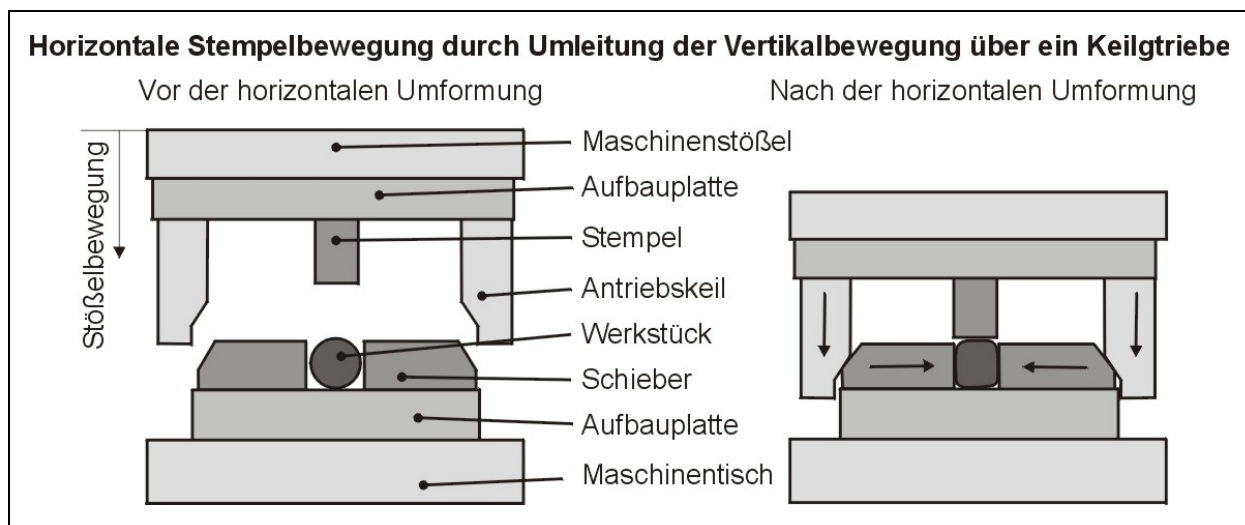
- Realisierung einer vertikal wirkenden Umformkraft (vertikaler Antrieb),
- Realisierung einer horizontal wirkenden Umformkraft (horizontaler Antrieb),
- Entkopplung der vertikalen und horizontalen Umformbewegungen,
- Schließen des modular aufgebauten Werkzeugs,
- Positionieren von Werkzeugober- und Unterteil,
- Führen der beweglichen Werkzeugelemente während der Umformung,
- Befestigung der Gravurelemente sowie
- Ausstoßen der Zwischenform.

### 6.2.3 Realisierung des horizontalen Antriebs

Die Realisierung der horizontalen Umformung erfolgt über Schieber, die durch vertikal betätigte Keile angetrieben werden. Ein Keilgetriebe (Bild 6.2) bietet zur Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung in einen horizontalen Schieberantrieb zahlreiche Vorteile.

Keile sind durch ihre einfache Geometrie besonders robust und bieten somit eine hohe Prozesssicherheit. Sie sind einfach und mit geringem Aufwand herstellbar. Aufgrund ihres einfachen Aufbaus wird der Zusammenbau sowie der Rüstvorgang in der Maschine erleichtert.

Der Antrieb erfolgt über das Werkzeugoberteil. Über eine Veränderung der vertikalen Lage am Maschinenstößel, die beispielsweise mit verschiedenen langen Halterungen realisierbar ist, können die Keilpaare zu beliebiger Zeit in Eingriff gebracht werden. Eine gute Einstellbarkeit der zeitlichen Entkopplung ist somit gewährleistet.



*Bild 6.2: Realisierung der horizontalen Umformbewegung durch Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung über ein Keilgetriebe*

## 6.2.4 Werkzeugkonzepte zur Steuerung der Umformbewegungen

### 6.2.4.1 Steuerung der Umformreihenfolge

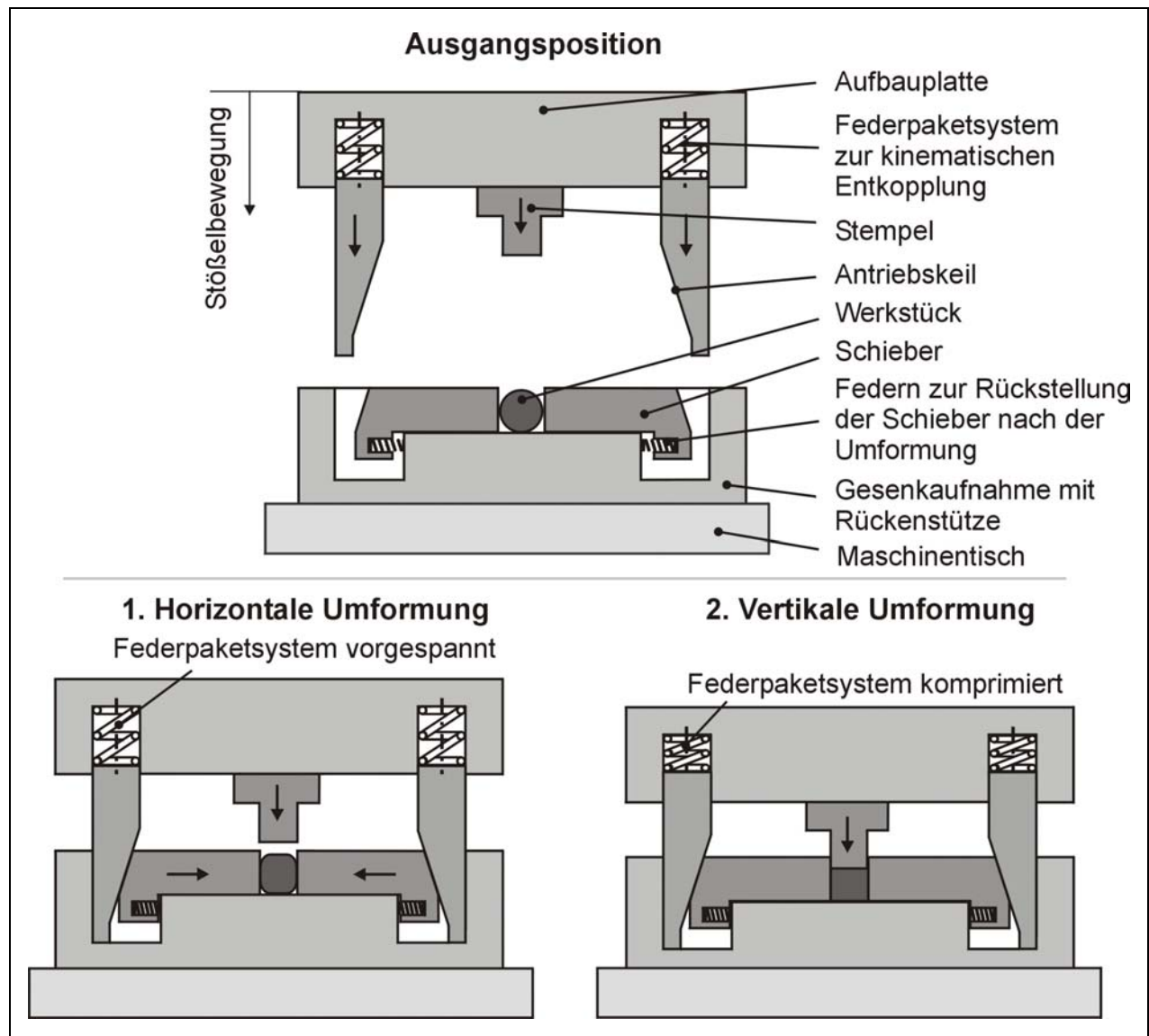
Für das Grundkonzept der mehrdirektionalen Vorformung ist eine Kombination aus vertikaler und horizontaler Vorformung erforderlich. Die vertikale Bewegung soll mit einem Stempel erfolgen, der das Höhen- bzw. Dickenprofil der Zwischenform ausformt. Aufgabe der Schieber ist es, durch eine Reduzierung des Querschnitts im Mittenbereich eine Schaftkontur zu erzeugen sowie eine Verdrängung des Materials in Richtung der Bauteillängsachse an die Werkstückenden zu bewirken.

Grundsätzlich bieten sich folgende Möglichkeiten der zeitlichen Abfolge für die Werkzeugbewegungen an:

- Vertikale Umformung nach Abschluss der horizontalen Umformung (Variante A, vgl. Bild 6.3),
- Horizontale Umformung nach Abschluss der vertikalen Umformung (Variante B, vgl. Bild 6.4).

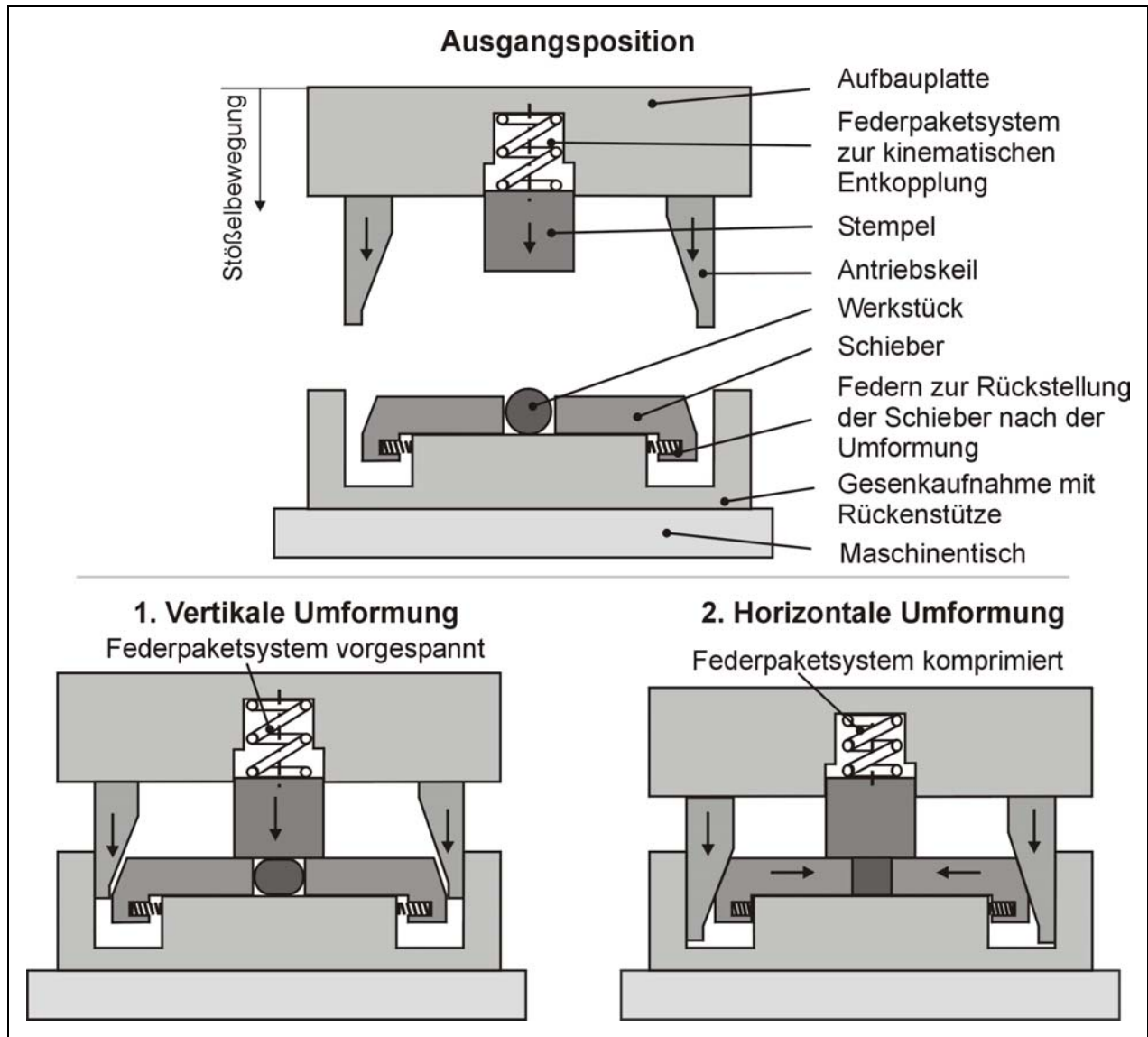
Darüber hinaus ist auch eine Überlagerung der Bewegungsabläufe denkbar, die jedoch die Komplexität des Werkzeugs stark erhöht und daher nicht weiter betrachtet wird.

Das Werkzeugkonzept der Variante A (Bild 6.3) sieht vor, erst ein horizontales Stauchen zur Stoffverdrängung aus der Mitte des Bauteils über die Schieber vorzunehmen und vollständig abzuschließen. Im Anschluss daran erfolgt über den vertikal wirkenden Stempel die Ausformung des Höhen- bzw. Dickenprofils.



*Bild 6.3: Werkzeugkonzept mit Keilgetriebe zur vertikalen Umformung nach Abschluss der horizontalen Umformung (Variante A), das für die Erprobung realisiert wurde (vgl. Bild 6.9 u. Bild 6.10)*

Im Rahmen des Werkzeugkonzepts der Variante B (Bild 6.4) wird zunächst die vertikale Umformung eingeleitet und vollständig abgeschlossen. Im Anschluss daran wird die horizontale Umformung durchgeführt.



*Bild 6.4: Werkzeugkonzept mit Keilgetriebe zur horizontalen Umformung nach Abschluss der vertikalen Umformung (Variante B)*

#### 6.2.4.2 Bewertung der Werkzeugkonzepte

Der Vorteil von Variante A (vgl. Bild 6.3) liegt darin, dass im Vergleich zu Variante B (vgl. Bild 6.4) wesentlich geringere Horizontalkräfte zur Umformung erforderlich sind. Dies führt zu geringeren Belastungen an den Schiebern sowie den wirkenden Keilflächen. Ursache dafür ist, dass während der horizontalen Umformung das Gesenk in vertikaler Richtung noch geöffnet ist und daher das Material in vertikaler Richtung ungehindert steigen kann.

Nachteilig an Variante B (vgl. Bild 6.4) ist, dass nach Abschluss der vertikalen Umformung und der damit einhergehenden Querschnittsvorbildung das verbleibende Gravurvolumen verringert ist, so dass sich der Umformwiderstand infolge des verengten Querschnitts für die horizontale Umformung erhöht. Dies führt zu erheblich gesteigerten

Horizontalkräften und einer damit verbundenen erhöhten Beanspruchung der Werkzeugkomponenten.

Neben der Werkzeugbelastung wird die Entscheidung, welches Werkzeugprinzip zum Einsatz kommt, stark von den geometrischen Anforderungen des Fertigteils und den daraus abgeleiteten Anforderungen der Zwischenform beeinflusst. Hier sind insbesondere der maximal erforderliche Querschnittsunterschied sowie der minimale Querschnitt der Zwischenform von Bedeutung. Darüber hinaus beeinflussen die konstruktive Auslegung der Umformstempel sowie die Geometrie der Ausgangsform (Rohteil) die resultierenden Umformbelastungen sowie die erforderlichen Verfahrenswege des Stempels und der Schieber.

Die Festlegung des Werkzeugprinzips kann daher nur im Einzelfall getroffen werden. FEM-Simulationen (vgl. Bild 6.6 u. Bild 6.7) können den Entscheidungsprozess dabei unterstützen.

#### 6.2.4.3 Kinematische Entkopplung

Die Entkopplung der horizontalen und vertikalen Bewegung lässt sich mit Hilfe von Federelementen realisieren, die je nach Verfahrensvariante entweder im Keilgetriebe (Variante A, vgl. Bild 6.3) oder im Stempel (Variante B, vgl. Bild 6.4) angeordnet sind. Vorteil dieses Prinzips ist, dass sich das Werkzeug damit auf einfach wirkenden Pressen einsetzen lässt.

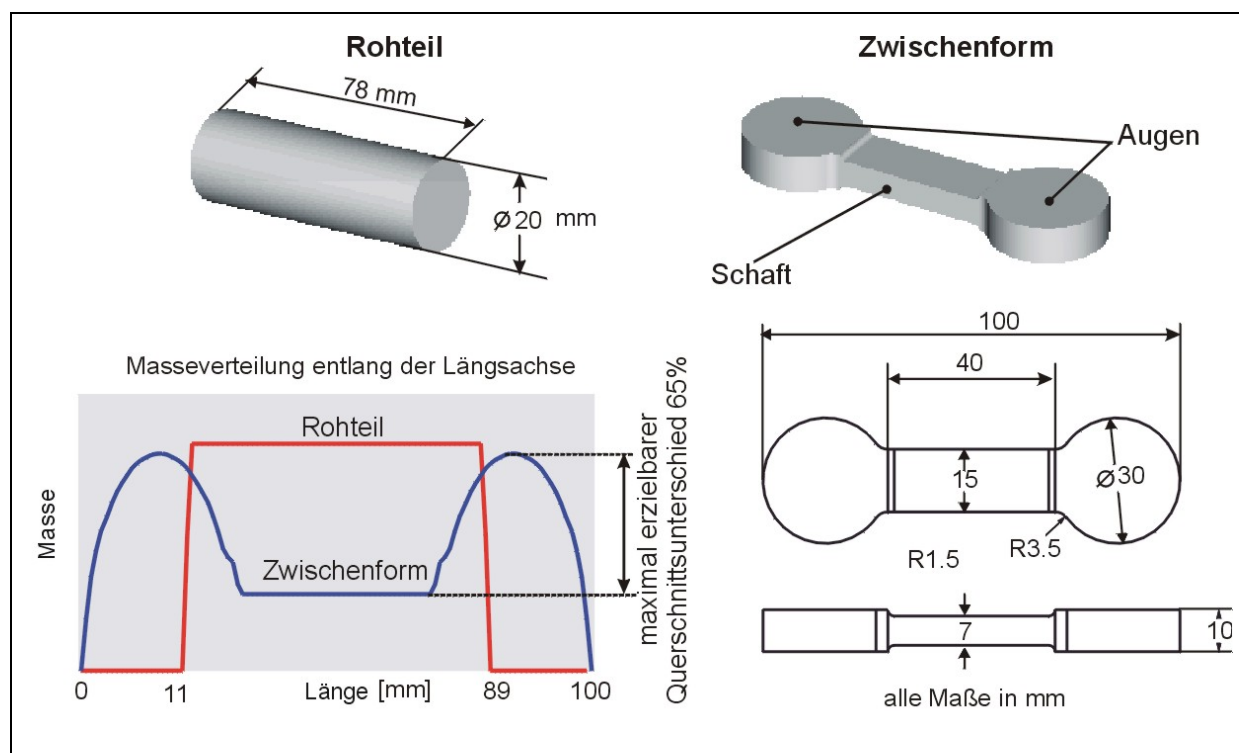
Die Federelemente müssen drei Anforderungen genügen. Zum einen müssen sie die Relativbewegung zwischen den einzelnen Werkzeugkomponenten zueinander gewährleisten. Zum anderen müssen sie je nach Werkzeugvariante die erforderlichen Umformkräfte entweder während der horizontalen (Variante A) oder der vertikalen Umformung (Variante B) bereitstellen. Darüber hinaus müssen im Rahmen von Variante A die erforderliche Schließkraft der Schieber während der vertikalen Umformung gewährleisten, um eine Öffnung der Werkzeugelemente zu verhindern. Für Variante B müssen sie während der horizontalen Umformung die Schließkraft für den Stempel bereitstellen. Standardmaschinenelemente, wie Gasdruck- oder Tellerfedern bieten sich für diese Aufgaben an, da hydraulische Lösungen im Allgemeinen zu aufwändig sind.

## 6.3 Konzeption und Konstruktion des Vorformwerkzeugs

### 6.3.1 Beschreibung und Begründung der Beispielgeometrie

Die Konstruktion des prototypischen, mehrdirektionalen Vorformwerkzeugs, das auch für die anschließende Erprobung genutzt wird, erfolgt auf Basis einer pleuelähnlichen Zwischenform. Die gewählte Beispielgeometrie weist im mittleren Bereich eine große Querschnittsreduzierung sowie Stoffanhäufungen an den Enden auf. Entlang der Längsachse findet ein symmetrischer Materialfluss statt. Bild 6.5 zeigt die gewählte Geometrie sowie das zugehörige Masseverteilungsschaubild. Der maximale Quer-

schnittsunterschied zwischen dem größten Querschnitt im Bereich der Augen ( $300 \text{ mm}^2$ ) und dem Steg ( $105 \text{ mm}^2$ ) beträgt 65%.



**Bild 6.5:** Für die Erprobung des mehrdirektionalen Vorformwerkzeugs gewählte Geometrie von Ausgangsform und Zwischenform (oben) und zugehöriges Masseverteilungsschaubild (unten)

Die Verfahrensgrenze des Vorformverfahrens für das Präzisionsschmieden von Langteilen liegt in der Bildung von Stirngraten an den Teilungsfugen der beweglichen Werkzeugkomponenten (vgl. Bild 6.14). Mit zunehmender Querschnittsreduktion nimmt der Gesenkinnendruck zu. Wird der Gesenkinnendruck zu hoch, kommt es zu einer Auffederung des Gesenks in horizontaler oder vertikaler Richtung. Durch die Auffederung entsteht ein Spalt, in den während der Umformung Material eindringen kann (vgl. Bild 7.6, oben). Ein so entstehender Stirngrat muss vermieden werden, da dieser vor der Fertigformung beim Präzisionsschmieden in einem zusätzlich Arbeitsgang entfernt werden muss. Die gewählte Versuchsgeometrie bietet mit einer maximal möglichen Querschnittsreduktion das Potenzial, durch eine schrittweise Erhöhung der Querschnittsreduktion diese Verfahrensgrenze zu bestimmen.

### 6.3.2 Festlegung der Umformreihenfolge

Voraussetzung für die Auslegung des Werkzeugs ist die Festlegung der Umformreihenfolge (Variante A oder Variante B). Maßgeblich für die Festlegung der



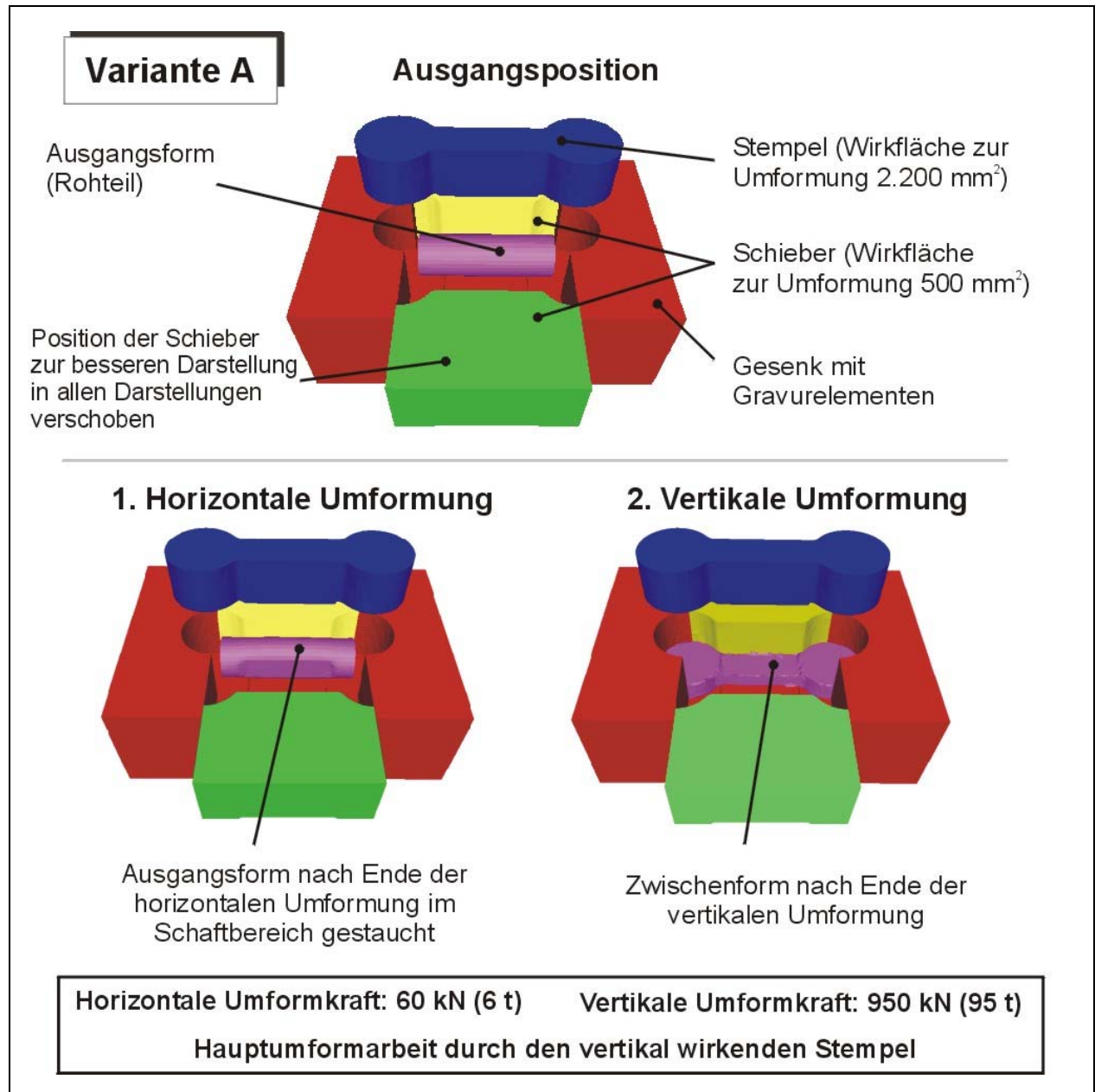
Umformreihenfolge ist die Kenntnis der jeweils maximalen Umformkräfte. Diese werden nachfolgend für die pleuelähnliche Beispielgeometrie (vgl. Bild 6.5) mit Hilfe der FEM bestimmt.

Zur Abschätzung der jeweils wirkenden Umformkräfte werden die für die Auslegung wichtigen Grenzsituationen betrachtet. Die Kräfte sind jeweils dann maximal, wenn der Stempel bzw. die Schieber ihre Endposition erreicht haben. Zur Bestimmung der Umformkräfte werden die Umformungen mit den in Frage kommenden Werkzeugvarianten mit Hilfe des 3-D-FEM-Programms Forge3 der Fa. Transvalor simuliert. Die genaue Geschwindigkeit der Schieber kann erst nach Bestimmung des Keilwinkels  $\alpha$  bestimmt werden. Für die Berechnung der Umformkräfte mit Hilfe der FEM wird eine Horizontalgeschwindigkeit  $v_x = 90 \text{ mm/s}$  zu Grunde gelegt. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die Parameter der Simulation.

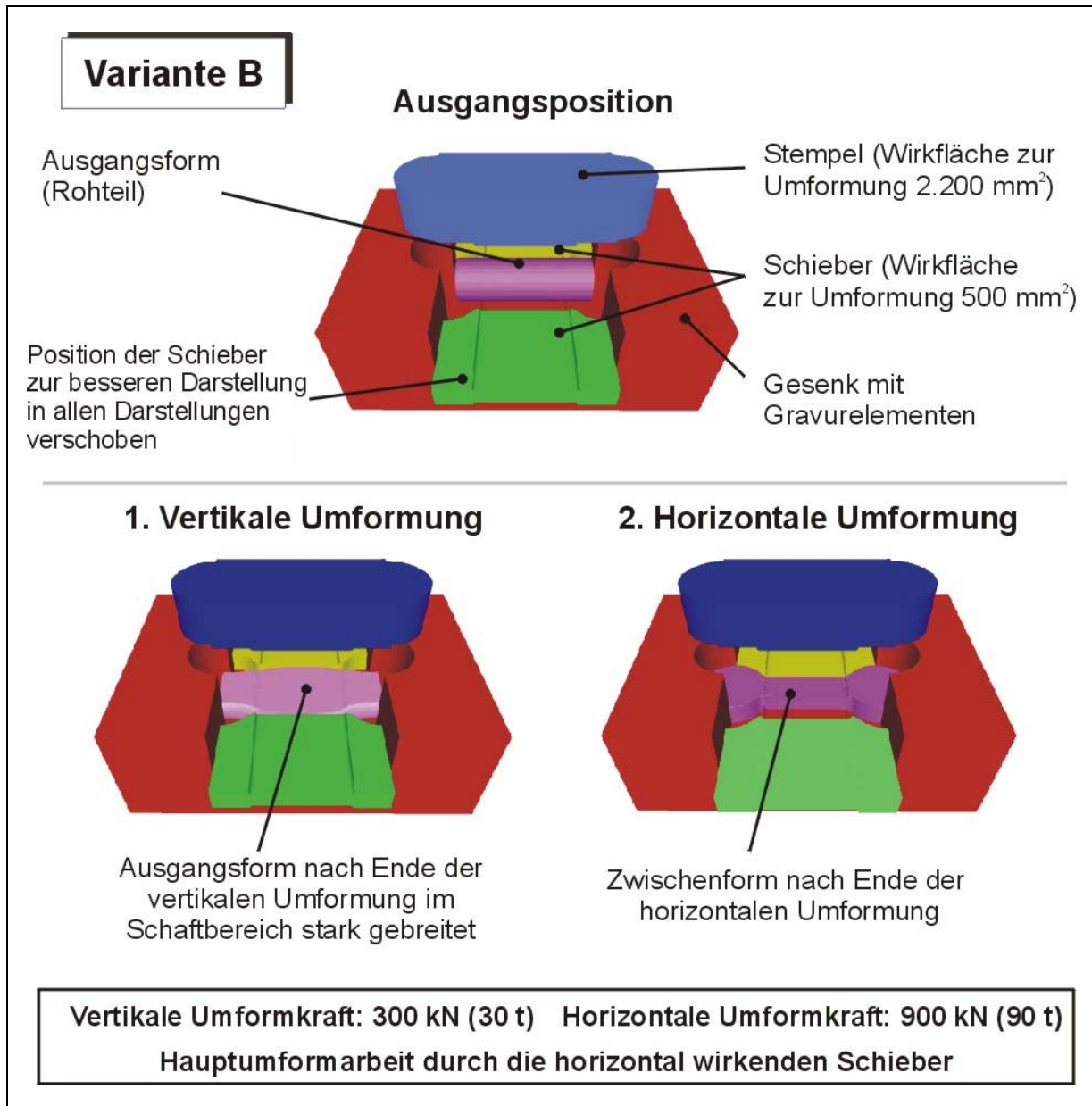
Parameter	Einstellung
Rohteiltemperatur	$T_R = 1250 \text{ °C}$
Werkzeugtemperatur	$T_{Wz} = 200 \text{ °C}$
Geschwindigkeit des Stempels	$v_y = 250 \text{ mm/s}$
Geschwindigkeit der Schieber	$v_x = 90 \text{ mm/s}$
Werkstückwerkstoff	C 15

*Tabelle 6.1: Parameter der Simulation zur Auswahl der Umformreihenfolge*

Bild 6.6 zeigt das Ergebnis der Simulation von Werkzeugvariante A (vertikale Umformung nach Abschluss der horizontalen Umformung), Bild 6.7 das Ergebnis der Simulation von Werkzeugvariante B (horizontale Umformung nach Abschluss der vertikalen Umformung).



*Bild 6.6: Ergebnis der Simulation von Werkzeugvariante A (vertikale Umformung nach Abschluss der horizontalen Umformung, vgl. Bild 6.3)*



*Bild 6.7: Ergebnis der Simulation von Werkzeugvariante B (horizontale Umformung nach Abschluss der vertikalen Umformung, vgl. Bild 6.4)*

In Tabelle 6.2 sind für die zur Auswahl stehenden Werkzeugkonzepte die jeweiligen Maximalwerte der Umformkräfte in vertikaler und horizontaler Richtung gegenübergestellt.

<b>Werkzeugvariante</b>	<b>Horizontale Umformkraft</b> Wirkfläche der Schieber: ca. 500 mm <sup>2</sup>	<b>Vertikale Umformkraft</b> Wirkfläche des Stempels: ca. 2.200 mm <sup>2</sup>
Variante A 1. horizontale Umformung 2. vertikale Umformung	60 kN ( $\hat{=}$ 6 t) (je Schieber)	950 kN ( $\hat{=}$ 95 t)
Variante B 1. vertikale Umformung 2. horizontale Umformung	900 kN ( $\hat{=}$ 90 t) (je Schieberl)	300 kN ( $\hat{=}$ 30 t)

*Tabelle 6.2: Ergebnis der Simulation zur Auswahl der Umformreihenfolge*

Das Ergebnis zeigt, dass die Realisierung des Vorformwerkzeugs nach Variante B im Vergleich zu Variante A zu einer ca. fünfzehn Mal größeren Umformbelastung am Schieber führt. Aufgrund der Zwischenformgeometrie steht für die Schieber eine Wirkfläche von ca. 500 mm<sup>2</sup> zur Verfügung. Dem gegenüber hat die Wirkfläche des Stempels eine Fläche von ca. 2.200 mm<sup>2</sup> und ist damit mehr als vier Mal so groß wie die der Schieber. Um eine möglichst hohe Standzeit des Werkzeugs zu erreichen, muss eine Reihenfolge gewählt werden, bei der die Belastung an den Schiebern möglichst gering ist und vom Stempel die größere Umformkraft aufgebracht wird.

Aufgrund der auftretenden Umformbelastungen wird für die prototypische Realisierung des Vorformverfahrens für das Präzisionsschmieden von Langteilen das Werkzeugprinzip nach Variante A ausgewählt. Neben einer deutlich geringeren Belastung der Schieber deutet die Simulation der Variante A gegenüber der Variante B auf einen deutlich günstigeren Materialfluss hin. Die Reihenfolge der Umformbewegungen ergibt sich somit wie folgt:

1. Durchführung der horizontalen Umformung und
2. Durchführung der vertikalen Umformung.

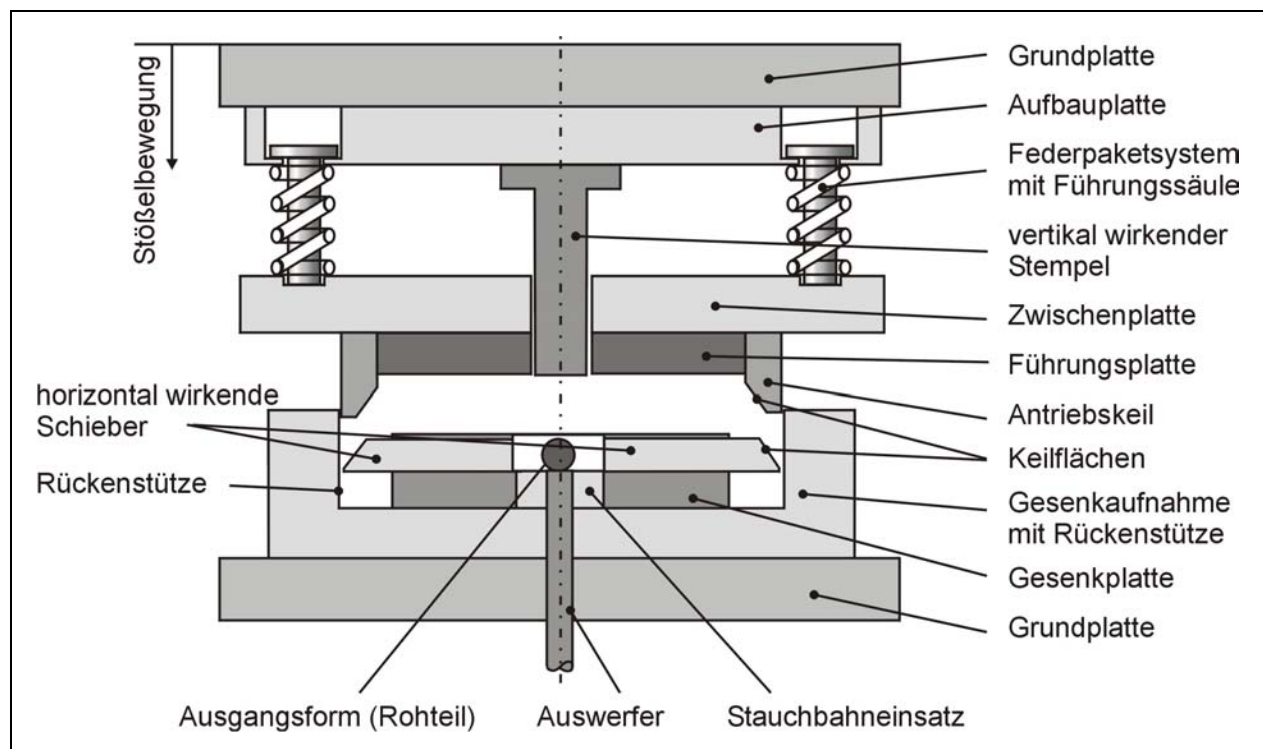
### **6.3.3 Beschreibung der Werkzeugkomponenten**

Nach Festlegung der für das zu entwickelnde Vorformwerkzeug entscheidenden Lösungsprinzipien (vgl. Arbeitsschritt 3 des methodischen Konstruierens) werden in diesem Abschnitt die verwendeten Werkzeugkomponenten beschrieben (vgl. Arbeitsschritt 4 - 6 des methodischen Konstruierens).

#### **6.3.3.1 Aufbau des Werkzeugs**

Bild 6.8 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Vorformwerkzeugs, das sich in Anlehnung an Arbeitsschritt 4 des methodischen Konstruierens in folgende Hauptkomponenten gliedert:

- Antriebskeile,
- Federpaketsystem zur kinematischen Entkopplung,
- Schieber,
- Stempel,
- Gravurelemente sowie
- Auswerfersystem.



*Bild 6.8: Prinzipieller Aufbau des nach Variante A realisierten Versuchswerkzeugs zur mehrdirektionalen Vorformung (vgl. Bild 6.3)*

Aufgabe der Antriebskeile ist es, die vertikale Bewegung des Stößels in eine horizontale Bewegung umzulenken. Die Federelemente dienen der zeitlichen Entkopplung von horizontaler und vertikaler Umformung. Eine weitere Aufgabe liegt in der Aufbringung der Schließkraft.

Aufgabe der Schieber ist eine Reduzierung des Querschnitts in der Mitte des Werkstücks sowie eine Verdrängung des Materials in Richtung der Bauteillängsachse an die Werkstückenden. Die Notwendigkeit zur horizontalen Umformung ergibt sich dadurch, dass für die Erzeugung von Zwischenformen Rohteile (Stangenabschnitte) mit einem Ausgangsdurchmesser verwendet werden müssen, der größer ist als die kleinste Breite der Zwischenform im Schaftbereich. Die Verwendung von Rohteilen mit einem Durchmesser, welcher der kleinste Breite der Zwischenform entspricht, ist nicht möglich, da dann aufgrund des erforderlichen Volumens für die Zwischen- bzw. Endform das Roh-

teil länger als die Länge der Zwischenform sein müsste. Die Erzeugung der gewählten Zwischenformgeometrie ist daher durch eine ausschließlich vertikale Krafteinleitung nicht möglich und erfordert eine horizontale Umformung.

Mit Hilfe des Stempels kommt es nach Abschluss der horizontalen Umformung zu einem weiteren Materialfluss zu den Werkstückenden sowie zu einer Ausformung des Höhen- bzw. Dickenprofils. Die Gravurelemente werden benötigt, um zusammen mit den Schiebern, der unteren Stauchbahn sowie dem Stempel ein geschlossenes Gesenk für den Vorformprozess zu bilden.

Zur Entnahme des Werkstücks nach der Umformung dient ein im Werkzeug integrierter Auswerfer sowie Rückholfedern für die Schieber, um diese nach Abschluss des gesamten Umformprozesses in die Ausgangsstellung zurückzusetzen.

### 6.3.3.2 Oberwerkzeug

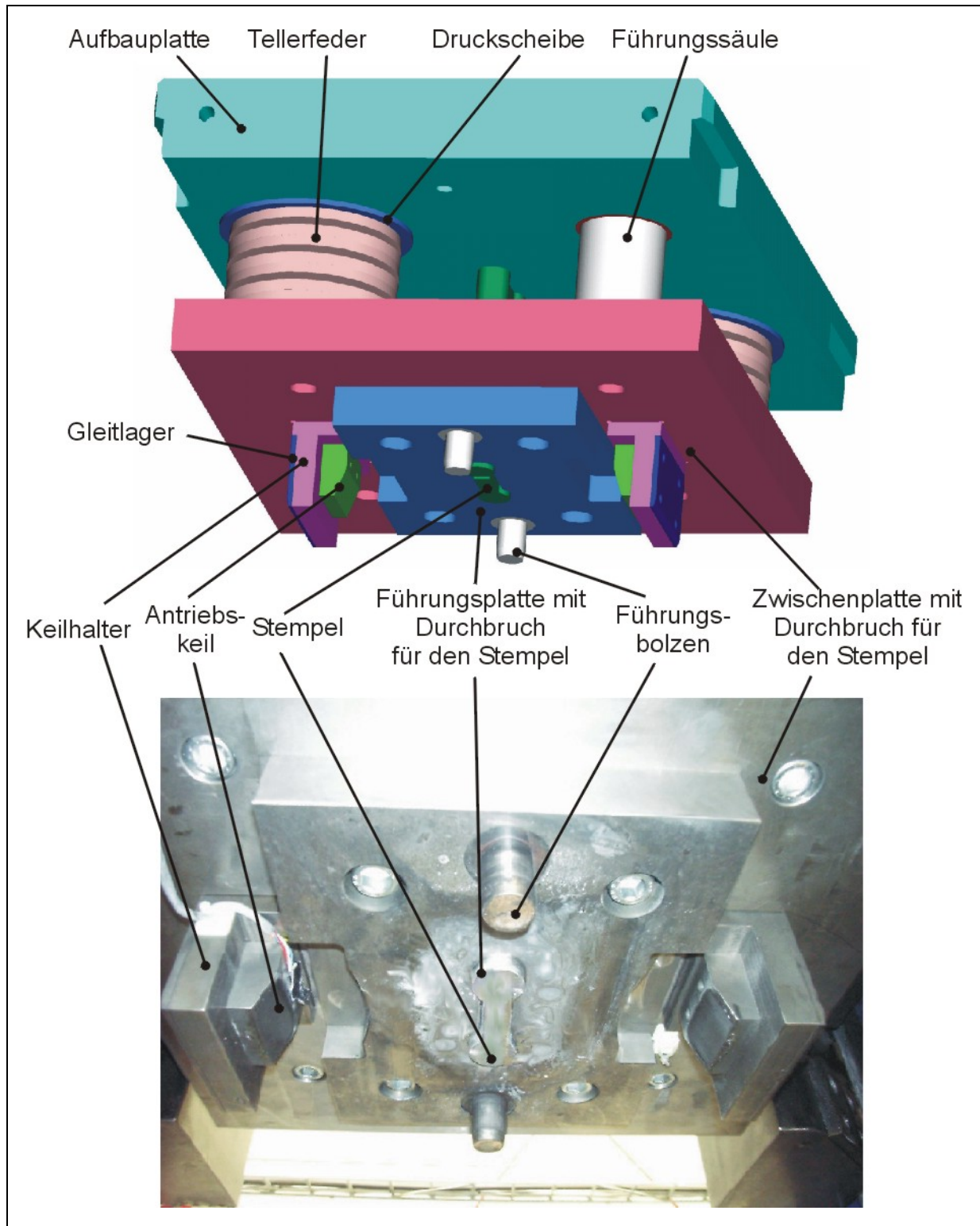
Bild 6.9 zeigt den Aufbau des Oberwerkzeugs. Auf der Aufbauplatte ist der Stempel kraftschlüssig befestigt. Die Befestigung der Keile erfolgt kraftschlüssig auf einer Zwischenplatte, die wiederum über vier Säulen geführt und auf insgesamt vier Federpaketen, die jeweils aus sieben wechselsinnig angeordneten Tellerfedern bestehen, gelagert ist. Aufgabe des Federpaketes ist es, die zeitliche Entkopplung der horizontalen von der vertikalen Umformung zu ermöglichen sowie die erforderlichen Kräfte für die horizontale Umformung bereitzustellen. Darüber hinaus müssen sie die erforderliche Schließkraft der Schieber während der vertikalen Umformung erzeugen, um eine Öffnung der Werkzeugelemente zu verhindern.

Die Führung von Ober- und Unterwerkzeug erfolgt über Führungsbolzen, die in einer Führungsplatte befestigt sind. Die Führungsplatte, die kraftschlüssig mit der Zwischenplatte verbunden ist, dient zusätzlich zur Führung des Stempels während der vertikalen Umformung sowie zum Schließen des Gesenks nach Abschluss der horizontalen Umformung. Mit dem Schließen des Gesenks kommen die Antriebskeile zum Stillstand, so dass die Führungsplatte gleichzeitig als Wegbegrenzung (Anschlag) für die vertikale Keilbewegung genutzt wird.

### 6.3.3.3 Unterwerkzeug

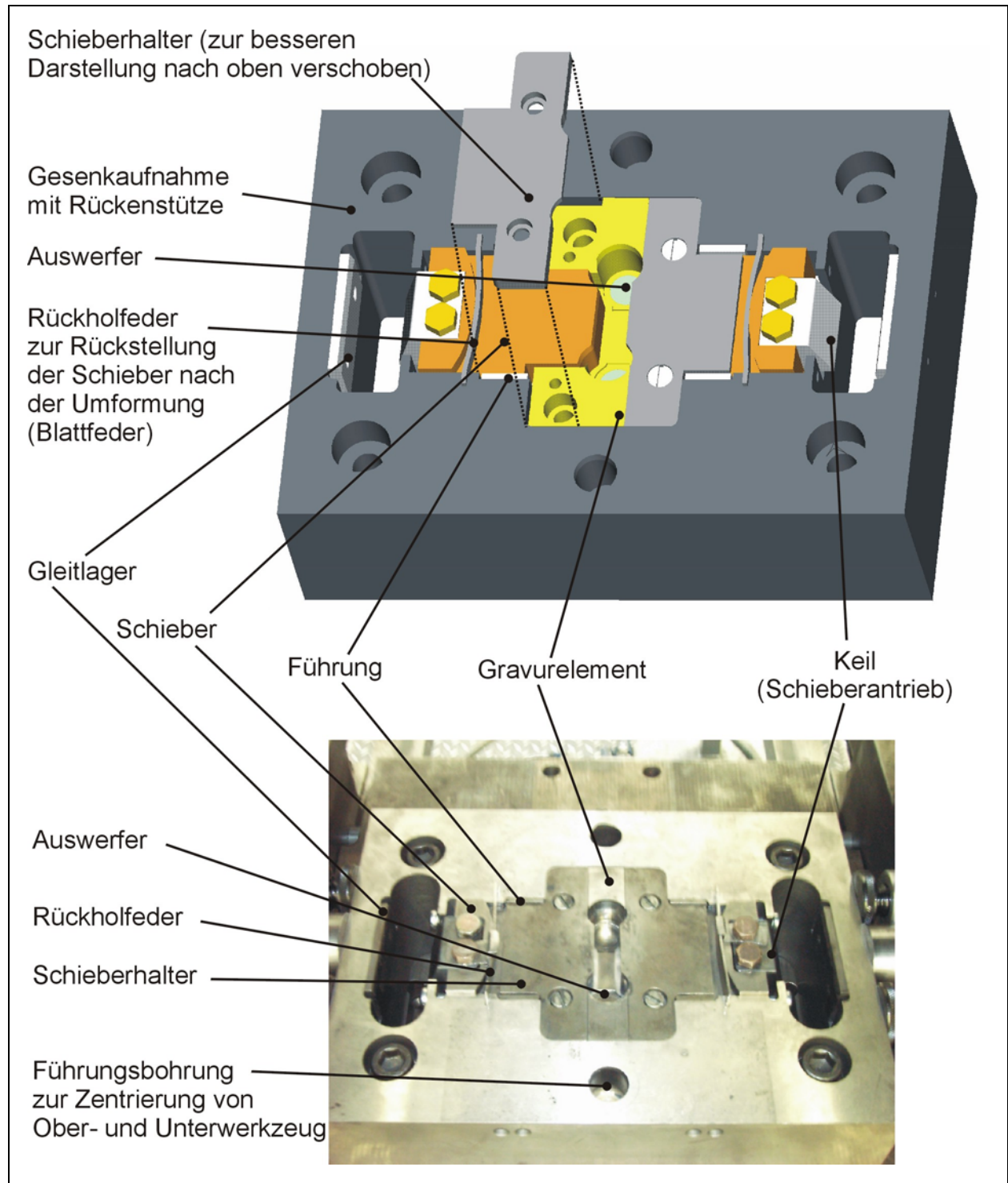
Bild 6.10 zeigt das Unterwerkzeug. Gravurelemente, Schieber, Gleitlager, Führung der Keilhalter und Auswerfer sind in einer Gesenkplatte angeordnet. Die Gesenkplatte ist wiederum auf der Grundplatte kraftschlüssig befestigt. Die Führungen der Schieber ermöglichen neben der Hauptfunktion *Führung* eine exakte Positionierung sowie die Einstellung der Spalte zwischen Schiebern und Gravurelementen. Die Schieber sind zweiteilig ausgeführt, so dass die Keilflächen zur Umleitung der Vertikalbewegung austauschbar sind. Rückholfedern zwischen Schiebern und Gesenkplatte ermöglichen ein Zurückschieben der Schieber in die Ausgangsposition nach Abschluss der Umformprozesse. Die Auswerfer erlauben eine leichte Entnahme des Werkstücks nach dem Öffnen des Gesenks.





**Bild 6.9:** Aufbau des Oberwerkzeugs des realisierten Versuchswerkzeugs zur mehrdirektionalen Vorformung (realisiert nach Variante A, vertikale Umformung nach Abschluss der horizontalen Umformung, vgl. Bild 6.3)





*Bild 6.10: Aufbau des Unterwerkzeugs des realisierten Versuchswerkzeugs zur mehrdirektionalen Vorformung (realisiert nach Variante A, vertikale Umformung nach Abschluss der horizontalen Umformung, vgl. Bild 6.3)*

### 6.3.3.4 Auslegung des Keilgetriebes

Das Keilgetriebe ermöglicht die Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung in eine horizontale Schieberbewegung. Um eine zeitliche Entkopplung der horizontalen Umformbewegung der Schieber von der vertikalen Umformbewegung des Stempels zu ermöglichen, sind die Antriebskeile wie in Kapitel 6.2.4.3 beschrieben auf je zwei Federpaketsystemen angeordnet. Dabei dürfen die Federn erst dann komprimieren, wenn die horizontale Umformung vollständig abgeschlossen ist. Es ist daher erforderlich, das Federpaketsystem entsprechend vorzuspannen. Ziel ist es, dass eine Komprimierung des Federpaketsystems erst dann eintritt, wenn die durch das Keilgetriebe erzeugte Schieberkraft ihren Maximalwert von  $F_{Horizontal} = 60 \text{ kN}$  erreicht. Die für die horizontale Umformung erforderliche Horizontalkraft  $F_{Horizontal} = 60 \text{ kN}$  wurde mit Hilfe der FEM bestimmt (vgl. Bild 6.6).

Aufgrund der gewählten Beispielgeometrie (vgl. Bild 6.5) ist ein Entkopplungsweg von  $s_E = 16 \text{ mm}$  notwendig, der sich aus der Dickenreduzierung von  $13 \text{ mm}$  (Durchmesser des Rohteils  $d_0 = 20 \text{ mm}$  zu  $h_{Schaft} = 7 \text{ mm}$  der Zwischenform) sowie der Materialanhäufung nach der horizontalen Umformung von  $3 \text{ mm}$  zusammensetzt.

Die Federpaketsysteme bestehen aus je sieben Tellerfedern nach DIN 2093 der Gruppe 3, Reihe A (harte Federn) mit einem Außendurchmesser von  $D_E = 160 \text{ mm}$ , einem Innendurchmesser von  $D_i = 82 \text{ mm}$  und einem empfohlenen Federweg  $s = 2,63 \text{ mm}$  [NN02]. Wenn der Federweg  $s_F$  jeder Tellerfeder maximal  $75 \%$  der Ausgangshöhe  $h_0$  betragen soll, steht aufgrund der Anordnung der Federpaketsysteme zu Federsäulen insgesamt folgender Federweg  $s_F$  zur Verfügung:

$$s_F = 7 \times s = 7 \times 2,63 \text{ mm} = 18,41 \text{ mm} \quad (\text{Formel 6.1})$$

Damit ergibt sich der für die Vorspannung zur Verfügung stehende Federweg  $s_V$ :

$$s_V = s_F - s_E = 18,41 \text{ mm} - 16 \text{ mm} = 2,41 \text{ mm} \quad (\text{Formel 6.2})$$

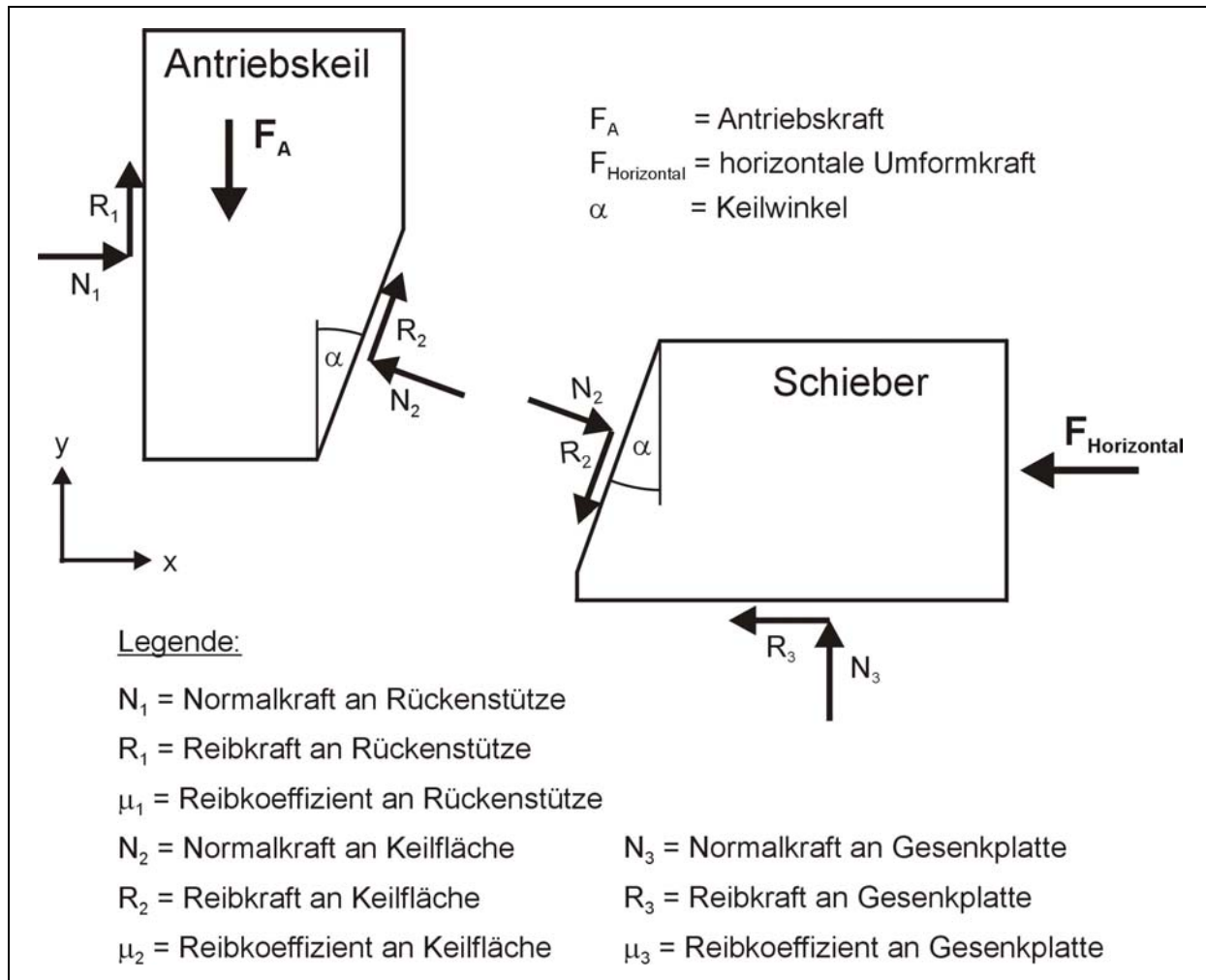
Damit ergibt sich die Vorspannkraft  $F_{Vor}$  eines Federpaketsystems, das aus  $i = 7$  wechschelchichtig angeordneten Tellerfedern besteht, zu:

$$F_{Vor} = c \times \frac{s_V}{i} = 52.851 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \times \frac{2,41 \text{ mm}}{7} = 18.196 \text{ N} \quad (\text{Formel 6.3})$$

Da für jeden Antriebskeil zwei Federpaketsysteme zur Verfügung stehen, ergibt sich die zur Verfügung stehende Antriebskraft  $F_A$  je Antriebskeil zu:

$$F_A = 2 \times F_{Vor} = 2 \times 18.196 \text{ N} = 36.392 \text{ N} \quad (\text{Formel 6.4})$$

Bild 6.11 zeigt die am Keilgetriebe zur Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung wirkenden Kräfte unter Berücksichtigung der realen Reibverhältnisse. Die Auslegung des Keilgetriebes bzw. des erforderlichen Keilwinkels  $\alpha$  erfolgt nun unter der Forderung, dass bei einer zur Verfügung stehenden (vertikal wirkenden) Antriebskraft am Antriebskeil von  $F_A = 36,4 \text{ kN}$  mindestens eine horizontale Umformkraft am Schieber von  $F_{Horizontal} = 60 \text{ kN}$  zur Verfügung stehen muss.



*Bild 6.11: Darstellung der am Keilgetriebe wirkenden Kräfte unter Berücksichtigung der Reibverhältnisse*

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

$$F_A = R_1 + N_2 \sin \alpha + R_2 \cos \alpha \quad (\text{Formel 6.5})$$

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

$$N_1 = N_2 \cos \alpha - R_2 \sin \alpha \quad (\text{Formel 6.6})$$

Mit  $R_1 = \mu_1 N_1$  und  $R_2 = \mu_2 N_2$  ergibt sich durch Einsetzen von (6.6) in (6.5):

$$F_A = N_2 ((\mu_1 + \mu_2) \cos \alpha + (1 - \mu_1 \mu_2) \sin \alpha) \quad (\text{Formel 6.7})$$

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

$$F_{\text{Horizontal}} = N_2 \cos \alpha - R_2 \sin \alpha - R_3 \quad (\text{Formel 6.8})$$

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

$$N_3 = N_2 \sin \alpha + R_2 \cos \alpha \quad (\text{Formel 6.9})$$

Mit  $R_2 = \mu_2 N_2$  und  $R_3 = \mu_3 N_3$  ergibt sich durch Einsetzen von (6.9) in (6.8):

$$F_{\text{Horizontal}} = N_2 ((1 - \mu_2 \mu_3) \cos \alpha - (\mu_2 + \mu_3) \sin \alpha) \quad (\text{Formel 6.10})$$

Aus (6.7) und (6.10) lässt sich eine Funktion für  $F_{\text{Horizontal}}$  ableiten, die nur vom Keilwinkel und der Antriebskraft abhängig ist:

$$F_{\text{Horizontal}} = F_A \frac{N_2 ((1 - \mu_2 \mu_3) \cos \alpha - (\mu_2 + \mu_3) \sin \alpha)}{N_2 ((\mu_1 + \mu_2) \cos \alpha + (1 - \mu_1 \mu_2) \sin \alpha)} \quad (\text{Formel 6.11})$$

mit  $\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$  lässt sich (6.11) vereinfachen zu:

$$F_{\text{Horizontal}} = F_A \frac{1 - \mu_2 \mu_3 - (\mu_2 + \mu_3) \tan \alpha}{\mu_1 + \mu_2 + (1 - \mu_1 \mu_2) \tan \alpha} \quad (\text{Formel 6.12})$$

Eine Übersicht über die verwendeten Gleitreibungskoeffizienten gibt Tabelle 6.3 [MOL02].

Formelzeichen	Reibpaarung	Reibwert	Schmiermittel
$\mu_1$	„Stahl-Stahl“	0,08	Schmierpaste mit MoS <sub>2</sub> (Molybdändisulfid)
$\mu_2$	„Stahl-Stahl“	0,08	Schmierpaste mit MoS <sub>2</sub> (Molybdändisulfid)
$\mu_3$	„Stahl-Stahl“	0,12	Schmierpaste mit MoS <sub>2</sub> (Molybdändisulfid)

Tabelle 6.3: Reibwerte (Gleitreibung) am Keilgetriebe

Die Schmierung der Reibflächen mit einer Schmierpaste mit Molybdändisulfid bietet sich an, da der Reibungskoeffizient von Molybdändisulfid mit  $\mu = 0,05$  bis  $0,095$  gegenüber Graphit deutlich geringer ist. Darüber hinaus zeichnet sich Molybdändisulfid durch einen abnehmenden Reibungskoeffizienten bei steigenden Drücken und einer hohen Temperaturfestigkeit aus. Um bei der Auslegung des Keilwinkels eine möglichst große Sicherheit zu gewährleisten, werden für die Berechnung jeweils Werte im oberen Bereich angenommen. Die Keilflächen sowie die Gleitlager an den Antriebskeilen lassen sich während des Betriebs gut nachschmieren, so dass  $\mu_1 = \mu_2 = 0,08$  gesetzt werden kann. Demgegenüber ist ein Nachschmieren der Reibungsfläche während des Betriebs am Gesenkboden nicht möglich, so dass hier ein 50 % höherer Reibwert  $\mu_3 = 0,12$  angenommen wird.

Der für die oben beschriebenen Anforderungen optimale Keilwinkel  $\alpha$  lässt sich nun iterativ unter Verwendung des berechneten Wertes für  $F_A = 36,4$  kN in Formel 6.12 bestimmen. Ziel ist es dabei, dass die zur Verfügung stehende Horizontalkraft  $F_{\text{Horizontal}}$

größer ist als die mit Hilfe der FEM erforderliche horizontale Umformkraft  $F_{Horizontal} = 60 \text{ kN}$  (vgl. Bild 6.6).

Bild 6.12 zeigt den Verlauf der horizontalen Umformkraft über dem Keilwinkel mit der zuvor berechneten Antriebskraft  $F_A = 36,4 \text{ kN}$ . Die erforderliche horizontale Umformkraft von  $F_{Horizontal} = 60 \text{ kN}$  wird unter den gewählten Randbedingungen ab einem Keilwinkel von  $\alpha = 22^\circ$  erreicht. Um eine höhere Sicherheit bei der Auslegung zu gewährleisten, wird ein Keilwinkel von  $\alpha = 20^\circ$  gewählt, so dass bei der gewählten Federvorspannung eine horizontale Umformkraft von  $F_{Horizontal} = 64 \text{ kN}$  zur Verfügung steht, ohne dass die Federpaketssysteme komprimieren. Sollte diese Umformkraft im Versuchsbetrieb nicht ausreichen, besteht die Möglichkeit, über eine Erhöhung der Federvorspannung ( $s_F > 0,75 h_0$ ) eine höhere Antriebskraft und damit eine höhere horizontale Umformkraft zu realisieren.

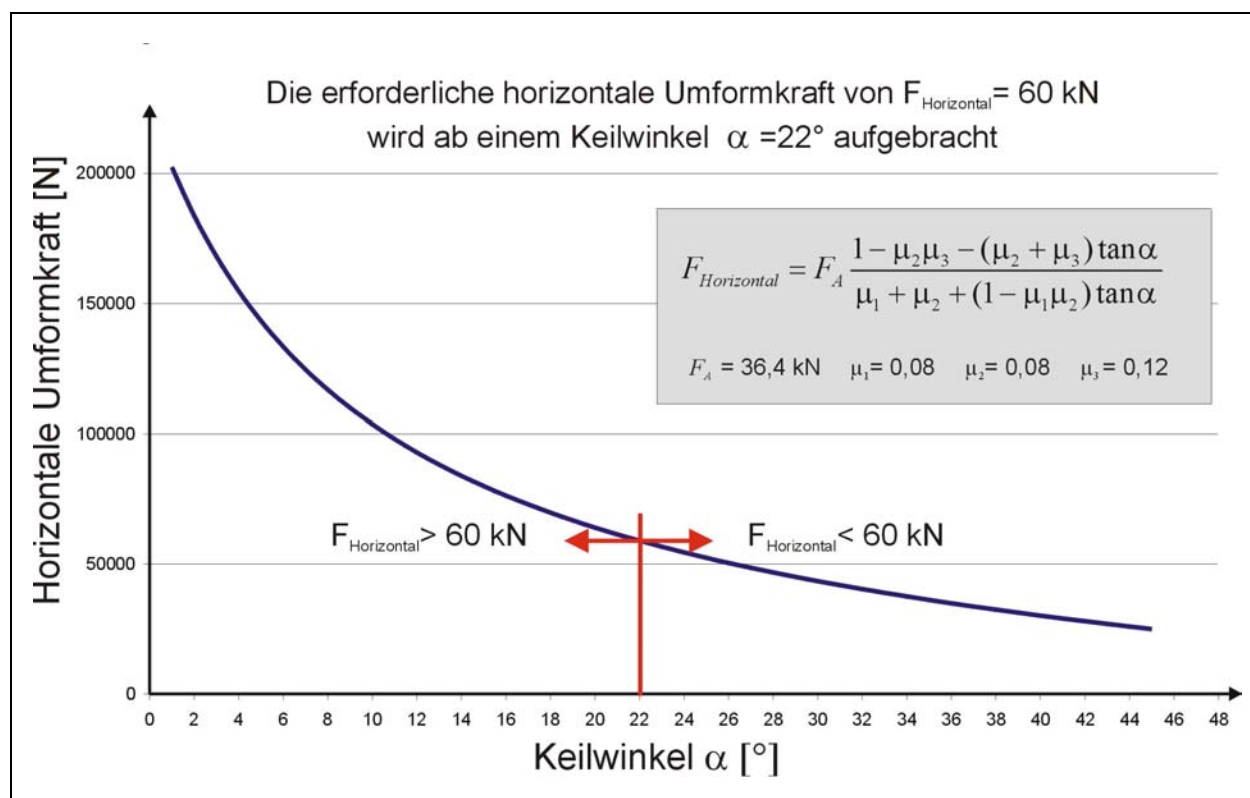


Bild 6.12: Verlauf der horizontalen Umformkraft bei konstanter Antriebskraft  $F_A$  und Variation des Keilwinkels  $\alpha$

### 6.3.3.5 Realisierung der Umlenkung

Bild 6.13 zeigt das Keilgetriebe zur Umlenkung der vertikalen Stößelbewegung in eine horizontale Bewegung im Überblick. Die Antriebskeile sind in das Oberwerkzeug (vgl. Bild 6.9) integriert und bestehen insgesamt aus Keilhalter, Keil und Führung. Die mehrteilige Ausführung des Keilsystems ermöglicht einen besonders einfachen und kostengünstigen Austausch der Wirkflächen. Die Befestigung der antreibenden Ele-

mente erfolgt auf der Zwischenplatte, die über das Federpaketsystem mit der Grundplatte verbunden ist.

Die Schieber sind Bestandteil des Unterwerkzeugs (vgl. Bild 6.10) und werden sowohl über seitliche Führungen als auch über den Schieberhalter geführt.

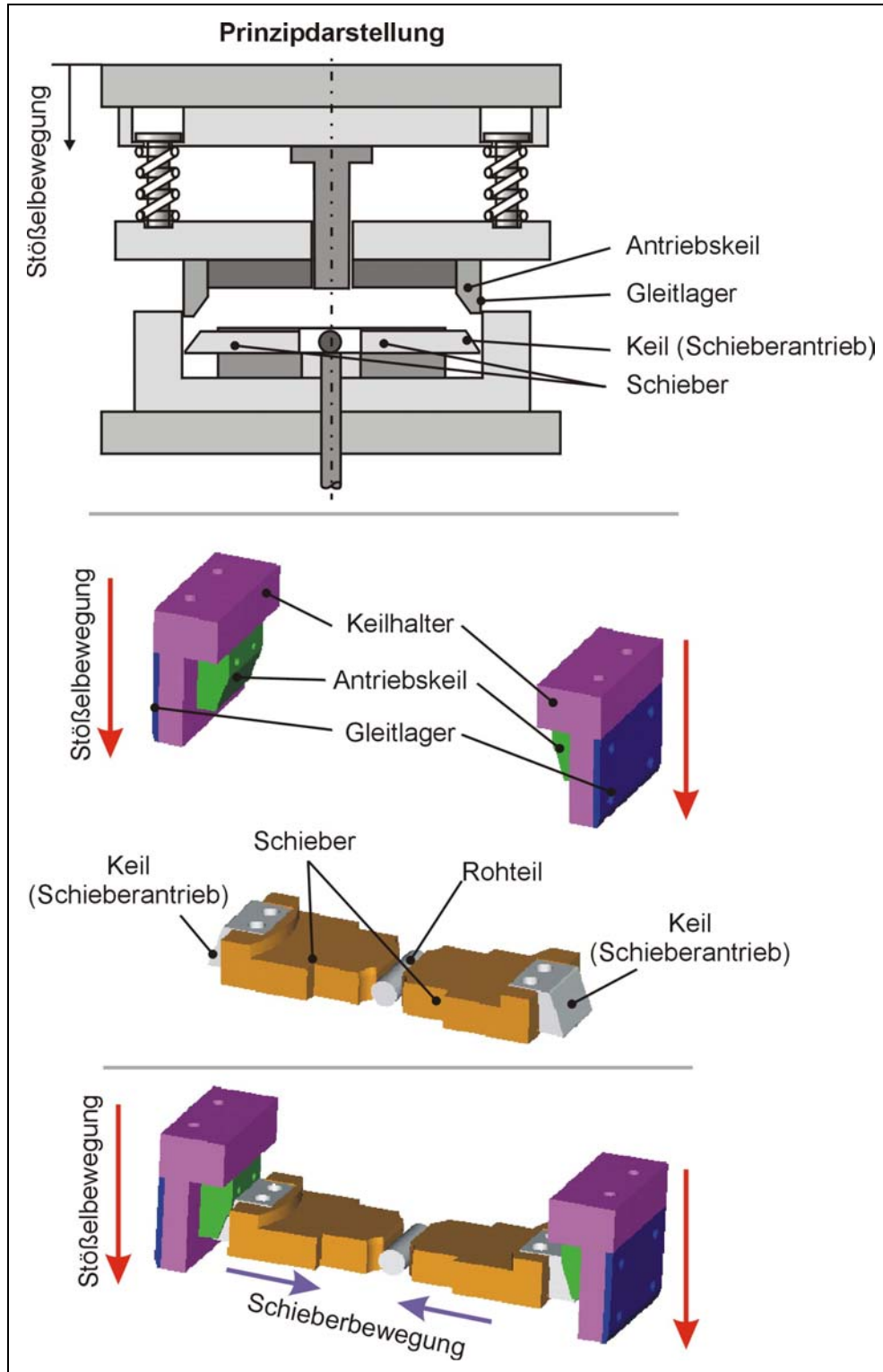


Bild 6.13: Detaildarstellung der Werkzeugkomponenten für die Horizontalbewegung (oben) und Wirkprinzip der horizontalen Umformung (unten)

#### 6.3.3.6 Funktionsweise des Werkzeugs

Während der Umformung bewegt sich die Grundplatte mit dem Oberwerkzeug in vertikaler Richtung nach unten, das Oberwerkzeug fährt mit den Keilen in das Unterwerkzeug, indem die Gleitlagerführungen, die eine reibungsarme Führung der Keilhalter ermöglichen, ineinander fahren. Durch die Vertikalbewegung der Keile werden die Schieber angetrieben, so dass das Werkstück horizontal gestaucht wird. Nach dem Aufsetzen der Führungsplatte auf dem Unterwerkzeug werden die Tellerfedern komprimiert. Es kommt zu einer Relativbewegung zwischen Zwischenplatte und Grundplatte, auf welcher der Stempel befestigt ist. Die Länge des Stempels ist so bemessen, dass erst nach Ende der horizontalen Umformung der Stempel in die Gravur eindringt und die vertikale Umformung eingeleitet wird.

## 6.4 Erprobung des Vorformverfahrens für das Präzisionsschmieden von Langteilen

### 6.4.1 Ziele und Vorgehensweise der Erprobung

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Beschreibung der Erprobung des entwickelten Vorformwerkzeugs für das Präzisionsschmieden von Langteilen.

Wie auch beim Konzept der flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen (vgl. Bild 5.1) liegt der Schwerpunkt dabei auf dem Nachweis der technischen Machbarkeit. Zusätzlich liegt ein weiteres Ziel in der Bestimmung der maximal möglichen Querschnittsreduzierung. Die Grenze der maximal möglichen Querschnittsreduzierung wird durch die Entstehung von Stirngraten an den Teilungsfugen zwischen den beweglichen Werkzeugkomponenten definiert (vgl. Bild 6.14).

Stirngrate an der Zwischenform müssen jedoch unbedingt vermieden werden, da sie beim Präzisionsschmieden zu Schmiedefehlern in Form von Überlappungen am Fertigteil führen. Die Entfernung eines Stirngrats vor der Fertigformung würde die Prozesskette um mindestens einen zusätzlichen Arbeitsschritt verlängern.

Bild 6.14 zeigt die Stirngratbildung im Schaftbereich der gewählten Beispielgeometrie, die bei vollständiger Formfüllung der zur Verfügung stehenden Gravur, d.h. bei der maximalen Querschnittsreduktion von 65%, zu beobachten ist.



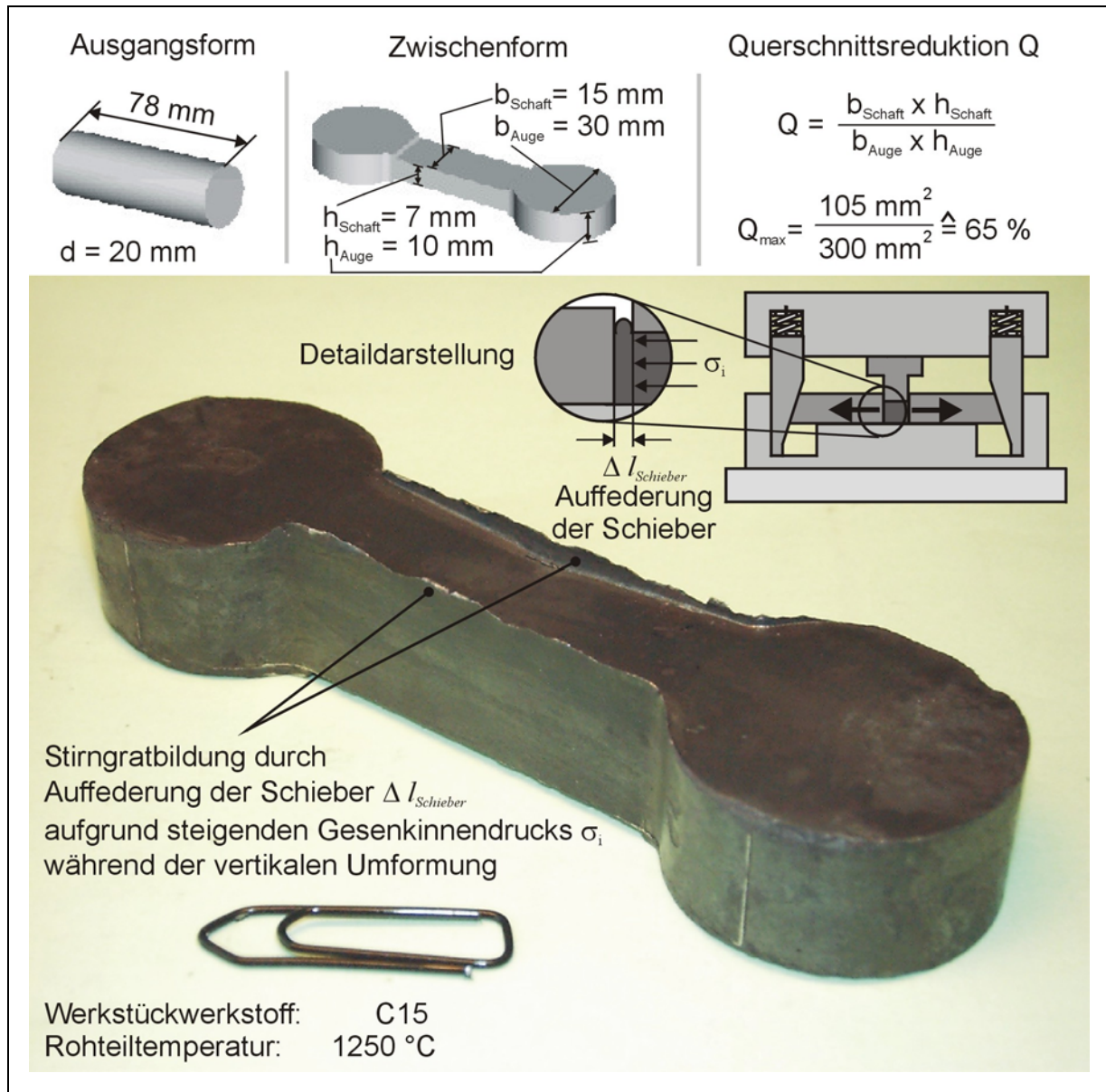


Bild 6.14: Stirngratbildung als Verfahrensgrenze der mehrdimensionalen Vorformung bei maximaler Querschnittsreduktion  $Q_{\text{max}} = 65 \%$

Für die Entstehung von Stirngraten an den Teilungsfugen zwischen den beweglichen Werkzeugkomponenten kommen folgende Ursachen in Betracht:

- Unterschiedliche Wärmedehnungen der Werkzeugkomponenten,
- Spiel zwischen Schieber und Stempel,
- Rückstellung der Schieber durch infolge des steigenden Gesenkinnendrucks entstehende Horizontalkräfte während der vertikalen Umformung sowie
- Auffederung der Schieber in horizontaler Richtung während der vertikalen Umformung.

Verfahrensbedingt sind Spalte zwischen den Schiebern und dem Stempel nicht zu vermeiden. Das Spiel zwischen Schiebern und Stempel ist notwendig, um ein Klemmen auszuschließen. Das Werkzeug wird daher so eingestellt, dass bei einer Werkzeugtemperatur von  $T_{WZ} \cong 150 \text{ °C}$  das Spaltmaß zwischen Schieber und Stempel  $s_{Spalt} = 0,05 \text{ mm}$  beträgt. Dieses Spaltmaß ermöglicht den Ausgleich von unterschiedlichen Wärmedehnungen zwischen den beweglichen Werkzeugkomponenten.

Eine Rückstellung der Schieber durch infolge des steigenden Gesenkinnendrucks entstehende Horizontalkräfte während der vertikalen Umformung kann durch eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung des Federpaketsystems verhindert werden. Dabei sind die Federpaketsysteme so auszulegen, dass die resultierende Federkraft am Ende der vertikalen Umformung größer ist als die durch das Keilgetriebe in eine vertikale Rückstellkraft  $F_{Rück}$  umgelenkte Horizontalkraft  $F_{Horizontal}$ . Die Horizontalkraft  $F_{Horizontal}$  resultiert aus dem steigenden Gesenkinnendruck auf die Schieber während der vertikalen Umformung und wird mit Hilfe der FEM berechnet. Bild 6.15 zeigt den Verlauf der vertikalen Umformkraft  $F_{Vertikal}$  und der daraus resultierenden horizontalen Kraft  $F_{Horizontal}$  während der vertikalen Umformung.

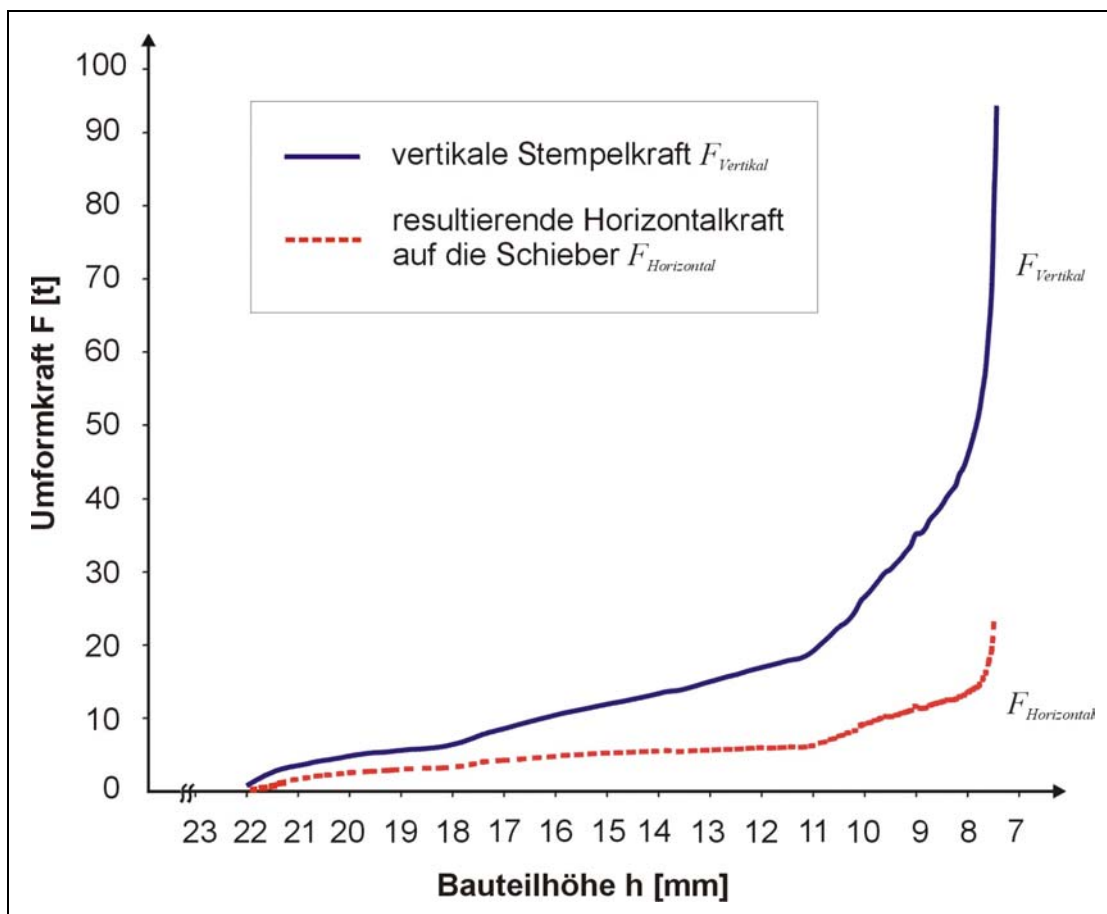


Bild 6.15: Mit Hilfe der FEM berechneter Verlauf der vertikalen Umformkraft  $F_{Vertikal}$  und der daraus resultierenden horizontalen Kraft  $F_{Horizontal}$  während der vertikalen Umformung des realisierten Versuchswerkzeugs zur mehrdimensionalen Vorformung

Nach Abschluss der horizontalen Umformung verharren die Schieber in ihrer Endposition. Mit zunehmender Abwärtsbewegung des Stößels komprimieren die Tellerfedern und der Stößel leitet die vertikale Umformung ein. Infolge des steigenden Gesenkinnendrucks steigen sowohl vertikale Umformkraft  $F_{Vertikal}$  als auch die auf den Stempel wirkende Horizontalkraft  $F_{Horizontal}$  mit abnehmender Bauteilhöhe  $h$  an.

Mit Abschluss der vertikalen Umformung sind die Federpaketsysteme um den Federweg  $s_F = 18,41$  mm komprimiert. Aufgrund der wechselsinnigen Anordnung zu Federsäulen steht pro Federpaketsystem folgende Federkraft  $F_{Feder}$  zur Verfügung (vgl. Formel 6.3):

$$F_{Feder} = c \times \frac{s_F}{i} = 52.851 \frac{N}{mm} \times \frac{18,41 mm}{7} = 139 kN$$

Da für jeden Antriebskeil zwei Federpaketsysteme zur Verfügung stehen, ergibt sich die zur Verfügung stehende Kraft je Antriebskeil  $F_{Federpaket}$  zu:

$$F_{Federpaket} = 2 \times F_{Feder} = 2 \times 139 kN = 278 kN$$

Die vertikale Rückstellkraft  $F_{Rück}$ , die durch die Umlenkung der infolge des steigenden Gesenkinnendrucks entstehende Horizontalkraft auf die Schieber entsteht, lässt sich analog zur in Kapitel 6.3.3.4 (vgl. Bild 6.11, Formel 6.12) wie folgt berechnen:

$$F_{Rück} = F_{Horizontal} \frac{(1 - \mu_1 \mu_2) \tan \alpha - \mu_1 - \mu_2}{1 + \mu_2 \mu_3 + (\mu_2 + \mu_3) \tan \alpha} \quad (\text{Formel 6.13})$$

Am Ende der vertikalen Umformung beträgt die Horizontalkraft auf die Schieber  $F_{Horizontal} = 241,65$  kN. Damit ergibt sich unter Verwendung der Haftreibungskoeffizienten  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,15$  sowie einem Keilwinkel  $\alpha = 20^\circ$  folgende vertikale Rückstellkraft  $F_{Rück}$ :

$$F_{Rück} = 241,65 kN \frac{(1 - 0,15 \times 0,15) \tan 20^\circ - 0,15 - 0,15}{1 + 0,15 \times 0,15 + (0,15 + 0,15) \tan 20^\circ} = 12.402 N$$

Damit ist die vertikale Rückstellkraft  $F_{Rück}$  sehr viel kleiner als die durch die Komprimierung der Federpaketsysteme zur Verfügung stehende Kraft  $F_{Federpaket}$ , so dass eine Rückstellung der Schieber durch infolge des steigenden Gesenkinnendrucks entstehende Horizontalkräfte während der vertikalen Umformung ausgeschlossen werden kann.

Die Hauptgefahr für eine Spaltbildung liegt daher in der Auffederung des Gesenks während der vertikalen Umformung. Nachfolgend soll exemplarisch die Auffederung der Schieber  $\Delta l_{Schieber}$  in Abhängigkeit des Gesenkinnendrucks  $\sigma_i$  während der vertikalen Umformung durch den Stempel rechnerisch bestimmt werden. Es gilt [BEI95]:

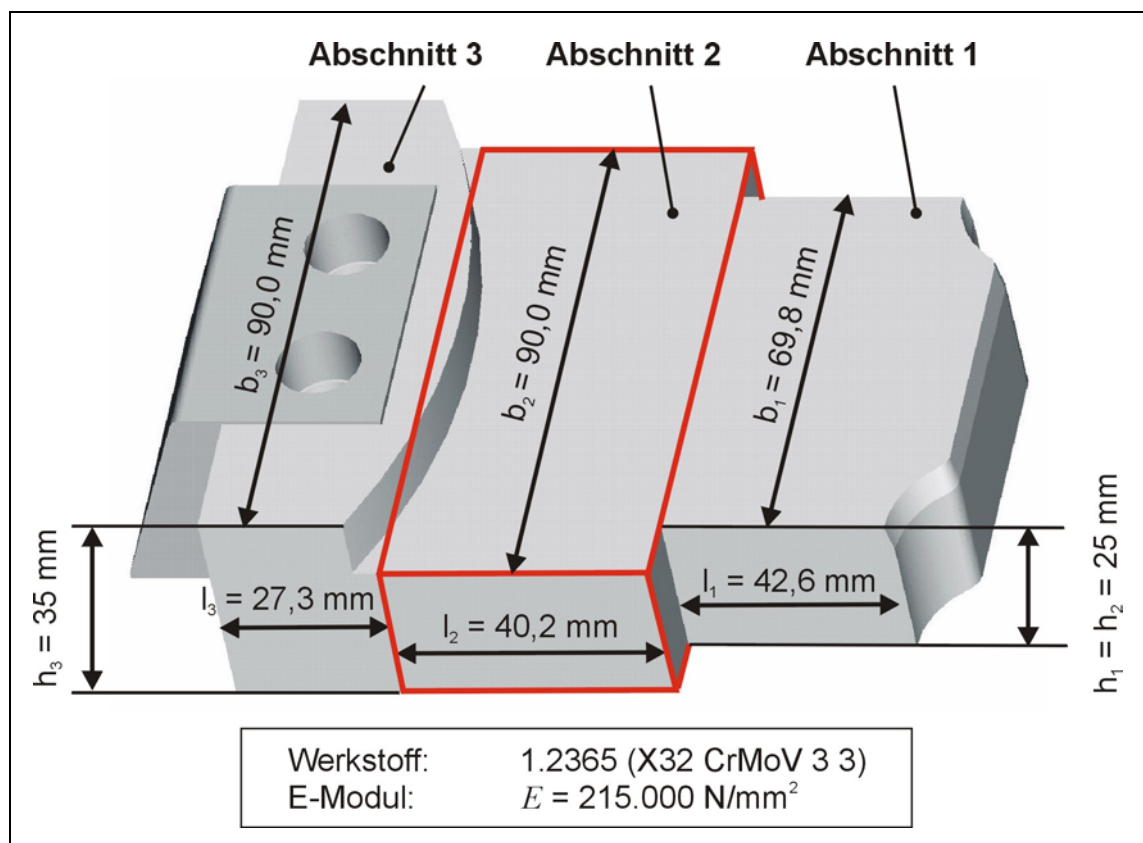
$$\Delta l_{Schieber} = l_{Schieber} \times \frac{\sigma_i}{E} \quad (\text{Formel 6.14})$$

mit 
$$\sigma_i = \frac{F_{Horizontal}}{A_{Schieber}} \quad (\text{Formel 6.15})$$

ergibt sich:

$$\Delta l_{\text{Schieber}} = \frac{l_{\text{Schieber}} \times F_{\text{Horizontal}}}{E \times A_{\text{Schieber}}} \quad (\text{Formel 6.16})$$

Bild 6.16 zeigt den im Versuchswerkzeug verwendeten Schieber, der zu Berechnung der Auffederung vereinfacht in drei Abschnitte aufgeteilt wird. Für die einzelnen Abschnitte können die für die Berechnung der Auffederung wirksamen Flächen  $A_{\text{Schieber}} = b_i \times h_i$  sowie die zugehörigen Längen  $l_i$  bestimmt werden.



**Bild 6.16:** Schieber zur horizontalen Umformung des realisierten Versuchswerkzeugs zur mehrdirektionalen Vorformung

Unter Berücksichtigung der festgelegten Abschnitte im horizontal wirkenden Schieber ergibt sich die Auffederung der Schieber  $\Delta l_{\text{Schieber}}$  zu:

$$\Delta l_{\text{Schieber}} = F_{\text{Horizontal}} \times \left( \frac{l_1}{E \times b_1 \times h_1} + \frac{l_2}{E \times b_2 \times h_2} + \frac{l_3}{E \times b_3 \times h_3} \right) \quad (\text{Formel 6.17})$$

Bild 6.17 zeigt den Verlauf der Auffederung der Schieber  $\Delta l_{\text{Schieber}}$  während der vertikalen Umformung. Am Ende der vertikalen Umformung wird ein Maximalwert der Auffederung  $\Delta l_{\text{Schieber}} = 0,057 \text{ mm}$  erreicht.

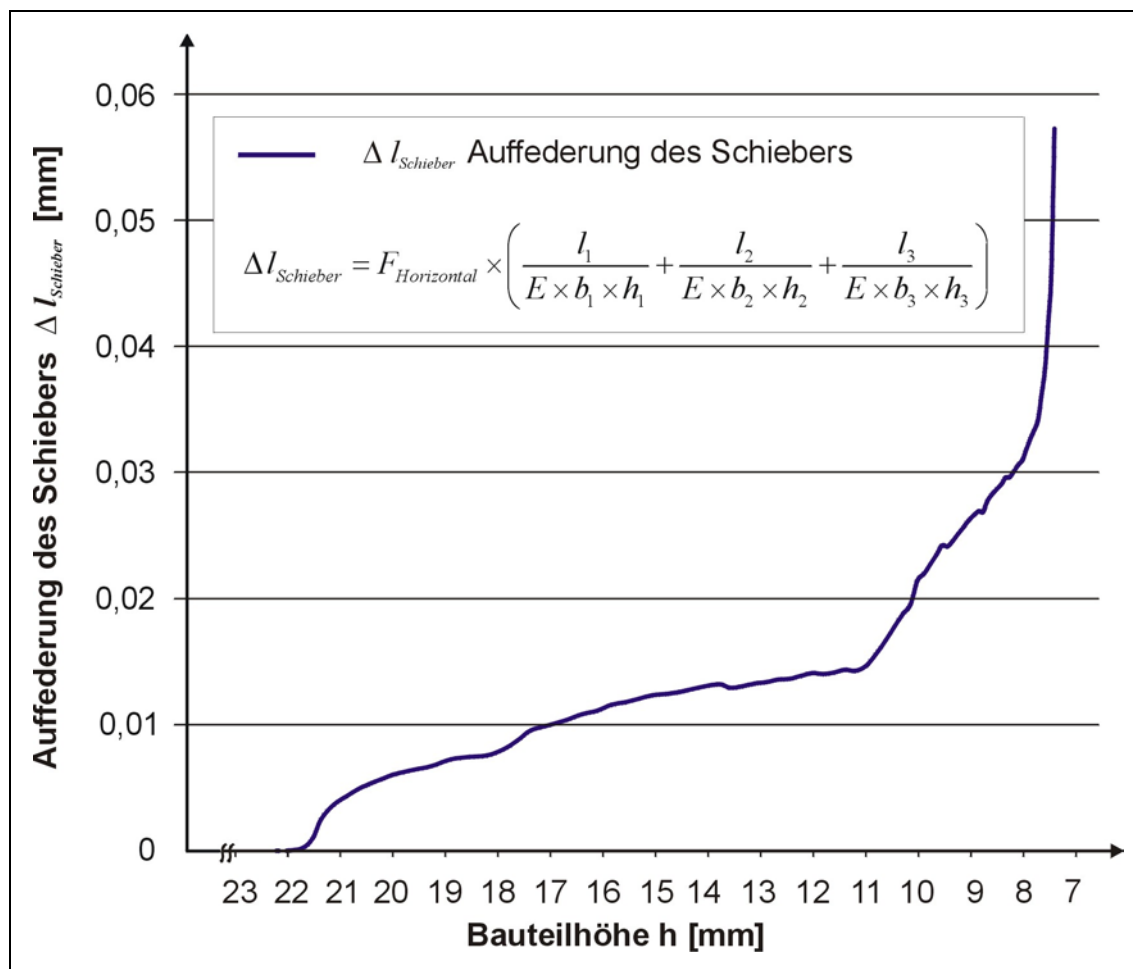


Bild 6.17: Mit Hilfe der FEM berechnete Auffederung der horizontal wirkenden Schieber  $\Delta I_{\text{Schieber}}$  während der vertikalen Umformung des realisierten Versuchswerkzeugs zur mehrdirektionalen Vorformung

Aus Untersuchungen zur Auslegung von geschlossenen Schmiedegesenken mit beweglichen, mehrfachwirkenden Umformstempeln ist bekannt, dass es bereits ein einem Spaltmaß von  $s_{\text{Spalt}} = 0,1$  mm zwischen beweglichen Werkzeugkomponenten zu einer Stirngratbildung führen kann. Dabei begünstigen kleine Radien am Umformstempel die Stirngratbildung. So tritt beispielsweise bei einem Spaltmaß von  $s_{\text{Spalt}} = 0,1$  mm und einem Stempelradius von  $r_{\text{Stempel}} = 1$  mm bereits Stirngratbildung auf, während bei gleichem Spaltmaß und einem Stempelradius von  $r_{\text{Stempel}} = 10$  mm eine gratlose Ausschmiedung möglich ist [DOE00]. Da bei dem realisierten Versuchswerkzeug zur mehrdirektionalen Vorformung kein Stempelradius angebracht ist (rechtwinklig und entgratet), ist damit zu rechnen, dass die Stirngratbildung bereits bei kleinen Spaltmaßen auftritt.

Mit dem voreingestellten Spaltmaß von  $s_{\text{Spalt}} = 0,05$  mm und der durch den Gesenkinndruck hervorgerufenen Auffederung der Schieber  $\Delta I_{\text{Schieber}}$  ergibt sich rechnerisch ein Spaltmaß von  $s_{\text{Spalt}} = 0,107$  mm, das eine Stirngratbildung hervorrufen kann.

Ziel der Erprobung ist es daher, den für die gewählte Zwischenform maximalen Querschnittsunterschied experimentell zu bestimmen, bei dem kein Stirngrat im Schaftbereich entsteht. Neben dem Gesenkinnendruck ist der Materialfluss während der vertikalen Umformung ein entscheidender Einflussfaktor für die Stirngratbildung. Eine Optimierung des Werkzeugs ist daher zu erwarten, wenn es gelingt, durch geeignete Gestaltung des Stempels einen gerichteten Materialfluss in Richtung der Längsachse zu begünstigen. Reduzierte Belastungen im Schaftbereich ermöglichen zusätzlich erhöhte Querschnittsreduktionen.

Im Rahmen der Erprobung werden drei unterschiedliche Stempelgeometrien untersucht und die jeweils maximal möglichen Querschnittsunterschiede bestimmt.

### 6.4.2 Beschreibung der Versuchsumgebung

Die Erprobung wurde im Versuchsfeld des IPH durchgeführt. Dabei wurde folgende Ausstattung genutzt:

- Kammerofen zur Erwärmung der Rohteile,
- einfach wirkende Spindelpresse mit Direktantrieb der Fa. Müller Weingarten (Typ PS 265 (vgl. Kapitel 5.5.1),
- Kühl-Schmiereinrichtung.

Als Versuchsgeometrie wurde die in Bild 6.5 vorgestellte pleuelähnliche Zwischenform verwendet. Als Probenmaterial wurde C15 gewählt. Um volumengenaue Rohteile für die Erprobung zu erhalten, werden die Stirnflächen der verwendeten Rohteile durch Plandrehen auf Maß gebracht.

Die Erwärmung der Rohteile auf eine Temperatur von 1250 °C erfolgt in einem Kammerofen unter Verwendung einer Schutzgasatmosphäre zur Zündervermeidung. Bedingt durch den sehr kurzen Transportweg entspricht die eingestellte Ofentemperatur annähernd der Schmiedeanfangstemperatur.

Auf der direkt angetriebenen Spindelpresse werden die Rohteile in einem Arbeitshub der Maschine zur Zwischenform umgeformt. Die Handhabung der Werkstücke erfolgt manuell. Von besonderer Bedeutung für das Schmiedeergebnis ist eine ausreichende Schmierung. Im Rahmen der Erprobung wurden daher nicht nur die Schieber, sondern das gesamte Gesenk geschmiert, um den Materialfluss in Richtung der Bauteillängsachse durch reduzierte Reibung zwischen den Kontaktflächen des Werkzeugs und des Werkstücks zu begünstigen. Als Schmiermittel wurde eine Wasser-Graphit-Mischung eingesetzt, die gleichzeitig eine Kühlung der Werkzeugkomponenten nach jedem Schmiedevorgang ermöglicht.

### 6.4.3 Bestimmung der maximal möglichen Querschnittsreduktion

Zur Bestimmung des Einflusses der Geometrie des Stempels auf die maximal mögliche Querschnittsreduktion wurden drei unterschiedliche Stempelgeometrien untersucht (Tabelle 6.4). Dazu wurde zunächst die horizontale Umformung vollständig durchgeführt und die Zustellung des Maschinenstößels durch Distanzbleche zwischen den Maschinenanschlügen und damit das vertikale Stauchen schrittweise erhöht. Diese Vorgehensweise wurde jeweils bis zu Ansätzen einer Stirngratbildung durchgeführt.

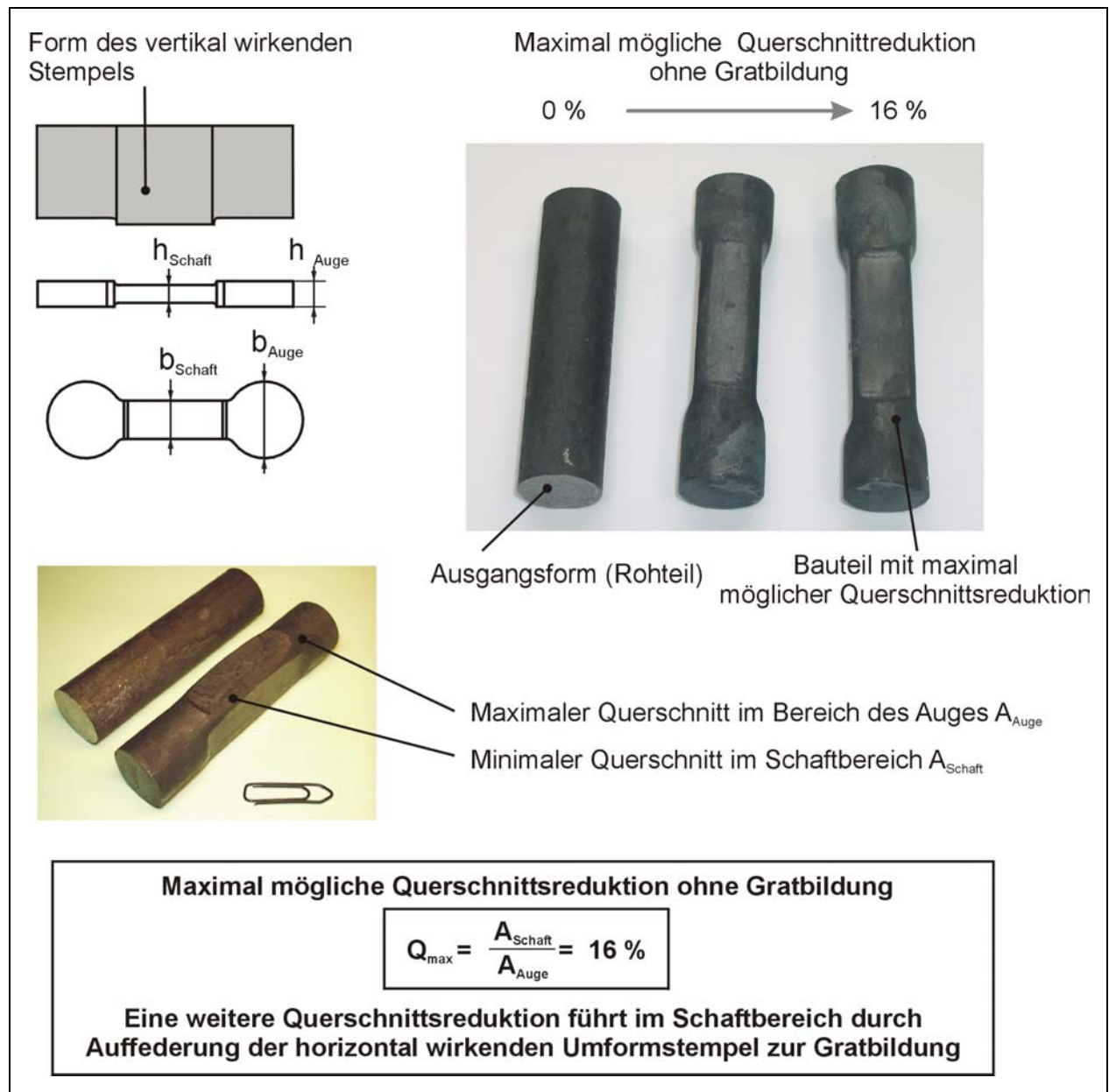
Variante 1	Variante 2	Variante 3
Stempel mit ebener Wirkfläche im Bereich des Schafts (vgl. Bild 6.18)	Stempel mit angeschrägter Wirkfläche im Bereich des Schafts (vgl. Bild 6.19)	Stempel mit angeschrägte Wirkfläche und Nut im Bereich des Schafts (vgl. Bild 6.20)

*Tabelle 6.4: Untersuchte Varianten der Stempelgeometrie zur Bestimmung der maximalen Querschnittsreduktion*

#### 6.4.3.1 Stempel mit ebener Kontaktfläche

Ein Stempel mit ebener Kontaktfläche (Variante 1, Bild 6.18) führt während der vertikalen Umformung (Querschnittsvorbildung) zu hohen Belastungen auf die horizontal wirkenden Schieber. Wird diese zu groß, kommt es zu einer Auffederung des Werkzeugs, die zu einer Vergrößerung des Spalts zwischen Schiebern und Stempel führt, so dass dort ein unerwünschter Stirngrat entsteht (vgl. Bild 6.14). Mit einer derartigen Stempelgeometrie lassen sich für die gewählte Probenform lediglich gratfreie Zwischenformen mit Querschnittsunterschieden von bis zu 16 % erzielen (Bild 6.18).





*Bild 6.18: Ermittlung der maximalen Querschnittsreduktion beim Einsatz eines Stempels mit ebener Wirkfläche im Bereich des Schafts*

#### 6.4.3.2 Stempel mit angeschrägter Wirkfläche

Ein Stempel mit einer Wirkfläche, die um  $4^\circ$  bezüglich der horizontalen Ebene angeschrägt ist (Variante 2, Bild 6.19), erlaubt Zwischenformen mit größeren Querschnittsunterschieden. Während der vertikalen Umformung (Querschnittsvorbildung) wird die horizontale Belastung der Schieber im Vergleich zu Variante 1 reduziert, so dass es zu einer bedeutend geringeren Auffederung der Schieber kommt. Die Bildung von Stirngraten wurde im Vergleich zur ebenen Stempelfläche (Variante 1) wesentlich reduziert,

so dass sich gratfreie Zwischenformen mit Querschnittsunterschieden von bis zu 29 % herstellen lassen (Bild 6.19).

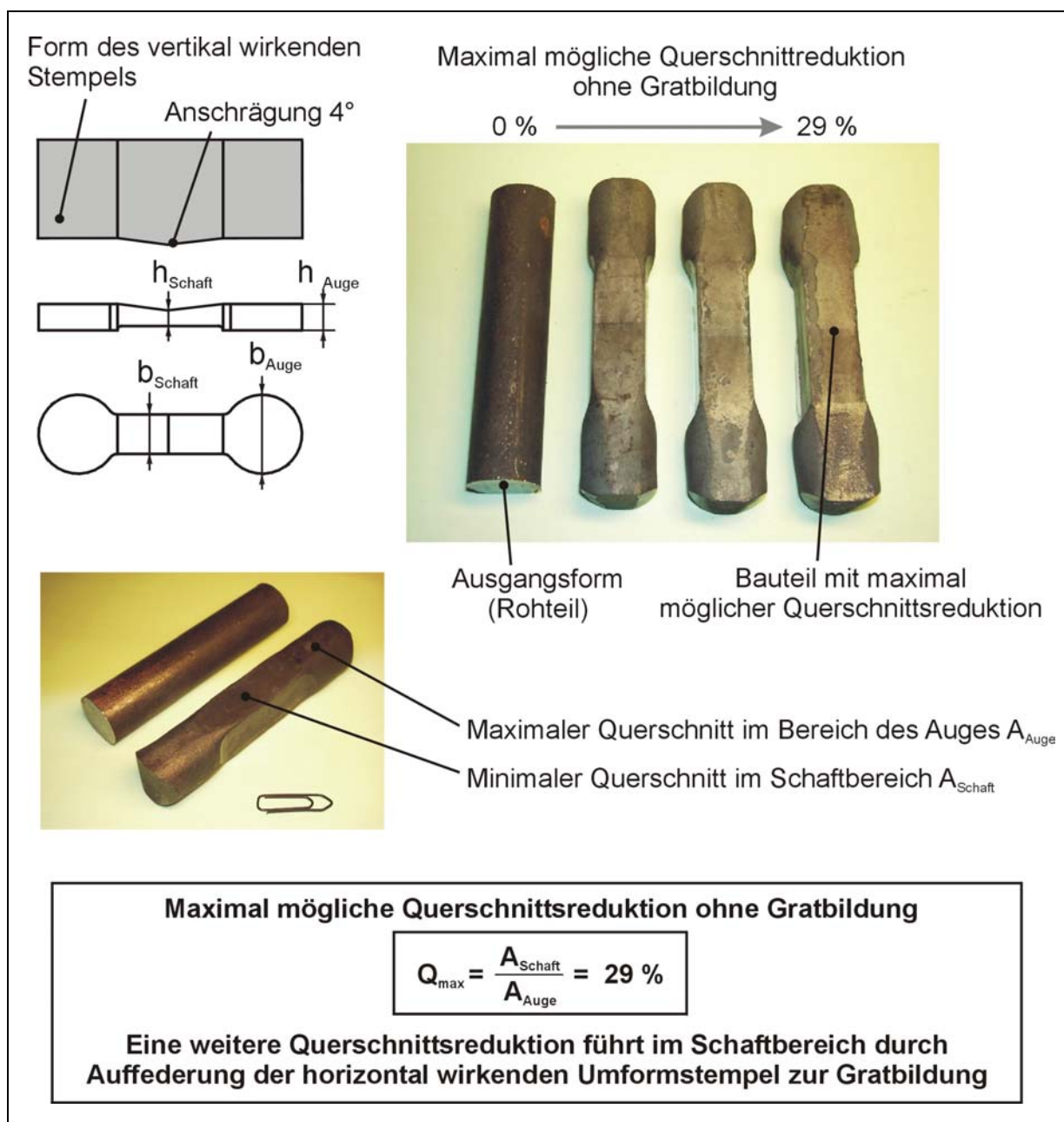


Bild 6.19: Ermittlung der maximalen Querschnittsreduktion beim Einsatz eines Stempels mit angeschrägter Wirkfläche im Bereich des Schafts

#### 6.4.3.3 Stempel mit angeschrägter Wirkfläche und eingebrachter Nut

Ein Stempel mit angeschrägter Wirkfläche und eingebrachter Nut (Variante 3, Bild 6.20) vergrößert die maximal möglichen Querschnittsunterschiede nochmals erheblich. Die in die Wirkfläche eingebrachte Nut vergrößert im Schaftbereich das zur Verfügung ste-

hende Volumen. Aufgrund der veränderten Stempelgeometrie findet zunächst ein Steigen des Materials in die im Stempel angebrachte Nut statt. Das Breiten im Schaftbereich erfolgt erst im Anschluss daran, so dass bei weiterer Stößelzustellung erst oberhalb einer Querschnittsreduzierung von 56 % eine Stirngratbildung aufgrund der Auffederung des Werkzeugs zu beobachten ist.

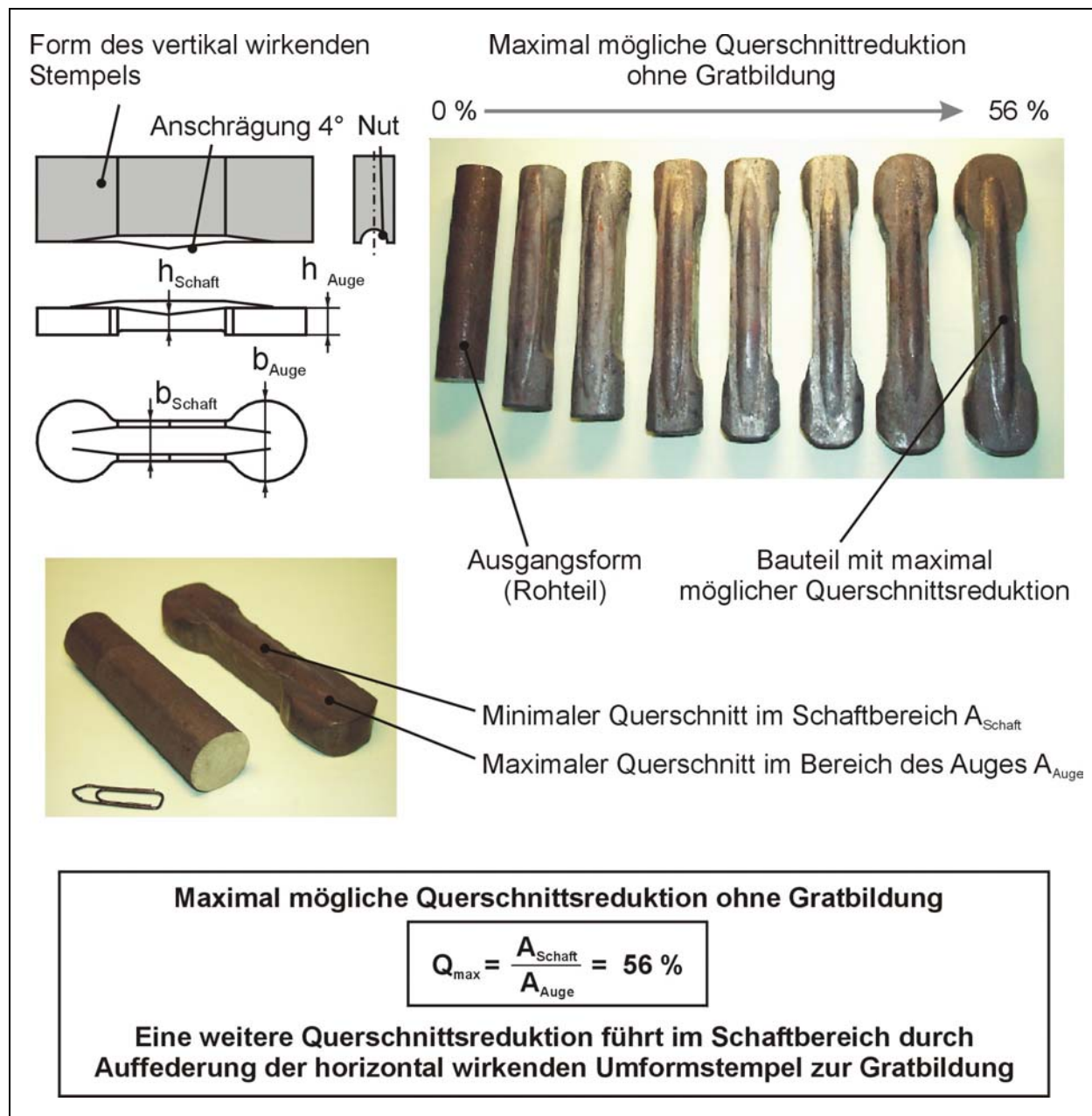


Bild 6.20: Ermittlung der maximalen Querschnittsreduktion beim Einsatz eines Stempels mit angeschrägter Wirkfläche und Nut im Bereich des Schafts

#### 6.4.3.4 Ergebnisse der Erprobung

Die Ergebnisse der Erprobung zeigen, dass eine Masseverteilung und Querschnittsvorbildung in einem Arbeitshub der Umformmaschine technisch realisierbar ist. Dabei hat sich die zeitliche Abfolge der Umformungen in der Weise als geeignet erwiesen, dass zunächst die horizontale Umformung durchgeführt und vollständig abgeschlossen wird und anschließend die vertikale Umformung erfolgt.

Die Grenze des entwickelten Verfahrens liegt in einer Vergrößerung des Spaltmaßes  $s_{Spalt}$  zwischen Stempel und Schiebern durch eine infolge des steigenden Gesenkinnendrucks hervorgerufenen Auffederung der Schieber  $\Delta l_{Schieber}$  während der vertikalen Umformung. Hier können bei maximaler Querschnittsreduktion Spalte entstehen, die zu einer Stirngratbildung im Schaftbereich führen (vgl. Bild 6.14).

Bei geeigneter Gestaltung des Stempels für die gewählte, pleuelähnliche Zwischenform lassen sich mit dem entwickelten Vorformwerkzeug jedoch Querschnittsreduzierungen von bis zu 56 % erzielen (vgl. Bild 6.20). Damit liegt die Verfahrensgrenze des entwickelten Vorformverfahrens in einem Bereich, der mit dem Querwalzen (Durchmesserreduzierungen von 16 - 58 %) vergleichbar ist. Nachteilig ist jedoch, dass diese Querschnittsreduktion nur mit einer Vergrößerung des Volumens im Schaftbereich möglich ist, die zu einer halbkreisförmigen Auswölbung im Stegbereich der Zwischenform führt. Diese geometrische Gestalt der Zwischenform ist u.U. ungünstig für das Präzisionsschmieden. Im folgenden Kapitel wird daher eine Möglichkeit zur Optimierung des Werkzeugkonzepts vorgestellt, mit der eine Auffederung der Schieber während der vertikalen Umformung infolge des steigenden Gesenkinnendrucks konstruktiv ausgeschlossen werden kann (vgl. Bild 7.6 und Bild 7.8).

Das entwickelte und anschließend erprobte Verfahren zeigt insgesamt, dass es grundsätzlich möglich ist, die für das Präzisionsschmieden von Langteilen erforderliche Zwischenform in einem Arbeitshub der Umformmaschine herzustellen und bietet somit Potenzial zur Verkürzung der Prozesskette *Präzisionsschmieden*.

## **7. Anwendung und Diskussion der Ergebnisse**

Bei der Entwicklung neuer Werkzeugtechnologien müssen bereits frühzeitig die Randbedingungen der industriellen Umsetzung berücksichtigt werden. Das gilt sowohl für die notwendigen Voraussetzungen in den Unternehmen als auch für die Verfahrensgrenzen sowie für noch bestehende Problemfelder im Hinblick auf eine Praxisumsetzung. Im Rahmen dieses Kapitels werden für die entwickelten Verfahren Möglichkeiten zum Einsatz in der industriellen Praxis diskutiert.

### **7.1 Flexibles Vorformwerkzeug für das konventionelle Schmieden von Langteilen**

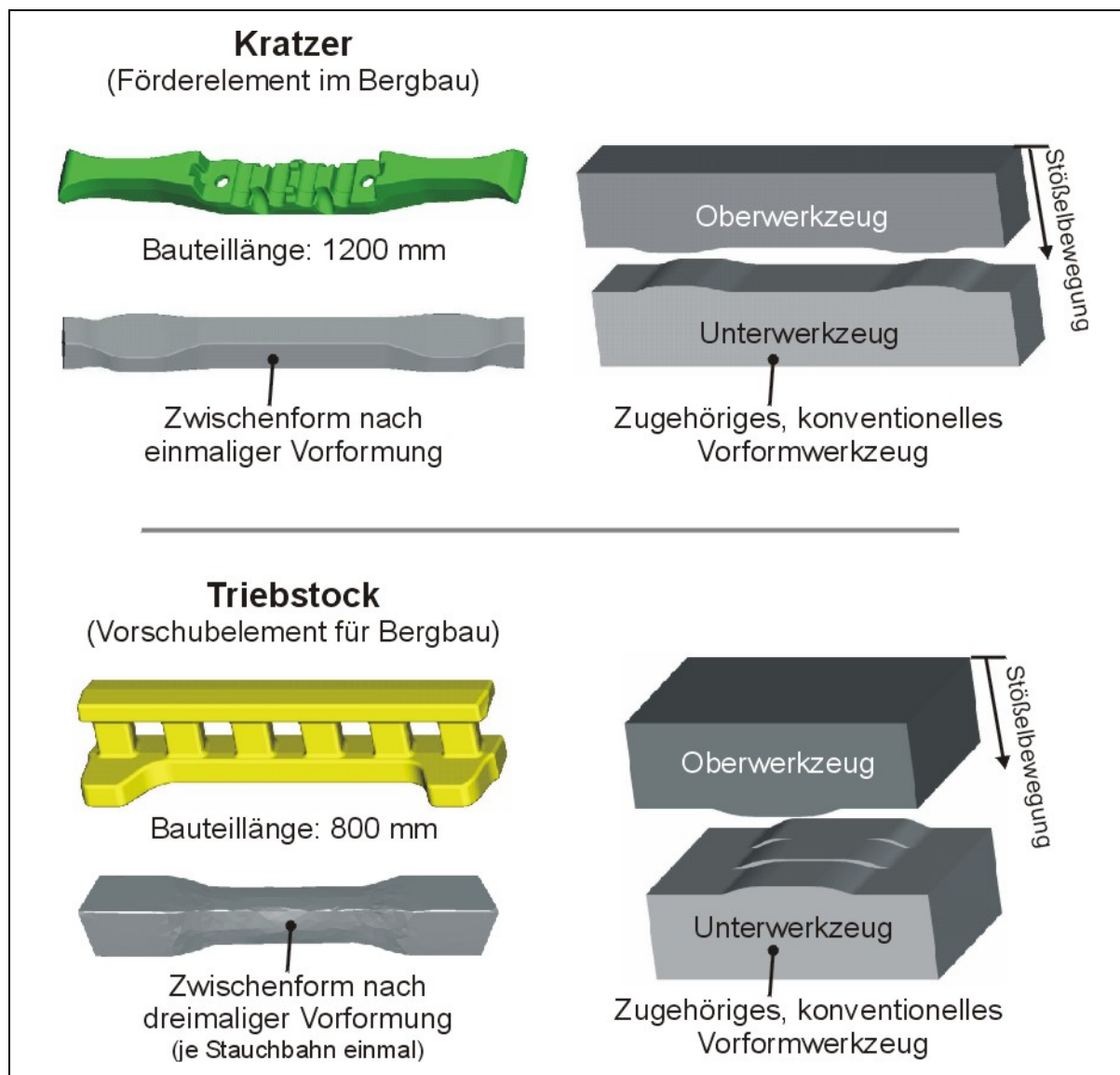
Aufbauend auf den Ergebnissen des in Kapitel 5 entwickelten Vorformkonzepts zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen (vgl. Bild 5.1) wird im folgenden Abschnitt ein Beispiel für eine mögliche Übertragung des Werkzeugprinzips auf eine Teilefamilie vorgestellt.

#### **7.1.1 Beispielhafte Konzeption eines segmentierten Vorformwerkzeugs für eine Teilefamilie**

Die beispielhafte Konzeption des segmentierten Vorformwerkzeugs für eine Teilefamilie erfolgt anhand von Bauteilen für die Bergbauindustrie. Es handelt sich dabei um einen sogenannten Kratzer und einen Triebstock, die jeweils in verschiedenen Varianten und geringen Stückzahlen hergestellt werden. Bild 7.1 zeigt die Bauteile sowie die gegenwärtig eingesetzten, konventionellen Vorformwerkzeuge.

Kratzer (Bild 7.1, oben) werden für Fördersysteme im Bergbau eingesetzt. Sie werden über Ketten miteinander verbunden und transportieren so abgebautes Material. Sie sind dabei mit den Mitnehmerrippen von Gurtförderanlagen vergleichbar.

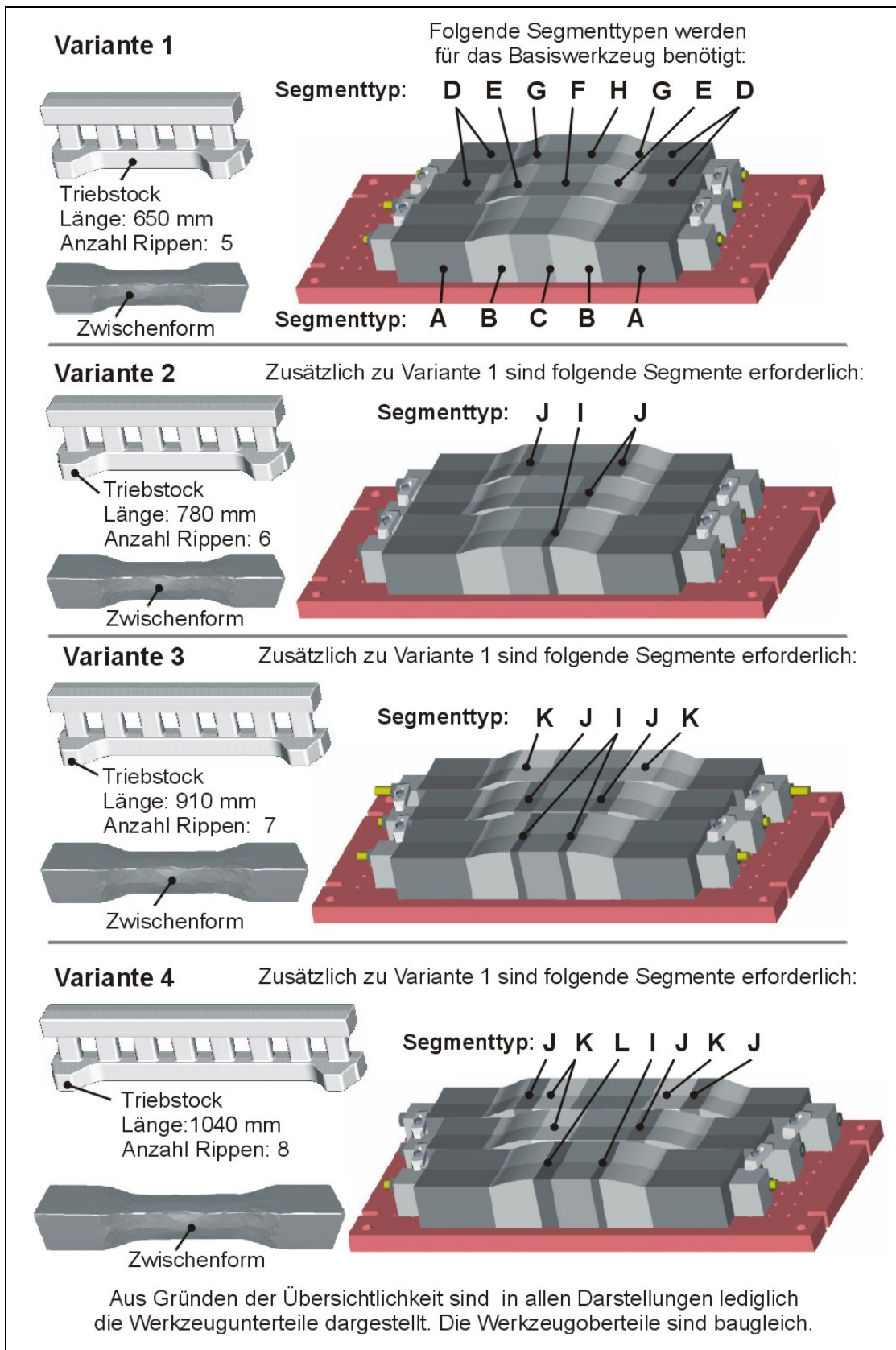
Triebstöcke (Bild 7.1, unten) sind Bestandteil von zahnradgetriebenen Vorschubsystemen im Bergbau. Sie sind somit vergleichbar mit Zahnstangen einer Zahnradbahn. Beide Bauteile werden in Abhängigkeit des Einsatzortes in unterschiedlichen Längen benötigt.



*Bild 7.1: Beispielbauteile für eine mögliche Übertragung des entwickelten Werkzeugprinzips zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen*

Im Folgenden wird für vier Varianten des Triebstocks ein segmentiertes Vorformwerkzeug vorgestellt (Bild 7.2). Die Varianten unterscheiden sich dabei in der Länge sowie der Anzahl der Rippen (Verzahnungselemente). Die Herstellung des Triebstocks sieht dabei vor, einen Vierkant-Knüppelabschnitt (Rohteil) auf jeder Stauchbahn einmal vorzuformen. Nach jeder Vorformung erfolgt eine Drehung um  $90^\circ$ . Um sowohl eine Streckung des Bauteils als auch eine Stoffanhäufung an den Enden zu erzielen, ist eine dreistufige Vorformung erforderlich. Das Werkzeugsystem basiert dabei auf dem in Kapitel 5.4.2.3 vorgestellten Spannsystem mit Hilfe einer Zugstange (vgl. Bild 5.10).





**Bild 7.2:** Übertragung des entwickelten Werkzeugkonzepts zur flexiblen Vorformung auf eine Bauteilfamilie am Beispiel von vier Varianten eines Triebstocks für die Bergbauindustrie



Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die erforderlichen Segmente und Befestigungskomponenten für eine aus vier Varianten bestehende Teilefamilie des Triebstocks.

Komponente	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Summe
Segment Typ A	4	4	4	4	4
Segment Typ B	4	4	4	4	4
Segment Typ C	2	2	2	2	2
Segment Typ D	8	8	8	8	8
Segment Typ E	4	4	4	4	4
Segment Typ F	2	2	2	2	2
Segment Typ G	4	4	4	4	4
Segment Typ H	2	2	2	2	2
Segment Typ I		2	4	2	4
Segment Typ J		6	4	6	6
Segment Typ K			4	6	6
Segment Typ L				2	2
<b>Anzahl Segmente</b>	<b>30</b>	<b>38</b>	<b>42</b>	<b>46</b>	<b>48</b>
Aufbauplatte	2	2	2	2	2
Spannklötze	12	12	12	12	12
Zugstange 1150 mm	2				2
Zugstange 1250 mm	4	6			6
Zugstange 1350 mm			4	4	4
Zugstange 1500 mm			2	2	2

*Tabelle 7.1: Übersicht über die erforderlichen Segmente und Befestigungskomponenten für das segmentierte Vorformwerkzeug für die Teilefamilie des Triebstocks (vgl. Bild 7.2)*

Die Auswertung der beispielhaften Konzeption eines segmentierten Vorformwerkzeugs für das konventionelle Schmieden von Langteilen zeigt, dass die Erweiterung des Basiswerkzeugs (Variante 1) auf drei weitere Varianten der Teilefamilie lediglich vier zusätzliche Segmenttypen erfordert. Für den in Bild 7.1 (oben) vorgestellten Kratzer ist eine Erweiterung auf Varianten einer Teilefamilie, die sich in der Länge unterscheiden, durch eine Segmentierung des Basiswerkzeugs ebenfalls möglich.

### 7.1.2 Anwendungs- und Einsatzbereich

Der erwartete Anwendungsbereich des flexiblen Vorformwerkzeugs liegt im Bereich der Klein- und Mittelserienfertigung. Insbesondere für Schmiedeunternehmen, deren Produktspektrum Teilefamilien mit Losgrößen zwischen 100 - 1000 Stück umfasst, stellt das flexible Vorformverfahren eine Alternative dar. Schmiedeunternehmen, die über keine Reck- oder Walzanlage zur Vorformung verfügen, wird durch das Werkzeugprinzip die Möglichkeit eröffnet, eine Vorformung für variantenreiche Kleinserien ökonomisch durchzuführen.

Geeignete Bauteilklassen für das Werkzeugsystem sind Langteile mit ausgeprägten Masseunterschieden entlang der Längsachse. Das entwickelte Werkzeugkonzept ist dabei insbesondere für Teilefamilien nutzbar. Durch die Verwendung von geeigneten Segmenten lässt sich so ein großes Teilespektrum abdecken.

Über den Einsatz zur Vorformung von Bauteilen einer Teilefamilie hinaus bieten sich modular aufgebaute Vorformwerkzeuge für den Einsatz bei Probeschmiedungen an. Während konventionelle Vorformwerkzeuge bei eventuell erforderlichen Änderungen zunächst ausgebaut und ggf. sogar in einem externen Werkzeugbau nachgearbeitet werden müssen, besteht bei dem entwickelten Werkzeugkonzept u.U. die Möglichkeit, bestimmte Segmente im eingebauten Zustand auszutauschen.

Unternehmen, die bislang hohe Investitionen in Vorformwerkzeuge vermieden haben, können durch die Bevorratung weniger Basisgeometriesätze die verschiedensten Vorformoperationen für ein breites Bauteilspektrum durchführen. Erzielbare Vorteile liegen in einer Standmengenerhöhung der Fertigformwerkzeuge sowie einer reduzierten Einsatzmasse aufgrund des verringerten Gratanteils.

Um den Anwendungsbereich des flexiblen Vorformwerkzeugs auf die Vorformung von möglichst vielen Bauteilen ausdehnen zu können, ist neben einer geometrischen Ähnlichkeit und ähnlichen Bauteilabmessungen die Möglichkeit zur Nutzung auf verschiedenen Maschinen erforderlich. Bei einer einheitlichen Gestaltung des Spannsystems für die Segmente lassen sich die Segmente auf unterschiedlichen Maschinen einsetzen. Zudem können bestimmte Standardbausteine für unterschiedliche Teilefamilien verwendet werden. Dies trägt zu einer Flexibilisierung des Vorformprozesses bei.

## 7.2 Vorformung für das Präzisionsschmieden von Langteilen

Im Folgenden wird ein möglicher Einsatzbereich des mehrdirektionalen Vorformkonzepts zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Pleuel aufgezeigt. Dazu wird die Stadienfolge von der Ausgangsform zur erforderlichen Zwischenform mit Hilfe der FEM untersucht. Auf Basis der FEM-Analyse wird exemplarisch ein mehrdirektional wirkendes Vorformwerkzeug zur Herstellung einer anforderungsgerechten Zwischenform vorgestellt. Anhand der beispielhaften Konstruktion werden besondere Anforderungen und weitere Entwicklungsbedarfe an das Verfahren insbesondere hinsichtlich der Vermeidung des Stirngrats im Schaftbereich diskutiert.

### 7.2.1 Beispiel für eine mögliche Übertragung des mehrdirektionalen Werkzeugprinzips auf die Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln

Ausgangspunkt für die im Folgenden vorgestellte mögliche Übertragung des entwickelten Vorformverfahrens mit mehrdirektional wirkenden Umformstempeln auf die Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Langteilen ist ein Pleuel. Die Fertigformung des Pleuels soll nach dem in Kapitel 2.2.3.2 vorgestellten Werkzeugkonzept zum Präzisionsschmieden von Langteilen (vgl. Bild 2.7) erfolgen, das auf der zeitlichen Trennung der Vorgänge *Gesenkschließen* und *Umformung* basiert.

Bild 7.3 zeigt die Geometrien des betrachteten, präzisionsgeschmiedeten Pleuels und der dafür erforderlichen Zwischenform sowie die zugehörigen Masseverteilungsschaubilder. Das Masseverteilungsschaubild des Fertigteils (präzisionsgeschmiedetes Pleuel) bildet dabei den Ausgangspunkt für die Auslegung der Zwischenform.

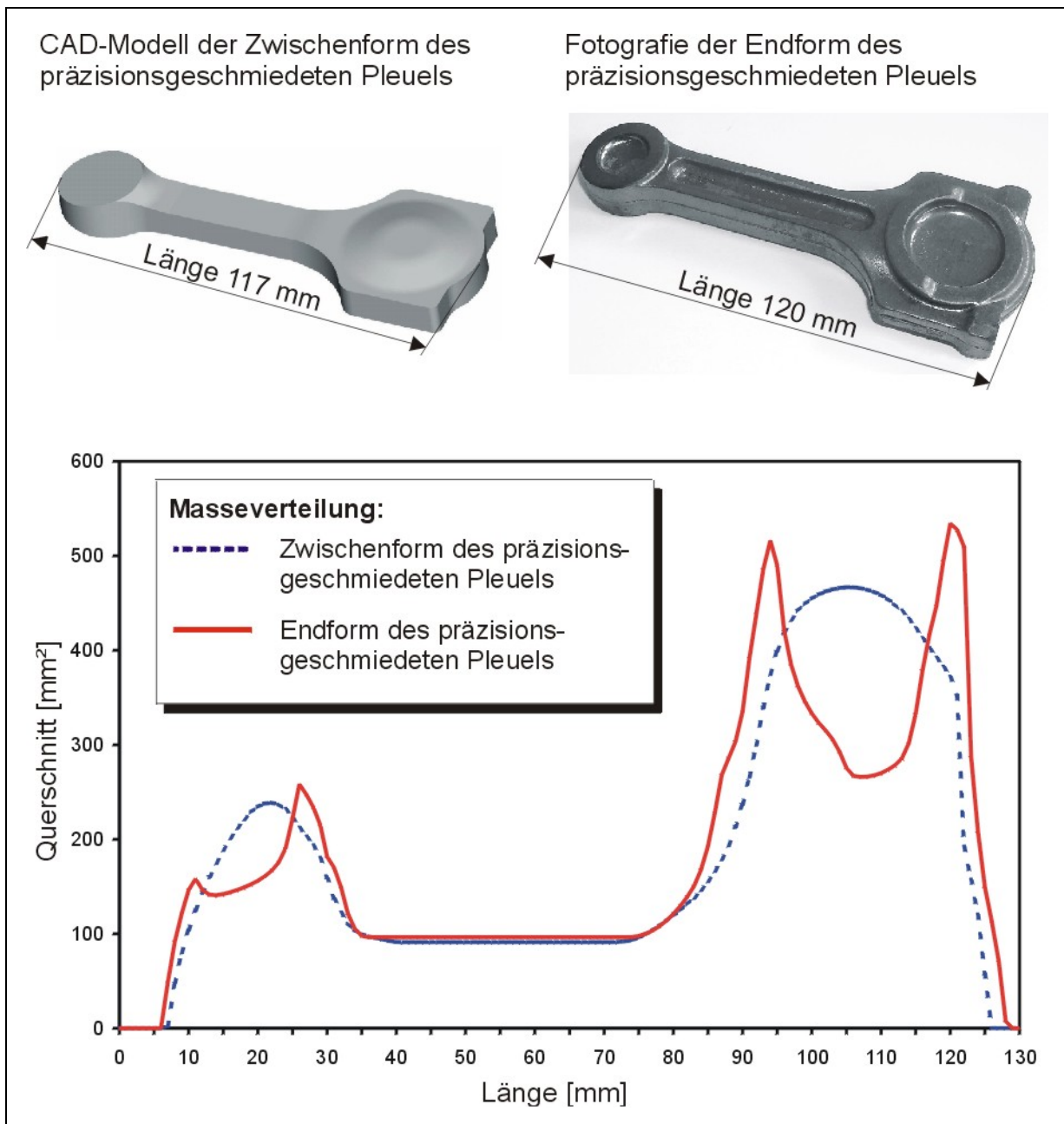
#### 7.2.1.1 Anforderungen an die Zwischenform für ein präzisionsgeschmiedetes Pleuel

Die Präzisionsumformung erfordert neben einer exakten Einsatzmasse eine Masseverteilung in engen Grenzen, da aufgrund des fehlenden Grats nur die Spiegel im kleinen und großen Auge als Ausgleichsräume für Masseschwankungen zur Verfügung stehen (vgl. Bild 2.7).

Aufgrund des Werkzeugprinzips muss die Masseverteilung der Zwischenform bereits annähernd der des Fertigteils entsprechen. Zu große Schwankungen der Gesamtmasse bzw. der Masseverteilung führen bei einem Masseüberschuss zu einem Öffnen der Gesenke während der Fertigformung. Bei zu geringer Masse bzw. unzureichender Masseverteilung kommt es zu einer mangelhaften Formfüllung in einzelnen Bereichen der Gravur. Darüber hinaus muss die Zwischenform derart gestaltet sein, dass ein umformfreies Schließen der Gesenkhälften ermöglicht wird. Eine Umformung vor dem Schließen des Gesenks kann zu einem Werkstofffluss in die Teilungsebene führen, der ein Schließen des Gesenks und damit ein gratfreies Schmieden unmöglich macht. Zu-

sätzlich muss die Außenkontur der Zwischenform ein reproduzierbares, positionsgenaues Einlegen in die Fertiggravur unterstützen [BRO99a].

In Bild 7.3 ist eine optimale Geometrie der Zwischenform dargestellt. Die Bestimmung der optimalen Zwischenformgeometrie basiert dabei auf Ergebnissen eines Grundlagenprojekts [BRO99b, IPH99]. Hier wurde in einem iterativen Prozess die Zwischenform mit optimalem Dickenprofil (umformfreies Schließen) und optimaler Außenkontur (reproduzierbares Einlegen) für die gewählte Pleuelgeometrie ausgelegt.



**Bild 7.3:** Beispiel für eine mögliche Übertragung des entwickelten Werkzeugprinzips mit mehrdirektional wirkenden Umformstempeln auf die Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln

Gegenwärtige Konzepte sehen vor, die erforderliche Zwischenform in einem Walzprozess zur Masseverteilung und einem anschließenden Stauchprozess zur Querschnittsvorbildung herzustellen. Durch die Herstellung der gleichen Zwischenform in einem Arbeitshub der Maschine durch eine mehrdirektionale Vorformung könnte die Prozesskette *Präzisionsschmieden* um den Walzvorgang verkürzt werden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass keine zusätzlichen Aggregate für die Herstellung präzisionsgeschmiedeter Bauteile benötigt werden.

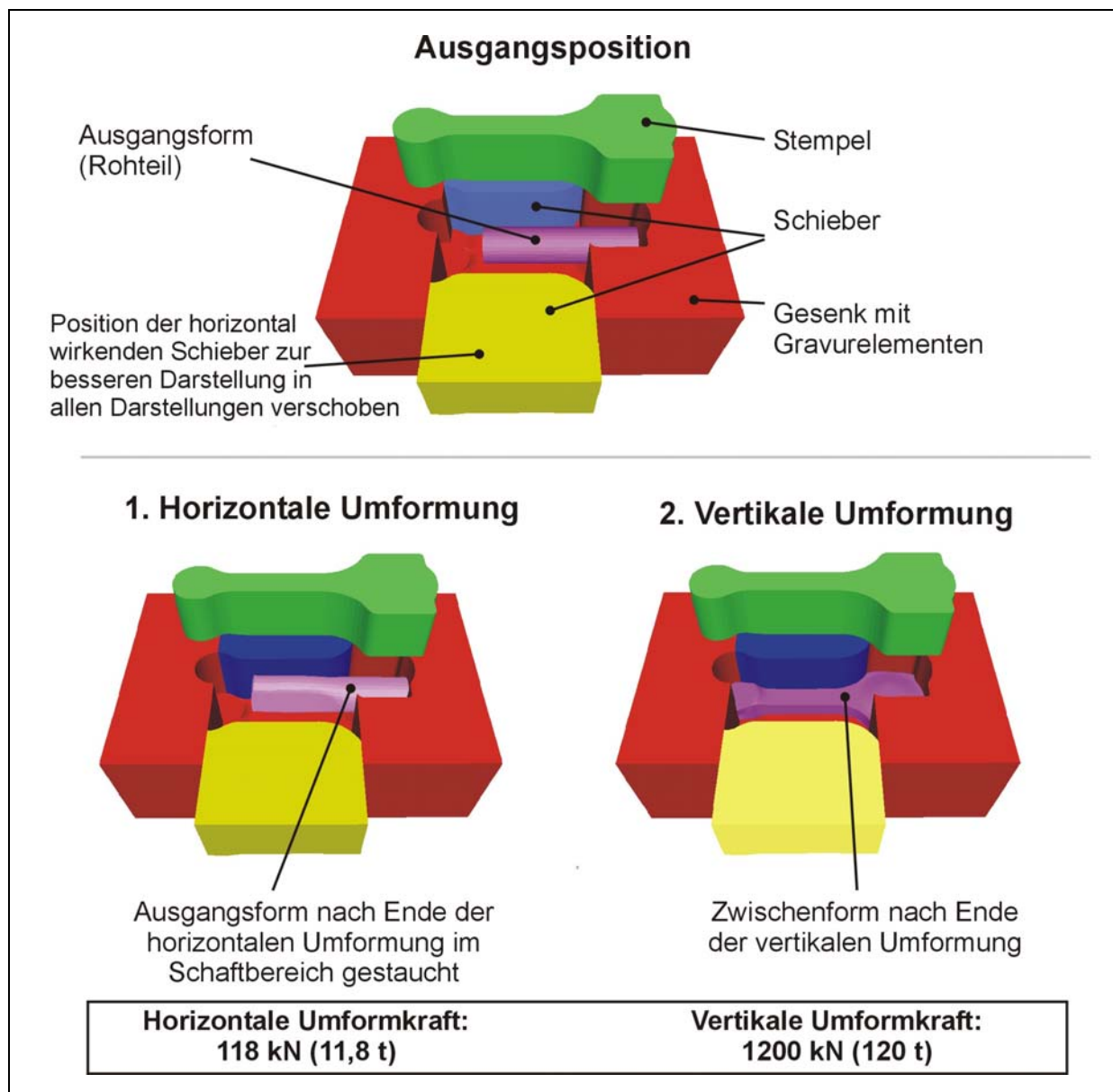
### 7.2.1.2 Simulation der Zwischenformherstellung

Im Folgenden wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gezeigt, dass sich die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Zwischenform mit dem entwickelten, mehrdirektional wirkenden Vorformverfahren in einem Arbeitshub der Umformmaschine herstellen lässt. Zur Herstellung der auf die Fertigform angepassten Zwischenform wird zunächst die horizontale Umformung durchgeführt und vollständig abgeschlossen. Im Anschluss daran erfolgt ein vertikales Stauchen. Wie in Kapitel 6.2.4 (vgl. Bild 6.6) dargelegt, führt eine Umkehrung der Reihenfolge zu wesentlich erhöhten Kräften für die horizontale Umformung und einer daraus resultierenden zu hohen Beanspruchung der Schieber.

Der Nachweis erfolgt mit Hilfe des 3-D-FEM-Programms Forge3 der Fa. Transvalor. Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die Parameter der Simulation.

Parameter	Einstellung
Rohteiltemperatur	$T_R = 1250 \text{ °C}$
Werkzeugtemperatur	$T_{Wz} = 200 \text{ °C}$
Geschwindigkeit des Stempels	$v_y = 250 \text{ mm/s}$
Geschwindigkeit der Schieber	$v_x = 90 \text{ mm/s}$
Rohteilwerkstoff	C 15

*Tabelle 7.2: Parameter für die Simulation der Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln mit einem mehrdirektional wirkenden Vorformwerkzeug*



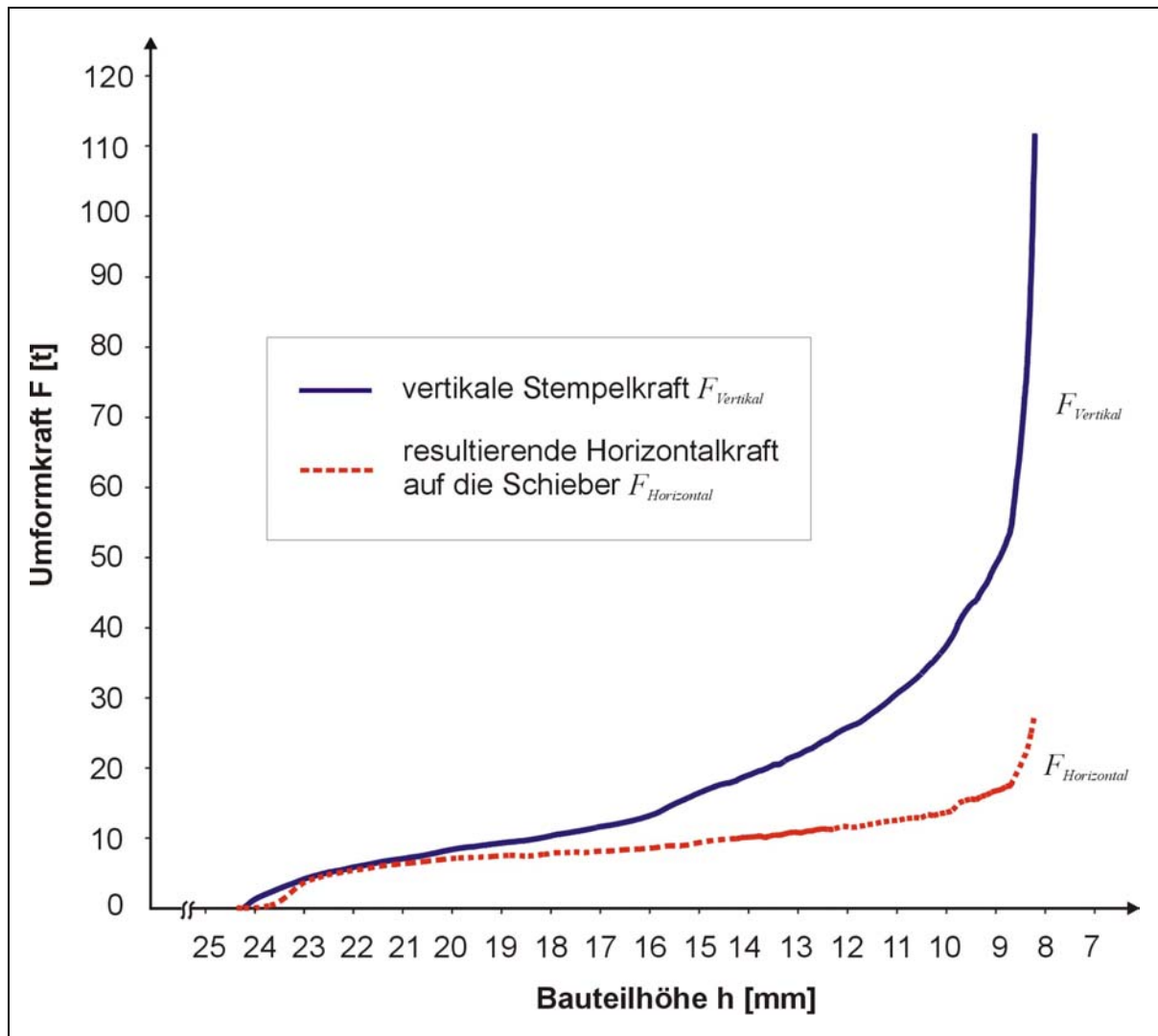
*Bild 7.4: Ergebnis der FEM-Analyse zur Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln mit einem mehrdirektional wirkenden Vorformwerkzeug*

Das Ergebnis der Simulation, das in Bild 7.4 dargestellt ist, zeigt eine Zwischenform, die den Anforderungen des Präzisionsschmiedens gerecht wird. Diese Zwischenform ist in einem Arbeitshub der Maschine herstellbar. Aufgrund des dargestellten Fließverhaltens ergeben sich keine Anzeichen für das Entstehen von Schmiedefehlern, z.B. Falten oder Stiche.

Die mit Hilfe der FEM berechneten maximalen Umformkräfte betragen:

- horizontal wirkende Umformkraft  $F_{\text{horizontal}} = 118 \text{ kN} \hat{=} 11,8 \text{ t}$
- vertikal wirkende Umformkraft  $F_{\text{vertikal}} = 1200 \text{ kN} \hat{=} 120,0 \text{ t}$

Wie in Kapitel 6.4.1 (Bild 6.14) dargelegt, ist die Belastung der horizontal wirkenden Schieber während der vertikalen Umformung bei der Auslegung eines mehrdimensional wirkenden Vorformwerkzeugs für das Präzisionsschmieden von entscheidender Bedeutung. Bild 7.5 zeigt den mit Hilfe der FEM berechneten Verlauf der vertikalen Umformkraft  $F_{\text{Vertikal}}$  und der daraus resultierenden horizontalen Kraft  $F_{\text{Horizontal}}$  während der vertikalen Umformung. Die maximal wirkende Horizontalkraft auf die Schieber beträgt am Ende der Umformung  $F_{\text{Horizontal}} = 268 \text{ kN}$ .



**Bild 7.5:** Mit Hilfe der FEM berechneter Verlauf der vertikalen Umformkraft  $F_{\text{Vertikal}}$  und der daraus resultierenden horizontalen Kraft  $F_{\text{Horizontal}}$  während der vertikalen Umformung des konzipierten Vorformwerkzeugs zur mehrdimensionalen Vorformung



## 7.2.2 Beispielhafte Konzeption eines Werkzeugs zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Pleuel

Auf Basis der durchgeführten Simulation (vgl. Bild 7.4 und Bild 7.5) wird abschließend eine beispielhafte Konzeption eines Werkzeugs zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Pleuel vorgestellt. Analog zu dem in Kapitel 6.3 (vgl. Bild 6.8) entwickelten Versuchswerkzeug besteht das Werkzeug aus den Hauptkomponenten Antriebskeile, Federpaketsystem, Schieber, Stempel und Gravurelementen. Die Schieber umschließen dabei wie beim erprobten prototypischen Werkzeug (vgl. Bild 6.9 und Bild 6.10) Teile des kleinen und großen Auges.

Wesentlicher Unterschied zu dem entwickelten Erprobungswerkzeug liegt in der Modifikation des Schieberantriebs zur Vermeidung von Stirngarten im Schaffbereich (Bild 7.6). Um eine Vergrößerung des Spaltmaßes  $s_{Spalt}$  zwischen Stempel und Schieber durch eine Auffederung der Schieber so weit wie möglich zu unterdrücken, werden zum einen die Schieber deutlich massiver ausgeführt. Zum anderen wird durch eine Verlagerung der Anschläge zur Begrenzung der horizontalen Umformung von den Antriebskeilen zu den horizontal wirkenden Schiebern die für die Auffederung relevante Schieberlänge  $l$  deutlich reduziert. Darüber hinaus kann durch die Verlagerung der Anschläge an die Schieber ein wesentlicher Teil der Auffederung durch ein Nachführen der Antriebskeile kompensiert werden.

Beim Erprobungswerkzeug (Bild 7.6 oben) endet die horizontale Umformung mit dem Aufsetzen der Führungsplatte auf dem Unterwerkzeug. Durch die weitere Abwärtsbewegung des Stößels werden die Tellerfedern komprimiert. Es kommt zu einer Relativbewegung zwischen Aufbauplatte, an welcher der Stempel befestigt ist, und der Zwischenplatte, an der die Antriebskeile angebracht sind. Durch das Eindringen des Stempels erfolgt die vertikale Umformung. Mit zunehmender Breitung während der vertikalen Umformung kommt es zu einer Auffederung der Schieber, so dass Spalte zwischen Schiebern und Stempel entstehen. Da die Antriebskeile in vertikaler Richtung festgesetzt sind, kann die Auffederung nicht durch ein Nachführen der Antriebskeile ausgeglichen werden.

Das weiterentwickelte Werkzeugkonzept (Bild 7.6 unten) sieht vor, ein Nachführen der Antriebskeile und damit das Aufbringen einer der Auffederung entgegenwirkenden Kraft zu ermöglichen. Im Rahmen dieses Werkzeugkonzepts endet die horizontale Umformung durch eine Wegbegrenzung der Schieber an der Gesenkplatte.

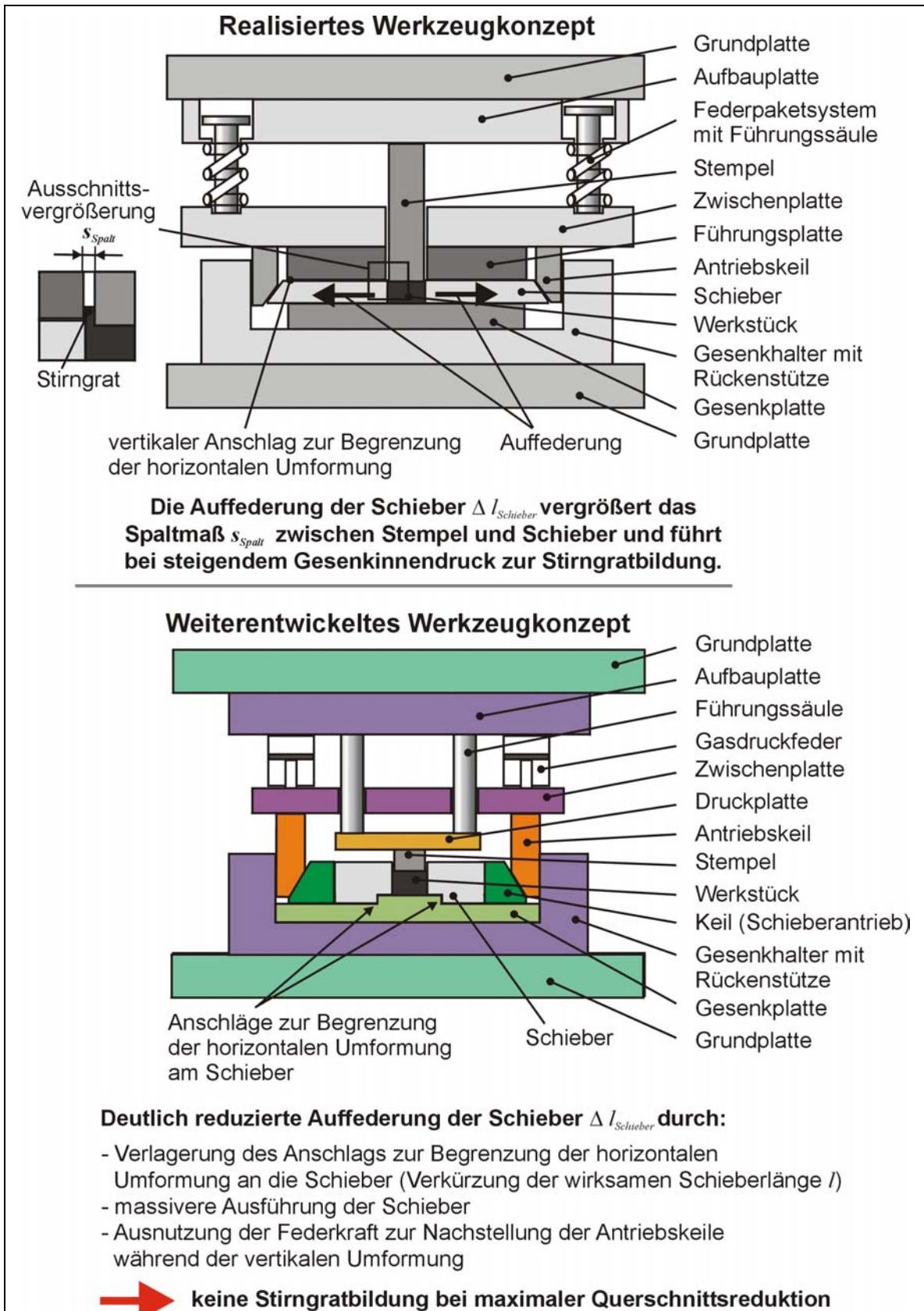


Bild 7.6: Auffederung der horizontalen Stempel beim realisiertem Versuchswerkzeug zur mehrdirektionalen Vorformung (oben) und Weiterentwicklung des Werkzeugs (unten)

Weiterer, wesentlicher Unterschied des weiterentwickelten Werkzeugprinzips gegenüber dem erprobten Versuchswerkzeug zur mehrdirektionalen Vorformung liegt in der Verwendung von Gasdruckfedern für die Realisierung der kinematischen Entkopplung von vertikaler und horizontaler Umformung. Gasdruckfedern bieten den Vorteil, dass die Federkraft mit zunehmendem Federweg (Entkopplungsweg  $s_E$ ) wesentlich geringer ansteigt (Verstärkungsfaktor von ca. 1,4 bei maximaler Komprimierung) als bei zu Federsäulen angeordneten Tellerfedern (Bild 7.7). Darüber hinaus lässt sich die Vorspannkraft von Gasdruckfedern  $F_{Vor}$  über den Gasfülldruck einstellen, so dass die Belastung des Keilgetriebes gegenüber zu einer Federsäule angeordneten Tellerfedern nahezu auf das erforderliche Minimum reduziert werden kann.

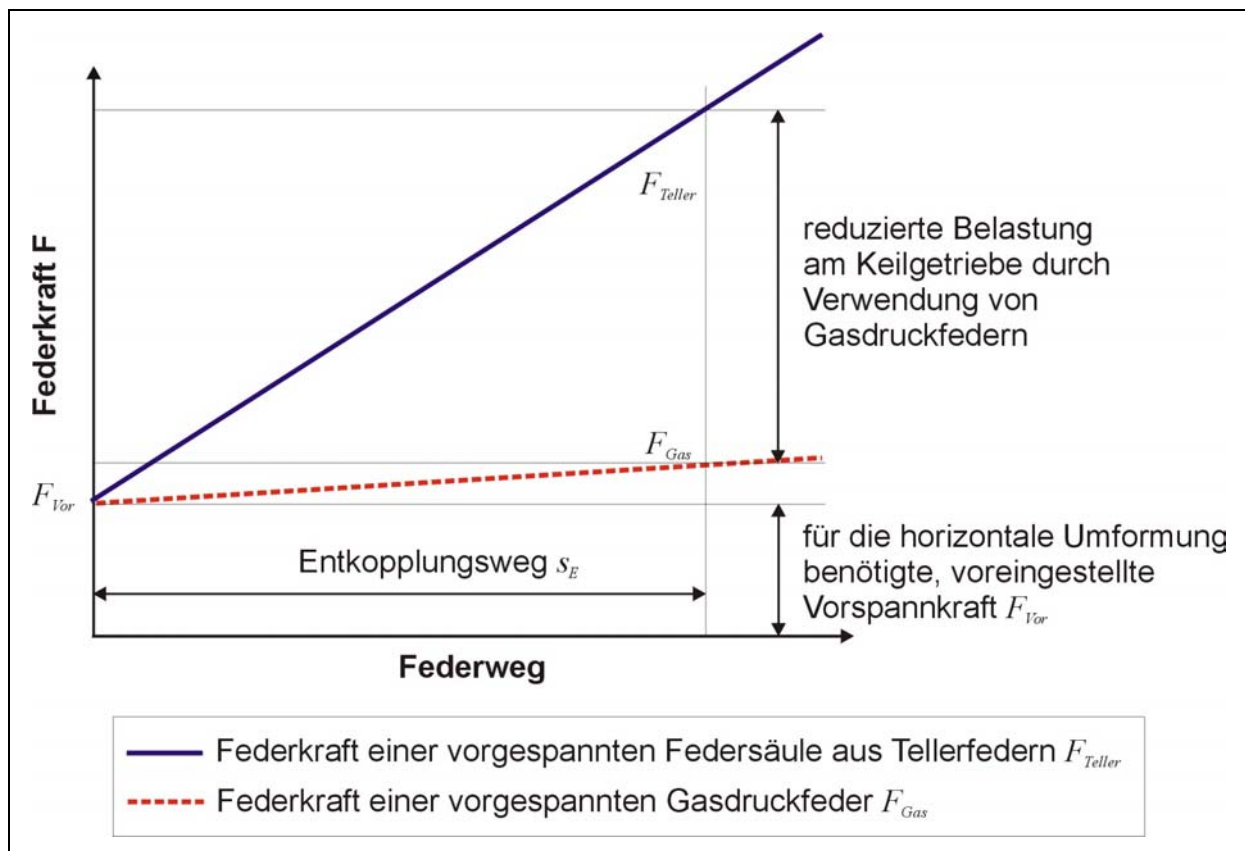


Bild 7.7: Qualitativer Verlauf der Federkräfte von Gasdruckfedern und zu Federsäulen angeordneten Tellerfedern im vorgespannten Zustand

Bild 7.8 zeigt die Funktionsweise des weiterentwickelten Werkzeugs zur mehr-direktionalen Vorformung.

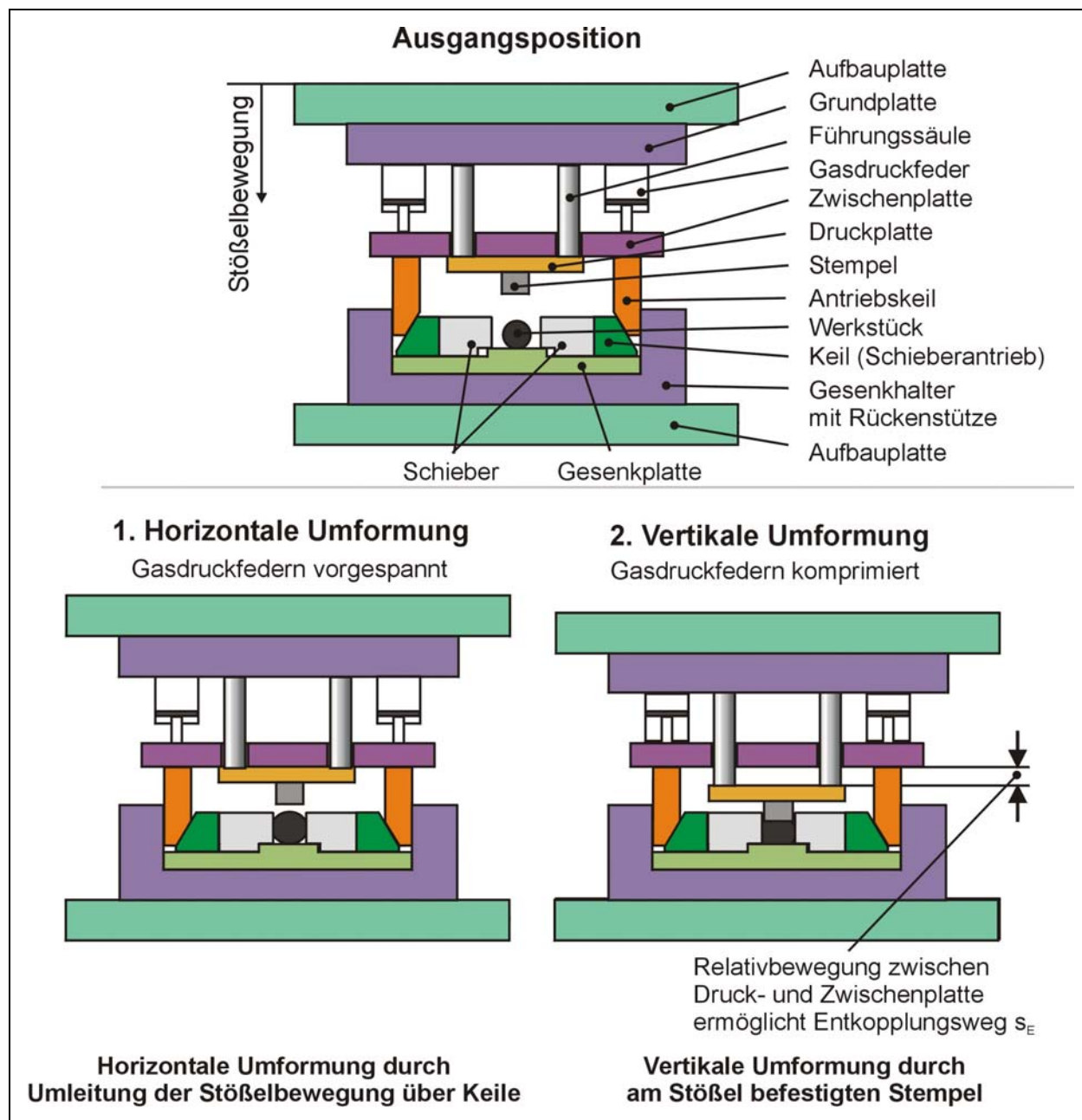


Bild 7.8: Beispiel für ein mögliches Werkzeugkonzept zur Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln

Bild 7.9 zeigt einen CAD-Konstruktionsentwurf für ein mehrdimensional wirkendes Vorformwerkzeug zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Pleuel (vgl. Bild 7.3).

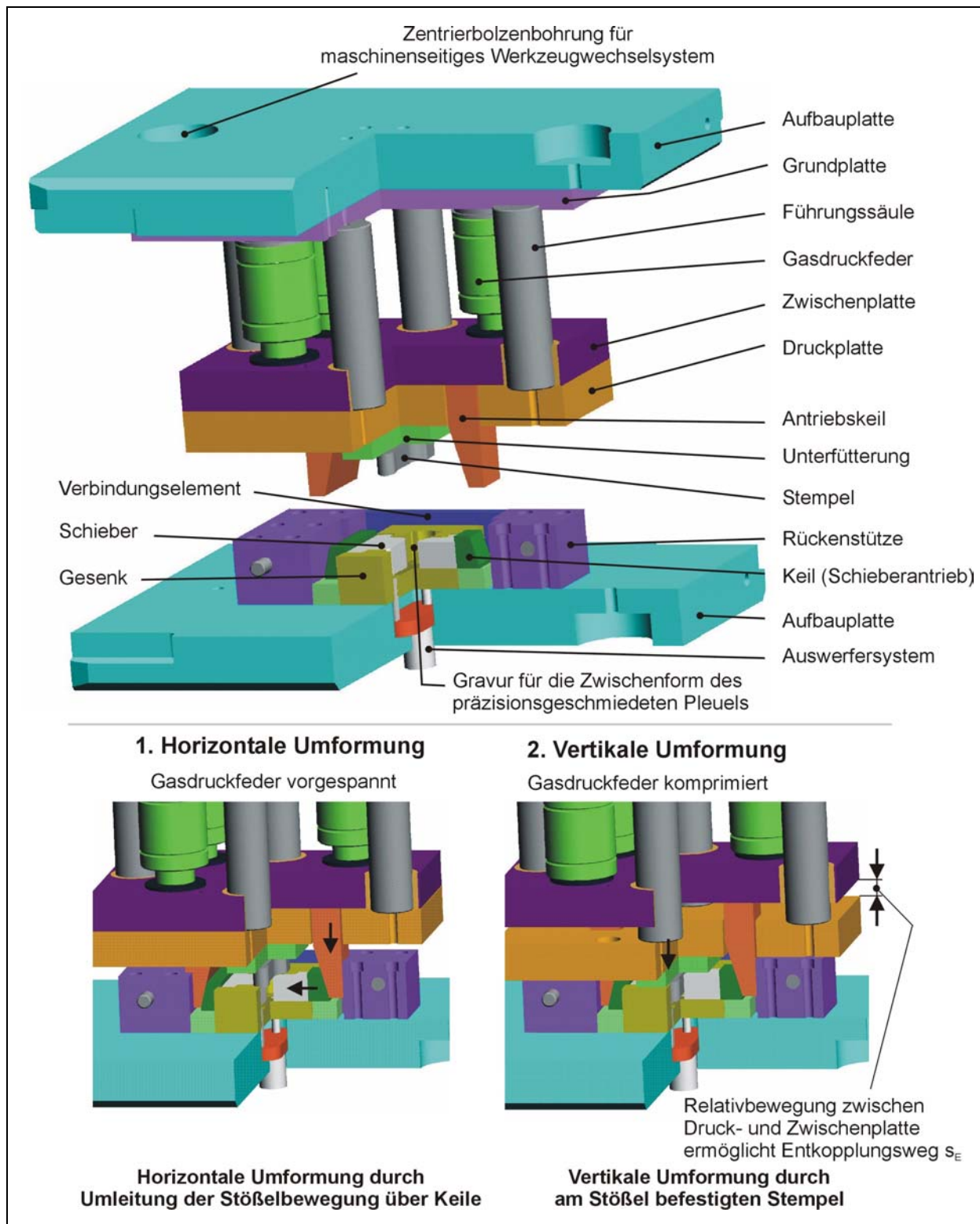


Bild 7.9 Beispiel für ein mögliches Werkzeugkonzept zur Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln (Konstruktionsentwurf)



Für die kinematische Entkopplung von horizontaler und vertikaler Umformung sollen Stickstoff-Gasdruckfedern verwendet werden, die bei einem Gasfülldruck von 150 bar eine Federvorspannung von  $F_{Vor} = 75$  kN zur Verfügung stellen. Für das Keilgetriebe wird ein Keilwinkel von  $\alpha = 20^\circ$  vorgeschlagen, da sich dieser Winkel bei der Erprobung des Versuchswerkzeugs bewährt hat. Bei der Verwendung von zwei Gasdruckfedern pro Antriebskeil steht nach Formel 6.12 für die horizontale Umformung eine Horizontalkraft  $F_{Horizontal} = 263$  kN zur Verfügung. Die mit Hilfe der FEM berechnete Umformkraft von  $F_{Horizontal} = 118$  kN (vgl. Bild 7.4) wird daher mit ausreichender Sicherheit zur Verfügung gestellt.

Eine Rückstellung der Schieber während der vertikalen Umformung infolge des steigenden Gesenkinnendrucks kann ausgeschlossen werden, da die von den Gasdruckfedern aufgebrauchte, vertikale Rückstellkraft mit 150 kN wesentlich größer ist als die nach Formel 6.13 berechnete Rückstellkraft von  $F_{Rück} = 13$  kN. Um die Belastungen auf das Keilgetriebe zu reduzieren, sollte daher der Fülldruck reduziert und auf die Anforderungen (Bereitstellung von horizontaler Umformkraft und Rückstellkraft) angepasst werden.

Bild 7.10 zeigt eine Draufsicht auf das Unterwerkzeug des beispielhaft konstruierten Vorformwerkzeugs zur mehrdirektionalen Umformung sowie eine Detailansicht des verwendeten Schiebers. Nach Formel 6.17 lässt sich die voraussichtlich auftretende Auffederung der Schieber  $\Delta l_{Schieber}$  berechnen:

$$\Delta l_{Schieber} = 268 \text{ kN} \times \left( \frac{30 \text{ mm}}{215.000 \text{ Nmm}^{-2} \times 75 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}} \right) = 0,014 \text{ mm}$$

Bei einem voreingestellten Spaltmaß von  $s_{Spalt} = 0,05$  mm und der berechneten Auffederung der Schieber  $\Delta l_{Schieber} = 0,014$  mm ergibt sich rechnerisch ein Spaltmaß von  $s_{Spalt} = 0,064$  mm, so dass eine Stirngratbildung aufgrund einer Auffederung der Schieber während vertikalen Umformung ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund der Modifizierung des Schieberantriebs, der massiveren Ausführung des Schiebers sowie der Möglichkeit zum Nachführen der Antriebskeile während der vertikalen Umformung durch Verlagerung der Wegbegrenzung für die horizontale Umformung an die Schieber lässt sich die Auffederung der Schieber auf ein Minimum reduzieren.

Während sich beim erprobten Werkzeug bei einer maximalen Horizontalkraft  $F_{Horizontal} = 241$  kN eine Auffederung von  $\Delta l_{Schieber} = 0,057$  mm (vgl. Bild 6.17) ergibt, lässt sich mit dem vorgestellten, weiterentwickelten Werkzeugkonzept die Auffederung auf  $\Delta l_{Schieber} = 0,014$  mm begrenzen. Dies entspricht einer Reduzierung um 75 %.

Da das resultierende Spaltmaß zwischen Stempel und Schieber mit dem weiterentwickelten Werkzeugkonzept den kritischen Wert von  $s_{Spalt} = 0,1$  mm mit hinreichender Sicherheit nicht erreicht, kann eine Stirngratbildung ausgeschlossen werden. Das vorgestellte, weiterentwickelte Werkzeugkonzept bietet damit eine realistische Möglichkeit zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Pleuel.

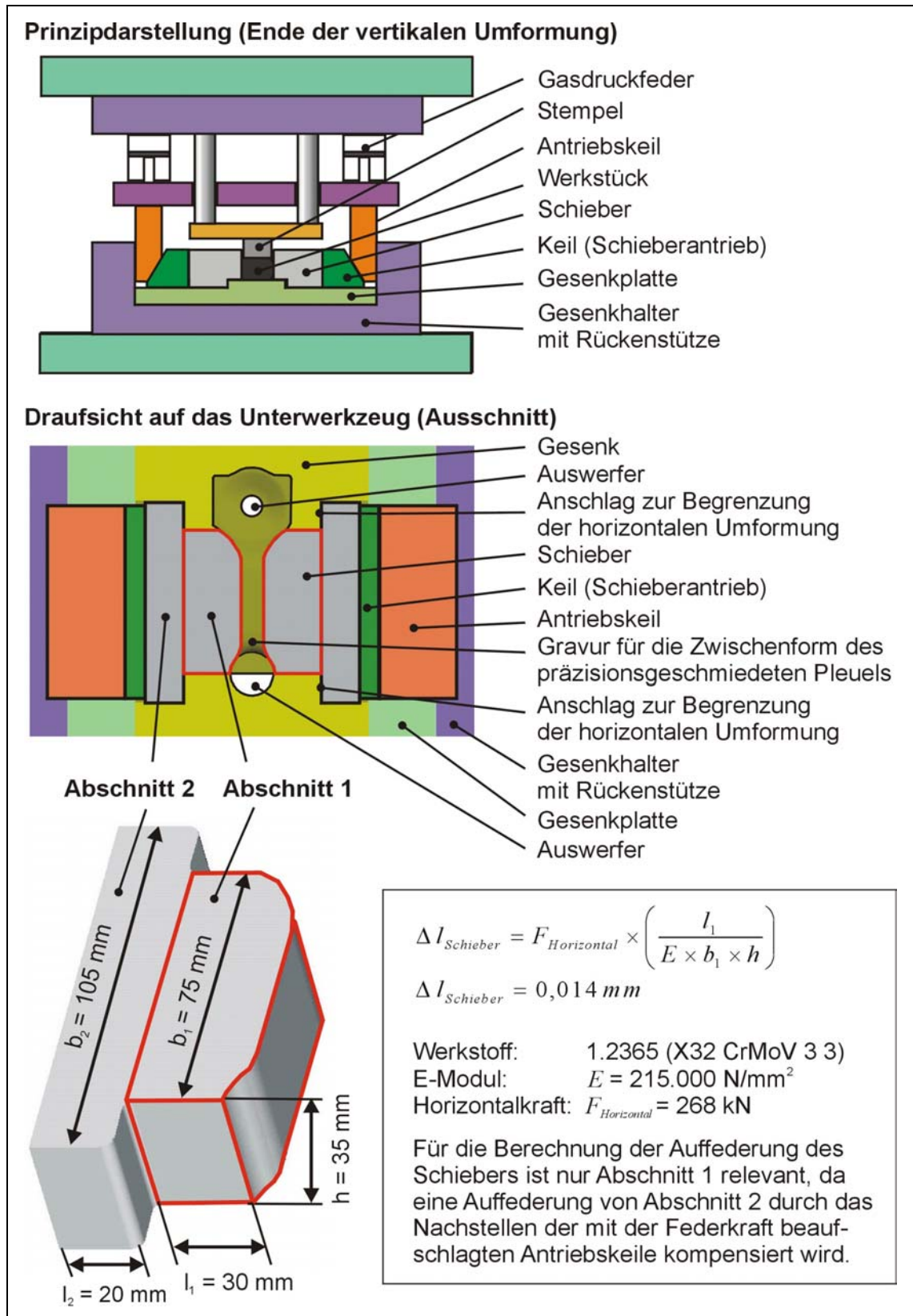


Bild 7.10: Prinzipdarstellung (oben), Draufsicht auf das Unterwerkzeug (Mitte) sowie Detaildarstellung des verwendeten Schiebers (unten) des weiterentwickelten Werkzeugkonzept zur Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln (vgl. Bild 7.3)



## 8. Zusammenfassung

Die Prozesskette *Gesenkschmieden* wird ganz wesentlich durch die Stadienfolge bestimmt, in der die Anzahl und Art der erforderlichen Umformschritte festgelegt wird. Für das Schmieden von Langteilen mit ausgeprägten Querschnittsunterschieden entlang der Bauteillängsachse erfolgt die Formgebung i.d.R. über eine oder mehrere Zwischenformen. Diese Vorformoperationen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Schmiedeteils, den Gratanteil sowie den Gesenkverschleiß. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass eine auf das Bauteil angepasste Vorformung die Voraussetzung für einen optimalen Umformprozess ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl für das konventionelle Gesenkschmieden als auch für das Präzisionsschmieden von Langteilen neuartige Vorformkonzepte entwickelt und erprobt. Gesamtziel war es dabei, Schmiedeunternehmen Verfahren zur Verfügung zu stellen, die eine flexible Herstellung einer auf den jeweiligen Fertigformprozess abgestimmten Zwischenform ermöglichen.

Für das konventionelle Gesenkschmieden stehen der Schmiedeindustrie eine Vielzahl von Vorformverfahren zur Verfügung. Umformwerkzeuge sind an die zu erzeugende Werkstückform gebunden. Dies gilt sowohl für Fertigform- als auch für Vorformwerkzeuge. Für eine variantenreiche Fertigung mit kleinen Stückzahlen führen die Aufwendungen für die lediglich bauteilspezifisch einsetzbaren Vorformwerkzeuge zu einem im Vergleich zur Massenfertigung hohen Stückkostenanteil.

Vor diesem Hintergrund wurde im ersten Teil dieser Arbeit ein modular aufgebautes Werkzeugsystem zur flexiblen Vorformung für das konventionelle Schmieden von Langteilen entwickelt und an einer Beispielgeometrie erprobt. Das grundlegende Konzept des Werkzeugsystems beruht auf einer Segmentierung des formgebenden Werkzeugs in einzelne Basisgeometrien. Durch den modularen Aufbau des Systems lässt sich der Einsatzbereich eines einzelnen Werkzeugs auf die Vorformung für mehrere Bauteile erweitern. Das System besteht aus verschiedenen Segmenten, die sich in einem speziellen Spannsystem zur Vorformung verschiedener Bauteile einer Teilefamilie flexibel anordnen und befestigen lassen.

Bei der Konzeption und Entwicklung des flexiblen Vorformwerkzeugs stand die Auslegung und Gestaltung der Übergänge zwischen den Segmenten im Mittelpunkt. Die Hauptanforderung bestand dabei darin, eine Öffnung der Teilungsfugen während des Vorformprozesses und damit das Entstehen von Schmiedefehlern zu vermeiden. Mit Hilfe von FEM-Analysen sowie durch eine prototypische Realisierung eines modular aufgebauten Vorformwerkzeugs konnte gezeigt werden, dass eine Segmentierung der formgebenden Stauchbahnen möglich ist und keinen negativen Einfluss auf nachgelagerte Schmiedeoperationen hat. Darüber hinaus wurde ein industriell einsetzbares Spannsystem entwickelt, in dem sich die Segmente einfach und sicher befestigen lassen. Zum Abschluss des ersten Teils dieser Arbeit wurde beispielhaft ein segmentiertes Vorformwerkzeug für eine Teilefamilie konzipiert.

Im Gegensatz zum konventionellen Schmieden ist beim Präzisionsschmieden von Langteilen eine Vorformung zur Masseverteilung und Querschnittsvorbildung zwingend erforderlich. Gründe dafür liegen in den besonderen Anforderungen der Fertigformung beim Präzisionsschmieden. Hier ist neben einer exakten Einsatzmasse eine Masseverteilung in engen Grenzen erforderlich. Die Zwischenform muss durch eine Masseverteilung und Querschnittsvorbildung so gestaltet sein, dass das beim Präzisionsschmieden von Langteilen erforderliche umformfreie Schließen der Gesenkhälften gewährleistet wird. Des Weiteren muss die Außenkontur der Zwischenform ein reproduzierbares, positionsgenaueres Einlegen in die Fertiggravur unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wurde im zweiten Teil der Arbeit ein Vorformkonzept für das Präzisionsschmieden von Langteilen entwickelt, das über mehrdirektional wirkende Umformstempel eine Masseverteilung und Querschnittsvorbildung in einem Arbeitshub der Umformmaschine ermöglicht. Das Werkzeugprinzip sieht dabei sowohl eine horizontale als auch eine vertikale Umformung vor. Die Zusammenfassung dieser Arbeitsschritte ermöglicht eine Verkürzung der Prozesskette *Präzisionsschmieden*.

Mit Hilfe der FEM wurde nachgewiesen, dass es aufgrund der resultierenden Kräfte vorteilhaft ist, zunächst die horizontale Umformung durchzuführen und erst im Anschluss daran die vertikale Umformung einzuleiten. Zum Nachweis der technischen Machbarkeit wurde auch für dieses Vorformverfahren ein Versuchswerkzeug ausgelegt, konstruiert und gefertigt. Die Ergebnisse der Erprobung zeigen, dass mit dem entwickelten, mehrdirektionalen Vorformverfahren bei geeigneter geometrischer Gestaltung des Stempels Querschnittsreduzierungen von bis zu 56 % realisierbar sind. Größere Querschnittsunterschiede führen zu einer Auffederung der Schieber während der vertikalen Umformung. Ein so entstehender Spalt zwischen Schiebern und Stempel erhöht die Gefahr einer Stirngratbildung, die gleichzeitig die Verfahrensgrenze des entwickelten Vorformkonzepts darstellt.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Erprobung wurde das entwickelte Werkzeugprinzip zum Abschluss des zweiten Teils dieser Arbeit mit Hilfe der FEM gezeigt, dass sich das entwickelte, mehrdirektionale Vorformverfahren auf die Herstellung von Zwischenformen für das Präzisionsschmieden von Pleueln übertragen lässt. Zur Herstellung der für das Präzisionsschmieden zwingend erforderlichen Zwischenform wurde beispielhaft ein Werkzeugkonzept erstellt, das eine Auffederung der Schieber während der vertikalen Umformung auf ein Minimum reduziert. Das entwickelte Verfahren zur mehrdirektionalen Vorformung bietet damit eine realistische Möglichkeit zur Herstellung von Zwischenformen für präzisionsgeschmiedete Langteile.

## 9. Literaturverzeichnis

- [ADA90] Adams, B.: Verfahren und Fertigungssystem zum Präzisionsschmieden von Zylinderrädern. Dissertation Universität Hannover, 1990.
- [AKA94] Akata, H.E.: An approach to preform design in the closed-die forging. ESDA 1994, Proc. Of the 1994 Engineering Syst. Design and Analysis Conf., Vol. 8 – Part A, Desogn: Analysis, Synthesis an d Applications, Band PD 64-8.1, London, GB, 4.-7.7.1994, S. 209-214.
- [BAC93] Bachmann, K.; Lüdenbach, B.: Neuere Entwicklungen beim Querwalzen. Umformtechnik 27, Heft 3, 1993, S. 179-183.
- [BAL01] Balendra, R.: Net-shape forming: state of the art. Journal of Materials Processing Technology, Band 115, Heft 2, S. 172-179, 2001.
- [BAY91] Bayliss, R.H.: Closed Die Forging. A Decade of Innovation and Change. Metallurgia, Redhill, Band 58, Heft 9, 1991, S. 340-342.
- [BEI95] Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, 17. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [BÖH02] Böhler W302, Warmarbeitsstahl, Datenblatt des Werkzeugstahls 1.2344, Böhler Edelstahl GmbH & Co. KG, Kapfernberg, Österreich, 2002.
- [BOH99a] Bohnsack, R.: Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Laufverzahnungen, Dissertation Universität Hannover, elektronische Veröffentlichung <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e002/309165466.pdf>, Hannover, 1999.
- [BOH99b] Bohnsack, R.: Schmieden ist oft besser als Spanen. Werkzeugtechnologien für das Präzisionsschmieden. Technica, Ruppreswil, Band 48, Heft 21, 1999, S. 24-29.
- [BRO77] Broder, G.: Umformen von nichtrostenden Stählen zu Instrumenten, Bestecken und Werkzeugen. Stahl u. Eisen 97 Heft 1, 1977
- [BRO99a] Broß, G.: Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden von Pkw-Pleueln, Dissertation Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 508, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [BRO99b] Broß, G., Müssig, B.: Gratloses Präzisionsschmieden von Langteilen im Halbwarmbereich. Schmiede-Journal September 1999, S. 24-25.
- [BUC97] Buchholz, B.: Ähnlichkeitsbasierte Auslegung von Stadienfolgen in der Warmmassivumformung. Dissertation Universität Hannover. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 415. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [CHI01] Chitkra, N.; Kim, Y.: Near-net-shape forging of a crown gear: some experimental results and an analysis. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Band 41, Heft 3, 2001, S. 325-346.

- [CHU00] Chunguo, X.; Guangsheng, R.; Jingliang, W., Guihua, L.: The research and application of the combined forming process for precise forgings. In 7th Asia Symposium on Precision Forging, 22.-25.10.00, S. 122-126.
- [CLA95] Claasen, K.-H.; Herlan, T.; Lorenz, B.: Querwalzen – Möglichkeiten und Kriterien. SFU Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Progressive Werkstoffumformung, Tagungsband I, Freiberg, 30.11-1.12.95, S. 1-34.
- [CZE01] Czerski, R.: Well-kept secrets for operating rollforming machines. Metal forming, Band 35, Heft 9, 2001, S. 32-38.S
- [DAI98] Dai, Y.: Simulation der Gefügebildung bei der Herstellung von Formteilen durch Reckwalzen. Dissertation Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1999.
- [DEA85] Dean, T.A.: Concepts & Practice in Precision Forging. Proceedings of the International Cold Forging Conference, 1985 in Birmingham, UK, S. 15-23.
- [DOE00] Doege, Eckart: Arbeitsbericht zum Forschungsvorhaben DO 190/119-1-2: Untersuchungen zur Auslegung von geschlossenen Schmiedegesenken mit beweglichen, mehrfachwirkenden Umformstempeln. Hannover 2000.
- [DOE01] Doege, E.; Dreyer, G.: Präzisionsschmieden komplexer Antriebsbauteile. Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Pkw-Gangrädern. Werkstattstechnik – wt, Band 91, Heft 10, 2001, S. 615-620.
- [DOE89] Doege, E.; Thalemann, J.; Weber, F.: Hot forging of Precision Parts. Journal of Material Processing Technology, Band 35, 1989, S. 481-569.
- [DOE96a] Doege, E.; Behrens, B.-A.; Wiarda, M.: Verkürzte Prozessketten durch das Präzisionsschmieden von Zahnrädern – Auswirkungen auf die Schmiedetechnik. Hrsg.: Doege E., Tagungsband zum 15. Umformtechnischen Kolloquium Hannover vom 29.02.-01.03.1996, Hannoversches Forschungsinstitut für Fertigungsfragen e.V. (HFF), HFF-Bericht Nr. 13, Hannover 1996, S. 257-278.
- [DOE96b] Doege, E.; Wiesner, J., Karkmann, A.: Präzisionsschmiedeverfahren zur Herstellung hinterschnittener Gleichlaufgelenke. Umformtechnik, Band 30, Heft 1, 1996, S. 67-71.
- [DOE96c] Doege, E.; Brüning, J.; Broß, G.: Technologieentwicklung zum Präzisionsschmieden von Langteilen. Umformtechnik, Band 30, Heft 3, 1996, S. 152-156.
- [DOE98] Doege, E. et al.: Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder. Umformtechnik, Band 32, Heft 1, 1998, S. 30-34.
- [DRE02] Dreyer, G.: Untersuchungen zur Herstellung von komplexen Antriebsbauteilen durch Präzisionsschmieden. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 619, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002

- [EBE91] Eberlein, L.; Müller, H.; Bohn, J.: Verfahrensentwicklung zur flexiblen Massivumformung von Rohteilen. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU „Otto von Guericke“ Magdeburg 35, Heft 5, 1991, S. 134-136.
- [EIS99] Eisele, R.; Hustedt, P.: Auswirkungen der Globalisierung auf die Automobilindustrie und ihre Zulieferer. In: Umformtechnik an der Schwelle zum nächsten Jahrtausend. Hrsg.: Doege E., Tagungsband zum 16. Umformtechnischen Kolloquium Hannover vom 25.-26.2.1999, Hannoversches Forschungsinstitut für Fertigungsfragen e.V. (HFF), HFF-Bericht Nr. 14, Hannover 1999, S. 7-14.
- [ELS97] Elsinghorst, D.; Pannasch, S.; Lorenz, B.: Optimierte Schmiedetechnologien für Teile der Langform. Wirtschaftsfaktor Umformtechnik. 4. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz, TU Chemnitz, Chemnitz 5.-6.11.1997, S. 124-132.
- [FLÜ02] Flüß, A.: Entwicklung eines Werkzeugsystems zur Fertigung gelochter Präzisionsschmiedestücke. Dissertation Universität Hannover
- [GAL93a] Gallade, U.; Fleischer, H.: Verfahrenstechnische und wirtschaftliche Aspekte beim Gratlos- und Präzisionsschmieden. In: 14. Umformtechnisches Kolloquium vom 17.-18.3.93, Hannoversches Forschungsinstitut für Fertigungsfragen e.V. (HFF), HFF-Bericht Nr. 12, Hannover 1993, S. 1-5.
- [GAL93b] Gallade, U.; Fleischer, H.: Weniger Spanen. Gratlosschmieden einbaufertiger Funktionsflächen senkt Herstellungskosten. Der Maschinenmarkt, Band 99, Heft 35, 1993, S. 26-31.
- [GIL97] Gill, T.: Auto forgings face tough challenges. MBM – Metal Bulletin Monthly, Heft 315, 1997, S. 84-89.
- [GRO01] Groche, P.; Heislitz, F.; Rathmann, T.: Weiterentwicklungen des Axial-Radial-Umformens. Eine Verfahrenserweiterung des Rundknetens mit Zukunftsperspektive. Werkstatttechnik – wt, Band 91, Heft 10, 2001, S. 621-624.
- [GUT99a] Gutmann, P.; Zitz, U.; Butz, F.: Leicht und hochbelastbar: Präzisionsgeschmiedete Getriebeteile. Forum technische Mitteilungen ThyssenKrupp, Heft 1, 1999, S. 56-59.
- [GUT99b] Gutmann, P.; Zitz, U.: Leicht und hoch belastbar. Präzisionsgeschmiedete Getriebeteile. Umformtechnik, Band 33, Heft 4, 1999, S. 16-18.
- [HAA64] Haas, F.: Fertigungsverfahren zum Herstellen von Ausgangsteilen für das Massivumformen. Ind.-Anz. 86, 1964, Band 84, S. 1727-1732.
- [HER01] Herlan, T.: Querkeilwalzen als Vorform- und Fertigformaggregat. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. Fellbach b. Stuttgart, Hrsg.: Siebert, K., 15.-16.Mai 2001, 2001, S. 45-55.
- [HER02] Herlan, T.: Cross Rolling. Metallurgia, Redhill, Band 69, Heft 2, 2002, S. FT7.

- [HER97a] Herbertz, R.; Waltermann, Th.: REWA 2: Die zweite Generation rechnerunterstützter Auslegung von Reckwalzwerkzeugen. Schmiedejournal März 1997, S. 21-22.
- [HER97b] Herbertz, R.; Hermanns, H.: Querkeilwalzen. Ein wirtschaftliches und flexibles Vorformverfahren für die Großserienfertigung. Schmiede-Journal September 1997, S. 20-21.
- [HID90] Hideaki, K.: Towards Net-Shape Forming, Journal of Material Processing Technology. Band 22, 1990, S. 307-342.
- [HIR00] Hirschvogel, M.: Zukunftsperspektiven der Schmiedeindustrie. Schmiede-Journal März 2000, S. 3.
- [HIR95] Hirschvogel, M.: Transmission shaft forgings – Technical and economical aspects of new developments. Proceedings of the 9th international cold forging congress, Solihull, UK, 22.-26.5.1995, S. 425-431.
- [HIR98] Hirt, G., Thixoforming: Eine zukünftige Alternative zur Herstellung komplex geformter Schmiedeteile. Schmiede-Journal März 1998, S. 32-33.
- [HIR99] Hirschvogel, M.: Technische und wirtschaftliche Aspekte der Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. Fellbach b. Stuttgart, Hrsg.: Siegert, K., 19.-20.Mai 1999, 1999, S. 1-16.
- [HUS01] Hustedt, P.; Gunga, H.-D.: Modulares Werkzeugkonzept zur Vorformung. Schmiede-Journal September 2001, S. 18-19.
- [IDS02] Industrieverband Deutscher Schmieden e.V., Internetdarstellung: [http://www.ids.wsu.de/web-bin/owa/home\\_page2?p\\_typ=1&p\\_typ2=1](http://www.ids.wsu.de/web-bin/owa/home_page2?p_typ=1&p_typ2=1)
- [IPH97] IPH-Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH: Studie zum Forschungsantrag „Entwicklung eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur flexiblen Vorformung für das Gesenkschmieden“. Im Auftrag vom Industrieverband Deutscher Schmieden e.V. (IDS), Hannover, 1997.
- [IPH99] IPH-Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Aw 6/5-1: Untersuchung und Ermittlung der Verfahrensgrenzen beim Halbwarmumformen von Langteilen, Hannover 1999.
- [KIM01] Kim, Y.; Chitkara, N.: Determination of preform shape to improve dimensional accuracy of the forged crown gear form in a closed-die forging process. International Journal of Mechanical Sciences, Band 43, 2001, S.853-870.
- [KOL95] Kolbe, M.: Querwalzen – Entwicklung eines alten Umform-Prinzips. Spektrum der Wissenschaft, November 1995, S. 112-113.
- [KOP87] Kopp, R.: Einfluss der Sattelgeometrie und Eindringtiefe auf das Hohlstellenverhalten beim Recken von Blöcken bis 1 t Gewicht. Forschungsbericht, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1987.

- [KRE01] Krell, H.-U.: Von der Gesenkschmiede zum Modul-Lieferanten. Schmiede-Journal 2001, S. 24-25.
- [KUD90] Kudo, H.: Towards Net-Shape Forming. Journal of Materials Processing Technology, Band 22, 1990, S. 307/342.
- [LAN00] Landgrebe, D.; Nägele, H.; Lorenz, B.: Umformtechnische Innovationen bei der Herstellung von Getriebewellen. Leichtbau durch Umformtechnik. 7. Sächsische Fachtagung Umformtechnik. Fraunhofer-Institut für Werkzeugtechnik und Umformtechnik IWU Chemnitz, TU Chemnitz, Chemnitz, 14.-25.10.2000, S. 357-369.
- [LAN77] Lange, K.; Meyer-Nolkemper, H.: Gesenkschmieden. 2., neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, New York, 1977.
- [LEI96] Leib, U.; Lorenz, B.; Elsinghorst, D.; Lüdenbach, B.: Weitere Entwicklungen bei der umformtechnischen Herstellung von Getriebewellen für Fahrzeuge. Schmiede-Journal März 1996, S. 19-20.
- [MAT91] Mathieu, H.: Ein Beitrag zur Auslegung von Stadienfolgen beim Gesenkschmieden mit Grat. Dissertation Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 213, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [MCD89] McDonald, W.: Cross rolling forging preforms. Precision Metal Band 47, Heft 8, 1989, S. 10-11.
- [MEI93] Meier, H.: Simultaneous Forging. Neue Wege im Schmiede- und Druckgusswerk bei Ford. Umformtechnik 27, Heft 6, 1993, S. 390-395.
- [MOL02] Molyduval Spezialschmierstoffe. Produktinformationen der Fa. Molyduval GmbH, Ratingen. Elektronische Veröffentlichung: <http://www.molyduval.com>, 2002.
- [MÜL96] Müller, F.: Potentiale des Axial-Radial-Umformens. 20 Jahre Umformtechnik in Darmstadt, Festschrift, Darmstadt, 3.6.1996, 1996, S. 199-204.
- [MÜL97] Müller, F.: Verfahrensgrundlagen des Rundknetens. Dissertation TH Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- [NEU99] Neugebauer, R.; Lorenz, B.: Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet des Querwalzens. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. Fellbach b. Stuttgart, Hrsg.: Siegert, K., 19.-20.Mai1999, 1999, S. 103-114.
- [NN01] Schmiedeteile aus Aluminium. Steigende Nachfrage sorgt für kontinuierliches Wachstum. VDI-Z Integrierte Produktion, Band 143, Heft 6, 2001, S. 72-73.
- [NN02] Tabellenbuch Metall. Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co., Haan-Gruiten, 2002.
- [POL95] Polley, W.; Knoch, U.: Endkonturnahe Herstellung von Ventildfedertellern durch Präzisionsschmieden. Umformtechnik, 29 (1995) 3, S. 178-183.

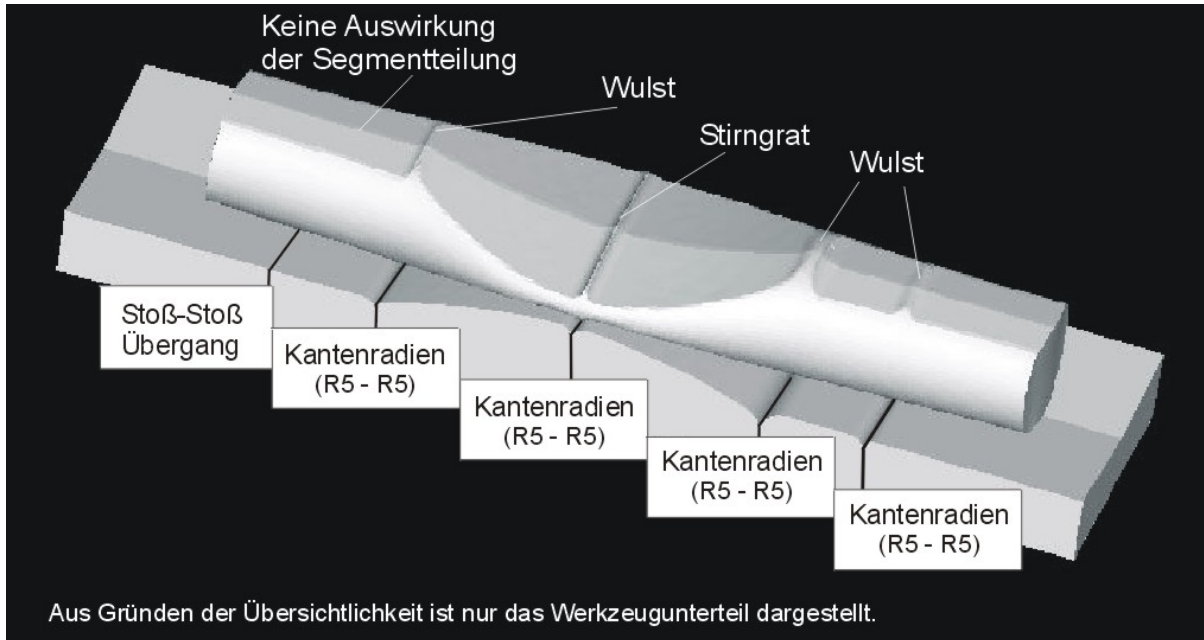


- [REN00] Ren, G.; Xu, C.; Wang, J.: New Developments on cross-wedge rolling technology in China. . In 7th Asia Symposium on Precision Forging, 22.-25.10.00, S. 178-193.
- [REN98] Ren, G.; Xue, C.: The process of cross-wedge rolling on forming complicated stepped-shaft forgings. In: ImechE Conference Transactions (ICFT'98), 1998, Birmingham UK, S. 163-174.
- [ROT97] Rotarescu, M.; Meinen, J.: FEM-Simulation lokaler Verformung metallischer Werkstoffe unter wiederholter Belastung. In: MARC Benutzertreffen, München, 15.-16. Oktober 1997, S. 1-15.
- [RUD00] Rudau, E.: Deutsche Gesenkschmiedeindustrie gerüstet für die Zukunft. Schmiede-Journal September 2000, S. 32-33.
- [SCH00] Schmidt, B.C.; Flüß, A.; Kohlstette, J.: Gratloses Präzisionsschmieden von Langteilen. Umformtechnik, Band 34, Heft 3, 2000, S. 43-46.
- [SCH01] Schmidt, B.C.; Flüß, A.: Bauteile schmieden ohne Gratansätze. MM - Maschinenmarkt, Würzburg, Band 107, Heft 7, 2001, S. 42-44.
- [SCH90] Schmöckel, D.: Konturnah fertigen in der Kaltmassivumformung. HFF-Bericht Hannover Nr. 11, 1990, S. 6/1-6/10.
- [SCH91] Schmöckel, D.; Sheljaskow, S.; Ruhland, T.: Neue Perspektiven durch die Axial-Radial-Umformung. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. Symposium, Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, 28.-29.5.1991, 1991, S. 389-407.
- [SIE97] Siegert, K.; Krüßmann, M.: Rundkneten im Einstechverfahren. Umformtechnik Heft1/97, S. 30-32.
- [SPI57] Spies, K: Die Zwischenform beim Gesenkschmieden und ihre Herstellung durch Formwalzen. Dissertation Technische Hochschule Hannover, 1959.
- [SPI59] Spies, K: Die Zwischenform beim Gesenkschmieden und ihre Herstellung durch Formwalzen. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfaen, Nr. 728, 1959.
- [STE97] Steffens, K.: Umformtechnik 2000 – Erwartungen voll erfüllt? In: UKD 97, 6. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Wege erkennen – Potenziale nutzen, Darmstadt, 11.-12. März 1997, S. 11-21.
- [TOM99] Tomov, B.; Gagov, V.: Modelling and description of the near-net-shape forging of cylindrical spur gears. Journal of Materials Processing Technology, Band 92-93, 1999, S. 444-449.
- [TÖN93] Tönshoff, H. K.; Wobker, H.-G.; Brandt, D.: Hartfeinbearbeitung aus Sicht der Forschung. In: Neuentwicklungen in der Zerspantechnik. Hrsg.: VDI Verlag, Düsseldorf, Tagungsband zum CIRP-VDI-Seminar vom 22.–24.9.1993 in Düsseldorf, VDI Berichte 988, S. 189/210.

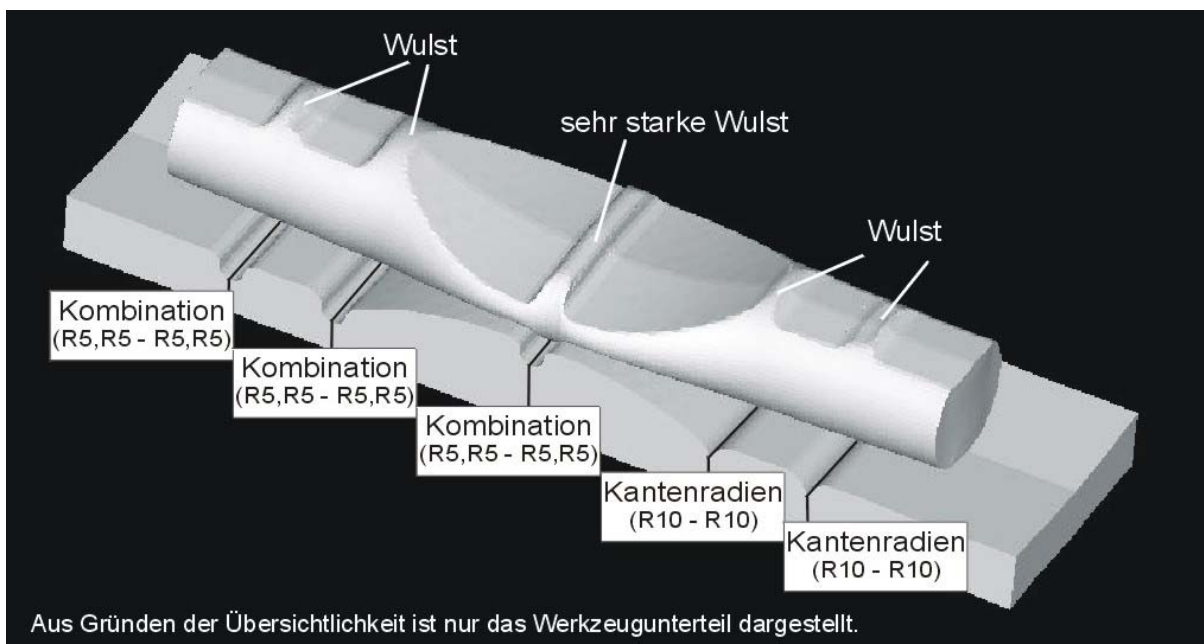
- [TUT99] Tutmann, T.: The Forging Industry in Europe – Facts and Trends. Neue Entwicklungen in der Massivumformung, 19. und 20. Mai 1999, Stuttgart, Fellbach. Hrsg.: Siegert, 1999, S. 383-391.
- [UMB95] Umbach, R.; Pannasch, S.; Lorenz, B.: Entwicklungsfortschritte zum Querwalzen von Stahlwerkstoffen. Umformtechnik 29, Heft 3, 1995, S. 173-175.
- [VDI86] VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1986.
- [VIE98] Vieregge, K.: Die deutsche Schmiedeindustrie im Wettbewerb. In: Fortschritt mit Schmiedeteilen 98. Veitshuchtheim, 16.-17.6.1998, VDI-Berichte, Band 1382, 1998, S. 1-11.
- [WEB93] Weber, M.: Comparison of advanced procedures and economics for production of connecting rods. Powder Metallurgy International, Band 25, Heft 3, 1993, S. 125-129.
- [WES97a] Westerkamp, C.; Weißmann, G.: Präzisionsumformung – eine Schlüsseltechnologie für die Antriebstechnik. VDI-Zeitschrift, Band 139, Heft 9, 1997, S. 72-74.
- [WES97b] Westerkamp, C.: Präzisionsschmieden verzahnter Antriebselemente am Beispiel schrägverzahnter Zahnräder. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 427, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [WES97c] Westkämper, E.: Arbeitsorganisation und Unternehmenskonzepte der deutschen Schmieden im internationalen Vergleich. Wirtschaftsfaktor Umformtechnik. 4. Sächsische Fachtagung Umformtechnik. Fraunhofer-Institut für Werkzeugtechnik und Umformtechnik IWU Chemnitz, TU Chemnitz, Chemnitz, 5.-6. November 1997, S. 17-33.
- [WIE95] Wiesner, J.; Karkmann, A.: Hinterschnitt im Sicherheitsbauteil. Präzisions-schmiedewerkzeug für Gleichlaufgelenke. Industrieanzeiger, Band 117, Heft 40, 1995, S. 62-63.
- [WIE96] Wiesner, J.: Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden hinterschnittener Gleichlaufgelenke. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 397, VDI-Verlag.
- [YOS99] Yoshimura, H.; Tanaka, K.; Wang, C.: Precision forging of aluminium and steel, especially in enclosed die forging. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. Hrsg.: Siegert, K., Tagungsband zum Symposium vom 19.-20.5.1999, Stuttgart, MAT-Info Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 1999, S. 339-358.
- [ZER97] Zerres, E.: Leichter, effizienter, genauer. Trends in der Massivumformung. Fertigung, Landsberg, Band 25, Heft 10, 1997, S. 36-38.
- [ZHA99] Zhao, G.; Wang, G.; Zhao, X.: Preform design engineering method in metal forming: from simulation verification to simulation design. Advanced Technology of Plasticity, Nürnberg, 19.- 24. September 1999, Band 3, 1999, S. 1625-1630.

## Anhang

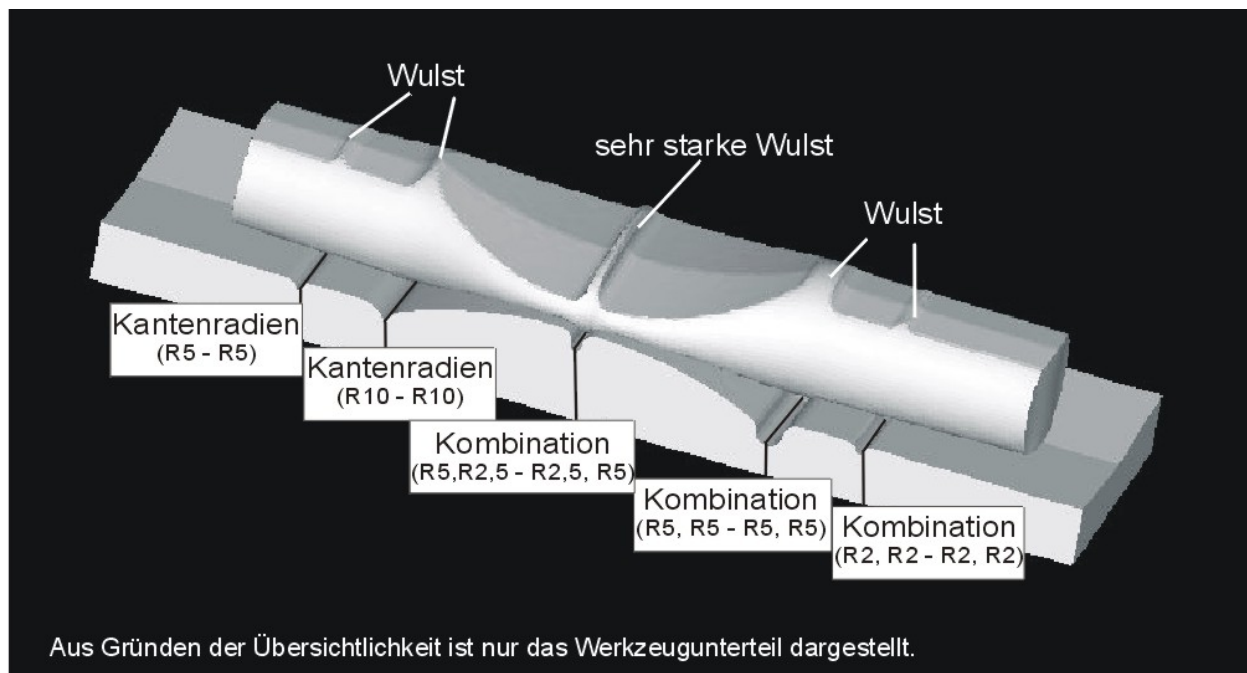
Im Folgenden sind die Ergebnisse der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen dargestellt (vgl. Kapitel 5.4.1.3, Tabelle 5.2 und Bild 5.7).



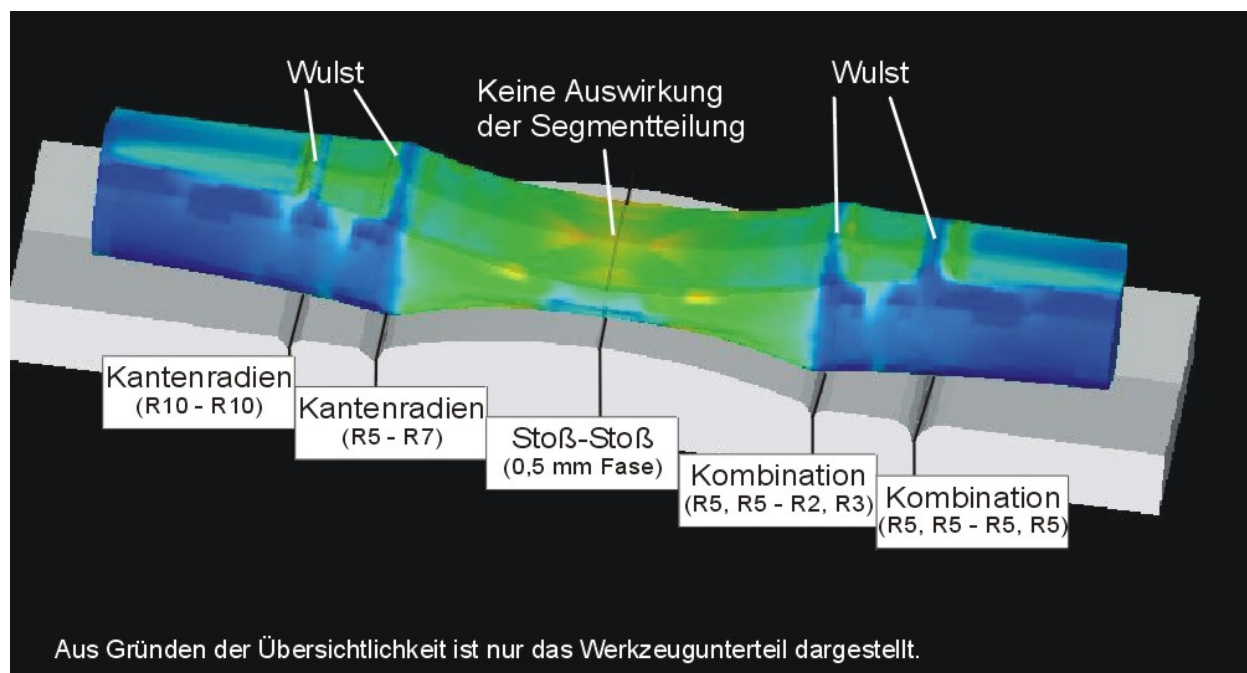
*Bild A.1: Ergebnisse der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*



*Bild A.2: Ergebnisse der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen*



**Bild A.3:** Ergebnisse der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen



**Bild A.4:** Ergebnisse der FEM-Analyse zur Auslegung der Segmentübergänge eines modular aufgebauten Werkzeugsystems zur Vorformung von Langteilen

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name Peter Hustedt  
Geburtsdatum und -ort 09.10.1969 in Einbeck  
Familienstand Verheiratet, zwei Kinder

### **Schulbildung**

08/76 - 07/80 Martin-Luther-Grundschule Northeim  
08/80 - 07/82 Thomas-Mann-Orientierungsstufe Northeim  
08/82 - 05/89 Gymnasium Corvinianum Northeim

### **Wehrdienst**

07/89 - 09/90 3./Pionierbataillon 2 in Hann. Münden

### **Studium**

10/90 -10/96 Studium des Maschinenbaus ,  
Vertiefungsrichtung Produktionstechnik  
- Technische Universität Braunschweig (WS 90/91)  
- University of Birmingham (SS 95)  
- Universität Hannover (SS 91 - SS 96)  
10/96 Studienabschluss als Diplom-Ingenieur Maschinenbau

### **Berufstätigkeit**

studienbegleitend Praktika in verschiedenen Industrieunternehmen  
studienbegleitend Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Fertigungstechnik  
und spanende Werkzeugmaschinen der Universität  
Hannover  
11/96 - 06/98 Vertriebsingenieur bei der Siemens AG in Erlangen,  
Instandhaltungsberater im Unternehmensbereich  
Anlagenbau und Technische Dienstleistungen  
07/98-08/01 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für  
Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Seit 09/01 Leiter der Abteilung Prozesstechnik am IPH - Institut  
für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Seit 07/03 Prokurist und stellvertretender Geschäftsführer des IPH -  
Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH