



FAU Studien aus dem Maschinenbau 317

Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen
unterschiedlicher Geometrie an Blechen
mittels Fließpressverfahren
der Blechmassivumformung

Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen
unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels
Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 317

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen
unterschiedlicher Geometrie an
Blechen mittels Fließpressverfahren
der Blechmassivumformung

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT)
Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Erlangen
FAU University Press
2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Gröbel, Daniel. 2019. *Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 317. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-169-0.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative Commons Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-168-3 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-169-0 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-169-0

**Herstellung von Nebenformelementen
unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels
Fließpressverfahren der Blechmassivumformung**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Daniel Gröbel

aus Neustadt a.d.Aisch

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2018

Vorsitzender

des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Vorwort

„Für jedes Problem gibt es eine Lösung, die einfach, klar und falsch ist.“

Henry Louis Mencken

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „A2: Fließpressen - Herstellung komplexer fließgepresster Funktionselemente an Blechen“ in der zweiten Phase des DFG-Sonderforschungsbereichs SFB/Transregio 73 (TR 73)“ angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, sowie für das in mich gesetzte Vertrauen. Die umfangreiche Unterstützung und die zahlreichen fachlichen Diskussionen haben entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Weiterhin gilt meine Dankbarkeit den Kollegen, technischen Mitarbeitern und Studenten am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie für die angenehme und produktive Zusammenarbeit. Besonders erwähnen möchte ich zudem Prof. Dr.-Ing. habil. Ulf Engel, der mich durch zahlreiche fachliche Diskussionen hindurch begleitet und mit großem Interesse unterstützt hat.

Allen voran möchte ich jedoch meiner Mutter und meinen Großeltern danken, die ohne Zweifel die wichtigste Rolle beim Gelingen dieser Arbeit gespielt haben. Ohne die Unterstützung und den Rückhalt, den ich während meiner gesamten Ausbildung erfahren habe, wäre diese Arbeit sicher nicht denkbar gewesen.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meiner Frau Cornelia, die stets zu mir gehalten hat, sowohl in guten als auch in schwierigen Zeiten, und mir damit den Freiraum geschaffen hat, der zur Bewältigung meiner Aufgaben notwendig war.

Erlangen, im April 2017

Daniel Gröbel

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	5
2.1	Grundlagen zur Blechmassivumformung	5
2.1.1	Definition und Charakteristika der Blechmassivumformung ...	5
2.1.2	Verfahren	6
2.1.3	Tribologie.....	9
2.1.4	Stofffluss.....	10
2.2	Fließpressverfahren in der Blechmassivumformung	10
2.2.1	Verfahren	11
2.2.2	Prozessgrenzen und Einflussgrößen.....	12
2.2.3	Maßnahmen zur Erweiterung der Bauteilumformung	14
2.3	Beanspruchung und Auslegung von Werkzeugen der Massivumformung	18
2.3.1	Werkzeugbeanspruchung und Versagensursachen	18
2.3.2	Hilfsmittel zur Werkzeugauslegung in der Kaltmassivumformung	22
2.4	Prozessanalyse mittels Finite-Elemente-Methode	23
2.4.1	Grundlagen	24
2.4.2	Stoffflusssimulation	25
2.4.3	Simulation der Werkzeugbeanspruchung.....	27
2.5	Zusammenfassende Bewertung zum Stand der Technik und Forschung.....	29
3	Zielsetzung und Methodik.....	33
4	Verwendete Werkstoffe, Versuchsanlagen, Messmethoden und Software.....	37
4.1	Bauteilwerkstoffe.....	37
4.2	Werkzeugwerkstoffe	39
4.3	Schmierstoff	41
4.4	Presse TZP 400/3.....	41
4.5	Messtechnische Anlagen	42
4.6	Simulationssoftware.....	44

5	Prozessaufbau und Werkzeugkonzept	45
5.1	Auswahl der Funktionselemente.....	45
5.2	Werkzeugauslegung	47
5.2.1	Vorwärtsfließpressen.....	48
5.2.2	Querfließpressen	52
5.3	Numerische Prozessbeschreibung	58
5.3.1	Vorwärtsfließpressen.....	59
5.3.2	Querfließpressen	61
5.3.3	Validierung der Modelle	62
6	Prozessanalyse	67
6.1	Untersuchte Zielgrößen	67
6.2	Prozess- und Stoffflussanalyse der Referenzprozesse	70
6.2.1	Vorwärtsfließpressen.....	70
6.2.2	Querfließpressen	79
6.2.3	Gegenüberstellung der Prozesse	87
6.3	Einflussgrößen auf Bauteilausformung und Umformkraft.....	90
6.3.1	Geometrische Gestalt der Formelemente	90
6.3.2	Kavitätsvolumen	102
6.3.3	Abstand zwischen gleichartigen Formelementen	103
6.3.4	Wechselwirkung zwischen unähnlichen Formelementen	105
6.3.5	Werkstoffkenngrößen	107
6.3.6	Gegenhalterkraft.....	109
6.4	Zusammenfassende Bewertung.....	111
7	Strategien zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen.....	117
7.1	Abgeleitete Maßnahmen und Wirkprinzipien	117
7.1.1	Geometrische Fließbehinderung	118
7.1.2	Tailored Surfaces	123
7.1.3	Tailored Blanks	129
7.1.4	Zusammenfassende Bewertung.....	136
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
9	Summary and outlook	143
	Literaturverzeichnis	147

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
a	Grad	Abstandswinkel zwischen zwei benachbarten Formelementen
b	mm	Formelementbreite
d ₀	mm	Rondendurchmesser vor der Umformung
h	-	Verfestigungskoeffizient
h _z	mm	Zargenhöhe des Bauteils im Querfließpressprozess
k _f	MPa	Fließspannung
k _{f0}	MPa	Anfangsfließgrenze
k _v	-	Verschleißkoeffizient
l	mm	Formelementlänge
m	-	Reibfaktor nach Tresca
n	-	Anzahl der Wiederholversuche
n _z	-	Gesamtanzahl der Formelemente auf einem Bauteil
r	mm	Radius
r _a	-	Mittlere Rauheit nach DIN EN ISO 4287
r _{ein}	mm	Einlaufradius des Formelements
r _{el}	mm	Formelementradius
s ₀	mm	Blechdicke des Halbzeugs
s _R	mm	Restblechdicke
s _w	mm	Stempelweg
s _{w,QFP}	mm	Stempelweg Querfließpressprozess
s _{w,VFP}	mm	Stempelweg Vorwärtsfließpressprozess
t	mm	Formelementhöhe / Kavitätstiefe

t_u	s	Umformzeit
v_r	mm/s	Radiale Stoffflussgeschwindigkeit
v_s	mm/s	Gleitgeschwindigkeit
v_{Sf}	mm/s	Stoffflussgeschwindigkeit
v_{St}	mm/s	Stempelgeschwindigkeit
v_z	mm/s	Axiale Stoffflussgeschwindigkeit
w	Grad	Formelementwinkel
w_v	-	Verschleißbetrag nach Archard
A_0	mm ³	Oberfläche am Prozessbeginn
A_1	mm ³	Oberfläche am Prozessende
A_g	-	Gleichmaßdehnung
A_V	mm ²	Fläche im Kontaktbereich Stempel / Matrize
A_{ZF}	mm ²	Fläche der Zahnzwischenflächen
F_G	kN	Gegenhalterkraft
F_{ges}	kN	Gesamtumformkraft
F_{id}	kN	Ideelle Umformkraft
F_N	kN	Niederhalterkraft
F_R	kN	Reibkraft
F_{St}	kN	Stempelkraft
H	-	Härte Werkstoff
HV	-	Härte nach Vickers
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 % Streckgrenze
V_k	mm ³	Volumen einer Werkzeugkavität
$V_{k,ges}$	mm ³	Gesamtvolumen aller Werkzeugkavitäten einer Matrize
$V_{k,M}$	mm ³	Volumen Mitnehmerkavität
$V_{k,Z}$	mm ³	Volumen Zahnkavität

V_{AF}	mm^3	Werkstoffvolumen in der Blechaußenfläche
V_{BM}	mm^3	Werkstoffvolumen in der Blechmitte
V_{BUZ}	mm^3	Werkstoffvolumen in der Blechumformzone ($V_{BM} + V_{AF}$)
V_F	mm^3	Formelementvolumen / Formfüllung
$V_{F\%}$	-	relatives Formelementvolumen / relative Formfüllung
$V_{F,ges}$	mm^3	Gesamte Formfüllung aller Kavitäten im Prozess
V_V	mm^3	Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich
V_{V0}	mm^3	Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich am Prozessbeginn
μ	-	Reibzahl nach Mises
σ_I	MPa	Größte Hauptspannung
$\sigma_{I,a}$	MPa	Spannungsamplitude der größten Hauptspannung
σ_{II}	MPa	Mittlere Hauptspannung
σ_{III}	MPa	Kleinste Hauptspannung
$\sigma_{III,a}$	MPa	Spannungsamplitude der minimalen Hauptspannung
σ_a	MPa	Spannungsamplitude
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_n	-	Standardabweichung
σ_v	MPa	Vergleichsspannung nach v. Mises
σ_N	MPa	KontaktNormalspannung
φ	-	Vergleichsumformgrad nach Mises
ΔF_G	kN	Differenz der Gegenhalterkraft
ΔV_{AF}	mm^3	Änderung des Werkstoffvolumens in der Blechaußenfläche
ΔV_{BM}	mm^3	Änderung des Werkstoffvolumens in der Blechmitte
ΔV_V	mm^3	Aus Verdrängungsbereich verdrängtes Werkstoffvolumen

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
AF	Blechaußenfläche
BM	Blechbereich Blechmitte
BUZ	Blechumformzone
DMS	Dehnungsmessstreifen
EDT	Electro Discharge Texturing
FE	Blechbereich Fließpresszone
FEM	Finite-Elemente Methode
GH	Gegenhalter
HVF	Hochvorschubfräsen
HV	Härte nach Vickers
ISF	Institut für spanende Fertigung, TU Dortmund
MUZ	Massivumformzone
NH	Niederhalter
PM	Pulvermettallurgisch
QFP	Querfließpressen
RSV	Ringstauchversuch
SW	Stempelweg
TB	Tailored Blank
VB	Verdrängungsbereich
VFP	Vorwärtsfließpressen
ZPV	Zapfenpressversuch

1 Einleitung

Die Geschichte der Zivilisation ist seit jeher eng mit der der Produktionstechnik verbunden. Mit den steigenden Bedürfnissen der Menschheit im Zuge des gesellschaftlichen und technologischen Fortschritts wurde die stetige Neu- und Weiterentwicklung von Fertigungsverfahren unabdingbar. Vor diesem Hintergrund nimmt die Umformtechnik einen besonderen Stellenwert ein. Der erste nachweisbare Einsatz von Schmiedeverfahren, die nach heutigem Verständnis der Massivumformung zugerechnet werden, lässt sich anhand der Himmelsscheibe von Nebra bereits auf ungefähr 1600 v. Chr. datieren [1]. Die Massivumformung war und ist seitdem eines der am meisten genutzten Produktionsverfahren. Der Umsatzanteil massivumgeformter Produkte [2] an Metallprodukten in Deutschland [3] lag im Jahr 2015 bei 21 %, was einem Produktionsvolumen von 2810 Millionen Tonnen entspricht [4]. Die lang anhaltende Alleinstellung der Massivumformung wurde erst mit der Einführung der Blechhalbzeuge um 1850 aufgelöst [5]. Im Zuge der industriellen Revolution führte der Bedarf nach robusten, flächigen und dennoch leichten Bauteilen zur Entwicklung und Erforschung der Blechumformung. Mit deren Hilfe war es nun möglich - ausgehend von Blechen - die insbesondere in der Automobilindustrie benötigten Karosseriebauteile in hoher Stückzahl herzustellen und somit einen wesentlichen Beitrag zum wirtschaftlichen Aufschwung Deutschlands zu leisten.

Rückblickend war die Etablierung der Blechumformung notwendig, da die bekannten Verfahren der Massivumformung nicht genutzt werden konnten, um die Herstellung der neuartigen Bauteilgeometrien zu realisieren. Eine vergleichbare Entwicklung kann derzeit in Bezug auf die sogenannte Blechmassivumformung beobachtet werden. Zunehmende Ressourcenverknappung und ansteigendes ökologisches Bewusstsein erfordern eine Effizienzsteigerung bei Produkten aller Art über deren gesamten Lebenszyklus. Als Beispiel ist hierbei die Automobilindustrie zu nennen, die einerseits durch die Nachfrage nach geringeren Treibstoffverbräuchen und andererseits durch politische Vorgaben zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes unter Druck gerät [6]. Ein effektiver Lösungsansatz zur Einsparung von Energie und Werkstoffressourcen ist die Anwendung des Leichtbaugedankens auf ein möglichst umfangreiches Bauteilspektrum. Die Reduktion des Bauteilgewichts wird hierbei sowohl durch eine gesteigerte Funktionsintegration als auch durch die Verringerung der eingesetzten Werkstoffmasse angestrebt. Die Einsparung der Werkstoffmasse wird durch

Verwendung geringer Bauteilwandstärken erreicht, was die Verwendung von Blechen als Halbzeug nahe legt. Um jedoch Funktionselemente in die Bleche zu integrieren, sind dreidimensionale Spannungs- und Formänderungszustände für die Ausformung nötig, die durch konventionelle Blechumformung nicht realisiert werden können. Zudem erfordert der Einsatz geringer Wandstärken die Verwendung von höherfesten Werkstoffen, um die durch die reduzierten Querschnitte bedingte Verringerung der Bauteilbeanspruchbarkeit zu kompensieren. Konventionelle Blech- oder Massivumformverfahren sind nicht in der Lage, diesen Anforderungen gerecht zu werden [7]. An diese Stelle tritt die Blechmassivumformung. Blechmassivumformverfahren sind durch die Anwendung von Massivumformoperationen auf Blechhalbzeugen charakterisiert. Auf diese Weise lassen sich lokal dreidimensionale Formelemente, wie beispielsweise Verzahnungen aus einem Blechgrundkörper in Blechdickenrichtung ausformen.

Ogleich der Begriff der Blechmassivumformung relativ neu und erstmals von MERKLEIN et al. im Jahre 2009 eingeführt worden ist, werden blechmassivumgeformte Bauteile bereits seit längerem industriell gefertigt [8]. Auch in der Wissenschaft wurden erste Ansätze bereits vor 40 Jahren Gegenstand von Forschungsaktivitäten [9]. Trotz dieses Umstands ist die Blechmassivumformung bis heute nach wie vor kaum verstanden. Dies kann vorrangig damit begründet werden, dass Stofffluss und Werkzeugbeanspruchung zu komplex für die damaligen numerischen und analytischen Möglichkeiten der Prozessauslegung waren. Mit dem Fortschritt der Computertechnik in den letzten Jahrzehnten wird diese Hürde jedoch zunehmend überwunden und tiefergehende Prozessanalysen ermöglicht. Angetrieben vom ansteigenden industriellen Bedarf nach hochintegrierten Funktionsbauteilen und den neuen technischen Analysemöglichkeiten wird die Thematik der Blechmassivumformung seit kurzem wieder verstärkt im nationalen und internationalen wissenschaftlichen Umfeld aufgegriffen. Unter anderem werden seit 2009 erstmals die grundlagenwissenschaftlichen Zusammenhänge der neuen Prozessklasse im Sonderforschungsbereich Transregio 73 (SFB/TR 73) der DFG untersucht, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist.

Ein Beispiel für den Forschungsbedarf aus der Automobilindustrie ist der Synchronring. Dessen Aufgabe als Bestandteil von manuellen Getrieben besteht darin, die Drehzahldifferenz zwischen einem zu schaltenden Gang und der Getriebewelle abzubauen. Konventionell werden Synchronringe unter Verwendung einer Messinglegierung durch Schmieden in hohen Stückzahlen hergestellt und anschließend spanend nachbearbeitet

[10]. Im Sinne der Reduktion des Fahrzeuggewichts wird angestrebt, Motor- und Getriebeteile einschließlich der Synchronringe in ihren Dimensionen weiter zu reduzieren. Da damit die spezifische Belastung der Funktionsbauteile zunimmt, ist die Verwendung von höherfesten Stahlwerkstoffen obligatorisch. Ferner wird eine Reduktion der Prozesskette angestrebt, indem der Umformprozess Net-Shape tauglich ausgeführt wird. Warmschmieden kommt damit, aufgrund der schlechten Oberflächengüten und der damit verbundenen Nacharbeit nicht in Frage. Die Lösung besteht stattdessen in der Nutzung von Kaltmassivumformverfahren ausgehend von höherfesten Blechroten, die in aktuellen Arbeiten sowohl für das Fließpressen [14], als auch das Stauchen [25] zur Ausformung von Verzahnungselementen grundlegend etabliert werden konnten. Die vorliegende Arbeit soll einen weiteren Beitrag zum grundlegenden Verständnis von Blechmassivumformprozessen leisten, indem das vorhandene Wissen auf das Fließpressen von geometrisch unähnlichen Formelementen an Blechen erweitert wird. Zudem werden die auftretenden Werkzeugbeanspruchungen in die Analyse miteinbezogen, um künftig die prozesssichere Auslegung von Blechmassivumformverfahren zu ermöglichen und eine ausreichende, funktionsgerechte Ausformung der Bauteile sicherzustellen.

2 Stand der Technik und Forschung

Für die Untersuchung von Fließpressprozessen zur Herstellung von Funktionselementen im Rahmen der Blechmassivumformung sind Kenntnisse aus verschiedenen Bereichen der Forschung notwendig. Im folgenden Kapitel werden die für das Verständnis dieser Arbeit vorausgesetzten Grundlagen nach dem aktuellen Stand der Technik und Forschung dargelegt.

Hierfür werden zunächst die Grundlagen der Verfahrensklasse Blechmassivumformung gelegt, die anschließend im Detail für das Fließpressen erweitert werden. Aufgrund seiner Relevanz für die typischerweise hoch beanspruchten Fließpresswerkzeuge wird darüber hinaus auf aktuelle Kenntnisse zur Beanspruchung und Auslegung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Erläuterung der Finite-Elemente-Methode, die zur Prozessmodellierung in dieser Arbeit eingesetzt wird, sowie mit einer zusammenfassenden Bewertung zum Stand der Technik.

2.1 Grundlagen zur Blechmassivumformung

Der Trend zu Leichtbau und Kostenreduktion erfordert den Einsatz dünnwandiger und hochgradig funktionsintegrierter Bauteile. Da diese Aufgabe von den konventionellen Fertigungsverfahren zunehmend nicht mehr bewältigt werden kann, ist die Entwicklung neuartiger Ansätze notwendig. Eine Lösung bietet die vergleichsweise junge Prozessklasse der „Blechmassivumformung“. Diese nutzt die Kombination von Verfahren aus den Einzeldisziplinen der Blech- und Massivumformung, wodurch deren Vorteile vereint werden können. In Folge entstehen neue Möglichkeiten zur Bauteilherstellung, jedoch ebenso neue Herausforderungen, die wissenschaftlich untersucht werden müssen. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden der aktuelle Stand der Technik zur Blechmassivumformung dargelegt.

2.1.1 Definition und Charakteristika der Blechmassivumformung

Der Begriff der Blechmassivumformung wurde erstmals 2009 von MERKLEIN [8] eingeführt, wobei erste Definitionen durch MERKLEIN et al. [11] sowie OYACHI und ALLWOOD [12] im Jahr 2011 getroffen worden

sind. Die Prozessklasse der Blechmassivumformung ist demnach durch die Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeugen charakterisiert, wobei diese in Kombination mit oder ohne Blechumformverfahren durchgeführt werden können [8]. Auf diese Weise lässt sich ein dreidimensionaler Stofffluss erzeugen, der zu einer definierten und lokalen Werkstoffanhäufung führt und wiederum formgebend zur Erzeugung von Funktionselementen oder allgemein zur gezielten Veränderung der Werkstoffverteilung im Bauteil genutzt wird [13]. Dieser lokal begrenzte und durch einen dreidimensionalen Spannungszustand bestimmte Bereich wird in Anlehnung an das eingesetzte Massivumformverfahren auch als Massivumformzone bezeichnet [14].

Der lokale und dreidimensionale Spannungs- und Formänderungszustand stellt das zentrale Unterscheidungsmerkmal zur konventionellen Blechumformung dar. Deren Verfahren zeichnen sich dagegen durch einen ausschließlich ebenen Spannungszustand aus, der zur Herstellung flächiger Bauteile im Allgemeinen ausreichend ist [15]. Die Abgrenzung zur Massivumformung ist durch die Verwendung von Blechen als Halbzeuge begründet, deren Blechdicke typischerweise zwischen 1 mm und 5 mm liegt [13]. Die Bleche lassen sich somit den Feinblechen ($s_0 \leq 3$ mm) bzw. den Mittelblechen zuordnen ($s_0 = 3 - 4,75$ mm) [16]. Verfahren der Massivumformung nutzen hingegen ausschließlich gedrungene Halbzeuge, wie etwa zylindrische Stäbe [17].

Zusammenfassend sind die Verfahren der Blechmassivumformung durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet [13]:

1. Einsatz von Blech als Halbzeug
2. Dreidimensionaler Spannungszustand
3. Lokale Änderung der Blechdicke
4. Lokal unterschiedliche Prozesskräfte
5. Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge


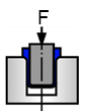

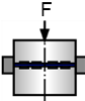



2.1.2 Verfahren

Für eine gezielte und lokale Veränderung der Blechdicke an einem Blechhalbzeug kommen grundsätzlich verschiedene Verfahren der Massivumformung in Frage. Um eine eindeutige Abgrenzung zu ermöglichen, wurde von MERKLEIN et al. erstmals 2012 eine Klassifizierung der Prozesse vorgeschlagen [13]. Hierfür wurden geeignete Verfahren aus der DIN 8582 [18] identifiziert und nach der Werkzeugkinematik (Rotation, Linearbewegung) sowie der beabsichtigten Blechdickenänderung (Aufdickung,

Ausdünnung oder deren Kombination) unterteilt [13]. Eine Übersicht der Klassifizierung nach MERKLEIN, HAGENAH und SCHNEIDER [19] ist in Tabelle 1 dargestellt.

Zu den Fertigungsverfahren mit Werkzeugrotation gehören das Drückwalzen, das Taumeln sowie das Nabenanformen, die unter anderem zur Herstellung von dünnwandigen, rotationssymmetrischen Getriebekomponenten (Drückwalzen) [20] oder zur Herstellung von Tailored Blanks (Taumeln) [21] erfolgreich eingesetzt werden konnten. Bei diesen Prozessen handelt es sich generell um inkrementelle Umformverfahren mit einer kontinuierlich wandernden Massivumformzone. Da die Umformzone auf einen vergleichsweise kleinen Bereich beschränkt ist, sind diese Verfahren durch einen geringen bis mittleren Kraftbedarf gekennzeichnet, was allerdings mit einem erhöhten Prozesszeitbedarf verbunden ist. Mit Ausnahme des Drückwalzens sind zudem Kombinationen mit Blechumformprozessen nicht möglich.

Tabelle 1: Einteilung der Blechmassivumformung anhand der Werkzeugkinematik und der erwünschten Blechdickenänderung nach [19]

	Lineare Werkzeugbewegung				Rotatorische Werkzeugbewegung		
	Stauchern	Abstreckgleitziehen	Fließpressen	Prägen	Drückwalzen	Taumeln	Nabenanformen
							
Änderung der Dicke	↑ ↓	↓	↑ ↓	↑ ↓	↓	↑ ↓	↑ ↓
Kombination Blechumformung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Umformkraft	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Niedrig	Mittel	Mittel

Für die Verfahren Stauchern, Abstreckgleitziehen, Fließpressen und Prägen mit linearer Werkzeugbewegung ist generell ein mittlerer bis hoher Kraftbedarf charakteristisch. Dies ist zum einen darin begründet, dass die Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück in der Massivumformzone hoch sind und zum anderen darin, dass die Ausformung aller Strukturmerkmale bzw. Funktionselemente simultan erfolgt [13]. Eine Kombination mit Blechumformverfahren ist für alle Prozesse ohne

weiteres möglich. Vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit behandelten Umformverfahren sind insbesondere das Stauchen sowie das Fließpressen hervorzuheben.

Beim Stauchen handelt es sich gemäß DIN 8583 um ein Umformverfahren, bei dem die Druckwirkung in der Längsachse des Werkzeugs liegt [22]. Dabei wird mindestens eine Werkstückdimension zwischen zwei Werkzeughälften reduziert [23]. Dieses Verfahren wurde beispielsweise von MAEDA und ARAKI [24] zur Erzeugung von Hohlzähnen genutzt, indem eine Blechrunde zunächst tiefgezogen und anschließend gestaucht wurde. Durch das Stauchen der Napfzarge wurde deren Aufdickung bewirkt und in Folge die Verzahnung umlaufend ausgeformt [24]. Eine ähnliche Verfahrenskombination wurde kürzlich von SCHNEIDER [25] allgemein zur Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile mit Verzahnungselementen und offenen Mitnehmern untersucht. In beiden Fällen erfolgte die Ausformung der Formelemente über die gesamte Zargenhöhe, wodurch der ständige Kontakt der Massivumformzone mit dem Stempel gegeben ist. Dies unterscheidet das Stauchen grundsätzlich vom Fließpressen, bei dem die Umformzone von der Krafteinleitung getrennt ist.

Fließpressverfahren sind nach DIN 8583 dem Druckumformen zuzuordnen und eignen sich gut zur Herstellung von Funktionselementen auf Blechbauteilen [26]. Vorteilhaft ist die Flexibilität bezüglich der Kombierbarkeit mit Blechumformprozessen sowie der Positionierung der Formelemente. Nachteilig ist dagegen der typischerweise hohe Kraftbedarf [26] sowie die hohe Werkzeugbeanspruchung [14]. Eine detaillierte Darstellung des Stands der Technik in Bezug auf das Fließpressen findet sich in Abschnitt 2.2. Mit dem Fließpressen verwandt ist das vor allem in Japan geprägte Schmieden von Dickblech (Plate Forging). Im Gegensatz zum Fließpressen ist die Fließscheide hier jedoch nicht ortsfest sondern wandert in Abhängigkeit des Umformwegs. Eine Zuordnung zu den Fließpressverfahren ist daher nicht gegeben, obwohl im englischsprachigen Raum im Allgemeinen nicht zwischen Fließpressen und Schmieden unterschieden wird. Bekannte Arbeiten in Bezug auf das Plate Forging gehen unter anderem auf NAKANO [27] zurück, der ein mehrstufiges Verfahren entwickelt hat, um Näpfe mit zyklisch-symmetrischer Innenverzahnung zu fertigen. Ein Überblick zum Plate Forging, einschließlich einer Verfahrensklassifizierung, wurde 2016 durch MORI und NAKANO in [28] gegeben.

2.1.3 Tribologie

Gemäß Zhang [29] und Groche [30] haben die tribologischen Bedingungen einen erheblichen Einfluss auf das Prozessergebnis und die Werkzeugstandzeit in der Umformtechnik. Die tribologischen Verhältnisse sind daher auch für Blechmassivumformprozesse von großer Bedeutung [13].

Zur Erfassung der Reibverhältnisse in der Blechmassivumformung sind herkömmliche Charakterisierungsverfahren nur bedingt geeignet, da diese speziell auf die Randbedingungen der Blech- oder Massivumformung ausgerichtet sind. Beispielsweise ist der in der Massivumformung häufig eingesetzte DCE-Test (Double-Cup-Extrusion-Test) [31] nur mit gedrunge-
nen Proben durchführbar und kann nicht für die Blechhalbzeuge der Blechmassivumformung angewendet werden. Auf der anderen Seite sind die herkömmlichen Testverfahren der Blechumformung, wie der Streifenziehversuch nicht für die hohen Flächenpressungen, wie sie in der Blechmassivumformung mitunter vorkommen, ausgelegt. Auf Basis aktueller Forschung [32] hat sich vor diesem Hintergrund der Zapfenpressversuch etabliert, der mit Blechen durchführbar und zur Ermittlung von Reibfaktoren geeignet ist. Ebenfalls häufige Verwendung findet der Ringstauchversuch nach BURGDORF [33], der weiterentwickelt und an die Bedingungen der Blechmassivumformung angepasst worden ist [34].

Zur Beschreibung der tribologischen Bedingungen in der Umformtechnik haben sich vorrangig das Reibzahlmodell und das Reibfaktormodell etabliert. Das Reibzahlmodell nach Coulomb ist nach wie vor das meistgenutzte Reibmodell und bietet eine gute Abbildung der Reibung unter niedrigen Kontaktnormaldrücken [35]:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (1)$$

mit τ_R als Reibschubspannung, μ als Reibzahl und σ_N als Kontaktnormalspannung. Aufgrund seiner Beschränkung auf niedrige Kontaktnormalspannungen ist das Coulomb Modell prädestiniert für die Anwendung in der Blechumformung, kommt jedoch in der Massivumformung seltener zum Einsatz. Für die hohen Drücke, wie sie insbesondere in der Kaltmassivumformung vorliegen, hat sich daher das Reibfaktormodell durchgesetzt, das die Reibschubspannung τ_R mit Hilfe des Reibfaktors m und der Schubfließgrenze k nach Gleichung (2) berechnet:

$$\tau_R = m \cdot k \quad (2)$$

Da in der Blechmassivumformung sowohl Kontaktbereiche hoher und niedriger Kontaktnormaldrücke simultan vorliegen und sich die Bedingungen zudem im Prozessverlauf verändern können, ist die herkömmliche Modellierung der Reibung in diesem Zusammenhang als fehleranfällig einzustufen. PETERSEN et al. [36] haben zwar eine Kombination des Reibzahl- und Reibfaktormodells vorgeschlagen, das einen Übergang zwischen den Modellen erlaubt, jedoch werden dadurch keine bleibenden Oberflächenveränderungen beschrieben, wie Sie von BEHRENS und SABITOVIC [37] bei Blechmassivumformprozessen nachgewiesen werden konnten. Das Interesse an der Entwicklung effektiver und effizienter Reibmodelle ist daher entsprechend groß. Beispielsweise wurde von BEYER und WILLNER [38] ein auf einem Halbraummodell basierendes konstitutives Reibgesetz entwickelt, das sich speziell für die Blechmassivumformung als geeignet erwiesen hat.

2.1.4 Stofffluss

Ein wesentliches Charakteristikum der Blechmassivumformung ist, dass die Blechdicke eines Halbzeugs lokal durch einen dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand verändert wird. Diese Zone der Massivumformung ist durch hohe Umformgrade im Vergleich zu den umliegenden Blechbereichen (Blechumformzone) gekennzeichnet. Die Folge ist ein Verfestigungsgradient zwischen beiden Bereichen, der zu einer Verlagerung des Stoffflusses aus der Massivumformzone in die wenig oder unverfestigten Blechbereiche führt [39]. Insbesondere bei Prozessen, die zur Ausformung von Funktionselementen dienen, ist es daher typisch, dass eine vollständige Füllung der zugehörigen Werkzeugkavitäten nicht möglich ist, selbst wenn eine sehr hohe Werkstoffverdrängung durch große Stempelhübe realisiert werden kann. Unter anderem wurde dieser Effekt von SCHNEIDER [25] für einen kombinierten Tiefzieh- und Stauchprozess und von MERKLEIN et al. [40] für einen kombinierten Tiefzieh- und Fließpressprozess nachgewiesen. Auch in dem von SIECZKAREK et al. [41] entwickelten inkrementellen Umformprozess zur Erzeugung einer stirnseitigen Außenverzahnung konnte dieser Effekt bestätigt werden [42].

2.2 Fließpressverfahren in der Blechmassivumformung

Gemäß Abschnitt 2.1.2 handelt es sich beim Fließpressen um eine mögliche Verfahrensvariante, die für die Blechmassivumformung geeignet ist. Mit dieser Prozessvariante lässt sich sowohl eine lokale Aufdickung als

auch eine Ausdünnung an einem Blechhalbzeug erzielen. In Verbindung mit einer guten Kombinationsmöglichkeit mit Blechumformverfahren ist das Fließpressen somit eine vielversprechende und flexible Möglichkeit zur Herstellung komplexer funktionsintegrierter Bauteile. Im Folgenden wird der aktuelle Stand zum Fließpressen in Bezug auf die Blechmassivumformung dargelegt, wobei auf bekannte Verfahren, Herausforderungen und Maßnahmen zur Prozessverbesserung eingegangen wird.

2.2.1 Verfahren

Fließpressverfahren haben in der Umformtechnik eine lange Geschichte, die bis in die 1935er Jahre zurückgeht [43]. Möglich wurde der wirtschaftlich relevante Einsatz mit der Einführung der Phosphatierung von Rohteilen nach dem Singer Patent [44], das die Umformung von Stahlwerkstücken in Stahlwerkzeugen ohne Kaltverschweißung erlaubt [43]. Die typischen Verfahrensgrenzen bestehen in der hohen Werkzeugbeanspruchung sowie dem Bedarf an hohen Umformkräften [43]. Die Vorteile des Fließpressens liegen in der Möglichkeit, präzise, komplexe und hochbeanspruchbare Teile kosteneffizient und mit hoher Werkstoffausnutzung in Massenproduktion herzustellen [43]. Typischerweise liegt die erreichte Genauigkeitsklasse beim Kaltfließpressen im Bereich IT 6-7, wobei gleichzeitig eine hohe Oberflächenqualität erzielt wird, weshalb Fließpressbauteile häufig Net-Shape oder Near-Net-Shape tauglich sind [45].

Das Fließpressen ist nach DIN 8583 [22] anhand des dominierenden Spannungszustandes dem Druckumformen und weiter dem Durchdrücken zuzuordnen. Die Einteilung wird in DIN 8583-6 näher nach der Querschnittsform vor der Umformung unterteilt [46]. Wird der Querschnitt des Rohteils nicht durch Aussparungen vermindert, so handelt es sich um Hohl-Fließpressen, ansonsten um Voll-Fließpressen [46]. Zudem wird nach der Fließrichtung in Relation zur Stempelbewegung unterschieden. Hierfür ergeben sich die drei folgenden Varianten [46]:

1. Vorwärtsfließpressen: Werkstofffluss und Stempelbewegung sind identisch
2. Rückwärtsfließpressen: Werkstofffluss und Stempelbewegung sind entgegengesetzt
3. Querfließpressen: Werkstofffluss ist quer zur Stempelbewegung

Fließpressverfahren in Bezug zur Blechmassivumformung werden seit den 1990er Jahren erforscht. Beispielsweise wurde von SCHMÖCKEL und BÖHM 1990 ein Prozess zum Hohl-Vorwärts-Fließpressen in Kombi-

nation mit einem Tiefziehprozess entwickelt [47]. Vor dem Hintergrund der damaligen Technologieentwicklung waren die Untersuchungen jedoch auf rotationssymmetrische Bauteile mit einer Wandstärke von über 8 mm beschränkt. Dies ist hauptsächlich damit zu begründen, dass die Computertechnologie und die darauf basierenden Möglichkeiten zur 3D-Prozesssimulation noch zu sehr eingeschränkt waren, um die anspruchsvolle Auslegung und Analyse komplexer Fließpressprozesse zu erlauben. Erst als sich die Rechnerkapazitäten im Zuge der allgemeinen Weiterentwicklung im IT-Bereich zur Berechnung räumlicher Finite Elemente Modelle als ausreichend erwiesen haben, begann der simultane Aufschwung der Forschung im Bereich der Blechmassivumformung und damit auch in der Teildisziplin des Fließpressens. MERKLEIN [8] hat 2009 erstmals einen Fließpressprozess in Kombination mit Tiefziehen vorgestellt, der die Erzeugung von Funktionselementen auf Blechhalbzeugen ermöglicht. Hierfür wurde mittels eines Stempels das Vorwärtsfließpressen einer Blechronde mit Blechstärken zwischen 1 mm und 2 mm in eine Matrize bewirkt, die über Kavitäten zur Ausformung von Funktionselementen verfügt [48]. Auf diese Weise konnte eine an eine Sperrverzahnung angelehnte Verzahnung umlaufend und rotationssymmetrisch eingebracht werden.

2.2.2 Prozessgrenzen und Einflussgrößen

MERKLEIN et al. [40] konnte nachweisen, dass bei der Herstellung von gleichartigen rotationssymmetrisch angeordneten Funktionselementen an Blechen durch Fließpressen die für die Blechmassivumformung typische unzureichende Füllung der Werkzeugkavitäten eine wesentliche Prozessgrenze darstellt. Ursächlich ist der Verfestigungsgradient zwischen dem Bereich der Funktionselemente (Massivumformzone) und der wenig verfestigten Blechumgebung. Untersuchungen von KOCH [14] am selben Prozess zeigen auf, dass eine Vielzahl an prozess- und halbzeugseitigen Größen bestehen, die die resultierende Ausformung am Prozessende beeinflussen. So resultiert eine Erhöhung der Blechdicke oder des Verfestigungsniveaus des Werkstoffs bei gleichem Stempelweg in einer Reduktion des Zahnvolumens, da ein größerer Werkstoffanteil aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche verdrängt wird. Besonders hervorzuheben ist weiter der Effekt der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug. KOCH [14] konnte zeigen, dass eine Erhöhung des Reibfaktors zu einer verbesserten Formfüllung führt. Als ursächlich wird angeführt, dass der erhöhte Reibwiderstand den Werkstofffluss aus der Massivumformzone heraus behindert und somit umgekehrt mehr Werkstoff in

die Werkzeugkavitäten gelangt. Dies steht im Kontrast zu konventionellen Massivumformprozessen, bei denen im Allgemeinen eine Reduktion der Reibung zur Prozessverbesserung angestrebt wird [35]. Daneben ist die prozessspezifische Größe der Niederhalterkraft eine Möglichkeit zur Einflussnahme auf die Formelementausformung. In dem von KOCH [14] untersuchten Prozess wurde ein Niederhalter für den Tiefzug verwendet, um die für das Tiefziehen typische Faltenbildung im Blechflansch zu vermeiden. Es konnte gezeigt werden, dass eine erhöhte Niederhalterkraft in einem größeren Formelementvolumen resultiert, da die durch den Niederhalter auf das Blech aufgebrachte Normalkraft erhöht wird. In Folge wird der Werkstofffluss in den Flanschbereich zugunsten der Formelementausformung reduziert. KOCH [14] konnte weiter zeigen, dass eine sequentielle Kombination von Blechumformung- und Massivumformung an einem Blech möglich ist und unter Umständen zu einer Verbesserung der Ausformung beitragen kann. In dem von KOCH [14] untersuchten Fall hatte der dem Fließpressen vorgelagerte Tiefzug der Rondenmitte einen positiven Einfluss auf die Ausformung der Formelemente.

Eine weitere Prozessgrenze, die beim Fließpressen von großer Relevanz ist, ist die hohe Werkzeugbeanspruchung. Zur Ausformung des von KOCH [14] verwendeten Prozesses sind unter Einsatz von DCo₄ Prozesskräfte von ca. 1600 kN erforderlich, die in einer Kontaktnormalspannung von bis zu 2500 MPa an der Werkzeugmatrize führen [49]. Dies spricht für eine hohe mechanische und tribologische Beanspruchung der Werkzeuge, die unter Umständen versagenskritisch hinsichtlich Verschleiß und Werkzeugbruch ist. Nähere Erkenntnisse zu den tatsächlichen Beanspruchungen im Werkzeug und deren Abhängigkeit von den Prozessparametern sind jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht erforscht. Um den hohen Werkzeugbeanspruchungen gerecht zu werden, ist der Einsatz hochfester Werkzeugwerkstoffe notwendig [13]. Für das konventionelle Kaltfließpressen werden hierfür fast ausschließlich Schnell- oder Kaltarbeitsstähle verwendet, die durch entsprechende Wärmebehandlung eine hohe Härte erreichen. Da Fließpresswerkzeuge durch hohe Druckspannungen beansprucht werden, ist eine hohe Werkstoffhärte in der Regel unumgänglich, um eine ausreichende Druckbeständigkeit zu gewährleisten [43]. Eine fast alle Anwendungen abdeckende Liste gebräuchlicher Werkzeugstähle findet sich in der VDI 3186 [50]. Werkzeugstähle werden prinzipiell schmelzmetallurgisch oder pulvermetallurgisch (PM) hergestellt [51]. PM-Stähle weisen herstellungsbedingt eine vergleichsweise homogene Carbidgebietverteilung auf, die Voraussetzung für eine hohe Werkstoffzähigkeit und isotrope mechanische Eigenschaften ist [52]. Die hohe

Reinheit der PM-Stähle erhöht zudem die Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs und wirkt sich somit positiv auf die Werkzeuglebensdauer aus [53].

Ähnlich zum konventionellen Fließpressen in der Massivumformung können auch in der Blechmassivumformung Armierungssysteme zur Erhöhung der Werkzeugbeanspruchbarkeit eingesetzt werden. Dies ist insbesondere in Verbindung mit hochgehärteten Werkzeugstählen von Bedeutung, da die hohe Härte mit einer hohen Sprödigkeit assoziiert ist. Dementsprechend würden Zugspannungen zum vorzeitigen Werkzeugbruch führen. Armierungssysteme verwenden ein oder mehrere Armierungsringe, die entweder auf eine zylindrische Matrize aufgeschumpft oder mechanisch aufgepresst werden [54]. Durch das Übermaß, das zwischen den Armierungsringen und der Matrize besteht, entstehen radiale und tangential Druckspannungen, die zu einer Verschiebung der in der Matrize vorherrschenden Spannungen in den Druckbereich führen [43].

Erfahrungen mit vorgespannten Matrizen sind derzeit hauptsächlich auf Untersuchungen an konventionellen Fließpressprozessen zurückzuführen. Aktuelle Forschungsarbeiten von KOCH [14] und SCHNEIDER [25] haben jedoch gezeigt, dass Armierungssysteme auch erfolgreich für das Fließpressen bzw. Stauchen von Blechen eingesetzt werden können.

2.2.3 Maßnahmen zur Erweiterung der Bauteilumformung

Zur Steigerung der durch den Verfestigungsgradienten bedingten unzureichenden Ausformung von Funktionselementen bei Blechmassivumformprozessen wurden in jüngster Zeit verschiedene Ansätze vorgeschlagen. Allen Maßnahmen ist gemein, dass der Stofffluss aus der Massivumformzone heraus begrenzt werden soll, um das durch die Umformung verdrängte Werkstoffvolumen möglichst vollständig für die Ausformung der Formelemente nutzen zu können. Hierfür wurden die Möglichkeiten sogenannter Tailored Blanks, Tailored Surfaces und geometrische Fließbehinderungen erforscht, die im Folgenden vorgestellt werden.

Tailored Blanks

Bei Tailored Blanks handelt es sich um Blechhalbzeuge, die für einen speziellen Prozess in ihren Eigenschaften lokal angepasst, also „maßgeschneidert“ worden sind [55]. Tailored Blanks werden häufig in ihrer Blechdicke modifiziert, um bei Umformprozessen nur dort Werkstoff zur Verfügung zu stellen, wo dieser tatsächlich für den Prozess oder für die Erzielung bestimmter Bauteileigenschaften benötigt wird. Auf diese

Weise wird unnötiger Werkstoff eingespart und das Bauteilgewicht gering gehalten.

Prinzipiell können unterschiedliche Herangehensweisen zur Herstellung von Tailored Blanks unterschieden werden. Zum einen können Bleche aus verschiedenen Werkstoffen, verschiedener Dicke oder Beschichtung durch Schweißen verbunden werden [56]. Durch diese „Tailor Welded Blanks“ können dem Umformprozess nachgelagerte Fügeoperationen vermieden werden. Zudem besteht eine hohe Flexibilität bezüglich Bauteilgeometrie und Werkstoffwahl. Tailor Welded Blanks tragen dazu bei, die Anzahl der notwendigen Umformwerkzeuge zu reduzieren und können die Bauteilgenauigkeit und Materialausnutzung steigern [57].

Bei den sogenannten „Patchwork Blanks“ werden nach LAMPRECHT und GEIGER [58] bzw. NEUGEBAUER et al. [59] Bleche verstanden, deren Grundplatte gezielt durch individuell angepasste Blechzuschnitte verstärkt und anschließend umgeformt werden. Gegenüber Tailor Welded Blanks ist der Beschnitt gering und das Fügen der Bleche ist weniger aufwendig [59]. Zudem liegt der Vorteil in den relativ geringen Herstellungskosten und einer unkomplizierten Weiterverarbeitung aufgrund hoher Passgenauigkeit [60].

Blechplatten mit einem definierten Blechdickenverlauf, sogenannte „Tailor Rolled Blanks“ sind auf KOPP, WIEDNER und MEYER [61] sowie HAUGER [62] zurückzuführen, die entsprechende Bleche durch einen flexiblen Walzprozess herstellen konnten. Der Vorteil liegt hierbei in dem Wegfall einer Schweißnaht sowie einem ununterbrochenen Faserverlauf.

Für einen Einsatz bei Blechmassivumformprozessen ist es erforderlich, dass die Eigenschaften der Tailored Blanks lokal und ohne, eine dem nachfolgende Umformprozess störende, Schweißnaht kostengünstig hergestellt werden können [63]. Dies ist mit den beschriebenen, konventionellen Verfahren nicht durchführbar. Aus diesem Grund wurden von OPEL [63] Tailored Blanks mit lokal variierender Blechdicke hergestellt, die in experimentellen Versuchen mit verschiedenen Blechmassivumformprozessen zielführend eingesetzt werden konnten. OPEL [63] konnte zeigen, dass sich für die Blechmassivumformung geeignete Tailored Blanks selbst ebenfalls durch Verfahren der Blechmassivumformung herstellen lassen. Untersucht wurde in diesem Zusammenhang erstmals das 2010 vorgestellte Stauchen [64], das Taumeln [65] und das flexible Walzen [66]. Gestauchte Tailored Blanks wurden in dem von KOCH [14] entwickelten Fließpressprozess zur Ausformung einer Sperrverzahnung genutzt, wobei eine Steigerung des Formelementvolumens von 12,7 %

erzielt wurde. Dies wurde auf die, durch den Stauchprozess bedingte, Vorverfestigung zurückgeführt. Der Verfestigungsgradient im Tailored Blank, welcher sich zwischen der stärker verfestigten Blechmitte und der geringer verfestigten Blechzone im Bereich der Formelementausformung ausbildet, wirkt dem unerwünschten Werkstofffluss beim Fließpressen entgegen und steigert somit die Füllung der Werkzeugkavitäten.

Tailored Surfaces

Tailored Surfaces stellen eine weitere Möglichkeit dar, den Stofffluss in Blechmassivumformprozessen gezielt zu steuern, um eine Steigerung der Bauteilformung zu erzielen. Unter Tailored Surfaces werden in der Umformtechnik generell Oberflächen verstanden, die individuell und lokal zur Optimierung eines bestimmten Prozesses angepasst werden. Eine Beeinflussung des Stoffflusses bei Blechmassivumformprozessen wird dabei durch eine gezielte und lokale Modifikation der Reibung von Werkzeug- oder Bauteiloberfläche erreicht [67]. Durch den damit erzeugten Reibgradienten wird der Stofffluss in bestimmte Bereiche gehemmt oder gefördert.

Grundsätzlich wurden in jüngster Zeit verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung von Tailored Surfaces in Bezug auf die Blechmassivumformung entwickelt und erforscht. Zum einen hat HENSE [68] ein Verfahren zur Herstellung von Oberflächenstrukturen mittels Hochvorschubfräsen entwickelt, das auch für eine Hartbearbeitung von Werkzeugen geeignet ist. Die damit erzeugten Oberflächenstrukturen wiesen in Streifenzugversuchen deutlich erhöhte Reibung auf [68]. Untersuchungen mit ähnlich hergestellten Strukturen zeigen zudem, dass das Verfahren mit einer Einbringung von oberflächennahen Eigenspannungen verbunden ist, die Werte bis -600 MPa erreichen können [69]. Dies ist insbesondere für eine Anwendung an Werkzeugen von Interesse, da damit potentiell eine Steigerung der Werkzeugstandzeit verbunden ist. Ein alternatives Verfahren wurde von KREBS [70] entwickelt und untersucht, das mittels Mikrofräsen bionische und technologische Mikrostrukturen auf gehärteten Oberflächen erzeugt, die wiederum reibungsreduzierend wirken [71].

Ein anderer Ansatz besteht in der Anwendung von Beschichtungen, die ebenfalls reibungsmindernd oder reibungssteigernd eingesetzt werden können. HETZNER [72] konnte zeigen, dass hierfür amorphe Kohlenstoffschichten (DLC) geeignet sind. Auch chrombasierte Beschichtungssysteme können zum Einsatz für Tailored Surfaces verwendet werden, wie von KERSTING et al. [73] nachgewiesen werden konnte. Aufgrund ihrer druck- und verschleißbeständigen Wirkung werden Beschichtungen

jedoch selten alleine zur Oberflächenmodifikation eingesetzt, sondern in der Regel mit strukturierten Oberflächen kombiniert, wie beispielsweise von SIECZKAREK et al. [74] für CrAIN PVD gezeigt werden konnte.

Daneben wird vor allem zur Erzeugung von Tailored Surfaces an Halbzeugen reibungssteigernd auf Abrasivstrahlen zurückgegriffen. LÖFFLER et al. [75] konnte nachweisen, dass Strahlverfahren mit unterschiedlichen Parametern zur Einstellung der Reibung am Werkstück geeignet sind. Die Reibungsbeeinflussung wird einerseits auf die Aufrauung der Werkstückoberfläche, andererseits auf die oberflächennahe Verfestigung durch das Strahlen zurückgeführt [75].

HETZNER et al. [76] konnte bereits 2012 den von KOCH [14] entwickelten kombinierten Tiefzieh- und Fließpressprozess zur Herstellung einer Verzahnung an einem Blech hinsichtlich der tribologischen Anforderungen für Tailored Surfaces untersuchen. Numerische Simulationen konnten aufzeigen, dass eine Erhöhung des Reibfaktors von $m = 0,12$ auf $m = 0,3$ im Flanschbereich und eine gleichzeitige Verringerung des Reibfaktors auf $m = 0,05$ im Bereich der Zahnausformung eine Steigerung des Formelementvolumens um 9,2 % zur Folge hat. Später durchgeführte Versuche am gleichem Prozess konnten diese Wirkung beim Einsatz abrasiv gestrahlter Halbzeuge in ähnlicher Stärke (Formelementhöhe + ca. 10 %) experimentell nachweisen [13]. Neben der Anwendung beim Fließpressen wurden auch in anderen Prozessen der Blechmassivumformung erfolgreich Tailored Surfaces eingesetzt. So konnte etwa LÖFFLER et al. [77] mittels abrasiv gestrahlter Halbzeuge eine Steigerung der Verzahnungsausformung bei einem vom SCHNEIDER [25] entwickelten kombinierten Tiefzieh- und Stauchprozess erzielen.

Geometrische Fließbehinderungen

Eine weitere Möglichkeit zur Stoffflusskontrolle bei Blechmassivumformprozessen bietet der Einsatz geometrischer Fließbehinderungen. Bei Tiefziehprozessen werden in diesem Zusammenhang seit langem Ziehsicken zur Steuerung des Werkstoffeinzugs genutzt [78]. Ähnliche Ansätze legen den Einsatz für Blechmassivumformprozesse nahe, sind jedoch in diesem Zusammenhang weitgehend unerforscht. KOCH und MERKLEIN [79] konnten an einer numerischen Studie an einem Fließpressprozess aufzeigen, dass verschiedene Fließbehinderungen zur Erweiterung der Funktionselementausformung genutzt werden können. So konnte eine umlaufende, halbkreisförmige Sicke, die direkt vor den Formelementen positioniert worden ist, das Formelementvolumen um 5,7 % steigern,

indem sie den unerwünschten Werkstofffluss in die Blechmitte zugunsten der Formelementausformung hemmte.

2.3 Beanspruchung und Auslegung von Werkzeugen der Massivumformung

Kaltmassivumformwerkzeuge gehören zu den am höchsten belasteten Werkzeugen überhaupt. Aus diesem Grund kommt der Erforschung der Werkzeugbeanspruchung sowie deren Auswirkung auf die Werkzeuglebensdauer große Bedeutung zu. Der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich Beanspruchung, Versagen und Auslegung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung wird daher im Folgenden näher dargelegt.

2.3.1 Werkzeugbeanspruchung und Versagensursachen

Die Beanspruchung von Werkzeugen teilt sich in mechanische, thermische und tribologische Faktoren auf, die letztlich zu den Versagensarten Gewaltbruch, Ermüdung und Verschleiß führen können [80]:

Mechanische Beanspruchung

Unter der mechanischen Beanspruchung werden die im Werkzeug wirkenden Spannungskomponenten verstanden. Diese Spannungen sind ein Resultat der äußeren Belastung durch Kontaktnormal- und Reibschubspannungen und damit letztlich eine Folge des im umzuformenden Werkstück vorherrschenden Stoffflusses [81]. Die durch das Werkstück aufgebrachtten Kräfte sind wiederum wesentlich von der im Werkstück vorliegenden Fließspannung und damit indirekt von der Umformgradverteilung im Werkstück abhängig. Da im Gegensatz zum Schmieden in der Kaltmassivumformung auf eine Reduktion der Fließspannung durch eine Erwärmung verzichtet wird, werden in Abhängigkeit des verwendeten Werkzeugwerkstoffs hohe Spannungen erreicht. Bei Einsatz höherfester Werkstoffe können, bedingt durch eine hohe Anfangsfließspannung und der Kaltverfestigung während der Umformung, ohne weiteres Fließspannungen von über 1000 MPa erreicht werden. Darüber hinaus wirken im Werkstück, insbesondere bei geschlossenen Werkzeugen mit weitgehend gefüllter Form, hohe hydrostatische Drücke, die sich ebenfalls in der Kontaktnormalspannung zwischen Werkzeug und Werkstück niederschlagen. Auf diese Weise werden in Kaltmassivumformwerkzeugen nicht selten Kontaktnormaldrücke von 2500 MPa und mehr erreicht [82].

Thermische Beanspruchung

Obwohl Kaltmassivumformprozesse mit Halbzeugen unter Raumtemperatur oder mit geringer Erwärmung (bis ca. 250°) durchgeführt werden, spielt die thermische Beanspruchung eine Rolle beim Werkzeugausfall. Das Ausmaß der im Prozess erreichten Temperatur ist jedoch stark abhängig von der verwendeten Umformgeschwindigkeit. Bei Prozessen mit ausreichend geringer Taktzeit können aufgrund der Umformwärme und der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück Temperaturen von über 400° gemessen werden [83]. Für Umformprozesse mit quasistatischer Geschwindigkeit, wie sie beispielsweise im Forschungsbetrieb gelegentlich genutzt werden, ist die thermische Beanspruchung nicht von Bedeutung.

Tribologische Beanspruchung

Die tribologische Beanspruchung der Werkzeuge ist in der Kaltmassivumformung von großer Bedeutung. Die bestimmenden Größen bezüglich der Werkzeuglebensdauer sind hierbei die Kontaktnormalspannungen in Kombination mit den zugehörigen Gleitwegen. Unter Letzterem wird die Relativbewegung zwischen in Kontakt stehenden Werkzeug- und Werkstückbereichen im Zuge der Umformung verstanden. Gemäß BAY et al. [84] sind insbesondere Prozesse der Kaltmassivumformung gleichzeitig von höchsten Kontaktnormalspannungen und größten Gleitwegen betroffen. Eine weitere Größe, die hinsichtlich des eingesetzten Schmierstoffs von Bedeutung ist, ist die Oberflächenvergrößerung des Werkstücks im Zuge der Umformung. Sie errechnet sich aus dem Quotienten der Oberfläche eines betrachteten Werkstückbereichs am Ende der Umformung (A_1) und des gleichen Bereichs am Prozessbeginn (A_0). Die Oberflächenvergrößerung ist keine direkte Beanspruchungsgröße, jedoch aufgrund ihrer Bedeutung für den Schmierfilm für die Werkzeuglebensdauer relevant. Starke Oberflächenvergrößerungen, wie sie in der Kaltmassivumformung auftreten ($> 300\%$ [84]), führen zu einem Abriss des Schmierfilms, wodurch wiederum adhäsiver Verschleiß begünstigt wird. Aus diesem Grund werden für tribologisch hochbeanspruchte Umformprozesse im Bereich der Kaltmassivumformung häufig Phosphatschichten verwendet, die oftmals noch mit zusätzlichen Schmiermitteln wie etwa Molybdändisulfid (MoS_2) beaufschlagt werden [84].

Grundsätzlich führen die Beanspruchungen bei ausreichender Stärke zu einem Ausfall der Werkzeuge. Hierbei werden die Versagensarten Bruch, Ermüdung und Verschleiß unterschieden [85], die im Folgenden näher beschrieben werden:

Gewaltbruch

Als Gewaltbruch wird der Gesamt- oder Teilbruch des Werkzeugs nach einem oder wenigen Hüben verstanden. Der Eintritt des Gewaltbruchs ist gleichbedeutend mit dem sofortigen Ausfall des Werkzeugs und muss in jedem Fall vermieden werden. Gewaltbrüche spielen im laufenden industriellen Betriebs normalerweise keine Rolle, vorausgesetzt das Umformwerkzeug wurde beanspruchungsgerecht konstruiert [86]. In der Entwicklungs- und Probephase neuer Werkzeuge sowie im Forschungsbetrieb ist die Auslegung gegen Gewaltbruch jedoch von großer Bedeutung. Ausschlaggebende Beanspruchungsgröße für diese Versagensart ist die Vergleichsspannung [81], die aus den deviatorischen Anteilen des Spannungstensors nach Mises berechnet wird [87] und analytisch oder numerisch bestimmt wird. Die Vergleichsspannung wird grundsätzlich zur Auslegung gegen plastisches Fließen verwendet, kann prinzipbedingt jedoch keine Schädigung im plastischen Bereich anzeigen. Dies ist problematisch, da plastisches Fließen bei den höchstbelasteten Werkzeugen der Kaltmassivumformung nicht unbedingt zu Gewaltbruch führen muss und häufig zur Erweiterung der Prozessgrenzen in Kauf genommen wird. Insbesondere an Radienübergängen oder in Bereichen mit starken Querschnittübergängen kann es zu einer lokal beschränkten Plastifizierung des Werkstoffs kommen, wodurch lediglich ein schädigungsfreier Abbau hoher Spannungsspitzen erfolgt. Dies konnte etwa von NEITZERT [88] gezeigt werden, der eine Teilplastifizierung am Übergangsradius einer Matrize zum konventionellen Fließpressen mit einem elastisch-plastischen Materialmodell feststellen konnte. Sofern die Plastifizierung nicht zum Bruch führt und drüber hinaus keine nennenswerten Auswirkungen auf die Werkzeuggeometrie aufweist, ist eine solche Teilplastifizierung daher konstruktiv akzeptabel.

Ermüdung

Laut GEIGER [89] stellt die Werkzeugermüdung bei der Herstellung komplexer Präzisionsbauteile die vorrangige Versagensursache dar. Tatsächlich begründen sich die laufenden Kosten für Werkzeuge der Kaltmassivumformung hauptsächlich durch ermüdungsbedingte Werkzeugausfälle [90]. Zum Bruch durch Ermüdung kommt es durch die zyklische, mechanische Beanspruchung des Werkzeugwerkstoffs, welche typisch für Umformprozesse ist und zu einer zyklischen Dehnung des Werkstoffs führt. Vor diesem Hintergrund werden bereits Spannungen versagenskritisch wirksam, die deutlich unter der statistischen Festigkeit liegen. Ursächlich sind zyklische, plastische Verformungen im Werkstoff auf

Mikro- oder Makroebene, die letztlich zu einer Anrissbildung und nachfolgend zu einer Rissausbreitung führen [91]. Ausgangspunkt sind Schwachstellen im Werkstoff, die sowohl im Werkstoffvolumen, als auch an der Werkzeugoberfläche herstellungsbedingt zu finden sind. Volumenfehler werden häufig durch Poren [92], Carbide [93] oder Einschlüsse [93] im Werkstoffinneren gebildet, die bereits im Zuge der Werkstoffgewinnung entstanden sind. Schwachstellen auf der Werkzeugoberfläche sind hingegen fertigungsbedingt und werden auf Mikrokerben zurückgeführt [91]. Aus diesem Grund werden Werkzeugoberflächen in aller Regel durch Schleifen und Polieren nachbearbeitet, um die Tiefe der Mikrokerben zu reduzieren und so die Ermüdungsfestigkeit zu steigern [94]. Neuere Untersuchungen zeigen allerdings auf, dass die Werkzeuglebensdauer nicht direkt mit der Oberflächenrauheit korreliert ist, da Nachbearbeitungsverfahren je nach Abtragtiefe unter Umständen nur die Rauheitsspitzen einglätten, jedoch die Kerbtiefe unangetastet lassen [95]. Entscheidender ist in solchen Fällen die durch beispielsweise Polieren oder Strahlen eingebrachten Druckeigenspannungen, die sich positiv auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken [95]. Da die Rissausbreitung insbesondere negativ durch Zugspannungen beeinflusst wird, kann die Werkzeuglebensdauer mit Hilfe einer Armierung kostengünstig gesteigert werden [96]. Diese verschiebt durch das Aufbringen einer Druckvorspannung das Beanspruchungskollektiv in Richtung Druckbereich, wodurch im Idealfall Zugspannungen vollständig vermieden werden [96].

Als maßgebliche Größen für die Werkzeuganalyse und -auslegung werden die Spannungs- oder Dehnungsamplituden herangezogen, die unter anderem mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode berechnet werden können. Zur Bestimmung der Werkzeuglebensdauer werden diese in Schädigungsmodelle eingesetzt, wodurch ein Abgleich mit experimentell ermittelten Wöhlerkurven ermöglicht wird. Aufgrund der einfachen Anwendung ist hierbei insbesondere der auf WÖHLER zurückgehende Spannungsansatz [97] verbreitet, bei dem die Amplitude der maximalen Hauptnormalspannung direkt mit der Wöhlerkurve verglichen wird. Nachteilig ist, dass sich die Anwendbarkeit auf vorwiegend einachsige Spannungszustände und den linear-elastischen Bereich beschränkt. Um diese Nachteile zu umgehen, wurden mit der Zeit alternative Modelle entwickelt, die jedoch in der Praxis deutlich schwieriger anzuwenden sind. Bekannte Modelle sind beispielsweise das Schädigungsmodell nach BASQUIN (dehnungsbasiert) [98] oder HÄNSEL (energiebasiert) [99]. Letzteres wurde in jüngster Zeit von FALK [100] und MEIDERT [101]

untersucht und weiterentwickelt, wodurch eine Steigerung der Vorhersagegenauigkeit erreicht werden konnte.

Verschleiß

Beim Verschleiß tritt das Werkzeugversagen nicht durch Bruch ein, sondern durch einen kontinuierlichen Materialabtrag an der Werkzeugoberfläche, der letztlich zu einer inakzeptablen Veränderung der Werkzeuggeometrie führt. Der Abtrag verläuft dabei bei Werkzeugen der Kaltmassivumformung in Abhängigkeit der Zyklenzahl nahezu linear [80]. Als bestimmende Größen für die Werkzeugauslegung werden die Flächenpressung σ_N (KontaktNormalspannung) und der Gleitweg ds herangezogen. Zur mathematischen Beschreibung des Verschleißes hat sich das Verschleißmodell nach ARCHARD [102] durchgesetzt. Der Verschleißbetrag dw_v errechnet sich demnach, mit k_v als Verschleißkoeffizient und H als Härte des Werkzeugwerkstoffs, wie folgt:

$$dw_v = \frac{k_v}{H} \cdot \sigma_N(t) \cdot ds \quad (3)$$

Der gesamte Verschleißbetrag w_v eines bestimmten Punktes auf dem Werkzeug ergibt sich dann durch Integration von Gleichung (3) über die Umformzeit t_u , mit v_s als Gleitgeschwindigkeit:

$$w_v = \frac{k_v}{H} \cdot \int_0^{t_u} \sigma_N(t) \cdot v_s(t) ds \quad (4)$$

2.3.2 Hilfsmittel zur Werkzeugauslegung in der Kaltmassivumformung

In der industriellen Praxis ist die Auslegung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung nach wie vor stark von Erfahrungswissen geprägt. Insbesondere aus der Zeit vor Einführung der FEM im Industrieinsatz stammen Auslegungsregeln, die aufgrund ihrer Einfachheit bis heute zum Teil erhalten geblieben sind. Die Verwendung einer Armierung wird beispielsweise von LANGE empfohlen wenn die Kontaktspannung den halben Wert der Fließgrenze übersteigt [17]. Ein Fortschritt besteht in der Veröffentlichung der mittlerweile zurückgezogenen VDI-Richtlinie 3176 [103], die Empfehlungen für Armierungssysteme auf Basis analytischer Überlegungen gibt. Die Erkenntnisse beschränken sich jedoch insbesondere beim Fließpressen auf einfache zylindrische Pressverbände. Komplexe Fragestellungen sind mit diesen Mitteln nicht ausreichend gut

analysierbar, was die beanspruchungsgerechte Konstruktion von komplexen Umformwerkzeugen schwierig gestaltet. In solchen Fällen muss auf Werkzeugsimulationen mittels FEM zurückgegriffen werden, die jedoch hohe Ansprüche an den Anwender stellt. Die FEM erlaubt die genaue Ermittlung der resultierenden Spannungen im Werkzeug über den gesamten Umformprozess und wird daher mit zunehmender Häufigkeit als bevorzugte Analysemethode im Forschungsumfeld genutzt.

2.4 Prozessanalyse mittels Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode, kurz FEM, ist ein zur Prozessauslegung häufig eingesetztes numerisches Hilfsmittel. Mit Hilfe der FEM lassen sich prinzipiell Prozesse beliebiger Komplexität beschreiben, was einen entscheidenden Vorteil gegenüber analytischen Verfahren darstellt. Letztere sind häufig auf starke Vereinfachungen von Fragestellungen angewiesen und können nicht oder nur unter größtem Aufwand für komplexen Probleme genutzt werden [104]. Aus diesem Grund bietet sich der Einsatz der FEM für die hochkomplexen Prozesse der Blechmassivumformung mit ihren lokal unterschiedlichen und interagierenden Spannungs- und Formänderungszuständen an. Bei der FEM an sich handelt es sich um eine mathematische Lösungsmethode, die bereits 1941 von HRENNIKOFF [105] für Stabmodelle beschrieben wurde. Der Einsatz in der Praxis begann jedoch erst in den 1950er Jahren, wobei der Ausdruck Finite-Elemente-Methode wahrscheinlich auf CLOUGH [106] zurückzuführen ist, der dem Begriff erstmals 1960 vorgeschlagen hat. Der Aufschwung der FEM ist eng mit der Entwicklung und Verbreitung von Computern verbunden, da diese erst die Lösung der erforderlichen Differentialgleichungen in einer akzeptablen Zeitspanne erlaubten [107]. Zum aktuellen Zeitpunkt steht eine Vielzahl an Softwareprogrammen zur Verfügung, die die FEM nutzen, um allgemeine physikalische Fragestellungen, darunter auch Umformvorgänge, zu beschreiben. Nach wie vor besteht die größte Limitierung der FEM in der Abhängigkeit von der verfügbaren Rechnerkapazität und -leistung. Komplexe Probleme, insbesondere wenn diese eine Vielzahl physikalischer Eingangsgrößen berücksichtigen müssen, erfordern trotz fortschrittlicher Computertechnik lange Rechenzeiten, die ohne Weiteres mehrere Wochen betragen können. Aus diesem Grund kommt der Optimierung eines gegebenen Simulationsmodells hinsichtlich Abbildungsgenauigkeit und Modellgröße entscheidende Bedeutung zu. Dies ist auch eine Herausforderung für Prozesse der Blechmassivumformung, die in aktuellen Forschungsarbeiten adressiert wird [108].

Eine Erschwernis speziell für die Simulation von Blechmassivumformprozessen besteht darin, dass aktuelle Simulationsprogramme und deren zugrundeliegende Mathematik entweder für Blech- oder Massivumformung ausgelegt sind. Die Möglichkeiten und Schwächen der Programme sind dabei unterschiedlich. So ist die FEM in der Massivumformung derzeit gut in der Lage Umformkräfte, Stofffluss und die geometrische Gestalt des Fertigbauteils zu berechnen, während die Abbildung von Werkzeugbeanspruchungen immer noch unzureichend und Gegenstand der Forschung ist [109]. In der Blechumformung ist die Darstellung des Stoffflusses und wesentlicher Versagensfälle im Bauteil gut möglich, jedoch ist unter anderem die Beschreibung der Umformkraft weniger präzise umsetzbar [110]. Da für die Blechmassivumformung insbesondere die Massivumformzone mit ihren dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszuständen von Interesse ist, wird in aktuellen Forschungsarbeiten in aller Regel auf Simulationsprogramme zurückgegriffen, die für die Massivumformung ausgelegt worden sind.

2.4.1 Grundlagen

Das zugrundeliegende Prinzip der FEM besteht in der Diskretisierung eines beliebigen Körpers bzw. allgemein eines Kontinuums in endlich viele, miteinander verbundene und einfach beschreibbare Einzelelemente. Soll nun ein allgemeines dynamisches Problem gelöst werden, wird zunächst die Bewegungsgleichung für das Gesamtsystem aufgestellt [104]:

$$[M] \cdot [\ddot{u}] + [C] \cdot [\dot{u}] + [K] \cdot [u] = [F] \quad (5)$$

Hierbei ist $[u]$ der Vektor der Knotenpunktverschiebung, $[F]$ der Kraftvektor und $[M]$, $[C]$ und $[K]$ die Elementmasse-, Dämpfungs-, und Steifigkeitsmatrize. Anschließend werden die bekannten Randbedingungen (Kräfte, Verschiebungen) angewandt und das Gesamtsystem numerisch gelöst. Die Größe des Gleichungssystems bestimmt entscheidend die benötigte Berechnungszeit. Im Sinne einer effizienten Prozesssimulation ist daher die Gesamtanzahl der Finiten Elemente nach Möglichkeit gering zu halten. Allerdings verringert eine grobe Diskretisierung die Aussagekraft des Modells, so dass in der Praxis stets ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungsgeschwindigkeit gefunden werden muss. [104]

Für die vollständige Abbildung eines Umformprozesses über die gesamte Prozesszeit ist die Unterteilung der Umformung in mehrere Zeitschritte,

sogenannte Inkremente notwendig. Bezüglich der Lösung der einzelnen Inkremente werden grundsätzlich zwei Methoden unterschieden. Die meisten kommerziellen Simulationsprogramme für Umformprozesse nutzen die sogenannte implizite Zeitintegration. Diese ist bezüglich der Zeitschrittweite unbedingt stabil und erlaubt daher die Berechnung eines Simulationsproblems mit verhältnismäßig großen Zeitschritten. Insbesondere bei linearen Problemen kann somit die Berechnungszeit gering gehalten werden. Da zur Lösung der Inkremente das Gleichgewicht zwischen inneren und äußeren Kräften in jedem Punkt berechnet wird, weisen implizite Lösungen zudem eine hohe Genauigkeit auf. Jedoch muss hierzu für jeden Schritt die Gesamtsteifigkeitsmatrix aufwendig invertiert werden, wodurch die Zeitdauer für die Berechnung der einzelnen Inkremente hoch ist. Da Modelle mit stark nichtlinearen Verhalten trotz impliziter Zeitintegration sehr kleine Zeitschrittweiten erfordern, ist dies wiederum ein maßgeblicher Nachteil. In solchen Fällen wird häufig alternativ auf die sogenannte explizite Zeitintegration zurückgegriffen. Hierfür wird das betreffende Inkrement, ausgehend vom vorhergehenden Inkrement, direkt mittels der Bewegungsgleichungen näherungsweise gelöst. Die Bildung des Gleichgewichts ist nicht nötig und der Berechnungsaufwand der einzelnen Inkremente selbst gering. Allerdings muss die Größe der Berechnungsschritte aus Stabilitätsgründen auf die Wellenlaufzeit im kleinsten Element beschränkt werden. Dementsprechend kann die Gesamtzahl der zu berechnenden Inkremente je nach Anwendungsfall sehr hoch ausfallen. Welches Verfahren vorzuziehen ist kann daher nicht allgemeingültig beantwortet werden und ist individuell vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. [111]

2.4.2 Stoffflusssimulation

Die Stoffflusssimulation dient der Abbildung der Umformvorgänge im Bauteil, einschließlich aller vorherrschenden Spannung- und Formänderungsvorgänge, wofür die Diskretisierung des Bauteils in Finite Elemente nötig ist. Für diesen Zweck stehen verschiedene Elementtypen zur Verfügung, die einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Simulationsergebnisses ausüben [112].

Grundsätzlich lässt sich zwischen 2D-Elementen und 3D-Elementen unterscheiden. 2D-Elemente werden unter anderem für Schalenelemente genutzt, die häufig für die Blechumformung eingesetzt werden. Diese sind für die Abbildung von Blechumformprozessen, die durch einen zweidimensionalen Spannungszustand charakterisiert sind, ausreichend.

Massivumformprozesse weisen hingegen einen dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand auf, für dessen Abbildung dreidimensionale Volumenelemente eingesetzt werden müssen. In diesem Zusammenhang werden überwiegend Tetraeder- oder Hexaederelemente eingesetzt. [104]

Im Wesentlichen liegt der Vorteil von Tetraederelementen in der einfacheren Vernetzung von komplizierten Geometrien. Das ist insbesondere zur Abbildung von Werkzeuggeometrien mit engen Radien und ausgeprägten Querschnittsänderungen von Vorteil. Dennoch werden, sofern möglich, bevorzugt Hexaederelemente genutzt, da Untersuchungen zeigen konnten, dass diese eine höhere Simulationsgenauigkeit gewährleisten [113].

Massivumformprozesse weisen typischerweise hohe Verzerrungen auf, die zu einer starken Deformation des FE-Netzes führen und Berechnungsfehler oder Berechnungsabbrüche zur Folge haben [114]. Aus diesem Grund sind speziell für die Massivumformung ausgerichtete Simulationsprogramme mit einer Option zur Neuvernetzung (Remesh) ausgestattet. Diese erlaubt die erneute Vernetzung der aktuellen Werkstückgeometrie während des Umformprozesses zu einem voreingestellten Zeitpunkt.

Aus den Verschiebungen und Kräften lassen sich über ein geeignetes Stoffgesetz Spannungen und Dehnungen der Elemente ableiten. Zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens genügt dabei das Hooke'sche Gesetz. Für die Abbildung der elastisch-plastischen Fragestellungen der Umformtechnik ist dagegen die Beschreibung des Fließverhaltens mittels Fließort und Fließkurve notwendig. Der Fließort wird durch eine geeignete Fließhypothese beschrieben. In der Massivumformung wird in fast allen Fällen die auf MISES zurückgehende Gestaltänderungsenergiehypothese verwendet, da im Gegensatz zur Blechumformung auf eine Abbildung der Halbzeuganisotropie verzichtet werden kann [23].

Die Fließkurve selbst wird experimentell ermittelt, wobei Zug- oder Druckversuche in Frage kommen. Grundsätzlich ist die Fließkurve desjenigen Versuchs vorzuziehen, der die größte Ähnlichkeit mit dem abzubildenden Umformvorgang aufweist. Dementsprechend werden Druckfließkurven vor allem in der druckdominierten Massivumformung und Zugfließkurven in der zugdominierten Blechumformung verwendet [23]. Zu beachten ist, dass die Umformgrade, die in Druck- oder Zugversuchen erreicht werden können, nur Werte bis etwa $\varphi = 0,2$ erreichen [115]. Da bei vielen Umformprozessen mit deutlich höheren Umformgraden gerechnet werden muss, sind die experimentellen Daten nicht ausreichend

und müssen erweitert werden. Dies wird mittels einer Approximation mathematischer Ansätze an die experimentell ermittelten Stützwerte gelöst. Durch die Überführung der Fließkurve in eine Funktion wird die Extrapolation der Werte ebenso wie die kontinuierliche Darstellung der Fließkurve ermöglicht. Bekannte und gebräuchliche phänomenologische Funktionen wurden von Gosh [116], Ludwik [117], Swift [118], Voce [119] und Hockett-Sherby [120] formuliert. Problematisch ist, dass keine eindeutige Empfehlung zur Anwendung eines bestimmten Modells gegeben werden kann. Der Anwender muss im Einzelfall entscheiden, wie die Fließkurve am geeignetsten für eine möglichst realistische Prozessabbildung zu approximieren ist. Ausschlaggebend ist in jedem Fall die genaue Abbildung vorhandener Datenpunkte im Rahmen der Interpolation, während für den extrapolierten Bereich Erfahrungswerte herangezogen werden müssen. Im Praxiseinsatz hat sich vor diesem Hintergrund das Modell nach Hockett-Sherby weitgehend durchgesetzt und wird unter anderem häufig für Kaltmassivumformprozesse verwendet.

2.4.3 Simulation der Werkzeugbeanspruchung

Um eine Analyse der Werkzeugbeanspruchung im Umformprozess zu ermöglichen, ist es notwendig alle relevanten Werkzeugteile in der Simulation abzubilden. Durch die Diskretisierung der Werkzeuggeometrie in ein FE-Netz wird die Berechnung der Spannungen- und Dehnungen grundsätzlich auf die gleiche Weise erlaubt, wie dies in der Stoffflusssimulation der Fall ist. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Stofffluss- und Werkzeugsimulation besteht jedoch in der Anwendung des Materialmodells. Da eine plastische Werkzeugdeformation im Umformprozess nicht beabsichtigt ist, kann in vielen Fällen auf die Abbildung des entsprechenden Materialverhaltens verzichtet werden. Es genügt die Verwendung des rein elastischen Materialmodells nach HOOK [121], für das lediglich die Kenntnis des E-Moduls und der Querkontraktionszahl erforderlich ist. Da sich diese Werte für Werkzeugstähle in der Regel nur wenig unterscheiden, wird auf eine explizite Ermittlung der Daten durch Charakterisierungsverfahren häufig verzichtet. Zur Abbildung plastischer Vorgänge im Werkzeug wird, wie im Fall der Stoffflusssimulation, ein Fließort und eine Fließkurve benötigt, die aus Zug- oder Druckversuchen mit dem verwendeten Werkzeugstahl ermittelt werden müssen. Ein weiterer Unterschied zur Stoffflusssimulation besteht in der Anwendung des FE-Elementtyps. Während bei der Bauteilsimulation häufig Hexaederelemente verwendet werden, ist bei Werkzeugen meist der Einsatz von

Tetraederelementen notwendig, um feine Werkzeugkonturen, insbesondere Radienübergänge, vernetzen zu können.

Eine besondere Herausforderung bei der Simulation von Werkzeugen ist die Kopplung der Stoffflusssimulation mit der Werkzeugsimulation. Hierfür ist die Übertragung der Knoteninformationen vom Werkstück auf das Werkzeug notwendig, um die Werkzeugbeanspruchung anhand der äußeren Werkzeugbelastung bestimmen zu können. Für diesen Zweck haben sich zwei grundsätzliche Vorgehensweisen etabliert, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

Gekoppelte Werkstück-Werkzeug Simulation

Für die gekoppelte Werkstück-Werkzeug Simulation wird ein einziges Simulationsmodell erstellt, das sowohl Werkstück, als auch Werkzeug gemeinsam abbildet. Bedeutend ist, dass alle Werkzeugkomponenten eingeschlossen werden, die für die Dehnungen der Matrize relevant sind. Im Fall der Kaltmassivumformung sind das mindestens die Matrize und die Armierung. Zur Berechnung werden Werkstück und Werkzeug diskretisiert, einschließlich der Armierungsringe. Eine Abbildung der durch die Armierung bewirkten Vorspannung durch Knotenverschiebungen an der Matrize ist dabei nicht ausreichend. Die Armierungsringe müssen zwingend als deformierbare Körper in die Simulation eingeschlossen werden, da diese die Steifigkeit des Gesamtsystems beeinflussen. Zudem werden diese während der Umformung aufgedehnt, wodurch eine dynamische Wechselwirkung mit der Matrize entsteht. Zur Erzeugung des Matrizenübermaßes werden die Armierungsringe mit ihrem Fertigmaß in die Simulation integriert. Die sich ergebende Überschneidung zwischen Armierung und Matrize wird im ersten Berechnungsschritt aufgehoben, wodurch sich die entsprechende Vorspannung einstellt. Neuere Programme wie etwa Simufact.forming erlauben alternativ die direkte Einstellung des Übermaßes im Programm.

Der Vorteil der gekoppelten Simulation besteht in der Abbildung der Rückkopplung zwischen umgeformtem Werkstück und Werkzeug in jedem Berechnungsschritt, wodurch die Simulationsgenauigkeit gesteigert wird. Nachteilig ist jedoch, dass zur gemeinsamen Darstellung von diskretisiertem Bauteil und Werkstück eine hohe Anzahl an Finiten Elementen notwendig ist. Zudem ist die Berechnung des Kontaktzustandes zwischen zwei deformierbaren Körpern sehr aufwendig, was die Berechnungszeit zusätzlich steigert. Dieser Simulationsansatz wird daher vorrangig bei weniger rechenintensiven 2D-Modellen genutzt. 3D-Simulationen können dagegen selten gekoppelt berechnet werden, da deren

Elementanzahl in der Regel die derzeitig verfügbare Rechnerkapazität überfordert. Um dennoch gekoppelte 3D-Simulationen zu ermöglichen, kann das FE-Netz vergrößert werden. Allerdings wird dadurch ein unverhältnismäßig großer Abfall der Berechnungsgenauigkeit in Kauf genommen.

Entkoppelte Werkstück-Werkzeug Simulation

Kann eine gekoppelte Simulation nicht zufriedenstellend durchgeführt werden, wird auf die entkoppelte Werkstück-Werkzeug Simulation zurückgegriffen. Bei diesem Verfahren wird eine getrennte Simulation für Werkstück und Werkzeugbeanspruchung erstellt, wobei zunächst die Berechnung der Werkstückumformung erfolgt. Die Diskretisierung der Simulationskörper sowie die Einbindung der Armierungsringe erfolgt analog zum gekoppelten Simulationsmodell. Für die Berechnung der Werkzeugbeanspruchung werden die Informationen der Knoten aus der Werkstücksimulation in die Werkzeugsimulation als Randbedingungen übertragen. Entscheidender Vorteil ist, dass die Anzahl der Finiten Elemente in den Simulationen gering gehalten werden und die Anzahl der Kontaktflächen reduziert wird. Auf diese Weise lassen sich auch anspruchsvollere 3D-Simulationen realisieren. Nachteilig ist jedoch, dass prinzipbedingt der Einfluss der Werkzeugdeformation auf das Umformergebnis des Bauteils nicht berücksichtigt werden kann. Da die Werkzeugbeanspruchung in der Regel nicht wesentlich durch die Rückkopplung mit dem Werkstück beeinflusst wird, kann dieser Fehler in Hinblick auf die Werkzeuganalyse meist vernachlässigt werden.

2.5 Zusammenfassende Bewertung zum Stand der Technik und Forschung

Die Blechmassivumformung ist eine vergleichsweise junge Prozessklasse, die aufgrund des Bedarfs nach gewichtssparenden, hochintegrierten Funktionsbauteilen aus effizienter Massenfertigung entstanden ist. Verfahren der Blechmassivumformung wurden zunächst in der Industrie angewandt und anschließend von der Forschung aufgegriffen. Wissenschaftliche Untersuchungen waren und sind notwendig, da sich aus der Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge neue Herausforderungen ergeben haben, die bisher unbekannt waren. Blechmassivumformprozesse unterliegen einer Vielzahl an Einflussgrößen, die zu einem komplexen und schwer beherrschbaren Stofffluss führen, der die Auslegung der Prozesse stark erschwert. Die Auslegungsproblematik wird darüber hinaus durch den Wunsch nach einer Kombination mit

Blechumformprozessen zusätzlich gesteigert, da hierfür in der Regel eine hoch komplexe Werkzeugkinematik erforderlich ist. Hinzu kommen die typischen hohen Prozesskräfte, die anspruchsvolle Anforderungen an die Werkzeugtechnik stellen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass konventionelle Verfahren mit den Anforderungen der Blechmassivumformung überfordert sind. Die Etablierung neuer Verfahren ist daher zwingend notwendig. Dies ist jedoch nur sinnvoll möglich, wenn die spezifischen Herausforderungen nicht nur erkannt, sondern deren Ursachen im Detail verstanden werden. Dies schließt insbesondere die Identifikation von Einflussgrößen auf den Stofffluss ein, der für Bauteilumformung maßgeblich ist. Sind die Wirkungsweisen der Einflussgrößen und deren Interaktion geklärt, können Maßnahmen entwickelt und erforscht werden, die eine gezielte Steuerung des Stoffflusses zur Verbesserung des Prozessergebnisses ermöglichen. Tatsächlich gab es in diesen Gebieten vor allem in jüngster Zeit eine Reihe von Fortschritten. So wurde als eine grundlegende und verfahrensübergreifende Herausforderung der während der Umformung entstehende Verfestigungsgradient erkannt, der maßgeblich für Fehler in der Bauteilumformung ist. Auch die besondere Rolle der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, die bei einer Erhöhung – konträr zu konventionellen Prozessen - zu einer vollständigeren Ausformung führt, konnte identifiziert und erklärt werden. Die Erkenntnisse wurden in Form von Tailored Blanks und Tailored Surfaces genutzt, um eine Stoffflusssteuerung mit dem Ziel der Steigerung der Bauteilumformung zu ermöglichen.

Trotz der Erfolge bleibt nach wie vor großflächig Forschungsbedarf bestehen. So wurde das Spektrum an den für die Umformung von Blechen geeigneten Massivumformverfahren bei weitem nicht ausgereizt. Speziell zum Fließpressen von Funktionselementen an Blechen existieren nur eingeschränkte Erkenntnisse. Bisherige Untersuchungen haben sich auf die Ausformung gleichartiger und rotationssymmetrisch angeordneter Verzahnungselemente beschränkt. Erkenntnisse über die Herstellbarkeit anderer Geometrieformen fehlen genauso wie Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen geometrisch ungleichartigen Formelementen. Wissen über dieses Gebiet ist jedoch zwingend erforderlich, da zur Realisierung einer möglichst hohen Funktionsintegration ein umfangreiches Spektrum an Funktionselementtypen an einem einzigen Bauteil erforderlich sein wird. Vor diesem Hintergrund müssen auch die etablierten Methoden zur Stoffflusssteuerung neu bewertet werden, da unklar ist, ob eine Übertragbarkeit in jedem Fall gewährleistet ist.

Des Weiteren besteht große Unsicherheit bei der beanspruchungsgerechten Auslegung von Umformwerkzeugen. Zwar gibt es eine große Anzahl an Forschungsbeiträgen bezüglich der Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von konventionellen Massivumformprozessen, die Zustände und Herausforderungen bei Blechmassivumformwerkzeugen sind jedoch weitgehend unerforscht. Insbesondere liegen kaum Erkenntnisse über die mechanischen und tribologischen Beanspruchungen in den Fließpressmatrizen selbst vor. Bisherige Aussagen wurden lediglich indirekt auf Basis des Prozesskraftbedarfs getroffen. Damit sind aber keine Aussagen über die tatsächlichen Spannungen im Werkzeug möglich. Selbst Erkenntnisse über prozessspezifische Herausforderungen und Grenzen fehlen praktisch vollständig.

Auch im Bereich der für die Prozessauslegung bedeutenden FE-Simulation besteht großer Forschungsbedarf. Bis heute existiert keine FE-Software, die speziell auf die Bedürfnisse der Blechmassivumformung maßgeschneidert ist. Zwar ist eine Prozesssimulation anhand von Programmen für die Massivumformung grundsätzlich möglich, jedoch von deutlichen Einschränkungen betroffen. Schwierig ist dabei insbesondere die Realisierung der gleichzeitigen Berücksichtigung der verschiedenen Anforderungen von Blech- und Massivumformbereichen durch geeignete Werkstoff- und Reibungsmodelle. Zudem stellt die hohe Berechnungszeit eine wesentliche Limitierung der Abbildungsmöglichkeiten dar. Lösungen, wie etwa der Einsatz einer modelladaptiven Simulation, sind derzeit noch nicht zufriedenstellend einsetzbar.

3 Zielsetzung und Methodik

Ziel der Arbeit ist die Schaffung des notwendigen Wissens, um dünnwandige Funktionsbauteile mit Formelementen verschiedenster Geometrie prozesssicher durch Fließpressen herstellen zu können. Hierfür sind Stofffluss und Werkzeugbeanspruchung bei der Ausformung geometrisch unterschiedlicher Formelemente zu untersuchen und Herausforderungen zu identifizieren. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend Maßnahmen entwickelt und erforscht, um eine funktionsgerechte Bauteil- und Funktionselementausformung zu gewährleisten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine dreistufige Vorgehensweise, bestehend aus Prozessaufbau, Prozessanalyse und der Methodenentwicklung zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen verfolgt (Bild 1).

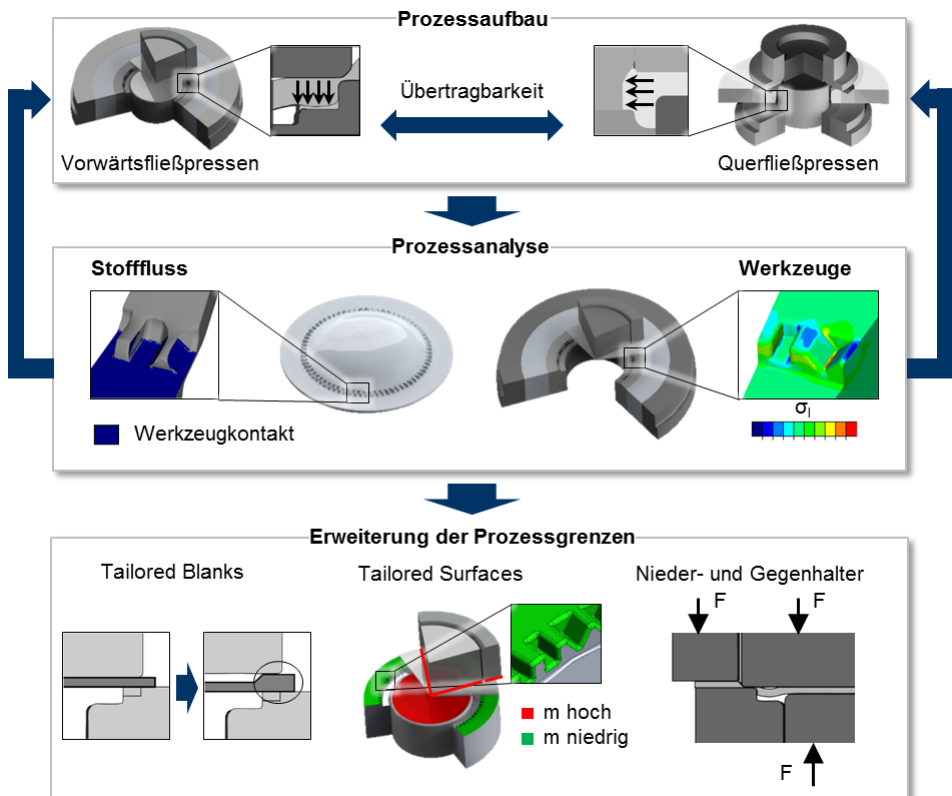


Bild 1: Methodische Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung

Im Rahmen des Prozessaufbaus (Kapitel 5) werden zwei Referenzprozesse ausgelegt und aufgebaut, die in weiterführenden Schritten analysiert und zur Validierung numerisch ermittelter Erkenntnisse genutzt werden. Die Erforschung zweier Prozessvarianten ist notwendig, um die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse untersuchen zu können. Grundsätzlich kommen die Prozessvarianten Vorwärtsfließpressen und Querfließpressen zur Ausformung von Formelementen in Blechdickenrichtung in Frage. Beide Verfahren unterscheiden sich wesentlich durch die Richtung der Krafteinleitung. Während beim Vorwärtsfließpressen die Krafteinleitung in Richtung der Blechebene und Formelementausformung erfolgt, wird diese beim Querfließpressen in Blechnormalenrichtung und quer zur Ausformung der Funktionselemente aufgebracht. Ausgehend von einem Grundkonzept werden die Verfahren anhand von numerischen Prozessmodellen hinsichtlich der Bauteilformung sowie der Werkzeugbeanspruchung analysiert. Die Erkenntnisse werden genutzt, um eine beanspruchungs- und funktionsgerechte Auslegung der Prozesse zu ermöglichen.

In einem zweiten Schritt wird auf Basis der Prozessmodelle eine Analyse des Stoffflusses durchgeführt (Kapitel 6). Ziel ist die Ermittlung wesentlicher Einflussgrößen auf die Bauteilformung in Abhängigkeit der angestrebten Formelementgeometrie und den daraus resultierenden Herausforderungen. Dies schließt die Identifikation von Wechselwirkungen ein, die bei der Ausformung zweier geometrisch ungleichartiger Formelemente an einem Blech auftreten. Hierfür wird zunächst für jede Prozessvariante ein Referenzprozess ausgewählt und detailliert untersucht, um die für die Prozessauslegung wesentlichen Zielgrößen zu identifizieren. Anschließend werden auf Basis der Referenzprozesse numerische Variantenrechnungen mit unterschiedlichen Kavitätsgeometrien und Prozessbedingungen durchgeführt und hinsichtlich der ausgewählten Prozesskenngrößen ausgewertet. Zusätzlich wird untersucht, ob die in der Literatur identifizierten Prozesseinflussgrößen auf beliebige Formelementgeometrien erweitert werden können.

Im letzten Schritt werden die Erkenntnisse der Prozessanalyse genutzt, um Maßnahmen zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen zu entwickeln und auf deren Wirksamkeit hin zu untersuchen (Kapitel 7). Hierfür werden zunächst Wirkprinzipien abgeleitet und mit Hilfe numerischer Simulation auf die konkreten Prozesse angepasst. Die Maßnahmen werden anschließend auf die Realprozesse übertragen und deren Wirksamkeit experimentell validiert. Im Detail wird die Möglichkeit einer Stoffflusssteuerung durch eine Beeinflussung des Reibgradienten zwi-

schen ausgewählten Prozessbereichen sowie durch Einsatz von geometrischen Fließbehinderungen analysiert und bewertet. Außerdem wird der Ansatz einer Materialvorverteilung in Form von sogenannten Tailored Blanks genutzt, um gezielt zusätzlichen Werkstoff in Bereichen verringerter Bauteilausformung zur Verfügung zu stellen. Abschließend wird die Möglichkeit einer Verbesserung der Ausformung durch einen gezielten Einsatz von Nieder- und Gegenhaltersysteme angestrebt. Abschließend werden die untersuchten Maßnahmen gegenübergestellt, bewertet und hinsichtlich eines Einsatzes in der industriellen Praxis evaluiert.

4 Verwendete Werkstoffe, Versuchsanlagen, Messmethoden und Software

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Werkstoffe und Schmierstoffe vorgestellt. Zudem werden die versuchstechnischen Anlagen beschrieben, die zur Durchführung der Umformversuche eingesetzt werden sowie die Methoden zur Durchführung der Bauteilmessungen vorgestellt. Abschließend wird das für die Durchführung der Finite-Elemente Simulationen notwendige Simulationsprogramm erläutert.

4.1 Bauteilwerkstoffe

Als Referenzwerkstoff für die Bauteilherstellung wurde der industriell weit verbreitet eingesetzte, kaltgewalzte Tiefziehstahl DC04 nach DIN EN 10130 [122] ausgewählt, der aufgrund seiner vorteilhaften Umformigenschaften insbesondere in der Automobilindustrie zur Herstellung von Karosserieteilen genutzt wird [123]. Zur Analyse der Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde darüber hinaus der höherfeste Dualphasenstahl DP600 nach DIN EN 10346 [124] verwendet. Dualphasenstähle zeichnen sich insbesondere durch eine niedrige Streckgrenze, hohe Festigkeiten und einen hohen Verfestigungsexponenten aus.

Beide Werkstoffe wurden in einer Nennblechdicke von $s_0 = 2$ mm eingesetzt. Die chemische Zusammensetzung der beiden Werkstoffe ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: a) Werkstoffdaten und b) Legierungszusammensetzung der verwendeten Bauteilwerkstoffe

a)	Werkstoffnummer	Werkstoffnorm	Blechdicke s_0	Oberfläche
DC04	1.0338	DIN EN 10130	2 mm	EDT
DP600	1.0936	DIN EN 10346	2 mm	EDT

b)	Stahl	Chemische Zusammensetzung (in Masse-%)							
		C	Mn	Si	Al	Nb	N	P	S
	DC04	< 0,08	< 0,35	-	0,02-0,07	-	< 0,007	< 0,03	< 0,03
	DP600	< 0,14	2,00	1,50	< 0,015	-	-	0,07	0,015

Zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften wurde eine umfangreiche Werkstoffcharakterisierung durchgeführt, um Fließbeginn und Verfestigungsverhalten numerisch beschreiben zu können. Hierfür wurden sowohl Zug- als auch Druckversuche bei Raumtemperatur quasistatisch durchgeführt. Die in Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1 [125] und in Schichtstauchversuchen ermittelten, mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte der Halbzeuge (n = 3)

Kennwert	Rp0,2 in MPa	Rm in MPa	Ag in %	r - Wert	n	Rp0,2* in MPa
DC04	180,98 ± 5,23	317 ± 0,00	23,5 ± 0,08	2,07 ± 0,08	0,21	164,79 ± 5,58
DP600	366,88 ± 1,78	602 ± 1,70	17,2 ± 0,05	0,94 ± 0,01	0,16	339,48 ± 7,76

*Schichtstauchversuch

Die Schichtstauchversuche wurden in Anlehnung an den konventionellen Stauchversuch nach DIN 50106 [126] durchgeführt. Hierfür wurden mehrere Einzelproben gestapelt, um die geringe Blechdicke der Proben versuchstechnisch zu kompensieren. Um Reibungseinflüsse so gut wie möglich auszuschließen, wurde zudem die Reibung zwischen Prüfkörper und Stauchbahn durch den Einsatz von Teflonfolie minimiert. Bei allen Versuchen wurden die resultierenden Dehnungen optisch mit Hilfe des Messsystems Aramis der Firma GOM mbH über eine photogrammetrische Punktverfolgung eines stochastischem Sprühmusters auf der Probenoberfläche gemessen.

Um die in der Blechmassivumformung typischen hohen Umformgrade in der FE-Simulation abbilden zu können, wurden die Fließkurven der Werkstoffe mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an eine mathematisch Funktion angenähert, wodurch eine Beschreibung und Extrapolation der Fließkurven ermöglicht wird. Im Zuge der Modellvalidierung hat sich hierfür das Modell nach Hockett-Sherby [120] zur Abbildung der Umformvorgänge als geeignet erwiesen und wurde daher für alle Werkstoffe und Versuche ausgewählt. Die sich ergebenden Fließkurven, einschließlich der aus den Charakterisierungsversuchen ermittelten Messpunkte, sind in Bild 2 dargestellt.

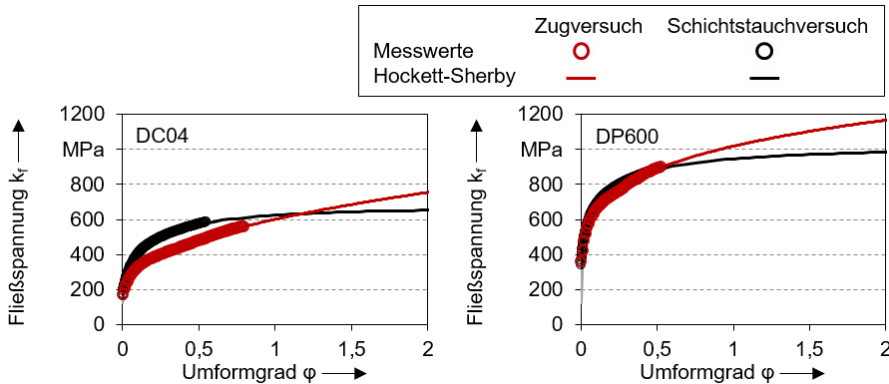


Bild 2: Experimentell ermittelte Messwerte der Zug- und Schichtstauchversuche sowie deren Approximation nach Hockett-Sherby

4.2 Werkzeugwerkstoffe

Da neben der Umformung der Bauteile eine Untersuchung der Werkzeugbeanspruchung durchgeführt wird, ist eine numerische Abbildung des Werkzeugwerkstoffverhaltens erforderlich. Eine ausschließlich elastische Beschreibung des Werkstoffverhaltens ist dabei nicht ausreichend, da auf diese Weise plastische Verformung, wie sie beispielsweise beim mikroplastischen Spannungsabbau im Werkzeug von Bedeutung ist, nicht berücksichtigt werden kann. Aufgrund seiner guten Härtebarkeit und der damit verbundenen hohen Druckfestigkeit wird der pulvermetallurgische und vergütete Werkstoff ASP2023 (1.3344) für die experimentelle Realisierung der Werkzeugaktivteile (Matrize, Stempel, Gegenhalter und Niederhalter) ausgewählt. Der pulvermetallurgisch hergestellte Werkzeugstahl wurde auf 60 HRC vergütet, um eine möglichst hohe Härte bei gleichzeitig ausreichender Werkstoffzähigkeit zu gewährleisten. Dies ist notwendig, da während der Umformung im Werkzeug sowohl ausgeprägte Druck- als auch Zugspannungen auftreten. Aufgrund der geringeren Beanspruchung wurden die Armierungsringe dagegen aus dem konventionell hergestellten Werkzeugstahl (1.3343) gefertigt, wobei die Härte auf 48 HRC eingestellt wird, um die in der Armierung auftretenden Zugspannungen ertragen zu können. Im Gegensatz zum Matrizenwerkstoff genügt die Abbildung des Werkstoffverhaltens im elastischen Bereich, da keine Plastifizierung der Armierungsringe zu erwarten ist.

Eine Übersicht über die Werkstoffdaten und die chemische Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: a) Werkstoffdaten und b) Legierungszusammensetzung der verwendeten Bauteilwerkstoffe

a)	Werkstoffnummer	Werkstoffnorm	Härte (HRC)
ASP2023	1.3344	DIN EN ISO 4957	60
1.3343	1.3343	DIN EN ISO 4957	48

b) Stahl	Chemische Zusammensetzung (in Masse-%)							
	C	Cr	Mo	W	Co	V	Mn	Si
ASP2023	1,28	4,1	5,0	6,4	-	3,1	-	-
1.3343	0,9	4,3	5,0	6,4	-	1,9	< 0,4	< 0,45

Für die Abbildung des Werkzeugwerkstoffverhaltens wurde auf Messwerte zurückgegriffen, die im Rahmen einer Studie der German Cold Forging Group (GCFG) aufgenommen worden sind [127]. Die wesentlichen mechanischen Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Mechanische Kennwerte der Werkzeugwerkstoffe [127]

Kennwert	R _{p0.2} in MPa	R _m in MPa	A _g in %	R _{p0.2} * in MPa	R _m * in MPa	A _g * in %
ASP2023 (60,5 HRC)	2496	2530	0,27	2060	2853	33,2
1.3343 (49,2 HRC)	1586	1665	3,72	1445	1971	kein Bruch

*Stauchversuch

Das Fließverhalten des ASP2023 wurde aus den Messwerten der GCFG Studie abgeleitet und mittels Hockett-Sherby Approximation [120] in eine Fließkurve übertragen. Das an die Datenpunkte angenäherte und extrapolierte Ergebnis ist in Bild 3 dargestellt.

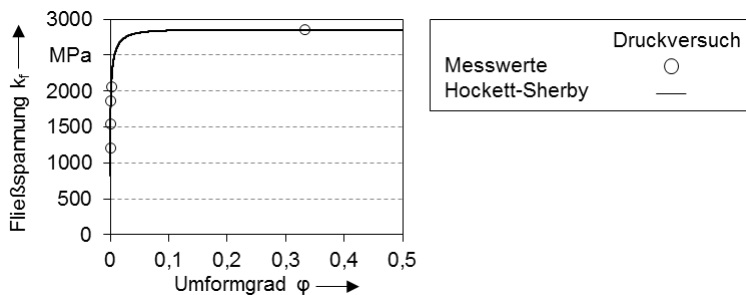


Bild 3: Messwerte und approximierte Fließkurve des Werkzeugwerkstoffs 1.3344 [127]

4.3 Schmierstoff

Zur Durchführung der experimentellen Umformversuche wurde der Schmierstoff BF 150 DL der Carl Bechem GmbH verwendet. Hierbei handelt es sich um ein wachshaltiges, wassermischbares Konzentrat, das meist bei Kaltmassivumformprozessen verwendet wird und sich durch seine umweltfreundlichen Eigenschaften auszeichnet [128]. Der Schmierstoff wurde von VIERZIGMANN et al. [129] bezüglich eines Einsatzes in der der Blechmassivumformung untersucht und als geeignet eingestuft. BF 150 DL wurde seitdem in verschiedenen Blechmassivumformprozessen, u.a. dem Fließpressen [14] erfolgreich eingesetzt. Die für die FE-Simulation in dieser Arbeit benötigten Reibfaktoren wurden in Ringstauch- und Zapfenpressversuchen im Rahmen des Teilprojekts C₁ des SFB/TR 73 am LFT ermittelt und sind in Bild 4 dargestellt.

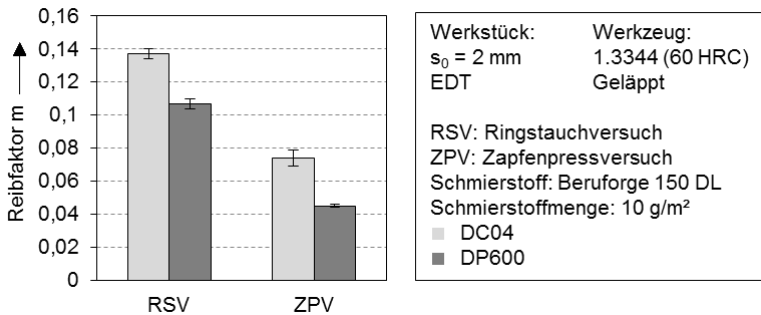


Bild 4: Experimentell ermittelte Ergebnisse der Ringstauch- und Zapfenpressversuche bezüglich des Schmierstoffs BF 150 DL

4.4 Presse TZP 400/3

Die Durchführung der experimentellen Versuche wurde mit Hilfe der hydraulischen Presse TZP 400/3 der Neue Materialien Fürth GmbH (NMF) realisiert. Die Anlage aus dem Hause Lasco Umformtechnik GmbH verfügt über eine Nennkraft von 4000 kN, die zum Verfahren des Stößels und der beiden Ziehkissen genutzt werden kann (Bild 5).

Gegen- und Niederhalter sind mittels des sogenannten Verdrängerbetriebs über in die Ziehkissen eingebrachte Druckstäbe (Pinolen) mit einer konstanten Kraft beaufschlagbar. Die kraftgebundene Presse verfügt über Kraft- und Wegmessensoren, die eine Steuerung der Prozesskraft und des Stößelwegs erlauben. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche ist eine präzise Steuerung des Stempelwegs notwendig, die

jedoch nicht von der Pressenregelung in ausreichender Genauigkeit erreicht wurde.

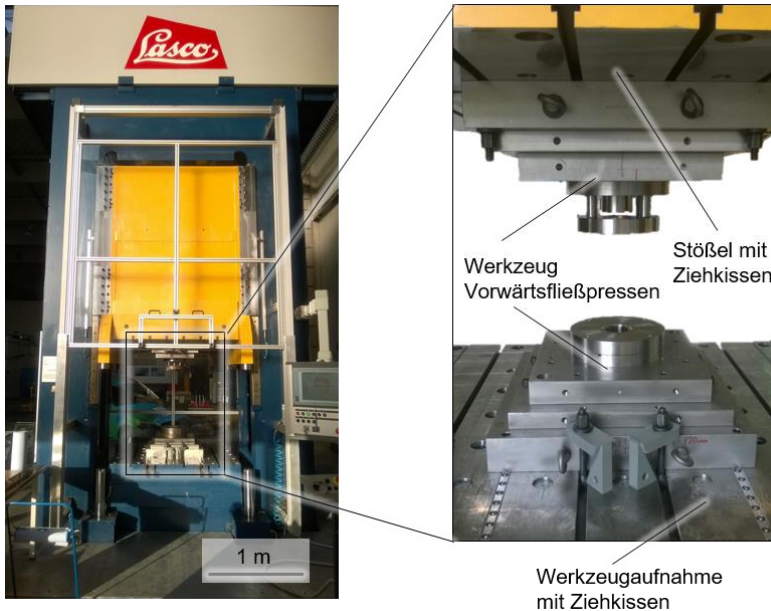


Bild 5: Presse des Typs Lasco TZP 400/3 mit einer Nennkraft von 4000 kN und eingebauten Werkzeug zum Vorwärtsfließpressen

Aus diesem Grund wurden mechanische Anschläge gefertigt, mit deren Hilfe der gewünschte Stempelweg mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,02$ mm angefahren werden kann. Die genaue Höhe der Anschläge musste für jede Versuchsvariante aufgrund der unterschiedlichen Pressenauffederung neu angepasst werden. Die Korrektur der Anschlagshöhe wird hierfür über Blechstreifen mit einer Dicke von 0,1 mm realisiert, die zwischen Anschlagblock und Stößel nach Bedarf eingeschoben werden.

4.5 Messtechnische Anlagen

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse sind die Ermittlung der resultierenden Bauteilgeometrie sowie die Aufnahme der Prozessgrößen mittels geeigneter Messtechnik notwendig. Die für diesen Zweck eingesetzten Messmethoden werden im Folgenden vorgestellt.

Prozessgrößen

Die Messung von Stempelkraft und Stempelweg erfolgt während der Umformung simultan durch entsprechende Messtechnik an der Presse TZP

400/3. Während die Stempelkraft direkt von der Maschine ausgegeben wird, ist für die Aufnahme des Stempelwegs der Einsatz eines Messtasters notwendig (Bild 6).

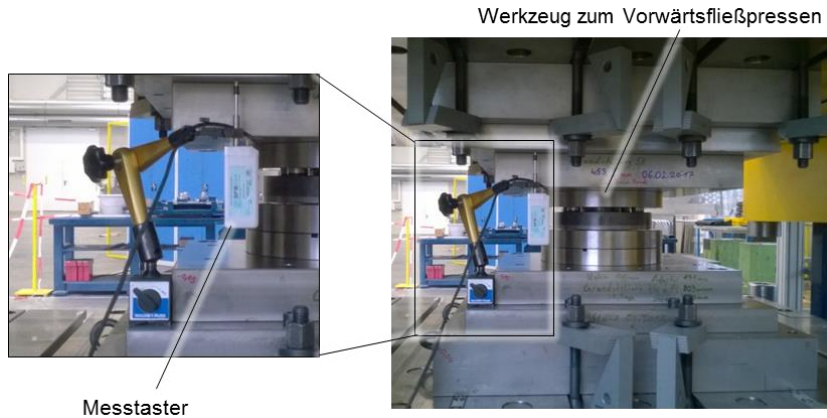


Bild 6: Messtaster zur Aufnahme des Stempelwegs

Durch die Positionierung eines Tasters der Heidenhain GmbH vom Typ MT 1200 in Stempelnähe konnte der Einfluss der Pressenauffederung beim Vorwärts- und Querfließpressen minimiert werden. Dennoch verbleibende Anteile wurden anhand der eigens aufgenommenen Pressenkennlinie analytisch herausgerechnet.

Geometrische Bauteilprüfung

Die Messung der Bauteilgeometrie nach Prozessende wurde mittels des optischen Messsystems ATOS der Firma GOM mbH realisiert (Bild 7a).

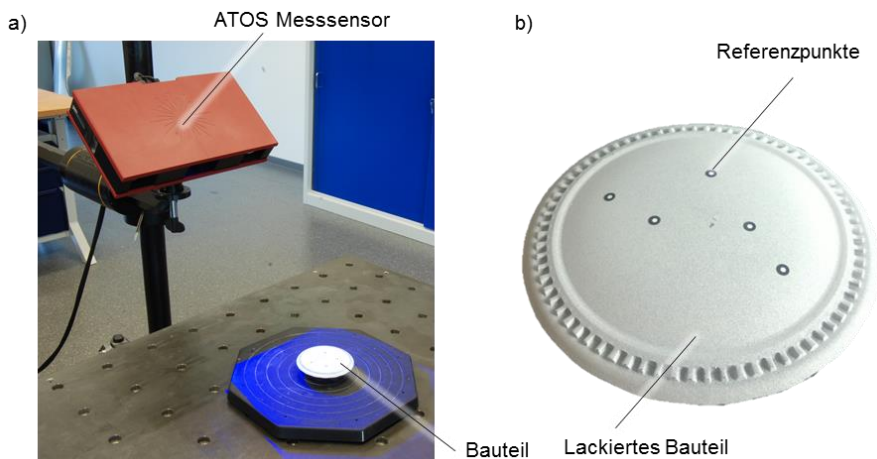


Bild 7: a) Messsystem ATOS und b) zur Messung vorbereitetes Bauteil

Für die Durchführung der Messung wird auf dem zu messenden Bauteil zunächst eine Lackschicht und Referenzpunkte aufgebracht (Bild 7b). Anschließend wird die Bauteiloberseite und -unterseite mit Hilfe der Streifenlichtprojektion über einen Sensormesskopf aufgenommen. Beide Bauteilhälften werden anschließend digital verarbeitet und in der Messsoftware ATOS zusammengefügt, wodurch eine detaillierte Analyse des Bauteilprofils und des Bauteilvolumens ermöglicht wird.

Messung der Werkzeugaufdehnung

Zur Validierung der Simulationen zur Werkzeugbeanspruchung ist die Messung der im Prozess auftretenden Dehnungen der Matrize und der Armierungsringe erforderlich. Dies wurde anhand von Dehnungsmessstreifen (DMS) des Typs 1-XY91-3/350 der Firma HBM realisiert. DMS bestehen aus einem stromdurchflossenen Drahtgeflecht, das auf die zu messende Stelle aufgeklebt wird und die gleichen Dehnungen erfährt, wie der zu messende Untergrund. Anhand der Änderung des elektrischen Widerstands, der auf der Leiterlänge basiert, wird auf die Dehnung zurückgerechnet. Die eingesetzten DMS verfügen über ein Messfeld von $1,5 \times 1,4$ mm und erlauben die gleichzeitige Messung von Dehnungen in 0° und 90° Richtung.

4.6 Simulationssoftware

Für die numerische Untersuchung des Vorwärts- und Querfließpressprozesses wird die Simulationssoftware Simufact.forming der Firma Simufact Engineering GmbH verwendet, die speziell zur Abbildung von Massivumformprozessen entwickelt wurde [130]. Zur Diskretisierung stehen Volumenelemente in Tetraeder- oder Hexaederform zur Verfügung, die zur dreidimensionalen Abbildung von umformtechnischen Prozessen genutzt werden. Um hohe Umformgrade ohne starke Netzverzerrung abbilden zu können, ist die automatische Neuvernetzung (Remesh) der diskretisierten Prozesskomponenten möglich. Eine Verringerung des Berechnungsaufwands ist durch den Einsatz von Symmetrieebenen sowie durch eine lokal anpassbare Netzkantenlänge umsetzbar. Zur Abbildung der Werkzeugbeanspruchung können Beanspruchungssimulationen des gekoppelten und entkoppelten Typs berechnet werden. Die Modellierung der Vorspannung wird dabei durch ein virtuelles Übermaß zwischen den Armierungsringen in der Werkzeugsimulation direkt eingestellt.

5 Prozessaufbau und Werkzeugkonzept

Ziel des Kapitels ist die Entwicklung der Referenzprozesse für das Vorwärts- und Querfließpressen. Hierfür wird zunächst eine geeignete Zielgeometrie für die Funktionselemente ausgewählt, die in die Ausgangsbleche durch Fließpressen eingebracht werden soll. Anschließend werden grundsätzliche Werkzeugkonzepte entwickelt, die die Ausformung der Bauteile ermöglichen. Im Sinne der Prozesskettenverkürzung werden die Konzepte derart ausgeführt, dass die komplette Bauteilumformung durch einen einzigen Stempelhub realisiert wird. Ziel ist zudem, dass der für die Ausformung relevante Stofffluss definitionsgemäß für das Vorwärtsfließpressen in Richtung der Stempelbewegung und für das Querfließpressen quer dazu gerichtet ist [131]. Die Werkzeugkonzepte werden anschließend in einen konkreten Werkzeugaufbau überführt. Voraussetzung ist hierfür, dass die Werkzeugteile den auftretenden Beanspruchungen standhalten können. Dementsprechend wird die ideale Werkzeuggeometrie gemäß den Anforderungen der Werkzeugbeanspruchung ausgelegt und ggf. angepasst. Technologische Grenzen sind vorrangig durch die vorhandene Werkzeugtechnologie und die Festigkeit des eingesetzten Werkzeugwerkstoffs gegeben. Um im weiteren Untersuchungsverlauf eine Analyse der Prozesse zu ermöglichen, werden für beide Verfahrensvarianten Finite Elemente Simulationsmodelle entwickelt. Die, anhand von experimentell gewonnenen Ergebnissen validierten Modelle, ermöglichen sowohl die Abbildung und Analyse des Stoffflusses, als auch die Berechnung der Werkzeugbeanspruchungen.

5.1 Auswahl der Funktionselemente

Ziel der Arbeit ist der Verständnissaufbau für Fließpressprozesse zur Erzeugung von Funktionselementen an Blechen. Hierfür wird zunächst eine Auswahl der Referenzgeometrie getroffen, die in den folgenden Untersuchungen systematisch und geometriebezogen variiert wird, um deren Einfluss auf das Prozessergebnisses ermitteln zu können. In Hinblick auf mögliche praktische Anwendungen werden die Funktionselemente an industriell relevante Bauteile angelehnt.

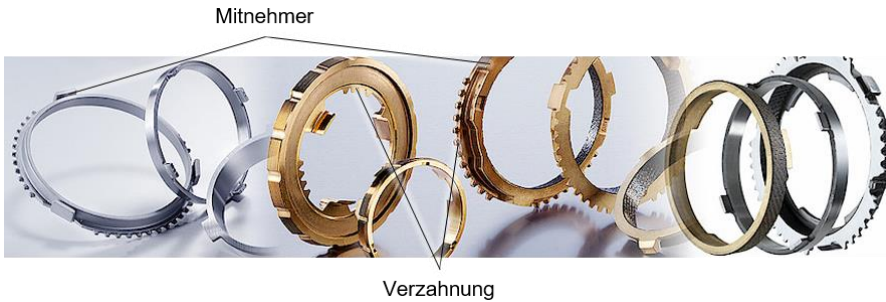


Bild 8: Beispiele von Synchronringen mit Verzahnungen und Mitnehmern [10]

Vor diesem Hintergrund ist als ein Beispiel der Synchronring zu nennen. Wie in Bild 8 dargestellt, weisen Synchronringe typischerweise Verzahnungen und Mitnehmer auf. Verzahnungen werden in technischen Anwendungen häufig als geometrisch komplexe Evolventenverzahnung ausgeführt, um eine möglichst gute Abwälzbewegung sicherzustellen [132]. Für eine systematische Untersuchung der geometrischen Einflussgrößen ist eine unveränderte Nutzung dieser Geometrie nicht zielführend, da die Einflüsse der einzelnen Geometriebestandteile nicht voneinander getrennt werden können. Aus diesem Grund wird die Zahngestalt auf eine einfache Grundgeometrie zurückgeführt, die durch wenige, klar getrennte Größen bestimmt wird. Als Abstraktion der Evolventenverzahnung (Bild 9a) wird hierfür die zugrundeliegende Grundform Dreieck genutzt (Bild 9b). Um die in der Umformtechnik werkzeugseitig häufig notwendigen Radienübergänge zwischen scharfen Kanten abbilden zu können, wird die Dreiecksgeometrie zusätzlich um Radien im Bereich von Formelementboden und -spitze erweitert (Bild 9c).

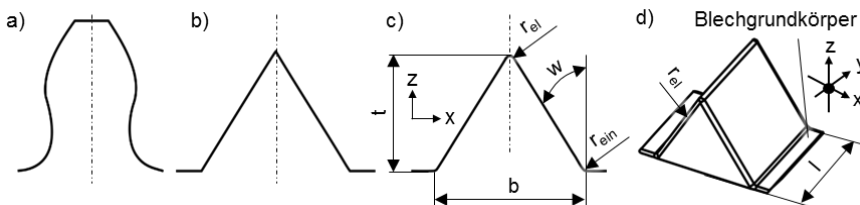


Bild 9: Abstraktion der Geometrie des Referenzformelements (c und d) ausgehend von einer Evolventenverzahnung (a) durch Rückführung auf die geometrische Basisform Dreieck (b)

Die Formelementgeometrie ist durch die Angabe von Höhe (t), Breite (b), Länge (l), Winkel (w), den Formelementradien (r_{el}) und den Einlaufadien (r_{ein}) eindeutig bestimmt (Bild 9c/d). Durch Variation der einzelnen Parameter ist neben der Veränderung der Dimension des Formelements

die Einstellung der Grundgeometrie möglich. Durch eine alleinige Änderung des Winkels w werden Funktionselemente unterschiedlicher Verjüngung abgebildet. Damit ergeben sich als Extremfall sowohl Dreieck (Bild 10a) als auch Rechteckelemente (Bild 10b). Die Abbildbarkeit der für Synchronringe relevanten Zähne (Dreieckelement) und Mitnehmer (Rechteckelement) ist auf diese Weise gegeben.

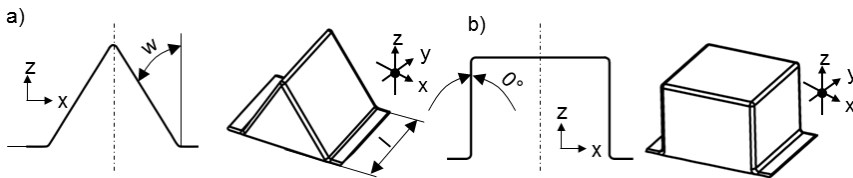


Bild 10: Bestimmung der Kavitätsgeometrie durch alleinige Änderung des Winkels w , Extremfall Dreieck (a) und Rechteck ($w = 0^\circ$) (b)

Gemäß MERKLEIN et al. [13] liegt die Dimension der auszuformenden Formelemente in Blechmassivumformverfahren im Rahmen der Blechdicke. Basierend auf einer Halbzeugdicke von 2 mm wird die Referenzgeometrie mit einer Länge und Breite von 3 mm und einer Tiefe von 2,2 mm ausgeführt. Die Element- und Einlaufradien werden auf die, in industriellen Anwendungen häufig verwendeten, Radien von 0,1 mm festgelegt. Insgesamt ergibt sich damit ein Formelementvolumen von 9,91 mm³. Eine Übersicht der verwendeten Werte ist in Tabelle 6 festgehalten.

Tabelle 6: Parameter der Referenzgeometrie

Größe	Länge	Breite	Höhe	Flankenwinkel	Einlaufradius	Elementradius	Kavitätsvolumen
Kürzel	l	b	t	w	r_{el}	r_{ein}	V_k
Einheit	mm	mm	mm	Grad	mm	mm	mm ³
Wert	3	3	2,2	34	0,1	0,1	9,91

5.2 Werkzeugauslegung

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Konzeption der Fließpressprozesse für das Vorwärts- und Querfließpressen. Neben der grundsätzlichen Forderung nach der Realisierung der Ausformung von Formelementen an einem Blechgrundkörper müssen beide Prozesse weiteren Anforderungen genügen.

Anforderungen

- Stoffflussrichtung zur Formelementausformung
Definitionsgemäß sind Vorwärtsfließpressprozesse durch einen Stofffluss in Richtung der Stempelbewegung und Querfließpressprozesse durch einen Stofffluss quer zur Stempelrichtung charakterisiert. Bei Blechmassivumformprozessen ist die Prozessvariante durch den Werkstofffluss im Bereich der Massivumformzone der Funktionselemente bestimmt und muss entsprechend der jeweiligen Vorgabe für beide Prozesse eingehalten werden.
- Umformung in einem Stößelhub
Im Sinne einer verkürzten Prozesskette sind mehrstufige Prozessausführungen zu vermeiden. Dementsprechend muss die Ausformung mit einem einzigen Stempelhub abgeschlossen sein.
- Ausreichende Werkzeugbeanspruchbarkeit
Für die experimentelle Realisierung der Prozesse muss die Werkzeugtechnik eine ausreichende Werkzeugbeanspruchbarkeit im Kontext der eingesetzten Werkstück- und Werkzeugwerkstoffe gewährleisten.

5.2.1 Vorwärtsfließpressen

Um Funktionselemente durch Vorwärtsfließpressen (VFP) auf einem Blech zu realisieren, ist es erforderlich, dass ein lokaler Stofffluss in Stempelrichtung und in Richtung der Blechnormale erzeugt wird. Um dies zu ermöglichen, wurde ein von KOCH [14] konzipierter Fließpressprozess als Grundlage verwendet und entsprechend den Anforderungen dieser Arbeit weiterentwickelt [S1]. Das resultierende Werkzeug besteht im Wesentlichen aus einer formgebenden Matrize und einem Stempel (Bild 11a). Um die Umformung durchzuführen, wird eine Blechrunde zentrisch auf die Matrize aufgelegt und anschließend mittels einer Bewegung des Stempels in z-Richtung umgeformt (Bild 11b). Die in die Matrize eingebrachten Kavitäten werden dabei durch einen Werkstofffluss in z-Richtung gefüllt. Bei vollständiger Füllung der Kavitäten ist die Ausformung der Formelemente abgeschlossen. Die Geometrie der Kavitäten bestimmt die Zielgeometrie der auszuförmenden Formelemente. Das Werkzeugkonzept wird mit einem optionalen Nieder- und Gegenhalter ausgestattet, um unbeabsichtigte Bauteilverformungen außerhalb des Funktionselementbereichs bei Bedarf zu verhindern. Ferner ist das Aufbringen einer Vorspannung

durch ein Armierungssystem notwendig, um eine Überbeanspruchung der Matrize während der Umformung zu vermeiden.

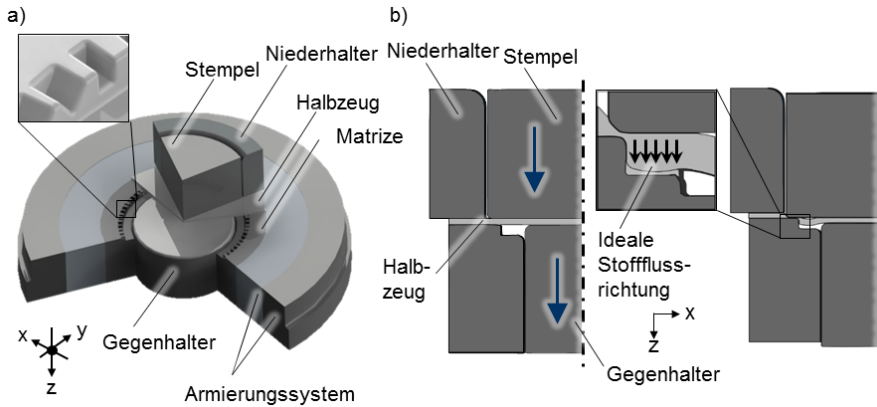


Bild 11: a) Werkzeugkonzept und b) Prozessablauf in Schnittdarstellung (VFP)

Um Effekte bei der gleichzeitigen Ausformung verschiedenartiger Formelemente an einem Blech experimentell untersuchen zu können, wird der Werkzeugaufbau mit einer Matrize ausgeführt, die neben der Referenzgeometrie „Zahn“ die Ausformung von Mitnehmern als Grenzfall erlaubt. Zahn- und Mitnehmerkavitäten werden umlaufend paarweise und abwechselnd auf der Matrize in einem Abstand von $a = 5^\circ$ angeordnet (Bild 12a). Das damit realisierbare Bauteil ist in Bild 12b dargestellt.

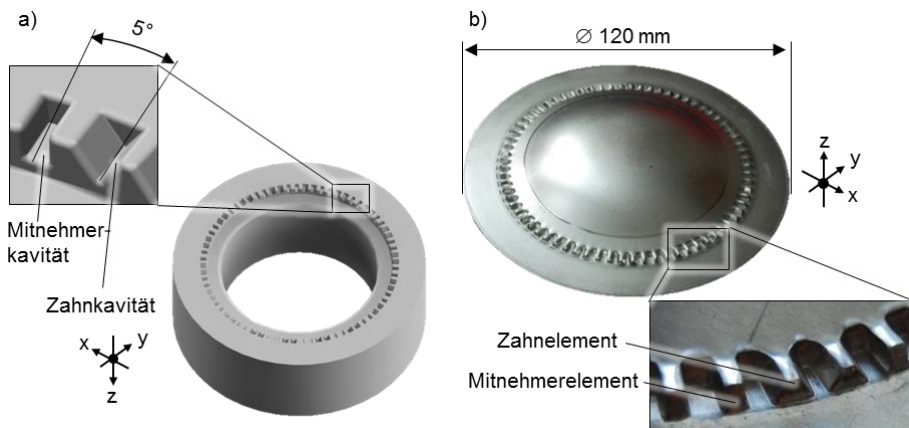
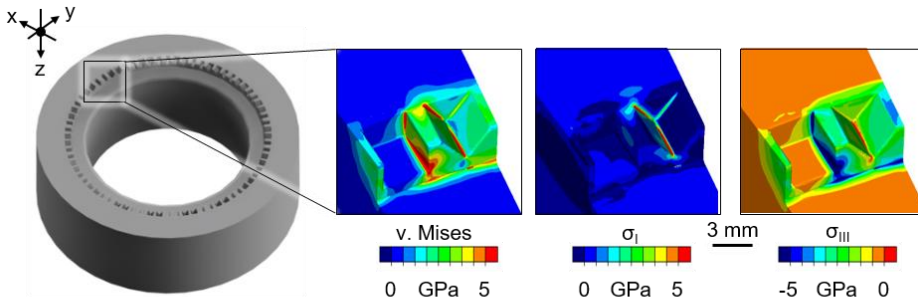


Bild 12: a) Aufbau der Matrize (CAD Darstellung) und b) resultierendes Realbauteil (VFP)

Aufgrund der hohen, versagenskritischen Werkzeugbeanspruchung im Prozess ist eine Anpassung der Referenzgeometrie für die experimentelle Prozessrealisierung (vgl. Tabelle 6) notwendig [S2]. Bild 13 veranschaulicht die am Prozessende wirkende, mechanische Beanspruchung der

Matrize ohne Armierung und ohne Modifikation der Kavitätsgeometrie bei linear-elastischem Werkstoffmodell. Die im Stegbereich zwischen den Kavitäten resultierende Vergleichsspannung mit Werten deutlich über 5000 MPa ist als eindeutig kritisch bezüglich Gewaltbruch einzustufen. Ursächlich sind stark ausgeprägte Zugspannungen ($\sigma_I > 5000$ MPa) in den Zahnkavitäten sowie sehr hohe Druckspannungen ($\sigma_{III} < -5000$ MPa) in den Mitnehmerkavitäten.



DP600, $s_0 = 2$ mm, $s_w = 1,7$ mm, $F_N = 360$ kN, $F_G = 40$ kN, Matrizenwerkstoff: 1.3344
Werkstoffmodell: ideal-elastisch

Bild 13: Mechanische Werkzeugbeanspruchung im Vorwärtsfließpressprozess am Prozessende ohne Anpassung der Referenzgeometrie und ohne Vorspannung der Matrize

Um die ebenfalls hohen Spannungsspitzen ($\sigma_v \approx 2000$ MPa) am Kavitätseinlauf zu reduzieren, werden die Einlaufradien von 0,1 mm auf 0,5 mm erhöht. Zudem wird die Mitnehmerbreite b von 3 mm auf 1,5 mm verringert, um den Steg zwischen den Kavitäten zu vergrößern. Auf diese Weise werden hohe Spannungswerte durch den größeren Stegquerschnitt abgebaut, während Zug- und Druckbeanspruchungen gleichermaßen im Bereich der Kavitätsradien durch die Erhöhung der Stegsteifigkeit reduziert werden. Zur Vermeidung von Sprödbruch oder Ermüdungsrissen wird den ausgeprägten Zugspannungen in den Kavitäten zusätzlich durch ein Armierungssystem mit zwei Armierungsringen aus dem Schnellarbeitsstahl 1.3343 und einer Härte von 48 HRC entgegengewirkt. Da die teils lokal stark ausgeprägten Druckspannungen durch die Armierungswirkung noch weiter verstärkt werden, kann die Vorspannung nicht beliebig hoch eingestellt werden. Ein Übermaß von 5 ‰ zwischen Matrize und dem ersten Armierungsring, sowie von 3 ‰ zwischen dem ersten und zweiten Armierungsring wurde iterativ anhand von Beanspruchungssimulationen als Kompromisslösung identifiziert. Um vor diesem Hintergrund eine möglichst hohe Druckfestigkeit des Werkstoffs zu gewährleisten, wird

der für die Matrize verwendete pulvermetallurgische Schnellarbeitsstahl (1.3344) auf 60 HRC gehärtet.

Die simulativ ermittelten Spannungen für den modifizierten, experimentellen Aufbau sind in Bild 14 für den unbelasteten und den höchstbelasteten Zustand am Prozessanfang- bzw. Prozessende dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht, dass unter maximaler Prozesslast insbesondere in den Kavitätsradien nach wie vor hohe, aber ertragbare Spannungswerte auftreten.

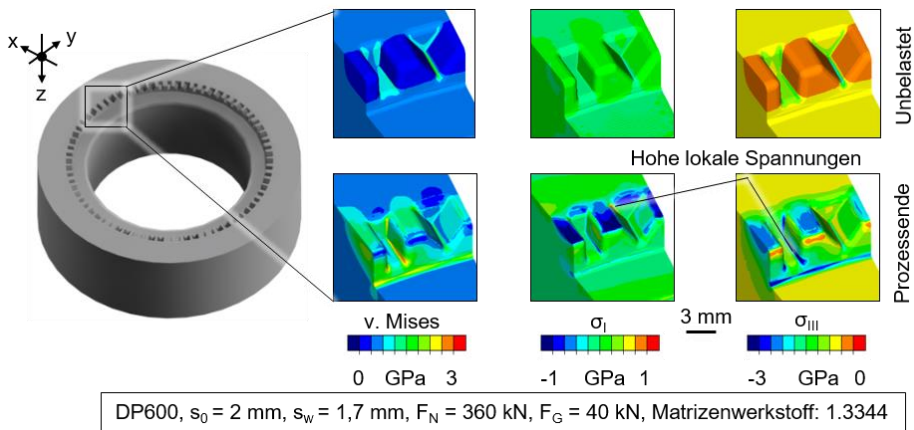


Bild 14: Numerisch ermittelte, mechanische Werkzeugbeanspruchung des experimentellen Aufbaus zum Vorwärtsfließpressen a) im unbelasteten Zustand und b) am Prozessende (Matrize im armierten Zustand)

Trotz verbleibender Hauptspannungswerte weit unterhalb -3000 MPa wird die Plastifizierungsgrenze durch die Vergleichsspannung ($R_{p_{0,2,Druck}} = 2060 \text{ MPa}$) nicht überschritten. Eine Ausnahme bilden die Kavitätsradien der Mitnehmerkavitäten, bei denen es zur Mikroplastifizierung kommt, die zu einem sofortigen Abbau kritischer Spannungsspitzen führt. Da sich die plastische Dehnung ($< 1,8 \%$) in diesen Bereichen nicht auf die Funktionalität des Werkzeugs auswirkt und sich deutlich unterhalb der Bruchdehnung ($A_{g,Druck} = 33,2 \%$) befindet, ist das Werkzeug als gewaltbruchssicher einzustufen. Eine genauere Untersuchung der Matrizenbeanspruchung wird für das Referenzwerkzeug in Kapitel 6.2.1 durchgeführt.

Das theoretische Füllvolumen der experimentell eingesetzten Mitnehmerkavität liegt bei $10,73 \text{ mm}^3$ und ist damit nahezu identisch zu dem der Zahnkavität mit $10,48 \text{ mm}^3$. Die geometrischen Parameter der Formelementkavitäten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Parameter der im Vorwärtsfließpressen verwendeten Kavitätsgeometrien des experimentellen Aufbaus

Größe	Länge	Breite	Höhe	Flankenwinkel	Elementradius	Einlaufradius	Kavitätvolumen
Kürzel	l	b	t	w	r _{el}	r _{ein}	V
Einheit	mm	mm	mm	Grad	mm	mm	mm ³
Zahn	3	3	2,2	34	0,1	0,5	10,48
Mitnehmer	3	1,5	2,2	0	0,1	0,5	10,73

Zur Einbindung in die dreifachwirkende Presse des Typs Lasco TZP 400/3 werden die Aktivteile in ein Gestellsystem eingebunden, das wiederum mit dem Presstisch verbunden ist (Bild 15). Über hydraulische Pinolen ist die separate Einstellung einer definierten Kraft für Niederhalter und Gegenhalter realisierbar, die über den gesamten Prozessverlauf konstant gehalten wird.

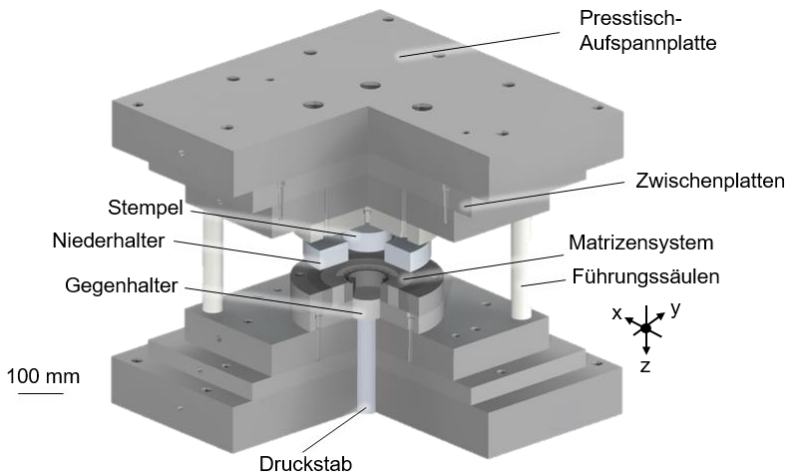


Bild 15: Gesamtaufbau Vorwärtsfließpressprozess

5.2.2 Querfließpressen

Um Formelemente an einem Blechhalbzeug und aus der Blechebene heraus durch einen Werkstofffluss quer zur Stempelbewegung der Presse ausformen zu können, wird ein von SCHNEIDER [25] entwickeltes Werkzeugkonzept zum kombinierten Tiefziehen und Stauchen als Grundlage

verwendet und an die Bedürfnisse des Querfließpressens angepasst. Der Aufbau des resultierenden Werkzeugs ist in Bild 16a dargestellt.

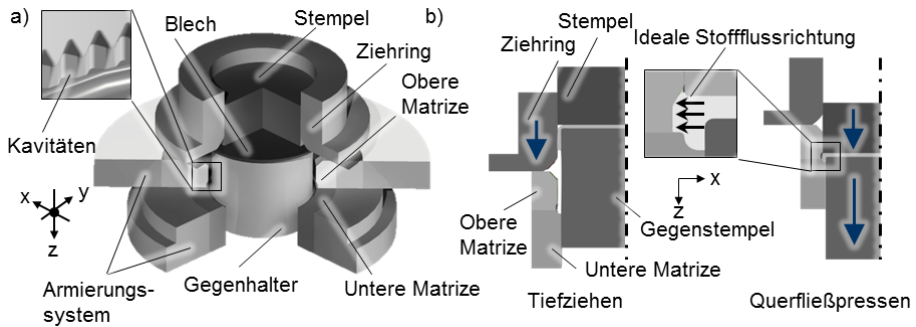


Bild 16: a) Werkzeugkonzept (Prozessbeginn) und b) Prozessablauf in Schnittdarstellung (QFP)

Das Werkzeug besteht im Wesentlichen aus einer in axialer Richtung geteilten, formgebenden Matrize, einem Stempel und Gegenstempel sowie einem Ziehring (Bild 16a). Um eine ausreichende Beanspruchbarkeit der Matrize zu gewährleisten, sind beide Matrizen zusätzlich mit Armierungssystemen ausgestattet. Die auf Basis der Beanspruchungssimulation iterativ ermittelten Übermaße betragen 4,2 ‰ für den ersten Armierungsring und 3,0 ‰ für den zweiten Armierungsring der oberen Matrize. Für die untere Matrize ist der Einsatz eines einzelnen Armierungsrings mit 5,0 ‰ ausreichend.

Um den Umformprozess durchzuführen, wird zunächst eine Blechrunde zentral auf den Gegenhalter aufgelegt und durch den Stempel mit einer konstanten Kraft geklemmt. Die Positionierung der Ronde im experimentellen Aufbau erfolgt über eine Zentrierbohrung in der Ausgangsronde, die auf Passung mit einer entsprechenden Aufnahme des Gegenhalters gebracht wird. Im zweiten Schritt verfährt ausschließlich der Ziehring in z-Richtung, wodurch ein Tiefziehen der Ronde bewirkt wird (Bild 16b). Sobald dieser abgeschlossen ist, verfahren Stempel und Gegenhalter simultan und widerstandslos mit dem napfförmigen Bauteil bis die Napfzarge auf dem Absatz der unteren Matrize zum Aufliegen kommt. Ab diesem Zeitpunkt wird die Napfzarge durch die fortwahrende Stempelbewegung in ihrer Höhe verringert. Der dabei verdrängte Werkstoff wird quer zur Stempelrichtung in die Kavitäten der oberen Matrize geleitet. Im Gegensatz zu der von SCHNEIDER [25] verwendeten Prozessvariante verlaufen die in einem Abstand von 5° angeordneten, umlaufenden Kavitäten nicht über die gesamte Höhe der Matrize, sondern sind in ihrer Ausdehnung begrenzt. Damit ist der Ort der Kraftaufbringung am Bauteil von der

Umformung im Bereich der Kavitäten getrennt. Auf diese Weise lassen sich abgesetzte Formelemente auf der Napfzarge erzeugen, wie am resultierenden Bauteil in Bild 17b dargestellt ist. Am Prozessende fahren Stempel, Ziehring und obere Matrize nach oben und geben das umgeformte Bauteil zum Auswurf durch den Gegenstempel frei.

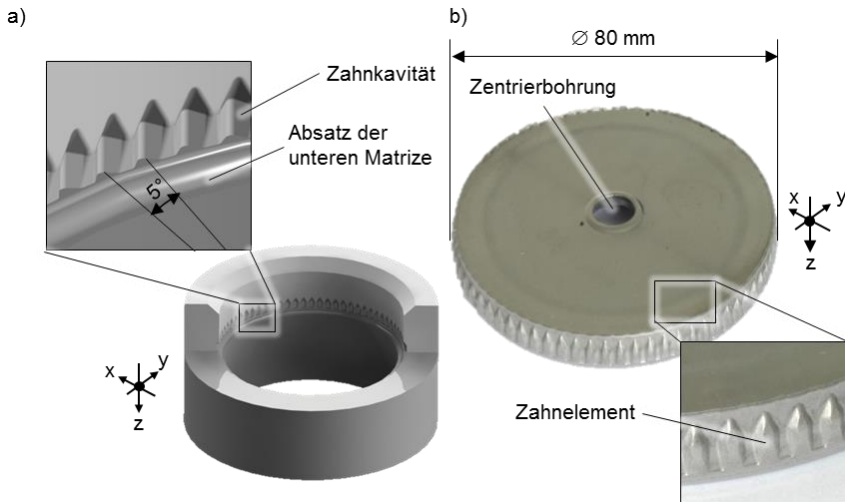
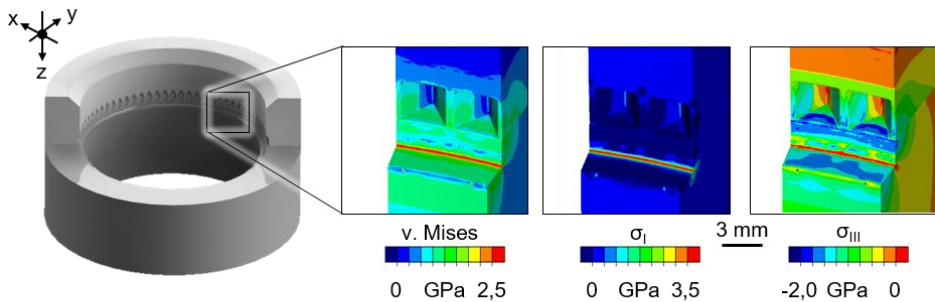


Bild 17: a) Aufbau der Matrize (CAD-Darstellung) und b) resultierendes Realbauteil des Querfließpressprozesses

Analog zum Vorwärtsfließpressen wird die Referenzgeometrie der Kavitäten angepasst, um versagenskritische Spannungen zu vermeiden. Bild 18 veranschaulicht die resultierende Werkzeugbeanspruchung der Werkzeugmatrize ohne modifizierte Kavitätsgeometrie und ohne Armierungssystem.



DP600, $s_0 = 2 \text{ mm}$, $s_w = 71,4 \text{ mm}$, $F_G = 400 \text{ kN}$, Matrizenwerkstoff: 1.3344
Werkstoffmodell: ideal-elastisch

Bild 18: Mechanische Werkzeugbeanspruchung im Querfließpressprozess am Prozessende ohne Anpassung der Referenzgeometrie und ohne Vorspannung der Matrize

Insbesondere am Radienübergang des Absatzes der unteren Matrize treten versagenskritische Vergleichsspannungen ($\sigma_v > 3000 \text{ MPa}$) auf, die auf hohe Zugspannungen (bis zu $\sigma_1 = 3447 \text{ MPa}$) zurückzuführen sind. Zudem werden die Werkzeugkavitäten durch den einfließenden Werkstoff aufgeweitet, wodurch in den Kavitätswänden ebenfalls ausgeprägte Zugspannungen mit maximalen Hauptspannungen von bis zu $\sigma_1 = 1140 \text{ MPa}$ erreicht werden.

Prinzipiell kann den Zugspannungen durch ein Armierungssystem entgegengewirkt werden, jedoch kann die Vorspannung analog zum Vorwärtsfließpressprozess nicht beliebig hoch eingestellt werden. Wie aus Bild 18 hervorgeht, treten bereits im unarmierten Zustand im Bereich des Kavitätseinlaufs anspruchsvolle Druckspannungen von bis zu -2000 MPa auf, die durch die Armierung weiter verstärkt werden würden. Unter den gegebenen Randbedingungen ist es nicht möglich die Vorspannung derart einzustellen, dass eine ausreichende Reduktion der kritischen Zugspannungen erreicht wird, ohne gleichzeitig die Druckfestigkeit des Werkzeugwerkstoffs zu überschreiten. Aus diesem Grund ist eine zusätzliche Anpassung der Matrizengeometrie notwendig. Um die ermüdungskritischen Zugspannungen für den experimentellen Aufbau in den Kavitäten zu reduzieren, wird die in Abschnitt 5.1 dargestellte, resultierende Geometrie auf $t = 1,6 \text{ mm}$ verringert und mit Kavitäts- und Einlaufsradien von $0,5 \text{ mm}$ ausgestattet (Bild 19).

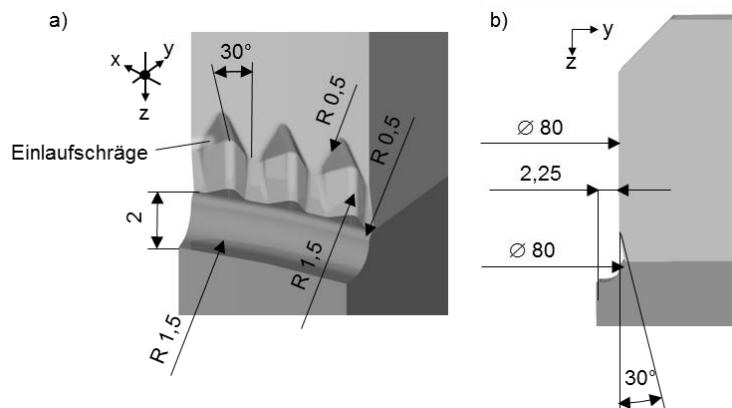


Bild 19: Maßnahmen zur Anpassung der Werkzeuggeometrie in a) 3D-Darstellung und b) in Seitenansicht

Darüber hinaus werden die Kavitäten um Einlaufschrägen erweitert, die den Werkstofffluss in die Form erleichtern und axial gerichtete Spannungen in den Kavitäten verringern. Die für die Entformung des umgeformten Bauteils am Prozessende notwendige Teilung der Matrize erfordert

zudem, dass die Stege zwischen den Kavitäten abgeschrägt werden. Auf diese Weise wird ein Überstand der oberen Matrize zur unteren Matrize vermieden und der Ziehspalt über die gesamte Höhe der beiden Matrizen konstant auf 2,25 mm gehalten.

Zudem wird der Radius der unteren Matrize im Bereich des Absatzes von 0,1 mm auf 1,5 mm erhöht, wodurch die gewaltbruchkritischen Vergleichsspannungen im Radienübergang reduziert werden. Die resultierende Werkzeugbeanspruchung am unbelasteten Prozessanfang und am Prozessende ist in Bild 20 dargestellt.

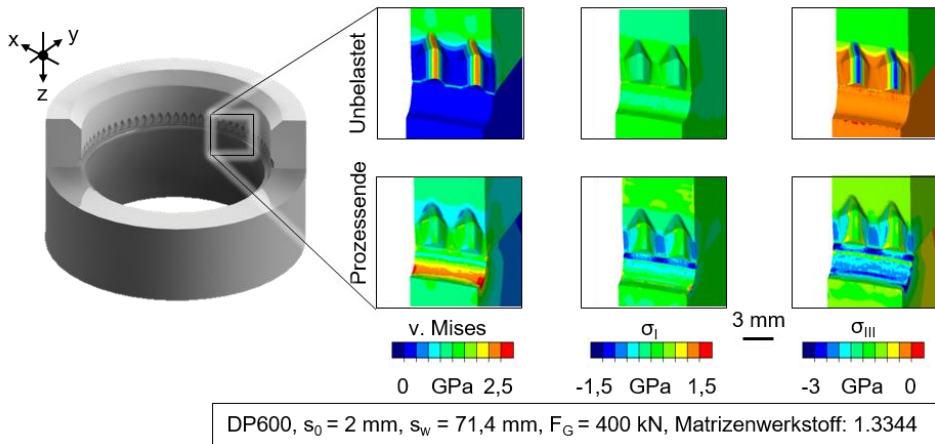


Bild 20: Mechanische Werkzeugbeanspruchung des experimentellen Aufbaus zum Querfließpressen a) im unbelasteten Zustand und b) am Prozessende (Matrize im armierten Zustand)

Die Abbildung veranschaulicht, dass am Radienübergang der unteren Matrize eine ausreichende Verringerung der Vergleichsspannung auf Werte unter 2000 MPa erzielt wird. Die durch das Armierungssystem aufgebraute Vorspannung verschiebt indessen die auftretenden radialen und tangentialen Spannungen in den Druckbereich, wodurch Zugspannungen in den Werkzeugkavitäten vollständig vermieden werden. Die für die Kavitäten maßgeblichen geometrischen Größen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Parameter der im Querfließpressprozess verwendeten Kavitätsgeometrien des experimentellen Aufbaus

Größe	Länge	Breite	Höhe	Flankenwinkel	Elementradius	Einlaufradius	Kavitätvolumen
Kürzel	l	b	t	w	r _{el}	r _{ein}	V
Einheit	mm	mm	mm	Grad	mm	mm	mm ³
Zahn	5,34	3	1,6	55,9	0,5	0,5	7,32

Der Gesamtaufbau des Querfließpressprozesses ist in Bild 21 dargestellt. Um die Prozessschritte Tiefziehen und Querfließpressen innerhalb eines Stempelhubes zu realisieren, werden die beiden Ziehkissen der Presse Lasco TZP 400/3 mit Druckstäben ausgestattet, die im Verdrängerbetrieb mit einer konstanten Kraft beaufschlagt werden.

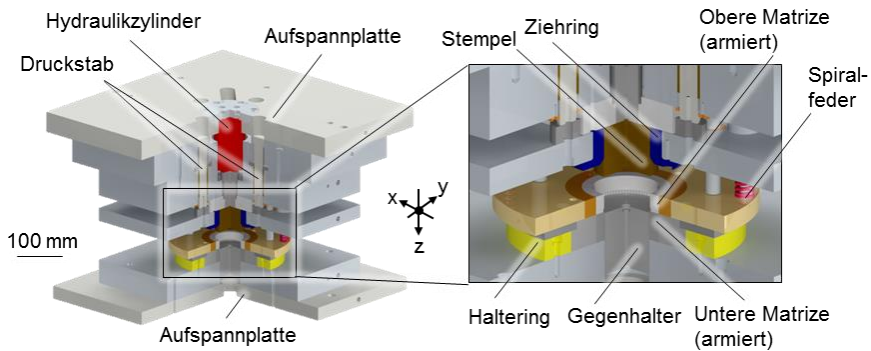


Bild 21: Gesamtaufbau Querfließpressprozess

Wird der Prozess mit einer auf dem ausgefahrenen Gegenhalter aufgelegten Ronde gestartet, senkt sich zunächst der Stempel ab, bis dieser auf die Blechrunde auftrifft. Die Pinolenkraft der Stempels ist dabei derart eingestellt, dass dieser anschließend verdrängt wird, während sich der Ziehring weiter senkt und den Tiefzug der Ronde bewirkt. Sobald der Tiefziehvorgang abgeschlossen ist, wird der Stempel durch einen Anschlag wieder in den Kraftfluss eingebunden und verdrängt den Gegenstempel, der dem Stempel mit einer konstanten Kraft entgegenwirkt. Aufgrund der Pinolenbelastbarkeit der Gegenhalters ist die maximal nutzbare Gegenhalterkraft auf 400 kN begrenzt. Nach Abschluss der Querfließpressstufe werden die Werkzeugkomponenten wieder auseinandergefahren. Spiralfedern zwischen dem oberen Matrizenverbund und der Zwischenplatte trennen die obere von der unteren Matrize und geben das Werkstück zum Auswurf frei.

5.3 Numerische Prozessbeschreibung

Für die detaillierte Untersuchung des Vorwärts- und Querfließpressprozesses werden numerische Prozessmodelle eingesetzt. Die numerische Abbildung der Prozesse erlaubt die Analyse umfangreicher Variantenanalysen sowie die Auswertung von Zielgrößen, die in konventionellen Experimenten nicht zugänglich sind. Zudem sind die Randbedingungen des numerischen Modells vollständig bekannt und können zielgerichtet manipuliert werden. Auf diese Weise ist die Analyse ausgewählter Einflussgrößen möglich, ohne dass die Auswertung durch unbekannte Störgrößen überlagert oder verfälscht wird.

Im Gegensatz zur Blechumformung sind zur Abbildung des umzuformenden Bauteils 2D-Schalenelemente nicht geeignet. Diese sind nicht in der Lage die - insbesondere im Formelementbereich vorherrschenden - dreidimensionalen Spannungszustände in der Blechmassivumformung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden für alle in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen 3D-Volumenelemente eingesetzt. Aufgrund der vergleichsweise vorteilhaften Berechnungseigenschaften werden für Bauteil und Werkzeugsimulation Hexaederelemente verwendet [133].

Die Modellierung des Werkstoffverhaltens erfolgt durch die isotrope Fließhypothese nach v. Mises, wobei die Werkstoffverfestigung durch eine Fließkurve hinterlegt ist. Aufgrund der im Prozess überwiegend vorherrschenden Druckspannungen wurden statt der Zugfließkurven die in Abschnitt 4.1 ermittelten Druckfließkurven zur Abbildung der Werkstoffverfestigung herangezogen. Zur Darstellung der tribologischen Bedingungen wird das Reibfaktormodell nach Tresca verwendet, um den in Massivumformzone vorzufindenden, ausgeprägten Kontaktnormaldrücken gerecht zu werden.

Da das komplette Werkstück vollständig durch Volumenelemente abgebildet werden muss, ist der Einsatz hoher Elementanzahlen unabdingbar. Simulationen von Blechmassivumformprozessen stellen aus diesem Grund eine Herausforderung für aktuelle Rechnersysteme dar. Um die Berechnung der Prozesse dennoch zu ermöglichen und die Netzauflösung gleichzeitig möglichst hoch zu halten, werden vorhandene Bauteilsymmetrien ausgenutzt und die Prozessmodelle auf 10° - Ausschnitte reduziert. Mittels lokal definierbarer Verfeinerungsboxen wird die Netzkantenlänge zusätzlich in relevanten Bereichen verringert und in flächigen Bereichen geringer Umformung vergrößert, um die Gesamtelementanzahl des Modells gering zu halten.

Des Weiteren wird auf eine gekoppelte Werkstück-Werkzeug Simulation verzichtet. Stattdessen wird mittels einer nicht-gekoppelten Analyse zunächst die Stoffflusssimulation durchgeführt, wobei lediglich das Bauteil selbst diskretisiert wird. Durch die Abbildung der Werkzeuge als starre Körper ist dabei eine erhebliche Reduktion der Rechenzeit gegeben. Für die anschließende Analyse der Werkzeuge werden die Kontaktinformationen der Stoffflusssimulation in einer separaten Simulation auf diskretisierte Werkzeugkomponenten übertragen, wodurch die Berechnung der Spannungen und Verschiebungen des Werkzeugs ermöglicht wird. Nachteilig ist, dass die Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten zwischen Werkstück und Werkzeug auf diese Weise nicht realisierbar ist. Zur Abbildung des Werkzeugwerkstoffverhaltens werden sowohl elastische, als auch elastisch-plastische Werkstoffmodelle eingesetzt.

Um die Aussagekraft der numerischen Simulationen einschätzen zu können, werden die Simulationsmodelle zum Vorwärts- und Querfließpressen einer Validierung mittels eines Vergleichs mit experimentellen Ergebnissen unterzogen. Folgende Ergebnisgrößen werden hierfür basierend auf einer Empfehlung nach TEKKAYA herangezogen [134]:

- Kraft-Weg Verläufe des Umformstempels
- Soll und Istgeometrie des Bauteils am Prozessende
- Lokale Spannungen auf Matrize und Armierungssystem, ermittelt aus Messungen mit Dehnmessstreifen

5.3.1 Vorwärtsfließpressen

Der Aufbau des Simulationsmodells für den Vorwärtsfließpressprozess ist in Bild 22 dargestellt. Bild 22a repräsentiert das 10° -Modell für die Simulation des Stoffflusses. Eine Diskretisierung in Finite Elemente erfolgt nur für das Werkstück (Bild 22b). Die übrigen Werkstoffkomponenten werden als starre Körper definiert. Die Kräfte des Nieder- und Gegenhalters werden mittels einer unendlich steifen Feder konstant auf das Werkstück aufgebracht. Die Stempelbewegung selbst erfolgt weggebunden und mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v_{st} = 0,1$ mm/s. Die maximale Netzkantenlänge wird im Bereich der Formelemente auf $0,062$ mm festgelegt, wodurch eine ausreichend genaue Abbildung der Bauteilgeometrie, insbesondere der Bauteilradien gegeben ist. Die weniger von der Umformung betroffenen Bereiche der Blechmitte und des Niederhalters stellen geringere Anforderungen an die Netzfeinheit und werden daher mit einer maximalen Netzkantenlänge von $0,5$ mm ausgeführt.

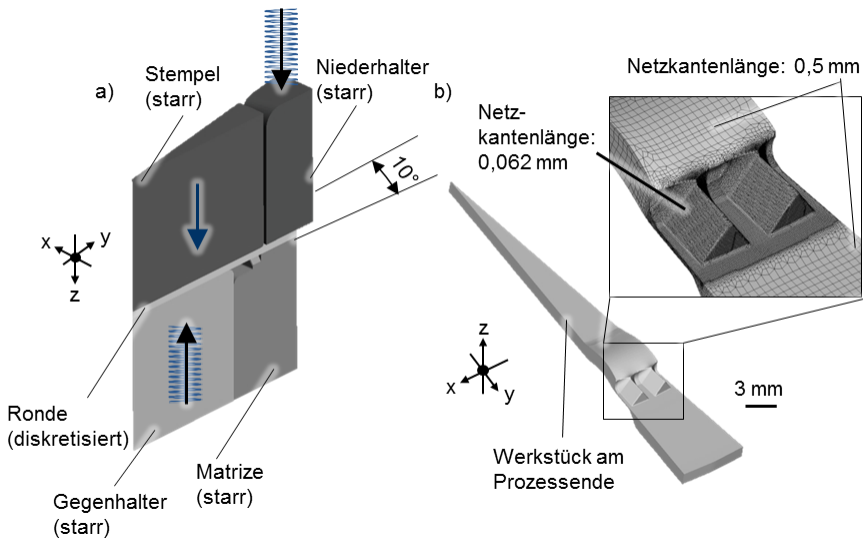


Bild 22: Aufbau des numerischen 10° -Modells: a) Stoffflusssimulation, b) Bauteil am Prozessende (VFP)

Die im Rahmen der Stoffflusssimulation ermittelten Knotenkräfte des Werkstücks werden für die Werkzeugsimulation auf das Werkzeug übertragen. Hierfür werden sowohl die Matrice selbst, als auch die beiden Armierungsringe in Finite Elemente diskretisiert (Bild 23).

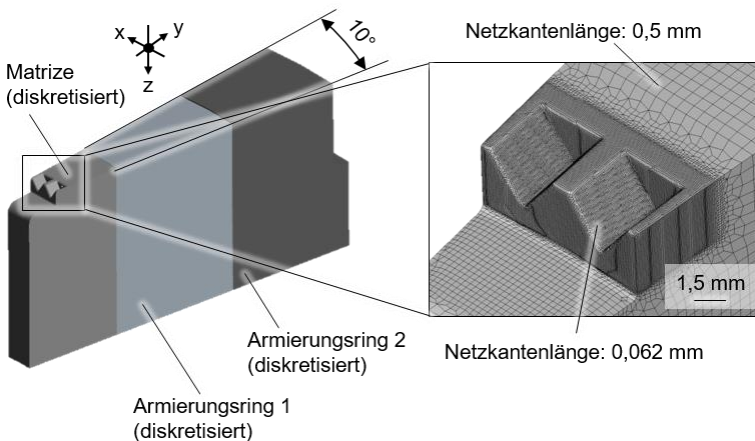


Bild 23: Aufbau des numerischen 10° -Modells für die Simulation der Werkzeugbeanspruchung (VFP)

Um eine ausreichende Abbildung der Werkzeuggeometrie zu gewährleisten, wird eine maximale Netz-kantenlänge von 0,5 mm zugrunde gelegt und im Bereich der Kavitäten auf 0,062 mm verringert. Das Übermaß der Armierungsringe wird durch eine Knotenrandbedingung im Simula-

tionsprogramm eingestellt. Diese erlaubt die Verschiebung der Kontaktbereiche zwischen den Armierungsringen und der Matrize um einen voreingestellten Wert und damit die Erzeugung der gewünschten Matrixvorspannung.

5.3.2 Querfließpressen

Der Aufbau der Simulation zur Modellierung des Stoffflusses im Querfließpressprozess ist in Bild 24a dargestellt. Simuliert wird, wie im Modell zum Vorwärtsfließpressen, ein 10° -Ausschnitt unter Ausnutzung der Bauteilsymmetrie.

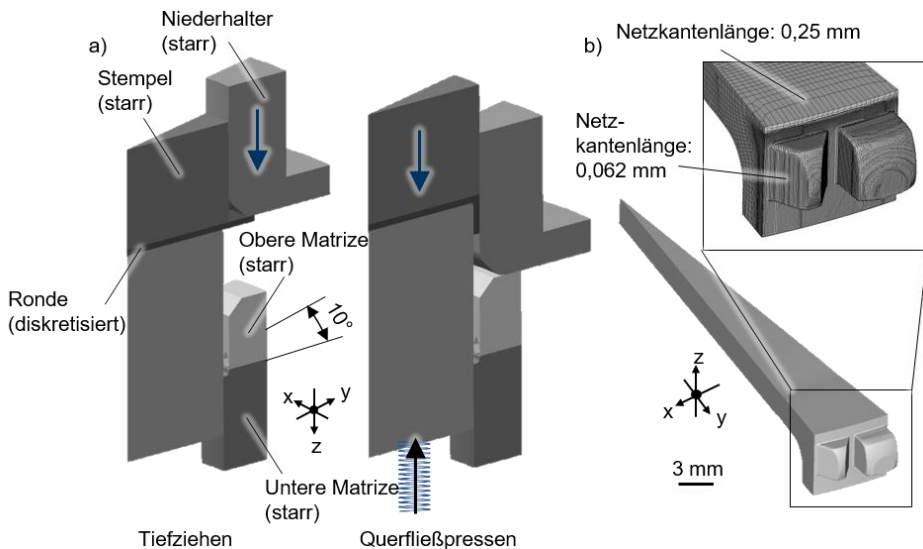


Bild 24: Aufbau des numerischen 10° -Modells: a) Stoffflusssimulation, b) Bauteil am Prozessende mit Vernetzung (QFP)

Ebenfalls wird ausschließlich das Werkstück in Finite Elemente diskretisiert, wodurch Rechenzeit eingespart wird. Im Gegensatz zum Vorwärtsfließpressmodell sind zwei getrennte Simulationen zur Darstellung des Tiefziehens und des angeschlossenen Querfließpressens erforderlich. In der Tiefziehsimulation erfolgt die für den Tiefzug der Ronde notwendige Bewegung des Ziehrings in z-Richtung weggesteuert, bis dieser auf der oberen Matrize zur Auflage kommt. Anschließend werden die Positionsdaten der Werkzeugkomponenten sowie die Werkstückeigenschaften vollständig in die Querfließpresssimulation übertragen. In letzterer verfährt der Stempel weggesteuert in z-Richtung, wobei der Gegenhalter zur Abbildung der Verdrängerkraft mit einer konstanten Federkraft beaufschlagt wird (Bild 24a). Der Prozess ist abgeschlossen, wenn der

gewünschte Stempelweg erreicht ist. Das FE-Netz des Bauteils wird zur Erreichung einer ausreichenden Abbildungsgüte mit einer Basiskantenlänge von 0,25 mm ausgeführt und im Bereich der Formelemente auf 0,062 mm verfeinert.

Der Aufbau der Werkzeugsimulation ist in Bild 25 dargestellt. Zur Abbildung der Spannungen im Werkzeug werden die obere und untere Matrize samt Armierungssystem diskretisiert und als 10°-Ausschnitt modelliert.

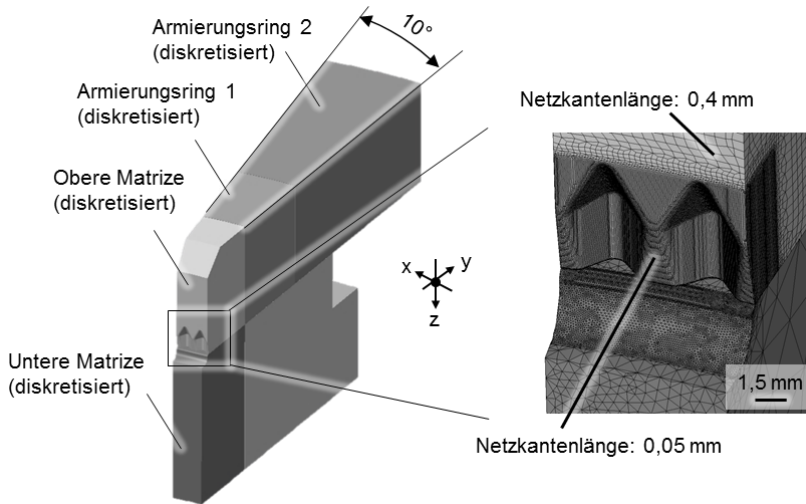


Bild 25: Aufbau des numerischen 10°-Modells für die Simulation der Werkzeugbeanspruchung (QFP)

Um eine ausreichende genaue Abbildung der Werkzeuggeometrie zu erreichen, wird die maximale Netzkantenlänge im Bereich der Kavitäten auf 0,05 mm festgelegt. Die restlichen, großflächigen Bereiche der Matrizen und Armierungsringe werden mit einer Kantenlänge von 0,4 mm ausgestattet, um die Rechenzeit gering zu halten.

5.3.3 Validierung der Modelle

Bild 26 zeigt den Abgleich der Kraft-Weg-Verläufe des Stempels zwischen Simulation und Experiment für den Vorwärtsfließpressprozess und für den Querfließpressanteil des Querfließpressprozesses. Die hohe Übereinstimmung der Kurven mit einer maximalen Abweichung von unter 5 % belegt die gute Abbildung der Realprozesse in beiden Fällen.

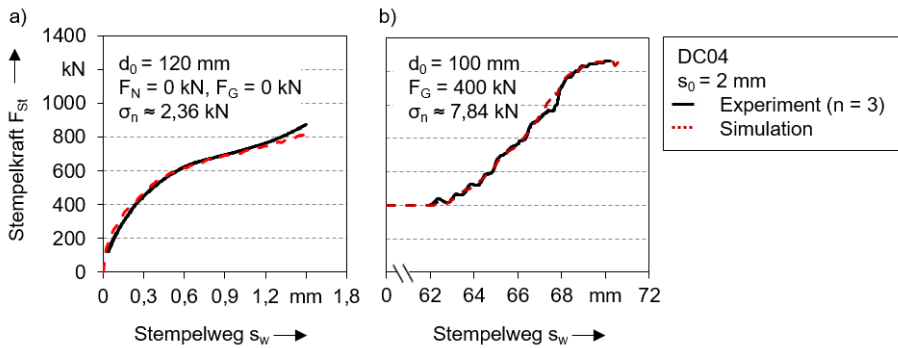


Bild 26: Stempelkraft-Weg Verläufe von Experiment und Simulation im Vergleich

Der Vergleich der Geometrien zwischen den experimentell und simulativ umgeformten Bauteilen beider Fließpressvarianten bestätigt ebenfalls eine hohe Modellgüte (Bild 27). Die maximale Abweichung zweier Punkte, bemessen durch den senkrechten maximalen Abstand zwischen der Soll- und Istgeometrie, liegt sowohl beim Vorwärts- als auch dem Querfließpressmodell bei 0,12 mm und entspricht damit einem Fehler von 6,0 % (VFP) und 7,5 % (QFP).

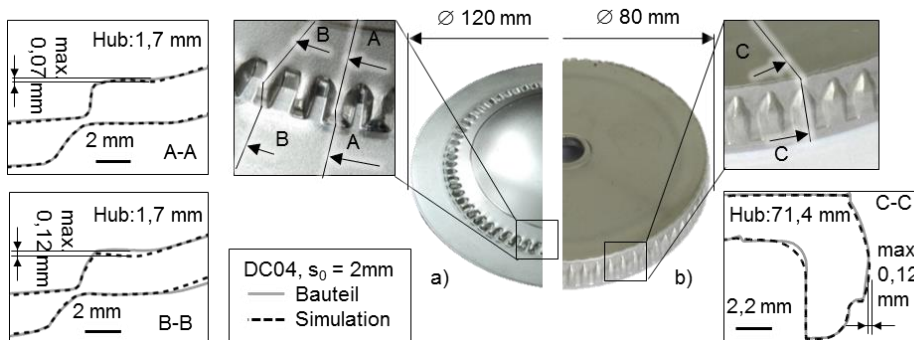


Bild 27: Geometrischer Abgleich der Bauteile am Prozessende für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen

Im Gegensatz zur Stoffflusssimulation ist die Validierung der Werkzeugsimulation durch Kraft-Weg Verläufe oder geometrische Abgleiche nicht möglich. Stattdessen werden die im Werkzeug während des Prozessverlaufs entstehenden Spannungen als Vergleichsgröße herangezogen. Hierfür werden Dehnungsmessstreifen (DMS) auf die dem Stempel zugewandte Seite von Matrize und Armierungsrings aufgebracht. Die durch die Werkzeugbeanspruchung verursachte Aufdehnung der Matrize und Armierungsrings wird durch die Dehnungsmessstreifen erfasst, in korrespondierende Spannungswerte umgerechnet und mit den Spannungs-

werten der Werkzeugsimulation an den identischen Positionen verglichen.

Das Ergebnis der Messungen ist in Bild 28 dargestellt, wobei eine maximale Abweichung über dem gesamten Prozessverlauf von 12,13 % und eine maximale Abweichung von 4,15 % am Prozessende für den Vorwärtsfließpressprozess festzustellen ist (Bild 28a). Im Fall des Querfließpressens musste aus Gründen der Zugänglichkeit auf eine Messung auf den Armierungsringen verzichtet werden. Ferner ist zu beachten, dass auf die obere Matrize bedingt durch die Prozesskinematik Kräfte wirken, die nicht durch die Werkzeugsimulation abgebildet werden. So wirken während des Querfließpressens Federkräfte durch die gestauchten Spiralfedern zwischen Zwischenplatte und Matrizenverbund sowie die Pinolenkräfte des oberen Ziehkissens über den auf der Matrize aufliegenden Ziehring axial auf die obere Matrize ein.

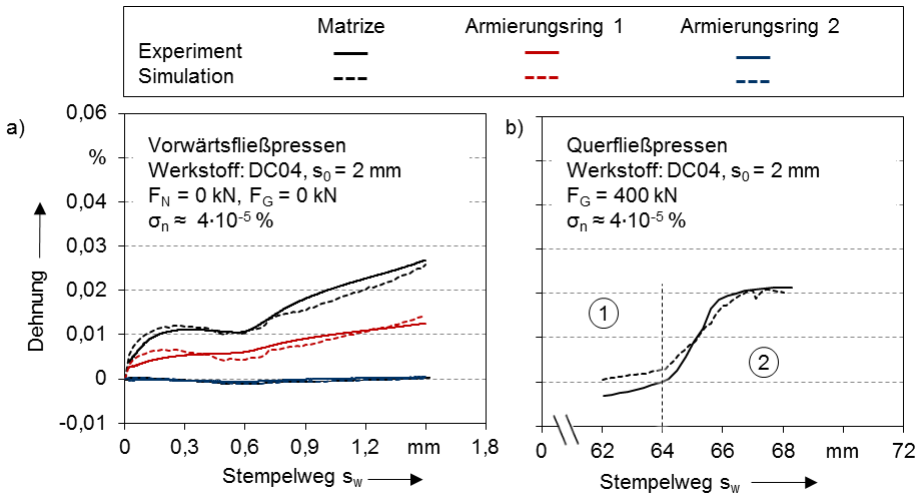


Bild 28: Abgleich der radial gerichteten Spannungen im Prozessverlauf auf Matrize und Armierungssystem für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen

Entsprechend zeigt der DMS der oberen Matrize zu Beginn des Querfließpressens eine geringe negative Dehnung im Bereich von $-0,0025 \%$ an (Abschnitt 1, Bild 28b). Dennoch wird über den Hauptabschnitt des Querfließpressvorgangs (Abschnitt 2, Bild 28b) eine Abweichung von 14,19 % zwischen Experiment und Simulation über den gesamten Prozessverlauf und von 0,74 % am Prozessende nicht überschritten.

Trotz der mäßigen Wertabweichungen ist die Modellgüte für beide Prozesse als gut einzustufen. Dies ist einerseits dadurch zu begründen, dass der qualitative Verlauf der Messwerte an den Matrizen sehr gut

durch die Simulationen abgebildet wird. Damit ist die für die Arbeit vorrangige und prinzipielle Darstellung der physikalischen Gegebenheiten durch das Modell als zuverlässig einzustufen. Andererseits sind für die nachfolgende Prozessanalyse insbesondere die Maximalwerte am Prozessende entscheidend, die durch das Modell mit Abweichungen unter 5% mit hervorragender Genauigkeit wiedergegeben werden.

6 Prozessanalyse

Gegenstand des folgenden Kapitels ist die Analyse des Vorwärts- und Querfließpressprozesses zur Identifikation und Erforschung der wesentlichen Prozesseinflussgrößen und deren Wirkungsweise. Hierfür werden zunächst wesentliche Zielgrößen ausgewählt, anhand derer das Prozessergebnis bauteil- und werkzeugseitig eindeutig charakterisiert und quantifiziert werden kann. Anschließend werden die Referenzmodelle für Vorwärts- und Querfließpressprozess im Detail untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wird im Anschluss eine Variantenanalyse durchgeführt, in deren Mittelpunkt, neben einer Analyse prozessspezifischer Kenngrößen, insbesondere die Untersuchung der geometrischen Einflussgrößen steht. Das Kapitel schließt mit der Zusammenfassung der ermittelten Erkenntnisse und deren Bewertung hinsichtlich der angestrebten Herstellung von Fließpressteilen in Blechmassivumformprozessen.

6.1 Untersuchte Zielgrößen

Im Folgenden wird eine Auswahl an Zielgrößen getroffen, um die Ergebnisse verschiedener Prozessvarianten vergleichbar zu machen. Eine zentrale Voraussetzung ist, dass die gewählten Auswertegrößen hinsichtlich der angestrebten Bauteilqualität und Werkzeugbeanspruchbarkeit wesentlich, vollständig, eindeutig und repräsentativ sind. Die Größen sollten ferner möglichst allgemeingültig, einfach bestimmbar und quantifizierbar sein, um eine praktikable Handhabung und Auswertung zu gewährleisten.

Entscheidend für das bauteilseitige Prozessergebnis ist die funktionsgerechte Ausformung der Formelemente. Wann dies in der Praxis gegeben ist, ist vom jeweiligen Einzelfall und dem geforderten Einsatzzweck des Funktionselements abhängig. Eine Verallgemeinerung des Begriffs bzw. dessen Übertragung auf eine quantifizierbare Größe ist daher nicht möglich. Alternativ wird daher die Güte der Ausformung durch das Verhältnis von erreichter Ausformung zur theoretisch maximal erzielbaren Ausformung beschrieben. Zur Quantifizierung der Ausformung wird das Volumen des Formelements herangezogen.

Das Formelementvolumen wird als das in der zugehörigen Kavität befindliche Werkstoffvolumen am Prozessende definiert, welches im Folgenden als Formfüllungsvolumen V_F bezeichnet wird. Durch genannte Definition wird sichergestellt, dass nur solche Werkstoffvolumina in die Auswertung

miteinbezogen werden, die zur Ausformung der Formelemente an der vorgesehenen Blechposition beitragen. Formelemente oder deren Bestandteile, die am Prozessende nicht an der vorgesehenen Blechposition zu finden sind, können die ihnen zugeordnete Funktion nicht ausüben und werden daher nicht berücksichtigt.

Das maximal erreichbare Formelementvolumen entspricht dem Volumen der zugehörigen Kavität V_k . Die Ausformung eines Formelements ist folglich dann abgeschlossen, wenn die Formfüllung das Kavitätvolumen erreicht:

$$V_{F,max} = V_k \quad (6)$$

Vor diesem Hintergrund wird als Maß für den Grad der Formelementausformung das relative Formfüllungsvolumen $V_{F\%}$ herangezogen, das als Koeffizient aus Formfüllung und Kavitätvolumen definiert ist:

$$V_{F\%} = \frac{V_F}{V_k} \quad (7)$$

Die Verwendung der relativen Formfüllung bietet den Vorteil, dass die dreidimensionale Gestalt eines beliebigen Funktionselements durch eine einzige Größe beschrieben wird und ein Vergleich mit Formelementen anderer Geometrie direkt möglich ist. Die absolute Formfüllung V_F ist für die Bewertung der Formelementqualität von untergeordneter Bedeutung, da diese in keinem direkten Bezug zur gewünschten Idealausformung steht. Dennoch ist V_F eine zentrale Größe für die Analyse von Wirkzusammenhängen. Basierend auf der Volumenkonstanz bei Umformprozessen lassen sich mit ihrer Hilfe Erkenntnisse über die Veränderung der Volumenverteilung des Werkstoffs in Abhängigkeit der Prozesseinflussgrößen ermitteln. Die Bauteile des Vorwärtsfließpress- und Querfließpressprozesses werden hierfür gemäß Bild 29 in einzelne, stoffflussrelevante Bereiche unterteilt. Für das Vorwärts- und Querfließpressen erfolgt die Einteilung gleichermaßen in die Bereiche „Blechmitte“ (BM), „Fließpresszone“ (FE), „Verdrängungsbereich“ (VB) und „Blechaußenfläche“ (AF). Die Abschnitte FE und VB werden in Anlehnung an die dort maßgebliche, durch dreidimensionale Spannungs- und Formänderungszustände charakterisierte Massivumformoperation als Massivumformzone (MUZ) zusammengefasst. Blechmassivumformprozesse werden häufig mit Blechumformverfahren kombiniert, die in den übrigen, nicht von der Massivumformung betroffenen Blechbereichen angewendet werden. Dieser durch zweidimensionale Spannungszustände charakterisierte Bereich wird im Folgenden als Blechumformzone (BUZ) definiert. In den in dieser

Arbeit untersuchten Prozessen wird die BUZ durch die Blechabschnitte Blechmitte und Außenfläche gebildet, auch wenn die Fließpressprozesse in diesem Fall nicht mit Blechumformverfahren kombiniert werden.

Aus dem Verdrängungsbereich wird das für die Ausformung notwendige Werkstoffvolumen durch die Stempelbewegung verdrängt und in die umliegenden Bereiche verteilt. Der aus dieser Zone ausgehende Werkstofffluss ist in Richtung Formelemente (Fließpresszone), Blechmitte und Blechaußenfläche gerichtet und für die Steigerung der dortigen Blechvolumina verantwortlich. Der am Prozessende nicht verdrängte Volumenanteil verbleibt im Verdrängungsbereich und ist ausschließlich abhängig vom gewählten Stempelweg.

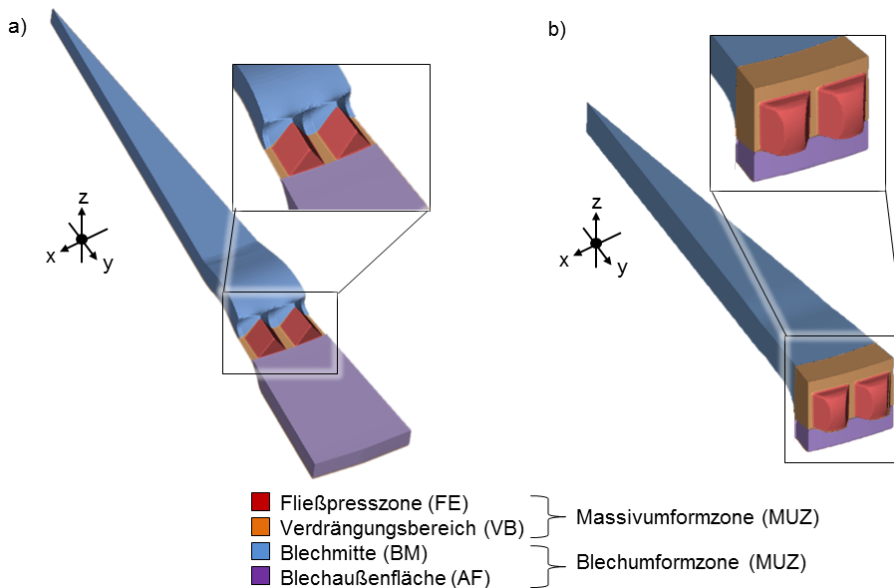


Bild 29: Bereichseinteilung der Bauteile (10° Ausschnitt) zur Stoffflussanalyse für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen

Werkzeugseitig ist die Beständigkeit der Werkzeugkomponenten gegen Gewalt- und Ermüdungsbruch sowie Werkzeugverschleiß von industrieller Bedeutung. Zur Einschätzung der Gewaltbruch- und der Ermüdungsgefahr wird die mechanische Beanspruchung der Werkzeuge analysiert. Hierfür wird die Vergleichsspannung nach v. Mises als Zielgröße herangezogen, um einen Abgleich mit der Fließgrenze des Werkzeugwerkstoffs und damit Aussagen über die Werkzeugplastifizierung zu ermöglichen.

Da die Vergleichsspannung keine Aussage über die Zug- und Druckanteile der wirkenden Spannungen geben kann, wird zur näheren Analyse bei Bedarf auf Hauptspannungskomponenten zurückgegriffen. Zur Einschätzung der Beanspruchung hinsichtlich der Werkzeuermüdung werden die Hauptspannungsamplituden σ_a , einschließlich der zugehörigen Mittelspannungen σ_m herangezogen.

Bezüglich des Werkzeugverschleißes wird die hierfür ursächliche tribologische Beanspruchung der Werkzeugkomponenten analysiert. Als Zielgrößen dienen die Kontaktnormalspannungen, sowie die Gleitwege an den Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück. Aufgrund ihrer Bedeutung für die Integrität des Schmierfilms wird darüber hinaus die Oberflächenvergrößerung als Kenngröße in die Betrachtung miteinbezogen.

6.2 Prozess- und Stoffflussanalyse der Referenzprozesse

Ziel des Kapitels ist die Identifizierung und Erforschung der wesentlichen geometrischen und prozessspezifischen Einflussgrößen auf Fließpressprozesse der Blechmassivumformung. Im Folgenden wird hierfür für Vorwärts- und Querfließpressprozess jeweils ein Referenzprozess festgelegt, der mit Hilfe numerischer Simulation hinsichtlich der in Kapitel 6.1 beschriebenen Zielgrößen detailliert untersucht wird. Auf Basis der Ergebnisse werden anschließend ausgewählte, geometrische und prozessspezifische Größen variiert und deren Wirkung und Wirkungsweise auf das Prozessergebnis analysiert.

6.2.1 Vorwärtsfließpressen

Der Referenzprozess für das Vorwärtsfließpressen wird mit der Referenzgeometrie „Zahn“ nach Tabelle 6 ausgeführt. Bei einem Abstandswinkel von $\alpha = 5^\circ$ zwischen benachbarten Formelementen ergibt sich die Gesamtanzahl der Formelemente zu $n_z = 72$. Das resultierende Idealbauteil zeichnet sich durch eine vollständige Ausformung der Zahnelemente ($V_{F\%} = 100\%$) sowie eine unverformte Bauteilmitte aus. Als Halbzeug dient eine Blechrolle mit Durchmesser $d_o = 120$ mm und einer Blechdicke von $s_o = 2$ mm aus dem Werkstoff DCo4. Der Stempelweg wird auf $s_w = 1,7$ mm festgelegt, womit sich am Prozessende eine Restblechdicke von $s_R = 0,3$ mm im Verdrängungsbereich ergibt. Niederhalter und Gegenhalterkräfte werden für den Referenzprozess gering gehalten ($F_G = 0$ kN, $F_N = 20$ kN), um eine möglichst freie Ausformung der Funk-

tionselemente zu gewährleisten. Die Ergebnisauswertung bezüglich der Bauteilumformung am Prozessende und des Stempelkraftverlaufs ist in Bild 30 dargestellt.

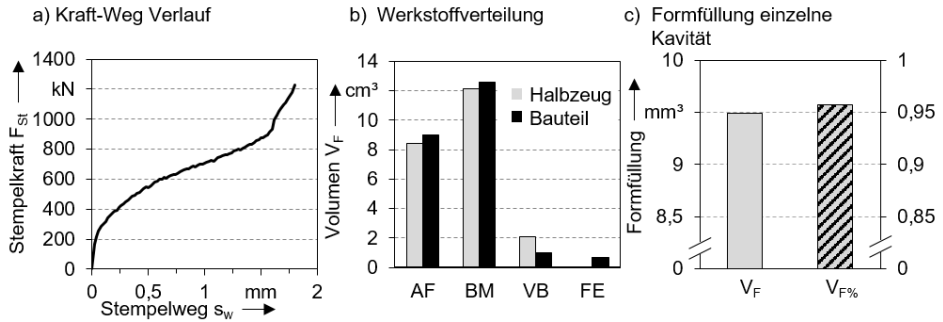


Bild 30: a) Stempelkraftverlauf sowie b) Werkstoffvolumina der Bauteilbereiche und V_F eines Formelementes am Prozessende des Referenzprozesses (VFP)

Ursächlich für den kontinuierlich ansteigenden Verlauf der Stempelkraft in Bild 30a ist die Umformung des Werkstoffs im Bereich der Massivumformzone im Verdrängungsbereich und in den Werkzeugkavitäten. Durch die Druckumformung des Werkstoffs kommt es zu einer kontinuierlichen Steigerung des Umformgrads und damit zu einer zunehmenden Verfestigung (Bild 31).

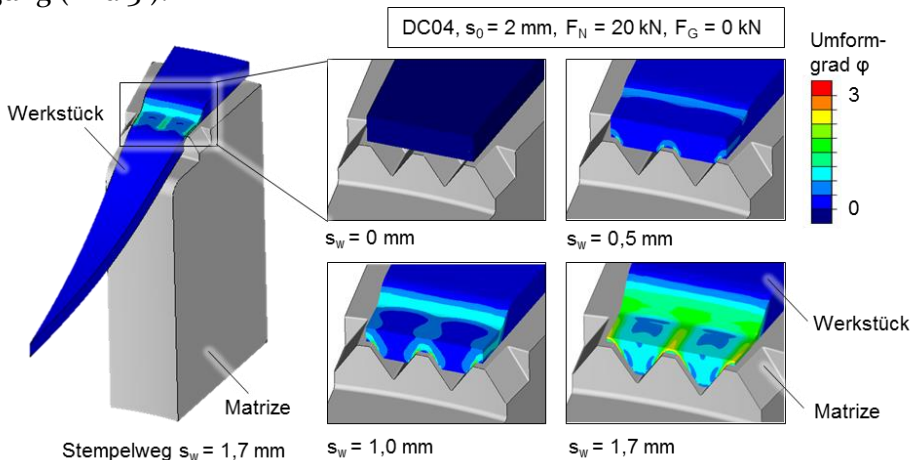


Bild 31: Entwicklung des Umformgrades im Prozessverlauf des Referenzprozesses (VFP)

Da die Reibung nach dem Reibfaktormodell von der Fließspannung abhängig ist, steigt die Reibkraft zwischen Werkstück und Werkzeug, wodurch der Kraftbedarf zusätzlich erhöht wird. Bei Einsatz des Gegenhalters wirkt zudem die volle Gegenhalterkraft konstant über den kompletten Prozessverlauf auf den Stempel und addiert sich zum

Gesamtkraftbedarf hinzu. Die Gesamtumformkraft F_{ges} des Stempels setzt sich damit wie folgt aus der Umformkraft F_{id} , der Reibkraft F_R und der Gegenhalterkraft F_G zusammen (Gleichung (8)):

$$F_{ges} = F_{id} + F_R + F_G \quad (8)$$

Im Zuge der Umformung wird der Werkstoff aus der Blechebene im Verdrängungsbereich (VB) in die umliegenden Blechabschnitte verdrängt, wodurch es zu einem Anstieg des Volumens im Bereich der Außenfläche (AF), der Blechmitte (BM) und zur Ausformung der Formelemente (FE) kommt (Bild 30b/c). Werkstoffanteile, die zu Prozessbeginn im Verdrängungsbereich zwischen Stempel und Matrize lokalisiert sind, werden hierbei durch die axiale Bewegung des Stempels umgeformt und sowohl tangential, radial, als auch axial verdrängt (Bild 32).

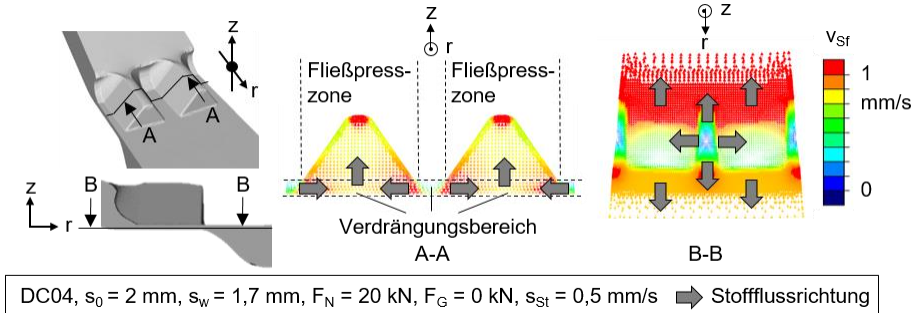


Bild 32: Stoffflussgeschwindigkeit (v_{srf}) des Referenzprozesses am Prozessende (VFP)

Der tangentielle Werkstofffluss ist in Richtung der Kavitäten orientiert und trägt dort zur Formfüllung im Prozessverlauf bei, während die radiale Stoffflusskomponente zu einer Verlagerung des Werkstoffs aus der Massivumformzone heraus in Richtung Blechmitte bzw. der Blechaußenfläche führt. Der axial gerichtete Stofffluss dominiert dagegen in der Fließpresszone und ist ein direktes Resultat aus der Stempelbewegung in Richtung der z-Koordinate. Das verbleibende Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich (V_V) wird ausschließlich von der Restblechdicke s_R im Kontaktbereich zwischen Stempel und Matrize (A_V) am Prozessende bestimmt und berechnet sich nach Gleichung (9). Die Restblechdicke ist wiederum bei gleichbleibender Halbzeugblechdicke s_0 ausschließlich vom Stempelweg s_w abhängig.

$$V_V = A_V \cdot s_R = A_V \cdot (s_0 - s_w) \quad (9)$$

Charakteristisch für den Verdrängungsbereich ist die Umformung durch Druckspannungen sowie die unmittelbare Krafteinwirkung durch den

Stempel. Kennzeichnend ist zudem die kontinuierliche Abnahme des Werkstoffvolumens im Prozessverlauf sowie die im Vergleich zu den übrigen Blechbereichen am stärksten ausgeprägten Umformgrade (bis ca. $\varphi = 3$) und Druckspannungen (bis ca. $\sigma_{III} = -3000$ MPa) (Bild 33).

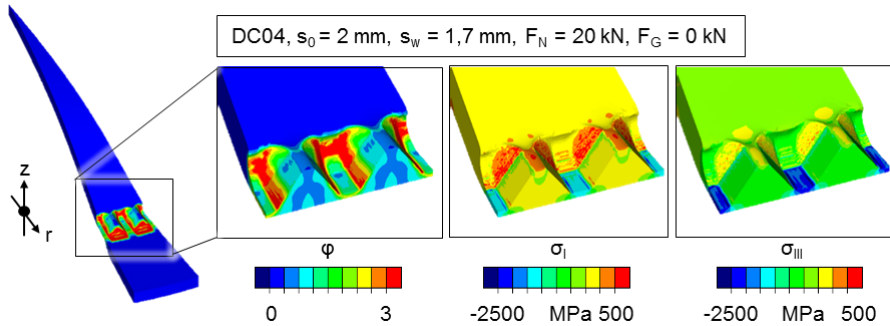


Bild 33: Umformgrad und Hauptspannungen am Prozessende in Schnittdarstellung (radialer Schnitt durch Formelementmitte)

In der Fließpresszone werden die aus dem Verdrängungsbereich einfließenden Werkstoffvolumina durch Einwirkung von Druckspannungen umgeformt und die Ausformung der Formelemente bewirkt. In Folge werden mit zunehmender Formfüllung Umformgrade von durchschnittlich $\varphi = 0,45 \pm 0,38$ bis zum Prozessende erreicht (Bild 33). Kennzeichnend sind die Druckspannungen im Formelement, die jedoch deutlich unter denen des Verdrängungsbereichs liegen (Bild 33). Im Gegensatz zu Letzterem zeichnet sich die Fließpresszone durch eine mittelbare Krafteinleitung aus, die örtlich von der Umformzone in den Kavitäten getrennt ist. Umformgrad und Spannungen in der Blechaußenfläche und Blechmitte (Blechumformzone) bleiben dagegen über den gesamten Prozessverlauf gering ausgeprägt. Ein wenig ausgeprägter Anstieg der Werte ist ausschließlich auf unbeabsichtigte Verformung zurückzuführen, die durch den radialen Werkstofffluss aus der Massivumformzone verursacht wird (vgl. Bild 32).

Da ausschließlich Werkstoff aus dem Verdrängungsbereich zur Ausformung der Formelemente beiträgt, ist die Formfüllung gemäß dem Gesetz der Volumenkonstanz und unter Kenntnis der Volumenänderung in den einzelnen Blechbereichen berechenbar. Abzüglich des im Verdrängungsbereich am Prozessende verbleibenden Werkstoffvolumens V_V und des in die Blechmitte ΔV_{BM} und Blechaußenfläche ΔV_{AF} verdrängten Volumens ergibt sich die tatsächlich erreichbare Formfüllung V_F auf Basis des Volumens im Verdrängungsbereich am Prozessbeginn V_{V_0} zu

$$V_F = V_{V0} - (V_V + \Delta V_{BM} + \Delta V_{AF}). \quad (10)$$

Im Rückschluss berechnet sich die theoretisch maximale Werkstoffausnutzung mit $V_{BM} = V_{AF} = 0$ nach Gleichung (11):

$$V_F = V_{V0} - V_V. \quad (11)$$

Im Fall des Referenzprozesses mit einem Stempelradius von 48 mm, einem Matrizeninnerradius von 44 mm und einem Stempelweg von $s = 1,7$ mm ergibt sich somit ein theoretisch nutzbares Werkstoffvolumen von insgesamt $1,46 \text{ cm}^3$. Dem gegenüber steht ein Gesamtkavitätsvolumen von $0,71 \text{ cm}^3$. Trotz des erheblichen Volumenüberschusses wird im Prozess keine vollständige Ausformung der Funktionselemente erreicht. Ursächlich ist der deutlich ausgeprägte, radiale Stofffluss aus der Massivumformzone in Richtung der Blechmitte und der Blechaußenfläche. Wie bereits von MERKLEIN et al. [135] dargelegt, ist dieser bei Blechmassivumformprozessen allgemein auf den Verfestigungsgradienten zwischen der Massivumformzone und den umliegenden, kaum umgeformten Blechbereichen der Blechumformzone zurückzuführen (vgl. Bild 31/Bild 33).

Eine detaillierte Analyse der radialen Stoffflussgeschwindigkeit in Bild 34 zeigt, dass sich der Stofffluss aus dem Verdrängungsbereich sowohl in positiver als auch negativer Richtung kontinuierlich bis zum Prozessende erhöht.

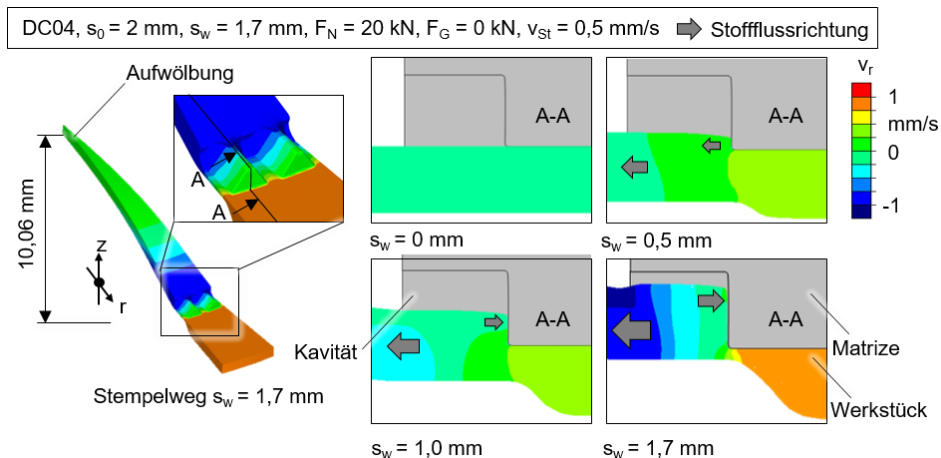


Bild 34: Radialer Stofffluss im Prozessverlauf und resultierende Blechauftwölbung der Blechmitte am Prozessende des Referenzprozesses (VFP)

Innerhalb der Zahnkavitäten selbst verhindert die Kavitätswandung eine Verdrängung des Werkstoffs aus der Zahnkavität heraus in den Bereich

der Blechaußenfläche. Die in der Nähe der Kavitätswand positiv gerichteten Fließgeschwindigkeiten bei größeren Stempelwegen belegen, dass der dort befindliche Werkstoff dennoch aktiv in beide Richtungen radial verdrängt wird. Dies ist auf die Umformung des Werkstoffs in der Fließpresszone zurückzuführen, wobei erst bei größeren Formfüllungen einen wesentlicher Einfluss auf den Stofffluss erkennbar wird. Grundsätzlich verstärkt der negativ gerichtete Stofffluss des Formelements den Stofffluss im Verdrängungsbereich, wodurch der globale Stofffluss aus der Massivumformzone insgesamt in die Blechmitte erhöht und in Folge die Werkstoffausnutzung verringert wird. Im Gegensatz dazu wirkt sich der in der Kavität positiv gerichtete Stoffflussanteil bezüglich der Formfüllung im untersuchten Referenzfall vorteilhaft aus, da ein Verlust des Werkstoffkontakts zur radialen Kavitätswand weitgehend verhindert und entsprechendes Leervolumen in der Kavität vermieden wird.

Bild 35 veranschaulicht den Verlauf der Formfüllung V_F über dem Stempelweg. Demnach steigt die Formfüllung mit fortschreitender Stempelbewegung streng monoton bis zum Prozessende an.

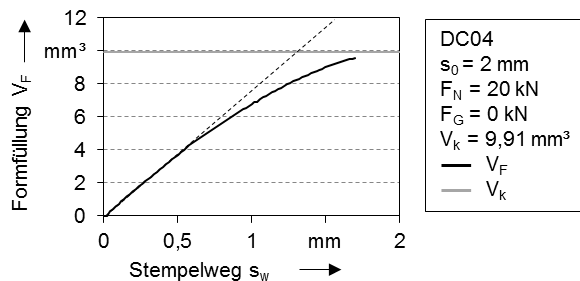


Bild 35: Entwicklung der Formfüllung im Referenzprozess über den Prozessverlauf (VFP)

Das Verhältnis der Formfüllungssteigerung pro Weginkrement ($\Delta V_F / \Delta s_w$) sinkt jedoch kontinuierlich ab. Dies ist auf die ansteigende Verfestigung in der Fließpresszone zurückzuführen, die das Verhältnis der Verfestigungsgradienten Verdrängungsbereich / Blechumformzone zu Verdrängungsbereich / Fließpresszone stetig vergrößert. Folglich wird der Werkstofffluss zunehmend und überproportional in die Kavitäten reduziert, während der Werkstofffluss in Blechmitte und Blechaußenfläche im Gegenzug ansteigt.

Der globale Stofffluss aus der Massivumformzone führt grundsätzlich zu einer Erhöhung des Werkstoffvolumens in der Blechmitte und der Blechaußenfläche. Im Fall der Blechmitte wird der Volumenüberschuss durch eine Blechaufdickung und -aufwölbung kompensiert (Bild 34). Im Hinblick auf industrielle Anwendungen kann angenommen werden, dass

die Erhöhung der Blechdicke selbst je nach Anwendung nicht in jedem Fall ein Fehlermerkmal darstellt, da damit die grundlegende Bauteilfunktionalität in der Regel nicht beeinträchtigt wird. Im Gegensatz dazu stellt die Blechauftwölbung einen unzulässigen Bauteilverzug dar, der entsprechend als Bauteilfehler gewertet wird. Bezüglich der Blechaußenfläche kommt es statt zur Aufdickung der Ronde zu einer Erhöhung des Rondenaußendurchmessers. Im Referenzprozess führt dies zu einer Durchmessererhöhung von $d_o = 120 \text{ mm}$ auf $d = 123,27 \text{ mm}$. Eine mögliche Blechauftwölbung wird durch Einsatz des Niederhalters verhindert.

Die mechanische Beanspruchung der Werkzeugmatrize ist in Bild 36 dargestellt. Wie anhand der nicht armierten Matrize ersichtlich wird, treten im Bereich der Zahnkavitäten ausgeprägte Vergleichsspannungen auf, die in Abhängigkeit Ihrer Position auf dem Werkzeug sowohl auf Druck- als auch Zugspannungen zurückzuführen sind.

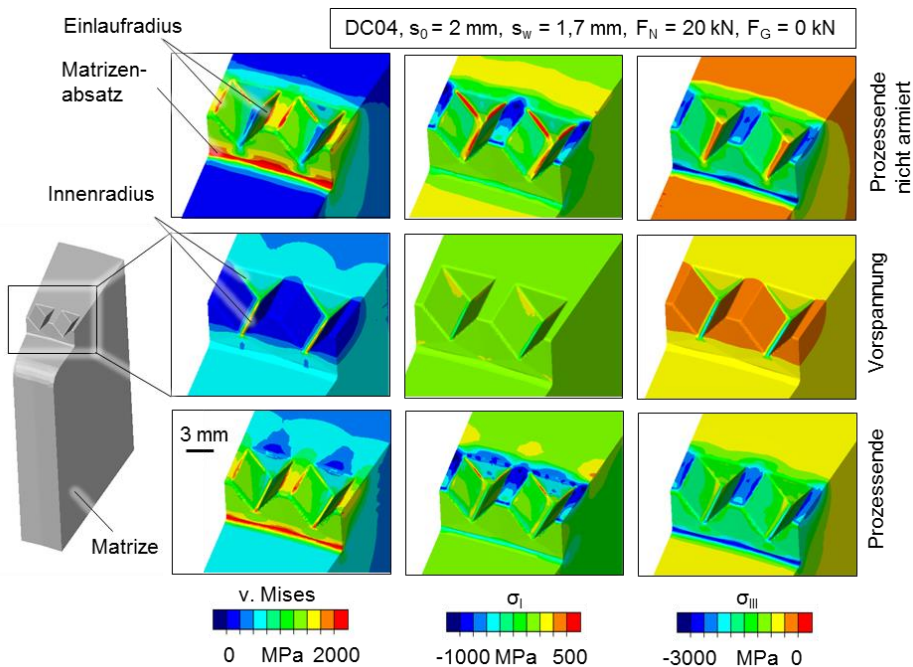


Bild 36: Mechanische Werkzeugbeanspruchung des Referenzprozesses am Prozessende (VFP)

Insbesondere im Bereich der Einlaufradien und des Matrizenabsatzes kommt es zu hohen Vergleichsspannungsamplituden von bis zu 2700 MPa, die auf den im Verdrängungsbereich vorherrschenden Druckspannungen basieren. Daneben sind in den Kavitätsinnenradien domi-

nante Zugspannungen mit Werten von bis zu $\sigma_1 = 1281$ MPa zu verzeichnen, die in Kombination mit den Druckspannungen der mittleren und geringsten Hauptspannungen zu Vergleichsspannungswerten von ca. 2200 MPa führen. Durch den Einsatz des Armierungssystems wird eine radial und tangential gerichtete Druckvorspannung in der Matrize erzeugt. Wie in Bild 36 dargestellt, wird auf diese Weise eine Reduktion der Zugspannungen und folglich der Vergleichsspannung im Bereich der Kavitätsradien am Prozessende bewirkt. Die durch Druckspannungen verursachte Beanspruchung der Einlaufradien und des Matrizenabsatzes wird davon nicht beeinflusst.

Zur Analyse der Werkzeugbeanspruchung über den Prozessverlauf sind die Hauptspannungen auf der Werkzeugoberfläche an den höchstbeanspruchten Bereichen in Bild 37 dargestellt. Als repräsentative Punkte werden hierfür der tangentielle Kavitätseinlauf (1), die Kavitätsinnenradien (2, 3) und der axial gerichtete Radienübergang im Absatzbereich (4) gewählt.

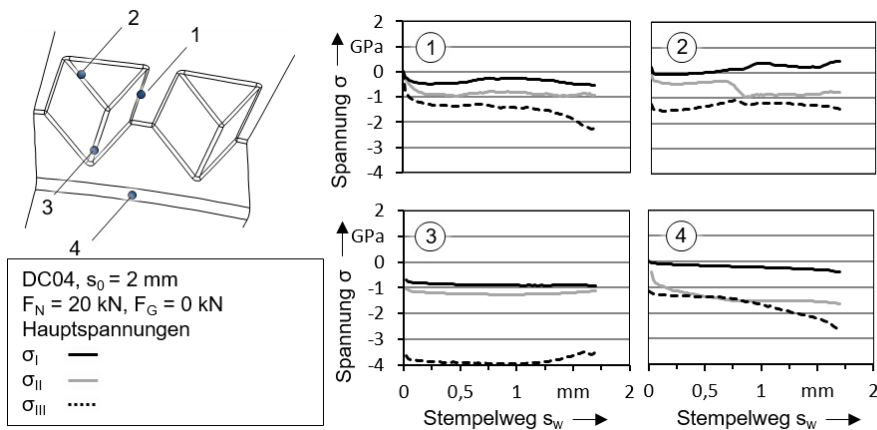


Bild 37: Mechanische Werkzeugbeanspruchung des Referenzprozesses in Abhängigkeit des Stempelwegs s_w (VFP)

Die Auswertung der Verläufe verdeutlicht, dass die maximale Beanspruchung sowohl betragsmäßig als auch hinsichtlich der erreichten Spannungsamplituden für alle Spannungskomponenten am Prozessende vorzufinden ist. Die Werkzeugbeanspruchung ist dabei grundsätzlich druckspannungsdominiert, was insbesondere für die Einlaufradien (1) und den Matrizenabsatz (2) gilt. Sowohl in (1) als auch (2) werden hohe Spannungsamplituden um $\sigma_a = 1000$ MPa erreicht, die überwiegend auf die axiale Belastung der Matrize zurückzuführen sind.

Die höchsten absoluten Druckspannungen liegen dagegen bei (3) vor, wobei Werte um $\sigma_{III} = -4000$ MPa erreicht werden. Da die Vorspannung in diesem Punkt bei Prozessbeginn bereits zu Werten von $\sigma_{III} = -3650$ MPa führt, ist die tatsächlich erreichte Amplitude jedoch gering. Am Prozessende werden in (3) geringere Druckspannungen verzeichnet als am Prozessbeginn, was für eine Aufweitung der Kavitäten durch den einfließenden Werkstoff spricht und mit den Erkenntnissen aus Bild 36 überstimmt. Die Verschiebung der Spannungen in Richtung Zugbereich in den Kavitätsinnenradien wird bei (2) noch stärker verdeutlicht. Da der einfließende Werkstoff bei geringeren Stempelwegen mit den Kavitätsflanken um (2) in Kontakt kommt, wird die größte Hauptspannung (σ_I) bereits kurz nach Prozessbeginn in den Zugspannungsbereich verschoben. In Folge werden in (2) die höchsten Zugspannungen mit Maximalwerten von $\sigma_I = 479$ MPa erreicht.

Bezüglich der tribologischen Beanspruchung sind die hohen Kontaktnormalspannungen zu nennen, die auf den Zahnzwischenflächen Werte um 2000 MPa und auf den Einlaufradien bis 3000 MPa erreichen (Bild 38). Die vergleichsweise hohen Werte sind auf die ausgeprägte Druckumformung des Werkstoffs und die damit verbundene Werkstoffverfestigung zurückzuführen.

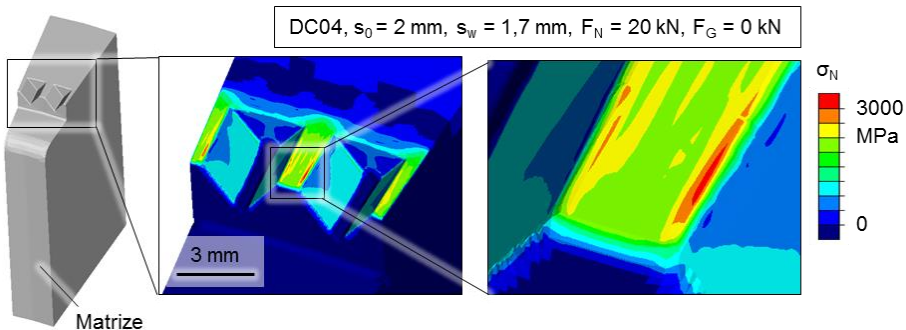


Bild 38: Kontaktnormalspannungen des Referenzprozesses am Prozessende (VFP)

Die höchsten Gleitwege zwischen Werkstück und Werkzeug sind mit Werten bis zu 0,89 mm im Bereich der Einlaufradien lokalisiert, während die höchste Oberflächenvergrößerung im Bereich der Formelemente Werte von maximal 170 % erreicht. Beide Beanspruchungsgrößen sind im Vergleich zu konventionellen Blech- und Massivumformprozessen als gering einzustufen. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die tribologische Beanspruchung der Werkzeuge beim untersuchten Prozess bezüglich des Werkzeugverschleißes keine nennenswerte technologische

Herausforderung darstellt. Dies gilt trotz der ausgeprägten Kontaktnormalspannungen, da diese im Zusammenspiel mit den sehr geringen Gleitwegen von untergeordneter Bedeutung sind. Auch ein Abriss des Schmierstofffilms ist bei der gering ausgeprägten Oberflächenvergrößerung als wenig wahrscheinlich anzunehmen.

6.2.2 Querfließpressen

Der Referenzprozess für das Querfließpressen wird analog zum Vorwärtsfließpressen mit der Referenzgeometrie „Zahn“ nach Tabelle 6 ausgeführt. Der Abstandswinkel zwischen benachbarten Formelementen wird mit $\alpha = 5^\circ$ festgelegt, womit sich ebenfalls die Gesamtanzahl der Formelemente zu $n_z = 72$ ergibt. Das resultierende Idealbauteil zeichnet sich durch eine vollständige Ausformung der Zahnelemente ($V_F = 100\%$) sowie eine unverformte Bauteilmitte aus. Als Halbzeug wird eine Blechrunde mit Durchmesser $d_o = 100$ mm und einer Blechdicke von $s_o = 2$ mm aus dem Werkstoff DCo4 verwendet. Der Stempelweg wird auf insgesamt $s_w = 73$ mm festgelegt, wobei hiervon 27 mm auf den Tiefzieh- und 46 mm auf den Querfließpressvorgang entfallen. Am Ende des Umformprozesses ergibt sich somit ein Napf mit einer Zargenhöhe $h_z = 6$ mm. Die Gegenhalterkraft wird für den Referenzprozess auf $F_G = 400$ kN eingestellt. Die Auswertung beschränkt sich im Folgenden auf die Querfließpressstufe. Für eine ausführliche Untersuchung zu den Vorgängen beim Tiefziehen sei auf die Forschung von SCHNEIDER [25] bezüglich der Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile durch einen kombinierten Tiefzieh-Stauch Prozesses verwiesen. Die Ergebnisauswertung bezüglich der Bauteilausformung am Prozessende und des Stempelkraftverlaufs beim Querfließpressen ist in Bild 39 dargestellt.

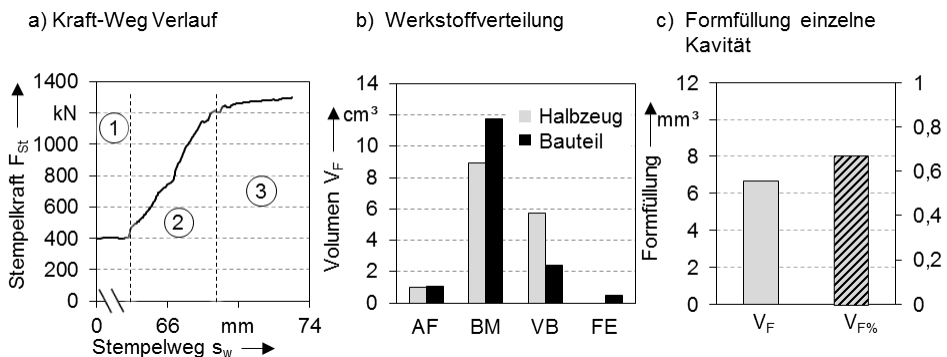


Bild 39: a) Stempelkraftverlauf sowie b) Werkstoffvolumina der Bauteilbereiche und c) V_F eines Formelementes am Prozessende des Referenzprozesses (QFP)

Ausgehend von der am Gegenstempel wirkenden Gegenhalterkraft (Bild 39a Abschnitt 1) zeichnet sich der Verlauf der Stempelkraft zunächst durch einen kontinuierlichen Kraftanstieg aus (Abschnitt 2). Wie Bild 40 veranschaulicht, ist dieser auf die Druckumformung der Napfzarge und der damit einhergehenden und über den Prozessverlauf ansteigenden Verfestigung des Werkstoffs zurückzuführen. Zur Stempelkraft addiert sich analog zum Vorwärtsfließpressprozess die Reibkraft F_R , die selbst von der Verfestigung abhängig ist. Im Gegensatz zum Vorwärtsfließpressen sinkt der Kraftanstieg ab einem Stempelweg von ca. 69 mm ab und ein annäherndes Kraftplateau wird erreicht (Abschnitt 3).

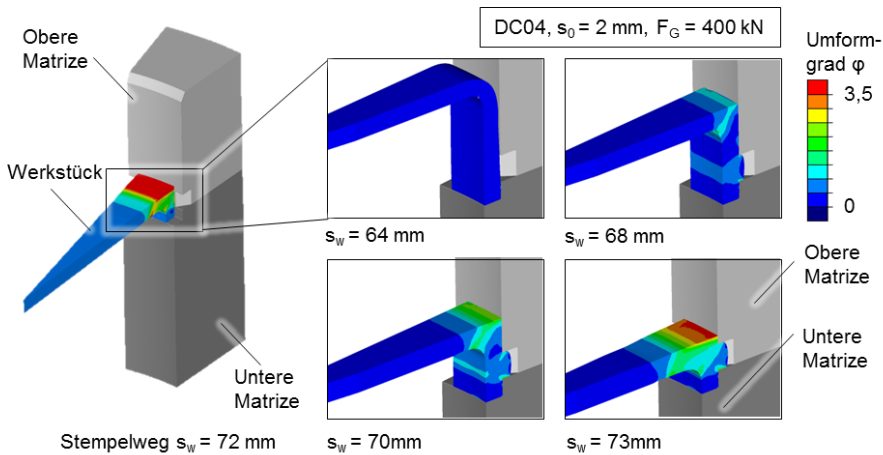


Bild 40: Entwicklung des Umformgrades im Prozessverlauf des Referenzprozesses (Schnittdarstellung durch Zahnmitte) (QFP)

Ursächlich ist hierfür, dass die Verfestigung in der Napfzarge einen Schwellwert erreicht, der den Werkstofffluss fast vollständig in den Napfboden umlenkt. Da die Verfestigungsarbeit nun weitgehend im gering verfestigten Bereich des Napfbodens geleistet wird und die Umformung in der Napfzarge gleichzeitig nur noch langsam fortschreitet, flacht der Kraftbedarfsanstieg für die Umformung insgesamt ab. Unabhängig davon ist in Übereinstimmung zum Vorwärtsfließpressprozess die Gesamtkraft des Stempels durch einen Umformanteil, die Reibkraft sowie der Gegenhalterkraft berechenbar:

$$F_{ges} = F_{id} + F_R + F_G \quad (12)$$

Durch die Umformung wird der Werkstoff aus einem Teil der Napfzarge (Verdrängungsbereich) in die umliegenden Blechbereiche verdrängt. Entsprechend ist bis zum Prozessende eine Erhöhung der Werkstoffvolumina in der Blechmitte (V_{BM}), Blechaußenfläche (V_{AF}) und der Formelemente

(V_F) zu verzeichnen, während das Volumen der Napfzarge (V_V) absinkt (Bild 39b,c). Wie im Vorwärtsfließpressprozess lässt sich die Massivumformzone in eine Verdrängungs- und Fließpresszone anhand der dort vorherrschenden Spannungs- und Formänderungszustände einteilen. Bild 41 veranschaulicht dies sowie die Stoffflussdynamik in Relation zu den Bauteilbereichen anhand einer Darstellung der Stoffflussvektoren. Die aus dem Verdrängungsbereich positiv und radial gerichtete Stoffflusskomponente trägt zur Formfüllung V_F der Kavitäten bei, während der negative gerichtete Anteil zur Erhöhung des Blechmittenvolumens V_{BM} führt.

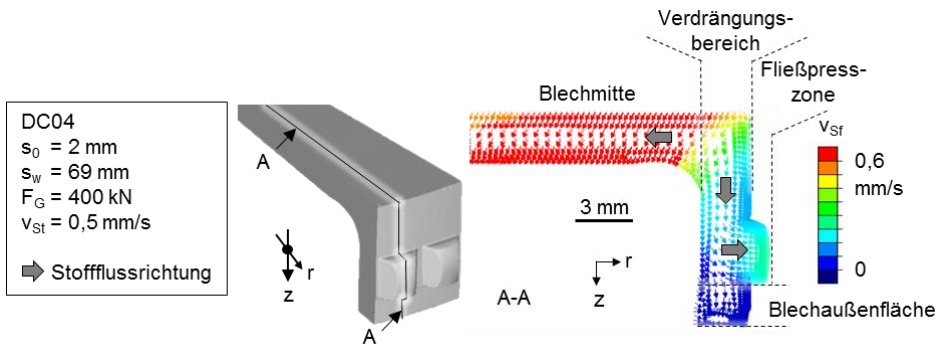


Bild 41: Vektoren der Stoffflussgeschwindigkeit (v_{SF}) im Referenzprozess bei $s_w = 69 \text{ mm}$ (QFP)

Hervorzuheben ist, dass es zu keinem Werkstofffluss aus dem Napfzargenbereich unterhalb der Werkzeugkavitäten (Blechaußenfläche) in die Kavitäten kommt. Das dort befindliche Werkstoffvolumen ist nicht für die Ausformung der Formelemente nutzbar und kann, aufgrund der Umschließung des Bereichs durch das Werkzeug, nur geringfügig an Volumen zunehmen. Charakteristisch für den Verdrängungsbereich ist die Umformung des Werkstoffs durch Druckspannungen (Bild 42), die unmittelbare Krafteinleitung und die Reduktion des Bereichsvolumens im Umformprozess. Typisch sind zudem hohe Umformgrade, deren stärkste Ausprägung über den gesamten Prozessverlauf im Kontaktbereich zwischen Zarge und Stempel zu finden ist.

Im Fließpressbereich findet die Ausformung der Formelemente durch Druckumformung statt. Wie im Fall des Vorwärtsfließpressens wird der aus dem Verdrängungsbereich einfließende Werkstoff durch die Verjüngung der Zahnkavitäten in Ausformungsrichtung umgeformt. Die Umformgrade liegen dabei mit Werten bis maximal ca. $\varphi = 0,8$ im Allgemeinen unter denen des Verdrängungsbereichs. Charakteristisch für den Fließpressbereich sind die vergleichsweise hohen Druckspannungen

(bis ca. $\sigma_{III} = -1000$ MPa) und die von der Kräfteinleitung getrennte Umformzone. Die Bereiche der Blechumformzone, bestehend aus Blechaußenfläche und Blechmitte, unterliegen einer nur vergleichsweise gering ausgeprägten Verfestigung.

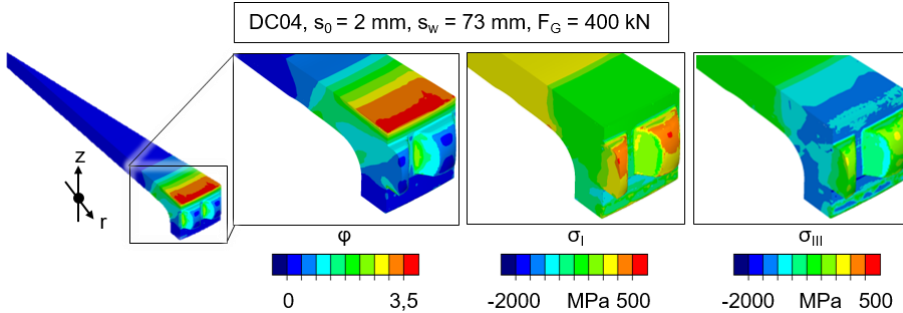


Bild 42: Umformgrad und Hauptspannungen des Referenzprozesses am Prozessende in Schnittdarstellung (VFP, Schnitt durch Formelementmitte)

Die vorhandenen und insbesondere in der Nähe der Napfzarge ausgeprägten Umformgrade sind ausschließlich auf den unbeabsichtigten Werkstofffluss aus der Massivumformzone zurückzuführen.

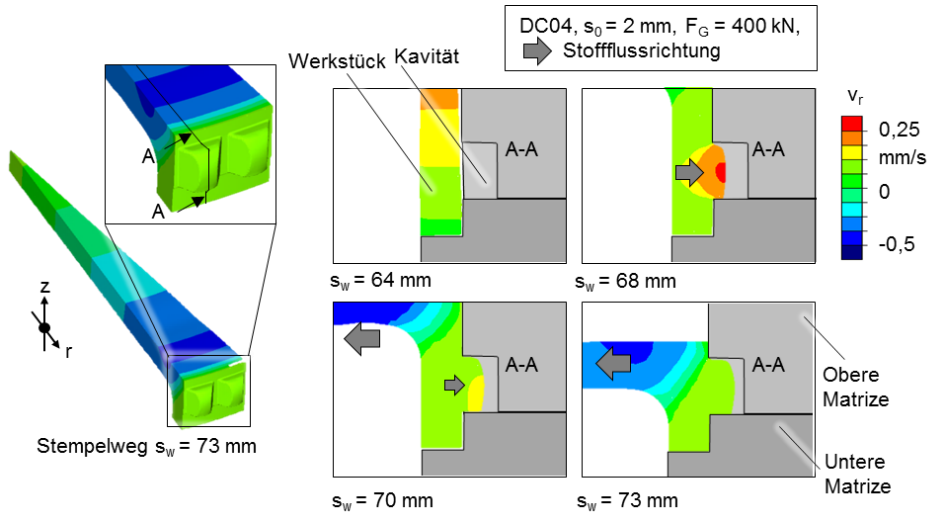
Analog zum Vorwärtsfließpressen ist die tatsächlich erreichte Formfüllung auf Basis der Volumenkonstanz wie folgt berechenbar:

$$V_F = V_{V0} - (V_V + \Delta V_{BM} + \Delta V_{AF}) \quad (13)$$

Damit ergibt sich die theoretisch maximale Werkstoffausnutzung mit $V_{BM} = V_{BM} = 0$ nach Gleichung (11):

$$V_F = V_{V0} - V_V. \quad (14)$$

Mit einem Zargenvolumen von insgesamt $6,98$ cm³ und einem Außenflächenvolumen von $2,20$ cm³ ergibt sich im vorliegenden Referenzprozess für die Ausformung der Formelemente maximal nutzbares Werkstoffvolumen von $4,78$ cm³. Für eine vollständige Formfüllung werden dagegen nur $0,71$ cm³ benötigt. Dennoch wird keine vollständige Formfüllung erreicht. Analog zum Vorwärtsfließpressen und in Übereinstimmung mit der Literatur ist dies auf den Verfestigungsgradient zwischen der hochverfestigten Massivumformzone und den weitgehend unverfestigten Blechbereichen zurückzuführen, der zu einem Werkstofffluss aus der Massivumformzone führt. Bild 43 veranschaulicht diesen Zusammenhang anhand der radialen Stoffflussgeschwindigkeiten.

Bild 43: Radiale Stoffflussgeschwindigkeit (v_r) im Prozessverlauf beim Querfließpressen

Demnach reduziert sich der Stofffluss in die Werkzeugkavitäten kontinuierlich über den Prozessverlauf zugunsten des Stoffflusses in die Bauteilmittte, wodurch die Werkstoffausnutzung sinkt und eine vollständige Formfüllung bis zum Prozessende nicht erreicht wird. Die Umformung des Werkstoffs in der Fließpresszone bewirkt ähnlich zum Vorwärtsfließpressen einen kavitätsinternen Werkstofffluss senkrecht zur Ausformungsrichtung der Formelemente, wie anhand der axialen Stoffflussgeschwindigkeit nachzuvollziehen ist (Bild 44). Als wesentlicher Unterschied zum Vorwärtsfließpressen ist festzustellen, dass aus den Kavitäten selbst kein Werkstoff in die Blechmitte verdrängt werden kann, da diese in axialer Richtung beidseitig geschlossenen sind.

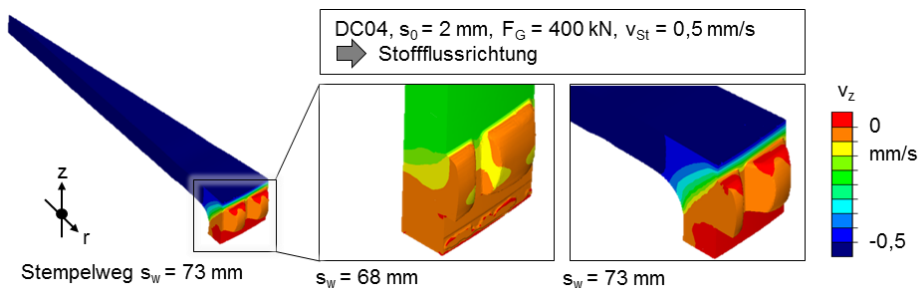
Bild 44: Axiale Stoffflussgeschwindigkeit (v_z) im Prozessverlauf als Schnittdarstellung beim Querfließpressen (Längsschnitt durch Zahnmitte links)

Bild 45 veranschaulicht den Verlauf der Formfüllung V_F über dem Stempelweg. Grundsätzlich steigt die Formfüllung mit fortschreitender Stempelbewegung streng monoton bis zum Prozessende an.

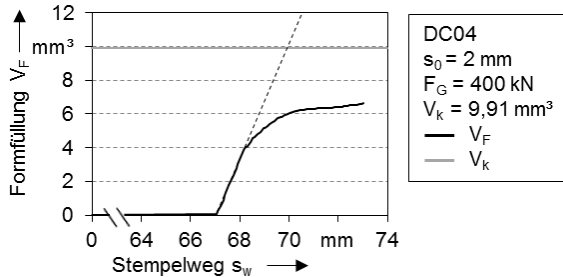


Bild 45: Entwicklung der Formfüllung im Referenzprozess Querfließpressen über den Prozessverlauf

Wie im Vorwärtsfließpressprozess sinkt das Verhältnis der Formfüllungssteigerung pro Weginkrement ($\Delta V_F / \Delta s_w$) kontinuierlich ab. Dies ist in gleicher Weise auf die ansteigende Verfestigung in der Fließpresszone zurückzuführen, die das Verhältnis der Verfestigungsgradienten Verdrängungsbereich / Blechumformzone zu Verdrängungsbereich / Fließpresszone vergrößert (vgl. auch Bild 40). Im Gegensatz zum Vorwärtsfließpressprozess ist der Abfall der Kurvensteigung derart stark ausgeprägt, dass die Formfüllung bis zum Prozessende nahezu stagniert. Dies ist damit zu erklären, dass im Querfließpressprozess die Blechdicke am Bereichsübergang Verdrängungsbereich / Blechmitte im Gegensatz zum Querfließpressen nicht mit zunehmenden Stempelweg absinkt. In Folge steigt die Verfestigung im Übergangsbereich weniger stark an und die Verlagerung des Werkstoffflusses in die Blechumformzone wird im Vergleich zum Vorwärtsfließpressen erleichtert.

Für die Analyse der mechanischen Werkzeugbeanspruchung sind die Vergleichsspannung nach v. Mises sowie die größte und kleinste Hauptspannung der oberen und unteren Matrize in Bild 46 dargestellt. Wie anhand der Vergleichsspannung ersichtlich ist, treten die größten Spannungswerte der oberen Matrize an den Kavitätinnenradien auf. Analog zum Vorwärtsfließpressprozess sind die durch die Zahnausformung verursachten Kontaktnormalspannungen auf den Kavitätsflanken ursächlich, die zu Zugspannungen in der Kavität führen.

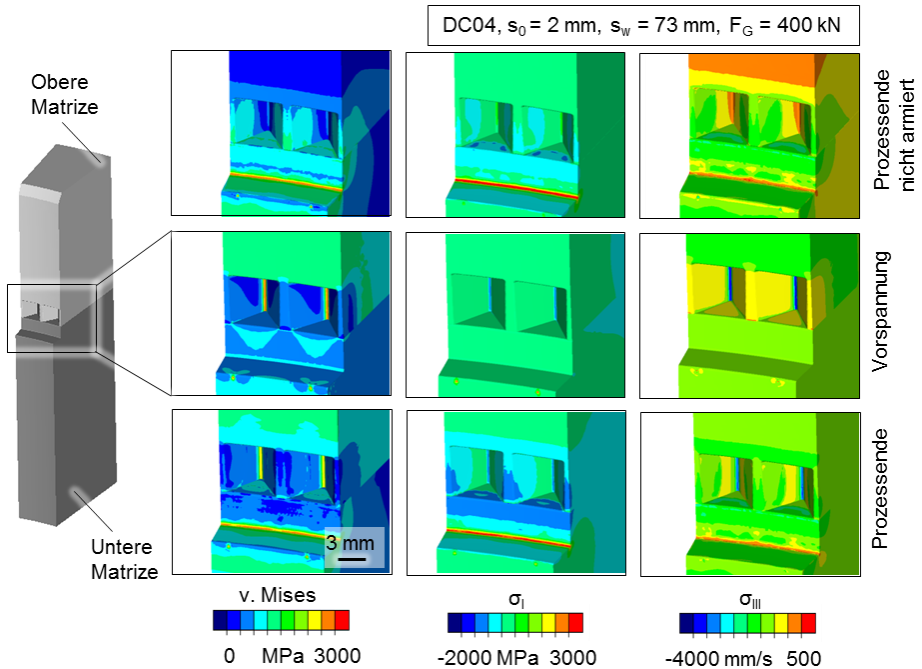


Bild 46: Mechanische Werkzeugbeanspruchung des Referenzprozesses am Prozessende (QFP)

Ebenfalls in Übereinstimmung steht die Druckbeanspruchung der Einlaufradien, obgleich insbesondere die Radien der oberen Matrize wesentlich geringere Spannungswerte aufweisen, als die der unteren Matrize. Dies ist auf die konstruktiv notwendige Abschrägung der Kavitätsstege zurückzuführen, wodurch der Stofffluss an dieser Stelle erleichtert wird. Besonders hohe Beanspruchungen sind darüber hinaus am Absatz der unteren Matrize zu verzeichnen, die durch hohe Kontaktnormalspannungen in radialer und axialer Richtung begründet sind. Das Aufbringen der Vorspannung durch die Armierung bewirkt die Verschiebung der Spannungen in den Druckbereich, wodurch im vorliegenden Fall die Ausprägung von Zugspannungen in der oberen Matrize vollständig vermieden und in der unteren Matrize reduziert wird.

Zur Analyse der Werkzeugbeanspruchung über den Prozessverlauf sind die Hauptspannungen in Bild 47 über dem Stempelweg dargestellt. Analog zum Vorwärtsfließpressen werden als Referenzpunkte die höchstbelasteten Bereiche tangentialer Kavitätseinlauf (1), Kavitätsinnenradien (2, 3) und der axial gerichtete Radienübergang im Absatzbereich (4) gewählt. Die Werkzeugbeanspruchung ist grundsätzlich druckspannungsdominiert, wobei die höchste Beanspruchung am Prozessende auftritt.

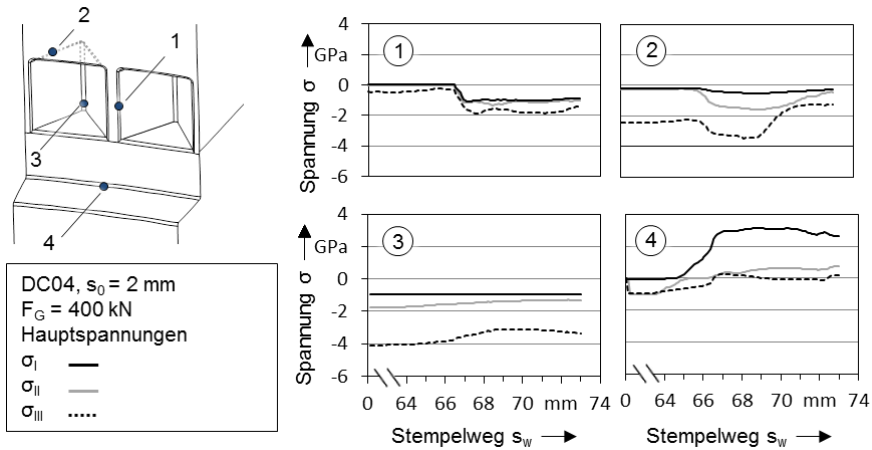


Bild 47: Mechanische Werkzeugbeanspruchung des Referenzprozesses in Abhängigkeit des Stempelwegs s_w (QFP)

So werden im Absatz- (4) und Einlaufbereich (1) sowohl die höchsten Spannungsbeträge, als auch die größten Spannungsamplituden ($\sigma_{a,\max} = 1347 \text{ MPa}$, Punkt 4) erreicht. Im Fall der Kavitätsradien (2, 3) treten die größten Spannungsbeträge aufgrund der überlagerten Vorspannung zwar nicht bei den höchsten Stempelwegen auf, dennoch sind die Werte am Prozessende maßgeblich für die Ausprägung der Maximalspannungsamplituden. Analog zum Vorwärtsfließpressen ist eine Verschiebung der Spannungen bis zum Prozessende in Richtung Zugbereich zu verzeichnen, was auf die Aufweitung der Kavitäten durch den einfließenden Werkstoff zurückzuführen ist. Durch die aufgebrachte Vorspannung werden jedoch keine positiven Spannungswerte erreicht.

Einen wesentlichen Unterschied zum Vorwärtsfließpressen stellt die Beanspruchung des Absatzradius (4) dar, der im Fall des Querfließpressens ausgeprägte Zugspannungswerte (σ_I) aufweist. Dies ist auf die Umformung des Werkstücks im Verdrängungsbereich zurückzuführen, die zu hohen Kontaktnormalspannungen (siehe Bild 48) in axialer und radialer Richtung im Bereich der unteren Matrize führt.

Hinsichtlich der tribologischen Beanspruchung sind die Kontaktnormalspannungen zu nennen, die auf der unteren Matrize Werte von ca. 1500 MPa bzw. 2000 MPa im Bereich der Einlaufradien erreichen und damit als vergleichsweise hoch einzustufen sind. In der Gegenüberstellung mit dem Vorwärtsfließpressprozess fallen die Werte im Durchschnitt geringer aus, was durch die weniger ausgeprägte Formfüllung zu begründen ist.

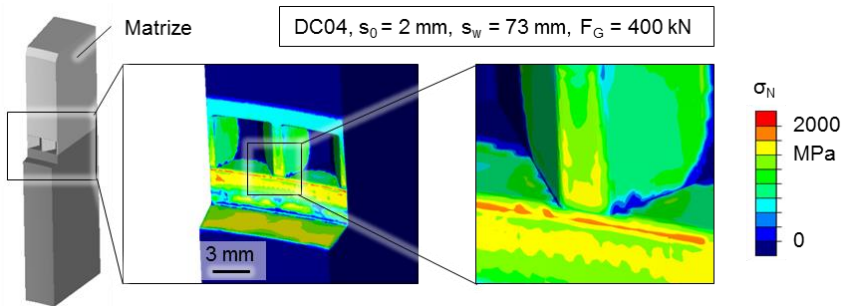


Bild 48: Kontaktnormalspannungen am Prozessende des Referenzprozesses (QFP)

Die höchsten Gleitwege zwischen Werkstück und Werkzeug sind mit Werten bis zu 7,3 mm im Bereich der Napfzarge lokalisiert. Obwohl die Gleitwege damit deutlich ausgeprägter sind als im Fall des Vorwärtsfließpressens, sind diese insgesamt als gering einzustufen. Die gleiche Wertung gilt der Oberflächenvergrößerung, die im Bereich der Formelemente ihren Maximalwert von vergleichsweise geringen 170 % erreicht. Damit ist gezeigt, dass die tribologischen Beanspruchungen beim Querfließpressen im untersuchten Prozess nur von untergeordneter Bedeutung sind.

6.2.3 Gegenüberstellung der Prozesse

Auf Basis der Prozessanalyse lassen sich grundlegende Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den beiden Prozessvarianten identifizieren. In Tabelle 9 sind hierfür die wesentlichen Kenngrößen beider Prozesse zusammengefasst. Um die Prozesse so gut wie möglich vergleichbar zu machen, werden die Werte bei gleicher Formelementausformung gegenübergestellt.

Bezüglich der Prozesskraft zeigt sich beim Querfließpressen gegenüber dem Vorwärtsfließpressprozess ein um ca. 46 % vergrößerter Bedarf. Zu beachten ist jedoch, dass im untersuchten Fall beim Querfließpressen eine um 400 kN größere Gegenhalterkraft verwendet wird und sich die tatsächliche Kraftdifferenz daher auf 196 kN reduziert. Der verbleibende Unterschied (28 %) ist damit zu begründen, dass das verdrängte Werkstoffvolumen ΔV_V beim Vorwärtsfließpressen geringer ist und in Folge eine niedrigere Verfestigung und Umformarbeit im Verdrängungsbereich erreicht bzw. geleistet wird.

Tabelle 9: Gegenüberstellung von Kenngrößen der Referenzprozesse

Vergleichsgröße (Prozessende)	Vorwärtsfließpressen	Querfließpressen	
Prozess			
Kraftbedarf	699 MPa	1295 MPa	
Stempelweg	0,98 mm	73 mm	
Bauteil			
φ (gemittelt)	Verdrängungsbereich	0,51 ± 0,21	1,93 ± 1,35
	Blechmitte	0,056 ± 0,0026	0,51 ± 0,55
	Außenfläche	0,2 ± 0,072	0,32 ± 0,022
	Fließpresszone	0,45 ± 0,38	0,82 ± 0,33*
Formfüllung V_F	6,66 mm ³	6,66 mm ³	
Formfüllung $V_{F\%}$	67,20 %	67,20 %	
Verdrängtes Werkstoffvolumen ΔV_V	1,46 cm ³	4,78 cm ³	
Werkzeug (Maximalwerte)			
v. Mises	2857 MPa (Formelementradien)	2980 MPa (Matrizenabsatz)	
Kontaktnormalspannungen	1798 MPa	1700 MPa	
Gleitwege	0,98 mm	7,3 mm	
Oberflächenvergrößerung A_1/A_0 (lokal)	150 %	150 %	

* Verfestigung in der Napfzarge zum Beginn der Formelementausformung: $0,34 \pm 0,04$

Auf den ersten Blick fallen die in der Fließpresszone des Querfließpressprozesses vorherrschenden Umformgrade im Vergleich zum Vorwärtsfließpressprozess um den Faktor zwei höher aus. Zu beachten ist jedoch, dass es beim Querfließpressen unmittelbar nach dem Abschluss des Tiefziehens zunächst zu einer Anstauung der Napfzarge kommt, bis der Ziehspalt zwischen Gegenhalter und Matrize schließlich vollständig durch das Bauteil ausgefüllt wird. Berücksichtigt man die damit verbundene Vorverfestigung der Napfzarge zu Beginn der eigentlichen Formelementausformung ($\varphi = 0,34 \pm 0,04$), verschwindet der Unterschied zwischen den Umformgraden in der Fließpresszone vollständig. Dies legt nahe, dass die in den Funktionselementen vorherrschende Verfestigung bei gleicher Kavitätsgeometrie und Dimension im Wesentlichen von der erzielten Formfüllung bestimmt wird. Unterschiede zeigen sich bei den durchschnittlichen Umformgraden in Blechmitte und Blechaußenfläche. Beim Vorwärtsfließpressen wird eine nur unwesentliche Verfestigung im Zuge der Blechauftwölbung bzw. der Durchmesserergrößerung in diesen

Zonen erreicht. Im Gegensatz dazu kommt es beim Querfließpressen zu einer Blechaufdickung in beiden Bereichen, wodurch die vergleichsweise höheren, aber immer noch als gering zu bewertenden Umformgrade um 0,3 erklärt werden.

Ein wesentlicher, prinzipbedingter Unterschied zwischen den Prozessen ist das für die Ausformung der Formelemente verwertbare Werkstoffvolumen. Bei vollständiger Ausnutzung des jeweiligen Verdrängungsbereichs steht für den Querfließpressprozess im Vergleich zum Vorwärtsfließpressprozess das 3,27-fache Volumen für die Formelementausformung zur Verfügung. Eine Steigerung des nutzbaren Werkstoffvolumens ist in beiden Fällen nur durch eine Vergrößerung des Verdrängungsbereichs zu erzielen. Bezüglich des eingesetzten Halbzeugs ist dies beim Querfließpressen entweder durch eine Erhöhung der Anfangsblechdicke oder der Zargenhöhe realisierbar. Beim Vorwärtsfließpressen ist dagegen ausschließlich eine Blechdickenerhöhung anwendbar, wodurch die Flexibilität des Prozesses hinsichtlich der realisierbaren Formelementdimensionen deutlich eingeschränkt wird.

Trotz ausreichendem Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich ist bei beiden Prozessvarianten eine unzureichende Ausformung der Funktionselemente festzustellen. Ursächlich ist hierfür der Verfestigungsgradient bzw. der daraus resultierende Stofffluss zwischen der Massivumformzone (Fließpresszone, Verdrängungsbereich) sowie den umliegenden, weitgehend unverfestigten Blechbereichen (Blechmitte, Blechaußenfläche). Dieses Erkenntnis steht in Übereinstimmung mit dem Stand der Technik und ist hiermit gleichermaßen für das Vorwärts- und Querfließpressen von Funktionselementen nachgewiesen.

Aufgrund der geringen Gleitwege und der geringen Oberflächenvergrößerung ist die tribologische Beanspruchung der Werkzeuge im Vergleich zu konventionellen Massiv- und Blechumformprozessen als gering einzustufen. Beide Prozesse sind dabei in der Dimension der Werte prinzipiell vergleichbar. Im Gegensatz dazu stellt die mechanische Beanspruchung der Werkzeuge vor dem Hintergrund aktuell verfügbarer Werkzeugwerkstoffe und Armierungssysteme eine wesentliche Herausforderung dar. Hohe Vergleichsspannungsamplituden belasten insbesondere die Kavitätinnenradien sowie scharfkantige Kantenübergänge an Werkzeugab-sätzen. Die Absolutwerte und Amplituden der Spannungen sowie deren Ursachen sind hierbei zwischen den beiden Prozessvarianten grundsätzlich übertragbar.

6.3 Einflussgrößen auf Bauteilausformung und Umformkraft

Ziel des folgenden Kapitels ist die Identifikation und Untersuchung wesentlicher Einflussgrößen auf die Bauteilausformung und Werkzeugbeanspruchung. Hierfür wird eine Variantensimulation des Vorwärts- und Querfließpressprozesses durchgeführt und gemäß der in Abschnitt 6.1 festgelegten Zielgrößen ausgewertet. Der Versuchsaufbau ist an Erkenntnissen aus [S₃] und [S₄] angelehnt und wird entsprechend den Anforderungen dieser Arbeit angepasst und grundlegend weiterentwickelt. Da in Abschnitt 6.2.3 die prinzipielle Vergleichbarkeit der beiden Prozesse festzustellen war, wird die Analyse im Folgenden gemeinsam durchgeführt. Durch die Untersuchung beider Prozesse kann die Übertragbarkeit der Erkenntnisse bewertet werden.

Als mögliche Einflussgröße wurde zunächst die geometrische Gestalt der formgebenden Werkzeugkavitäten analysiert. Vor dem Hintergrund der ermittelten Erkenntnisse wird die Analyse anschließend auf die gleichzeitige Ausformung geometrisch unähnlicher Formelemente erweitert. Abschließend erfolgt die Untersuchung wesentlicher prozessspezifischer Größen wie der Werkstoffwahl und die Nieder- und Gegenhalterkräfte.

Bezüglich der Werkzeugbeanspruchung wird auf Basis der Erkenntnisse aus Abschnitt 6.2 aufgrund ihrer untergeordneter Bedeutung auf eine Analyse der tribologischen Beanspruchung verzichtet. Die Analyse zeigt ferner, dass die höchsten mechanischen Beanspruchungen - repräsentiert durch die erzielten Spannungsamplituden und -beträge - am Prozessende Maximalwerte erreichen. Grundsätzlich korreliert die Werkzeugbeanspruchung mit dem Stempelkraftverlauf. Im Folgenden wird daher die maximale Stempelkraft als abgeleitete Vergleichsgröße zur Beurteilung der Werkzeugbeanspruchung in Abhängigkeit der untersuchten Einflussgrößen herangezogen.

6.3.1 Geometrische Gestalt der Formelemente

Im Folgenden wird der Einfluss der geometrischen Ausprägung der formgebenden Werkzeugkavitäten auf die Ausformung des Bauteils sowie auf den Kraftbedarf und die mechanische Werkzeugbeanspruchung untersucht. Hierfür werden alle in Abschnitt 6.1 definierten Basisgrößen der Werkzeugkavitäten variiert und die resultierenden Zielgrößenwerte mit dem Referenzprozess (Abschnitt 6.2.1 bzw. 6.2.2) verglichen.

Flankenwinkel

Zur Analyse des Einflusses des Kavitätsflankenwinkels werden die Flankenwinkel $w = 0^\circ$, 17° und 34° untersucht. Eine visuelle Darstellung der angestrebten Formelemente und der zugehörigen Kavitätsvolumina ist in Bild 49 gegeben.

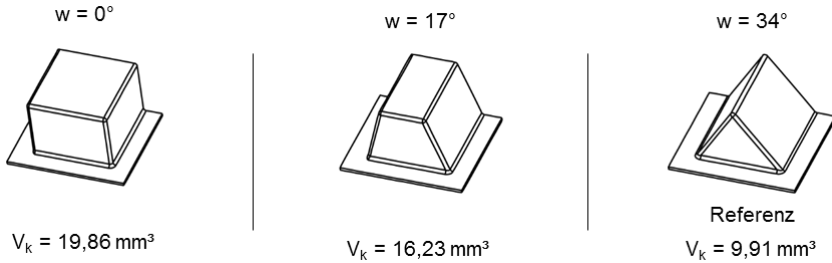


Bild 49: Angestrebte Formelementgeometrien und zugehörige Kavitätsvolumina V_k Variation Flankenwinkel

In Bild 50 sind die Formfüllungen (V_F bzw. $V_{F\%}$) sowie die Differenzen des Werkstoffvolumens der einzelnen Blechbereiche ΔV_F im Vergleich zur Referenzsimulation für den Vorwärts- und Querfließpressprozess gegenübergestellt.

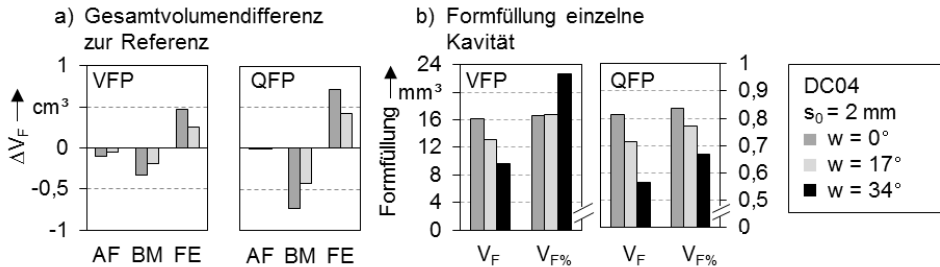


Bild 50: Einfluss des Flankenwinkels auf die Zielgrößen beim Vorwärtsfließpressprozess

Wie aus Bild 50a hervorgeht, sinkt der Werkstofffluss in die Blechmitte (BM) und die Blechaußenfläche (AF) und damit das resultierende Werkstoffvolumen in diesen Bereichen zugunsten des Formelementvolumens V_F in der Fließpresszone (FE) mit sinkendem Flankenwinkel. Dieser Zusammenhang spiegelt sich auch in der absoluten Formfüllung der einzelnen Kavitäten wieder, die Bild 50b zu entnehmen sind und durch die mit zunehmendem Flankenwinkel ansteigende Umformung des Werkstoffs in der Fließpresszone zu erklären ist. Bild 51 veranschaulicht dies anhand einer Darstellung der Umformgradverteilung für die untersuchten Formelementvarianten.

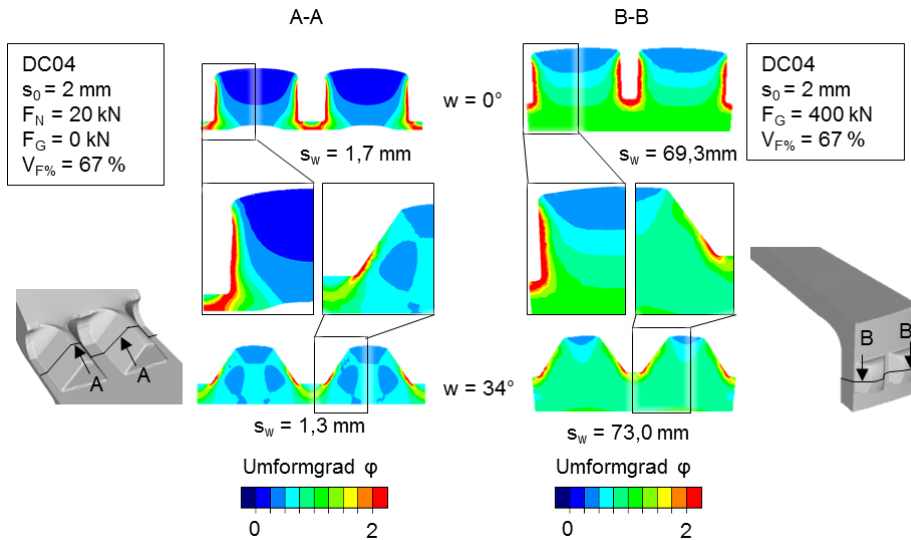


Bild 51: Umformgrade in der Fließpresszone in Abhängigkeit des Flankenwinkels w

Der Vergleich bei identischer Formfüllung bestätigt die höheren Umformgrade bei höheren Flankenwinkeln, wobei dieser Zusammenhang qualitativ zwischen den Prozessen übertragbar ist. Zwar reduzieren sich die hohen, lokalen Umformgrade am Kavitätseinlauf, jedoch überwiegt die verstärkte Umformung über den gesamten Formelementquerschnitt, so dass ein Einfließen des Werkstoffs in die Kavität insgesamt erschwert wird.

Die erhöhte Umformung in der Fließpresszone bedingt die stärkere Ausprägung des Verfestigungsgradienten zur Blechmitte bzw. Blechaußenfläche und damit die Verlagerung des Stoffflusses in die umliegenden Bereiche. Vor diesem Hintergrund erscheint die erhöhte relative Formfüllung bei höheren Flankenwinkeln im Fall des Vorwärtsfließpressens (Bild 50b) zunächst als widersprüchlich. Dieser Zusammenhang ist jedoch durch die in der Fließpresszone herrschende Stoffflussdynamik erklärbar. Im Extremfall des Mitnehmers ($w = 0^\circ$) findet keine Umformung des Werkstoffs in der Fließpresszone statt. Dementsprechend wird die Mitnehmerausformung maßgeblich durch den Stofffluss im Verdrängungsbereich bestimmt. Da dieser in die Blechmitte gerichtet ist (Bild 52a), wird das Mitnehmerelement in Richtung Blechachse deformiert, wodurch der Kontakt zwischen Werkstoff und Werkzeugkavität abreißt und ein Hohlraum in der Kavität ausgebildet wird (Bild 52b).

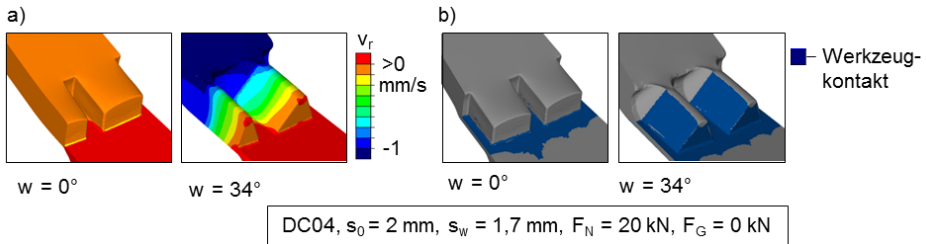


Bild 52: Stofffluss in der Fließpresszone in Abhängigkeit des Flankenwinkels

Umgekehrt wird mit steigendem Flankenwinkel durch die Umformung des Werkstoffs in der Fließpresszone ein kavitätsinterner Stofffluss erzeugt, der der Deformation des Formelements entgegenwirkt (vgl. auch Abschnitt 5.3.1). In Folge verbleibt relativ zum Kavitätsvolumen V_k mehr Werkstoff in der Fließpresszone, obwohl gleichzeitig ein höheres, absolutes Werkstoffvolumen in die umliegenden Blechbereiche verdrängt wird. Im Gegensatz dazu geht die höchste relative Formfüllung beim Querfließpressen nicht mit dem höchsten, sondern mit dem geringsten Flankenwinkel einher. Dies ist damit zu begründen, dass die Kavitäten beim Querfließpressen senkrecht zur Blechnormalen geschlossen sind und ein Stofffluss des Werkstoffs aus der Fließpresszone selbst nicht möglich ist. Dementsprechend folgt die relative Formfüllung erwartungsgemäß dem Verlauf der absoluten Formfüllung.

Wie aus dem Vergleich der Kraft-Weg Verläufe in Bild 53 hervorgeht, steigt der Kraftbedarf für die Umformung mit einer Erhöhung des Flankenwinkels bei beiden Prozessen aufgrund der erhöhten Verfestigung in der Fließpresszone an. So ist etwa beim Vorwärtsfließpressen (Bild 53a) bei Einsatz der Zahnkavität ($w = 34^\circ$) eine Verdoppelung der Kraft um 216 % im Vergleich zur Mitnehmerkavität zu verzeichnen ($w = 0^\circ$). Im Gegensatz zum Vorwärtsfließpressen unterscheidet sich der Verlauf der Stempelkraft beim Querfließpressen am Prozessbeginn zunächst nicht zwischen den Simulationsvarianten (Bild 53). Dies ist damit begründbar, dass bis zu einem Stempelweg von ca. 67 mm zunächst die Füllung des Zargenvolumens erfolgt, wobei keine nennenswerte Ausformung der Formelemente stattfindet (Abschnitt 1). Die unterschiedlichen Flankenwinkel wirken sich erst im anschließenden Prozessabschnitt aus, der durch einen deutlichen Anstieg der Formfüllung gekennzeichnet ist (Abschnitt 2). Steigende Flankenwinkel sind in diesem Bereich mit einer Erhöhung der Stempelkraft verbunden, die in Übereinstimmung mit dem Vorwärtsfließpressen durch erhöhte Umformgrade in der Fließpresszone begründet sind.

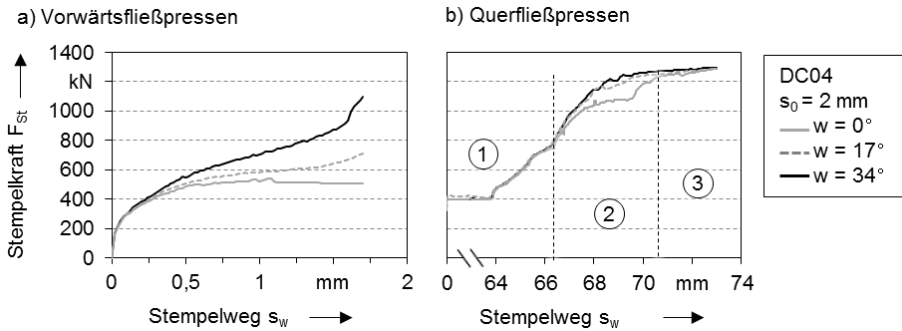


Bild 53: Einfluss des Flankenwinkels auf die Stempelkraft F_{St}

Wie in Abschnitt 6.2.2 dargelegt, kommt es ab einem bestimmten Stempelweg jedoch zu einer weitgehenden Stagnation der Formelementausformung (Abschnitt 3). Die Umformarbeit wird daher fast ausschließlich im Verdrängungsbereich und in der Blechmitte geleistet. Aus diesem Grund kommt es im Gegensatz zum Vorwärtsfließpressen zu einer Angleichung der Prozesskraft bis zum Prozessende.

Kavitätstiefe

Zur Ermittlung des Einflusses der Kavitätstiefe auf die Formfüllung wird eine Simulation mit $t = 1,1 \text{ mm}$ der Referenzsimulation gegenübergestellt. Die angestrebten Formelementgeometrien und Kavitätsvolumina V_k sind in Bild 54 abgebildet.

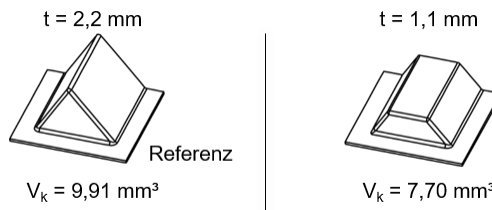


Bild 54: Formelementgeometrien und Kavitätsvolumina V_k Variation Kavitätstiefe

Die Verringerung der Kavitätstiefe geht mit einer Reduktion des Kavitätsvolumens einher, wodurch sich das Verhältnis zwischen verdrängtem Werkstoffvolumen und dem Kavitätsvolumen erhöht. Dementsprechend steigt die Verfestigung in der Massivumformzone bzw. der Verfestigungsgradient zwischen Massivumformzone und Blechumformzone an und eine vergleichsweise größere Menge an Werkstoff wird in die Blechmitte und Blechaußenfläche verdrängt (Bild 55a).

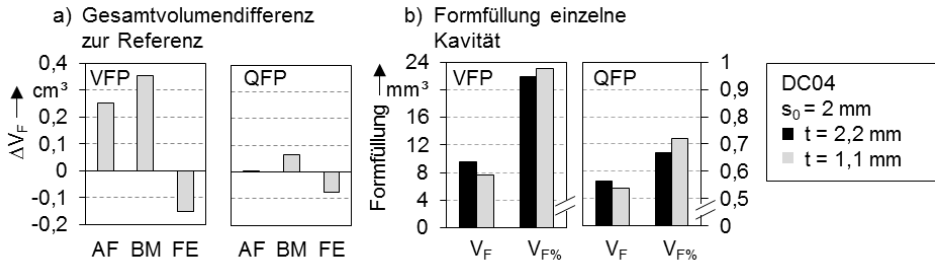


Bild 55: Einfluss der Kavitätstiefe auf die Formfüllung

Dieser für die Formfüllung nachteilige Effekt tritt jedoch erst ein, wenn die Formelemente in Kontakt mit dem Kavitätsboden kommen. Da das Kavitätsvolumen deutlich geringer ist als im Referenzfall und sich die Formfüllung über den Prozessverlauf zunächst identisch zum Referenzfall verhält, wird am Prozessende dennoch eine gesteigerte relative Formfüllung $V_{F\%}$ erreicht. Die Auswertung der Formfüllung V_F über den Stempelweg in Bild 56 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Am Prozessbeginn in Abschnitt 1 verläuft die Formfüllung unverändert zum Referenzfall bis die Formelemente Bodenkontakt erhalten und die Volumenzunahme fortlaufend stark abweicht (Abschnitt 2). Der Verlauf nähert sich hierbei frühzeitig einem Plateau an, das auf die stark zunehmende Verfestigung des Formelements zurückzuführen ist. Trotz der geringeren erreichten Absolutwerte ist der verbleibende Abstand zum theoretischen, maximalen Füllvolumen (gestrichelte Linien) jedoch niedriger als im Referenzfall.

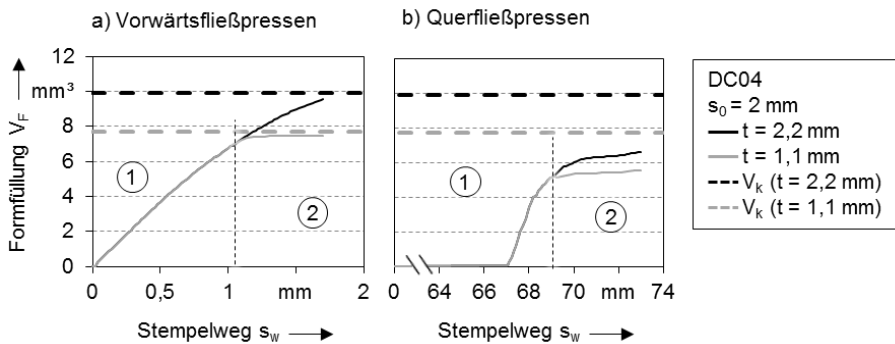


Bild 56: Verlauf der Formfüllung V_F über den Stempelweg s_w in Abhängigkeit der Kavitätstiefe

Die Auswertung der Stempelkraft-Weg Verläufe in Bild 57 zeigt, dass die Kraftverläufe bei beiden Prozessen zunächst nicht von denen der Referenzen abweichen (Abschnitt 1). Sobald im Fall der geringeren Kavitätstiefe beim Vorwärtsfließpressen der Kontakt zum Kavitätsboden hergestellt

wird, steigt der Kraftbedarf durch den geometrischen Widerstand an (Abschnitt 2, Bild 57a). Im Gegensatz dazu kommt es beim Querfließpressen nicht zu einer merklichen Beeinflussung der Verläufe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Bodenkontakt aufgrund der nach wie vor geringen Formfüllung am Prozessende wenig ausgeprägt ist und die Prozesskraft daher nur unmerklich verändert wird.

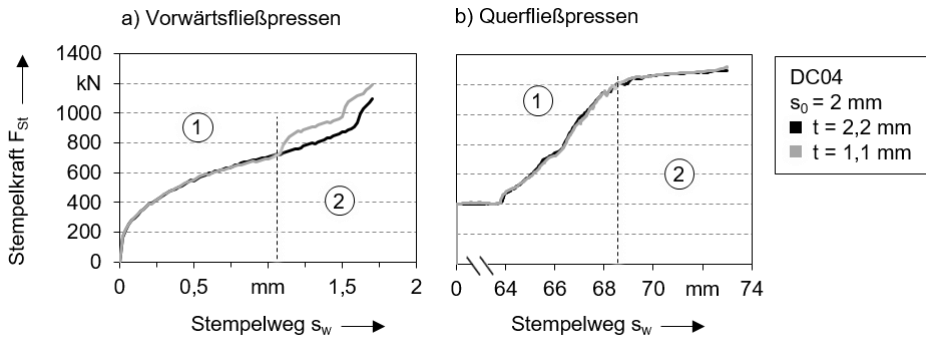


Bild 57: Einfluss der Kavitätstiefe auf die Stempelkraft F_{St}

Kavitätsbreite

Zur Ermittlung des Einflusses der Kavitätsbreite b auf die Formfüllung wird eine Simulation mit $b = 6$ mm der Referenzsimulation ($b = 3$ mm) gegenübergestellt. Eine Darstellung der angestrebten Formelemente und zugehörigen Kavitätsvolumina ist in Bild 58 festgehalten.

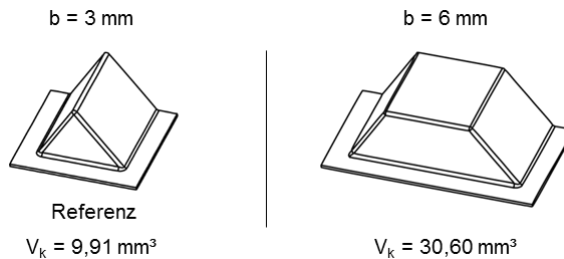


Bild 58: Angestrebte Formelementgeometrien und zugehörige Kavitätsvolumina V_k Variation Kavitätsbreite

Bild 59 zeigt das Ergebnis bezüglich Formfüllung und Werkstoffverteilung am jeweiligen Prozessende. Die Anhebung der Kavitätsbreite vergrößert das Verhältnis zwischen Fließpresszone und Verdrängungsbereich. Dementsprechend sinkt die Umformung in der Massivumformzone und der Verfestigungsgradient zur Blechumformzone wird reduziert. In Folge gelangt insgesamt mehr Werkstoff in die Formelemente und ent-

sprechend weniger Werkstoff in die Blechaußenfläche und Blechmitte (Bild 59a/b).

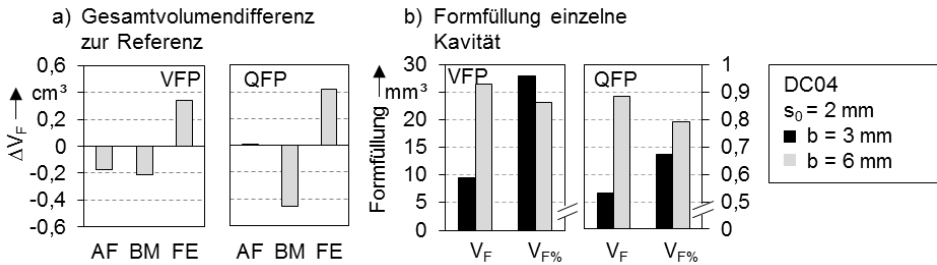


Bild 59: Einfluss der Kavitätsbreite auf die Werkstoffverteilung am Prozessende

Vor diesem Hintergrund erscheint die bei größerer Kavitätsbreite geringere relative Formfüllung beim Vorwärtsfließpressen widersprüchlich, ist jedoch durch die Stoffflussdynamik in der Werkzeugkavität erklärbar. Durch das erleichterte Einfließen des Werkstoffs in die breitere Kavität werden weniger Umformgrade in der Fließpresszone eingebracht. Dadurch wird dem Werkstofffluss im Verdrängungsbereich weniger entgegengewirkt und das Formelement folglich Richtung Blechmitte deformiert. Analog zu den Verhältnissen bei der Verringerung des Flankenwinkels bildet sich ein Hohlraum in der Kavität wodurch die relative Formfüllung sinkt. Im Querfließpressprozess sind die Kavitäten geschlossen und die Deformation des Formelements wird verhindert. Dementsprechend entspricht die relative Formfüllung in diesem Fall dem Verlauf der absoluten Formfüllung.

Durch die Vergrößerung der Kavitätsbreite von 3 mm auf 6 mm wird eine deutliche Kraftreduktion beim Vorwärts- und Querfließpressen über den gesamten Umformprozess bewirkt (Bild 60).

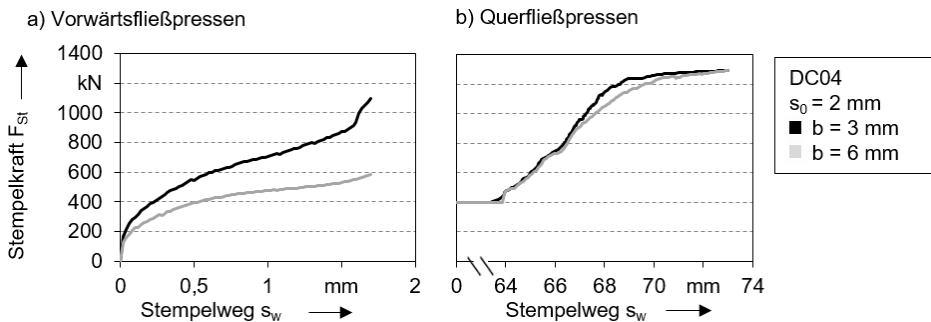


Bild 60: Einfluss der Kavitätsbreite auf die Stempelkraft F_{St}

Dieser Effekt ist bei beiden Prozessen mit der Verringerung der Umformgrade und der damit verbundenen verringerten Verfestigung in der Massivumformzone zu erklären.

Kavitätslänge

Bild 63 zeigt den Einfluss der Kavitätslänge anhand eines Vergleichs zwischen der Referenz ($l = 3 \text{ mm}$) und einer identischen Simulation mit reduzierter Kavitätslänge ($l = 1,5 \text{ mm}$) auf die Stempelkraft. Die angestrebten Formelemente und die zugehörigen Kavitätsvolumina V_k sind in Bild 61 abgebildet.

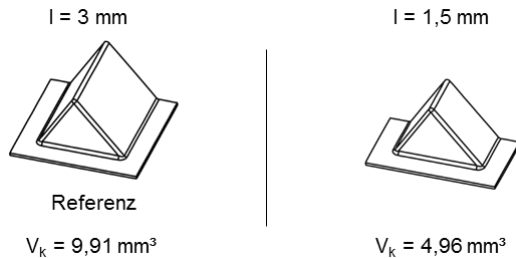


Bild 61: Angestrebte Formelementgeometrien und zugehörige Kavitätsvolumina V_k Variation Kavitätslänge

Aus Bild 62a geht hervor, dass die Längenreduktion der Kavität eine Verlagerung des Werkstoffflusses Richtung Blechumformzone zur Folge hat. Damit sinkt im Gegenzug das in den Kavitäten gemessene Werkstoffvolumen. Beim Querfließpressen entfällt die Stoffflussänderung ausschließlich auf die Blechmitte, da das maximale Volumen in der Blechaußenfläche aufgrund des Werkzeugaufbaus begrenzt und bei beiden Geometrielängen erreicht worden ist. Grundsätzlich ist der Einfluss auf den Stofffluss durch die erhöhten Umformgrade im Verdrängungsbereich zu begründen, die zu einer Verstärkung des Verfestigungsgradienten zwischen Massivumformzone und den wenig verfestigten Blechbereichen führen. Dies steht in Übereinstimmung mit der gemessenen absoluten und relativen Formfüllung, die beide geringere Werte aufweisen als im Fall der Referenz (Bild 62b).

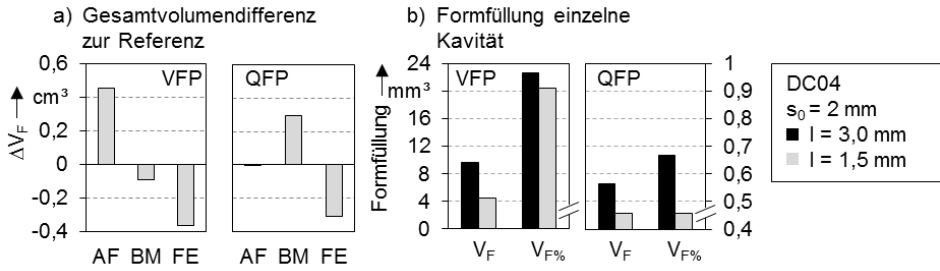


Bild 62: Einfluss der Kavitätslänge auf die Werkstoffverteilung am Prozessende

Bei beiden Prozessvarianten ist eine Steigerung des Kraftbedarfs mit sinkender Kavitätslänge festzustellen (Bild 63). Die Längenreduktion geht mit einer Verringerung der Kavitätsöffnungsfläche und damit umgekehrt mit einer Vergrößerung der Fläche des Verdrängungsbereichs einher.

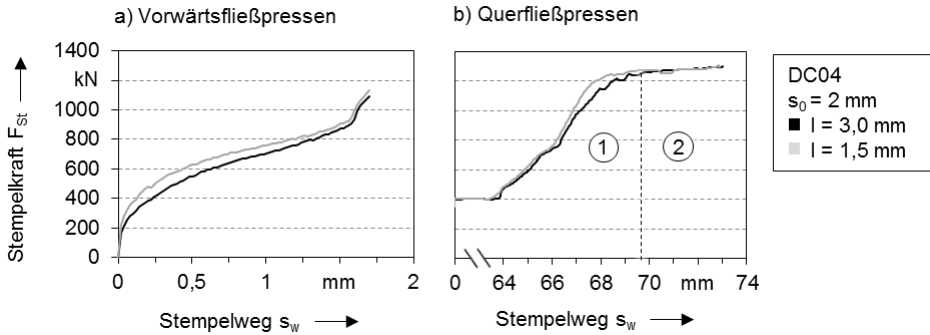


Bild 63: Einfluss der Kavitätslänge auf die Stempelkraft F_{St}

Dementsprechend steigt die Umformung im Verdrängungsbereich und in Folge der Umformkraftbedarf an. Beim Querfließpressen kommt es dennoch zu einer Angleichung der Stempelkraft bis zum Prozessende (Abschnitt 2), da die Ausformung bei ca. $s_w = 70 \text{ mm}$ fast vollständig stagniert und im weiteren Verlauf lediglich die Umformung der Napfzarge und Blechmitte maßgeblich für den Kraftbedarf ist.

Einlaufgradien

Zur Untersuchung des Einflusses der Einlaufgradien auf das Prozessergebnis wird die Referenzsimulation mit $r_{ein} = 0,1 \text{ mm}$ einer Simulation mit $r_{ein} = 0,5 \text{ mm}$ gegenübergestellt. Die angestrebten Formelemente sowie die zugehörigen Kavitätsumfänge V_k sind in Bild 64 visualisiert.

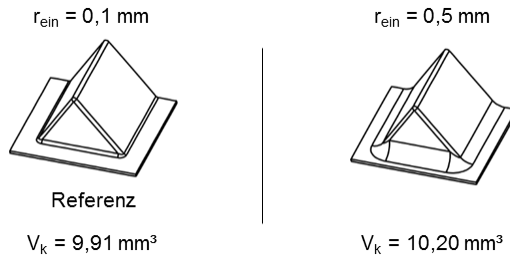


Bild 64: Angestrebte Formelementgeometrien und zugehörige Kavitätsvolumina V_k Variation Einlaufradius

Bild 65b veranschaulicht, dass am Prozessende im Vergleich zur Referenz bei beiden Prozessen kein nennenswerter Einfluss der Einlaufradien auf die Formfüllung V_F zu verzeichnen ist. Da die Erhöhung der Radien mit einer mäßigen Vergrößerung der Werkzeugkavitäten verbunden ist, fällt die relative Formfüllung allerdings geringer aus. Bezüglich der Werkstoffverteilung ist beim Vorwärtsfließpressen eine Verlagerung des Werkstoffvolumens aus der Blechaußenfläche in die Blechmitte zu verzeichnen (Bild 65a).

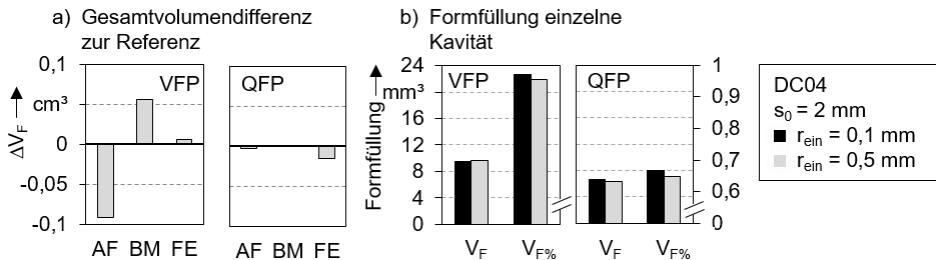


Bild 65: Einfluss der Einlaufradien auf die Werkstoffverteilung am Prozessende

Der radial gerichtete Einlaufradius führt zur Umlenkung des Werkstoffflusses im Radienbereich in Richtung der Blechachse. Da die Kavitäten beim Querfließpressen umlaufend geschlossen sind, wird dieser Effekt durch den jeweils gegenüberliegenden Einlaufradius ausgeglichen, so dass der Stofffluss in diesem Fall nicht beeinflusst wird.

Die resultierenden Prozesskräfte sind in Bild 66 dargestellt. Als Hypothese wurde angenommen, dass die Vergrößerung der Einlaufradien zu einer Erleichterung des Werkstoffeinfbaus aus dem Verdrängungsbereich führt und in Folge der Stempelkraftbedarf reduziert wird.

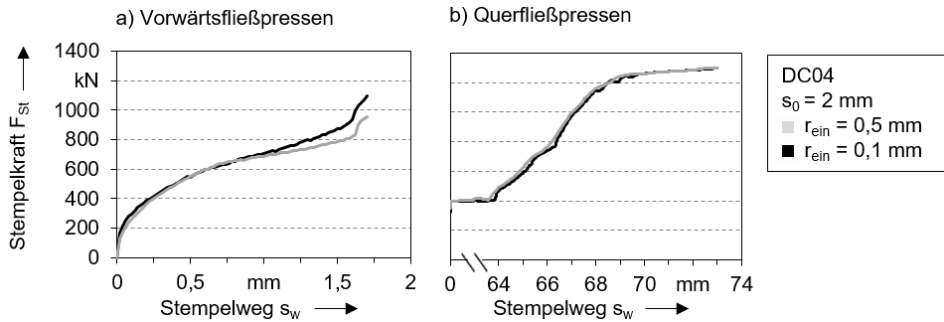


Bild 66: Einfluss der Einlaufradien auf die Stempelkraft F_{St}

Die Stempelkraft-Stempelweg Verläufe in Bild 66 bestätigen diese Annahme für beide Prozessarten weitgehend nicht. Lediglich beim Vorwärtsfließpressen ist ab einem Stempelweg von ca. 1 mm eine mäßige Reduktion der Prozesskraft zu verzeichnen, die ihr Maximum am Prozessende ($\Delta F_{St} = -11 \%$) erreicht. Ursächlich für den unveränderten Kraftbedarf ist, dass die Prozesskraft für die Umformung durch die Gesamtheit der im Prozess erreichten Umformgrade bestimmt wird. Durch die Radienvergrößerung werden die Umformgrade in unmittelbarer Umgebung der Einlaufradien zwar über eine größere Fläche verteilt und somit Spannungsspitzen reduziert, jedoch das Integral der Umformgrade über der gesamten Massivumformzone nicht verändert.

Obwohl die Einlaufradien einen geringen Effekt auf die Stoffflussdynamik der Prozesse ausüben, sind diese von Bedeutung für die Werkzeugauslegung. In Abschnitt 6.2.1 und 6.2.2 wurde bereits dargelegt, dass die Einlaufradien (r_{ein}) zu den höchstbeanspruchten Werkzeugbereichen zählen. Wie in Bild 67a gezeigt, führt eine Vergrößerung der Radien zu einer Reduktion der Kontaktnormalspannungen im Einlaufbereich der Kavitäten.

a) Kontaktnormalspannungen b) Maximalspannungen Einlaufradien

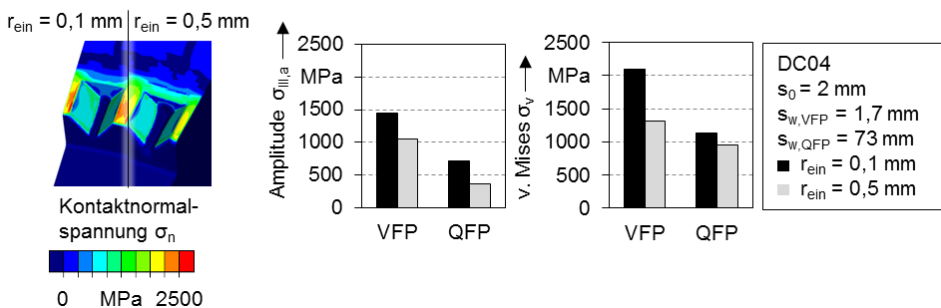


Bild 67: Einfluss der Einlaufradien beim Vorwärtsfließpressen auf die a) Kontaktnormalspannungen und die b) Vergleichsspannungen für beide Prozesse am Prozessende

Als Folge ist eine deutliche Verringerung der maximalen Vergleichsspannungen um 37,4 % bzw. 16,0 % (VFP bzw. QFP) sowie der betragsmäßig größten Spannungsamplitude ($\sigma_{III,a}$ vgl. Bild 37 und Bild 47) um 28,0 % bzw. 50 % (VFP bzw. QFP) am Kavitätseinlauf festzustellen (Bild 67b).

6.3.2 Kavitätswolumen

Auf Basis der Analyse der geometrischen Kavitätsparameter lässt sich die Hypothese ableiten, dass die erzielte Formfüllung ausschließlich vom Volumen der Werkzeugkavitäten abhängig ist, d.h. die einzelnen Geometriemerkmale stellen keine unabhängigen Einflussgrößen dar. Zur Untersuchung dieser Annahme sind in Bild 68 für beide Prozessarten sowohl die relative als auch absolute erzielte Formfüllung über das zugrundeliegende, gesamte Kavitätswolumen im Prozess aufgetragen. Genutzt werden hierfür alle Datenpunkte, die für die in der vorangehenden Analyse der geometrischen Kavitätsparameter verwendet worden sind.

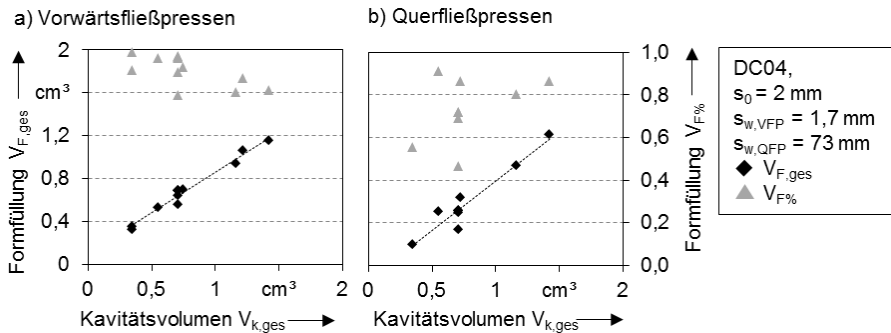


Bild 68: Korrelation zwischen gesamten Kavitätswolumen $V_{k,ges}$ und gesamter, absoluter ($V_{F,ges}$) bzw. relativer ($V_{F\%,ges}$) Formfüllung für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen am Prozessende

Die Darstellung zeigt, dass eine starke Korrelation zwischen der erzielten absoluten Formfüllung und dem Kavitätswolumen besteht. Der Korrelationskoeffizient beträgt für das Vorwärtsfließpressen und das Querfließpressen $r = 0,99$ bzw. $r = 0,96$. Das Kavitätswolumen ist demnach bei gleichem Stempelweg und Halbzeug der dominierende Faktor für die resultierende Werkstoffverteilung im Bauteil. Da bei keiner Simulationsvariante eine vollständige Formfüllung erreicht wurde, ist dieser Zusammenhang nicht durch die geometrische Beschränkung der Formfüllung ab $V_{F\%} = 100 \%$ beeinflusst.

Der Korrelation liegt zugrunde, dass der Werkstofffluss aus dem Verdrängungsbereich in die Kavitäten vom Verhältnis $\Delta V_V / V_{k,ges}$ abhängig ist. Bei geringerem Gesamtkavitätsvolumen $V_{k,ges}$ wird der Werkstofffluss in die Kavitäten erschwert, da die Verfestigung in der Massivumformzone und damit der Verfestigungsgradient zur Blechumformzone über den Prozess zunimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fläche zwischen den Kavitäten im Verdrängungsbereich durch die Verringerung des Kavitätsvolumens häufig indirekt vergrößert wird. Aus Abschnitt 6.2 ist bekannt, dass die größten Umformgrade in diesem Bereich auftreten (vgl. Bild 33 und Bild 42). Mit steigendem Flächenanteil fällt folglich die Gesamtheit der Umformgrade im Verdrängungsbereich größer aus. Unabhängig davon werden die Umformgrade in den Formelementen durch die Kavitätsgeometrie selbst beeinflusst. Da eine Änderung der Kavitätsgeometrie häufig mit einer Änderung des Kavitätsvolumens einhergeht, besteht eine Korrelation zwischen V_k und Formfüllung. Ursächlich ist jedoch nicht das Kavitätsvolumen sondern die zugrundeliegende Gestalt der Kavität, wie die Analyse der relativen Formfüllung in Bild 68 veranschaulicht. Durch Verwendung von $V_{F\%}$ werden die volumenunabhängigen Einflüsse isoliert und es zeigt sich, dass, im Gegensatz zur absoluten Formfüllung V_F , bei der relativen Formfüllung nur eine mäßige bis schwache Korrelation festzustellen ist, deren Vorzeichen zudem für die Prozessarten unterschiedlich ausfällt (VFP: $r = -0,65$, QFP: $r = 0,42$). Damit ist belegt, dass das Maß der Formelementausformung nicht durch das Kavitätsvolumen und unabhängig von Kavitätsgeometrie und Kavitätsabstand beschrieben werden kann. Diese Feststellung ist insofern von Bedeutung, als dass letztlich ausschließlich die relative Formfüllung für die Qualität der Ausformung ausschlaggebend ist.

6.3.3 Abstand zwischen gleichartigen Formelementen

Zur Untersuchung des Einflusses des Formelementabstandes auf das Prozessergebnis wird die Referenzsimulation ($a = 5^\circ$) Simulationsvarianten mit den Formelementabständen $a = 10^\circ$ und $a = 20^\circ$ gegenübergestellt. Die angestrebten Formelementausformungen mit den Abstandswinkeln 5° und 10° sind in Bild 74 veranschaulicht. Da die Kavitätsgeometrie selbst in allen Fällen gleich bleibt, ist das Kavitätsvolumen der einzelnen Kavitäten V_k in jedem der untersuchten Fälle identisch.

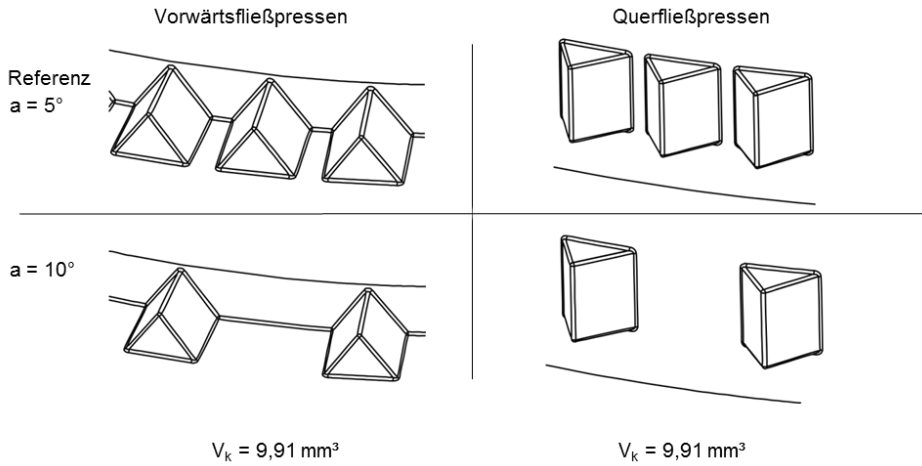


Bild 69: Angestrebte Formelementgeometrien und zugehörige Kavitätsvolumina V_k Variation Formelementabstand ($a = 20^\circ$ nicht abgebildet)

In Bild 70 ist das Ergebnis bezüglich der resultierenden Formfüllung und Werkstoffverteilung dargestellt. Mit steigendem Abstand der Kavitäten erhöht sich das Verhältnis zwischen Verdrängungsbereich und Fließpresszone. Dies hat zur Folge, dass ein vergleichsweise höheres Werkstoffvolumen bei gleichem Stempelweg verdrängt wird und die Verfestigung in der Massivumformzone insgesamt ansteigt.

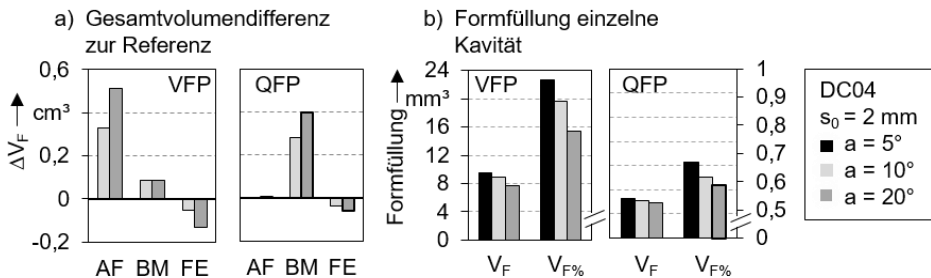


Bild 70: Einfluss des Formelementabstands auf die Werkstoffverteilung am Prozessende

Durch die daraus resultierende Vergrößerung des Verfestigungsgradienten wird der Stofffluss in Richtung Blechmitte und Blechaußenfläche verstärkt (Bild 70a) und die absolute und relative Formfüllung unabhängig von der Prozessvariante gesenkt (Bild 70b). Die größte Formfüllung wird folglich mit möglichst geringen Formelementabständen erreicht. Der Anstieg der Verfestigung spiegelt sich in den Kraft-Weg-Verläufen wieder, die in Bild 71 abgebildet sind. Die Kurven bestätigen den erhöhten Kraftbedarf bei größeren Formelementabständen und für beide Prozesse.

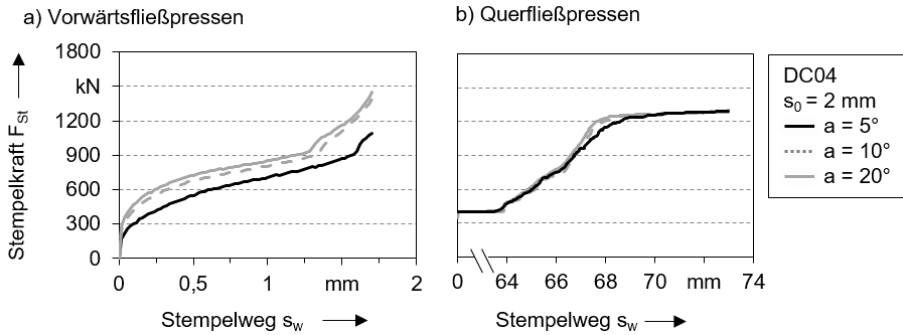


Bild 71: Einfluss des Formelementabstands a auf die Stempelkraft F_{St}

6.3.4 Wechselwirkung zwischen unähnlichen Formelementen

Das Bestreben nach einer hohen Funktionsintegration bedingt häufig die Herstellung von Bauteilen mit mehreren, geometrisch unähnlichen Formelementen. Um Effekte und Wechselwirkungen zu identifizieren, die mit der Ausformung ungleichartiger Funktionselemente durch Fließpressen einhergehen, wird die simultane Ausformung der beiden Extremfälle Zahn ($w = 34^\circ$) und Mitnehmer mit einem Flankenwinkel von $w = 34^\circ$, bzw. 0° an einem Blech untersucht. Bild 72 veranschaulicht die angestrebten Formelemente für die untersuchte Referenz (nur ein Elementtyp) und die kombinierte Zahn- und Mitnehmeranordnung (Kombination) sowie die zugehörigen Kavitätsumfänge V_k .

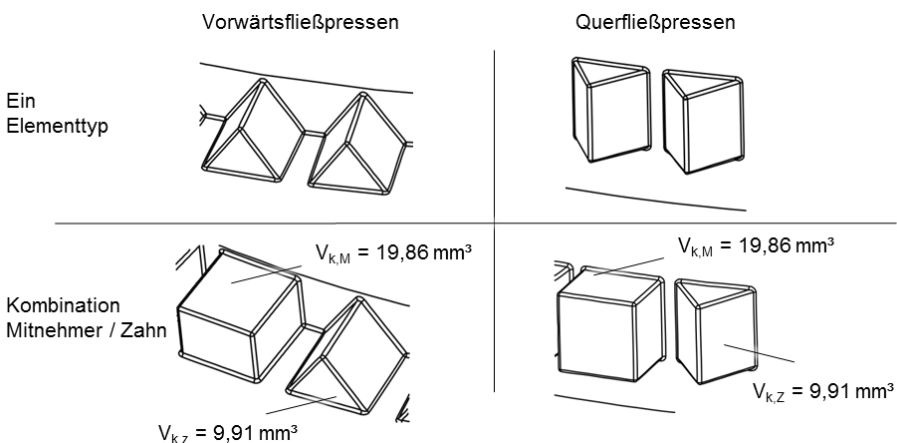


Bild 72: Angestrebte Formelementgeometrien und V_k Variation Wechselwirkung ($a = 5^\circ$)

Für die Untersuchung werden die beiden Formelementtypen nebeneinander unter verschiedenen Abständen ($a = 5^\circ / 10^\circ / 20^\circ$) ausgeformt und hinsichtlich der in Abschnitt 6.1 festgelegten Zielgrößen analysiert.

Bild 73 zeigt die am Prozessende resultierende Formfüllung für beide Anordnungsvarianten unter unterschiedlichen Formelementabständen. Die Positionierung zweier geometrisch ungleichartiger Formelemente an einem Blech resultiert demnach in einer gegenseitigen Beeinflussung der Ausformung. Im Falle des Zahnelements ist eine Erhöhung der Formfüllung festzustellen, wenn neben dem Formelement statt eines weiteren Zahns ein Mitnehmer positioniert wird (Bild 73a). Umgekehrt sinkt die Formfüllung des Mitnehmerelements, wenn neben diesem ein Zahnelement angeordnet wird (Bild 73b).

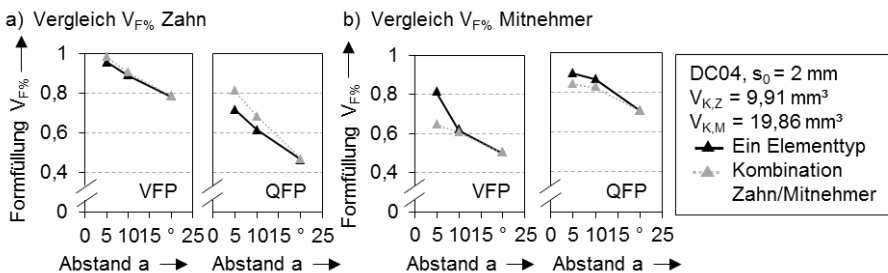


Bild 73: Formfüllung bei wechselseitiger Anordnung Zahn / Mitnehmer

Die Wechselwirkung ist anhand der in Abschnitt 6.3.1 identifizierten Einflüsse der geometrischen Formelementgestalt auf den globalen Stofffluss in der Massivumformzone zurückzuführen. Demnach bewirkt eine Erhöhung des Flankenwinkels eine verstärkte Verdrängung des Werkstoffs aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche. Wird nun neben einem Mitnehmer statt eines weiteren Mitnehmers mit Flankenwinkel $w = 0^\circ$ ein Zahnelement mit hohem Flankenwinkel ($w = 34^\circ$) angeordnet, so wird der Werkstofffluss aus der Massivumformzone durch den Einfluss des Zahnelements insgesamt erhöht. Die damit einhergehende Steigerung der Fließgeschwindigkeit in die Blechmitte führt zu einer verstärkten Deformation des Mitnehmers in dieselbe Richtung und damit zu einer Verringerung der Formfüllung in der zugehörigen Mitnehmerkavität. Umgekehrt wird durch die Positionierung eines Mitnehmerelements neben einem Zahnelements statt eines weiteren Zahnelements der globale Stofffluss in die umliegenden Blechbereiche durch den geringen Flankenwinkel des Mitnehmers insgesamt reduziert. Folglich gelangt im Zuge der Umformung mehr Werkstoff in die Zahnkavitäten und die Formfüllung steigt sowohl relativ als auch absolut an.

Mit zunehmendem Abstand der Formelemente sinkt in jedem Fall die Formfüllung der Funktionselemente, was in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 6.3.1 steht. In Bezug auf die Wechselwirkung zwischen geometrisch unähnlichen Formelementen ist zudem festzustellen, dass mit zunehmendem Abstand der Wechselwirkungseffekt sinkt. Ein Abstandswinkel von $\alpha = 20^\circ$ ist ausreichend, um im vorliegenden Fall die Wechselwirkung vollständig verschwinden zu lassen. Ursächlich hierfür ist, dass sich mit steigendem Abstand die Zahnzwischenfläche und damit das Verhältnis zwischen Verdrängungsbereich und Fließpresszone erhöht. In Folge sinkt der relative Einfluss der einzelnen Werkzeugkavitäten auf den globalen Stofffluss ab und Unterschiede können nicht mehr erfasst werden.

6.3.5 Werkstoffkenngrößen

Neben der geometrischen Gestalt und Positionierung der Formelemente wird die Bauteilformung durch die Wahl des Werkstoffs beeinflusst. Dies wurde prinzipiell bereits von KOCH [14] für das Fließpressen festgestellt. Unklar ist jedoch bisher, auf welche Werkstoffeigenschaften dies im Detail zurückzuführen ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Referenzsimulationen des Vorwärts- und Querfließpressprozesses (DCo4) denen identischer Simulationen unter Verwendung des Bauteilwerkstoffs DP600 gegenübergestellt. Die Fließkurve von DP600 zeichnet sich im Vergleich zu DCo4 sowohl durch einen höheren Fließbeginn als auch durch eine stärker ausgeprägte Verfestigung aus. Um den Einfluss dieser Werkstoffcharakteristika weiter separieren zu können, werden zudem Simulationen mit Werkstoffen analysiert, deren Fließbeginn ausschließ- lich verdoppelt oder alternativ deren Verfestigung um den Faktor 2 erhöht worden ist. Die verwendeten Fließkurven sind in Bild 74 festgehalten.

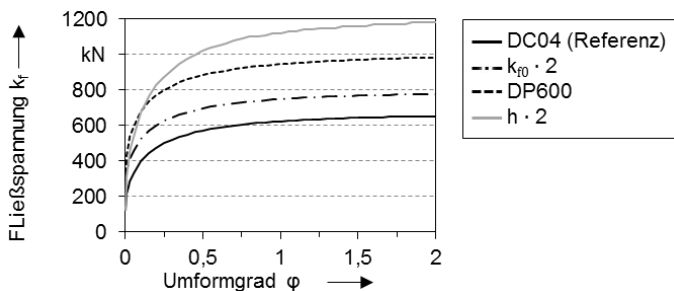


Bild 74: Fließkurven zur Analyse des Einflusses von Werkstoffkenngrößen

Der Einfluss des Werkstoffs auf die Bauteilformung ist in Bild 75 dargestellt. Eine Erhöhung des Fließbeginns bei gleichbleibender Verfestigung führt demnach zu einer Verbesserung der Formfüllung bei beiden Prozessvarianten. Wird der Fließbeginn erhöht, verringert sich das Verhältnis zwischen der verfestigungsbedingten Fließspannungserhöhung des Werkstoffs und der absoluten Fließspannung zu einem gegebenen Prozesszeitpunkt. Folglich sinkt der Gradient zwischen der stark umgeformten Massivumformzone und der gering verfestigten Blechumformzone, wodurch mehr Werkstoff in die Werkzeugkavitäten gelangt und die relative und absolute Formfüllung ansteigen.

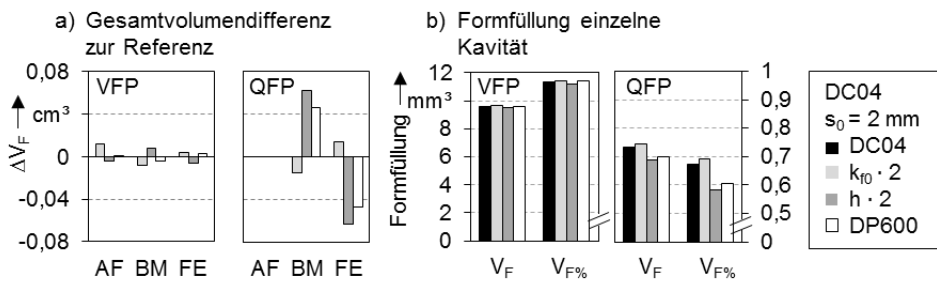


Bild 75: Einfluss des Werkstoffs auf die Werkstoffverteilung am Prozessende

Wird dagegen der Fließbeginn konstant gehalten und die Steigung der Fließkurve erhöht, so stellt sich mit ansteigender Umformung über den Prozessverlauf ein erhöhter Verfestigungsgradient zwischen der Massivumformzone und den umliegenden Blechbereichen ein. In Folge kommt es zu einer Verringerung der Formfüllung und zu einer Erhöhung des Blechvolumens in der Blechumformzone (Bild 75a/b). Auffällig ist, dass dieser Effekt beim Querfließpressen stärker ausgeprägt ist als im Vorwärtsfließpressprozess. Dies ist damit zu erklären, dass die Umformgrade in der Massivumformzone des Querfließpressprozesses im Mittel höher liegen (vgl. Abschnitt 6.2). Da sich mit steigenden Umformgraden die Fließgrenze zunehmend von der Referenzfließkurve unterscheidet, fällt in Folge der Verfestigungsgradient zwischen MUZ und BUZ entsprechend höher aus. DP600 weist sowohl eine stärkere Verfestigung, als auch einen höheren Fließbeginn auf. Als Konsequenz wird eine Überlagerung der einzelnen Einflüsse bewirkt. Beim Vorwärtsfließpressen überwiegt der hinsichtlich der Formfüllung vorteilhafte Einfluss des höheren Fließbeginns, so dass am Prozessende eine im Vergleich zur Referenz geringfügig erhöhte Formfüllung festzustellen ist (Bild 75a/b). Im Unterschied dazu verringert sich die Formfüllung im Querfließpressprozess, was durch den stärker ausgebildeten formfüllungsreduzierenden Effekt des Verfestigungsgradienten zu erklären ist.

Die resultierenden Prozesskräfte sind in Bild 76 dargestellt. Erwartungsgemäß folgt der Stempelkraftverlauf dem Niveau der jeweils zugrundeliegenden Fließkurve. Eine Erhöhung der Fließkurve durch eine Anhebung des Fließbeginns oder alternativ durch eine Steigerung des Verfestigungsverlaufs resultiert demnach in einer Vergrößerung des Kraftbedarfs.

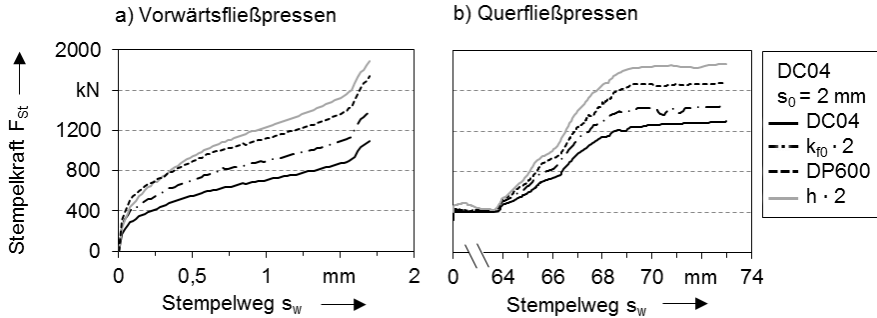


Bild 76: Einfluss von Werkstoffkenngrößen auf die Stempelkraft F_{st}

6.3.6 Gegenhalterkraft

Als prozessspezifische Größen stellen die Kräfte des Gegenhalters und Niederhalters eine weitere Möglichkeit zur Einflussnahme auf das Prozessergebnis dar. Auf die Untersuchung des Niederhalters wird an dieser Stelle verzichtet, da dieser einerseits beim Querfließpressen entfällt und andererseits in Bezug auf das Vorwärtsfließpressen bereits von KOCH [14] analysiert worden ist. Höhere Niederhalterkräfte sind demnach eine Möglichkeit, den Stofffluss in den Niederhalterbereich (Blechaußenfläche) zu reduzieren, wodurch eine Steigerung der Formelementausformung erreicht wird.

Zur Analyse des Einflusses des Gegenhalters auf die Bauteilausformung wird die Referenzsimulation einer Simulation mit Gegenhalterkraft $F_G = 40 \text{ kN}$ bzw. $F_G = 1000 \text{ kN}$ gegenübergestellt. Wie aus Bild 77 ersichtlich wird, führt der Einsatz von höheren Gegenhalterkräften bei beiden Prozessen zu einer Reduktion des Stoffflusses in die Blechmitte zugunsten der relativen und absoluten Formfüllung. Im Fall des Vorwärtsfließpressens wird hierbei eine fast vollständige Ausformung der Formelemente erreicht ($V_{F\%} = 99,63 \%$ bei $F_G = 1000 \text{ kN}$). Allerdings wird ebenfalls ersichtlich, dass ein Teil des Werkstoffs in die Blechaußenfläche umgelenkt wird und nicht in die Kavitäten gelangt. Im Querfließpressprozess ist dagegen ein weiterer Anstieg des Volumens in der Außenfläche bei größeren Kräften aufgrund deren geometrischen Umschließung durch das Werkzeug nicht möglich. Dementsprechend wird der gesamte umgelenkte

Anteil des Werkstoffvolumens in die Werkzeugkavitäten geleitet, was sich in einer vergleichsweise großen Steigerung der Formfüllung niederschlägt.

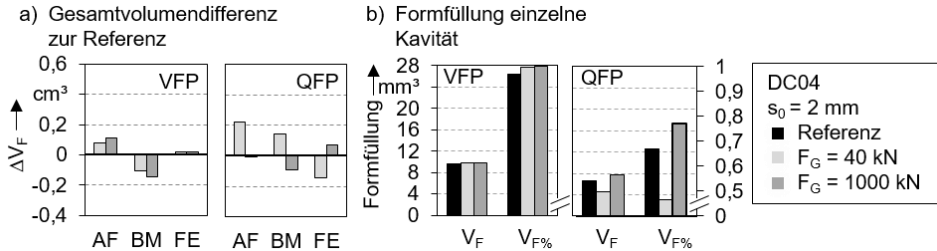


Bild 77: Einfluss der Gegenhalterkraft auf die Werkstoffverteilung am Prozessende

Die Stempelkraft-Weg-Verläufe in Bild 78 zeigen, dass die Erhöhung der Gegenhalterkraft bei beiden Prozessen zu einem ausgeprägten Anstieg des Kraftbedarfs führt.

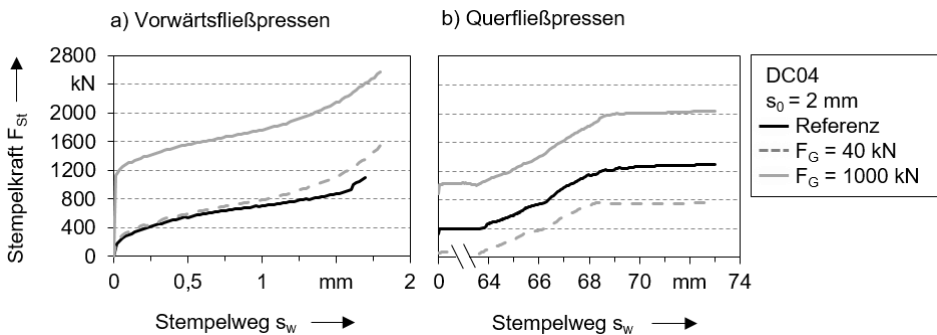


Bild 78: Einfluss der Gegenhalterkraft auf die Stempelkraft F_{St}

Wie an dem deutlich veränderten Kraftniveau am Prozessbeginn zu erkennen ist, ist dies überwiegend durch die Gegenhalterkraft selbst begründet, die dem Stempel entgegenwirkt. Hinzu kommt, dass die Blechaufdickung in der Blechmitte reduziert und die Ausformung der Formelemente steigt. Als direkte Folge steigt die Gesamtverfestigung im Prozess an. Dies spiegelt sich in der leicht erhöhten Steigung der Kraft-Weg-Kurven wieder, die insbesondere beim Vorwärtsfließpressen ausgeprägt ist.

6.4 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen der durchgeführten Prozessanalyse konnten zwei Prozessarten des Fließpressens zur Ausformung von Funktionselementen an Blechronden etabliert und untersucht werden. Grundsätzlich weisen die beiden Prozesse des Vorwärts- und Querfließpressens weitgehend vergleichbare Charakteristika auf. So ist für die Ausformung gleicher Formelemente trotz prinzipbedingter Unterschiede im Werkzeugaufbau ein ähnlicher Kraftbedarf erforderlich, wobei die erzielten Umformgrade in der Massiv- und Blechumformzone vergleichbare Dimensionen erreichen. Der resultierende Verfestigungsgradient zwischen den beiden Zonen ist als ursächlich für die in beiden Prozessarten auftretende unzureichende Formelementausformung anzusehen.

Die Charakteristik der Werkzeugbeanspruchung ist zwischen den Prozessen übertragbar. In beiden Fällen sind insbesondere die hohen mechanischen Beanspruchungen als versagenskritisch einzustufen, die sich sowohl durch hohe absolute Spannungen als auch hohe Spannungsamplituden auszeichnen. Diese treten vorrangig in den Kavitätsradien r_{el} , den Einlaufradien r_{ein} sowie an in Stempelrichtung angebrachten Absätzen und Übergängen auf. Der Kraftbedarf des Stempels lässt sich dabei über den Prozessverlauf mit der Beanspruchung positiv korrelieren. Aufgrund der vergleichsweise geringen Kavitätsdimensionen im Millimeterbereich treten nur stark eingeschränkte Gleitwege auf, wodurch der tribologischen Beanspruchung trotz hoher Kontaktnormalspannungen eine mutmaßlich untergeordnete Bedeutung zukommt.

Auf Basis der Referenzprozessanalyse sind grundlegend zwei Bedingungen abzuleiten, die für eine vollständige Formfüllung bzw. Formelementausformung notwendig sind:

1. In der Massivumformzone muss zu Prozessbeginn ausreichend Werkstoffvolumen zur Verdrängung in die Werkzeugkavitäten zur Verfügung stehen. Das verdrängbare Werkstoffvolumen muss dabei mindestens dem Gesamtvolumen der Werkzeugkavitäten entsprechen.
2. Bis zum Prozessende muss ausreichend Werkstoff zur Formelementausformung in der Massivumformzone verbleiben.

Punkt 1 kann für ein gegebenes Kavitätsvolumen neben einer Veränderung des Stempelhubs nur durch die Dimension der Blechrunde am Prozessbeginn beeinflusst werden. In diesem Punkt besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen den untersuchten Prozessvarianten. Aufgrund der

Krafteinleitung senkrecht zur Blechnormalen ist das beim Querfließpressen zur Verfügung stehende Werkstoffvolumen prinzipbedingt deutlich höher als beim Vorwärtsfließpressen. Im Gegensatz zum Vorwärtsfließpressen ist zudem eine Steigerung des verdrängbaren Werkstoffvolumens neben einer Erhöhung der Rondendicke auch durch eine Vergrößerung des Rondendurchmessers möglich. Aus diesem Grund ist das Potential des Querfließpressens zur Realisierung von großvolumigen Formelementen größer einzustufen als das des Vorwärtsfließpressens.

Punkt 2 wird durch den Werkstofffluss aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche bestimmt (Blechumformzone). Hinsichtlich der Bauteilumformung ist unabhängig von der Wahl der Formelemente im Allgemeinen eine vollständige Unterbindung dieser Stoffflusskomponente als ideal anzusehen. Zum einen wird damit die Werkstoffausnutzung in der Massivumformzone maximiert und damit die Anforderungen an Punkt 1 minimiert. Zum anderen wird eine unkontrollierte Blechaufdickung bzw. ein Blechverzug außerhalb der Massivumformzone vermieden und im Umkehrschluss die Maßhaltigkeit des Bauteils gesteigert. Der Stofffluss in die einzelnen Blechbereiche ist von der geometrischen Gestalt der Werkzeugkavitäten, der Werkstoffwahl sowie der prozessspezifischen Gegen- und Niederhalterkraft abhängig, wie in Tabelle 10 zusammenfassend dargestellt ist. Das Werkstoffvolumen selbst ist dabei als vermengte Einflussgröße hinsichtlich der Beschreibung der Formfüllung nicht als ausreichend anzusehen.

Die Einflüsse der einzelnen geometrischen und werkstoffseitigen Größen auf die Formelementumformung ($V_{F\%}$) sind auf die unterschiedlichen, in der Massivumformzone erreichten Umformgrade zurückzuführen, die letztlich den Verfestigungsgradienten im Bauteil dominierend bestimmen. Gegen- und Niederhalterkräfte wirken dagegen als kraftschlüssige Fließbehinderung zur Reduzierung des Stoffflusses in die Blechmitte und Blechaußenfläche. Die Ausformung der einzelnen Formelemente ist nicht unabhängig voneinander, sondern wechselwirkt über den gemeinsam bestimmten globalen Stofffluss in der Massivumformzone. Zur Minimierung des Wechselwirkungseffekts ist ein möglichst großer Abstand zwischen den geometrisch ungleichartigen Formelementen anzustreben. Für die untersuchten Prozesse hat sich hierfür ein Mindestabstand von $\alpha = 20^\circ$ als ausreichend erwiesen, um die Wechselwirkung praktisch vollständig aufzuheben.

Tabelle 10: Zusammenfassung und Bewertung der Prozesseinflussgrößen

		Prozessantwort			
		Prozesskraft F_{St} / Werkzeug- beanspruchung	Formfüllung V_F	Formfüllung $V_{F\%}$	Stofffluss Blechmitte/- außenfläche
Prozessparameter	Flankenwinkel w	↑	↗	↗ ↘ *	↗
	Kavitätsiefe t	↑	↓	↘	↓
	Kavitätsbreite b	↑	↓	↗ ↘ *	↓
	Kavitätslänge l	↑	↓	↗	↓
	Einlausradius r	↑	↓	○	○
	Abstand a	↑	↗	↘	↗
	Fließbeginn $R_{p0,2}$	↑	↗	↗	↗
	Verfestigung	↑	↗	↘	↘
	Gegenhalterkraft F_G	↑	↗	↗	↓
	Niederhalterkraft F_N	↑	↗	↗	↓

Legende	Effekt erhöht ↑	Effekt gesenkt ↓	Einfluss positiv ↗ ↘	Einfluss negativ ↘ ↗	Kein Einfluss ○
---------	-----------------	------------------	----------------------	----------------------	-----------------

* Steigerung $V_{F\%}$ bei geschlossener Kavität (QFP) / Verringerung bei offener Kavität (VFP)

Die absolute Werkstoffverteilung im Bauteil am Prozessende wird im Gegensatz zur Formelementausformung ($V_{F\%}$) zusätzlich zu einer Beeinflussung durch den Verfestigungsgradienten durch das Verhältnis von Gesamtkavitätsvolumen ($V_{k,ges}$) zu verdrängtem Werkstoffvolumen (ΔV_v) bestimmt. Je höher dieses Verhältnis ausfällt, desto weniger Werkstoff gelangt aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche, wodurch dort in Folge die Blechaufdickung bzw. -aufwölbung reduziert wird. Aus Sicht der Prozessauslegung ist daher anzustreben, das ver-

drängbare Werkstoffvolumen nicht größer zu gestalten, als für die Ausformung der Formelemente notwendig ist.

Die für den Prozess notwendige Stempelkraft wird maßgeblich durch die Gesamtheit der Umformgrade im Bauteil beeinflusst, die letztlich von Kavitätsgeometrie und Werkstoffwahl abhängig sind und betragsmäßig in der Massivumformzone dominieren. Im Gegensatz zur relativen Formfüllung ist jedoch nicht der Verfestigungsgradient im Bauteil, sondern die Gesamtverfestigung ausschlaggebend. Dementsprechend steht die Vergrößerung des Kraftbedarfs nicht in einem festen Verhältnis zur Formelementausformung, wie in Tabelle 10 nachvollzogen werden kann.

Die sich aus der Prozessanalyse ergebenden Wirkmechanismen und Herausforderungen sind in Tabelle 11 den Zielen einer möglichst effizienten Prozessgestaltung gegenübergestellt.

Tabelle 11: Aus der Prozessanalyse abgeleitete Herausforderungen und Lösungsansätze

Ziel	Herausforderung	Lösungsansatz
Vollständige Formfüllung ($V_{F90} = 100\%$)	Werkstofffluss aus Massivumformzone in umliegende Blechbereiche	Reduktion Verfestigungsgradient / Fließbehinderung
Maximierung Werkstoffausnutzung	Werkstofffluss aus Massivumformzone in umliegende Blechbereiche	Reduktion Verfestigungsgradient / Fließbehinderung
Minimierung Kraftbedarf ($F_{St} = \min.$)	Gesamtverfestigung	Reduktion Umformgrade im Bauteil / Reduktion Fließspannung

Sowohl die Ziele einer vollständigen Formelementausformung und der Maximierung der Werkstoffausnutzung sind durch eine Reduktion des Werkstoffflusses aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche zu erreichen. Dies ist durch die Minimierung des Verfestigungsgradienten oder alternativ durch die Verwendung einer Fließbehinderung zu realisieren. Auf Möglichkeiten zur Fließbehinderung wird nachfolgend in Kapitel 7 näher eingegangen. Eine Reduktion der Stempelkraft ist dagegen nur durch die Verringerung der Gesamtumformgrade oder durch die Wahl eines Werkstoffs mit geringerer Fließspannung zu erreichen. Konkrete Lösungsansätze im Rahmen der Prozessgestaltung auf Basis der Erkenntnisse aus Tabelle 10 sind in Tabelle 12 abschließend zusammengefasst.

Tabelle 12: Ansätze zur Prozessoptimierung

Lösungsansatz	Umsetzung in der Prozessauslegung
Reduktion Verfestigungsgradient	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion Kavitätsflankenwinkel w • Erhöhung Verhältnis $V_{k,ges} / \Delta V_V$ durch <ul style="list-style-type: none"> ○ Erhöhung Anzahl Kavitäten ○ Erhöhung Kavitätsvolumen ○ Reduktion Stempelhub • Erhöhung $R_{p0,2}$ • Reduktion Verfestigungsexponent n
Fließbehinderung (vgl. Kapitel 7)	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugung Spannungsgradient • Erzeugung Reibungsgradient
Reduktion Umformgrade	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung Verhältnis $V_{k,ges} / V_V$ durch <ul style="list-style-type: none"> ○ Erhöhung Anzahl Kavitäten ○ Erhöhung Kavitätsvolumen ○ Reduktion Stempelhub • Reduktion $R_{p0,2}$
Reduktion Fließspannung	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion $R_{p0,2}$ • Reduktion Verfestigungsexponent n

7 Strategien zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen

Die in Kapitel 6 durchgeführte Prozessanalyse zeigt, dass eine vollständige Ausformung der Funktionselemente sowohl beim Vorwärts- als auch beim Querfließpressen aufgrund des Werkstoffflusses aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche auch bei hohen Stempelhuben nicht zu erreichen ist. Problematisch ist darüber hinaus, dass der Stofffluss in die Blechmitte zum Bauteilverzug führt und daher zusätzlich die Bauteilqualität beeinträchtigt. Im Folgenden werden aus den Ergebnissen der Prozessanalyse Wirkprinzipien abgeleitet und in Maßnahmen zur Erweiterung der Prozessgrenzen bezüglich der Bauteilformung überführt. Diese werden anschließend experimentell realisiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Praxistauglichkeit untersucht.

7.1 Abgeleitete Maßnahmen und Wirkprinzipien

In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass der Stofffluss aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche, insbesondere in die Blechmitte, ursächlich für die unzureichende Ausformung der Funktionselemente und die Aufdickung/Aufwölbung der Blechmitte ist. Um umgekehrt die Bauteilformung insgesamt zu steigern, ist die Minimierung des unvorteilhaften Stoffflusses anzustreben. Prinzipiell ist dies durch eine Reduktion des Verfestigungsgradienten erreichbar, indem die Kavitätsgeometrie angepasst und der Abstand zwischen den Werkzeugkavitäten minimiert wird. Aus konstruktiven Gründen wird dies jedoch nicht in jedem Fall umsetzbar sein, weshalb alternative Maßnahmen erforderlich sind.

Ein Ansatzpunkt ist die aktive Hemmung des Stoffflusses aus der Massivumformzone. Dies kann beispielsweise durch geometrische Fließbehinderungen oder durch einen Reibgradienten mittels Tailored Surfaces erfolgen. Geometrische Fließbehinderungen in Form von Ziehsecken werden im Folgenden nicht untersucht, da der Einsatz von solchen oder ähnlichen Werkzeugmodifikationen im Allgemeinen in der Umgebung der Formelementausformung erfolgen muss, um den Stofffluss aus der Massivumformzone zu hemmen. Durch die zwangsläufige Einprägung der werkzeugseitigen geometrischen Fließbehinderungen im Prozessverlauf würde die Werkstückgeometrie jedoch unvorteilhaft verändert und die Bauteilbeanspruchbarkeit herabgesetzt werden. Da dies in Hinblick auf das spätere Bauteileinsatzverhalten nicht akzeptiert werden kann, wird

der Ansatz im Rahmen dieser Arbeit verworfen. Eine weitere Möglichkeit, geometrische Fließbehinderungen zu realisieren, ist der Einsatz von Nieder- oder Gegenhaltern. In einem solchen Fall wird der Stofffluss durch die kraftgebundene Umschließung des Werkstücks eingeschränkt.

Ein alternativer Ansatzpunkt ist die Steigerung des für die Ausformung zur Verfügung stehenden Werkstoffvolumens. Prinzipiell kann hierfür ein Halbzeug mit höherer Blechstärke verwendet werden, wodurch mehr Werkstoffvolumen bei gleichem Stempelweg in die Kavitäten verdrängt wird. Dies widerspricht allerdings dem Leichtbaugedanken, da ein Großteil des durch die Blechdickensteigerung eingebrachten Werkstoffvolumens nicht an der Ausformung der Formelemente beteiligt ist. Eine Lösung bieten die bereits in der Umformtechnik etablierten Tailored Blanks mit variabler Blechdicke. Entsprechende Bleche können genutzt werden, um das Werkstoffvolumen gezielt und lokal zu erhöhen und so die Ausformung der Formelemente zu steigern, ohne das Bauteilgewicht unnötig zu erhöhen.

Hervorzuheben ist, dass bezüglich der Anwendung der Ansätze keine spezielle Anpassung der verschiedenen Kavitätsgeometrien vorgenommen werden muss. Zwar unterscheiden sich die erzielten Formfüllungen in Abhängigkeit der Kavitäts- bzw. Formelementgeometrie, jedoch ist in allen Fällen eine möglichst starke Hemmung des unvorteilhaften Stoffflusses aus der Massivumformzone anzustreben. Vorausgesetzt, dass zu Prozessbeginn genug verdrängbares Werkstoffvolumen in der Massivumformzone zur Verfügung steht ($V_V \geq V_{k,ges}$) und der Stofffluss in die umliegenden Blechbereiche ausreichend gering ist, wird eine vollständige Ausformung der Formelemente unabhängig von deren geometrischer Gestalt zwangsläufig erreicht.

7.1.1 Geometrische Fließbehinderung

Eine Maßnahme zur Hemmung des unerwünschten Stoffflusses aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche ist die Nutzung einer kraftgebundenen, geometrischen Fließbehinderung. Für diesen Zweck sind Gegen- und Niederhalter geeignet, deren Kräfte auf das Werkstück gezielt eingestellt werden können. Gemäß Abschnitt 6.3.6 und den Erkenntnissen von KOCH [14] führt eine Vergrößerung der Nieder- und Gegenhalterkräfte zu einer Steigerung der Ausformung gleichartiger Formelemente an einem Blech. Durch die Einbringung von Druck in der Blechumformzone wird ein Spannungsgradient erzeugt, welcher dem Werkstofffluss aus der Massivumformzone entgegenwirkt. Auf diese

Weise wird die Blechaufwölbung bzw. Blechdickenzunahme verringert. Im Extremfall wird die Blechaufdükung durch ausreichend hohe Kräfte vollständig unterbunden und der Prozess nähert sich der Situation in einem Schmiedeprozess mit geschlossenem Gesenk an.

Numerische Analyse

Zur Identifizierung des Maßnahmenpotentials werden Simulationen mit variierenden Nieder- und Gegenhalterkräften durchgeführt und mit der Referenz verglichen. Für die Referenzsimulation werden die Niederhalter- und Gegenhalterkräfte (F_N und F_G) auf 0 kN festgelegt. Für die Variantensimulationen werden ausgehend von der Referenz entweder F_N oder F_G schrittweise erhöht. In Bild 79 ist die dabei erreichte relative Formfüllung $V_{F\%}$ dargestellt. Die Untersuchung zeigt, dass durch die Erhöhung der Nieder- und Gegenhalterkräfte eine Steigerung der Formfüllung grundsätzlich bei beiden Prozessen und bei allen Formelementgeometrien erreicht wird. Dies gilt insbesondere für das Querfließpressen, bei dem eine Erhöhung der relativen Formfüllung um $\Delta V_{F\%} = 26\%$ (Zahn) durch eine Änderung der Gegenhalterkraft F_G von 20 kN auf 720 kN erzielt wird (Bild 79b).

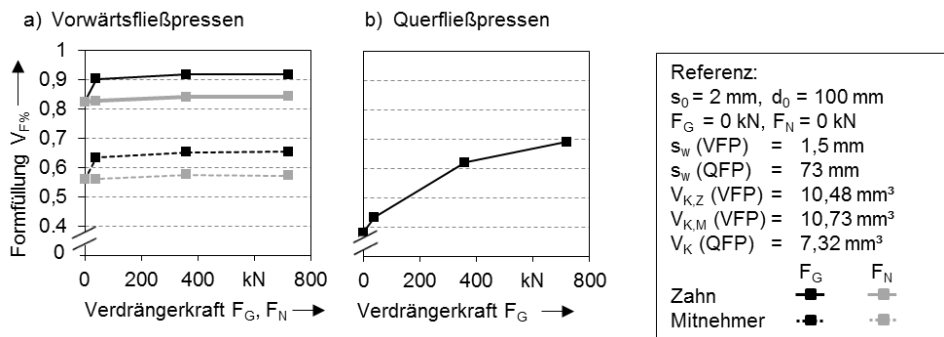


Bild 79: Einfluss der Nieder- und Gegenhalterkraft (F_N bzw. F_G) der einzelnen Werkzeugkomponenten auf die relative Formfüllung am Prozessende (numerisch)

Hervorzuheben ist, dass der Kurvenverlauf mit zunehmender Gegenhalterkraft abflacht. Weitere Steigerungen der Formfüllung erfordern somit überproportional hohe Kräfte. Im Fall des Vorwärtsfließpressens ist grundsätzlich die gleiche Prozessantwort festzustellen, wobei die Steigerung der Formfüllung geringer ausfällt. Im Detail wird durch die Anhebung der Gegenhalterkraft F_G von 20 kN auf 720 kN lediglich eine Steigerung der relativen Formfüllung um $\Delta V_{F\%} = 9,41\%$ (Zahn) und $\Delta V_{F\%} = 9,53\%$ (Mitnehmer) erreicht. Dies ist dadurch begründet, dass im Gegensatz zum Querfließprozess keine vollständige Umschließung des Werkstücks durch das Werkzeug vorliegt. Dementsprechend kann ein

Teil des Werkstoffs in die Blechaußenfläche sowie in den Freiraum zwischen Gegenhalter und Matrize ausweichen, wodurch die Effektivität der Maßnahme reduziert wird.

Experimentelle Realisierung

Die in der numerischen Analyse ermittelten Ergebnisse zeigen, dass eine Steigerung der Formelementausformung sowohl durch eine Erhöhung von F_G als auch F_N erreicht wird. Um dies experimentell zu validieren, werden für den Vorwärts- und Querfließprozess jeweils Umformversuche mit hohen Niederhalter- und Gegenhalterkräften (Mod.) durchgeführt und mit einer Referenz mit geringen Kräften (Ref.) verglichen. Im Detail wird für den Niederhalter beim Vorwärtsfließpressen die Verdrängerkraft auf 720 kN gesteigert. Die Gegenhalterkräfte werden bei beiden Prozessen auf 400 kN angehoben. Höhere Kräfte sind insbesondere beim Querfließpressen wünschenswert (vgl. Bild 79b), jedoch aus Gründen der Gegenhalterbeanspruchbarkeit experimentell nicht umsetzbar. Die verwendeten Parameter sowie die am Prozessende erreichten relativen Formfüllungen $V_{F\%}$ sind in Bild 80 dargestellt. Grundsätzlich bestätigen die experimentellen Ergebnisse qualitativ die der numerischen Simulation aus Bild 79. Bei beiden Prozessarten wird eine Steigerung der Ausformung durch die Anhebung der Nieder- und Gegenhalterkräfte erreicht, wobei die erzielten Steigerungen der relativen Formfüllung $\Delta V_{F\%}$ mit maximal $7\% \pm 4\%$ (DCo4, Zahn) bzw. $8\% \pm 4\%$ (DCo4, Mitnehmer) für das Vorwärtsfließpressen und $16\% \pm 4\%$ für das Querfließpressen auch quantitativ mit den numerischen Ergebnissen vergleichbar sind.

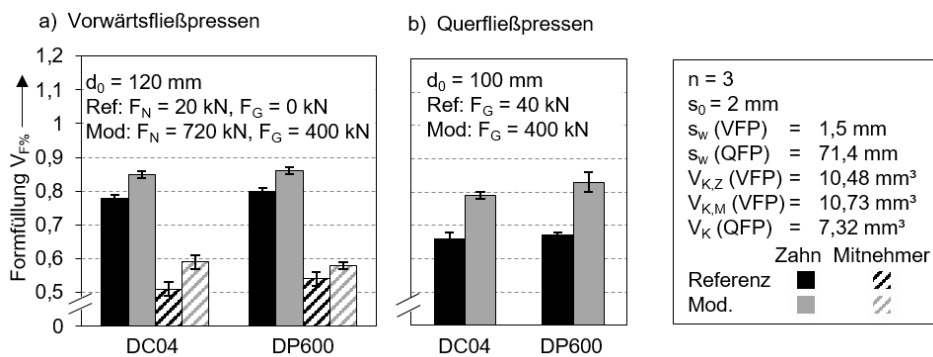


Bild 80: Einfluss der Nieder- und Gegenhalterkraft (F_N bzw. F_G) der einzelnen Werkzeugkomponenten auf die relative Formfüllung am Prozessende (Experiment)

In Bild 81 sind die umgeformten Bauteile der untersuchten Gegen- und Niederhalterkräfte für DCo4 exemplarisch gegenübergestellt.

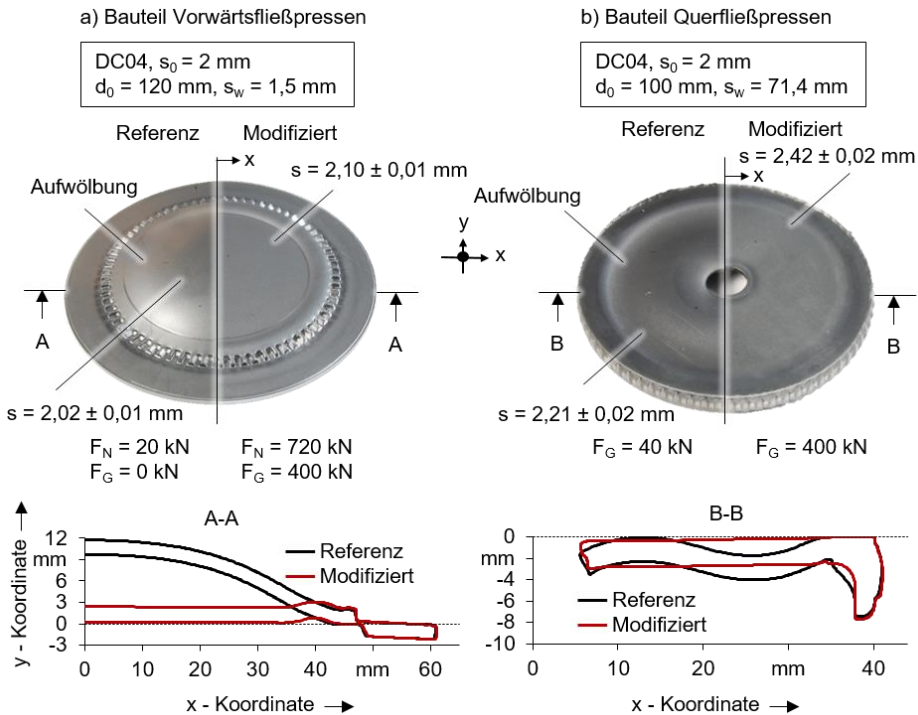


Bild 81: Bauteile und Bauteilfehler bei verschiedenen Nieder- und Gegenhalterkräften

Wie aus den Lichtbildaufnahmen und Profilschnitten ersichtlich wird, führen geringe Verdrängerkräfte zu einer Aufwölbung der Bauteilmitte. Bei ausreichend hohen Kräften wird dieser Prozessfehler zwar vermieden, eine vollständige Unterbindung des Werkstoffflusses in die Blechmitte wird mit den untersuchten Kräften jedoch nicht erzielt. Stattdessen kommt es zu einer Blechaufdickung in diesem Bereich um 10 % für das Vorwärts- und um 21 % für das Querfließpressen.

Die in Bild 82 dargestellten Verläufe der Stempelkräfte zeigen einen deutlich gestiegenen Kraftbedarf mit erhöhten Nieder- und Gegenhalterkräften. Die Kraftdifferenz entspricht bei beiden Prozessen etwa der Änderung der Gegenhalterkraft ΔF_G und ist daher überwiegend mit der auf den Stempel wirkenden Verdrängerkraft zu erklären. Zu beachten ist, dass die Niederhalterkraft im Fall des Vorwärtsfließpressens dem Stempel nicht direkt entgegenwirkt und somit deren Veränderung nicht im Stempelkraft-Weg-Verlauf zu erkennen ist. Da Niederhalterkraft ΔF_N dennoch durch die Presse aufgebracht werden muss, ist diese zum gesamten Kraftbedarf der Maschine hinzuzurechnen.

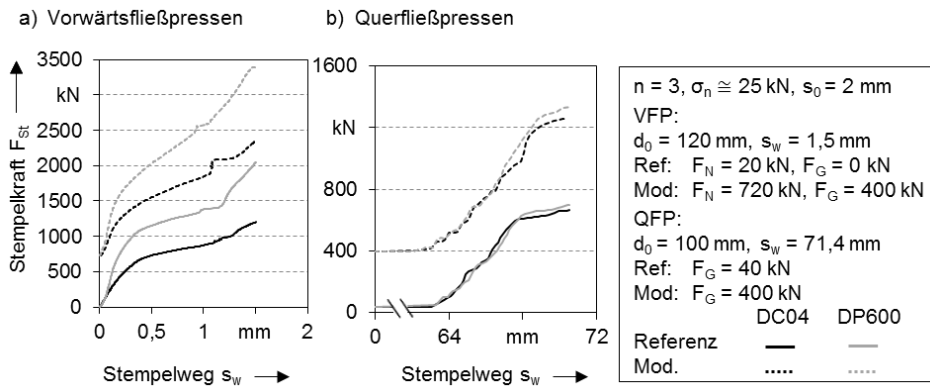


Bild 82: Stempelkraftverlauf bei Einsatz verschiedener Nieder- und Gegenhalterkräfte (F_N , F_G) im Experiment

Bewertung der Maßnahme

Die gezielte Einstellung der Nieder- und Gegenhalterkräfte stellt eine effektive Maßnahme zur Verbesserung der Ausformung von Funktionselementen bei beiden untersuchten Fließpressprozessen dar. Die erreichte Steigerung der Formfüllung mit Maximalwerten von $8\% \pm 4\%$ für das Vorwärtsfließpressen und $16\% \pm 4\%$ für das Querfließpressen zeigt auf, dass der Stofffluss aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche merklich reduziert wird. Als Vorteil ist zu bewerten, dass die Maßnahme einfach anzuwenden ist und keine gesonderte Halbzeug- oder Werkzeugmodifikation im Vorfeld der Umformung erforderlich macht. Des Weiteren wird durch die Reduktion des unerwünschten Stoffflusses in Blechmitte und Blechaußenfläche Bauteilverzug reduziert und die Bauteilqualität insgesamt erhöht. Die bedarfsgerechte Einstellung der Verdrängerkräfte ist somit als einfache, kosten- und zeitsparende Maßnahme zur Verbesserung des Prozessergebnisses zu bewerten. Als nachteilig ist dagegen der deutlich erhöhte Kraftbedarf einzustufen. Konkret wurde in den experimentell untersuchten Fällen eine um bis zu $196,08\% \pm 6,56\%$ (VFP) bzw. $189,62\% \pm 11,78\%$ (QFP) vergrößerte Stempelkraft gemessen. Aufgrund der abnehmenden Effektivität der Maßnahme bei hohen relativen Formfüllungen sind zudem überproportional hohe Prozesskräfte erforderlich, sofern eine vollständige Ausformung der Formelemente erreicht werden soll. In Kombination mit den typischerweise stark ausgeprägten Prozesskräften in der Blechmassivumformung ist zu erwarten, dass der Kraftbedarf eine wesentliche Grenze für die Anwendung der Maßnahme in der Praxis darstellt. Dies gilt gleichzeitig für die mit den Kräften assoziierte Werkzeugbeanspruchung, die eine wesentliche Limitierung aus Sicht der Werkzeugtechnik repräsentiert.

7.1.2 Tailored Surfaces

Tailored Surfaces mit lokal angepassten tribologischen Zonen stellen eine Möglichkeit dar, den unerwünschten Stofffluss aus der Massivumformzone in die umliegenden Blechbereiche zugunsten der Formfüllung zu reduzieren. Hierfür werden die Oberflächen des Halbzeugs lokal derart modifiziert, dass sich ein Reibgradient im Prozess einstellt, der dem Stofffluss in Richtung Blechmitte und Blechaußenfläche entgegenwirkt. Zur Auslegung und Untersuchung von Tailored Surfaces ist es erforderlich, zunächst die in den Prozessen relevanten tribologischen Zonen zwischen Werkzeug und Werkstück zu identifizieren. Bild 83 zeigt hierzu die Aufteilung der Kontaktbereiche zwischen Werkstück und Werkzeug für den Vorwärts- und Querfließpressprozess.

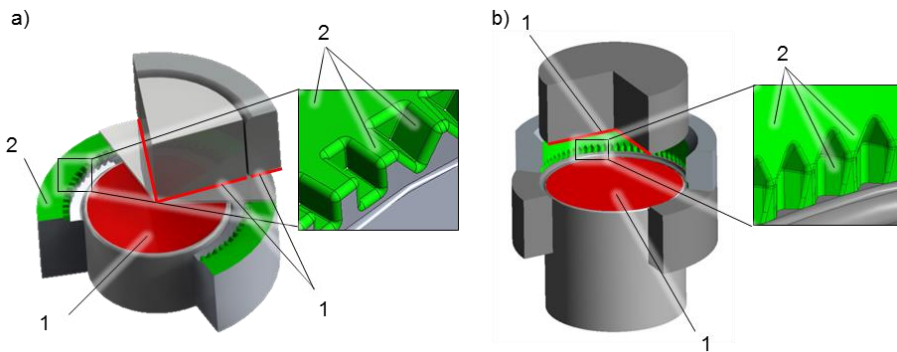


Bild 83: Tribologisch relevante Zonen beim a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen (Ziele: Zone 1: Stoffflusshemmung, Zone 2: Stoffflusserleichterung)

Grundsätzlich sind zwei Zonen zu unterscheiden, die zwischen den Prozessvarianten übertragbar sind. Zone 1 bildet die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Blechumformzone ab. Da der Werkstofffluss aus der Massivumformzone in diese Bereiche unerwünscht ist, ist in der gesamten Zone eine möglichst hohe Reibung einzustellen. Zone 2 stellt hingegen die Matrize mit den Werkzeugkavitäten dar. Um den Stofffluss in die Kavitäten zu erleichtern und die Prozesskräfte zu reduzieren, ist eine möglichst geringe Reibung in diesem Bereich erforderlich.

Numerische Analyse

Um das Potential von Tailored Surfaces zur Verbesserung der Bauteilumformung zu identifizieren, wird eine numerische Analyse an den in Abschnitt 5.2 beschriebenen und experimentell realisierten Vorwärts- und Querfließpressprozessen durchgeführt. Grundsätzlich befinden sich die tribologischen Zonen nach Bild 83 auf verschiedenen Werkzeug-

aktivteilen, deren Einfluss auf die relative Formfüllung $V_{F\%}$ zunächst einzeln untersucht wird. Hierfür wird der Reibfaktor m jeweils für jede Werkzeugkomponente auf $m = 0,3$ angehoben und mit der Referenz RF verglichen, für die ein globaler Reibfaktor von $m = 0,1$ eingestellt ist. Wie in Bild 84 dargestellt, zeigt die Erhöhung des Reibfaktors an jeder Kontaktfläche in Zone 1 einen positiven Einfluss auf die Formfüllung. Sowohl prozess-, als auch formelementübergreifend sind Steigerungen der Formfüllung zu verzeichnen, wobei Werte bis zu $\Delta V_{F\%} = 0,08 \%$ erzielt werden.

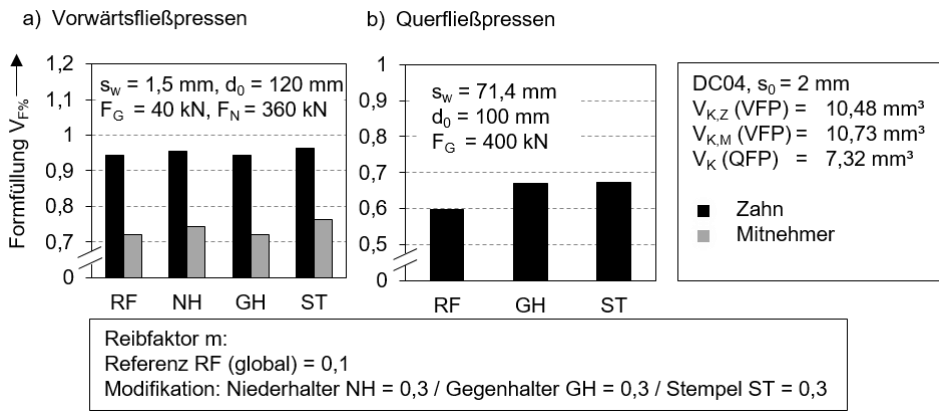


Bild 84: Einfluss der tribologischen Zonen der einzelnen Werkzeugkomponenten auf die relative Formfüllung am Prozessende für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen

Der Effekt der Reibungssteigerung auf die Formfüllung ist für die einzelnen Aktivteile nicht identisch, sondern wird durch die unterschiedlichen, an den Kontaktflächen wirkenden Fließspannungen des Werkstücks bestimmt. Gemäß Reibfaktormodell steigt die Reibkraft in Abhängigkeit der Fließspannung an. Aus Bild 33 ist zu entnehmen, dass die Umformgrade vorrangig am Kontakt zum Stempel beim Vorwärtsfließpressen und gemäß Bild 42 am Kontakt zu Stempel und Gegenhalter beim Querfließpressen stark ausgeprägt sind. Folgerichtig weist die Steigerung des Reibfaktors an diesen Werkzeugteilen den stärksten Einfluss auf die Formfüllung auf.

Es ist festzustellen, dass bei den Mitnehmererelementen des Vorwärtsfließpressprozesses eine höhere Steigerung der Formfüllung erzielt wird, als dies bei den Zahnelementen der Fall ist. Dies ist damit zu begründen, dass die Zahnelemente bereits im Referenzmodell weitgehend ausgeformt sind. Wie in Abschnitt 6.2 gezeigt wurde, werden bei Zahnelementen aufgrund des höheren Flankenwinkels größere Umformgrade im Formelement erreicht und in Folge die weitere Steigerung der Ausformung erschwert.

Aus dem Analyseergebnis ist abzuleiten, dass die Erhöhung der Reibung aller Werkzeugkomponenten in Zone 1 zur Maximierung des Reibgradienten anzustreben ist, um eine möglichst große Steigerung der Ausformung zu erreichen. Bild 85 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Simulation, wobei die Reibfaktoren für alle Kontaktflächen in Zone 1 einheitlich zwischen $m = 0,1$ und $m = 0,5$ variiert wurden.

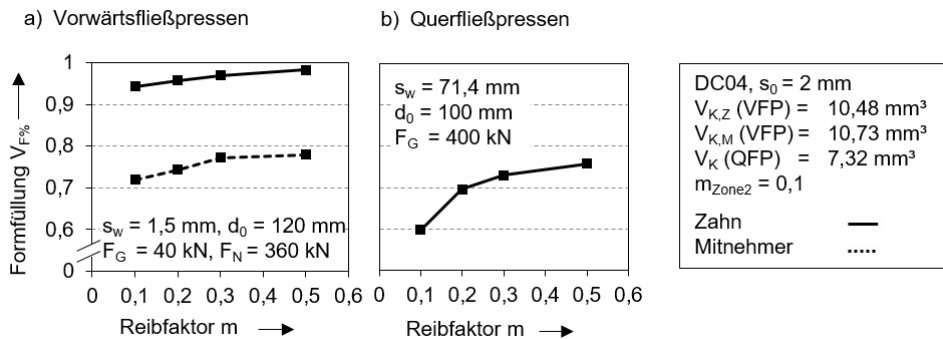


Bild 85: Numerisch ermittelter Einfluss des Reibfaktors m in der tribologischen Zone 1 auf die relative Formfüllung am Prozessende

Die Abbildung zeigt, dass die Formfüllung mit einer Vergrößerung des Reibgradienten ansteigt. Dies ist für beide Prozesse und Formelementtypen grundsätzlich übertragbar. Aus dem Ergebnis der numerischen Simulation ist abzuleiten, dass der Reibgradient zwischen Zone 1 und Zone 2 im Experiment möglichst hoch einzustellen ist.

Experimentelle Realisierung

Zur experimentellen Validierung der Wirksamkeit von Tailored Surfaces werden Umformversuche mit ausgewählten, reibungsmodifizierten Werkzeugteilen (Tailored Surfaces, TS) durchgeführt und mit identischen Versuchen ohne Einsatz von Tailored Surfaces verglichen. Gemäß der numerischen Analyse wird hierfür die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug in Zone 1 (vgl. Bild 83) möglichst stark erhöht. Erreicht wird dies durch gezieltes Hochvorschubfräsen (HVF) der Werkzeuoberflächen. Diese Methode wurde am Institut für spanende Fertigung (ISF) der technischen Universität Dortmund erforscht und speziell für die Bedürfnisse der Blechmassivumformung entwickelt [136]. Die Bearbeitung der Werkzeugteile wurde im Rahmen des Teilprojekts B3 des SFB/TR 73 durchgeführt. In Bild 86a ist die resultierende Oberfläche der Strukturierung mit einer Rauheit von $R_a = 13,4 \pm 1,2 \mu\text{m}$ dargestellt (Laserscanning Mikroskop VK-X 200, Keyence). Die im Teilprojekt C1, SFB/TR 73 ermittelten Reibfaktoren bestätigen die Erhöhung der Reibung im

Zapfenpressversuch von $m = 0,074 \pm 0,005$ auf $m = 0,108 \pm 0,002$ für DC04 und von $m = 0,045 \pm 0,001$ auf $m = 0,086 \pm 0,007$ für DP600 (Bild 86b).

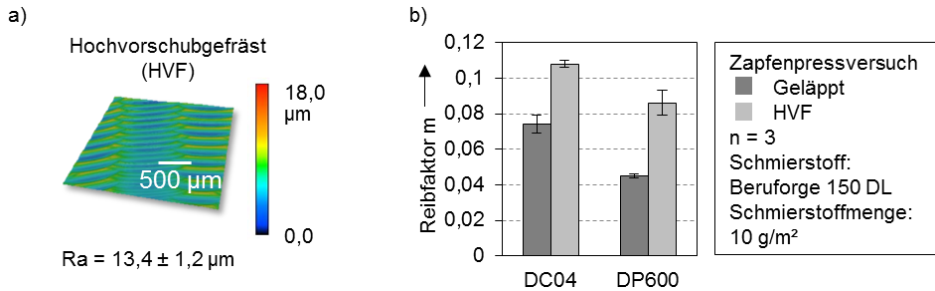


Bild 86: a) Oberflächenstruktur der hochvorschubgefrästen (HVF) Werkzeugoberflächen und b) Reibfaktor in Paarung mit Halbzeug (Schmierstoff: BF 150 DL, Werkstoff: DC04) im Vergleich zur unbehandelten Werkzeugoberfläche

Die Matrize (Zone 2) wird zur Reibungsminimierung im Referenzzustand belassen. Die Umformversuche werden für die Referenz und TS unverändert mit geschmierten Ronden (Schmierstoff: BF 150 DL) durchgeführt. Die Auswertung der Versuche hinsichtlich der erzielten relativen Formfüllung ist in Bild 87 dargestellt.

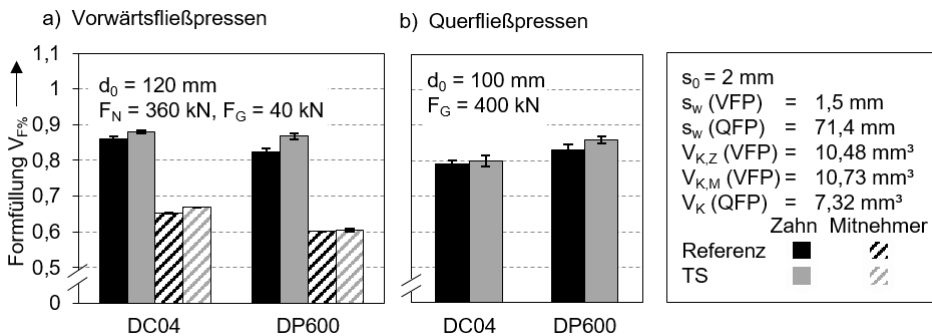


Bild 87: Resultierende relative Formfüllung $V_{F\%}$ am Prozessende bei Einsatz von Tailored Surfaces (TS) im Vergleich zur Referenz

Der Einsatz der Tailored Surfaces führt wie erwartet zu einer Steigerung der Ausformung. Im Detail werden beim Vorwärtsfließpressen maximale Formfüllungssteigerungen von $4,29\% \pm 1,8\%$ (Zahn, DP600) und $1,5\% \pm 0,09\%$ (Mitnehmer, DC04) erreicht, während beim Querfließpressen Werte bis $3,00\% \pm 2,5\%$ (Zahn, DP600) erzielt werden. Die Ergebnisse bestätigten damit die Vorhersagen der numerischen Simulation und zeigen, dass der Effekt zwischen den beiden Prozessarten sowie den verwendeten Formelementgeometrien grundsätzlich übertragbar ist.

Bezüglich der Bauteilqualität ist festzustellen, dass die Struktur der Tailored Surfaces in die Oberfläche des Bauteils eingepreßt wird. Bild 88 zeigt eine Lichtbildaufnahme und das zugehörige Profil der Bauteiloberfläche im Vergleich zu der des konventionell hergestellten Bauteils für beide Prozesse.

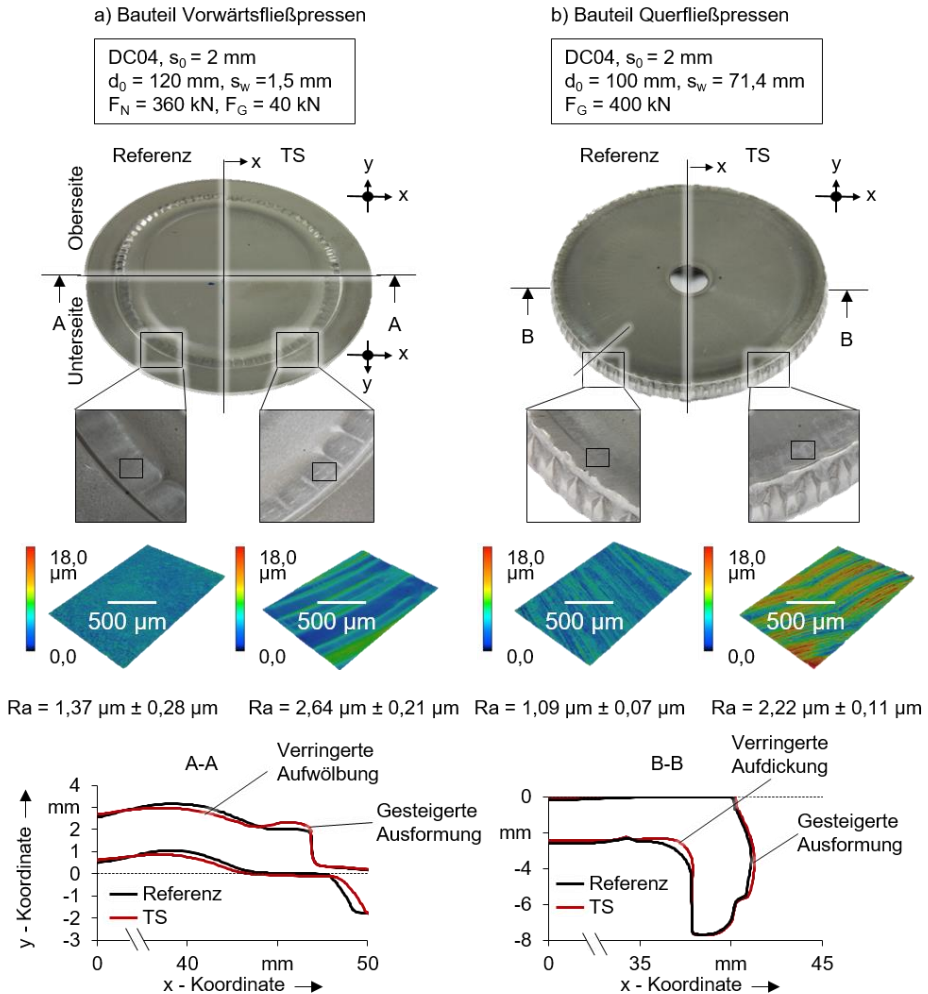


Bild 88: Vergleich konventioneller und mit Tailored Surfaces (TS) hergestellter Bauteile

Die Aufnahmen des Oberflächenprofils im durch Kontaktnormalspannung am höchsten beanspruchten Kontaktbereich zwischen Stempel und Blech belegen die Struktureinprägung und zeigen einen Anstieg des Mittenrauwerts Ra bei beiden Prozessvarianten auf Werte bis zu $2,64 \mu\text{m} \pm 0,21 \mu\text{m}$. Die Profilschnitte der Bauteile zeigen zudem, dass neben einer Steigerung der Formelementausformung der Bauteilverzug reduziert

wird. Dies ist auf die durch die Tailored Surfaces bewirkte Stoffflusssteuerung zurückzuführen, die eine Verringerung des Werkstoffflusses in die Blechmitte zur Folge hat.

Der Kraftbedarf über den Stempelweg ist in Bild 89 dargestellt. Auffällig ist, dass nur ein ausgeprägt geringer Anstieg der Stempelkraft von durchschnittlich ca. 4 % festzustellen ist. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit kann die Beeinflussung des Stempelkraftbedarfs daher zumindest im vorliegenden Fall als unwesentlich eingestuft werden.

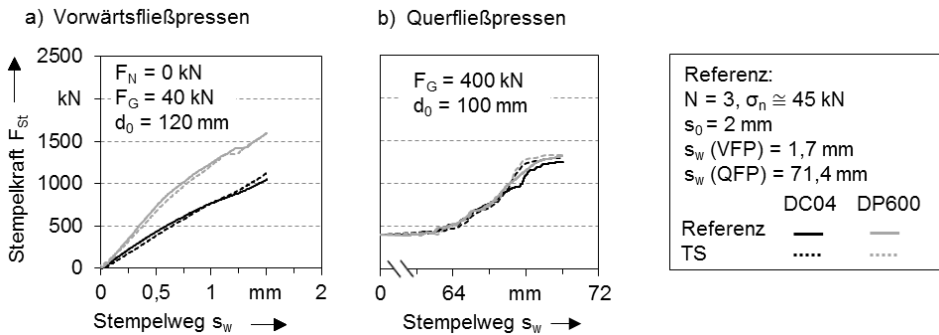


Bild 89: Stempelkraftverlauf bei Einsatz von Tailored Surfaces (TS) im Vergleich zur Referenz für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen (Experiment)

Bewertung der Maßnahme

Tailored Surfaces stellen eine effektive Maßnahme zur Verbesserung der Formelementausformung für die untersuchten Vorwärts- und Querfließpressprozesse dar. Konkret konnte eine Vergrößerung der Formfüllung um bis zu $4,29\% \pm 1,8\%$ (VFP) bzw. $3,00\% \pm 2,5\%$ (QFP) erreicht werden. Als vorteilig zu bewerten ist, dass eine wesentliche Steigerung der Formelementausformung erreicht wird, ohne dass hierfür ein nennenswerter Anstieg der Prozesskraft (ca. 4 %) erforderlich ist. Ferner ist die Verringerung des Werkstoffflusses aus der Massivumformzone grundsätzlich als positiv hinsichtlich einer Reduktion möglichen Bauteilverzugs zu bewerten. Nachteilig ist, dass die Oberflächengüte des Bauteils durch die werkzeugseitigen Tailored Surfaces beeinflusst wird. In den untersuchten Prozessen wurden bei Verwendung von Tailored Surfaces durch die Einprägung der Werkzeugoberfläche Oberflächenrauheiten von durchschnittlich $Ra = 2,43 \pm 0,3$ am Bauteil nach der Umformung gemessen, während die konventionell hergestellten Ronden Werte von $Ra = 1,29 \pm 0,3$ aufwiesen. Je nach Anwendungsfall und Bauteileinsatzzweck kann dies den Einsatz von Tailored Surfaces im Praxiseinsatz ausschließen. Ungeklärt ist, ob die Einbringung von Strukturen oder anderen Tailored Surfaces auf hochbeanspruchten Werkzeugkomponenten einen

Einfluss auf die Werkzeuglebensdauer ausübt. Zudem ist zu klären, ob die werkzeugseitig aufgetragenen Tailored Surfaces einen ausreichend hohen Verschleißwiderstand aufweisen, um den in der Kaltmassivumformung üblichen Werkzeugstandzeiten gerecht zu werden.

7.1.3 Tailored Blanks

Neben der Möglichkeit zur Beschränkung des Stoffflusses aus der Massivumformzone, besteht der Ansatz zur Erhöhung des zur Ausformung der Formelemente nutzbaren Werkstoffvolumens. In der Praxis ist dies durch Tailored Blanks mit maßgeschneiderter Blechdickenverteilung realisierbar. Grundsätzlich stehen hierfür verschiedene Herstellungsverfahren zur Verfügung. Zum Einsatz in der Blechmassivumformung bieten sich getaumelte Tailored Blanks nach OPEL [63] an. Diese weisen keine Fügstellen auf, welche unter hohen Kräften und Formänderungen im Zuge der Umformung gelöst werden könnten. Zudem kann das Blechhalbzeug nach Bedarf lokal und umlaufend aufgedickt werden. Für den Einsatz beim Vorwärtsfließpressen werden Tailored Blanks mit erhöhter Blechdicke im Randbereich der Ronde verwendet. Wie in Bild 90a dargestellt, wird dadurch eine Steigerung des für die Formelementausformung nutzbaren Werkstoffvolumens erreicht.

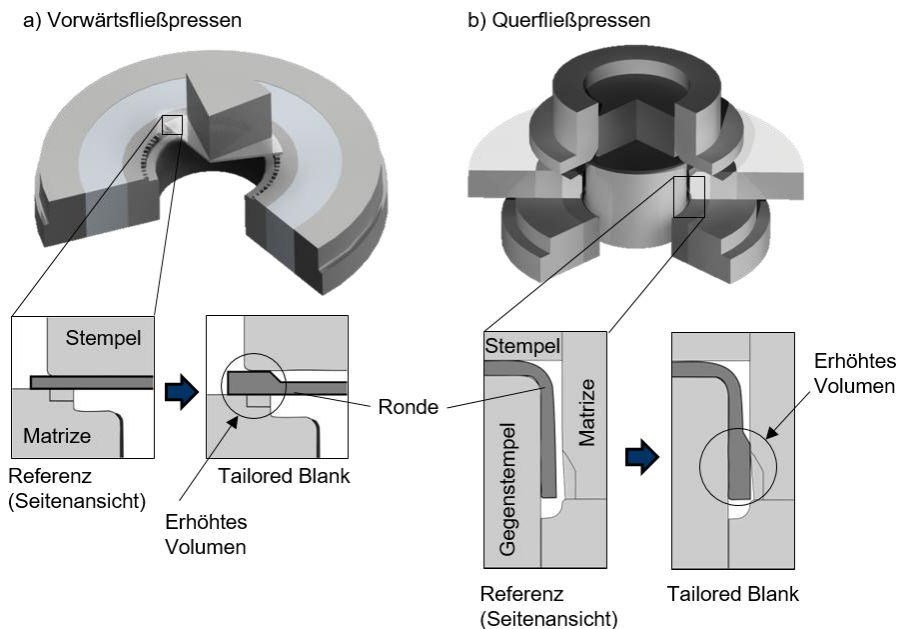


Bild 90: Prinzip zum Einsatz von Tailored Blanks

Das Vorgehen beim Querfließpressen erfolgt analog zum Vorwärtsfließpressen. Es werden identische Tailored Blanks mit aufgedicktem Randbereich eingesetzt (Bild 90b). Damit wird gewährleistet, dass nach erfolgtem Tiefzug ein erhöhtes Werkstoffvolumen in der Napfzarge zur Verdrängung vorliegt.

Numerische Analyse

Um das Potential von Tailored Blanks numerisch zu analysieren, werden im Vorwärts- und Querfließpressprozess jeweils Ronden mit einer randnahen Blechaufdickung von 2 mm auf 2,25 mm und 2,5 mm simulativ umgeformt und mit einer Referenzsimulation hinsichtlich der erzielten Formfüllung verglichen. Lage und Geometrie der aufgedickten Blechbereiche sind an die von OPEL [63] durch Taumeln erzielten Tailored Blanks angelehnt. Die Ausgangsblechdicke in der Rondenmitte wird mit 2 mm beibehalten, um resultierende Effekte ausschließlich auf die Blechaufdickung im Randbereich zurückführen zu können. Eine Prinzipskizze der verwendeten Tailored Blanks ist in Bild 91 dargestellt.

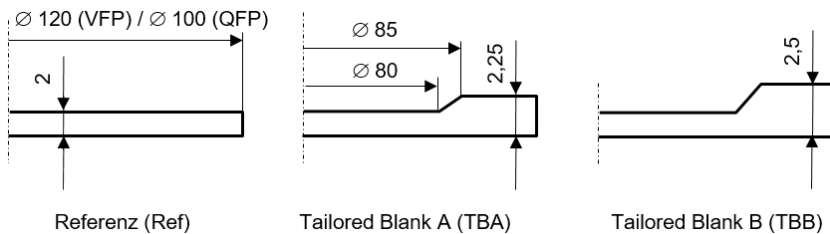


Bild 91: Geometrie der Tailored Blanks im Vergleich zur Referenzrunde in der numerischen Analyse (Angaben in mm)

Die resultierende Formfüllung $V_{F\%}$ ist in Bild 92 dargestellt. Das Simulationsergebnis bestätigt die Annahmen, dass höhere Blechdicken bei Tailored Blanks zu einer Steigerung der Ausformung führen.

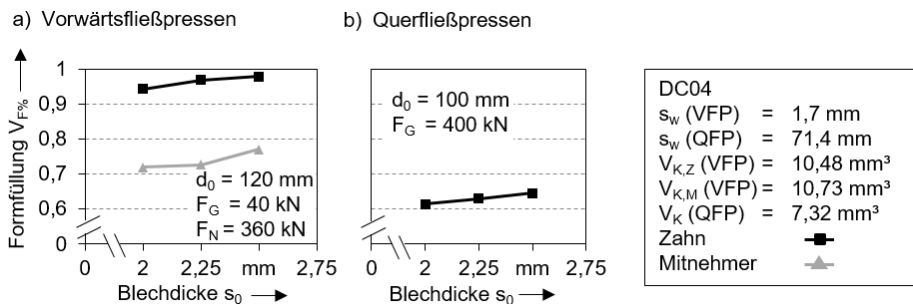


Bild 92: Relative Formfüllung beim Einsatz von Tailored Blanks verschiedener Aufdickung

Das zusätzliche Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich ist sowohl in beiden Prozessen, als auch bei unterschiedlichen Formelementgeometrien wirksam.

Experimentelle Realisierung

Gemäß den Ergebnissen der numerischen Analyse führt der Einsatz von Tailored Blanks zu einer Steigerung der Formelementausformung, wenn diese durch eine Materialanhäufung (Blechaufdickung) das Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich erhöhen. Hierfür sollte die Ausgangsblechdicke in der Massivumformzone möglichst hoch gewählt werden. Um die Wirksamkeit der Maßnahme experimentell zu validieren, werden Tailored Blanks umgeformt, die von Philipp Hildenbrand [137] im Rahmen des Teilprojekts A1 des SFB/TR 73 hergestellt worden sind. Um die Übertragbarkeit der Maßnahme auf andere Werkstoffe zu gewährleisten, werden sowohl Tailored Blanks aus DCo4 als auch aus DP600 eingesetzt. Die Tailored Blanks wurden nach einem von OPEL [63] entwickelten Verfahren angefertigt, bei dem Werkstoff aus der Blechmitte einer Ausgangsrunde mit $s_0 = 2 \text{ mm}$ inkrementell durch Taumeln in den Randbereich der Runde verlagert wird. Aufgrund der Volumenkonstanz wird gleichzeitig die Blechdicke in der Blechmitte reduziert, womit das Rondengewicht gleich bleibt. Im Gegensatz zu den in der numerischen Simulation verwendeten Ronden weisen die getaumelten Ronden eine herstellungsbedingte Vorverfestigung auf, die insbesondere im aufgedickten Randbereich zu einer Steigerung der Härte führt. Die resultierende Härteverteilung sowie die Geometrie der Tailored Blanks sind in Bild 93 abgebildet.

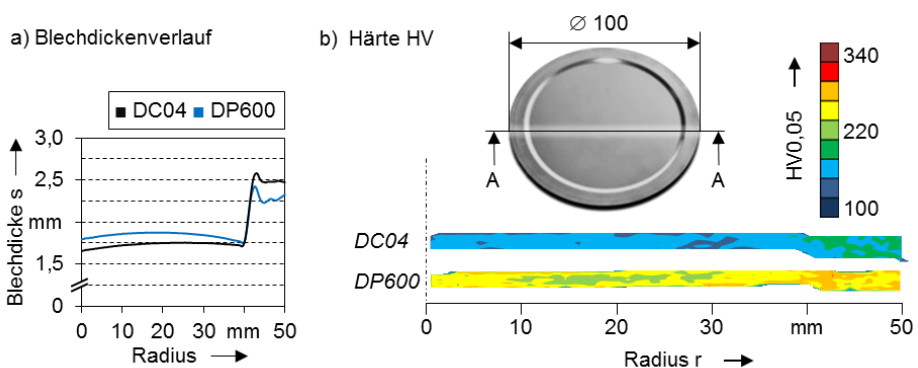


Bild 93: a) Blechdickenverlauf und b) Härteverteilung (Vickers) der experimentell verwendeten Tailored Blanks nach [137] in Schnittdarstellung

Identische Tailored Blanks wurden von SCHNEIDER [25] erfolgreich zur Verbesserung der Bauteilformung bei einem kombinierten Tiefzieh- und Stauchprozess eingesetzt. Dabei wurde unter anderem gezeigt, dass das Einlegen der Tailored Blanks mit Orientierung der Materialanhäufung auf der resultierenden Napfaußenseite notwendig ist, um eine Rissbildung im Tiefziehprozess zu vermeiden. Da der in dieser Arbeit verwendete Querfließpressprozess über eine identische Tiefziehstufe verfügt, werden die Tailored Blanks im Folgenden auf die gleiche Art in das Werkzeug eingelegt (siehe Bild 90).

Bezüglich des in dieser Arbeit verwendeten Fließpressprozesses konnten Untersuchungen von GRÖBEL und HILDENBRAND [137] bereits zeigen, dass eine Steigerung der Formfüllung erreicht wird. Für die folgende Untersuchung werden die Experimente mit erhöhten Stempelwegen und unter Einsatz des Gegenhalters wiederholt, um eine höhere Praxisrelevanz zu erreichen. Die Orientierung der Tailored Blanks hat dabei gemäß [137] keinen Einfluss auf das Prozessergebnis. Im Folgenden wird die Einlegestrategie mit Materialanhäufung auf der stempelzugewandten Seite gewählt (siehe Bild 90). Da nur Tailored Blanks mit Außendurchmesser $d_o = 100 \text{ mm}$ zur Verfügung stehen, entfällt im Falle des Vorwärtsfließpressens der Einsatz des Niederhalters.

Für beide Prozesse werden Versuche mit konventionellen Ronden (Referenz) sowie Tailored Blanks (TB) durchgeführt und miteinander hinsichtlich Formfüllung und Kraftbedarf verglichen. Als Vergleichspunkt wird das jeweilige Prozessende gewählt, welches mit dem Erreichen des zum Referenzfall identischen Stempeltotpunkts definiert ist. Folglich werden für Referenz und TB unterschiedliche Stempelwege erreicht, während die resultierende Restblechdicke bzw. Napfhöhe im Verdrängungsbereich gleich bleibt. Entscheidend ist zudem, dass sich die Tailored Blanks im Gegensatz zur numerischen Simulation bezüglich des Bauteilgesamtvolumens nicht von den im Referenzversuch eingesetzten konventionellen Ronden unterscheiden.

Bild 94 zeigt die resultierende, relative Formfüllung $V_{F\%}$ für den Vorwärts- und Querfließprozess im Vergleich zu einem Referenzversuch mit einer konventionellen Ronde. Erwartungsgemäß ist bei beiden Prozessen und für alle Werkstoffe sowie Formelemente eine Steigerung der Formfüllung zu verzeichnen.

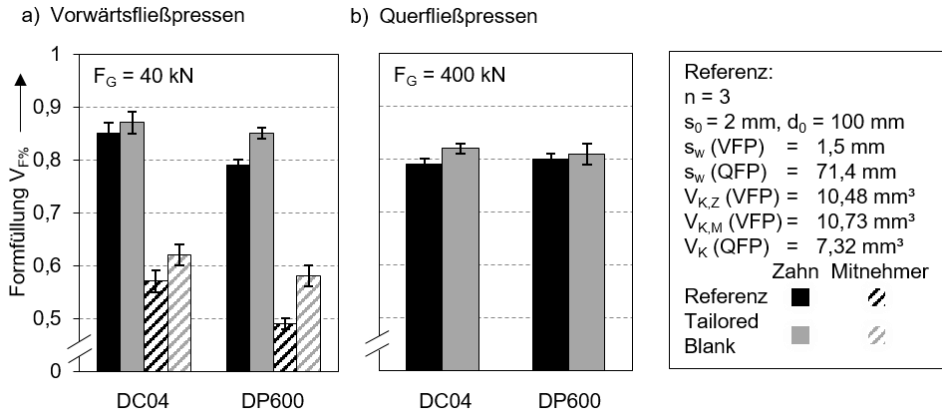


Bild 94: Resultierende relative Formfüllung $V_F\%$ am Prozessende bei Einsatz von Tailored Blanks im Vergleich zur Referenz (Gleicher Totpunkt des Stempels am Prozessende für Referenz und Tailored Blank)

Der größte Anstieg der Formfüllung beim Vorwärtsfließpressen ist bei den Mitnehmerelementen zu sehen, während der Effekt auf die Zahnelemente geringer ausfällt. Ursächlich ist hierfür die bereits im Referenzversuch weiter fortgeschrittene Formfüllung der Zahnelemente, die mit einer höheren Verfestigung im Bereich der Zähne verbunden ist und den Gradienten zu den wenig verfestigten Blechbereichen (Blechmitte / Blechaußenfläche) erhöht. Der daraus resultierende, ausgeprägte Stofffluss aus der Massivumformzone verringert die Ausnutzung des zusätzlichen Werkstoffvolumens der Tailored Blanks. Im Querfließpressprozess sind generell die geringsten Steigerungen der Formfüllung zu verzeichnen. Dies ist dadurch zu begründen, dass im Referenzfall bereits prinzipbedingt ein großes Werkstoffvolumen aus der Napfzarge verdrängt wird. Die durch das Tailored Blank erzielte, relativ bezogene Erhöhung des Verdrängungsvolumens und die darauf basierende Formfüllungssteigerung fällt daher verhältnismäßig gering aus.

In keinem der untersuchten Fälle wurde eine vollständige Ausnutzung des zusätzlich bereitgestellten Werkstoffvolumens erreicht. Trotz des damit verbundenen, verstärkten Werkstoffflusses in die Blechmitte bzw. Blechaußenfläche fallen die Bereichsvolumina aufgrund der Bedingung der Volumenkonstanz im Vergleich zum Referenzblech geringer aus. Allerdings sind beim Einsatz von Tailored Blanks Bauteilfehler festzustellen, die auf die erhöhte Umformung und die damit verbundenen vergrößerten Fließwege zurückzuführen sind. Bild 95 veranschaulicht diese Prozessfehler anhand einer Gegenüberstellung der umgeformten Bauteile für beide Prozesse.

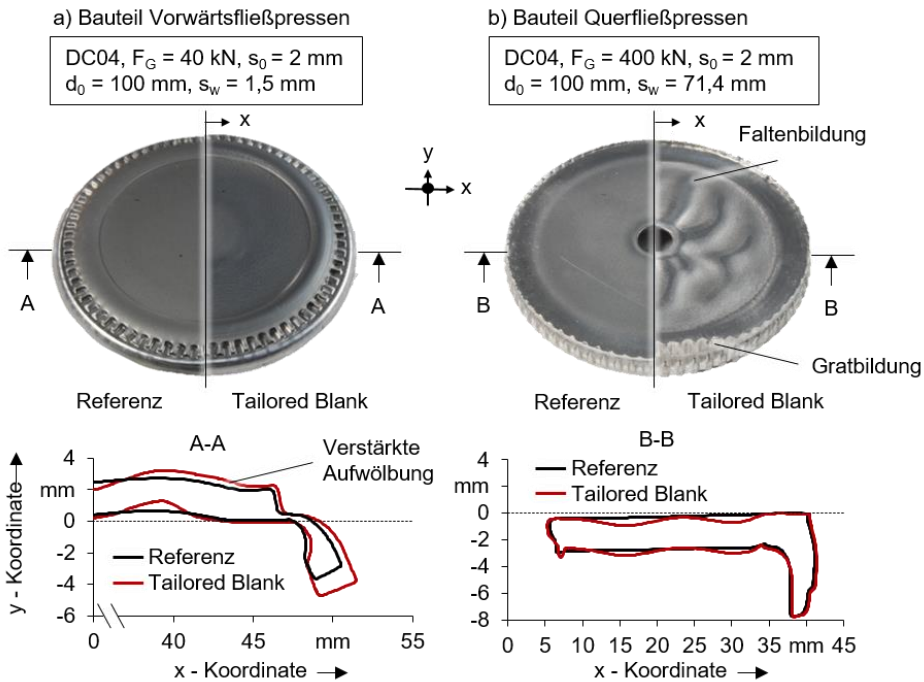


Bild 95: Vergleich konventioneller und mit Tailored Blanks hergestellter Bauteile

Im Fall des Querfließpressens führt die stärkere Werkstoffverdrängung in die vergleichsweise dünne Blechmitte trotz Einsatz des Gegenhalters zur Faltenbildung und zur Bildung eines ausgeprägten Grats an der Napfobenseite (Bild 78b). Der Grat ist auf den deutlich erhöhten Innendruck in der Umformzone zurückzuführen, der Stempel und obere Matrize auseinandergedrückt und das Einfließen von Werkstoff in den entstehenden Zwischenraum ermöglicht. Beim Vorwärtsfließpressen fallen die Bauteilfehler erheblich geringer aus. Dennoch ist eine Verstärkung der Blechaufwölbung im Bereich des Freiraums zwischen Matrize und Gegenhalter festzustellen (Bild 78a)

Der Verlauf der Stempelkraft in Bezug auf den Stempelweg ist für den Vorwärts- und Querfließpressprozess in Bild 96 dargestellt. Bei beiden Prozessen ist ein moderat erhöhter Kraftbedarf für beide Werkstoffe zu verzeichnen, wenn Tailored Blanks eingesetzt werden. Im Detail beträgt die Steigerung der Stempelkraft maximal $14,39 \% \pm 4,84 \%$ (DC04) für das Vorwärtsfließpressen und $26,79 \% \pm 4,52 \%$ (DP600) für das Querfließpressen. Dies ist auf die größere Werkstoffverdrängung und die damit verbundenen, erhöhten Umformgrade zurückzuführen. Zusammen mit der durch die Herstellung der Tailored Blanks eingebrachten Vor-

verfestigung wird somit eine vergleichsweise hohe Gesamtverfestigung in Verdrängungs- und Fließpresszone über den Umformprozess erzielt.

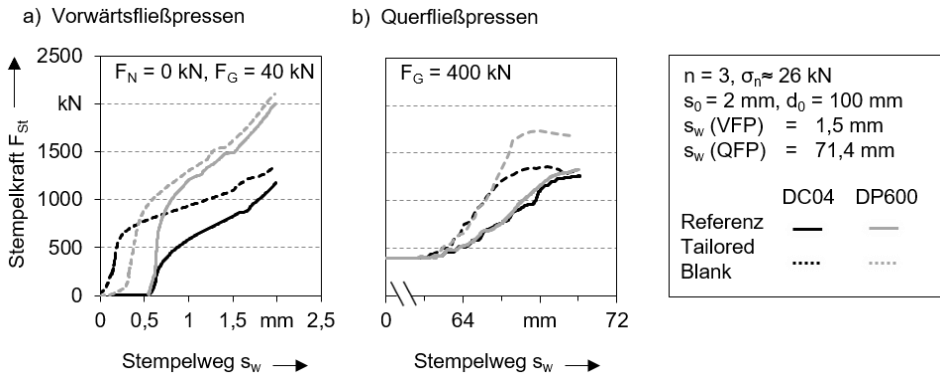


Bild 96: Stempelkraftverlauf bei Einsatz von Tailored Blanks im Vergleich zur Referenz für a) Vorwärtsfließpressen und b) Querfließpressen (Gleicher Totpunkt des Stempels am Prozessende für Referenz und Tailored Blank)

Bewertung der Maßnahme

Tailored Blanks stellen eine wirkungsvolle Maßnahme zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen bei Fließpressprozessen der Blechmassivumformung dar. Konkret wurde eine maximale Steigerung der relativen Formfüllung beim Vorwärtsfließpressen um $6,0\% \pm 2,0\%$ (Zahn, DP600) bzw. $9,0\% \pm 3,0\%$ (Mitnehmer, DP600) erzielt, während beim Querfließpressen Werte bis $3,0\% \pm 2\%$ (Zahn, DC04) erreicht wurden. Der zentrale Vorteil von Tailored Blanks besteht in der Möglichkeit, gezielt zusätzlichen Werkstoff für die Ausformung von Formelementen zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise kann das Werkstoffvolumen des umzuförmenden Bauteils insgesamt minimiert werden, wenn gleichzeitig die Blechdicke in umformtechnisch nicht relevanten Bereichen reduziert wird. Wie flexibel die Werkstoffverteilung in der Praxis realisiert werden kann, hängt von dem verwendeten Herstellungsverfahren der Tailored Blanks ab und ist derzeit Gegenstand der Forschung. Mit den in dieser Arbeit verwendeten, getaumelten Tailored Blanks ist eine Steigerung der Ausformung prozess- und werkstoffübergreifend grundsätzlich erreicht worden. Der hierfür notwendige Anstieg des Kraftbedarfs ist als moderat einzustufen. Im untersuchten Fall betrug dieser maximal $14,39\% \pm 4,84\%$ (DC04) für das Vorwärtsfließpressen und $26,79\% \pm 4,52\%$ (DP600) für das Querfließpressen. Da die Effektivität der Materialvorverteilung direkt vom unerwünschten Stofffluss aus der Massivumformzone abhängt, ist ein Einsatz von Tailored Blanks variabler Blechdicke jedoch nur sinnvoll, wenn bereits alle Möglichkeiten zur Minimierung des Stoffflusses in die

Blechumformzone durch Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung ausgenutzt worden sind. Eine unnötige Erhöhung des verdrängbaren Werkstoffvolumens durch Tailored Blanks führt zu einer unverhältnismäßig starken Erhöhung des Bauteilverzugs sowie zur Begünstigung von Gratbildung.

7.1.4 Zusammenfassende Bewertung

Alle in diesem Kapitel untersuchten Maßnahmen haben sich als wirkungsvoll erwiesen, um eine mangelhafte Ausformung von Funktionselementen durch eine Steigerung der Formfüllung zu verbessern. Wirkungsweise und Wirkzusammenhänge sind hierbei grundsätzlich sowohl zwischen Vorwärts- und Querfließpressprozess als auch zwischen den untersuchten geometrisch ungleichen Formelementen übertragbar. Eine zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen ist in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Bewertung der Maßnahmen zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen

Maßnahme	Bauteilqualität			Kraftbedarf / Werkzeugbeanspruchung
	Oberfläche (R_a)	Verzug / Aufdickung (V_{BM} / V_{AF})	Formelement ($V_{F\%}$)	Stempelkraft (F_{St})
Gegenhalter, Niederhalter				
Tailored Surfaces				
Tailored Blanks				

Legende	Größe erhöht	Größe gesenkt	Einfluss positiv	Einfluss negativ	Kein Einfluss
---------	--------------	---------------	------------------	------------------	---------------

Obwohl die erreichten Steigerungen der relativen Formfüllung $\Delta V_{F\%}$ im Rahmen der untersuchten Parameter für alle untersuchten Maßnahmen in vergleichbaren Größenordnungen liegen, sind die Einflüsse auf Kraftbedarf und Bauteilqualität von deutlichen Unterschieden geprägt. Das größte Potential zur Prozessverbesserung ist den Tailored Surfaces zuzuschreiben. Dies begründet sich vorrangig damit, dass nicht nur die Formelementausformung gesteigert, sondern der Bauteilverzug durch die Reduktion des Stoffflusses aus der Massivumformzone verringert wird. Gleichzeitig ist nur eine geringfügig erhöhte Prozesskraft von Nöten,

wodurch eine übermäßige hohe Werkzeugbeanspruchung vermieden wird. Unklar ist in diesem Zusammenhang jedoch der Einfluss der werkzeugseitigen Oberflächenmodifikation auf die Beanspruchbarkeit des Werkzeugs, der Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein sollte. Nachteilig ist darüber hinaus die Einprägung der Werkzeugoberfläche in das Bauteil, was je nach Anwendungsfall eine optische oder funktionale Einschränkung darstellt.

Als wirksam und ebenfalls positiv hinsichtlich der Steigerung der Ausformung und der Reduktion des Bauteilverzugs ist der gezielte Einsatz von Nieder- und Gegenhaltern zu werten. Grundsätzlich erlaubt diese Maßnahme eine Verbesserung des Prozessergebnisses bei geringem Aufwand. Nachteilig ist jedoch der erheblich erhöhte Kraftbedarf, der in Abhängigkeit der verfügbaren Pressen eine Begrenzung für die realisierbaren Bauteildimensionen darstellt. Darüber hinaus ist von einer deutlich erhöhten Werkzeugbeanspruchung auszugehen, die zu einer Reduktion der Werkzeuglebensdauer führt bzw. die realisierbaren Formelementgeometrien- und Dimensionen begrenzt.

Tailored Blanks stellen eine weitere wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Formelementausformung dar. Im Gegensatz zu den alternativ untersuchten Ansätzen wird jedoch der Bauteilverzug aufgrund des größeren verdrängten Werkstoffvolumens und des damit verbundenen, erhöhten Stoffflusses aus der Massivumformzone gesteigert. Eine weitere Konsequenz sind die moderat erhöhten Prozesskräfte und der daraus resultierende Anstieg der Werkzeugbeanspruchung.

Auf Basis der Maßnahmenanalyse ist zu empfehlen, bei einem gegebenen Prozess mit unzureichender Formelementausformung zunächst Einsatz und Optimierung der Nieder- und Gegenhalterkräfte zu erwägen. Dies ist im ersten Schritt aufgrund der häufig einfachen Anwendung und des Entfalls der Notwendigkeit einer technisch anspruchsvollen Oberflächenbearbeitung anderen Maßnahmen vorzuziehen. Sofern die gewünschte Bauteilformung nicht mit ausreichend geringen Prozesskräften erreicht werden kann oder die Werkzeugbeanspruchung unzulässig ansteigt, ist der Einsatz von Tailored Surfaces als effektive und effiziente Maßnahme zu empfehlen. Tailored Blanks sollten zur Steigerung der Formelementausformung nach Möglichkeit nicht genutzt werden, sofern bereits genug Werkstoffvolumen im Verdrängungsbereich für die Ausformung zur Verfügung steht. Die aktive Steuerung des Stoffflusses zur effizienteren Werkstoffnutzung ist einer Steigerung des verdrängbaren Volumens grundsätzlich vorzuziehen, um Bauteilverzug zu reduzieren

und das Bauteilgewicht gering zu halten. Ist dagegen nicht genug Werkstoff im Verdrängungsbereich vorhanden, stellen Tailored Blanks eine geeignete Maßnahme dar, das Werkstoffdefizit zu kompensieren ohne das Bauteilgewicht unnötig anzuheben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Aktuelle gesellschaftliche und politische Forderungen nach einer Reduktion der Umweltbelastung durch effiziente Herstellungsverfahren und gewichtsoptimierte Bauteile führen konventionelle Fertigungstechnologien an die Grenzen der Machbarkeit. Ein Ansatz, beiden Herausforderung zu begegnen, ist die Nutzung von Blechmassivumformverfahren, um eine energie- und kosteneffiziente Herstellung hoch integrierter, dünnwandiger Funktionsbauteile zu erreichen. Eine etablierte Möglichkeit, die benötigten Formelemente unterschiedlichster Ausprägung zu erzeugen, ist hierbei die Anwendung von Fließpressverfahren auf Blechhalbzeuge. Obwohl Grundlagen in diesem Bereich vorliegen, fehlen bisher weitgehend Erkenntnisse zur Herstellung verschiedener Funktionselementgeometrien und den dabei vorherrschenden Werkzeugbeanspruchungen.

Vor diesem Hintergrund bestand die Zielsetzung dieser Arbeit darin, notwendiges Wissen zu schaffen, um dünnwandige Funktionsbauteile mit Formelementen verschiedenster Geometrie prozesssicher durch Fließpressen herstellen zu können. Hierfür wurden ein Vorwärts- und ein Querfließpressprozess zur Ausformung von Zahn- und Mitnehmergeometrien an Blechen mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm ausgelegt und numerisch sowie experimentell untersucht. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend Maßnahmen erforscht und bewertet, um identifizierte Problemstellungen zu lösen.

Die numerische Analyse der Prozesse zeigt, dass beide Verfahrensarten hinsichtlich Kraftbedarf, Werkzeugbeanspruchung und Bauteilformung grundsätzlich miteinander vergleichbar sind. Als wesentlicher Unterschied wurde das zur Ausformung zur Verfügung stehende Werkstoffvolumen identifiziert, das für den untersuchten Querfließpressprozess prinzipbedingt deutlich größer ist als beim Vorwärtsfließpressen. Das Potential zur Realisierung großvolumiger Formelemente ist daher beim Querfließpressen höher einzustufen. Kennzeichnend für beide Prozessarten sind die unzureichende Formfüllung der Werkzeugkavitäten und die damit verbundene unvollständige Ausformung der Formelemente, die auf den Stofffluss aus dem Bereich der Formelementausformung (Massivumformzone) in die gering verfestigte Umgebung (Blechumformzone) zurückzuführen ist. Der charakteristische, hohe Kraftbedarf spiegelt sich in einer hohen mechanischen Werkzeugbeanspruchung durch Zug- und Druckspannungen sowie hohen Spannungsamplituden, insbesondere im Bereich von Radienübergängen in den Werkzeugkavitäten und an

Werkzeugabsätzen, wieder. Die tribologische Werkzeugbeanspruchung in Bezug auf den Werkzeugverschleiß ist in den untersuchten Fällen als gering zu bewerten, da zwar ausgeprägte hohe Kontaktnormalspannungen auf das Werkzeug einwirken, diese jedoch mit sehr geringen Gleitwegen einhergehen. Eine numerische Variantensimulation mit unterschiedlichen Kavitätsgeometrien zeigt, dass die Formfüllung maßgeblich durch den Verfestigungsgradienten zwischen der Massivumformzone und der gering verfestigten Blechumformzone beeinflusst wird. Dieser wird durch die Verjüngung der Kavitäten (Flankenwinkel w) sowie durch das Verhältnis zwischen verdrängtem Werkstoffvolumen und dem Gesamtvolumen der Kavitäten bestimmt. Der Kraftbedarf ist im Wesentlichen von der Gesamtverfestigung im Bauteil sowie der Reibung zwischen Bauteil und Werkzeug abhängig. Bei der simultanen Ausformung geometrisch unterschiedlicher Formelemente in unmittelbarer Nachbarschaft besteht ein Wechselwirkungseffekt über den globalen Stofffluss, der zu einer Beeinträchtigung der Formfüllung des weniger verfestigten Formelements (Mitnehmer) führt. Aus der numerischen Analyse ist übergreifend abzuleiten, dass hinsichtlich einer möglichst effizienten Prozessgestaltung unabhängig von der angestrebten Formelementgeometrie nicht mehr Werkstoff verdrängt werden sollte, als für die Ausformung nötig ist. Dieser Bedarf wird wiederum minimiert, wenn der Stofffluss aus der Massivumformzone so gering wie möglich gehalten wird. Beides kann durch eine Anpassung der Kavitätsgeometrie und -anzahl sowie des Kavitätsvolumens oder Stempelwegs begünstigt werden.

Anpassungen der Werkzeuggeometrie zur Minimierung des Verfestigungsgradienten sind aus konstruktiven Gründen in der Praxis nicht immer möglich. Aus diesem Grund sind alternative Maßnahmen zur Steigerung der Ausformung nötig. Dies ist einerseits durch die Reduktion des Stoffflusses aus der Massivumformzone mittels Stoffflusssteuerung durch Einstellung eines Reibgradienten (Tailored Surfaces) oder durch Anwendung einer kraftgebundenen, geometrischen Fließbehinderung (Nieder- und Gegenhalter) erreichbar. Andererseits können lokal aufgedickte Tailored Blanks genutzt werden, um ein erhöhtes Werkstoffvolumen für die Ausformung der Formelemente bereitzustellen. Numerische und experimentelle Untersuchungen zeigen, dass beide Grundprinzipien hinsichtlich einer Steigerung der Formfüllung effektiv sind. Der Einsatz von Gegen- und Niederhalter stellt eine einfach anzuwendende Maßnahme dar, bedingt aber den Einsatz deutlich erhöhter Prozesskräfte, die mit einer erhöhten Werkzeugbeanspruchung assoziiert sind. Werkzeugseitige Tailored Surfaces zeigen sich ebenso wirksam, wobei nur eine geringe

Steigerung der Prozesskräfte erforderlich ist. Nachteilig ist die Einprägung der Oberflächenstruktur der Werkzeugoberfläche in die Bauteiloberfläche. Tailored Blanks steigern die Ausformung der Funktionselemente, erhöhen jedoch Bauteilverzug und Gratbildung aufgrund eines erhöhten Werkstoffflusses in die Blechumformzone. Der Einsatz dieser Maßnahme ist daher nur sinnvoll, wenn die Möglichkeiten zur Stoffflusssteuerung vollständig ausgenutzt worden sind. In diesem Fall können Tailored Blanks genutzt werden, um fehlendes Werkstoffvolumen zu ergänzen und somit die Herstellung großvolumiger Funktionselemente zu ermöglichen.

Zukünftige Arbeiten haben zu klären, inwiefern die Ergebnisse auf komplexere Formelemente und deren Kombinationen auf unterschiedlichen Bauteilradien übertragbar sind. Die numerisch ermittelten Schlussfolgerungen hinsichtlich Werkzeugverschleiß und Werkzeugermüdung müssen ferner unter Praxisbedingungen näher untersucht werden, um die Voraussetzung für eine beanspruchungsgerechte Auslegung der Werkzeuge zu schaffen. Abschließend ist eine Erweiterung der untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Ausformung, beispielsweise durch eine Maßnahmenkombination, anzustreben, um deren Effektivität zu vergrößern und die in dieser Arbeit aufgetretenen Bauteilfehler zu vermeiden.

9 Summary and outlook

Current social and political aspects demand the reduction of the environmental impact by means of efficient manufacturing processes and weight optimized parts. However, this requirement surpasses the limits of conventional production methods. One possibility to approach this challenge is the use of Sheet-Bulk Metal Forming processes which allow the manufacturing of highly integrated, thin walled, functional parts. In relation to this, an established solution to realize the desired and widely varying functional elements is the application of flow forming operations on sheet metal. Although basic process knowledge is available, there is a paucity of data on the fabrication of functional elements of different geometrical shape as well as on the associated tool load.

The objective of this work has been to create the required knowledge to allow the reliable manufacturing of thin walled parts containing functional elements of different shape by flow forming operations. For this purpose, a full forward- and a lateral extrusion process, which allow the fabrication of tooth and tappet geometries from blanks of 2 mm in thickness, have been designed and investigated by numerical and experimental means. Subsequently and based on the ascertained findings, measures have been investigated and evaluated to solve identified challenges.

The numerical process analysis reveals that both manufacturing operations are broadly comparable in regard to process forces, tool stresses and the forming of the functional elements. A substantial distinction has to be made in respect to the usable material volume, which is markedly larger in the case of the lateral forming process. Hence the potential for the realization of high volume elements is by principle greater for lateral extrusion operations. Specific for both processes is the insufficient form filling of the tool cavities and the related incomplete forming of the functional elements, which is explained by material flow from the area of the functional elements (bulk forming zone) into the surrounding and only marginally flow hardened sheet sections (sheet forming zone). The characteristically high demand on process forces is mirrored by the pronounced mechanical tool stresses, tensile as well as compressive stresses, and high stress amplitudes, especially around tool radii in cavities and between tool steps. The tribological tool load in regard to tool wear is low for the investigated processes, since the pronounced contact stresses are accompanied by very low glide paths. A numerical variant simulation, using functional elements of differing geometrical shape, shows that the form filling is

dependent on the strain hardening gradient between bulk forming and sheet forming zone. The gradient itself is determined by the tapering of the cavity walls (cavity angle w) as well as by the ratio between the displaced material volume and total cavity volume. Contrary to this, the demand on process force is dependent on the total strain hardening as well as the friction between tool and workpiece. During the simultaneous forming of geometrically differing functional elements in direct neighborhood an interdependency is present which acts via the global material flow and leads to a reduction of form filling for the less strain hardened element (tappet). In summary, to increase process efficiency, not more material should be displaced by the punch than is necessary for the forming of the elements. The material demand is in turn minimized if the material flow from the bulk forming into the sheet forming zone is restricted as much as possible. Both aspects are improvable by an adaption of the cavity shape and number as well as by modification of the cavity volume or punch stroke.

In the realm of practical application, an adaption of the tool geometry is not possible in every case due to construction design restrictions. Hence alternative measures are necessary to improve the forming of the functional elements. On one hand this is possible through a reduction of the material flow from the bulk forming zone into the surrounding areas by use of a friction gradient (tailored surfaces) or by geometrical restriction (blank holder / counterpunch). On the other hand, locally thickened tailored blanks can be utilized to provide more material volume for the forming operation. Numerical and experimental investigations reveal that both approaches are effective to increase form filling and thus the forming of the functional elements. The use of blank holder and counter punch represents a method that is simple to employ but is limited due to a need for high process forces and, as a consequence, high tool loads. Tailored surfaces, applicated on the tool, are similar effective, whereby only small increases in punch forces are required. As a disadvantage, the surface structure of the modified tool is coined into the workpiece surface. Tailored blanks improve forming of the functional elements, however also heighten workpiece deformation and burr formation due to an increase of material flow towards the sheet forming zone. Hence, the application of tailored blanks is only advised if all measures suited to control the material flow have been fully utilized. In this case tailored blanks can be used to complement insufficient material volume and therefore enable the manufacturing of functional elements of high volume.

Further work has to show if the results are transferable to more complex functional elements positioned on different workpiece radii. Furthermore, the numerically ascertained implications regarding tool wear and tool fatigue have to be investigated under industrial conditions to set the prerequisite for proper tool design. Finally, an extension of the approaches on forming improvement, for example by a combination of measures, is necessary to increase effectiveness and to avoid workpiece defects.

Literaturverzeichnis

- [1] https://de.wikipedia.org/wiki/Himmelscheibe_von_Nebra
(abgerufen am 04.10.2016)
- [2] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/165099/umfrage/umsatzentwicklung-in-der-schmiedeindustrie-seit-2005/>
(abgerufen am 04.10.2016)
- [3] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/165036/umfrage/umsatz-der-metallwarenindustrie-in-deutschland-seit-2005/>
(abgerufen am 04.10.2016)
- [4] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/439348/umfrage/produktion-der-schmiedeindustrie-in-deutschland/>
(abgerufen am 04.10.2016)
- [5] Pischel, H.: Geschichte des Massiv- und Blechumformens. Dannat, 1987
- [6] EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ – Emissionen von Personenkraftwagen, 2008
- [7] Merklein, M.; Hagenah, H.: Introduction to sheet-bulk metal forming. Production Engineering 10(2016)1, S. 1-3
- [8] Merklein, M.: Manufacturing of Complex Functional Components with Variants by Using a New Sheet Metal Forming Process. In: Ruan, X. Y. (Hrsg.): Proceedings of the 42nd Plenary Meeting of the International Cold Forging Group, 2009, S. 143-155
- [9] Rick, M.: Kalt-Massivumformen von Grobblechteilen. Technische Universität Hannover, 1972
- [10] <http://www.diehl.com/de/diehlmetall/produkte/synchronringe.html>
(aufgerufen am 04.10.2016)
- [11] Merklein, M.; Tekkaya, A. E.; Brosius, A.; Opel, S.; Koch, J.: Overview on sheet-bulk metal forming processes. In: Hirt, G.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): Proceedings of the 10th international conference on technology of plasticity, 2011, S. 1109-1114

- [12] Oyachi, Y.; Allwood, J. M.: Characterizing the class of local metal sheet thickening processes. In: Hirt, G.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): Steel research international—special edition: 10th international conference on technology in plasticity, 2011, S. 1036–1041
- [13] Merklein, M.; Allwood, J. M.; Behrens, B.; Brosius, A.; Hagenah, H.; Kuzman, K.; Mori, K.; Tekkaya, E.; Weckenmann, A.: Bulk forming of sheet metal. Annals of the CIRP 61(2012)2, S. 725-745
- [14] Koch, J.: Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach, 2016.
- [15] Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung. Springer, 1990, 2. Auflage
- [16] Norm DIN EN 10131: Kaltgewalztes Breitband und Blech aus unlegierten Stählen. Beuth-Verlag, 2009
- [17] Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 2: Massivumformung. Springer, 1988, 2. Auflage
- [18] Norm DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. Berlin: Beuth-Verlag, 2003
- [19] Merklein, M.; Hagenah, H.; Schneider, T.: Sheet-Bulk Metal Forming Processes – State of the Art and its Perspectives; In: Kolleck, R. (Hrsg.): TTP 2013 - Tools and Technologies for Processing Ultra High Strength Materials, Verlag der TU Graz, S.197-204, Graz, 2013
- [20] Groche, P.; Fritsche, D.: Application and Modelling of Flow Manufacturing Processes for Internally Geared Wheels. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46(2006), S. 1261–1265
- [21] Merklein, M.; Plettke, R.; Opel, S.: Orbital forming of tailored blanks from sheet metal. Annals of the CIRP 61(2012)1, S. 263-266
- [22] Norm DIN 8583-1: Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag, 2003

- [23] Doege, E; Behrens B. A.: Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen. Springer, 2010, 2. Auflage
- [24] Maeda, A.; Araki, K.: Plate Gear. Japanese patent, 9-222158, 1996
- [25] Schneider, T.: Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach, Erlangen, 2016
- [26] Merklein, M.; Schneider, T.; Gröbel, D.; Nürnberger, F.: Blechmassivumformung – vom Halbzeug zum Funktionsbauteil. In: Behrens, B. A. (Hrsg.): 21. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Industrie und Wissenschaft – Gemeinsam die Zukunft gestalten, 2014, S. 265-280
- [27] Nakano, T.: Introduction of Flow Control Forming (FCF) for Sheet Forging and New Presses. In: Yoshida, Y.; Matsumoto, R. (Hrsg.): International Seminar on Precision Forging, 2009, S. 35-40
- [28] Mori, K.; Nakano, T.: State-of-the-art of plate forging in Japan. *Production Engineering* 10(2016)1, S. 81-91
- [29] Zhang, Q.; Felder, E.; Bruschi, S.: Evaluation of Friction Condition in Cold Forging by Using T-Shape Compression Test. *Journal of Materials Processing Technology* 3(2009), S. 572-5729
- [30] Groche P.; Stahlmann J.; Hartel J.; Köhler, M.; (2009) Hydrodynamic Effects of Macroscopic Deterministic Surface Structures in Cold Forging Processes. *Tribology International* 42(2009), S.1173–1179
- [31] Buschhausen, A.; Lee J. Y.; Weinmann K.; Altan T.: Evaluation of Lubrication and Friction in Cold Forging Using a Double Backward Extrusion Process. *Journal of Materials Processing Technology* 33(1992)1–2, S.95–108
- [32] Vierzigmann, U.: Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung – Bereitsstellung von Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2015.

- [33] Burgdorf, M.: Über die Ermittlung des Reibwertes für Verfahren der Massivumformung durch den Ringstauchversuch. *Ind. Anz.* 89, 1967
- [34] Vierzigmann, U.; Schneider, T.; Koch, J.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Engel, U.; Hense, R.; Biermann, D.; Krebs, P.; Kersting, P.; Henning, L.; Denkena, B.; Herper, J.; Tillmann, W.: Untersuchungen von Tailored Surfaces für die Blechmassivumformung mittels angepasstem Ringstauchversuch. In: Merklein, M.; Behrens, B. A., Tekkaya, A. E. (Hrsg.): 2. Workshop Blechmassivumformung, Meisenbach, 2013, S. 137-162
- [35] Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Grundlagen. Springer, 2013, 2. Auflage
- [36] Petersen, S.B.; Martins, P.A.F.; Bay, N.: Friction in Bulk Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology* 66(1997), S. 186–194
- [37] Behrens, B. A.; Sabitovic, A.: Modelling of Friction in Deep Drawing considering Irreversible Sheet Surfaces Changes. In: Asnafi, N. (Hrsg.): Proceedings of the IDDRG. Olofstrom, 2008, S. 125-132
- [38] Beyer, F.; Willner, K.: A constitutive friction law for sheet-bulk metal forming. In: *Tribology Online* (Hrsg.): 11(2016)5, S. 614-622
- [39] Vierzigmann, U.; Koch, J.; Merklein, M.; Engel, U.: Material Flow in Sheet-Bulk Metal Forming. *Key Eng. Mater.* 504-506 (2012), S. 1035-1040
- [40] Merklein, M.; Koch, J.; Opel, S.; Schneider, T.: Fundamental investigations on the material flow at combined sheet and bulk metal forming processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60(2011)1, S. 283-286
- [41] Sieczkarek, P.; Kwiatkowski, L.; Ben Khalifa, N.; Tekkaya, A.: Novel five-axis forming press for the incremental sheet-bulk metal forming. *Key Engineering Materials*, 554(2013), S. 1478-1483

- [42] Gröbel, D.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Engel, U.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Gies, S.; Tekkaya, A.E.; Behrens, B.A.; Hübner, S.; Vucetic, M.; Koch, S.; Merklein, M.: Manufacturing of functional elements by sheet-bulk metal forming processes. *Production Engineering: Research and Development* 10(2016)1, S. 63-80
- [43] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: *Fließpressen – Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke*. Springer, 2008
- [44] Singer, F.: Verfahren zur Vorbehandlung von Eisen- und Stahlwerkstücken für die spanlose Fertigung, z.B. das Ziehen, Strecken und Walzen, Reichspatentamt, Patentschrift Nr. 673405, 1934
- [45] Geiger, R.; Hänsel, M.: Von Near-Net-Shape zu Net-Shape beim Kaltfließpressen – Stand der Technik. In: Siegert, K. (Hrsg.): *Neuere Entwicklungen in der Massivumformung*, DGM Informationsges. Verlag, 1995, S. 435-456
- [46] Norm DIN 8583-6: *Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 6: Durchdrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth-Verlag, 2003
- [47] Schmöckel, D.; Böhm, E.: Kombiniertes Tiefziehen und Fließpressen dicker Bleche. In: *Forschungsgesellschaft Umformtechnik mbH (Hrsg.): 7. Seminar der Forschungsgesellschaft Umformtechnik*, 1986, S. 1-30
- [48] Merklein, M.; Koch, J.; Schneider, T.; Opel, S.; Vierzigmann, U.: Manufacturing of Complex Functional Components with Variants by Using a new Metal Forming Process – Sheet-Bulk Metal Forming. *International Journal of Material Forming* 3 (2010), S. 347-350
- [49] Biermann, D.; Merklein, M.; Engel, U.; Tillmann, W. ; Surmann, T. ; Hense, R.; Herper, J. ; Koch, J.; Krebs, E. ; Vierzigmann, U.: Umformwerkzeuge in der Blechmassivumformung. In: Merklein, M.; Bach, Fr.-W.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): *1. Workshop Blechmassivumformung*, Meisenbach, 2011, S. 119-138
- [50] VDI 3186: *Tool materials for cold forging – List of tool materials*, Vol. 1. Berlin: Beuth-Verlag, 1995

- [51] ICFG: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging, Part Two: Quality Requirements for Tool Manufacturing, Dokument Nr. 16/04, ISBN 3-87525-209-8, Bamberg: Meisenbach, 2004
- [52] Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. Berlin: Springer, 1993
- [53] VDI 3186: Tool Materials for Cold Forging – Instruction for Design, Manufacturing and Improvement of Quality, Vol. 2. Berlin: Beuth Verlag, 1997
- [54] VDI 3176: Vorgespannte Presswerkzeuge für das Kaltmassivumformen. Berlin: Beuth-Verlag, 1986
- [55] Merklein, M.; Hofmann, M.; Lechner, M.; Kuppert, A.: A Review on Tailored Blanks - Production, Applications and Evaluation. J. Mater. Process. Tech. 214(2014)2, S. 151-164
- [56] Zadpoor, A.A.; Sinke, J.; Benedictus, R.: Mechanics of tailor welded blanks: an overview. Key Engineering Materials 344(2007), S. 373-382.
- [57] Kinsey, B.; Liu, Z.; Cao, J.; A novel forming technology for tailor-welded blanks. Journal of Materials Processing Technology, 99(2000), S. 143-153
- [58] Lamprecht, K.; Geiger, M.: Characterisation of the Forming Behavior of Patchwork Blanks. Steel Research International, 76(2005)12, S. 910-915
- [59] Neugebauer, R.; Mauermann, R.; Menzel, S.; Standfuß, J.: Patchwork Blanks – eine neue Halbzeugphilosophie. Blech Rohre Profile, 54(2007)5, S. 10-12
- [60] <http://www.tailored-blanks.com/de/products.php> (aufgerufen am 09.01.2017)
- [61] Kopp, R.; Wiedner, C.; Meyer, A.: Flexibly rolled sheet metal and its use in sheet metal forming. Advanced Materials Research, 6-8(2005), S. 81-92

- [62] Hauger, A.: Flexibles Walzen als kontinuierlicher Fertigungsprozess für Tailored Rolled Blanks. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2000
- [63] Opel, S.: Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variable Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung, Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Meisenbach, 2013
- [64] Merklein, M.; Opel, S.: Investigation of Tailored Blank Production by the Process Class Sheet-Bulk Metal Forming. In: Chinesta F.; Chastel Y.; El Mansori, M. (Hrsg.): International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT2010), AIP Conference Proceedings, 2010, S. 395-400
- [65] Merklein, M.; Plettke, R.; Opel, S.: Orbital forming of tailored blanks from sheet metal. *Annals of the CIRP* 61(2012)1, S. 263-266
- [66] Opel, S.; Schneider, T.; Merklein, M.: Manufacturing of geared sheet metal components using flexible rolled tailored blanks. *Key Eng. Mater.* 554-557(2013), S. 1459-1470
- [67] Löffler, M.; Gröbel, D.; Engel, U.; Andreas, K.; Merklein, M.: Analysis of Effectiveness of Locally Adapted Tribological Conditions for Improving Product Quality in Sheet-Bulk Metal Forming. *Applied Mechanics and Materials* 794(2015), S. 81-88
- [68] Hense, R.: Using Chatter Vibrations in Milling to Create Tribo-Functional Surfaces for Sheet-Bulk Metal Forming Tools. In: *Advanced Materials Research*, 769(2013), S. 263-270
- [69] Lucas, H.; Denkena, B.; Grove, T.; Krebs, E.; Kersting, P.; Freiburg, D.; Biermann, D.: Analysis of Residual Stress States of Structured Surfaces Manufactured by High-Feed and Micromilling. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 70(2015)4, S. 183-189
- [70] Krebs, E.: Mikrofräsen von funktionalen Oberflächenstrukturen in hochharten Arbeitsstählen. In: Biermann, D. (Hrsg.): Begleitband zum Fachgespräch zwischen Industrie und Hochschule „Zerspanen im modernen Produktionsprozess“, (2013), S. 189-199

- [71] Tillmann, W.; Stangier, D.; Biermann, D.; Kersting, P.; Krebs, E.; Hagen, L.: Tribological investigation of bionic and micro-structured functional surfaces. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 46(2015)11, S. 1096-1104
- [72] Hetzner, H.: Systematische Entwicklung amorpher Kohlenstoffschichten unter Berücksichtigung der Anforderungen der Blechmassivumformung. Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2014
- [73] Kersting, P.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Tekkaya, A.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Matthias, S.; Reithmeier, E.; Löffler, M.; Beyer, F.; Willner, K.: Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming. *Production Engineering*, 10(2016)1, Springer, S. 37-50
- [74] Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Gies, S.; Tekkaya, A.; Krebs, E.; Wiederkehr, P.; Biermann, D.; Tillmann, W.; Stangier, D.: Wear Behavior of Tribologically Optimized Tool Surfaces for Incremental Forming Processes. *Tribology International*, 104(2016), S. 64 - 72
- [75] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Merklein, M.: Applicability of blasted blanks for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming. *Procedia CIRP* 45(2016), S. 239-242
- [76] Hetzner, H.; Koch, J.; Tremmel, S.; Wartack, S.; Merklein, M.: Improved Sheet Bulk Metal Forming Processes by Local Adjustment of Tribological Properties. *J. Manufacturing Science and Engineering* 133(2012)6, S. 61011_1-11
- [77] Löffler, M.; Schneider, T.; Vierzigmann, U.; Engel, U.; Merklein, M.: Locally Adapted Tribological Conditions as a Method for Influencing the Material Flow in Sheet-Bulk Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials* 639(2015), S. 267-274
- [78] Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer, 2007, 22. Auflage

- [79] Koch, J.; Merklein, M.: Cold forging of closely-tolerated functional components out of blanks – possibilities of the new process class sheet-bulk metal forming. In: Ishikawa, T. (Hrsg.): Proc. 6th JSTP Int. Seminar Precision Forging, 2013, S. 109-112
- [80] Engel, U.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Massivumformung. Bamberg, Meisenbach-Verlag, 1996
- [81] Engel, U.: Prediction of Life of Bulk Forming Tools. In: Carstensen, J. V.; Leffers, T.; Lorentzen, T.; Pedersen, O. B.; Sorensen, B. F.; Winter, G. (Hrsg.): Proceedings of the 19th Riso Internatiol Symposium on Materials Science: Modelling of Structure and Mechanics of Matrials from Microscale to Product, Denmark, 1998
- [82] Bay, N.: (1994) The State of the Art in Cold Forging Lubrication. Journal of Materials Processing Technology 46(1994), S. 19-40
- [83] Wibom, O.; Aalborg, J. A.; Bay, N.: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf Reibung und Schmierung beim Kaltmassivumformen von Stahl. Umformtechnik, 29(1995), S. 106-112
- [84] Bay, N.; Azushima, A.; Groche, P.; Ishibashi, I.; Merklein, M.; Morishita, M.; Nakamura, T.; Schmid, S.; Yoshida, M.: Environmentally Benign Tribo-System for Metal Forming, Manufacturing Technology. Annals of the CIRP 59(2010), S. 760-780
- [85] Engel, U.; Falk, B.: Tool life in cold forging. In: Kuzman, k.; Balic, J. (Hrsg.): ICIT'99 Conference Proceedings Int. Conf. on Industrial Tools, Vol. I, Slovenia, Tecos, 1999, S. 61-68
- [86] Pöhlandt, K.: Werkzeuge der Kaltmassivumformung – Grundlagen und Praxis. Renningen-Malmsheim, expert verlag, 1999
- [87] Bürgel, R.: Festigkeitslehre und Wersktstoffmechanik - Band 1. Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2005
- [88] Neitzert, T.: Auslegung von rotationssymmetrischen Fließpresswerkzeugen im Bereich elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Springer, 1982
- [89] Geiger, R.: System zum Erfassen und Senken des Werkzeugverbrauchs beim Kaltmassivumformen. Wt-Z. ind. Fert. 69, 1979

- [90] Bartz, W. J.: Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik. Sindelfingen, expert Verlag, 1987
- [91] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Ingenieure. Berlin, Springer, 2007, 3. Auflage
- [92] Shyam, A.; Blau, P.; Jordan, T.; Yang, N.: Effect of submillimeter size holes on the fatigue limit of a high strength tool steel. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 37(2014), S. 368-379
- [93] Meurling, F.; Melander, A.; Tidesten, M.; Westin, L.: Influence of carbide and inclusion contents on the fatigue properties of high speed steels and tool steels. *Int. Journal of Fatigue*, 23(2001), S. 215-224
- [94] Bergengren, Y.; Larsson, M.; Melander, A.: The influence of machining defects and inclusions on the fatigue of a hardened spring steel. *Fatigue Fract. Of Eng. Mat. Struct.*, 18(1995), S. 1071-1087
- [95] Andreas, K.: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach, Erlangen, 2016
- [96] Völkl, R.: Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach, Erlangen, 2008
- [97] Wöhler, A.: Über die Versuche zur Ermittlung der Festigkeit von Achsen, welche in Werkstätten der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d. Oder angestellt sind. *Zeitschrift für das Bauwesen*, 13(1863), S. 233-258
- [98] Basquin, O. H.: The Exponential Law of Endurance Tests. *Proc. ASTM*, 10(1910), S. 625-630
- [99] Hänsel, M.: Beitrag zur Simulation der Oberflächenermüdung von Umformwerkzeugen. Bericht 6 aus der Reihe „Prozesssimulation in der Umformtechnik“. Berlin, Springer, 1993

- [100] Falk, B.: Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach, Erlangen, 2000
- [101] Meidert, M.: Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2006
- [102] Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(1953), S. 981-988
- [103] VDI-Richtlinie 3176: Vorgespanne Presswerkzeuge für das Kaltumformen. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1986
- [104] Klein, B.: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Vieweg + Teubner Verlag, 2007, 7. Auflage
- [105] Hrennikoff, A.: Solution of problems of elasticity by the framework method. *Journal of applied mechanics*, 8(1941)4, S. 169-175
- [106] Clough, R.W.: The finite element method in plane stress analysis. Proc. 2nd A.S.C.E. Conf. on Electronic Computation, Pittsburg, 1960
- [107] Zienkiewicz, O. C.; Cheung, Y. K.: Finite Elements in the Solution of Field Problems. *The Engineer* (1965), S. 507-510
- [108] Beese, S.; Beyer, F.; Blum, H.; Isik, K.; Kumor, D.; Rademacher, A.; Tekkaya, A.; Willner, K.; Wriggers, P.; Zeller, S.; Löhnert, S.: Simulation of Sheet-Bulk Metal Forming Processes with Simufact.forming using User-Subroutines. In: ESAFORM (Hrsg.): (2016), Nantes, Frankreich
- [109] Simulation in der Massivumformung. In: Info-Reihe Massivumformung, Industrieverband Massivumformung e.V., 2006
- [110] Roll, K: Simulation in der Blechumformung – Neue Anforderungen und Tendenzen. In: DWM e.V. (Hrsg.): 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 2007, S. 6-20

- [111] Rebelo, N.; Nagtegaal, J. C.; Taylor, L. M.; Passmann, R.: Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods in the Simulation of Metal Forming Processes. In: Chenot, J. L.; Wood, R. D.; Zienkiewicz, O. C. (Hrsg.): 4th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Rotterdam: Balkema, 1992, S. 99-108
- [112] Fleischer, M.: Auslegung ausgewählter Schmiedeprozesse mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode. Umformtechnische Schriften – Band 67, Düsseldorf, Stahleisen mbH, 2000
- [113] Kraft, P.; Pfeufer, P.: Jüngste Entwicklungen im Bereich Hexaeder-Vernetzer für den vollautomatischen Einsatz in der Simulationspraxis. In: Streckhardt, A. (Hrsg.): XXIV FEM-Kongress, Baden-Baden, 1997
- [114] Schafstall, H.: Verbesserung der Simulationsgenauigkeit ausgewählter Massivumformverfahren durch eine adaptive Reibwertvorgabe. Hamburg, Shaker Verlag, 1998
- [115] Doege, E.; Meyer-Nolkemper, H.; Saeed, I.: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. München, Hanser Verlag, 1986
- [116] Kaspar, R.; Müller, P. M.; Phillip, F. D.; Backmann, G.: Hot stress-strain curves of steel determined by different kinds of deformation. Steel Research, 64(1993)12, S. 611-617
- [117] Ludwik, P.: Elemente der Technologischen Mechanik. Springer, 1909
- [118] Swift, H. W.: Plastic instability under plain stress. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1(1952), S. 1-18
- [119] Kishore, R.; Sinha, T. K.: Analysis for Stress-Strain Curves of a Modified 9Cr-1Mo Steel by the Voce Equation. Metallurgical and Materials Transaction A 27(1996), S. 3340-3343
- [120] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large strain deformation of polycrystalline metal at low homologous temperatures. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 23(1975), S. 611-617
- [121] Bargel, H. J.; Schulze G.: Werkstoffkunde. Springer, 2008, 10. Auflage

- [122] Norm DIN EN 10130: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth-Verlag, 2007
- [123] ThyssenKrupp Steel Europe: Tiefziehstähle DD,DC und DX für Bauteile höchster Umformkomplexität.
http://www.thyssenkrupp.at/files/qs/TechnischeInfo/Feinblech%20und%20oberflaechenveredeltes%20Material/produktinformation_tiefziehstaehle_dd_dx_und_dc_de.pdf (aufgerufen am 29.12.2016)
- [124] Norm DIN EN 10346: Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth-Verlag, 2015
- [125] Norm DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin Beuth-Verlag, 2009
- [126] Norm DIN 50106: Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth-Verlag, 2016
- [127] German Cold Forging Group (GCFG): Festigkeit von Werkzeugstählen für die Kaltmassivumformung, GCFG, 2015
- [128] Carl Bechem GmbH: Technische Produktinformation Beruforge 150 DL
- [129] Vierzigmann, H. U.; Merklein, M.; Engel, U.: Friction Conditions in Sheet-Bulk Metal Forming. *Procedia Engineering* 19(2001), S. 377 - 382
- [130] <http://www.simufact.de/simufactforming-umformsimulation.html> (aufgerufen am 03.01.2017)
- [131] Norm DIN 8583-6: Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 6: Durchdrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth-Verlag, 2003
- [132] Böge, A.; Böge, G.; Böge, W.: Zahnräder. In: *Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 22. Aufl.

- [133] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Finite Elemente Analyse für Ingenieure, Eine leicht verständliche Einführung. 3. Auflage. München. Carl Hanser Verlag
- [134] Tekkaya, A. E.: A Guide for Validation of FE-Simulations in Bulk Metal Forming. The Arabian Journal for Science and Engineering 30(2005)1C, S.113-136
- [135] Merklein, M.; Koch, J.; Opel, S.; Schneider, T.: Fundamental investigations on the material flow at combined sheet and bulk metal forming processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60(2011)1, S. 283-286
- [136] Freiburg, D.; Biermann, D.; Hense, R.; Tillmann, W.; Stangier, D.: Influence of Surface Modifications on Friction, Using High-Feed Milling and Wear Resistant PVD-Coating for Sheet-Metal Forming Tools. Key Engineering Materials, 639(2015), S. 275-282
- [137] Gröbel, D.; Hildenbrand, P.; Engel, U.; Merklein, M.: Influence of tailored blanks on forming of cold forged functional elements in a sheet bulk metal forming process. In: Stahl-Institut VDEh (Hrsg.): Proceedings METEC & 2nd ESTAT, 2015, auf CD veröffentlicht

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Merklein, M.; Lechner, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.: Innovative approaches for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming processes. *Manufacturing Review* 3(2016)2, S. 1-17
- [P2] Kersting, D.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Tekkaya, A. E.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Matthias, S.; Reithmeier, E.; Beyer, F.; Willner, K.; Löffler, M.: Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming. *Prod. Eng.* doi:10.1007/s11740-015-0651-6 10(2016)1, S. 37-50
- [P3] Gröbel, D.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Engel, U.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Gies, S.; Tekkaya, A.E.; Behrens, B.A.; Hübner, S.; Vucetic, M.; Koch, S.; Merklein, M.: Manufacturing of functional elements by sheet-bulk metal forming processes. *Production Engineering: Research and Development* 10(2016)1, S. 63-80
- [P4] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Schulte, R.; Gröbel, D.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Weikert, T.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Lucas, H.; Denkena, B.; Merklein, M.: Tribological measures for controlling material flow in sheet-bulk metal forming. *Production Engineering* 10(2016), S. 459-470
- [P5] Gröbel, D.; Schneider, T.; Merklein, M.: Sheet-Bulk Metal Forming. In: Tekkaya, A.E.; Homberg, W.; Brosius, A. (Hrsg.): *60 Excellent Inventions in Metal Forming*, Springer, 2015, S. 101-106
- [P6] Gröbel, D.; Hildenbrand, P.; Engel, U.; Merklein, M.: Influence of tailored blanks on forming of cold forged functional elements in a sheet bulk metal forming process. In: *Stahl-Institut VDEh (Hrsg.): Proceedings METEC & 2nd ESTAT, 2015, auf CD veröffentlicht*

- [P7] Löffler, M.; Freiburg, D.; Gröbel, D.; Loderer, A.; Matthias, S. ; Stangier, D. ; Weikert, T. : Untersuchung von Tailored Surfaces hinsichtlich ihres tribologischen Einflusses auf Prozesse der Blechmassivumformung. In: Tagungsband zum 18. Workshop Blechmassivumformung & 3. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2015 - DFG Transregio 73 (Hrsg.): Tekkaya, A. E.; Liewald, M.; Merklein, M.; Behrens, B.-A. , Shaker Verlag Aachen , 2015, S. 132-146
- [P8] Löffler, M.; Gröbel, D.; Engel, U.; Andreas, K.; Merklein, M.: Analysis of Effectiveness of Locally Adapted Tribological Conditions for Improving Product Quality in Sheet-Bulk Metal Forming. Applied Mechanics and Materials 794(2015), S. 81-88
- [P9] Merklein, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Hildenbrand, P.: Sheet-bulk metal forming – forming of functional components from sheet metals. In: Y. Qin, T.A. Dean, J. Lin, S.J. Yuan, F. Voltertsen (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on New Forming Technology, MATEC Web of Conferences, 2015, S. 01001 1-12
- [P10] Merklein, M.; Schneider, T.; Gröbel, D.; Nürnberger, F.: Blechmassivumformung – vom Halbzeug zum Funktionsbauteil. In: Behrens, B. A. (Hrsg.): 21. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Industrie und Wissenschaft – Gemeinsam die Zukunft gestalten, 2014, S. 265-280
- [P11] Merklein, M.; Andreas, K.; Gröbel, D.; Hildenbrand, P.; Müller, M.; Noneder, J.; Zimmermann, A.; Schneider, T.; Vierzigmann, U.: Potenziale und Grenzen der Simulation in der Fertigungstechnik. In: simufact engineering GmbH (Hrsg.): Tagungsband 15. RoundTable - Simulating Manufacturing, ISBN: 978-3-9813814-3-6, 2014, S. 1-38
- [P12] Gröbel, D.; Koch, J.; Vierzigmann, U.; Engel, U.; Merklein, M.: Investigations and approaches on material flow of non-uniform arranged cavities in sheet bulk metal forming processes. Procedia Engineering 81(2014), S. 401-406

- [P13] Vierzigmann, U.; Schneider, T.; Koch, J.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Engel, U.; Hense, R.; Biermann, D.; Krebs, P.; Kersting, P.; Henning, L.; Denkena, B.; Herper, J.; Tillmann, W.: Untersuchungen von Tailored Surfaces für die Blechmassivumformung mittels angepasstem Ringstauchversuch. In: Merklein, M.; Behrens, B. A., Tekkaya, A. E. (Hrsg.): 2. Workshop Blechmassivumformung, Meisenbach, 2013, S. 137-162

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] Heyder, T.; Gröbel, D.; Merklein, M.: Entwicklung eines geeigneten Konzepts für ein Werkzeug der Blechmassivumformung. Diplomarbeit, Erlangen, 2013
- [S2] Abuaffan, F.; Gröbel, D.; Merklein, M.: Konstruktion und Auslegung eines Werkzeugs der Blechmassivumformung zur Herstellung eines komplexen Bauteils mit geometrisch unähnlichen Funktionselementen. Bachelorarbeit, Erlangen, 2014
- [S3] Fröschl, C.; Gröbel, D.; Merklein, M.: Untersuchung und Interpretation eines Prozesses der Blechmassivumformung anhand einer FE-Simulationsreihe und unter Anwendung der statischen Versuchsplanung. Bachelorarbeit, Erlangen, 2014
- [S4] Fröschl, C.; Gröbel, D.; Merklein, M.: Simulative Analyse eines Querfließpressprozesses der Blechmassivumformung. Projektarbeit, Erlangen, 2015

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2019):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmman
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokuslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und
der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für
die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahliefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlenschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LFT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischeneschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LFT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LFT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidlinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Gesellschaftliche und politische Forderungen nach einer Reduktion der Umweltbelastung durch effiziente Herstellungsverfahren und gewichtsoptimierte Bauteile führen konventionelle Fertigungstechnologien der Umformtechnik an die Grenzen ihrer Möglichkeiten. Ein Ansatz dieser Herausforderung zu begegnen, ist die Nutzung sogenannter Blechmassivumformverfahren, die eine energie- und kostenoptimierte Herstellung hoch integrierter, dünnwandiger Funktionsbauteile ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund wird die Zielsetzung verfolgt, notwendiges Wissen zu schaffen, um die gewünschten Formelemente verschiedenster Geometrie prozesssicher durch Fließpressen an Blechen herstellen zu können. Hierfür werden ein Vorwärts- und ein Querfließpressprozess zur Ausformung von Zahn- und Mitnehmergeometrien ausgelegt. Beide Prozesse werden numerisch sowie experimentell untersucht, um Einflussgrößen auf das Prozessergebnis zu identifizieren und zu analysieren. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend Maßnahmen erforscht und bewertet, um Herausforderungen bei der Bauteilformung zu lösen.

