



Verfahrensentwicklung zur Fertigung qualitätsgerechter Bauteile mit dem Hydro-Impuls-Umformen von Blechen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Andrey Vovk

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Molitor
Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Lichtenberg

Promotionskolloquium am 12.02.2008

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFQ der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Dem Lehrstuhlleiter für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Molitor danke ich für seine wohlwollende Unterstützung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Lichtenberg danke ich für seine wertvollen Anregungen und freundliche Übernahme des Koreferates.

Dem Rektor des Luftfahrtinstitutes Charkow, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Vladimir Krivzov gebührt mein ganz besonderer Dank für die Hilfestellungen sowie Ratschläge und kritischen Anmerkungen.

Meinen Freunden und Wegbegleitern des Luftfahrtinstitutes Charkow möchte ich ebenso meinen Dank aussprechen.

Mein ganz besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern des IFQ, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Nicht vergessen möchte ich meine Familie und meine Freunde für ihre verständnisvolle Unterstützung und Motivation.

Andriy Vovk

Kurzfassung

Im Zuge der weiteren Durchsetzung des Leichtbaus nimmt die Komplexität von Blechformteilen bei gleichzeitiger Erweiterung der Werkstoffpalette und Erhöhung der Qualitätsanforderungen und Erweiterung der Werkstoffpalette ständig zu. Aufgrund bestehender Verfahrensgrenzen führen klassische Blechumformverfahren oft nicht mehr zu brauchbaren Fertigungsergebnissen. Es besteht daher die Notwendigkeit, Verfahren mit erweiterten Potentialen einzusetzen. Neben der Anwendung der quasistatischen und hochdynamischen wirkmedienbasierten Umformung bietet sich bei Blechen als erfolgversprechende Verfahrensvariante das so genannte Hydro-Impuls-Umformen (HIU) an. Bei diesem Verfahren erfolgt die Umformung mit Wirkmedien durch Druckimpulse, die durch Zusammenstoß von einem Hammer mit dem Wirkmedium erzeugt werden. Die Impulscharakteristiken liegen im Übergangsbereich zwischen quasistatischem und hochdynamischem Druckaufbau. In der Anwendung der bei diesem Verfahrensprinzip erzeugten „weicheren“ Druckimpulse (als z.B. bei der Explosivumformung mittels Sprengstoff) werden zahlreiche Vorteile für Qualitätssicherheit der Blechumformung gesehen, welche bislang nicht erforscht sind. Mit diesen Untersuchungen werden Grundlagen für das HIU von Blechen entwickelt und Voraussetzungen für die industrielle Anwendung dieses innovativen Umformverfahrens geschaffen.

Um gesicherte Aussagen zu Potentialen des Verfahrens treffen zu können, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit, aufbauend auf den theoretischen Grundlagen, Simulation und experimentellen Untersuchungen für Umformgeschwindigkeiten $\dot{\epsilon}$ im Bereich zwischen 10 und 10^2 s^{-1} das Arbeitsfeld des Hydro-Impuls-Umformens determiniert.

Abstract

In the course of the further establishment of lightweight construction, the complexity of sheet metal components increases as the range of materials broadens and demands towards quality rise continually. Due to existing procedural limits, classical sheet forming methods often do not lead to useful production results as they had previously. Hence, the necessity to implement methods with increased potential exists. Apart from using the quasistatic and high dynamic work media based sheet forming, there exists the promising procedure of the so-called hydro pulse forming. In this method, the forming with working media takes place through pressure pulses that are caused by a collision between hammer and working media. The pulse characteristics lie in the transition area between quasistatic and high dynamic pressure build-up. Numerous advantages for sheet metal forming are seen in the “softer” pressure pulses generated in this method (as opposed to explosive forming by means of explosives), which are, however, not researched as yet. With these studies, basics for the hydro pulse forming of metal sheets are developed, and preconditions for the industrial use of this innovative forming technique created.

In order to make well-funded statements concerning this procedure’s potential, the hydro pulse forming area of expertise was identified in the present thesis on the basis of theoretical basics, simulation, and experimental studies for forming speeds $\dot{\epsilon}$ between 10 and 10^2 s^{-1} .

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Abkürzungen	V
Symbolverzeichnis	V
Verzeichnis der Indizes	VI
1. Einleitung	2
2. Stand der Technik	3
2.1 Wirkmedienbasierte Umformverfahren	3
2.2 Hochgeschwindigkeitsumformung	4
2.3 Hydro-Impuls-Umformung	6
2.4 Prozesssimulation	9
2.4.1 Simulation von Umformprozessen	10
2.4.2 Auslegung von Werkzeugkomponenten	13
2.4.3 FE-Modellierung des Wirkmedienvhaltens	14
2.4.4 Berechnung von HIU-Anlagen mit der FEM	15
3. Zielsetzung und Aufgabestellung	15
4. Untersuchungsmethoden	17
4.1 HIU-Wirkprinzips. Einflussgrößen	17
4.2 Simulation der HIU-Prozesse	19
4.2.1 Voraussetzungen zur numerischen FE-Simulation	19
4.2.2 Simulationsmodelle	20
4.2.3 Kontaktformulierungen	28
4.2.4 Ausgangsdaten. Dynamische Werkstoffkennwerte	29
4.3 Experimentelle Messwernerfassung	30
4.3.1 Versuchsvorrichtungen	30
4.3.2 Messtechnik	32
4.4 Werkstoffspektrum. Werkstofftechnische Untersuchungen	33
5. Qualitätssicherung durch Prozessauslegung	34
5.1 Beschreibung des Werkzeugs und Ausgangsblechs	34
5.2 Verfahrensabläufe	36
5.3 Übertragbarkeit der Modell-Untersuchungen	37
6. Ermittlung der Einflussgrößen beim HIU-Verfahren	42
6.1 Charakterisierung der HIU-Energiequelle	43
6.1.1 Einfluss der Masse des Hammers	43
6.1.2 Einfluss der Hammergeschwindigkeit	47
6.2 Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Wirkmediums	48
6.2.1 Druckaufbau im flüssigen Wirkmedium	50
6.2.2 Einfluss der Wirkmediumsart	55
6.3 Einfluss des Werkstücks	58
6.3.1 Blechwerkstoff	58
6.3.2 Blechdicke, Steifigkeit	60
6.3.3 Verlauf der Verformung	64
6.4 Einfluß der Umformparameter auf die Bauteilqualität bei HIU	65
6.4.1 Einfluss des Belastungsimpulses	66
6.5 Prozesssicherheit - Verfahrensgrenzen beim HIU-Tiefziehen	70
6.6 Verfahrensbedingte Qualitätsmerkmale	73
7. Einfluss dynamischer Effekte auf die Qualitätssicherheit	76
7.1 Elastisch-plastischen Wellen	76
7.2 Dynamische Werkstoffeigenschaften	78
7.3 Spannungs-Effekte	81
7.4 Thermische Effekte	83
7.5 Einfluss der Massenkräfte	87
8. Untersuchungen zu den HIU-Anlagen	90
8.1 Untersuchung der Anlagevarianten	90
9. Untersuchungen zur HIU-Werkzeugtechnik	94

9.1 Werkzeugkomponenten	95
9.2 FE-Untersuchungen der HIU-Werkzeuge	96
9.3 Konstruktion der HIU-Versuchswerkzeuge	100
10. Praktische Erprobung der HIU	103
11 Ergebnisse.....	109
12 Zusammenfassung und Ausblick.....	112
13. Bildverzeichnis	114
14. Tabellenverzeichnis	116
15. Literatur	117

Abkürzungen

3D-CAD	Dreidimensionales Computer Aided Design
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite Elemente Methode
GFK	Grenzformänderungskurve
IHU	Innenhochdruckumformung
HBU	Hochdruckblechumformung
HIU	Hydro-Impuls-Umformung
HGU	Hochgeschwindigkeitsumformung
WBU	Wirkmedienbasierte Blechumformung
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics - Modell

Symbolverzeichnis

c	Schallgeschwindigkeit	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
d	Durchmesser	m
E	Energie	kJ
$\dot{\epsilon}$	Umformgeschwindigkeit	s^{-1}
F	Kraft	kN
f	Relative Verschiebung	m
h	Maß	m
k	Koeffizient	
m	Masse	kg
n	Verfestigungsexponent	
P	Impuls	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
p	Druck	MPa

T	Temperatur	K
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	m·s ⁻¹
x, y, z	Koordinaten	m
δ	Wanddicke	m
σ	Spannungen	MPa
ρ	Dichte	kg·m ³

Verzeichnis der Indizes

0	Ausgangsparameter
1	Parameter in der ersten direkt wirkenden Stoßwelle
I, II, III, IV, V	Parameter in den charakteristischen Messpunkten I bis V
[]'	Parameter bei der Reflexion
kr	Kritische Parameter
max	Maximale Parameter
B	Parameter des Blechs
G	Parameter des Gummis
H	Parameter des Hammers
W	Parameter des Wassers
WZ	Parameter des Werkzeugs
Σ	Parameter für die Gesamtdauer der Belastungsphase

1. Einleitung

Die Anwendung wirkmedienbasierter Fertigungsverfahren zur Blechumformung gewinnt eine immer größere Bedeutung für Leichtbaukonstruktionen, die in Großserien, aber auch in Kleinserien bzw. für die Herstellung von Prototypen produziert werden. Die Produktionskosten von Blechformteilen werden gerade bei kleinen und mittleren Serien im Wesentlichen durch die Anlage- und Werkzeugkosten bestimmt. Durch zunehmende Typenvielfalt, kürzere Entwicklungszyklen und schnellere Produktwechsel müssen die Unternehmen der Zulieferindustrie immer flexibler auf die Kundenwünsche reagieren, d.h. möglichst universelle, mobile und flexible Anlagen und Werkzeuge in der Produktion nutzen. Durch die Forderung nach flexibleren Umformtechniken ergibt sich die Notwendigkeit stückzahlangepasste Verfahrenskonzepte zu entwickeln, damit für kleine und mittlere Serien keine extrem intensiven Kosten entstehen. Die wirkmedienbasierten Verfahren ersetzen eines von den beiden Werkzeugelementen: Matrize oder Stempel und bieten dadurch ein flexibles Verfahrenskonzept der Umformtechnik an. Andererseits sind die Anlagen zur Realisierung von wirkmedienbasierten Fertigungsverfahren sehr energie- und kostenaufwendig. Das liegt darin, dass für die Umformung bzw. Kalibrierung der Endkonturen des Bauteils extrem hohe Drücke erforderlich sind, welche wegen der Besonderheit des Verfahrensprinzips gleich auf das gesamte Werkzeug übertragen wurden.

Ein Lösungsweg bietet jedoch eine örtliche Lokalisierung des Überdruckes im Wirkmedium mit einem kurzzeitigen dynamischen Druckaufbau an. Auf dieser Grundidee basiert eine ganze Reihe von Hochgeschwindigkeitsumformverfahren. Die Blechumformung mit hohen Geschwindigkeiten hat andere Mechanismen als die konventionelle quasistatische Umformung. Dabei spielen die Massenkräfte im Wirkmedium und im Blech, dynamische Reibungskräfte und Werkstoffeigenschaften eine große Rolle.

Die Weiterentwicklung von neuen Verfahren unter Berücksichtigung der komplexen Einflüsse aller Verfahrensparameter bei der dynamischen Blechumformung ist nur unter Nutzung von modernen mathematischen Modellen und von Software für FEM-Simulationen möglich. Die marktüblichen Software-Produkte für die Umformsimulation sind für die quasistatische Umformung entwickelt, berücksichtigen keine dynamischen Effekte und sind für die Simulation der Hochgeschwindigkeitsumformung nicht geeignet.

Die Grundlagenuntersuchung der wirkmedienbasierten dynamischen Umformverfahren sowie die numerische und experimentelle Beurteilung den spezifischen Effekte sind die Ziele der vorliegenden Arbeit.

Die Simulationsberechnungen sowie experimentelle Untersuchungen wurden für das Hydro-Impuls-Umformen von Blechen durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf die konventionellen quasistatischen wirkmedienbasierte Umformverfahren sowie auf die weiteren Hochgeschwindigkeitsumformverfahren übertragen werden.

2. Stand der Technik

2.1 Wirkmedienbasierte Umformverfahren

Bei den wirkmedienbasierten Umformverfahren werden die flüssigen bzw. gasförmigen Medien als aktive formgebende Elemente (Matrize oder Stempel) des Werkzeuges eingesetzt (Bild 1). Man unterscheidet quasistatische (z.B. hydraulische Blechumformung - HBU) und dynamische (z.B. Hochgeschwindigkeitsumformung - HGU) Verfahren.

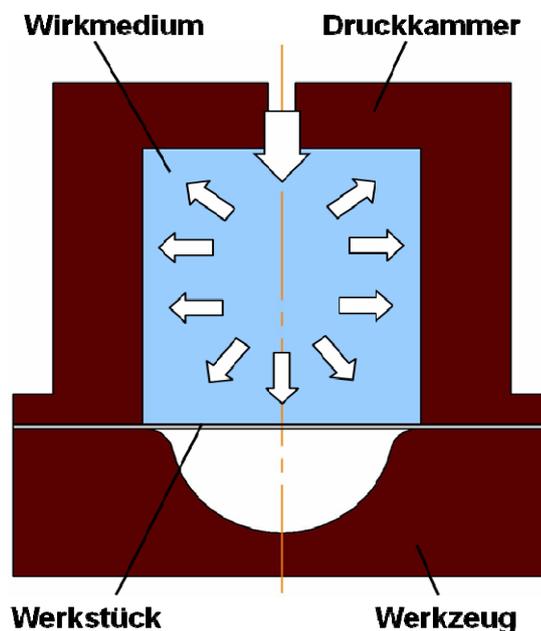


Bild 1: Verfahrensprinzip der wirkmedienbasierten Blechumformung

Die wichtigsten Vorteile der HBU [1] bis [5] gegenüber klassischen (mechanischen) Umformverfahren bestehen in

- der Einsparung von Prozessstufen;
- den verbesserten Eigenschaften der Werkstücke;
- der Erweiterung der Universalität des Werkzeugs durch Anpassen des Wirkmediums an verschiedene Formen sowie Fertigungsverfahren;
- der Flexibilität des Verfahrens durch schnelle und einfache Umgestaltung der Werkzeugelemente.

Demgegenüber hat die gleichmäßige Druckverteilung beim HBU folgende Nachteile [6, 7]:

- Unerwünschte zusätzliche Belastung der Anlage (Kraftschluss) und der Werkzeuge;
- Überdimensionierung der Ausrüstung;
- unsichere Abdichtung bei komplizierten Werkstückgeometrien;
- Schwierigkeiten bei der Erzeugung des hohen Wirkdruckes;
- unnötig hoher Energieverbrauch.

Eine Lösung zur Beseitigung dieser Nachteile bieten die HGU-Verfahren mit einem kurzzeitigen, dynamischen Druckaufbau im Wirkmedium.

2.2 Hochgeschwindigkeitsumformung

Dynamische Verfahren ergänzen die quasistatischen, schließen neue technologische Bereiche ein und bilden zusammen mit HBU eine gemeinsame Gruppe wirkmedienbasierter Umformverfahren (WBU).

Die HGU-Verfahren werden unter Nutzung der folgenden Energiequellen realisiert [8]:

- Sprengstoffe
- Schießpulver
- Gasgemische
- elektrische Entladung,

Als Übertragungs- / Wirkmedium werden Luft, Wasser, Sand u. ä. angewendet (Bild 2).

Die neuartigen dynamischen Effekte wie z.B. Blechmaterial- und Schmierstoffverhalten, zeit- und ortsabhängige Druckverteilung, gesonderte Zwischen- und Endgeometrie der Blechteile, wurden in der Praxis festgestellt. Es fehlen aber grundsätzliche Untersuchungen zu HGU, Simulation dieser Prozesse, damit die momentan begrenzte industrielle Nutzung dieser progressiven Umformprozesse erweitert werden kann.

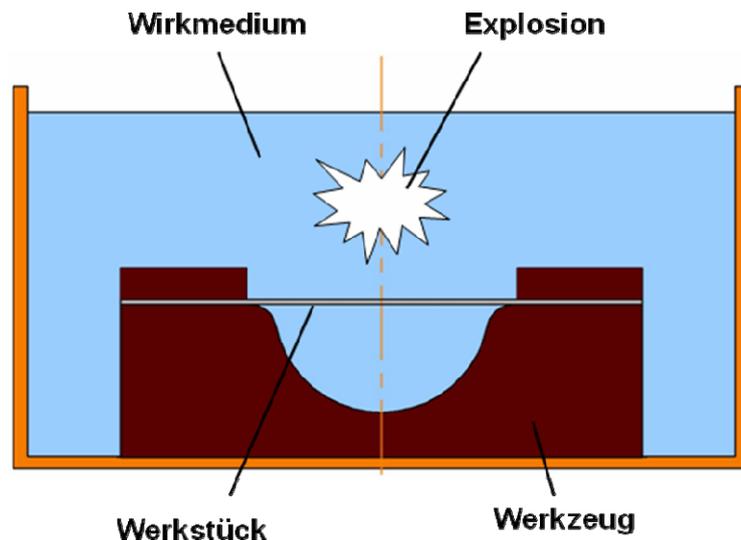


Bild 2: Verfahrensprinzip der Explosivumformung

Die zahlreichen Beispiele industrieller Realisierung der HGU von flächigen Halbzeugen [9] bis [15] zeigen, dass diese Technologie besonders für Bauteile

- komplizierter Hauptform,
- mit Nebenformen, die einen extrem hohen Wirkdruck erfordern,
- aus hochfesten schlecht umformbaren Blechmaterialien

geeignet ist

Die Nachteile der HGU sind die erforderlichen besonderen Sicherheitsvorkehrungen sowie größere Parameterschwankungen und die daraus resultierende unsichere Reproduzierbarkeit. Die Sicherheits- sowie die Reproduzierbarkeits-Probleme können durch eine maschinelle Realisierung der HGU gelöst werden.

2.3 Hydro-Impuls-Umformung

Ein Verfahren, das den realen Praxis-Anforderungen entspricht und eine Variation von Prozessparametern in einem breiten Intervall ermöglicht, ist das so genannte Hydro-Impuls-Umformen (HIU) [10]. Bei diesem Verfahren erfolgt die Blechumformung durch einen über ein flüssiges Wirkmedium übertragenen Druckimpuls, welcher durch einen auf das Medium auftreffenden Hammer erzeugt wird (Bild 3).

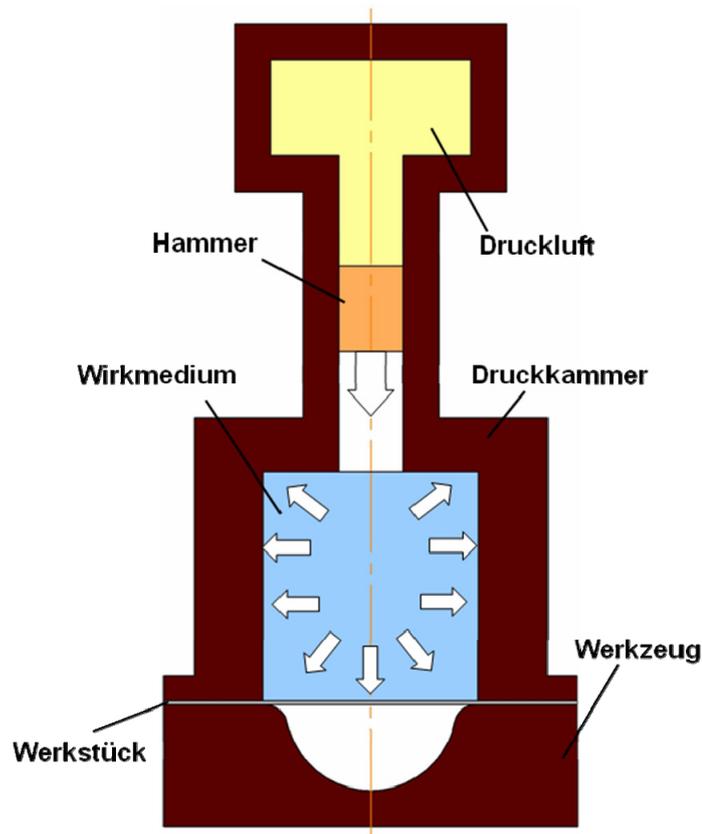


Bild 3: Verfahrensprinzip der Hydro-Impuls-Umformung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine vertiefte Analyse der aus Patenten und der Literatur bekannten technischen Lösungen durchgeführt. Aus der Analyse des Standes der Wissenschaft und Technik [16] bis [25] wurden die wichtigsten Aspekte abgeleitet und für die Entwicklung und die Konstruktion der Anlage und des Versuchswerkzeuges als Basis übernommen.

Von nahezu allen o.g. Autoren wird die große Bedeutung der Charakteristik des Druckverlaufs wie z.B. Drucksteigerung-, Drucksenkung- Gradienten sowie die absoluten

Werte des Maximaldrucks und der Druckdauer für den Umformvorgang bei allen Hochgeschwindigkeitsverfahren hervorgehoben.

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführte Analyse der wirkmedienbasierten Umformverfahren ermöglicht eine Einordnung der bekannten quasistatischen sowie dynamischen Verfahren nach dem Charakteristik des Druckimpulses (Bild 4).

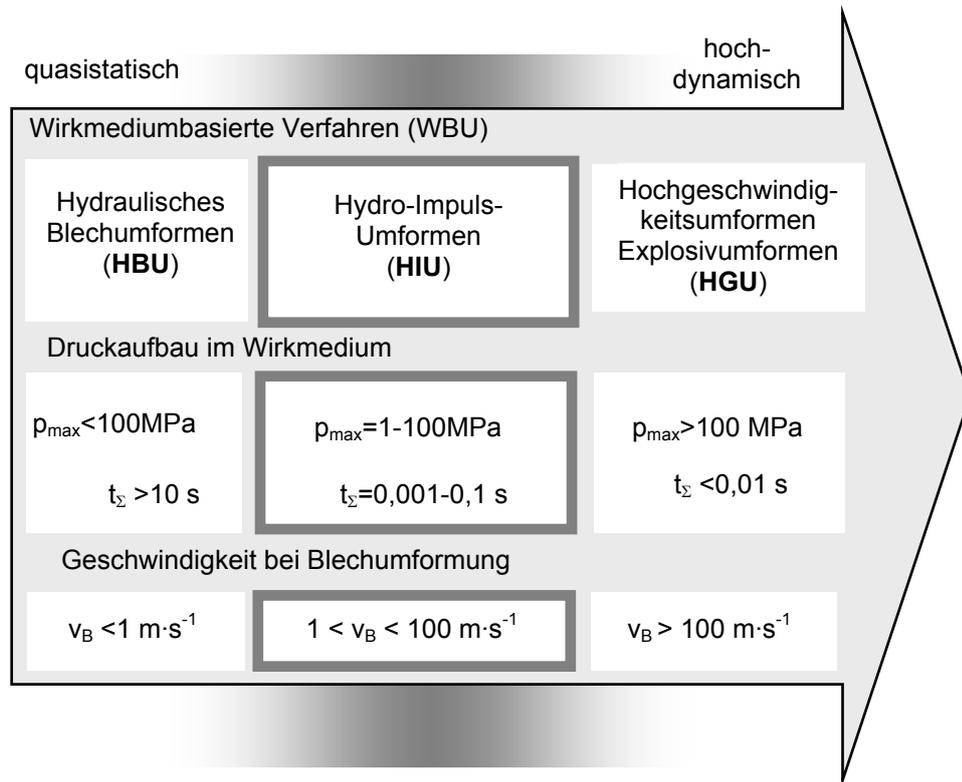


Bild 4: Wirkmedienbasierte Umformverfahren

Die quasistatischen WBU-Verfahren sind durch Drucksteigerungsgradienten, die unter ca. $dp/dt < 1,0 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ liegen, charakterisiert. Das entspricht einer Geschwindigkeit der Blechverformung von ca. $v_B < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Es ist bekannt, dass die Erhöhung dieser Geschwindigkeit bis zu einer gewissen Grenze einen positiven Einfluss auf die Prozessbedingungen hat und zu besseren Umformergebnissen führt.

Für die HGU wurden bislang meistens die Explosion von Sprengstoffen als Energiequelle genutzt. Die Drucksteigerungsgradienten bei diesem hochdynamischem Prozess betragen ca. $dp/dt > 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, was einer Geschwindigkeit der Blechverformung von ca. $v_B > 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ entspricht. Die extrem hohe Umformgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ führt zur Änderung des gesamten

Umformmechanismus, zur Versprödung des Materials und zur Begrenzung der Verfahrensmöglichkeiten. Deshalb ist der Übergangsbereich von quasistatischen zu hochdynamischen WBU-Verfahren von besonders großem Interesse. In diesem Bereich ordnet sich das HIU-Verfahren ein, mit dem sich gut reproduzierbare Geschwindigkeiten der Blechverformung v_B von 1 bis 100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ realisieren lassen.

Das HIU-Verfahren hat gegenüber dem HGU-Verfahren folgende Vorteile:

- Erzeugung eines „weichen“ Druckimpulses, der für die Blechumformung besonders gut geeignet ist;
- Variierbarkeit der Impulscharakteristik in einem breiten Intervall;
- gute Reproduzierbarkeit der Prozessparameter;
- Sicherheitsaspekte.

Während zu den Umformvorgängen mittels dynamischer Belastung unter Verwendung von Sprengstoffen und elektrischer Entladung als Energiequellen zahlreiche theoretische und versuchstechnische Erfahrungen sowie Anwendungsfälle vorliegen, sind die Verhältnisse beim HIU bisher noch weitgehend ungeklärt. Insbesondere fehlen systematische, theoretische und experimentelle Untersuchungen

- zum Einfluss der Druckcharakteristik in einem breiten Übergangsbereich zwischen quasistatischer und hochdynamischer Belastung (Impulsdauer, Flankensteilheit des Impulses) auf ein Verlauf der Umformung und Qualität der Blechteile;
- zur Erzeugung eines Belastungsimpulses in einer geschlossenen Druckkammer beim Aufstoßen des Hammers auf die Oberfläche des Wirkmediums;
- zur Übertragung des beim HIU erzeugten Impulses durch Wirkmedien unterschiedlicher Art auf das Werkstück;
- zu den bei diesen spezifischen Belastungen auftretenden dynamischen Effekten im Werkstück und deren Auswirkungen auf die verfahrens- und werkstoffspezifischen Parameter;
- zu den Verfahrensgrenzen des HIU überhaupt sowie zu den optimalen Parametern hinsichtlich Masse und Geschwindigkeit des Hammers, Tiefe des Wirkmediums und Steifigkeit des Werkstückes.

Die weitere Klärung der vorgenannten Zusammenhänge stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung des HIU-Verfahrens zu einer innovativen Technologie mit zahlreichen Vorteilen insbesondere für die Blechumformung dar und bildet damit den Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen.

Da die dynamischen Untersuchungen die Verwendung sehr komplizierter und teurer Messtechnik sowie Werkzeuge erfordern, wurden systematische grundsätzliche Untersuchungen des HIU auf der Basis von modernen mathematischen Modellen unter Einbeziehung der FEM-Simulation durchgeführt und an ausgewählten Beispielteilen quasistatisch experimentell geprüft.

2.4 Prozesssimulation

Der Einsatz von FE-Methoden im Produktentstehungsprozess ist heute für die Qualitätssicherung sowie für die Weiterentwicklung von Umformprozessen und Werkzeugen sowie für eine wirtschaftliche Fertigung notwendig. Um beim Einsatz eines neuartigen Verfahrens bereits im Vorfeld Aussagen über die Machbarkeit und erreichbarer Qualität der Fertigteile treffen zu können, ist die Umformsimulation ein unterstützendes Werkzeug. Dabei muss eine hohe Abbildungsqualität des Realprozesses gewährleistet sein.

Bei der technologischen Entwicklung konnte die hohe Flexibilität der FEM genutzt werden, die eine schnelle Veränderung sowohl der Prozessparameter als auch der Werkstück- und Werkzeuggeometrien bei diesem neuen Fertigungsverfahren ermöglichte. Somit konnten anhand der FE-Ergebnisse innerhalb kurzer Zeit und mit geringeren Investitionskosten die Auswirkungen auf das Umformergebnis beurteilt und Risiken, die durch nicht ausreichende Kenntnisse der HIU- Prozessgrundlagen auftreten, minimiert werden.

Bisher gibt es keine fundierten Kenntnisse hinsichtlich der Abbildungsqualität der FE-Simulation für HGU-Prozesse insgesamt und insbesondere für HIU.

2.4.1 Simulation von Umformprozessen

Die FEM-Simulation ermöglicht es Aussagen über den Umformprozess vor seiner realen Durchführung zu treffen und die Werkzeuggeometrie sowie einzustellende Prozessparameter virtuell schnell und kostengünstig zu optimieren. Bei der Prozesssimulation wurde ein realer Umformvorgang in ein idealisiertes physikalisches Modell überführt und mit dessen Hilfe die Prozessgrößen näherungsweise bestimmt [26, 27]. Die Modellierung des Umformprozesses kann in Abhängigkeit von der Komplexität des betrachteten Umformvorgangs in analytische, halbanalytische und numerische Verfahren unterschieden werden [28]. Für den Bereich der Simulation von Umformverfahren insgesamt und insbesondere der dynamischen Umformverfahren hat sich auf Grund der Komplexität des Prozesses und der hohen Flexibilität der Modellierungsmöglichkeiten die numerische Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgesetzt, obwohl die analytischen sowie halbanalytischen Methoden immer noch eine große Bedeutung für vereinfachte geometrische Verhältnisse haben.

Die FEM wird in der industriellen Fertigung sowohl zur Gestaltung von Werkzeuggeometrien als auch zur Optimierung von Bauteileigenschaften eingesetzt [29].

Mit der momentan verfügbaren Software kann die Fertigung komplexer Bauteilgeometrien und Fertigungsoperationen für konventionelle quasistatische Umformverfahren ziemlich genau berechnet werden.

Insbesondere bei der Vorbereitung der Fertigung von Großserien, z.B. im Bereich der Automobilindustrie, erfolgt eine umfassende Analyse der Blechteile vor der eigentlichen Fertigung. Mit ihrer Hilfe werden die Machbarkeit und die Bauteileigenschaften beurteilt. Dafür werden speziell angepasste Programme von Software-Entwicklern angeboten.

Die FEM-Programme für nichtlineare Berechnungen realisieren eine implizite oder explizite Zeitintegrationsmethode. Bei implizierten FEM-Berechnungen bleiben dynamischen Kräfte unberücksichtigt und Umformprozess wird als statischer Vorgang beschrieben.

Beim implizierten Verfahren werden die Gleichgewichtsbedingungen durch den Einsatz von Iterationsverfahren, z.B. nach Newton-Raphson, bestimmt. Der Aufbau und die Lösung der

erforderlichen tangentialen Steifigkeitsmatrix in jedem Iterationsschritt benötigt jedoch eine hohe Speicher- und Rechenzeitkapazität [26].

Bei der expliziten Methode wird eine Bewegungsgleichung formuliert und über ein zentrales Differenzen-Schema gelöst. Aus Stabilitätsgründen ist bei dieser Methode der Zeitschritt begrenzt und von der kleinsten Seitenlänge des Elementes abhängig [31].

Zur Berechnung der dynamischen Verformung beim HIU sind die implizierten Methoden nicht geeignet. Dabei können die durch Druckwellen auftretenden Instabilitäten wie z.B. Faltenbildung, Massenkräfte, lokale Erwärmungen usw. nicht berücksichtigt werden.

Für die Vereinfachung und Beschleunigung der Berechnungen wurden bei der FEM-Simulation der quasistatischen Prozesse viele Annahmen eingesetzt, die für eine realistische Berechnung der dynamischen Prozesse nicht akzeptabel sind. Da z.B. die Umformwerkzeuge im Vergleich zum Blech eine höhere Steifigkeit aufweisen, wurden Sie durch einen starren Körper idealisiert und nur mit Werkzeugoberflächen modelliert. In den meisten Berechnungsmethoden werden Werkzeuggeometrien durch einfache Oberflächenelemente approximiert. Bei den dynamischen Prozessen muss dagegen neben der Geometrieinformation auch die Kraftübertragung der eigenen Verformung der Werkzeuge sowie der Kontakt und die dynamische Reibung während der Umformung modelliert werden. Dabei können Probleme bei der Beschreibung einander grenzender Flächensegmente auftreten, die zu uneindeutigen Kontaktbeschreibungen insbesondere an den Grenzen flüssiger bzw. gasförmiger Wirkmedien mit festen Körpern führen können [32].

Da die Blechteile in ihren End- und Zwischenformen eine mehrfach gekrümmte Geometrie aufweisen, ist eine 3D-Beschreibung in der Simulation unumgänglich. Diese erfordert den Einsatz von Schalen-, Volumen- und Membranelementen [33].

Die Beschreibung von konventionellen Umformprozessen wird meist mit Membran- oder Schalenelementen durchgeführt. Durch ihre flächigen Formulierungen kann das Blech durch weniger Elemente diskretisiert werden, was eine kurze Berechnungszeit bei zuverlässiger Genauigkeit ermöglicht.

Die dynamische Verformung erfolgt mit den überlagerten Schwindungen des Blechs in Form von laufenden Wellen. Für die Beschreibung von Biegeeffekten und die Formulierung des beidseitigen Kontaktes des Bleches zum Werkzeug und zum Wirkmedium wurde der Einsatz von Volumenelementen erforderlich. Die Modellierung einer dynamischen Biegung des Blechs bei den überlagerten Schwindungen fordert jedoch den Einsatz von mehreren Volumenelementen in Dickenrichtung. Da weiterhin das Verhältnis der Kanten eines Volumenelementes nicht das Verhältnis 1:4 unterschreiten darf [34], muss eine hohe Elementenanzahl bei der Simulation dynamischer Prozesse wie HIU eingesetzt werden.

Bei der Simulation von wirkmedienbasierten Umformverfahren haben spezielle FE-Programme, wie z.B. INDEED, LS-DYNA und AUTOFORM einen hohen Entwicklungsstand erreicht [35, 36], so dass auch komplexe Fertigungsoperationen des Innenhochdruckumformens von Rohren erfolgen können. Sowohl vorher durchgeführte Biegeoperationen als auch anschließende Rückfederungen können erfasst werden. Neben der Machbarkeitsanalyse für spezielle Bauteilgeometrien, der Bewertung der Bauteileigenschaften und der Prozesssicherheit wurden durch FEM-Berechnungen die Bestimmung des Werkstoffflusses, von Spannungen und Dehnungen, der benötigten Umformkräfte und der Werkzeugbelastung in einzelnen Umformschritten erreicht. Dies trifft aber auf die dynamischen wirkmedienbasierten Umformverfahren nicht zu.

Anhand des Testens der Simulationsprogramme für die Prozesse mit erhöhten Umformgeschwindigkeiten ist erkennbar, dass mit den quasistatischen Fließkurven das reale Verhalten nicht abgebildet werden kann. In rissgefährdeten Elementen traten hohe Verformungen bei Dehnraten von mehr als hundert Prozent auf. Mit den quasistatischen Fließkurven wurden Risse berechnet, die in den realen Ziehtteilen nicht auftraten. Wie die eigenen Berechnungen an Modellen zeigen, muss eine Modellierung mit dynamischen Fließkurven erfolgen. Mit diesen konnte die experimentell festgestellte Risslage gut vorhergesagt werden.

Das Verhalten der Metallwerkstoffe während der Umformung kann in der Simulation durch starr-plastische bzw. elastisch-plastische Stoffmodelle beschrieben werden [37]. Bei der Modellierung der Blechumformung sollen die Instabilitäten, wie z.B. Faltenbildung sowie Eigenspannungen und Rückfederungen vorhergesagt werden können. Deshalb sind die

elastischen Anteile nicht vernachlässigbar und müssen durch elastisch-plastische Modelle berücksichtigt werden. Eine genaue Materialbeschreibung durch neuste Werkstoffmodelle und Integration weiterer Materialkennwerte sind eine Voraussetzung für die Qualität von Umformsimulationen [38].

Für die Simulation von dynamischen Prozessen wie z.B. Explosion, Durchbrechen, Zersplittern wurde ein speziell für die Hochgeschwindigkeitstechnik entwickeltes Programm AUTODYN eingesetzt. Der Einsatz von AUTODYN für die Simulation von Umformprozessen ist bisher aber nicht bekannt, deshalb wurde zunächst die Eignung des Programms AUTODYN zur Abbildung der dynamischen aber auch quasistatischen Umformprozesse untersucht.

2.4.2 Auslegung von Werkzeugkomponenten

Für die neuartigen noch nicht ausreichend untersuchten Verfahren wie HIU ist es von großer praktischer Bedeutung die Werkzeuge schon bei der Entwicklung möglichst optimal zu konstruieren und dadurch Kosten und Zeit für die Einarbeitung der Werkzeuge zu sparen. Dafür bietet die FEM wegen seiner hohen Flexibilität bei den Modellierungsmöglichkeiten und der Festlegung von Randbedingungen eine weitere Anwendungsmöglichkeit. So können auch komplexe geometrische Strukturen im Bereich der Werkzeugtechnik durch numerische Simulationsberechnungen untersucht werden.

Bei der Simulation von konventionellen Blechumformprozessen werden meistens die Werkzeuge als starr beschrieben [39]. Die gekoppelten Berechnungen in der Massivumformung (z.B. Software MARC) bieten einen Lösungsansatz zur Berücksichtigung der wirkenden Reaktionskräfte und der Angriffspunkte in der Simulation [40], jedoch nur unter quasistatischen Bedingungen. Die spezifischen dynamischen Effekte wie z.B. die Druckwellenausbreitung in den Werkzeugelementen können mit bekannten FE-Modellen nicht berücksichtigt werden. Deshalb besteht ein weiterer Forschungsbedarf bei der Auslegung und Modellierung der Werkzeuge für dynamische Prozesse insgesamt und konkret für HIU-Werkzeuge bei ihrem Einsatz in der Industriepraxis.

2.4.3 FE-Modellierung des Wirkmedienverhaltens

Für die Simulation von wirkmedienbasierten dynamischen Verformungen ist das Verhalten der Wirkmedien selbst von besonderer Bedeutung. Die bekannten Untersuchungen [41] bieten eine Lösung für die quasistatischen Prozesse und für die üblichen flüssigen Wirkmedien (Öl). Als Wirkmedien wurden in der Praxis flüssige aber auch elastische Werkzeugkomponenten eingesetzt. Die speziell für Flexforming mit Elastomer-Membran - entwickelten Programme wie „Flexform“ ermöglichen die Berücksichtigung des Reibverhaltens sowie die extrem große elastische Verformbarkeit des Elastomers, jedoch unter quasistatischer Belastung. Bei dynamischen Verfahren soll der Druck und der Materialfluss im Wirkmedium abhängig von Ort und Zeit berücksichtigt werden.

In den Untersuchungen von HIU-Verfahren sollen sowohl die flüssigen (Wasser) als auch elastischen (Gummi, Polyurethan) Wirkmedien eingesetzt werden. Obwohl für die Berechnung von Strömungen der flüssigen Medien in abgegrenzten Räumen mehrere Modelle und Software-Tools angeboten werden [35, 42], können diese Modelle bei der Untersuchung des dynamischen Verhaltens von durch starke Druckwellen belastete flüssige Wirkmedien nur begrenzt eingesetzt werden. Die Lösungen für die elastischen Wirkmedien werden kaum angeboten.

Im Vergleich zu Metallwerkstoffen weisen Elastomere ein anderes Materialverhalten auf. Bei einer Beanspruchung wird am Elastomer eine hohe elastische Verformung verbunden mit kleinen Spannungswerten erzielt. Für Elastomere kann kein linear-elastischer Bereich definiert werden [43]. Wegen der großen möglichen Deformationen müssen in der Simulationsberechnung geometrische Nichtlinearitäten beschreibbar sein. Die Inkompressibilität und Hyperelastizität der Elastomere muss durch spezielle Materialgesetze modelliert werden [44].

Die in einigen FEM-Simulationsprogrammen implementierten Materialgesetze berücksichtigen jedoch nicht das dynamische Verhalten von Elastomeren und sollen für die Simulation von HIU erweitert werden.

2.4.4 Berechnung von HIU-Anlagen mit der FEM

Die Simulation erlangt auch im Bereich der konventionellen Umformmaschinen sowie Hochgeschwindigkeitsanlagen eine zunehmende Bedeutung [7, 45].

Die FEM-Simulation wird zur Auslegung und Steifigkeitsoptimierung von Gestellen für Pressen, Verbesserung des Genauigkeitsverhaltens von Stößelbewegungen und zur Berechnung der Pressenstrukturen z.B. für wirkmedienunterstützte Umformverfahren eingesetzt. Die Berechnungen werden häufig mit dem Programm ANSYS durchgeführt, wobei die Diskretisierung aus Schalen- und Volumenelementen erfolgt.

Bei der Auslegung von Hochgeschwindigkeitsumformtechniken gibt es kaum praktische Erfahrungen bezüglich der Prozesskräfte. Die FEM soll in der Entwicklungsphase eine Modellierung der HIU-Anlage-Struktur, einen Funktionsnachweis und die Optimierung der Anlagenbestandteile zunächst virtuell ermöglichen.

3. Zielsetzung und Aufgabestellung

Durch die Anwendung des speziellen Wirkprinzips „Hydroimpuls“ sollen neuartige Möglichkeiten zur wirkmedienbasierten Umformung von Blechteilen geschaffen und für die industrielle Nutzung nutzbar gemacht werden. Mit den Ergebnissen der Untersuchungen soll ein Beitrag zur Qualitätssicherung sowie zur Erweiterung der Anwendungsbereiche und der wissenschaftlichen Grundlagen der wirkmedienbasierten Blechumformung als Voraussetzung für die Herstellung intelligenter Leichtbauteile geleistet werden.

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss der Prozessparameter beim Hydro-Impuls-Umformen zu ermitteln. Das formulierte Forschungsziel soll durch theoretische und experimentelle Untersuchungen unter Einbeziehung der FEM-Simulation erreicht werden.

Um das Erfahrungswissen über die Werkzeug- und Anlageauslegung für das neuartige Blechumformverfahren HIU zu erweitern, sollen verstärkt die Möglichkeiten der numerischen Prozesssimulation genutzt werden. Die Fertigungssimulationen sollen vor allem eine Qualitätssteigerung und Verringerung der Anzahl experimenteller Untersuchungen bewirken,

um die Kosten sowie den Zeitaufwand für die komplexen Versuchswerkzeuge und –anlagen möglichst gering zu halten.

Einen wesentlichen Arbeitsschwerpunkt im Bereich der Umformsimulation stellt die realistische Abbildung der Hochgeschwindigkeitsumformprozesse dar. Hierzu müssen geeignete FE-Modelle entwickelt werden, mit denen die Prozessparameter, die Prozessgrenzen sowie die Bauteileigenschaften mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden können.

Aus dieser Zielsetzung resultiert für die Untersuchung folgende Aufgabestellung:

- Analyse und wissenschaftliche Beschreibung des Wirkprinzips unter besonderer Berücksichtigung der für die Umformung nutzbaren dynamischer Effekte;
- Erarbeitung des Modells und einer Berechnungsmethode zur Berechnung von HIU-Prozessen;
- Durchführung von Simulationsberechnungen von Umformversuchen unter Verwendung dynamischer Werkstoffkennwerte;
- Bestimmung geeigneter Wirkmedien / Wirkketten;
- Ableitung von Berechnungsansätzen für den Kraft- und Energiebedarf;
- Konstruktion und Bau der HIU-Versuchsanlage sowie Implementierung einer Messvorrichtung;
- Ermittlung maßgebender Verfahrensparameter und -grenzen sowie Endteileigenschaften für das HIU für ausgewählte Werkstückgrundgeometrien;
- Vergleich der Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit den Ergebnissen von Analysen von Formänderungen an realen Bauteilen.

Die Güte der FEM-Berechnungen wird mit Hilfe von ausgewählten Ergebnissen eines Referenzbauteils anhand von experimentellen Untersuchungen bewertet. Nach einem erfolgreichen Abgleich soll eine Optimierung der Prozessparameter am Referenzbauteil erfolgen. Ziel dieser technologischen FE-Untersuchungen ist es, über eine Variation der Prozessparameter ein vorzeitiges Werkstoffversagen zu verhindern und die umformtechnisch bedingten Prozessgrenzen festzustellen.

Einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit stellt die Prüfung des Einsatzes erweiterter FE-Modellierungen der Umformprozesse dar. Diese sollen die Beschreibung der spezifischen

dynamischen Effekte beim HIU ermöglichen. Das war mit bisher konventionell eingesetzter Software nicht möglich. Sie sollen am Beispiel vom HIU-Tiefziehen erstmalig durchgeführt und bewertet werden.

In einem weiteren Schritt werden diese optimierten Prozessparameter auf reale Bauteile übertragen. Für die industrielle Nutzung müssen neben einer qualitativ abgesicherten Prozessführung die Konzepte für die HIU-Werkzeuge und - Anlage analysiert werden. Abschließend werden die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen des HIU-Verfahrens beurteilt.

4. Untersuchungsmethoden

Die Analyse und wissenschaftliche Beschreibung des HIU-Verfahrensprinzips wird mit einem für die Software AUTODYN selbst entwickelten FE-Modell unter Berücksichtigung der Besonderheiten dynamischer Umformung durchgeführt. Aus den Ergebnissen der FEM-Verfahrenssimulation werden Schlussfolgerungen für eine verfahrensgerechte Gestaltung des Werkzeuges und die zweckmäßige Auswahl der Verfahrensparameter abgeleitet. Im Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentell ermittelten Werten werden Aussagen zur Realitätsnähe der Simulation und der Anwendbarkeit auf das zu untersuchende Verfahrensprinzip getroffen.

4.1 HIU-Wirkprinzips. Einflussgrößen

Das HIU gehört zu den Hochgeschwindigkeitsumformverfahren mit einer indirekten Einwirkung der Energiequelle. Im Unterschied zu der z.B. elektrohydraulischen bzw. Explosivumformung, werden beim HIU die Belastungsimpulse im Wirkmedium über eine zusätzliche Zwischenmasse erzeugt (Bild 5).

Die potentielle Energie des im Hochdruckbehälter komprimierten gasförmigen Wirkmediums (Luft) wurde in eine kinetische Energie der beschleunigten Zwischenmasse (des Hammers) umgewandelt. Der Druckimpuls in der Arbeitskammer wird durch Auftreffen des Hammers auf das flüssige bzw. elastische Wirkmedium erzeugt. Diese zusätzliche Energieumwandlung lässt

die extrem hohen Drücke in den Wirkmedien bei verhältnismäßig geringeren Ausgangsdrücken der Energiequelle zu erzeugen. Die kinetische Energie ist im Wesentlichen vom Ausgangsdruck, der Masse des Hammers und dem Beschleunigungsweg abhängig. Die energetische Optimierung des Anlagekonzeptes stellt eine wichtige Aufgabe der Forschungsarbeit dar. Aus den Ergebnissen der FE-Untersuchungen und der Experimente werden Aussagen zur Verfahrensführung und zur Auswahl geeigneter Verfahrensparameter abgeleitet.

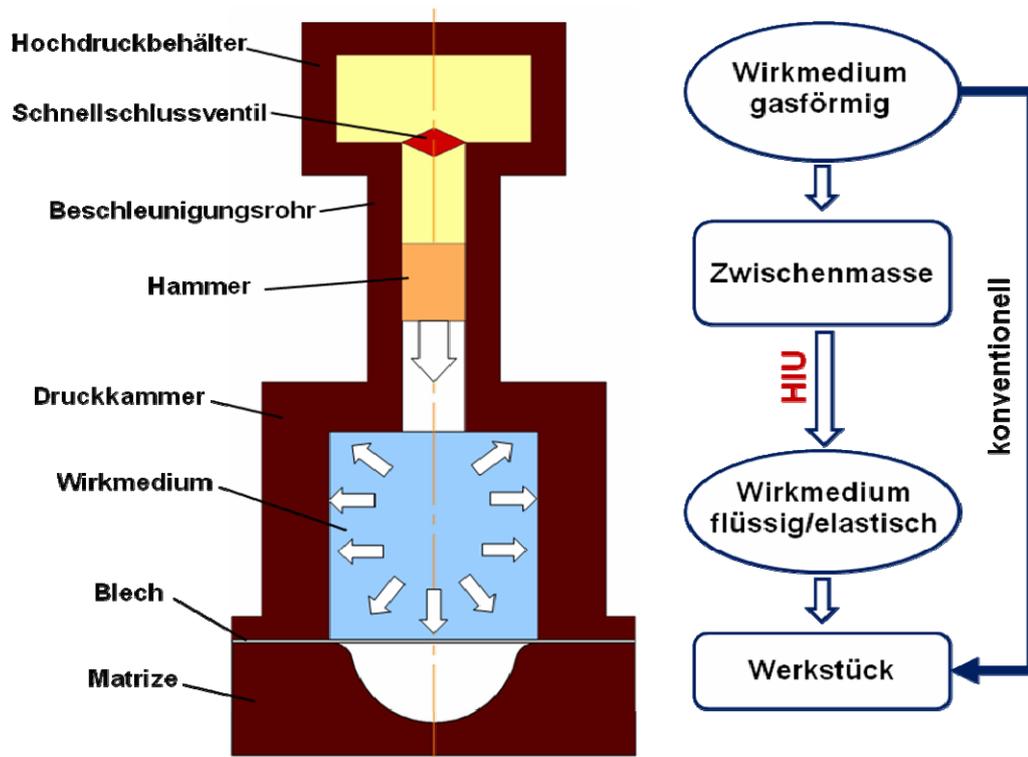


Bild 5: Wirkprinzip des HIU-Verfahrens

Bei den Versuchen werden die folgenden Einflussparameter variiert (Bild 6):

- die Verfahrenskenngrößen (Hammermasse und -geschwindigkeit)
- das Wirkmedium (Werkstoff und Schichtdicke)
- der Werkstoff und die Geometrie des Werkstückes
- die Werkzeuggeometrie.

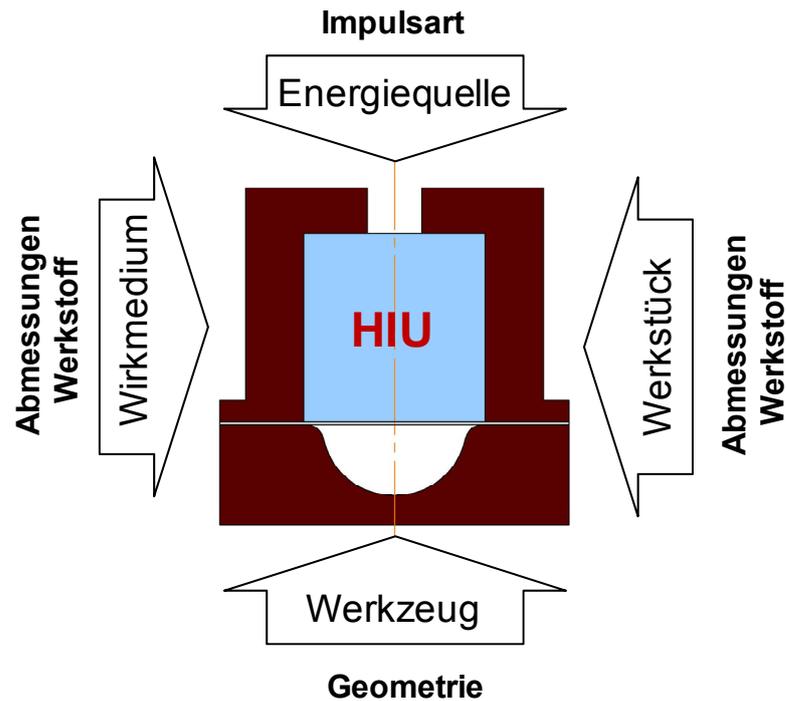


Bild 6: HIU-Einflussgrößen

Aus den Ergebnissen der FE-Untersuchungen und der Experimente werden Aussagen zur Verfahrensdurchführung und zur Auswahl geeigneter Verfahrensparameter abgeleitet.

4.2 Simulation der HIU-Prozesse

4.2.1 Voraussetzungen zur numerischen FE-Simulation

Am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg stehen die FEM-Programme AUTOFORM, MARC, LS-DYNA und INDEED zur Verfügung. Da aus der Analyse der genannten Programme (2.4.1) folgt, dass die spezifischen dynamischen Effekte der Hochgeschwindigkeitsumformung nicht ausreichend in den o.g. Simulationsprogrammen berücksichtigt werden können, fiel die Entscheidung auf den Einsatz eines speziellen Programmproduktes AUTODYN. Dieses Programm wurde speziell für die Berechnung von dynamischen Prozessen wie Explosion, Durchbruch usw. in der Militär- und Sicherheitstechnik entwickelt. Mit dem Programm AUTODYN kann nahezu jede beliebige physikalische Problemstellung, die sich durch Feldgleichungen beschreiben lässt, behandelt

werden. Mit Hilfe der umfangreichen Elementbibliothek besteht bei AUTODYN auch die Möglichkeit, komplexe Problemstellungen auf 2D-Modelle zu reduzieren. Dieses Programm ist durch die Implementierung spezieller Elementformulierungen, Reib- und Materialgesetze, sowie Kontakt- und Lösungsalgorithmen auf die dynamischen Verhältnisse abgestimmt. Einen besonderen Schwerpunkt des Programms stellt die realistische Beschreibung des Verhaltens von unterschiedlichen Materialien unter Druckwellenbelastung und bei hohen Geschwindigkeiten dar.

Da bis zum Beginn dieser Arbeit keine umformtechnischen Berechnungen mit dem Programm AUTODYN bekannt sind, soll die Eignung des Programms für die FEM-Simulation der Hochgeschwindigkeitsumformung überprüft werden.

4.2.2 Simulationsmodelle

Es wurden die Simulationsmodelle für das verformbare Blech aus Stahl und aus einer Aluminiumlegierung, für die Werkzeuge aus Stahl, für die Wirkmedien Wasser und Gummi sowie für die an der Matrizenkaverne angeschlossenen Luft definiert. Bei der Auswahl des Modells wurden die Besonderheiten des Materialverhaltens bei hohen Geschwindigkeiten berücksichtigt. Aus dem Anforderungsprofil ergibt sich, dass zur Beschreibung der verschiedenen Simulationsaufgaben unterschiedliche Finite-Element-Typen benötigt werden. Für die ausgewählten Blechwerkstoffe sind die charakteristischen Werkstoffkennwerte in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Materialeigenschaften für die untersuchenden Bleche

Bezeichnung		QStE340	Al2024
Dichte ρ	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7,90	2,785
Gleichungen des Zustandes			
Shock			
Gruneisen-Koeffizient	(none)	1,930	2,0
Parameter c_1	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$4,570\cdot 10^3$	$5,328\cdot 10^3$
Parameter s_1	(none)	1,490	1,338
Temperatur	(K)	300	300
Spezifische Wärme c	$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	423,0	180,0
Festigkeitsverhalten			
Steinberg-Guinan			
Schubmodul G	(kPa)	$7,70\cdot 10^7$	$2,60\cdot 10^7$
Fließspannung	(kPa)	$3,40\cdot 10^5$	$1,2\cdot 10^6$
Maximale Fließspannung	(kPa)	$2,50\cdot 10^6$	$1,80\cdot 10^6$
Verfestigungskonstante K	(none)	43,0	10,0
Verfestigungsexponent n	(none)	0,35	0,1
Schmelztemperatur	(K)	2.380	850

hier: Parameter c_1 – Schallgeschwindigkeit,

Parameter s_1 – Verhältnis Schallgeschwindigkeit / Partikelgeschwindigkeit.

Bei den betrachteten Umformprozessen geht man von der Idealisierung aus, dass die Biegung gegenüber der Membranspannung klein ist. Deshalb werden für die Bleche Membranelemente formuliert und aus dem ebenen Spannungszustand ausgegangen.

Bei der Formulierung der Gleichungen des Zustandes wurde der *Gruneisen-Koeffizient* berücksichtigt und ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Druck bei einer adiabatischen Zustandsänderung dargestellt. Sie wird zur Berechnung von Stoßwellen bei hohem Umgebungsdrücken und zur Modellierung von dynamischen Untersuchungen verwendet. Sie stellt die Messergebnisse von Hochdruckexperimenten auf der Basis von nur zwei Materialparametern mit guter Genauigkeit dar.

Bei den Berechnungen des Blechumformens wurde das Blechmaterial als ein plastisch und elastisch verformbares Material unter Berücksichtigung von Stabilitätsverlust und Faltenbildung sowie der Ausschöpfung von Duktilität bis zur dynamischen Bruchgrenze und Riss- bzw. Splitter-Bildung betrachtet.

Das Festigkeitsverhalten wurde mit dem *Steinberg-Guinan* Modell charakterisiert. In diesem Modell wird berücksichtigt, dass die Fließspannung zunächst zusammen mit der Dehnungsgeschwindigkeit steigt. Danach erreicht die Fließspannung einen maximalen Wert, der weiter von der Deformationsgeschwindigkeit abhängig ist. Der Schubmodul steigt mit der Druckerhöhung und sinkt mit einer Temperaturerhöhung. Deshalb ist in diesem Modell der *Bauschinger*effekt implementiert.

Für dieses Modell bietet AUTODYN eine Datenbank für die meist im technischen Sinne eingesetzten Materialien mit dem Berücksichtigen der Abhängigkeit des Schubmoduls und der Fließgrenze von der Verformungsgeschwindigkeit, den plastischer Dehnungen, dem Druck sowie von der Innenenergie (Temperatur).

Die Werkzeuge wurden auch als elast-plastisch verformbar betrachtet (Tabelle 2), obwohl die plastische Verformung der Werkzeugelemente nur lokal bis zu einem bestimmten Grenzwert zugelassen werden soll. Bei den Werkzeugen spielt eine elastische Verformung bis zur Bildung von Mikrorissen eine übergeordnete Rolle.

Tabelle 2: Materialeigenschaften für das Werkzeug

Name		STEELV250
Dichte ρ	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	8,129
Gleichungen des Zustandes		
		Shock
Gruneisen-Koeffizient	(none)	1,60
Parameter c_1	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$4,980\cdot 10^3$
Parameter s_1	(none)	1,580
Temperatur	(K)	300
Spezifische Wärme	$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	407,99
Festigkeitsverhalten		
		Steinberg-Guinan
Schubmodul G	(kPa)	$7,179\cdot 10^7$
Fließspannung	(kPa)	$1,560\cdot 10^6$
Maximale Fließspannung	(kPa)	$2,50\cdot 10^6$
Verfestigungskonstante K	(none)	2,0
Verfestigungsexponent n	(none)	0,50
Schmelztemperatur	(K)	$2,310\cdot 10^3$

Zur Beschreibung von Massivkörpern wie z.B. Werkzeuge sind die Volumenelemente besonders gut geeignet. Zur Diskretisierung der Werkzeugkomponenten werden bei den numerischen Simulationen IJK-Elemente eingesetzt (Bild 7).

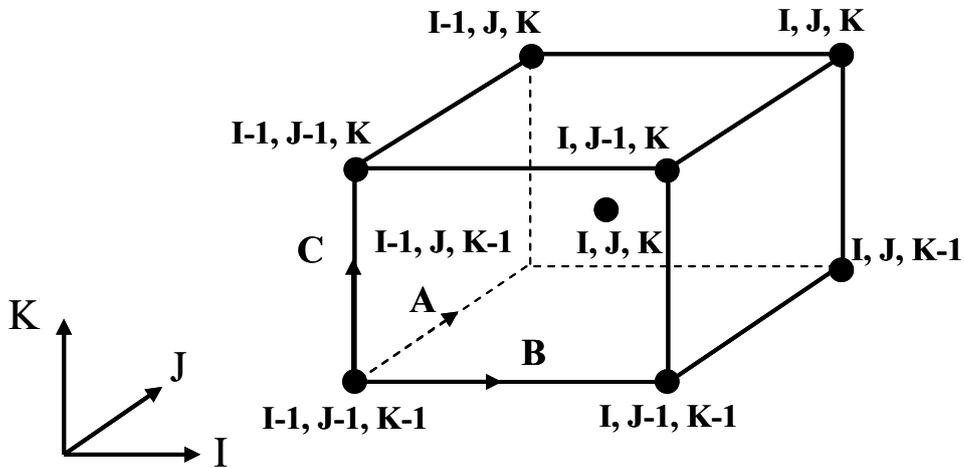
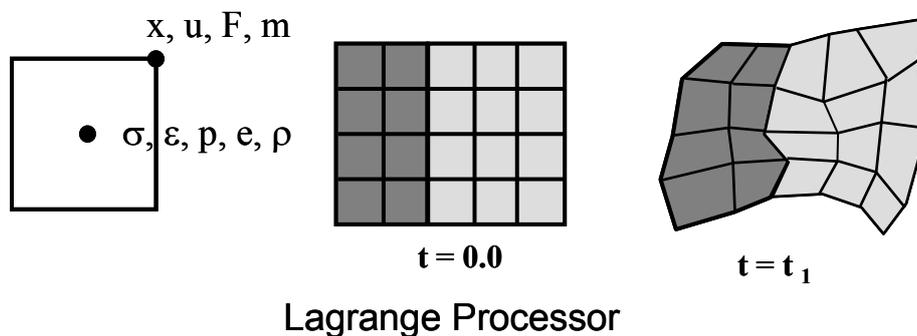


Bild 7: Volumenelement für die Beschreibung der Werkzeugkomponenten

IJK-Elemente basieren sich auf IJK- Vektoren (Deckart-Koordinatensystem) für jeden Knoten. Alle Daten sind mit geometrischer Topologie des Elementes definiert.

Für die Berechnung von festen Körpern, wie z.B. Blech, Matrize, Druckkammer und Arbeitskammer wurden IJK- Lagrange-Elemente ausgewählt. Die Gitterstruktur des Materials bewegt und verzerrt sich zusammen mit dem numerischen Netz (Bild 8).



Lagrange Processor

Bild 8: Lagrange-Elemente

Für die Blech- sowie Werkzeugmaterialien werden die Zustandgleichungen über das sog. *SHOCK EOS*-Modell formuliert. Dabei wird der Fluss eines kompressiblen Mediums mit Eulergleichungen und das Verhalten von Stoßwellen mit den *Rankine-Hugoniot-Gleichungen* beschrieben. Die *Rankine-Hugoniot-Gleichung* beschreibt die Sprungbedingungen für die Geschwindigkeit und die Dichte (bzw. Druck) an der Stoßfront und ist für die meisten Materialien einsetzbar. Als Voraussetzung gilt dabei der Erhalt von Masse, Energie und Impuls. Das führt dazu, dass die Flussgeschwindigkeiten beiderseits der Stoßfront eliminiert worden sind.

Die Gleichungen sind äquivalent zu den Erhaltungssätzen von Masse, Impuls und Energie. Dabei ist zu beachten, dass der Energiefluss aus den drei Komponenten mechanische Arbeit, innere Energie und kinetische Energie besteht.

Für die flüssigen, elastischen und gasförmigen Medien wurden sog. SPH –Elemente (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) eingesetzt (Bild 9). Bei den SPH-Elementen wird die Zusammenwirkung zwischen den Partikeln durch die Interpolations-Funktion berechnet. Es gibt keine feste Kopplung zwischen den Partikeln.

$$\rho^I = \sum_{J=1}^N m^J W^{IJ}(x^I - x^J, h)$$

wo m^J – masse des Partikels
 W^{IJ} – Massenfunktion (Kernel B-Spline)
 x^J – Position der Center des Partikels
 h – angegebene Partikelgröße

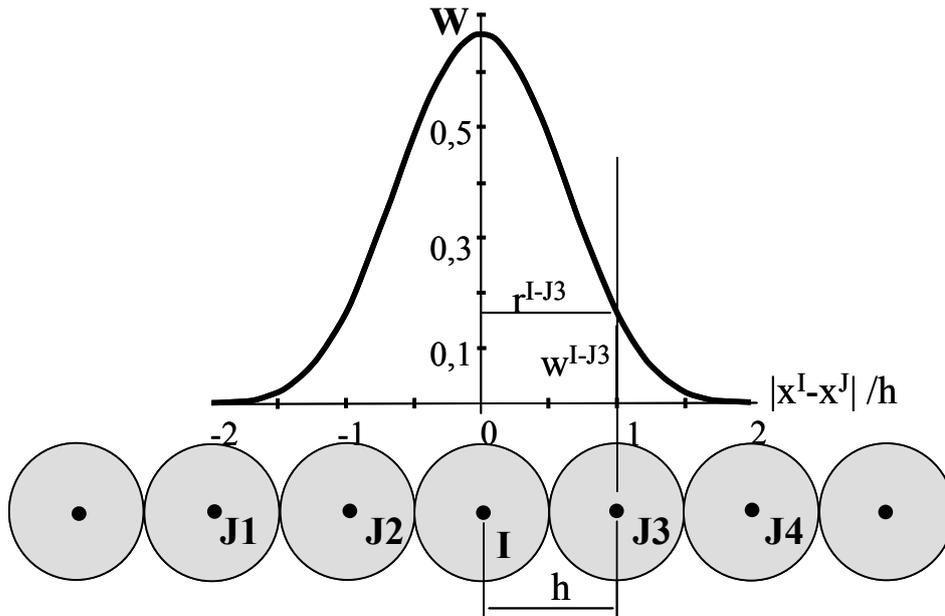


Bild 9: Das SPH-Elemente für die Beschreibung von Wirkmedium

Wegen der speziellen Formulierung eignen sie sich besonders zur Modellierung von Problemstellungen, bei deren inkompressibles, elastisches Materialverhalten zu erwarten ist. Das zu simulierende flüssige Wirkmedium wird in SPH-Elemente aufgeteilt, die, ähnlich den Monte-Carlo Methoden, zufällig über das ganze Medium verteilt werden, was den möglichen Fehler minimiert. Der mittlere Abstand zwischen den einzelnen Elementen wird durch die *Smoothing Length* (Glättlänge) h repräsentiert. Sie ist der wichtigste Parameter der Methode.

Zwischen den Teilchen wird das Fluid durch den Kernel geglättet. Jede Größe (z. B. die Dichte ρ) wird durch Summation über alle Teilchen berechnet. Jedes einzelne Teilchen erhält einen Anteil in Form eines Skalars an dieser Größe. Dadurch werden aus den partiellen Differentialgleichungen der Hydrodynamik gewöhnliche Differentialgleichungen, was die Berechnungen sehr vereinfacht. Um die Hydrodynamik in SPH zu formulieren, ist der einfachste Ansatz, die Grundgleichung in die hydrodynamischen Gleichungen wie z. B. die *Navier-Stokes*-Gleichung einzusetzen. Die daraus resultierenden Gleichungen sind allerdings nicht symmetrisch gegenüber der Teilchenvertauschung. Deshalb gelten in diesem Fall viele Erhaltungssätze wie für die Energie, den Drehimpuls, etc., nicht mehr. Für das flüssige Wirkmedium Wasser wurde das sog. HYDRO-FEM-Modell eingesetzt (Bild 10).

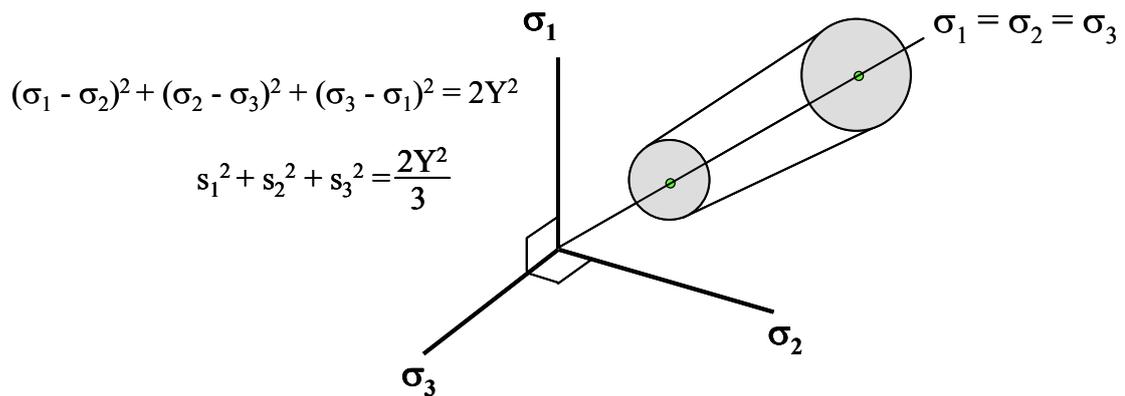


Bild 10: HYDRO-Modell

Beim HYDRO-Modell ist die Fließspannung gleich Null. Die Spannungen in allen drei Richtungen sind gleich. Für das Wasser wurde ein minimaler Druck definiert, bei dem das flüssige Medium noch homogen und kontinuierlich bleibt (Tabelle 3). Wurde dieser Druck unterschritten, entstehen im Wasser die Kavitationen.

Tabelle 3: Materialeigenschaften für das Wirkmedium Wasser

Name		WATER
Dichte ρ	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,00
Gleichungen des Zustandes		Shock
Grüneisen-Koeffizient	(none)	0,280
Parameter c_1	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$1,4830\cdot 10^3$
Parameter s_1	(none)	1,75
Festigkeitsverhalten		None
Versagenskriterien		Hydro (Pmin)
Hydro Tensile Limit	(kPa)	$-1,0\cdot 10^4$

Für das elastische Wirkmedium Gummi wurde ein lineares elastisches Festigkeitsverhalten mit linearen Zustandgleichungen bis zum Bruch angenommen.

Bei linearem Modell hat der Druck die Funktion von zwei Variablen: vom spezifischen Volumen und von der spezifischen Entropie. In mehreren Fällen ist die Einfluss der Entropie sehr gering, deshalb kann der Druck als Funktion der Dichte oder des spezifischen Volumens

betrachtet werden. Für die elastischen Materialien wurde die Fließgrenze als unbegrenzt angenommen. (Tabelle 4).

Tabelle 4: Materialeigenschaften für das Wirkmedium Gummi

Name	GUMM	
Dichte ρ	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,2650
Gleichungen des Zustandes	Linear	
Kompressionsmodul	(kPa)	$2,0\cdot 10^6$
Festigkeitsverhalten	Elastic	
Schubmodul G	(kPa)	$5,0\cdot 10^3$

In der Matrize, der Druckkammer sowie im Beschleunigungsrohr der HIU-Anlage befindet sich Restluft, die bei hohen Geschwindigkeiten den Umformprozess stark beeinflussen kann. Die Restluft wurde in den Berechnungen als ideales kompressibles Gas betrachtet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Materialeigenschaften für die Luft

Name	Air	
Dichte ρ	($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0,001225
Gleichungen des Zustandes	Ideal Gas	
Gamma γ	(none)	1,4
Temperatur	(K)	288,20
Spezifische Wärme c	$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	717,6
Festigkeitsverhalten	None	
Versagenskriterien	None	

Die Zustandgleichung für das ideale Gas wird aus dem Boyle-Marionette und Guy-Lussac-Gesetz abgeleitet. Die innere Energie des idealen Gases wird proportional zur Temperatur betrachtet.

4.2.3 Kontaktformulierungen

Sowohl bei der Prozesssimulation des HIU-Umformens als auch bei den Berechnungen der Werkzeuge und Anlagen müssen die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Körpern und Medien beschrieben und in den FEM-Berechnungen durch Kontaktsituationen abgebildet werden. Diese werden über sog. Kontaktalgorithmen dargestellt, die im Kontakt zwischen starren und einem deformierbaren Körper, zwischen zwei deformierbaren Körper, sowie zwischen fließenden Wirkmedien und deformierbaren Körpern eingeteilt werden.

Bei konventionellen quasistatischen Umformprozessen kann davon ausgegangen werden, dass die Werkzeuge ein wesentlich steiferes Verhalten als das Blech aufweisen. Hierzu wurde der Kontakt zwischen einem deformierbaren und mehreren starren Körpern formuliert. Diese Idealisierung konnte bei den Hochgeschwindigkeitsprozessen nicht eingesetzt werden, da lokale Verformungen der Werkzeugelemente wegen des Druckwelleneinflusses wesentlich größer sind und oft im elasto-plastischen Bereich liegen. Bei der Simulation von Umformprozessen müssen neben dem beiseitigen Kontakt zwischen dem Blech und den Werkzeugen auch die lokalen Blechdickenänderungen während des Prozesses berücksichtigt werden. Da mit dem Element der beiderseitige Kontakt zu den Werkzeugen nicht abgebildet werden kann, sollen spezielle Niederhalterersatzmodelle verwendet werden. Die Blechdickenänderungen werden in der Nachlaufrechnung aus den Verzerrungen ermittelt. Durch lokale Blechaufdickungen und Blechdickeabnahmen verändern sich die Kontaktsituationen und die Kontaktformulierungen müssen erneut neu formuliert werden. Die Wirkmedienmodelle müssen die Komprimierung des Wirkmediums in Druckwellen, den Materialfluss innerhalb der Druckkammer sowie die Wechselwirkung zwischen dem Wirkmedium und dem deformierbaren Blech berücksichtigen.

Bei einer nichtlinearen Problemstellung, wie z.B. dem Fließen des Blechwerkstoffs und des Wirkmediums, bei großen Verschiebungen und sich ändernden Kontaktrandbedingungen, wird eine inkrementelle Vorgehensweise eingesetzt. Die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems erfolgt in diesem Fall durch ein Iterationsverfahren. Die Wirkimpulse und -drücke werden bei der HIU-Simulation nicht in einem Schritt, sondern inkrementell aufgebracht.

Beim Wechsel von einem zum nächsten Inkrement wird die Lastkonfiguration geändert. Die Kontaktsituation aus dem vorherigen Inkrement erfüllt nicht mehr die Gleichgewichtsbedingungen. Daher wird nun der Kontaktalgorithmus aktiviert, der eine Gleichgewichtskontaktsituation herstellt. An den Kontaktflächen zwischen den Werkzeugelementen, dem deformierbaren Blech und den Wirkmedien werden sowohl geometrische als auch physikalische Kriterien geprüft. Die Knoten werden in Kontaktknoten und freie Knoten eingeteilt, die im Laufe des Umformprozesses ihren jeweiligen Zustand ändern können.

Bei dynamischer Blechumformung hat die Reibung auf Grund der Relativbewegung einen hohen Stellwert. In einem Reibmodell muss neben dem Reibwert, der von den Oberflächen des Werkzeugs und Blechs sowie vom eingesetzten Schmierstoff abhängig ist, auch die Relativgeschwindigkeit zwischen den Kontaktkörpern berücksichtigt werden. Eine Reibkraft wird nur an Knoten, die sich im Kontakt mit einem anderen Körper befinden und sich verschieben, angetragen.

4.2.4 Ausgangsdaten. Dynamische Werkstoffkennwerte

Für die Werkstoffbeschreibung stehen Schnittstellen zu den verschiedenen Stoffgesetzen für nicht lineares Materialverhalten zur Verfügung, so dass in den Untersuchungen sowohl die elastisch-plastische Verformung des Blechs als auch eine ungewollte lokale Verformung der Werkzeugkomponenten beurteilt werden kann. Es wurden für die FEM-Simulation die Werkstoffmodelle [46] sowie Werkstoffkennwerte aus den eigenen Untersuchungen eingesetzt (siehe auch 7.2). Zur Ermittlung von dynamischen Werkstoffkennwerten wurden die Zugversuche an einem Schlagwerk in Kooperation mit der TU Chemnitz für den Geschwindigkeitsbereich 1 bis 10 m/s durchgeführt. Für die Geschwindigkeitsbereich 10-100 m/s wurde eine modifizierte pneumatische Prüfanlage eigener Entwicklung eingesetzt [47]. Mit einem vereinfachten Modell werden bei der Variation der Werkstoffeigenschaften und der Verfahrensbedingungen FEM-Berechnungen zum HIU-Prozeß vorgenommen, mit dem experimentellen Ergebnis verglichen und auf diese Weise die Berechnungsmethode korrigiert.

4.3 Experimentelle Messwerterfassung

Der Abgleich zwischen der Simulation und dem Experiment stellt eine wesentliche Grundlage für die Überprüfung und Bewertung von FE-Modellen dar. Mit einer erfolgreich abgeglichenen Modellbildung können auch weitere Berechnungen ohne parallele experimentelle Untersuchungen erfolgen.

Die in den Experimenten erfassten Messgrößen sind in Bild 11 dargestellt.

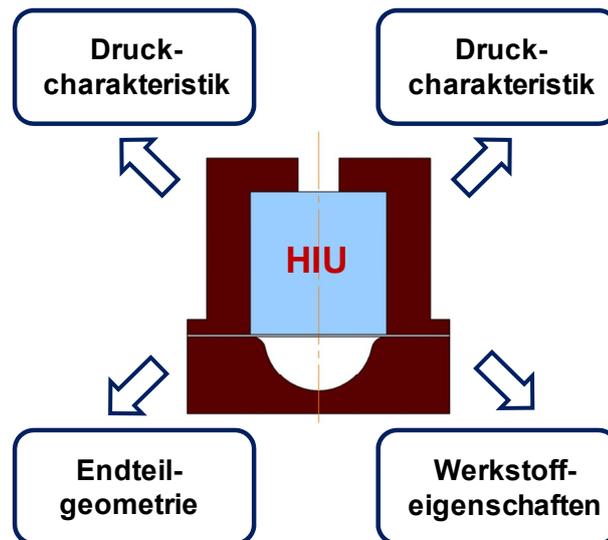


Bild 11: Messgrößen in Experimenten

Zur Bewertung der Güte von FEM-Simulationsberechnungen müssen die Prozessparameter, wie Druckcharakteristik im Wirkmedium, Geschwindigkeit des Hammers und des Blechs, geometrische Konturen der Bauteile, wie z.B. Geometriebildung in Abhängigkeit der Umformgeschwindigkeit und umformbedingte Änderungen der Eigenschaften, z.B. Blechdicke- bzw. Härte-Änderungen, erfasst und miteinander verglichen werden.

4.3.1 Versuchsvorrichtungen

Für die experimentellen Untersuchungen der HIU-Verfahren wurde im Rahmen des DFG-Förderprogramm SPP 1098 „Wirkmedienbasierte Fertigungstechniken zur Blechumformung“ eine pneumatisch getriebene Hydro-Impuls-Anlage entwickelt und gebaut (siehe 8.1). Diese Anlage wurde für umformtechnische sowie für werkstofftechnische Hochgeschwindigkeitsuntersuchungen eingesetzt. Für die Vergleichsversuche unter quasistatischen Bedingungen wurde eine hydraulische Universalpresse (Druckkraft 6.300kN)

genutzt. Zur Ermittlung des Umformvermögens des Blechmaterials unter Berücksichtigung der Mehrachsigkeit des Spannung-Dehnungs-Zustandes wurde die speziell entwickelte hydraulische Tiefziehanlage mit Drücken bis zu 400 bar eingesetzt (Bild 12).



Bild 12: Hydraulische Tiefziehanlage

Die Untersuchungen zum Umformvorgang beim Hydro-Impuls-Umformen (HIU) werden am Beispiel des Tiefziehens mit Wirkmedium im offenem und geschlossenem Gesenk (siehe Bild 13) durchgeführt.

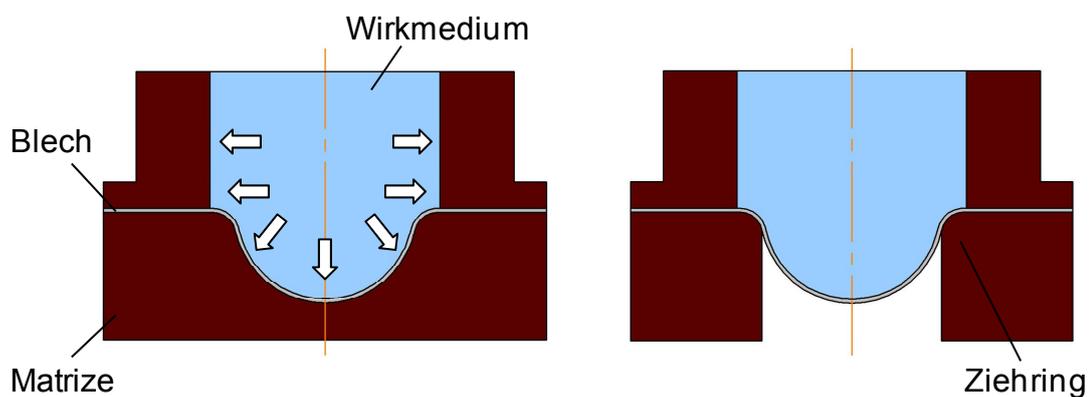


Bild 13: Geschlossenes (links) und offenes (rechts) Gesenk

Die Versuche wurden unter Nutzung verschiedener Wirkmedien in folgenden Varianten durchgeführt:

Wasser mit einer Tiefe $h_w =$ von 32 bis 131 mm

Gummi als Block $\varnothing 115$ mm $h_G =$ von 32 bis 131 mm

Mischmedium aus Wasser (Tiefe 100 mm) und Gummi ($\varnothing 115$ mm, $h_G = 31$ mm).

4.3.2 Messtechnik

Das Messsystem zum Messen der Prozessparameter (Bild 14) besteht aus der Registrierungstechnik YOKAGAVA und Modulen zum Messen

- der Geschwindigkeit des Hammers unmittelbar vor dem Zusammenstoß mit dem Wirkmedium (Lichtschanke) sowie
- der Druckcharakteristiken während der Belastungsphase im Wirkmedium (Drucksensoren KISTLER 6215).

Die eingesetzte Kurzzeittechnik hat eine sehr hohe Eigenfrequenz und ist für die ballistischen Messungen geeignet. Die Messungen des Belastungsimpulses wurden zeit- und ortabhängig (Drucksensoren 1 bis 4) unter Variation von Masse und Geschwindigkeit des Hammers durchgeführt. Die entstehenden Effekte wurden mit einer Kurzzeitkamera festgehalten.

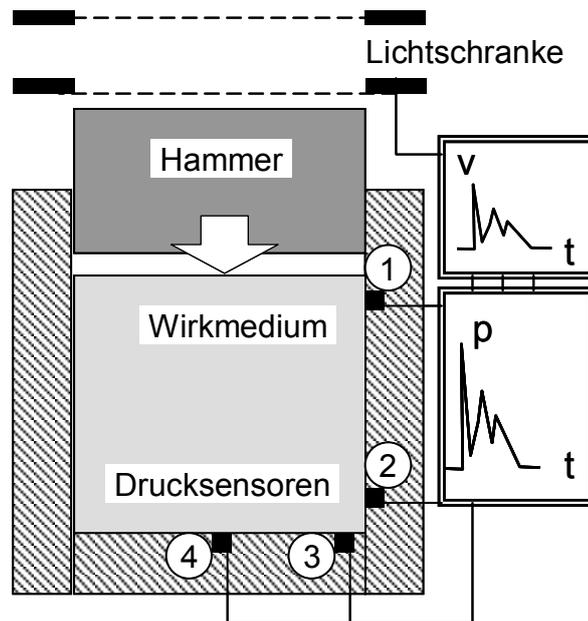


Bild 14: Messungen der Druckcharakteristik

Die Erfassung der geometrischen Konturen der Versuchsteile erfolgt mit einer 3D-Koordinatenmessmaschine des Typs „ZEISS SMM-C-DSE“. Für die Messungen wird ein Kugeltastkopf mit einem Durchmesser von 2mm eingesetzt. Die Abtastungen erfolgen in 2mm Abstand von der projizierten Länge beginnend am Ziehringradius.

Die Dehnungsverteilung am fertigen Teil wurde über die Erfassung der auf das ebene Blech vor der Umformung aufgebrauchten deterministischen Raster mit dem optischen System VIALUX AUTOGRID bestimmt.

Die Messungen der Blechdickenänderung an den gefertigten Versuchsteilen werden nach dem Prüfverfahren Senkrechteinschlagung (EN473) mit einem Ultraschallmessgerät CL304 der Firma Krautkrämer durchgeführt. Die Genauigkeit der Blechdickenmessung ist von der Wahl des Prüfkopfes abhängig. Zur Verfügung stehen zwei verschiedene Normalprüfköpfe mit den Prüfkopfdurchmessern von 3mm und 5mm. Damit können Blechdicken in Bereich gekrümmter Konturen, wie beispielsweise in Bereichen von Formsicken und Ziehradien, bestimmt werden.

4.4 Werkstoffspektrum. Werkstofftechnische Untersuchungen

In den grundsätzlichen Untersuchungen der HIU-Verfahren sollen auch unterschiedliche Feinblechwerkstoffe berücksichtigt werden. Als Ausgangsformen für das Tiefziehen wurden Zuschnitte mit einem Durchmesser von $d_B = 100$ mm und einer Wanddicke von $s_B = 1,0; 2,0$ und $3,0$ mm mit einem aufgetragenen Raster verwendet. Es wurden Stähle S235JR und QstE340 sowie die Aluminiumlegierung AlMg4Mn untersucht. Diese sind typische Vertreter der Werkstoffgruppen konventioneller Tiefziehstahl und Al-Knetlegierung. Der konventionelle Tiefziehstahl dient als Referenzwerkstoff, da er gute Umformeignung aufweist und im Automobilbereich als Standardwerkstoff für unterschiedliche Ziehteile eingesetzt wird.

Die Beurteilung der Fertigungsverfahren des HIU erfolgt im Vergleich zum konventionellen quasistatischen wirkmedienbasierten Tiefziehen. Besonderes Augenmerk gilt den möglichen Materialverfestigungen und Blechdickenverteilungen, die sich durch dynamische Blechumformverfahren ergeben sollen. Für die o.g. Werkstoffe sind detaillierte Untersuchungen der erreichbaren Formänderungen, des Verlaufs der Blechdicke und der Härte vorgesehen.

Die stofflichen Eigenschaften sollen über die Gefügeanalyse sowie anhand der Härteverteilung mit einer Mikrohärtmessung (SHIMADZU-M) über dem Werkstückquerschnitt ausgewiesen werden.

Ein Versagen durch Einschnürung und Rissbildung kann an den Versuchsteilen nicht direkt sichtbar gemacht werden. Daher erfolgt eine indirekte Rissbewertung über die lokalen Blechdickenänderungen und den zugehörigen Hauptverzerrungen in den kritischen Bereichen. Liegen in einem Bauteilbereich hohe Blechdickenabnahmen vor, so ist dies ein erster Hinweis auf eine mögliche Einschnürung und Rissbildung. Die Hauptverzerrungen dieses Bereiches werden zur genaueren Auswertung in das Grenzformänderungsschaubild eingetragen und mit einem Sicherheitskoeffizient von 10% wegen eventueller Chargen- und Blechdickenschwankungen analysiert.

5. Qualitätssicherung durch Prozessauslegung

Die Bewertung der Verfahrensvarianten erfolgt mit dem Programm AUTODYN an den ausgewählten Modell- und Versuchsbauteilen in Verbindung mit verschiedenen Vertretern der Werkstoffgruppen.

5.1 Beschreibung des Werkzeugs und Ausgangsblechs

Der Ausgangspunkt bei einer FEM-Modellierung ist die geometrische und stoffliche Zuordnung der Werkzeugkomponenten und des Ausgangsblechs, hier am Beispiel eines Modellversuchs (Bild 15), dargestellt.

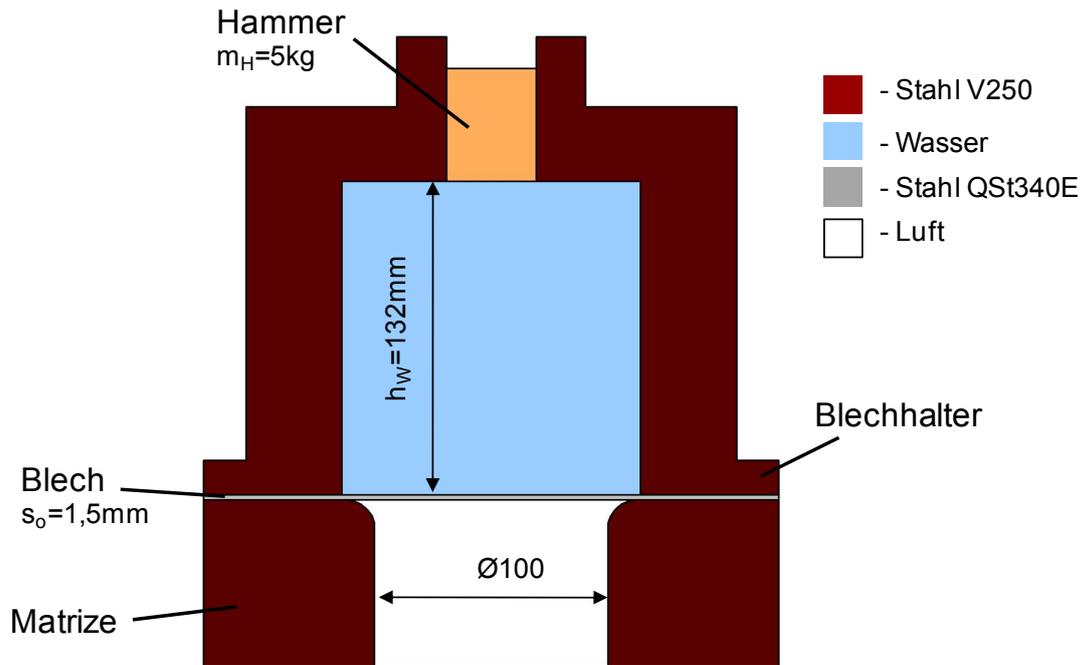


Bild 15: Anordnung des Modellversuchs

In den Berechnungen zum Modellteil konnte die Achsensymmetrie ausgenutzt werden, wodurch nur ein Viertel des Ausgangsblechs unter Berücksichtigung der erforderlichen Randbedingungen modelliert werden musste.

Für eine realistische Wiedergabe des Umformprozesses muss bei der Aufteilung des Werkzeugs und des Ausgangsblechs durch finite Elemente auf den Elementtyp sowie auf die Anzahl der Elemente geachtet werden. Zur Auswahl des geeigneten Elementtyps wurden die Modellberechnungen mit Membran- und Schalenelementen am Modellteil durchgeführt. Im Vergleich zu den experimentellen Arbeiten ergab sich, dass das Membranelement quantitativ gute Ergebnisse liefert und zur grundsätzlichen Prozessauslegung in der Vorphase einer Verfahrensentwicklung gut geeignet ist.

Für eine genauere Berechnung von Bauteileigenschaften muss jedoch das Schalenelement eingesetzt werden, da bei der Verwendung von Membranelementen maximale Abweichungen von 10% im Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen überschritten werden können. Weiterhin konnten mit den Membranelementen die Ziehradien sowie die Bodeneckbereiche, in denen verstärkt Biegung auftritt, nur bedingt abgebildet werden.

Untersuchungen mit unterschiedlich hohen Diskretisierungsdichten haben gezeigt, dass die Vernetzung eines Ausgangsblechs für das Versuchsteil durch Schalenelemente mit dem Maß ca. $0,5 \times 0,5$ mm (etwa 50.000 Elemente für ein Bauteilelement) eine gute Übereinstimmung im Vergleich zum Experiment liefert.

5.2 Verfahrensabläufe

Nachdem die Geometrie des Werkzeuges und des Blechausschnittes definiert sind, erfolgte eine Einordnung der Impulsdrücke und der Blechhalterkräfte in das Simulationsmodell. Bei den HIU-Verfahren wird in einem ersten Schritt der Blechhalter geschlossen und anschließend die Schließkraft aufgebracht. Bei ebenen Blechhalterflächen wurde der Schließvorgang in einem Berechnungsschritt durchgeführt. Danach wurden die Kontaktflächen für das Blech und den Blechhalter definiert und die Kontaktbedingungen zunächst für eine quasistatische Kontaktsituation und für eine Initialbewegung formuliert.

Anschließend wird die Druckkammer geschlossen und mit dem Wirkmedium gefüllt. In einem weiteren Schritt wurden die Masse, Geometrie und Geschwindigkeit des Hammers definiert. In der Folge wird der Druckimpuls auf die Wirkmedienflächen aufgebracht, wobei nur die Wirkmedienfläche beaufschlagt wird, die im HIU-Prozess mit dem Hammer in Kontakt kommt.

Der Impulstransfer durch das Wirkmedium wurde im nächsten Schritt berechnet, so dass an den Kontaktflächen des Wirkmediums der entstehende Druck und die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Ort und Zeit bestimmt werden. Diese Parameter dienen als Ausgangsdaten für die Berechnungen des Blechumformens, wenn die Impulsbelastung der Blechfläche erreicht wird. Beim Tiefziehen wird der Blecheinzug über eine Routine berechnet, die die neu hinzukommenden Kontaktbereiche Blech-Wirkmedium zusätzlich mit Druck beaufschlagt und gleichzeitig die Minderung der Reibungsflächen Blech-Niederhalter im Flanschbereich berücksichtigt.

In den FEM-Simulationen des Hydro-Impuls-Umformens wird das dynamische Blechverhalten bis zum abschließenden Kontakt zwischen dem Blech und der Formfläche der

Matrize berechnet. Der dynamische Wirkmediendruck erzeugt die Zwischenformen an den Blechbereichen, die noch keine Kontakte zum Werkzeug haben. Beim Aufstoßen des Blechs und der Matrize werden die neu entstehenden Kontaktzonen definiert und für diese Bereiche die Gegenkräfte, Reibung und Formfüllung beurteilt. Parallel läuft die Berechnung der Hammerposition und des weiteren Druckaufbaus bzw. -abbaus im Wirkmedium. In der anschließenden Reflektion des Hammers wird die Drucklast in einem Entlastungsschritt weggenommen.

Die Endteileigenschaften können durch die Verfestigungs- sowie Formänderungsanalysen in der FE-Simulation abgebildet werden. Eine Bewertung der Endteilgeometrie kann im Hinblick auf die Einschnürungen und Risse erfolgen. Dieser Schritt soll unter den Bedingungen der quasistatischen Starrkörperberechnung erfolgen.

5.3 Übertragbarkeit der Modell-Untersuchungen

Eine wesentliche Grundlage für die Übertragung der an einem FE-Modell gewonnenen Ergebnisse auf einen Realprozess ist die Modellbewertung durch Modellierungsgüte und Eignung der eingesetzten Simulationsprogramme. Ein Abgleich zwischen der Simulation und dem Experiment wird zunächst an den Versuchsteilen „elliptischer Boden“ und „zylindrischer Napf“ durchgeführt. Zur Bestimmung der Endteileigenschaften wird die Geometrie des durch HIU-Verfahren gefertigten Werkstückes, dessen geometrische Abweichungen, der Wanddickenverlauf sowie die Messgitterverzerrung und die maximale Dehnung für die Zwischenformen (Umformung im offenen Gesenk) sowie für die Endform (Umformung im geschlossenen Gesenk) ermittelt.

Der geometrische Vergleich erfolgte an entlasteten frei geformten Versuchsteilen, die durch unterschiedliche Impulse gefertigt wurden. Für den Abgleich erfolgt eine Gegenüberstellung von geometrischen Größen und umformtechnisch bedingten Bauteileigenschaften.

Beispielhaft werden die Ergebnisse für die Hammergeschwindigkeiten 50 m/s, Hammermasse 10 kg dargestellt, als Wirkmedium wurde Wasser und als Blechwerkstoff ein QStE340 mit einer Blechdicke von 1,5 mm verwendet.

Zunächst wurde die Eignung der neuen Modelle, die für das AUTODYN entwickelt wurden, zur Abbildung der HIU untersucht. Weil bei Explosionen und beim Durchbrechen vergleichbare Geschwindigkeiten sowie Werkstoffbeanspruchungen wie bei der HIU vorliegen und eine Rissbildung im Material als Versagenskriterium eingesetzt wird, wurde angenommen, dass die Modellberechnungen zur Eignungsbeurteilung der verschiedenen Elementtypen (siehe 4.2.3) und der implementierten Druck- sowie Materialflussbeschreibungen verwendet werden können. Die FE-Modelle wurden über experimentelle dynamische HIU-Tiefungsversuche verifiziert. Im Anschluss daran wurden diese FE-Modelle auf die Anforderungen der HIU angepasst. Weiterhin erfolgten die grundsätzlichen Untersuchungen der verschiedenen HIU-Varianten: freies und formgebundenes Hydro-Impuls-Umformen von rotationssymmetrischen Werkstücken mit flüssigen, elastischen und kombinierten Wirkmedien.

Aus den Vergleichen mit den experimentellen Untersuchungen und den Modellierungsmöglichkeiten mit verschiedenen Elementtypen ergab sich die bessere Eignung der Euler-Berechnungen (SPH-Elemente) für die Wirkmedien und der Lagrange-Berechnungen (IJK-Elemente) für das Blech. Daher wurde es für die weiterführenden Untersuchungen eingesetzt.

Für den Vergleich zwischen der Simulation und dem Experiment wurde ein Schnitt am frei geformten Bauteil entlang der Symmetrieebene (Bild 16) ausgewählt. Der Grund hierfür war, dass sich hier die größten Abweichungen bei einer unzureichenden Modellabbildung ergeben können. Ein Vergleich der berechneten und gemessenen statistisch durchschnittlichen Schnittgeometrien ergibt eine maximale Abweichung von 15%, die erwartungsgemäß festzustellen ist.

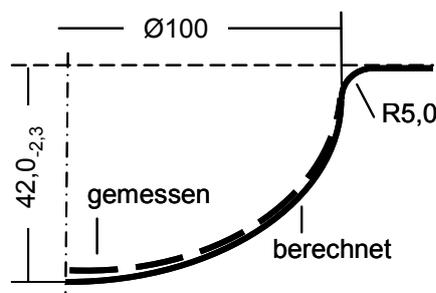


Bild 16: Geometrischer Vergleich für einen Boden

Insgesamt zeigt der geometrische Vergleich auch für die anderen Bauteilgeometrien (z.B. kreiszylindrischer Napf) eine gute Übereinstimmung (Bild 17). Aus dem Vergleich des Versuchsteils mit den Kontaktzonen des berechneten Modellbauteils kann die Ausformung der Näpfe abgeleitet werden. Mit Hilfe des ausgewählten Schnittes können Aussagen über das Anliegen an der Matrize in Abhängigkeit vom dynamischen Wirkmediendruck gemacht werden.

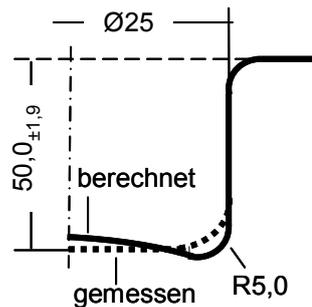


Bild 17: Geometrischer Vergleich für einen Napf

Die festgestellten Übereinstimmungen mit den kleinen Abweichungen bezüglich der Endteilgeometrie bei der Simulation und dem Experiment lassen auf die Eignung der verwendeten Modelle hinsichtlich der Prozessabbildung schließen.

Da mit einer ausschließlich geometrischen Bewertung die realistische Abbildung nicht hinreichend genau beurteilt werden kann, werden die umformbedingten Eigenschaftsänderungen von FEM-Simulation und Experiment einander gegenüber gestellt. Die Messungen der Blechdickenänderungen erfolgen an den Endteilen mit einem Ultraschallmessgerät. Am Beispiel einer frei geformten elliptischen Bodengeometrie (Bild 18) soll die Auswertung der Simulationsergebnisse vorgestellt werden.

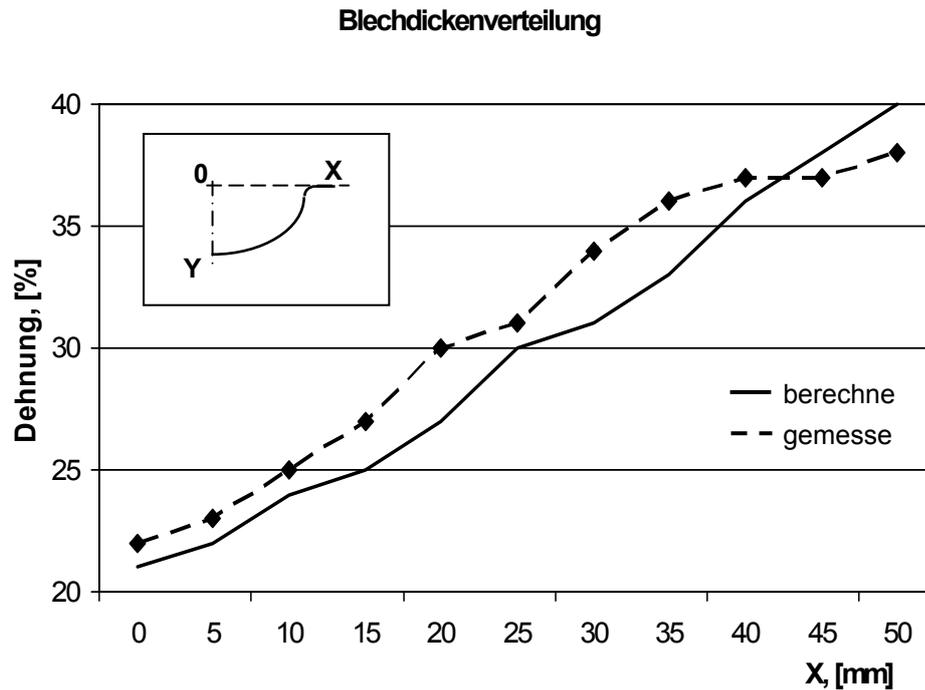


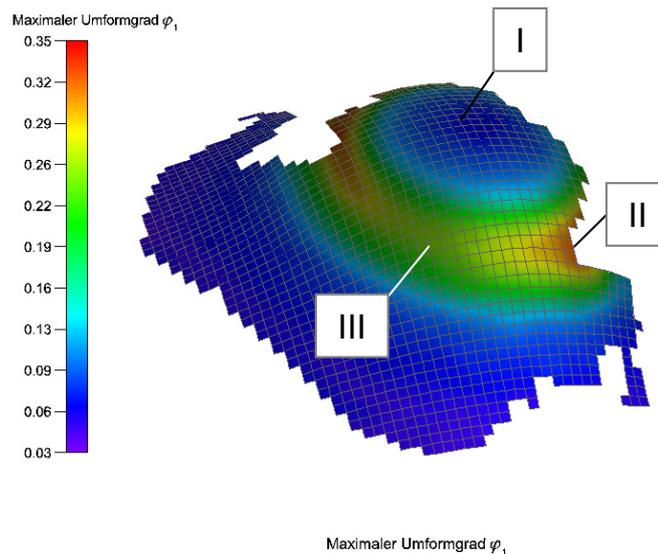
Bild 18: Vergleich der Blechdickenänderungen bei der dynamischen Umformung

In Abständen von 5,0 mm wurden die Messpunkte am Axialschnitt aufgenommen. Hier ergibt sich eine gute Übereinstimmung besonders in stark verformten Bereichen mit einer maximalen Abweichung unter 10%. Die Bewertung der Simulationsberechnungen für die Napfgeometrie ergab auch eine gute Übereinstimmung mit maximalen Abweichungen von 17%.

Eine weitere detaillierte Untersuchung der Eignung des entwickelten FE-Modells wurde an berasterten Ronden durchgeführt. Als Kriterium wird eine lokale Blechdickenverteilung sowie eine Messgitterverzerrung vorgenommen. Die im Experiment durch HIU geformten Ronden werden mit dem optischen System VIALUX analysiert. Ein Vergleich des Modells mit dem Experiment stellt Tabelle 6 und Bild 19 dar. Es wurde eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der lokalen Blechdicken sowohl an kritischen Bereichen (Ziehradius und Kuppel), als auch an umformtechnisch unkritischen Bereichen festgestellt.

Tabelle 6: Vergleich der Blechdickenreduzierung

	Bereich I	Bereich II	Bereich III
Modell	0,02	0,33	0,24
Experiment	0,03	0,35	0,23

**Bild 19:** Blechdickenreduzierung an eine Ronde

Hieraus kann zum einen die Eignung des Programms AUTODYN sowie der speziell entwickelten Berechnungsmodule für die Abbildung von dynamischen Umformprozessen wie das HIU abgeleitet werden. Zum anderen können die entwickelten Modelle hinsichtlich Diskretisierung, Grenzbedingungen und numerischer Prozessparameter für die weiterführenden FE-Untersuchungen des HIU-Verfahrens als gut geeignet bewertet werden.

Durch die Übertragung geeigneter FE-Modelle eines Verfahrens auf die realen Bedingungen können diese hinsichtlich der Grundkenntnisse beim Einsatz neuer HIU-Verfahren bewertet werden, ohne zunächst aufwendige Umrüstarbeiten eines realen Werkzeugsystems und der Anlage vornehmen zu müssen.

6. Ermittlung der Einflussgrößen beim HIU-Verfahren

In den FE-Untersuchungen wurden die Einflussgrößen während des gesamten Prozessverlaufs beim HIU analysiert. Durch Auftreffen des Hammers auf dem flüssigen bzw. elastischen Wirkmedium erfolgt zunächst der Energie- bzw. Impulsaustausch zwischen dem Hammer und dem Wirkmedium. Das Wirkmedium nimmt nur einen Teil der Energie des Hammers auf und gibt diese Energie an das Blech weiter. Durch die im Wirkmedium entstandenen Impulsdrücke wird das Blech in die Matrize gepresst. Dabei wird die in der Matrizenkaverne gebliebene Luft komprimiert. Der gesamte Energieaustausch beim HIU ist zeit- und ortabhängig und wird durch die Charakteristiken des Belastungsimpuls (Maximaldruck, Impulsdauer, Drucksteigerungs- und -senkungsgradienten), des Wirkmediums (Dichte ρ_w , E-Modul, akustische Impedanz $\rho_w \cdot c_w$) sowie des Blechs (Dichte ρ_B , R_m , R_{p02} , A_{80}) bestimmt. Der Energieaustausch kann durch Impulsverteilung im Prozessverlauf charakterisiert werden (Bild 20).

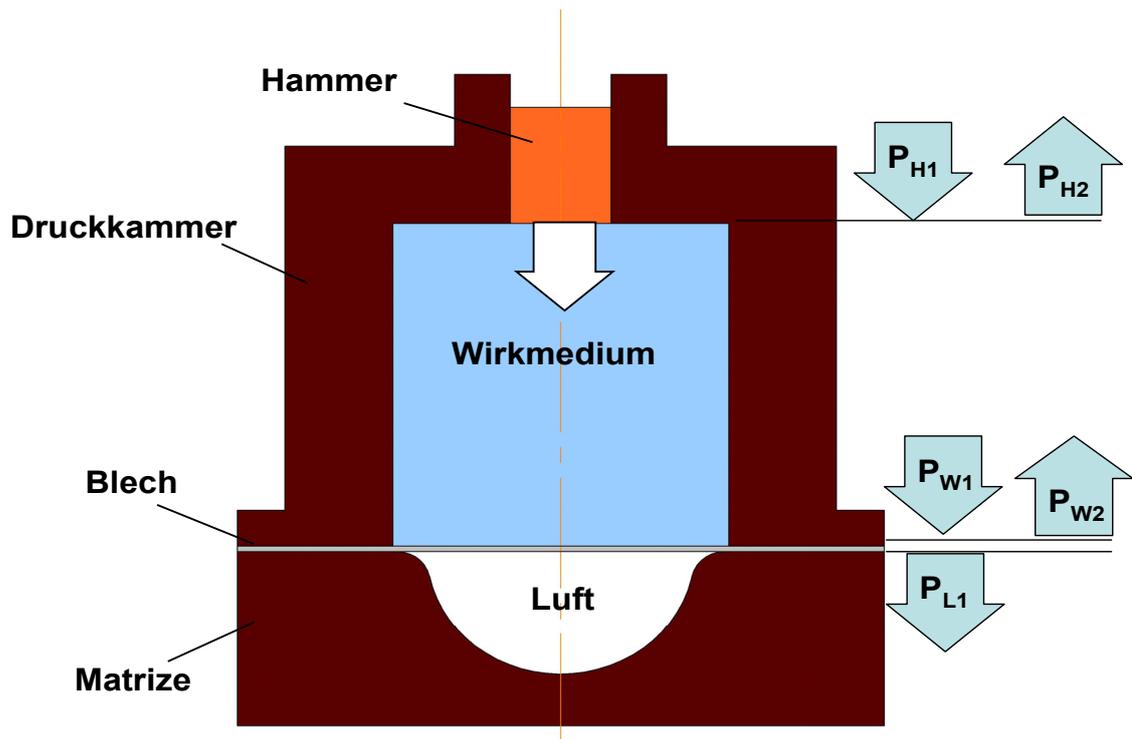


Bild 20: Impulsverteilung bei HIU

Vor dem Auftreffen auf dem Wirkmedium erhält der Hammer einen Impuls I_{H1} , der in Anteilen auf die Verformung des Blechs, das Wirkmedium selbst (I_w), die Werkzeugelemente und die Komprimierung der Luft in der Matrizenkaverne (I_L) übergeht. Im reflektierenden Hammer bleibt noch ein Teil des Impulses I_{H2} über.

Der dargestellte Impulsaustausch ist stark vereinfacht. Bei den Simulationsberechnungen sollte der Energieverlust in den Werkzeugelementen sowie im Wirkmedium und Luftpolster berücksichtigt werden.

Auf Basis der Modellversuche und der theoretischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Energie- bzw. Impulsaustausch zwischen Hammer und Wirkmedium in einem Zeitraum von 0,5 bis 2,0 ms erfolgt und von der Masse m_H und der Geschwindigkeit des Hammers v_H abhängig ist. Nach dieser Zeit wurde das Wirkmedium in der Druckkammer komprimiert und drückt den Hammer zurück. Der Hammer wird dadurch in die Gegenrichtung beschleunigt und verliert den Kontakt mit dem Wirkmedium. Damit geht die Energie des komprimierten Wirkmediums teilweise in den Hammer über.

Die Auswirkungen der in Abhängigkeit der Belastungsgrößen innerhalb der Wirkkette Impulserzeugung - Wirkmedium - Werkstück entstehenden Umformbedingungen auf den Umformvorgang sind ein weiterer Gegenstand der Untersuchungen. Als Ergebnisgrößen werden die geometrischen und stofflichen Eigenschaften der Bauteile sowie die Verfahrensgrenzen analysiert.

6.1 Charakterisierung der HIU-Energiequelle

6.1.1 Einfluss der Masse des Hammers

Für die Modelluntersuchungen wurden die realitätsnahen Charakteristiken der HIU-Anlage sowie der Prozessparameter ausgewählt, um diese im Anschluss experimentell prüfen zu können.

Zunächst wurde untersucht, welche Impulse durch das Aufstoßen von Hämmern unterschiedlicher Massen auf das flüssige Wirkmedium Wasser, das sich in einer geschlossenen Druckkammer befindet, realisiert werden können.

Der Hammer wurde als ein Zylinder mit einer variablen Masse von 1,0 bis 15,0 kg betrachtet. Die Undichtheiten zwischen dem Hammer und der Druckkammer wurden zunächst nicht berücksichtigt. Für eine Geschwindigkeit $v_H = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ des Hammers vor dem Aufstoßen wurde der Druckverlauf in charakteristischen Punkten der Druckkammer ermittelt (Bild 21). Aus der Analyse der Werte und Form der erzeugten Impulse wurden die Schlussfolgerungen bezüglich des Einflusses der Hammermasse auf die HIU-Prozessparameter formuliert.

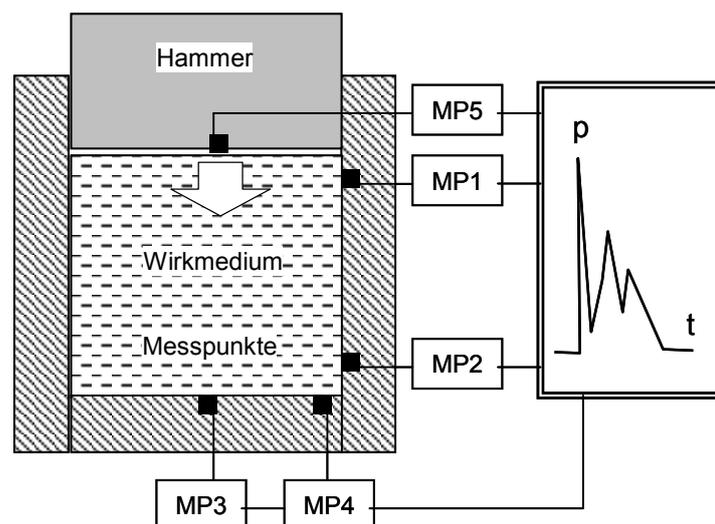


Bild 21: Charakteristische Bereiche für die Analyse der Druckverteilung

Einen typischen Druckverlauf in der Druckkammer während der Belastungsphase zeigt Bild 22. Die Nutzung von Hämmern mit einer geringeren Masse führt zu wesentlichen Änderungen an den Belastungscharakteristiken (Bild 23).

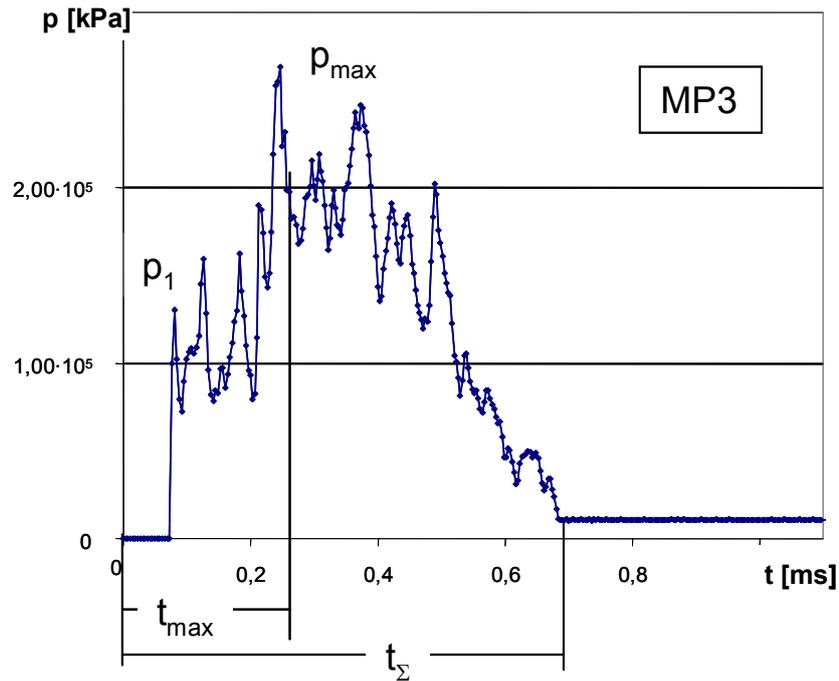


Bild 22: Druckverlauf in der Druckkammer. ($m_H = 5,0 \text{ kg}$, $v_H = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

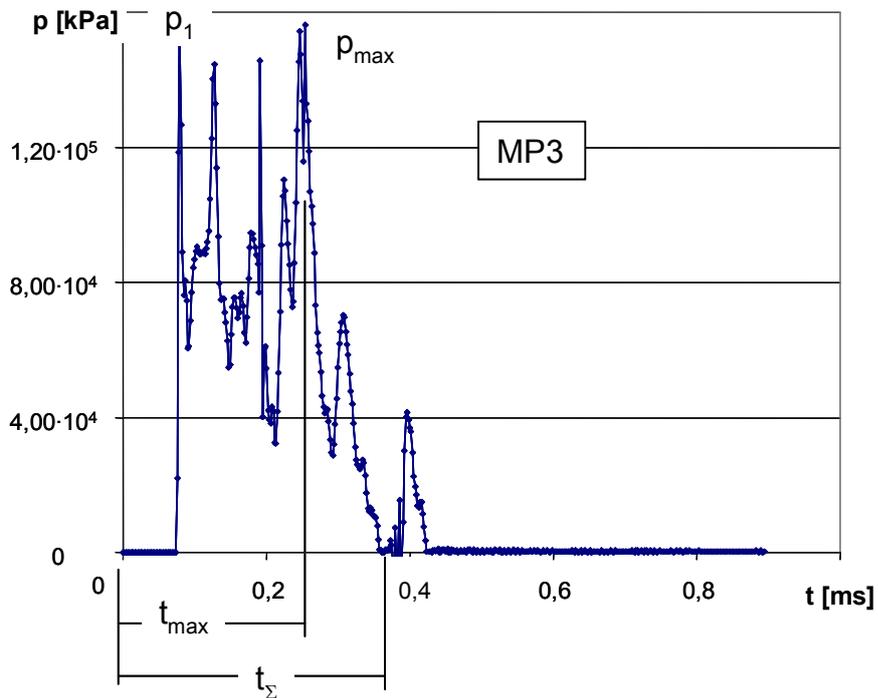


Bild 23: Druckverlauf in der Druckkammer. ($m_H = 1,0 \text{ kg}$, $v_H = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Es sind nur geringere Unterschiede an den ersten Druckmaxima p_1 festzustellen. Der maximale Druck p_{\max} sowie die Gesamtdauer der Belastung t_{Σ} hängt stark von der Hammermasse ab. Mit

der Vergrößerung der Hammermasse steigt der maximale Druck (Bild 24) und die Belastungsdauer (Bild 25).

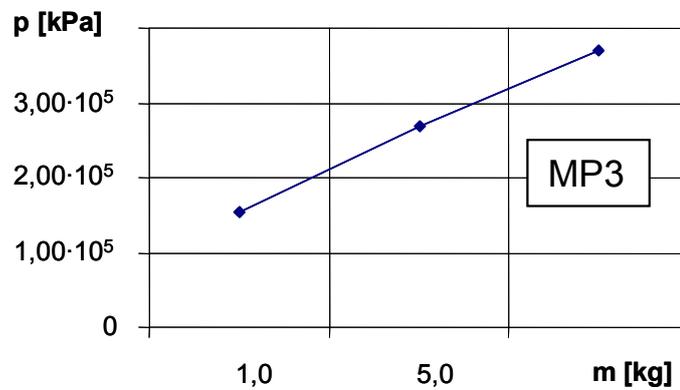


Bild 24: Maximaler Druck

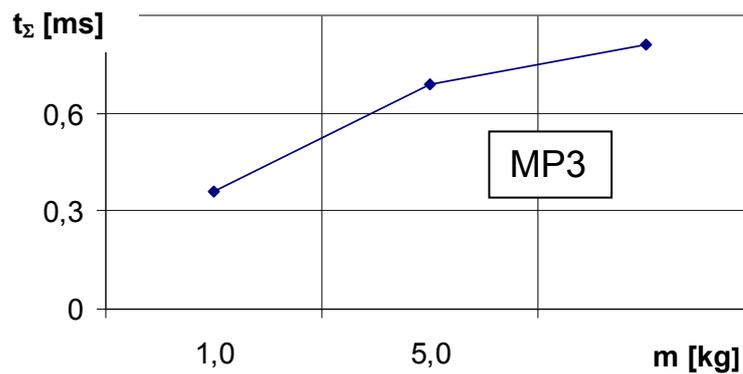


Bild 25: Belastungsdauer

Der maximale Druck ist geringer und wird früher erreicht. Die Gesamtdauer der Belastung senkt sich von 0,6 bis 0,3 ms ab. Die Druckschwankungen haben eine verhältnismäßig größere Amplitude für den leichten Hammer. Insgesamt wird der übertragene Impuls geringer, was einen negativen Einfluss auf die Umformergebnisse haben kann. Mit der Vergrößerung der Hammermasse wird der Drucksteigerungsgradient geringer, was für eine „weichere“ Belastung spricht. Die „scharfen“ Impulse mit einer kurzfristigen intensiven Belastung werden umgekehrt durch Hämmer mit einer geringeren Masse realisiert. Diese Ergebnisse zeigen, dass durch Auswahl der Hammermasse die Prozessparameter beim HIU bauteilbezogen gesteuert werden können.

6.1.2 Einfluss der Hammergeschwindigkeit

In Modellversuchen wurde die Hammergeschwindigkeit im Bereich von 5 bis 100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ variiert, was den realisierbaren Geschwindigkeiten der HIU-Versuchsanlage entspricht. Der Maximaldruck im Wirkmedium steigt mit der Erhöhung der Hammergeschwindigkeit fast quadratisch an und erreicht den Wert $5,0\cdot 10^5$ kPa bei der Geschwindigkeit 60 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Bild 26).

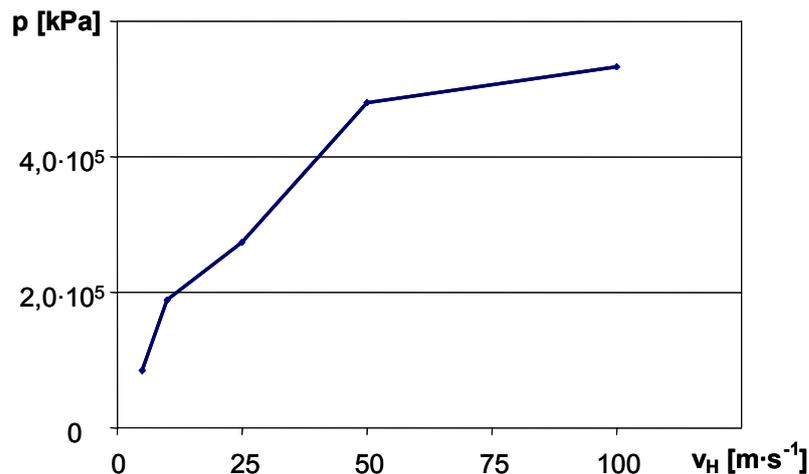


Bild 26: Maximaldruck abhängig von der Hammergeschwindigkeit

Die Belastungsdauer wird mit steigender Hammergeschwindigkeit kürzer. Der Hammer bleibt nicht so lange in Kontakt mit dem Wirkmedium und reflektiert sich zurück in die Gegenrichtung. Für einen effektiven Verlauf des Umformprozesses ist wichtig, dass möglichst viel Energie im komprimierten Wirkmedium bleibt und für die Blechumformung genutzt werden kann. Der gleiche Impuls kann im Wirkmedium durch unterschiedliche Kombinationen von Masse und Geschwindigkeit des Hammers erzeugt werden.

Die Belastung mit dem Hammer größerer Masse dauert länger und ist seitens der Energieübertragung effektiver. Das stimmt aber nur so lange, wie die anderen Parameter Wirkmedium, Druckkammer und Werkstück konstant bleiben.

6.2 Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Wirkmediums

Untersucht wurden die beim Hydro-Impuls-Umformverfahren im Wirkmedium entstehenden dynamischen Drücke beim Auftreffen der beschleunigten Masse auf die Oberfläche des Wirkmediums und die Druckänderungen bei der Übertragung der Belastungsimpulse durch das Wirkmedium auf das Werkstück.

Bei dem Aufstoßen des Hammers entstehen im Wirkmedium die Druckwellen, welche sich im Medium verbreiten und von den Grenzen des Mediums nach den Gesetzen der Akustik reflektieren (Bild 27). Der eindeutige Unterschied des dynamischen Druckbildes in einem Wirkmedium zu quasistatischen besteht darin, dass die Drücke nicht gleichmäßig verteilt sind. Darüber hinaus werden einige Ergebnisse der FEM-Berechnungen zur Erläuterung der Problematik der Druckverteilung dargestellt.

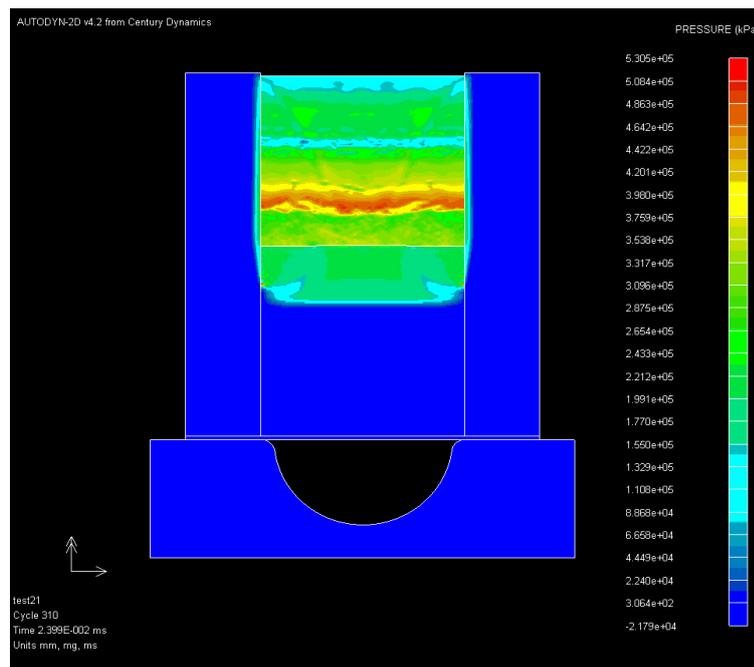


Bild 27: Druckwellenverbreitung im flüssigen Wirkmedium

Die Besonderheit dynamischer Umformung mit Wirkmedien im Vergleich zu quasistatischen besteht darin, dass sich die Charakteristiken des Wirkmediums selbst unter dem Einfluss von direkten und reflektierenden Stoßwellen ändern. Die Reflexion einer Stoßwelle an der Grenze zweier Körper oder des Mediums ist von der akustischen Charakteristik des Mediums, der sog. akustischen Impedanz, abhängig. Von einer freien Oberfläche oder von einer

beweglichen Grenze des Wirkmediums (z.B. vom verformten Blech) reflektiert sich nicht eine Welle mit Überdruck sondern eine Entlastungswelle mit Unterdruck.

Dadurch entstehen in dem Wirkmedium die örtlich begrenzten Bereiche, die nicht mit Druck sondern mit Zugspannungen belastet sind (Bild 28). Die flüssigen Wirkmedien wie z.B. Wasser können nur sehr geringere Zugspannungen übertragen. Dies kann dazu führen, dass in dem Flüssigmedium die sog. Kavitationskavernen entstehen. Die Kontinuität des Mediums wird gebrochen, was nicht nur ein theoretisches oder rechentechnisches Problem darstellt. Es führt zu den Änderungen der Grenzbedingungen innerhalb der Lösung einer Simulationsaufgabe sowie zu den Änderungen des gesamten Strömungs- und Druckbildes. Im Prozess der dynamischen Umformung ist es sehr wichtig, Ort und Zeitpunkt der Kavitation zu kennen.

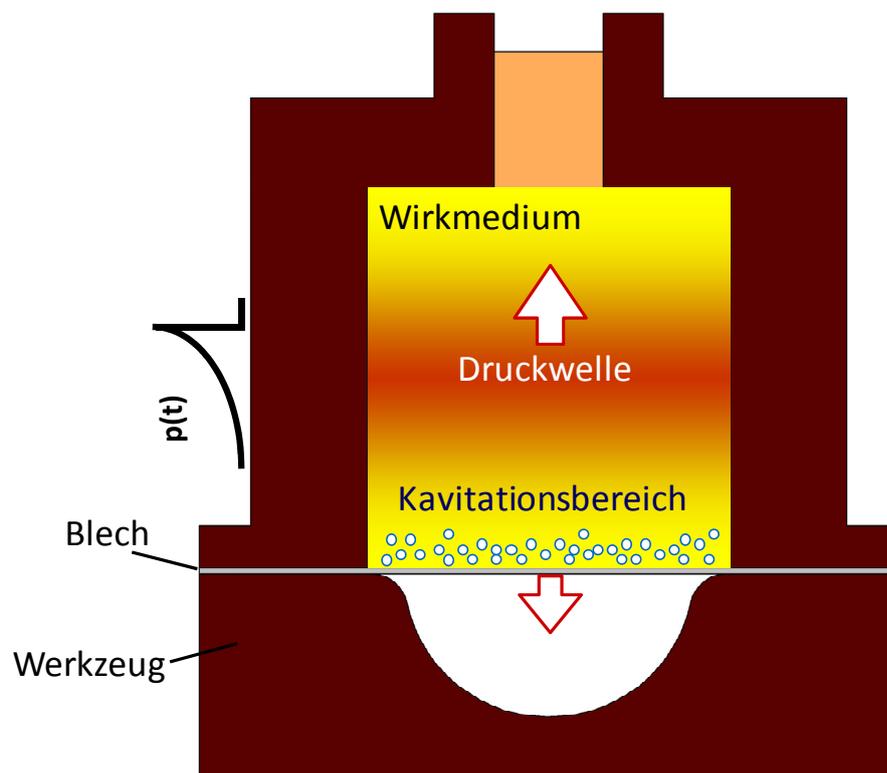


Bild 28: Kavitationsbild

Durch die Kavitation können auch Fehler, meistens an den Oberflächen des weichen Blechmaterials verursacht werden [48]. Die Kavitationseffekte sind nur für die flüssigen Wirkmedien unter intensiver Druckwellen-Belastung typisch und entstehen nicht in den elastischen Wirkmedien.

Bei dem Transfer durch das Wirkmedium ändert sich der ursprünglichen Belastungsimpuls I_{HI} abhängig von der Art des Wirkmediums sowie seiner geometrischen Grenzen und weist andere Werte für die Druckcharakteristiken auf.

6.2.1 Druckaufbau im flüssigen Wirkmedium

Durch eine FEM-Simulation zu den Grundlagen des HIU-Verfahrens werden der Druckaufbau in den charakteristischen Bereichen der Druckkammer (Messpunkte MP1 bis MP4 Bild 21) beim Zusammenstoß des Hammers mit dem Wirkmedium und der Einfluss der wichtigsten Prozessparameter wie Hammermasse, Geschwindigkeit sowie Wirkmedientiefe untersucht. Das Experimentierwerkzeug wird mit Drucksensoren in den Messpunkten MP1 bis MP4 ausgerüstet. Die experimentellen Messungen wurden mit den Berechnungsergebnissen verglichen und entsprechende Korrekturen für die Simulation vorgenommen.

Die typischen Druck-Zeit-Diagramme sind beispielhaft für die ausgewählten Belastungsparameter ($m_H = 10,0 \text{ kg}$, $v_H = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Wirkmedium Wasser mit der Tiefe $h_W = 131 \text{ mm}$) in Bild 29 bis Bild 32 dargestellt.

Beim Zusammenstoß des Hammers mit dem Wirkmedium entsteht an der Aufstoßfläche des Hammers (Messpunkt MP 5) zunächst ein Wirkdruck p_1 , der ca. $1,07 \cdot 10^5 \text{ kPa}$ beträgt (Bild 29). Der entstandene Druck p_1 wächst in pulsierender Weise innerhalb der ca. $0,431 \text{ ms}$ bis zum maximalen Druck $p_{\max} = 5,25 \cdot 10^5 \text{ kPa}$. Die Frequenz der Druckschwankungen entspricht der charakteristischen Zeit für die Reflexion einer durch den Hammer verursachten Stoßwelle vom Boden der Druckkammer. Die Gesamtdauer der Belastung beträgt ca. $t_\Sigma = 0,71 \text{ ms}$. Nach dieser Zeit verliert der Hammer den Kontakt mit der Wirkmediumsoberfläche und fliegt in die Gegenrichtung.

An dem gegenüber dem Hammer liegenden Bereich der Druckkammer (Messpunkt MP3) weist der Druckverlauf eine andere Charakteristik auf (Bild 30).

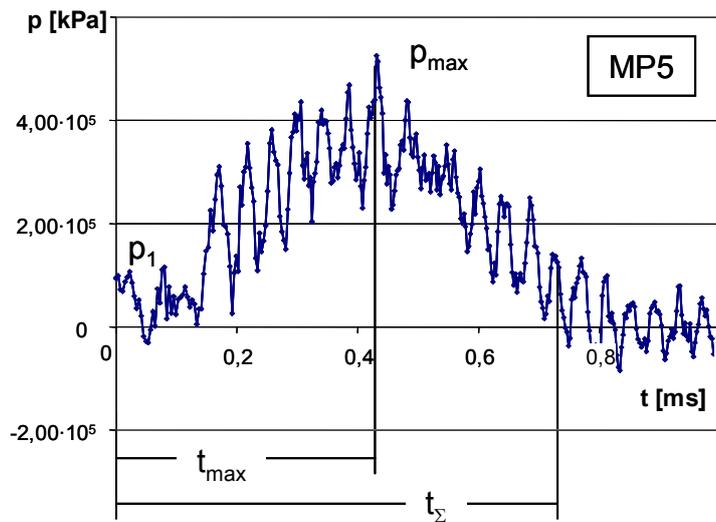


Bild 29: Druckaufbau an der Kontaktfläche des Hammers

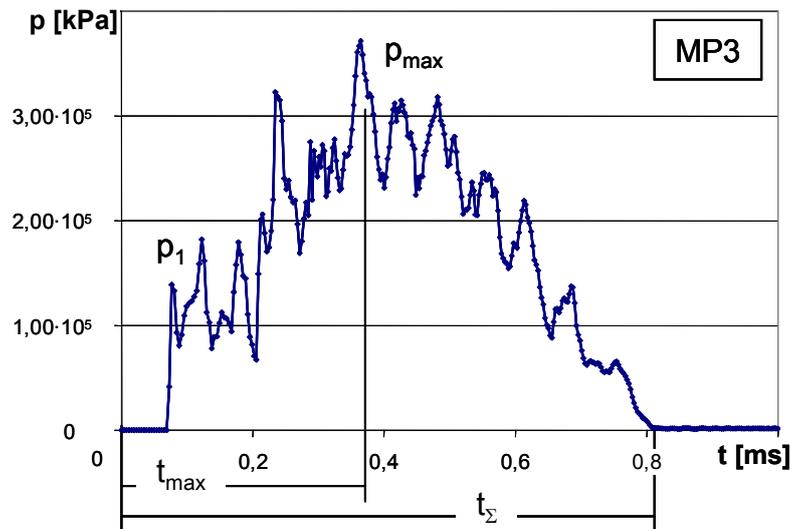


Bild 30: Druckaufbau am Boden der Druckkammer

Das erste Maximum des Drucks p_1 hat fast den gleichen Wert, wurde aber später erreicht. Der maximale Druck p_{\max} wurde kleiner und beträgt ca. $3,71 \cdot 10^5$ kPa. Die Gesamtdauer der Belastung am Boden der Druckkammer bleibt gleich.

Obwohl ein weiterer Untersuchungsbereich MP4 genauso wie MP3 am Boden der Druckkammer liegt, weist einen anderen Druckverlauf auf (Bild 31). Bei der gleich bleibenden Frequenz der Druckschwankungen werden in der Ecke der Druckkammer andere Druckmaxima für p_1 sowie für p_{\max} als an der Symmetrieachse erreicht.

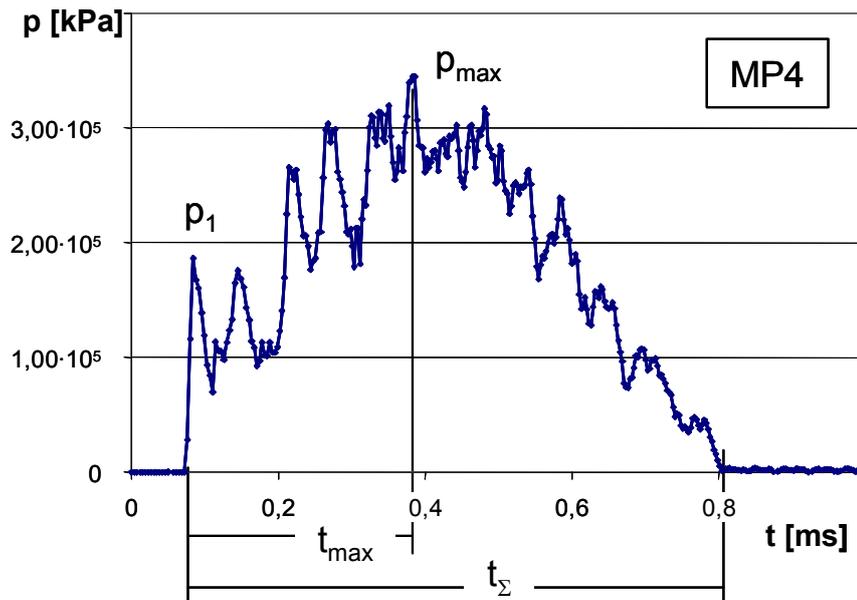


Bild 31: Druckaufbau an der Ecke der Druckkammer

Eine senkrecht orientierte Fläche der Druckkammer (MP2) wurde mit einer anderen Intensität der Stoßwellen belastet (Bild 32). Die entlang der Druckkammerwand laufende Stoßwelle belastet diese geringer als ein waagrecht orientierter Boden der Kammer. Die Druckmaxima p_1 und p_{\max} weisen ca. 25% geringere Werte für die senkrechten Flächen als für die waagrecht orientierten Flächen auf.

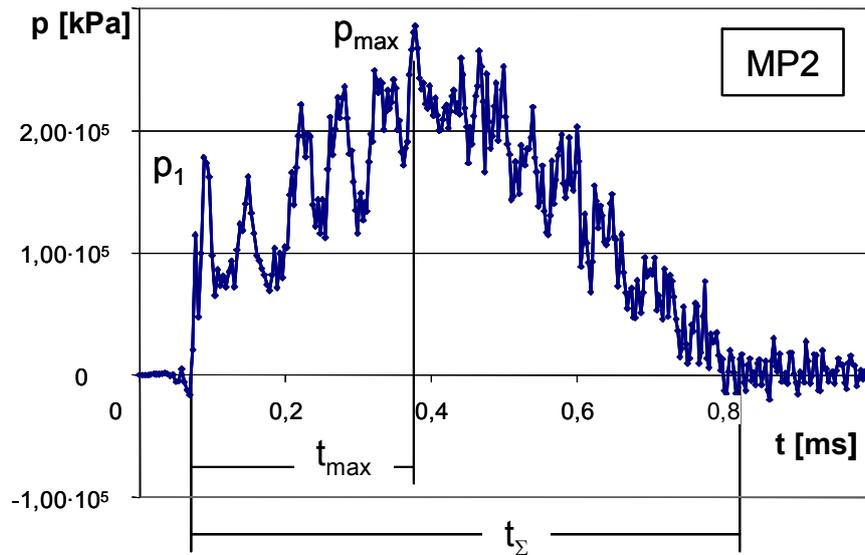


Bild 32: Druckaufbau an der Wand der Druckkammer

Darüber hinaus kann geschlussfolgert werden, dass bei dynamischer Druckerzeugung die Wirkdrücke in einer Kammer nicht nur von der Zeit sondern auch von Ort und Orientierung der Wirkflächen gegenüber der Druckwellenquelle abhängig sind.

Dieses Ergebnis hat eine sehr große Bedeutung für die Auslegung von Umformprozessen sowie der Werkzeuge für die dynamische Umformung.

Um den Einfluss der geometrischen Grenzen sowie des Volumens des Wirkmediums zu untersuchen, wurde der Druckverlauf in einer zylindrischen Druckkammer mit den Maßen: Durchmesser 115 mm und Tiefen $h_w = 32; 64; 95$ und 131 mm untersucht. Als charakteristische Parameter wurden die Maximaldrücke, Druckdifferenz, Zeitverschiebung für den Maximaldruck sowie der Drucksteigerungsgradient für den ersten Belastungsimpuls untersucht. Ein Beispiel für den Druckverlauf in einer Kammer mit geringerer Wirkmediumsmenge (Wassertiefe $h_w = 32$ mm) stellt die Bild 33 dar.

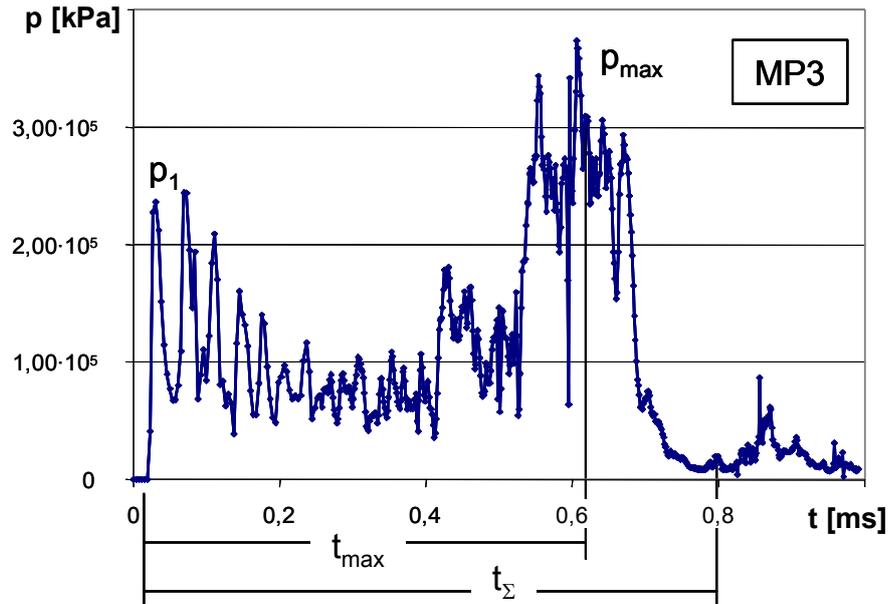


Bild 33: Druckaufbau am Boden der Druckkammer bei geringerer Wassertiefe

Bei der geringeren Wassertiefe wurde das erste Maximum des Drucks p_1 schneller erreicht (in nur 0,3 ms anstelle 0,8 ms), ist ca. 70% größer und beträgt $2,36 \cdot 10^5$ kPa (vergleiche Bild 30 und Bild 33).

Der maximale Druck p_{\max} bleibt unverändert, wurde aber später erreicht. Die Frequenz sowie die Amplitude werden größer, was der geänderten charakteristischen Zeit der Reflexion der Stoßwellen vom Boden der Druckkammer entspricht. Die Gesamtdauer der Belastung am Boden der Druckkammer bleibt gleich.

Im Unterschied zu den konventionellen WBU ist beim HIU die Belastung des Blechs vom Volumen und der Grenzgeometrie des Wirkmediums abhängig. Darüber hinaus ist der Wirkdruck auf die verschiedenen Bereiche des Werkstücks sowie des Werkzeuges nicht gleich. Der Druckverlauf hat einen pulsierenden Charakter mit einer Frequenz, die von der Geometrie der Druckkammer abhängig ist.

Da der Energieaustausch zwischen dem Hammer und dem Wirkmedium von der Geometrie und Steifigkeit der Druckkammer abhängig ist, wurden die Modellversuche für die Kammer mit unterschiedlichen Volumina des Wirkmediums durchgeführt.

6.2.2 Einfluss der Wirkmediumsart

Bei den HIU-Verfahren können unterschiedliche Wirkmedien eingesetzt werden. Meistens kommen flüssige, elastischen oder kombinierte Wirkmedien in Frage, weil diese besonders praktisch und effektiv bei der Übertragung der Belastungsimpulse auf die zu verformenden Bleche sind (Bild 34). Da die Wirkmedien eindeutig unterschiedliche akustische Charakteristiken (Impedanz), Dichte sowie Festigkeit haben, spielt die Art des Wirkmediums (elastisch / flüssig) eine entscheidende Rolle bei der Energieübertragung und wurde deshalb detailliert untersucht. Als Varianten der Wirkmedien wurden Wasser und Gummi (Shore-Härte 70) untersucht (Bild 34).

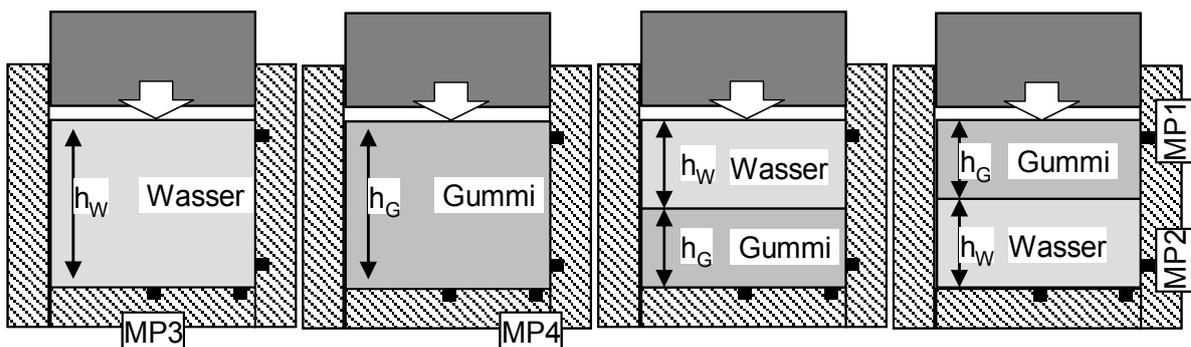


Bild 34: Wirkmediumsvarianten

Im Vergleich zum flüssigen Wirkmedium (Bild 30) weist ein elastisches Wirkmedium (Gummi, $h_G=131$ mm) einen anderen Druckverlauf auf (Bild 35).

Bei der Nutzung eines elastischen anstelle eines flüssigen Wirkmediums wurde das erste Maximum des Drucks p_1 später erreicht. Der maximale Druck p_{\max} ist geringer und stellt sich früher ein. Die Frequenz sowie die Amplitude für die Druckwechsel werden kleiner. Die Gesamtdauer der Belastung steigt. Insgesamt kann ein solcher Impuls als ein „weicherer“ Impuls im Vergleich zu den Impulsen im Wasser charakterisiert werden.

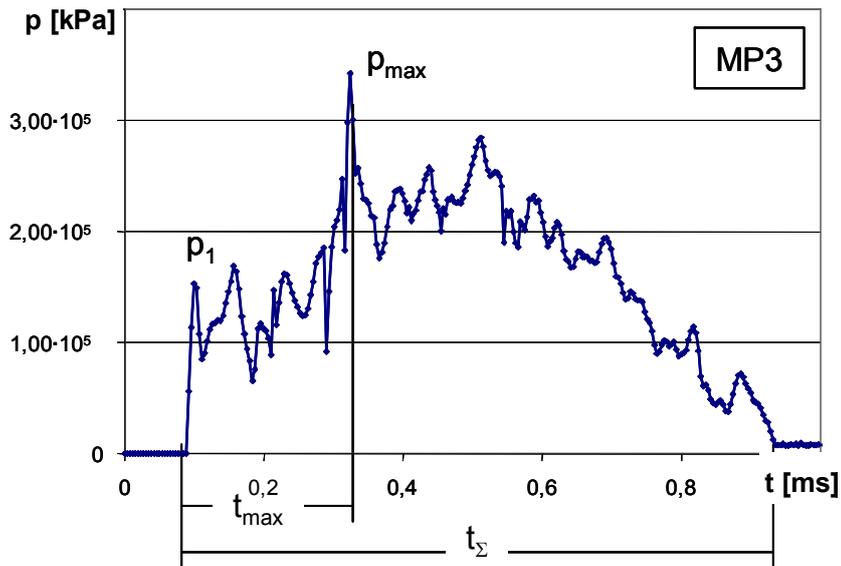


Bild 35: Druckverlauf im elastischen Wirkmedium

Der Druckverlauf bei kombinierten Wirkmedien ist von der Reihenfolge und Abmessung der Wirkmedienschichten abhängig (Bild 36 und Bild 37).

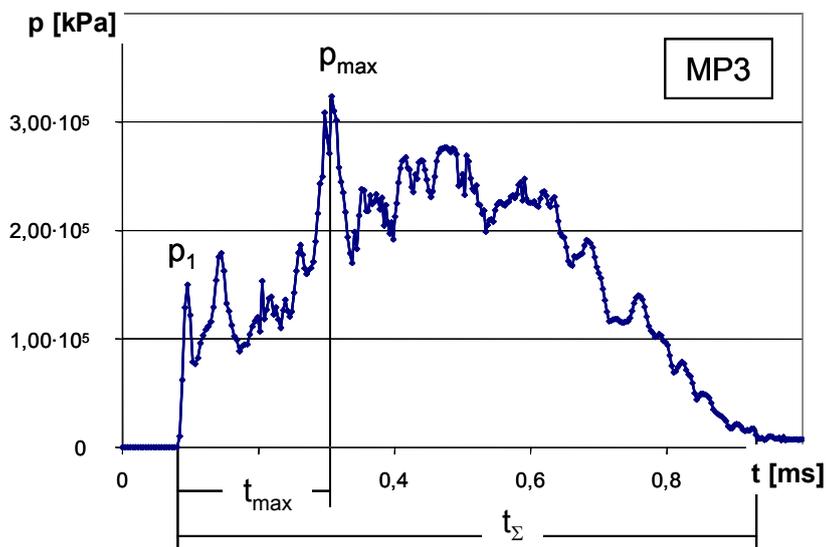


Bild 36: Druckverlauf im kombinierten Wirkmedium Wasser+Gummi

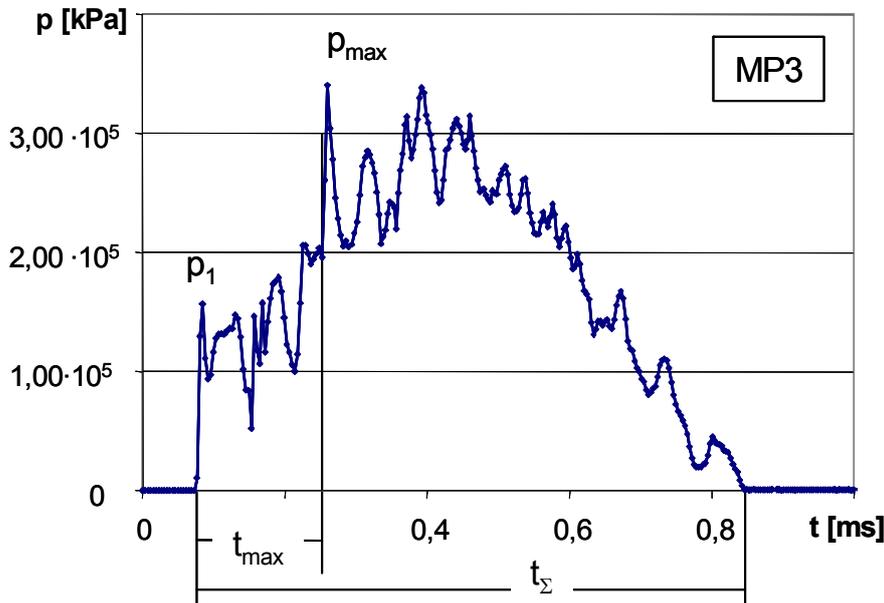


Bild 37: Druckverlauf im kombinierten Wirkmedium Gummi+Wasser

Die Untersuchungen zeigten, dass sich der Druckverlauf für ein flüssiges und ein elastisches Wirkmedium nur bis zu einer Geschwindigkeit von ca. $v_H = 75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ deutlich voneinander unterscheiden. Bei höheren Geschwindigkeiten ist die Druckwellenausbreitung in Wasser und in Gummi identisch.

Aus den Versuchsergebnissen kann folgendes geschlossen werden:

- bei Aufstoßgeschwindigkeiten des Hammers unter $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ unterscheidet sich das dynamische Verhalten des flüssigen Wirkmediums (Wasser) und elastischen Wirkmediums (Gummi) kaum vom quasistatischen Verhalten;
- bei Aufstoßgeschwindigkeiten von 25 bis $75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nimmt das flüssige Wirkmedium mehr Energie auf und überträgt mehr Energie als Gummi;
- ab Aufstoßgeschwindigkeiten von ca. $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ist der Charakter der dynamischen Verformung für flüssige und elastische Wirkmedien ähnlich.

6.3 Einfluss des Werkstücks

Es wird der Charakter der dynamischen Umformung einer Ronde aus unterschiedlichen Materialien und mit variabler Blechdicke unter konstant bleibenden Belastungsparametern untersucht.

6.3.1 Blechwerkstoff

Bei gleichem Wirkimpuls ist der Charakter der Blechverformung vom Blechwerkstoff abhängig. Außer den für die quasistatische Umformung üblichen Werkstoffkennwerten muss bei der dynamischen Verformung zusätzlich die Dichte und Schallgeschwindigkeit im Blechmaterial berücksichtigt werden [53]. Die Unterschiede in der akustischen Impedanz sind auf den materialspezifischen Impulstransfer und die Besonderheiten des Hydro-Impuls-Umformens von Blechteilen zurückzuführen.

Für die FE-Modellierung sowie für die experimentellen Untersuchungen des Einflusses der Blechwerkstoffe wurden zwei Typ von Materialien - Stahl QStE340 und Aluminium-Legierung A2024 - mit eindeutig unterschiedlicher Dichte und Schallgeschwindigkeit ausgewählt. Beide Materialien finden einen großen Einsatz in der Umformpraxis.

Es wurde eine freie Verformung des elliptischen Bodens untersucht. Die Ronden aus beiden Materialien haben einen Durchmesser von 300 mm und eine Dicke von 1,5 mm. Der Belastungsimpuls betrug ca. $200 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ was einer Aufstoßgeschwindigkeit des Hammers von $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und einer Hammermasse von 10 kg entspricht.

Aus dem unterschiedlichen Impulstransfer für das Stahl- und Aluminium-Blech resultieren bei gleichen Verfahrensparametern verschiedene Prozessverläufe (Bild 38). Der spezifische Impuls beträgt $91,7 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ für das Al-Blech im Vergleich zu $62,7 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ für das Stahl-Blech. Die maximale Umformgeschwindigkeit erreicht $19,4 \text{ s}^{-1}$ für das Al-Blech und $17,1 \text{ s}^{-1}$ für das Stahl-Blech.

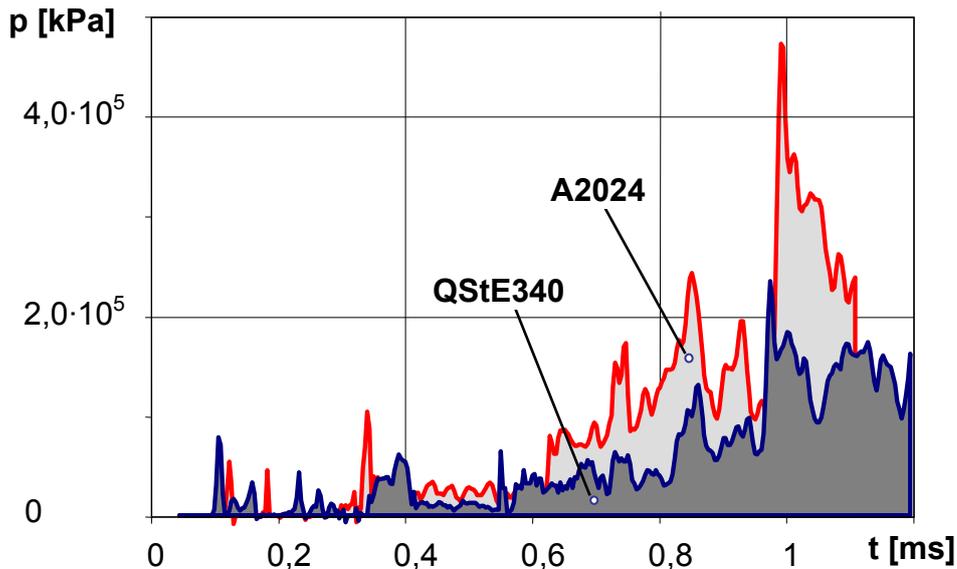


Bild 38: Druckverlauf bei unterschiedlichen Blechwerkstoffen

Das Stahlblech hat im Vergleich zum Aluminiumblech eine größere Dichte und wird langsamer beschleunigt, die maximale Umformgeschwindigkeit ist geringer und wird später erreicht (Bild 39).

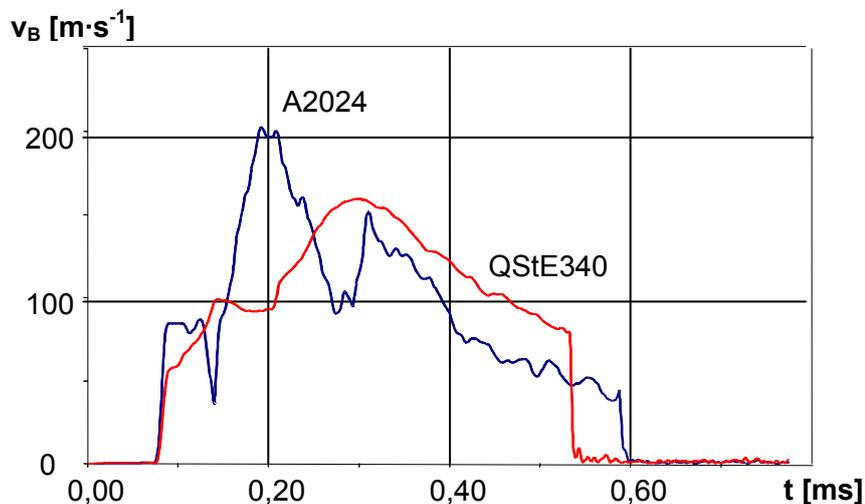


Bild 39: Die Geschwindigkeit des Blechs aus unterschiedlichen Materialien

Die reflektierten Druckwellen sind beim Stahlblech im Vergleich zum Al-Blech nicht so stark ausgeprägt. Ein spezifischer in das Blech übertragener Impuls (Impuls pro Fläche) ist beim Al-Blech fast 30% größer als beim Stahlblech. Bei dem gleichen Belastungsimpuls nimmt Al-Blech mehr Energie auf. Der Umformprozess weist einen größeren Wirkungsgrad bei Al-Blech

nach. Ein Vergleich der Werkstoffe QStE340 und Aluminium A2024 veranschaulicht die Bedeutung, die Impulsparameter an die Werkstoffcharakteristiken anzupassen.

6.3.2 Blechdicke, Steifigkeit

Der Hammer mit der Druckkammer, dem Wirkmedium und dem Blech stellt ein dynamisches Schwingungssystem dar. Die Energieübertragung vom Hammer in das Blech hängt im dynamischen System von der Frequenz der Belastung sowie von der Eigenfrequenz des Systems ab. Bei konstant bleibenden Charakteristiken des Werkzeugs und der Anlage wurde die Eigenfrequenz dieses Systems durch die Blechparameter bestimmt. Der Einfluss der Blechsteifigkeit wurde am Beispiel des Stahlblech QStE340 untersucht. Dafür wurden die Ronden mit unterschiedlichen Durchmessern und Blechdicken verformt.

Der ganze Druckverlauf im Wirkmedium ändert sich, wenn in der Druckkammer anstelle eines starren Kammerbodens ein verformbares Blech eingesetzt wurde. Die gesamte Belastung dauert länger und das Druckmaximum wird später erreicht (Bild 40 und Bild 29).

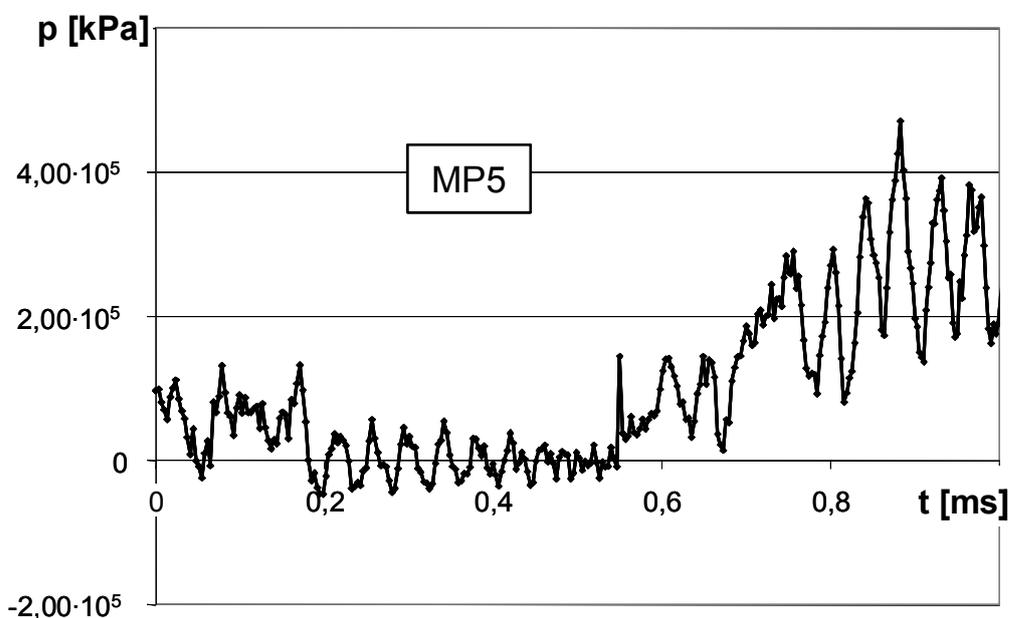


Bild 40: Einfluss des verformbaren Blechs auf den Druckaufbau (MP5)

Die gleichen Ergebnisse wurden für die anderen Bereiche der Druckkammer festgestellt (Bild 41 und Bild 42).

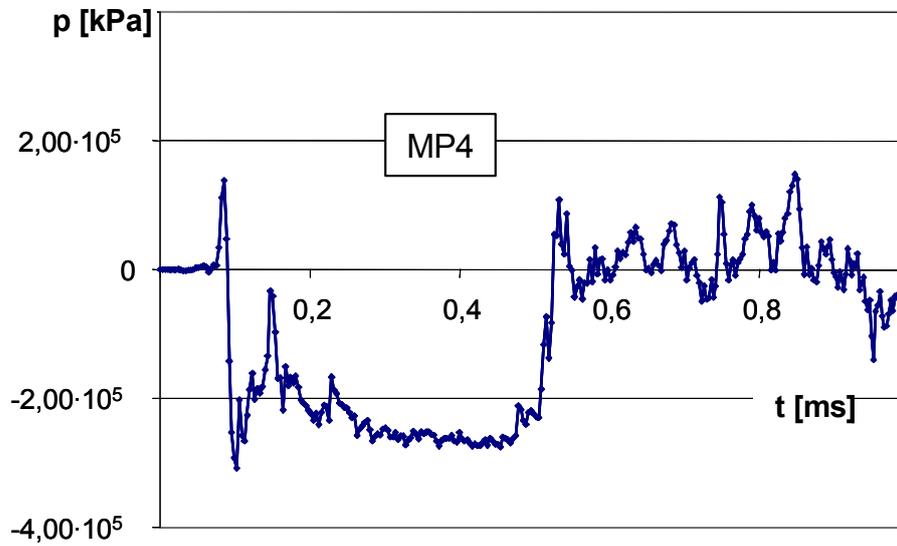


Bild 41: Einfluss des verformbaren Blechs auf den Druckaufbau (MP4)

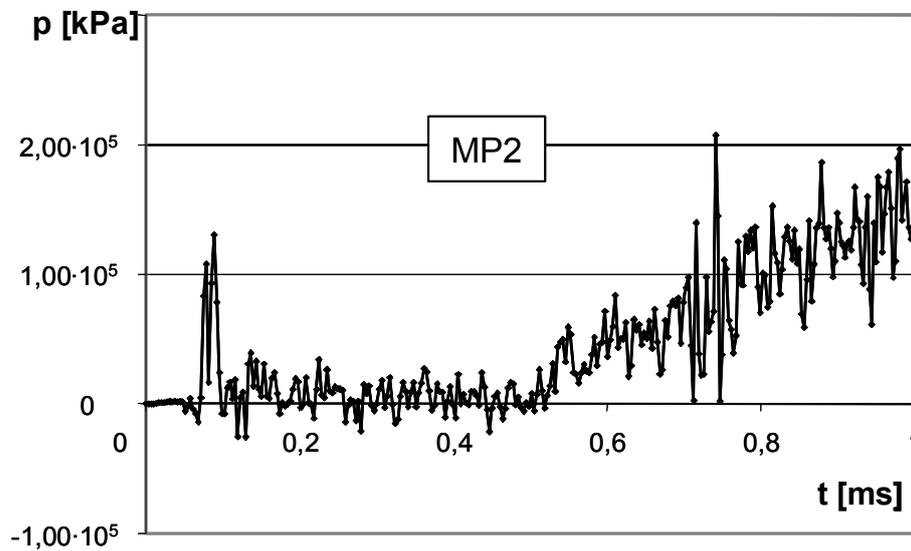


Bild 42: Einfluss des verformbaren Blechs auf den Druckaufbau (MP2)

Der Druckverlauf am beweglichen Blech selbst (Messpunkt MP3) hängt von der lokalen Geschwindigkeit des Blechs ab (Bild 43).

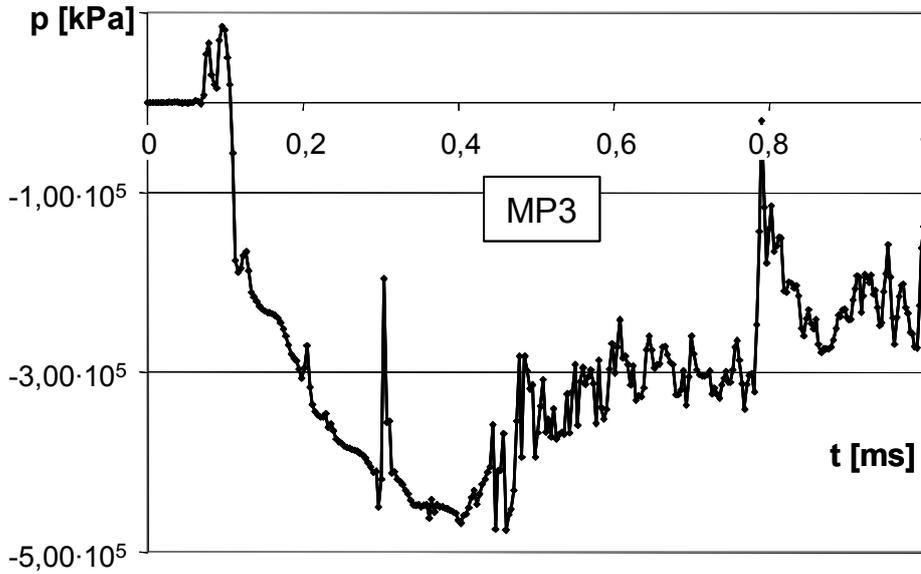


Bild 43: Druckaufbau am Blech (P3). Wirkmedium - Wasser

Im berechneten Beispiel beträgt der Gesamtimpuls des Hammer $P_{H1} = 8,40 \cdot 10^6$ [$\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], davon geht nur kleiner Anteil von ca. $P_B = 5,42 \cdot 10^4$ [$\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] in die Umformung des Blechs über. Der größte Anteil des Wirkimpulses ca. $P_{H2} = 7,72 \cdot 10^6$ [$\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] bleibt im reflektierenden und zurück fliegenden Hammer. Die Impulsverluste im Wirkmedium betragen ca. $P_W = 8,82 \cdot 10^5$ [$\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] und der Rest des Impulses geht in den Werkzeugelementen verloren. Der Impulstransfer hängt in erster Linie von der Steifigkeit des Blechs sowie von den Charakteristiken des Wirkmediums ab. Wurde anstelle des Wassers ein elastisches Wirkmedium (Gummi) eingesetzt, ändert sich der Druckverlauf an den charakteristischen Bereichen (Bild 44 und Bild 45) sowie die Verteilung des Impulses. Darüber hinaus sollte für jedes dynamische System Hammer-Wirkmedium-Blech-Werkzeug eine Optimierung des Wirkimpulses erfolgen. Unter gleichen Belastungsbedingungen wurde von einem dickeren und steiferen Blech mehr Energie reflektiert und weniger aufgenommen.

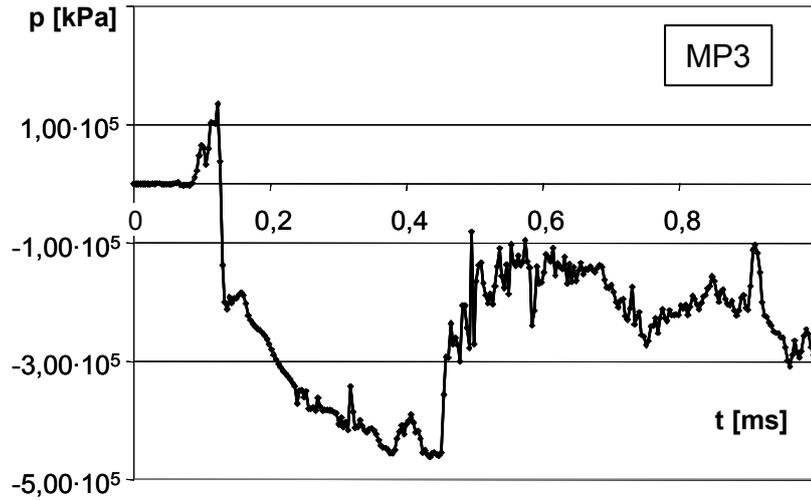


Bild 44: Druckaufbau am Blech. Wirkmedium - Gummi

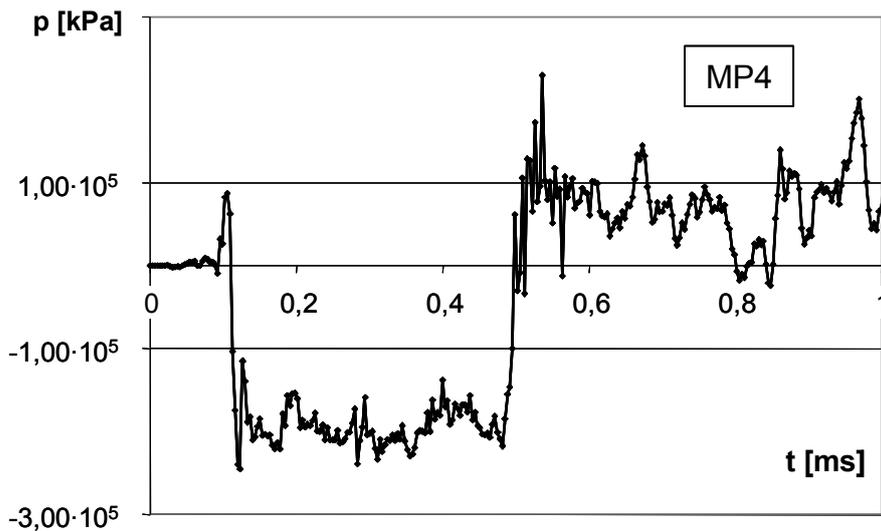


Bild 45: Druckaufbau an der Ecke der Druckkammer. Wirkmedium - Gummi

Für die Praxis bedeutet das, dass die Charakteristiken des Belastungsimpulses an die Steifigkeit jedes realen Werkstücks angepasst werden müssen. Am einfachsten kann das durch eine virtuelle Prozessanalyse realisiert werden. Da der Aufwand dabei ziemlich groß ist, sollen für diese Zwecke die in der vorliegenden Arbeit ausgearbeiteten FE-Modelle und Methoden eingesetzt werden.

6.3.3 Verlauf der Verformung

Es wurde festgestellt, dass das Umformen des Bleches beim HIU im Unterschied zu dem konventionellen quasistatischen Umformen mit einer zeitabhängigen ungleichmäßigen Änderung der Werkstückgeometrie erfolgt. Bei erhöhten Geschwindigkeiten spielt der wellenartige Charakter der Verformung eine dominierende Rolle. Die Verformung des Werkstücks erfolgt von einer Flachbodenform über eine Torus-Form in eine sphärische bzw. kegelförmige Zwischenform (Bild 46). Dadurch verhält sich das HIU identisch zur quasistatischen Umformung mit mehreren verschiedenförmigen Stempeln in Nachfolgeoperationen.

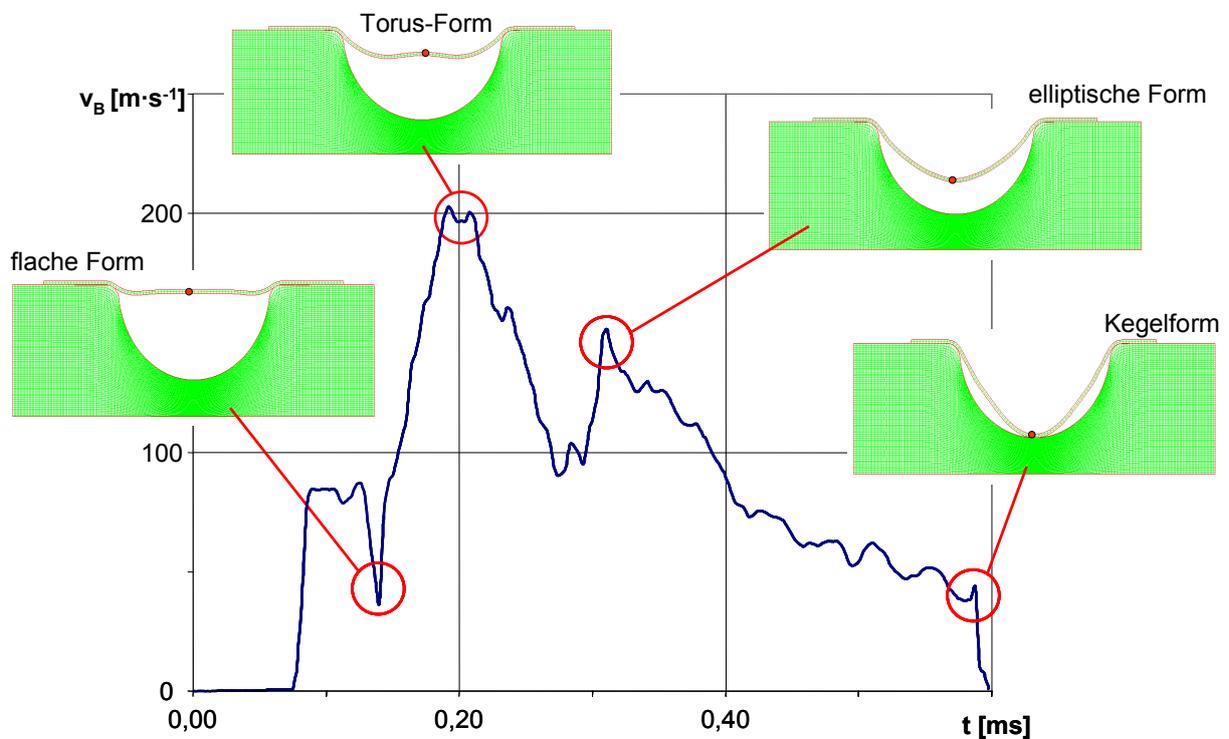


Bild 46: Verlauf des Blechverformens beim HIU

Aus den Simulationsberechnungen für die Umformung einer Ronde mit unterschiedlichen Impulsen kann nachgewiesen werden, dass durch die „weichen“ Impulse die elliptischen und durch die „harten“ Impulse die kegelförmigen Zwischen- und Endformen erzeugt werden (Bild 47). Das führt auch zu den großen Unterschieden bei der Verteilung der Blechdicke an den Bauteilen, die bei verschiedenen Geschwindigkeiten verformt sind.

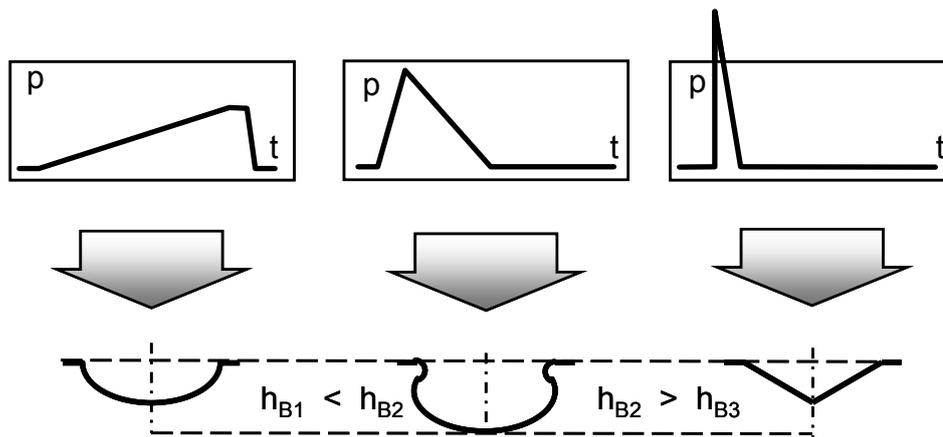


Bild 47: Endformen des Blechs bei unterschiedlichen Impulsen

Es wurde festgestellt, dass bei Hammergeschwindigkeiten unter ca. $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ der Verlauf der Blechumformung mit HIU dem bei quasistatischen wirkmedienbasierten Prozessen ähnlich ist. Mit der Steigerung der Auftreffgeschwindigkeiten des Hammers spielt der wellenartige Charakter der Blechverformung eine immer größere Rolle.

6.4 Einfluß der Umformparameter auf die Bauteilqualität bei HIU

Da bei den neuen HIU-Verfahren nur geringe Erfahrungswerte aus Laboruntersuchungen und kaum Werte aus der industriellen Praxis vorliegen, kann eine Festlegung der Prozessparameter nicht ohne Kenntnis ihres jeweiligen Einflusses sinnvoll getroffen werden.

Um die Praxistauglichkeit des HIU-Verfahrens aufzuzeigen, wird die Analyse der Einflussgrößen mit industrienahen Randbedingungen durchgeführt. Der Einfluss der unterschiedlichen Prozessparameter soll an den Blechdickenänderungen und am Vergleichsumformgrad bewertet werden. Da die untersuchten Werkstoffe qualitativ ähnliche Verläufe für diese Ergebnisgröße aufweisen, werden bei den vorgestellten Untersuchungen jeweils nur ausgesuchte Ergebnisse präsentiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Werkstoffe untereinander.

6.4.1 Einfluss des Belastungsimpulses

Da von den Impulscharakteristiken der Verlauf des Umformprozesses sowie die Endgeometrie des Bauteils abhängig sind, wurden die Modellberechnungen für die Impulsvarianten durchgeführt. Es wurde untersucht, mit welchen Impulsen (Druckgradienten) die besten Umformergebnisse (größten Umformgrade) erreichbar sind. Für die unterschiedlichen Impulse wurde der Verlauf des Umformprozesses bis zum Versagen des Blechs (Rissbildung) berechnet.

Ziel der Berechnungen war, ein technologisches Fenster für die Impulscharakteristiken zu finden, in dem eine maximale Verformung des Werkstücks ohne Risse realisierbar ist.

Die für die Umformung des Blechs erforderliche spezifische Energie wird in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie, der Blechdicke und den Werkstoffeigenschaften theoretisch bestimmt. Um den Einfluss der einzelnen Prozessparameter bewerten zu können, werden in den nachfolgenden Untersuchungen die jeweils anderen Prozessparameter konstant gehalten. Analog zu den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen wird in den FE-Berechnungen die Hammergeschwindigkeit auf $v_H = 5, 25, 50, 75$ und $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ eingestellt. Die Hammermasse wurde mit 5 kg berechnet. Es wurde festgestellt, dass bei Geschwindigkeiten v_H unter ca. $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ die Verformung des ganzen Blechs im elastischen Bereich bleibt. Wegen der Reflexion des Hammers von der Oberfläche des Wirkmediums wurde das Blech in die Gegenrichtung verformt. Die maximale Bauteiltiefe wurde bei einer Hammergeschwindigkeit von ca. $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ erreicht (Bild 48). Danach erfolgte eine Einschnürung und der Bruch des Blechs.

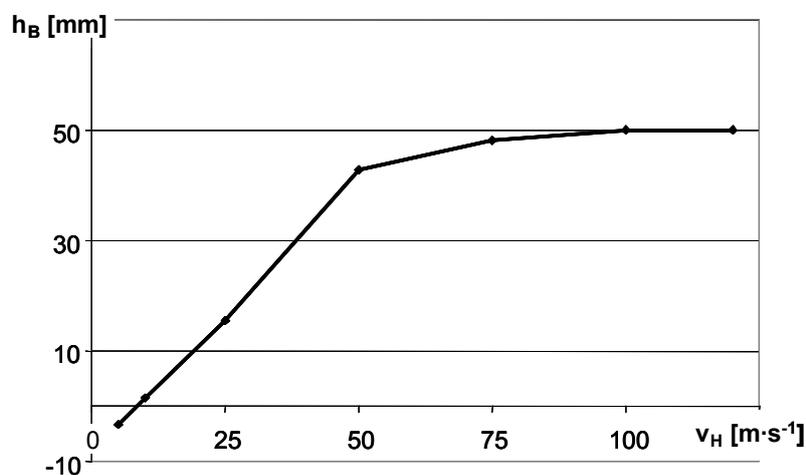


Bild 48: Bauteiltiefe bei unterschiedlichen Hammergeschwindigkeiten

Es wurde festgestellt, dass für die Verformung der untersuchten Bleche bis zum Bruch Impulse um ca. $5,4 \cdot 10^4 \text{ mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ erforderlich sind. Die kleineren Impulse reichen nicht aus um das Blech bis zum Versagen verformen zu können. D.h. bei einer Hammermasse von unter 1 kg und trotz einer hohen, maximal mit der vorhandenen HIU-Anlage realisierbaren Geschwindigkeit bis zu $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, bleibt die Verformung des Blech nicht vollständig und unkritisch. Das gleiche Ergebnis erreicht man bei zu geringeren Hammergeschwindigkeiten. Liegt die Hammergeschwindigkeit unter ca. $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, wurde das Blech auch unter der Nutzung von Hämmern mit einer Masse bis zu 10 kg nicht vollständig verformt. Im technologischen Fenster der vollständigen Bauteilverformung hängt der Charakter des Bruches von den Druckgradienten ab. Bei den verhältnismäßig „weichen“ Impulsen erfolgt das Versagen im Kuppelbereich. Wurden beim HIU die „scharfen“ Impulse mit großen Drucksteigerungsgradienten eingesetzt, bricht das Blech an den Ziehradien des Werkzeugs ab (Bild 49).

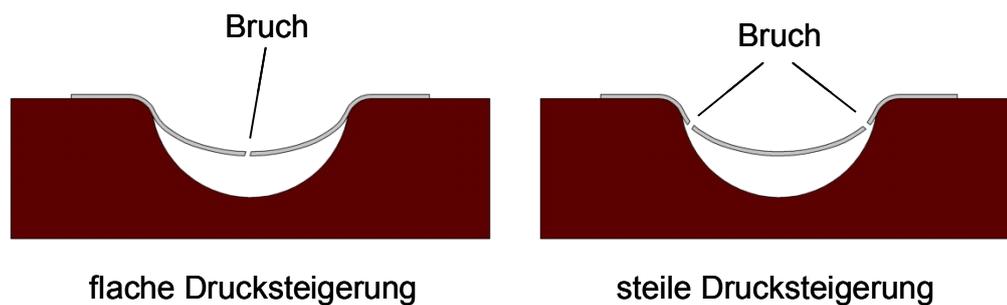


Bild 49: Charakter des Bruchs bei unterschiedlichen Druckgradienten

Bei der weiteren Steigerung der Hammergeschwindigkeit entstehen im Blech gleichzeitig mehrere kritische Bereiche mit Einschnürungen. Die Intensität der lokalen Verformung hängt vom Druckwellenbild im Blech ab (Bild 50).

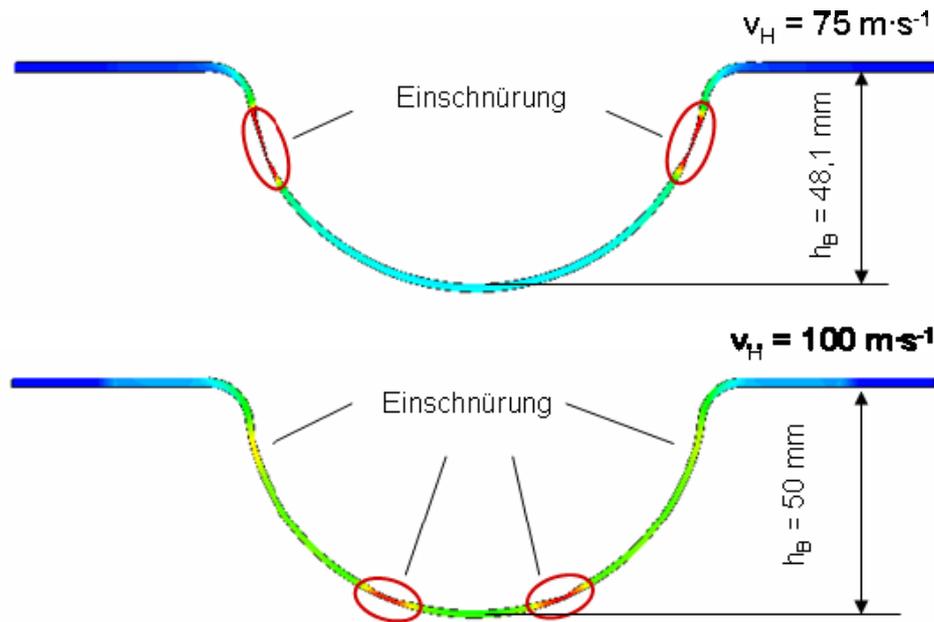


Bild 50: Kritische Bereiche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Die ähnlichen Ergebnisse wurden für das 3,0 mm dicke Blech berechnet (Bild 51). Da für die Verformung von dickerem Blech mehr Energie erforderlich ist, wurde das technologische Fenster der vollständigen Verformung des Werkstücks unter Voraussetzung der gleich bleibenden Anlageparameter kleiner.

Da die dynamische Umformung im Unterschied zur quasistatischen in mehreren kontinuierlich in einander übergehenden Stufen erfolgt, bestimmen die Impulsgröße sowie Impulsform nicht nur die maximal erreichbaren Umformgrade bis zum Versagen, sondern auch den gesamten Prozessverlauf und die Endteileigenschaften. Es wurde festgestellt, dass die Impulsform d.h. die Drucksteigerungs- und Drucksenkungsgradienten, eine entscheidende Rolle für die maximal erreichbare Bauteiltiefe haben.

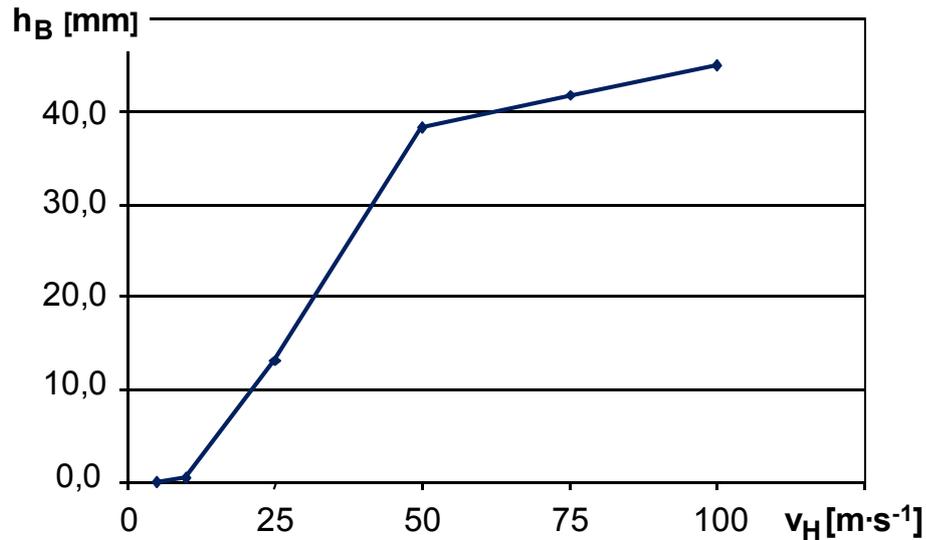


Bild 51: Umformergebnisse für ein 3mm dickes Stahlblech

Die maximale Tiefe h_{\max} für eine frei verformte Ronde wurde nicht unter Nutzung des Belastungsimpulses mit maximalem Spitzendruck (geringere Belastungszeit) oder bei maximaler Belastungsdauer (geringerer Spitzendruck) erreicht, sondern bei einer an die Steifigkeit des Blechs angepassten Druck-Zeit-Kombination der Belastungsimpulse berechnet (Bild 52).

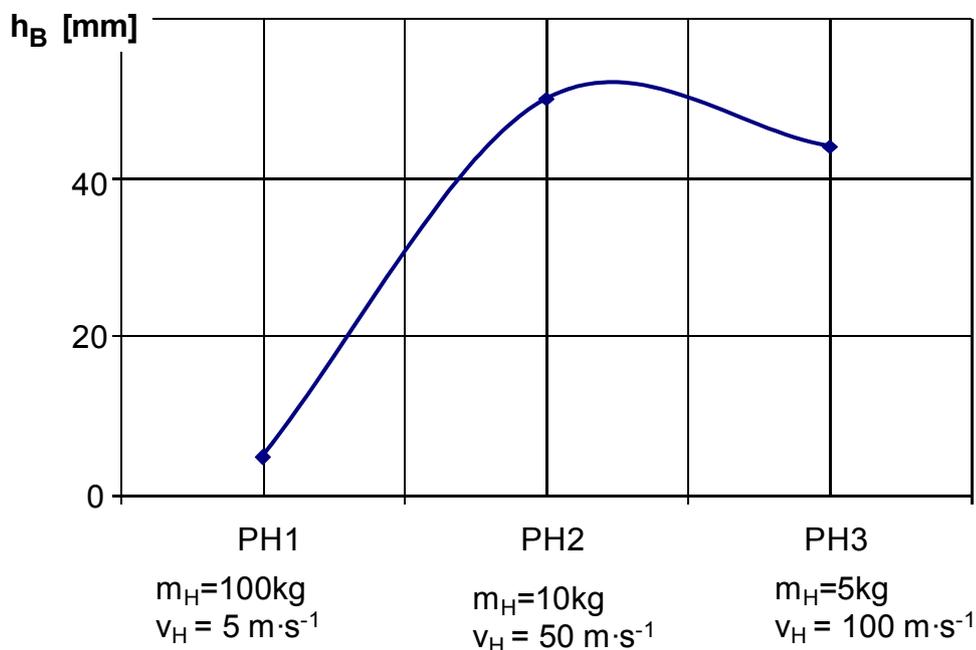


Bild 52: Bauteiltiefe bei unterschiedlichen Belastungsparametern

Bei der Auswahl der Hammergeschwindigkeit muss auf zwei Aspekte geachtet werden. Einerseits darf die Hammergeschwindigkeit nicht zu gering gewählt werden, da sonst keine

vollständige Bauteilgeometrie entsteht. Andererseits wird die Hammergeschwindigkeit nach oben durch die Anlagekapazität sowie durch starke Lokalisierung der Dehnungen im Kuppelbereich und die Rissbildungsgefahr begrenzt. Die Hammergeschwindigkeit muss daher an das jeweilige Bauteil angepasst werden.

Die experimentellen Untersuchungen zur genauen Beschreibung der Verfahrensparameter beim Tiefziehen wurden mit einer feinen Abstufung der Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Damit können gesicherte Aussagen zur vollen Ausschöpfung der Potentiale des HIU-Verfahrensprinzips bezüglich maximal erreichbarer Ziehverhältnisse getroffen werden. Dabei wurde nicht nur die Geometrie des Endteils sondern auch der Verlauf der Blechdickenänderungen abhängig von der Hammergeschwindigkeit analysiert.

6.5 Prozesssicherheit - Verfahrensgrenzen beim HIU-Tiefziehen

Die Formänderungsanalyse für das Versuchsteil „elliptischer Boden“ wurde auf Basis der FEM-Simulation durchgeführt und mit den experimentellen Ergebnissen an belasterten Bauteile verglichen (Bild 53).

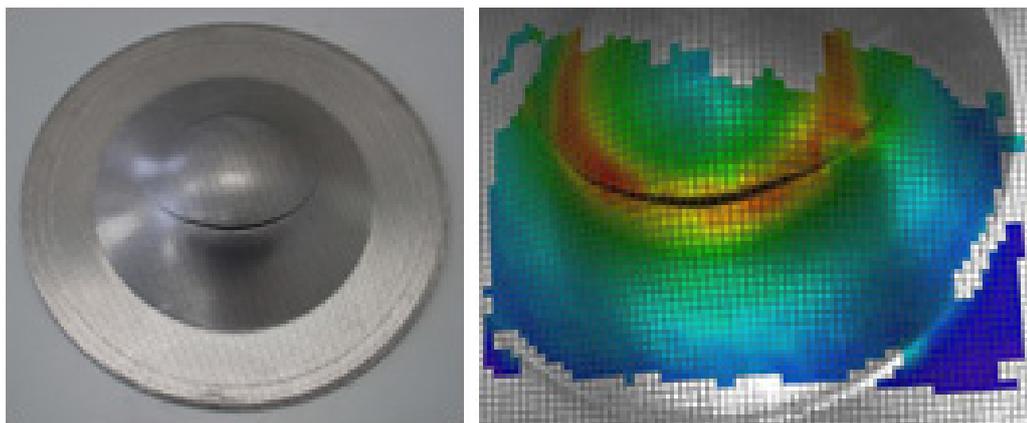


Bild 53: Erfassung der Umformgrade mit VIALUX

Der Verlauf der Blechdickenänderungen weist lokale Minima auf, die im Kuppelbereich des Bauteils vorliegen. Der dazugehörige Verlauf der Vergleichsumformgrade ermöglicht eine Beurteilung, welche plastische Vergleichsdehnung im kritischen Bereich vorliegt (Bild 54).

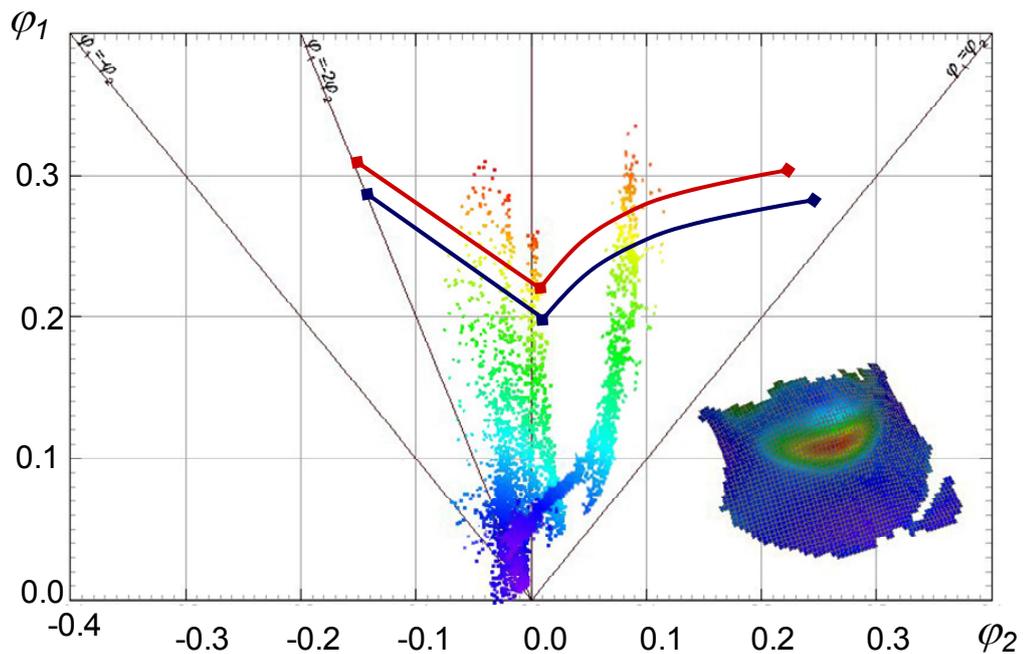


Bild 54: Formänderungsanalyse

Analog zum Verlauf der Blechdickenänderungen ergeben sich zwei Maxima der Vergleichsumformänderungen. Die betragsmäßig größten liegen in den Bereichen der Ziehradien und der größten Ziehtiefe. Im mittleren Bauteilbereich werden geringere Vergleichsumformgrade von ca. 10% berechnet. D.h. die Prozessparameter sollten so angepasst werden, dass in diesem Bereich höhere Formänderungen erzielt werden.

Neben der Optimierung von Bauteileigenschaften müssen auch die kritischen Bereiche hinsichtlich Einschnürungen und Rissbildung berücksichtigt werden. Am Bauteil „elliptischer Boden“ aus der Al-Legierung AlMg3 mit einer Blechdicke von 1,5 mm ergeben sich zwei kritische Bereiche, die in Abhängigkeit von der Prozessführung mehr oder weniger zur Rissbildung neigen. Um einen Extremfall darzustellen, erfolgte eine HIU-Berechnung des Versuchsbauteils mit einem Impuls von 124 N·s. Dieser entspricht einer Hammergeschwindigkeit von ca. $75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und einer Hammermasse von 10 kg. Im Kuppelbereich des Versuchsteils kann auf eine eindeutige Rissbildung geschlossen werden, da die lokalen Blechdickenabnahmen etwa 24% betragen und die Hauptverzerrungen in diesem Bereich oberhalb der dynamischen GFK für das Versuchsmaterial liegen (Bild 55).

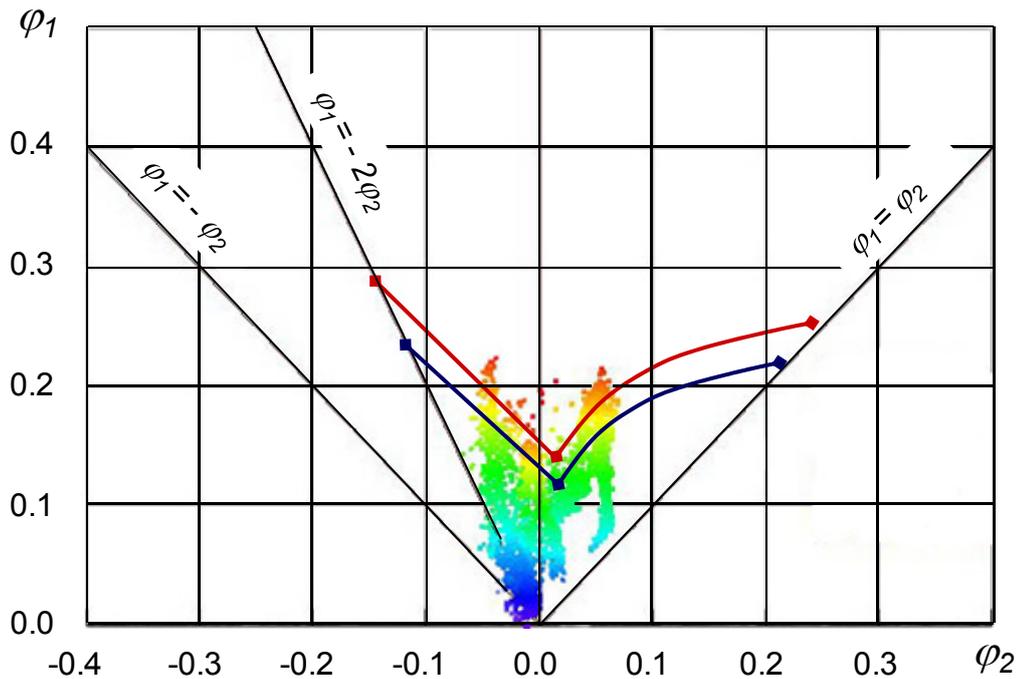


Bild 55: Grenzformänderungsdiagramm

Im Bereich des Ziehringes liegt nur eine geringe Sicherheit gegen Rissbildung vor, da hier die lokalen Blechdickenänderungen etwa 18% aufweisen. Im Bereich zwischen Kuppel und Ziehring dagegen werden nur vergleichsweise geringe Dehnungen von ca. 10% erzielt. Daher muss bei der Optimierung der Formänderungen in diesem Bereich auf das globale Verhalten der beiden anderen kritischen Bereiche hinsichtlich Rissbildungen geachtet werden.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass unter der Nutzung bauteilangepasster Impulse die größeren Ziehverhältnisse erreicht werden können. Damit wird eine weitere Zunahme der in einer Stufe gezogenen Reliefs erreicht, die Verfahrensgrenzen erweitert und die Endteileigenschaften verbessert.

Die FE-Modellversuche sowie Experimente mit HIU haben nachgewiesen, dass durch eine gezielte Wahl der Impulsform die Verfahrensgrenzen der wirkmedienbasierten Umformung wesentlich erweitert werden können. Es wurde festgestellt, dass die HIU einen besonderen Wirkmechanismus darstellt, der sich deutlich von quasistatischen sowie von hochdynamischen Verfahren unterscheidet. Die Umformung des Blechteils erfolgt in zeitlich aufeinander folgenden Stufen. Dadurch werden zahlreiche Vorteile für die Blechumformung gesehen, die bislang noch nicht erforscht sind.

6.6 Verfahrensbedingte Qualitätsmerkmale

Durch die experimentellen quasistatischen und dynamischen Vergleichsuntersuchungen werden die verfahrensspezifischen Endteileigenschaften wie Blechdicken-, Formänderungs- und Härteverteilung sowie die Gefügebesonderheiten bestimmt.

Für die Vergleichsversuche zur quasistatischen und dynamischen Umformung werden die gleichen Ausgangsteile und Werkzeuge genutzt. Der Einfluss eines dynamischen Charakters der Umformung wurde im Kuppel- und Ziehradien-Bereich festgestellt (Bild 56).

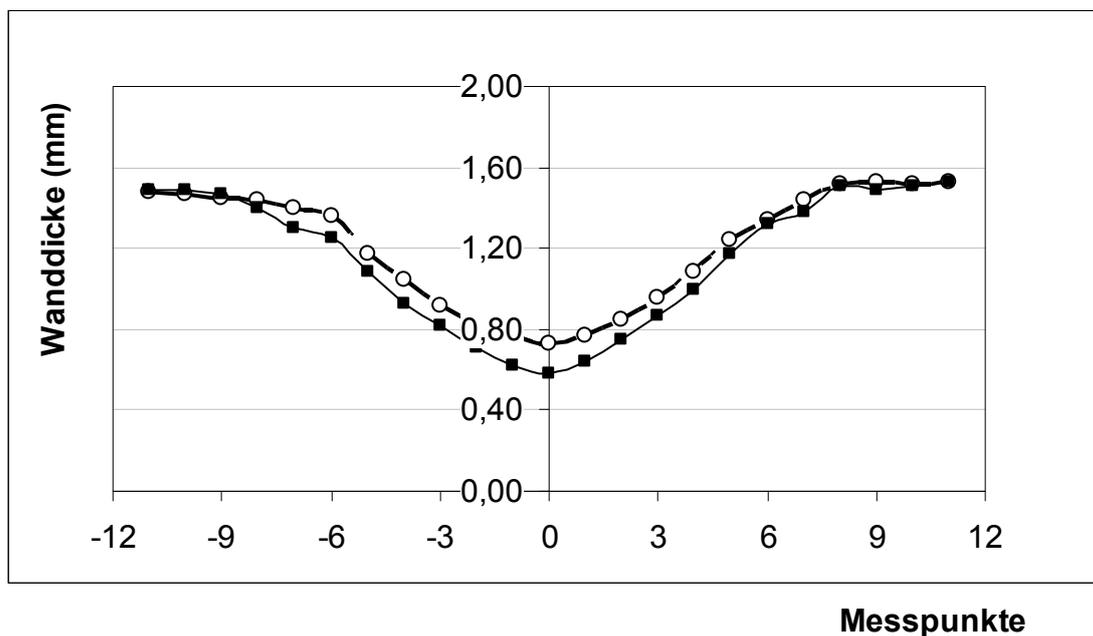


Bild 56: Blechdickenverteilung bei der Verformung

--o--o--o-- quasistatisch und --■--■--■-- dynamisch

Obwohl die maximale Dehnung bei der dynamischen Umformung bis zu 60 % in der Kuppel erreicht wurde, entstehen an den fertigen Bauteilen keine Risse. Unter quasistatischen Bedingungen geformte Bauteile reißen schon bei 51%-iger Dehnung in der Kuppel. Einer verhältnismäßig homogenen Verteilung der Blechdicken bei der quasistatischen Verformung steht eine inhomogene Blechdickenreduzierung bei der HIU-Verformung gegenüber. Die weiteren lokalisierten Bereiche mit Verjüngung des Blechmaterials werden im Bereich der Ziehradien festgestellt, was die Ergebnisse der FE-Modell-Versuche bestätigt.

Die umformbedingten Änderungen der Blechwerkstoffeigenschaften wurden durch die Untersuchung der Vickershärte (Halbkugel) analysiert. Die gemessene Härte lag am Rande

des Werkstücks bei 120 HV5 und in der Kuppel bei 190 HV5. Das entspricht einer Verfestigung von ca. 25 % (Mittelwert) in der Kuppel (Bild 57).

Die quasistatisch verformten Teile weisen höhere Härtewerte insbesondere im Bereich der lokalen Einschnürung auf. Obwohl bei dynamischer HIU-Verformung größeren Dehnwerte erreicht werden, ist die Materialverfestigung insbesondere in kritischen Bereichen geringer. Dies kann durch den Einfluss des wellenartigen Charakters der Verformung und der lokalen Entfestigung des Materials in einer laufenden elastisch-plastischen Welle erklärt werden.

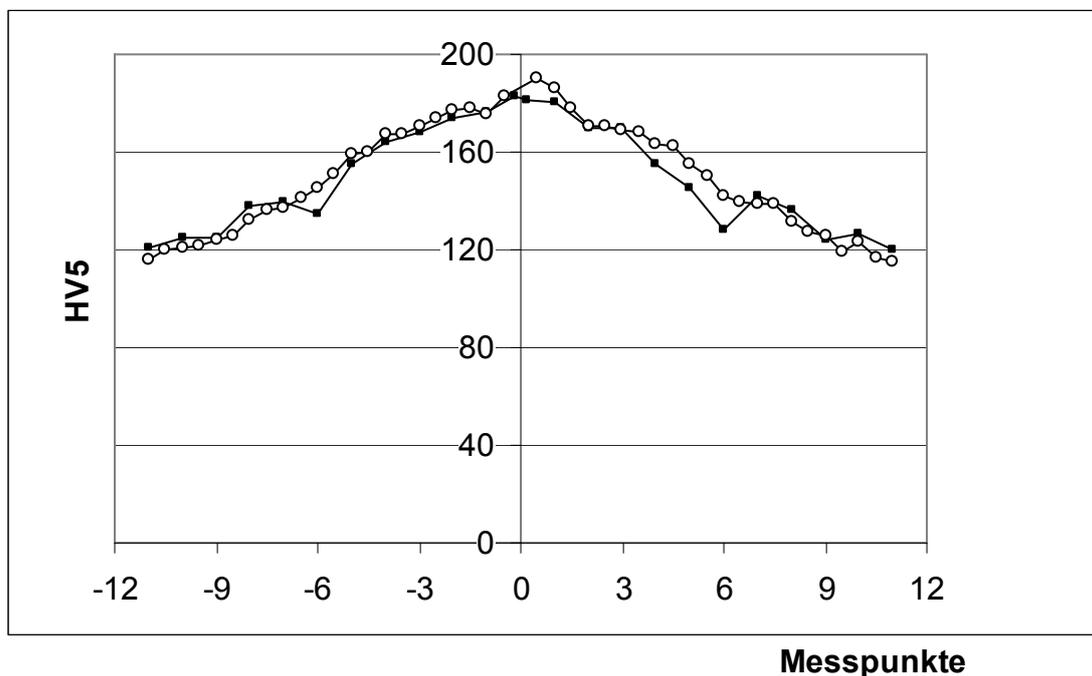


Bild 57: Mikrohärtemessungen der verformten Teile

--o--o--o-- quasistatisch und --■--■--■-- dynamisch

Diese theoretisch festgestellten und experimentell bestätigten Effekte sind von großem Interesse für die Verbesserung der Endteileigenschaften und sollten in weiteren Arbeiten detailliert untersucht werden.

Die Untersuchungen der Versagensfälle haben gezeigt, dass unter extremen Belastungsbedingungen die regelmäßig angeordneten Hohlräume im Inneren des Blechs entstehen (Bild 58).

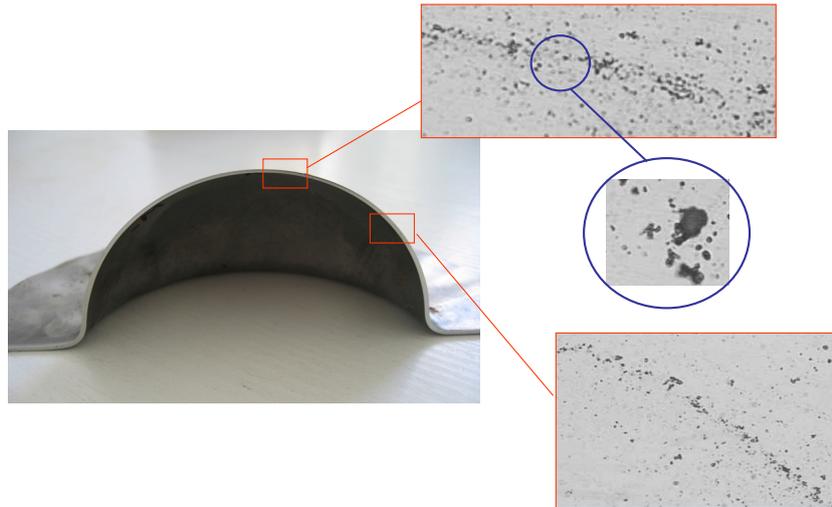


Bild 58: Hohlraumbildung bei extremen Umformparametern (QStE340)

Die Analyse der Versagensstellen an den Versuchsteilen mit dem Rasterelektronenmikroskop hat gezeigt, dass unter dynamischer Belastung ein Abfall der Bruchzähigkeit auftritt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Bruch des verformten Blechs unmittelbar mit dem Vorhandensein und Wachstum von Mikrorissen und Hohlräumen verbunden ist (Bild 59).

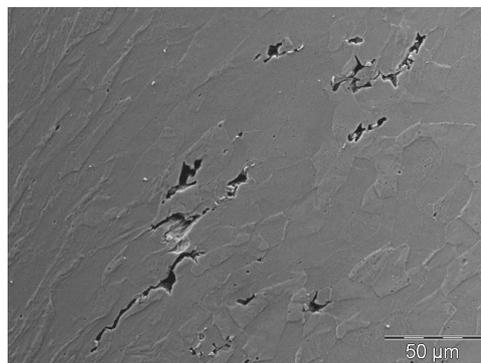


Bild 59: Analyse der Bruchstelle mit dem Rasterelektronenmikroskop

Derartige Mikrorisse und Hohlräume können in kristallinen Metallwerkstoffen durch verschiedenartige Wechselwirkungen von Versetzungen der Korn- und Phasengrenzen sowie anderer Grenzflächen entstehen. Diese Hohlräume sind eine Begleiterscheinung plastischer Verformung des Materials durch laufende elastisch-plastische Wellen im Blech während der Hydro-Impuls-Umformung. Diese sowie weitere dynamische Sondereffekte werden weiterhin näher untersucht.

7. Einfluss dynamischer Effekte auf die Qualitätssicherheit

Das HIU stellt einen besonderen dynamischen Prozess dar, welcher von spezifischen Effekten wie:

- einem wellenartigen Charakter der Blechverformung;
- einer lokalen kurzfristigen Erwärmung des Blechs;
- dem Einfluss von Massenkräften auf die Stabilität des Umformprozesses und
- der dynamischen Reibung zwischen Blech und Werkzeug

begleitet wird.

Durch die FEM-Simulation wurden am Beispiel der HIU-Verformung einer Ronde aus Stahl QStE340 mit der Blechdicke von 1,5 mm der Verlauf des Umformens und der spezifischen dynamischen Effekte analysiert.

7.1 Elastisch-plastischen Wellen

In FE-Modell-Versuchen wurde festgestellt, dass bei schlagartiger Belastung einer Blechprobe im Blechmaterial die elastisch-plastischen Wellen entstehen. Aus Bild 60 ist der Verlauf einer solchen Welle in der Zugprobe bei einem dynamischen Schlagzugversuch ($\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$) zu erkennen.

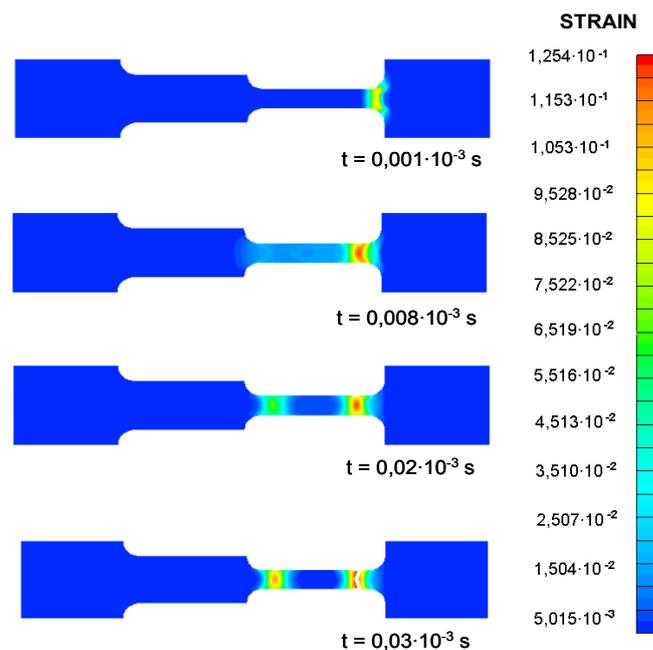


Bild 60: Elastisch-plastische Wellen bei einem Schlagzugversuch

Bei der HIU wird das Blech gleichzeitig durch überlagernde Zug- und Biegebelastungen beansprucht. Dabei entstehen im Blechmaterial elastisch-plastische Wellen, die hin und her laufen, von den Grenzflächen des Werkstücks reflektiert werden und die Schwingungen des Werkstückes verursachen (Bild 61).

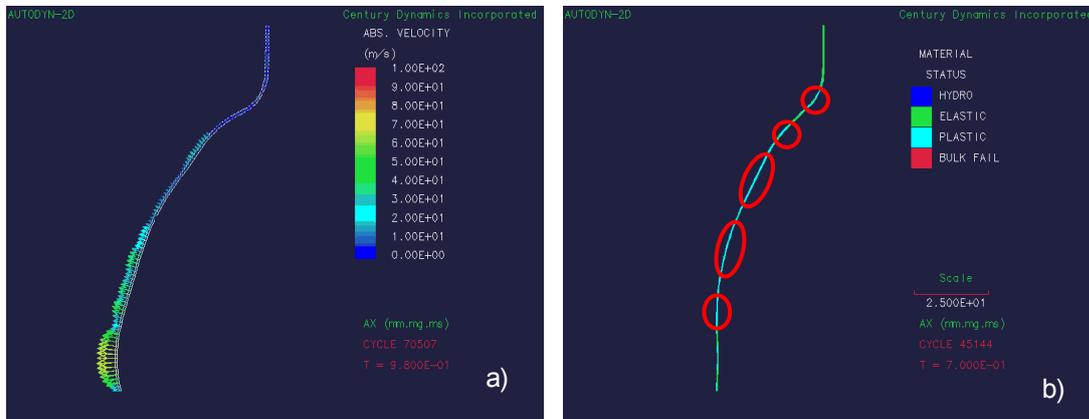


Bild 61: Schwingung des dynamisch verformten Blechs

a) lokale Geschwindigkeit b) plastisch verformte Bereiche

Die Verformung des Blechs in einer solchen Welle geht in den elastischen Bereich über und führt gleichzeitig an mehreren Bereichen des Blechs zu plastischer Verformung in einzelnen Wellen. Zwischen diesen Bereichen liegen die elastisch verformten Bereiche (Bild 62).

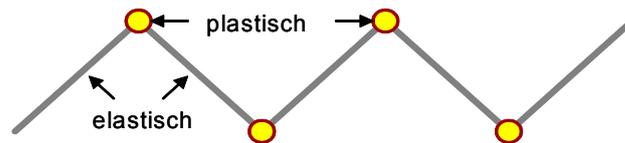


Bild 62: Schematische Darstellung einer dynamischen Blechverformung

In Unterschied zur quasistatischen Verformung bilden sich bei dynamischer Verformung gleichzeitig mehrere Bereiche mit einer großen Dehnrates (Bild 63).

Die plastische Verformung in einer Welle erfolgt im Zeitverlauf in Gegenrichtungen. Dadurch ist zu erwarten, dass die Verteilung der Blechdicken sowie der Eigenspannungen in Endzustand des Bauteils von der Verformungsgeschichte abhängig ist.

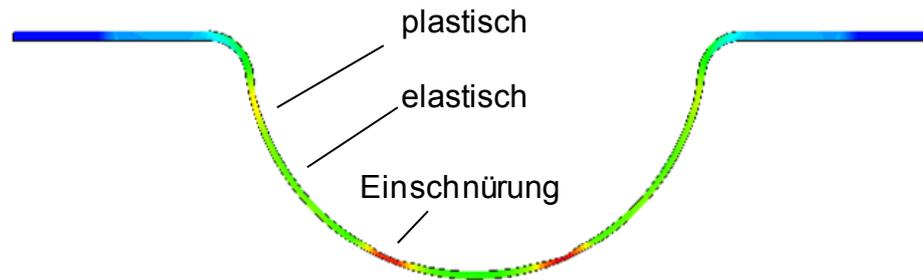


Bild 63: Kritische Bereiche in dynamisch verformtem Blech

Es wurde festgestellt, dass die Frequenz der Schwingungen von der eigenen Frequenz des Blechs (Werkstoff, Blechdicke, Ausschnittform, Befestigung) sowie von der Frequenz des Druckimpulses abhängig ist.

Die Verbreitung und Reflexion der Wellen von den Grenzflächen der Probe sowie ihre Diffraktion bestimmen die Bereiche, an denen später die Mikro- und Makrorisse entstehen können. Aus den Simulationsergebnissen folgt, dass mit der Erhöhung der Verformungsgeschwindigkeit die Bereiche, an denen die Risse entstehen, wandern [52].

7.2 Dynamische Werkstoffeigenschaften

Das mechanische Verhalten von Metallen und Legierungen, die hohen Verformungsgeschwindigkeiten unterworfen sind, weicht bekanntermaßen erheblich vom entsprechenden Verhalten statisch verformter Werkstoffe. Das gilt auch in einem Bereich der Umformgeschwindigkeit, der zwischen niedrigen (quasistatischen) und sehr hohen Geschwindigkeiten (z.B. bei der Explosivumformung) liegt und in dem sich mögliche Verbesserungen im Umformvermögen bzw. in den Umformgrenzen abzeichnen [8, 58, 59].

So lässt sich z.B. durch eine gezielte Wahl der Deformationsgeschwindigkeit im Bereich $\dot{\epsilon} \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ s}^{-1}$ das Umformvermögen und die Bearbeitbarkeit vieler Werkstoffe signifikant verbessern [14, 60, 61], womit neue Fertigungstechnologien erschlossen werden können. Des Weiteren wird es bei Kenntnis der veränderten mechanischen Werkstoffeigenschaften möglich, das Bauteilverhalten unter extremen Belastungsbedingungen realitätsnah zu beurteilen. Das Duktilitäts- und Festigkeitsverhalten der in vielen Zweigen der Technik zunehmend zum Einsatz kommenden Legierungen bei höheren

Verformungsgeschwindigkeiten sind kaum untersucht. Es fehlt daher für die meisten verwendeten Stähle und Al-Legierungen entsprechendes Wissen zum Verhalten dieser wichtigen Werkstoffgruppe bei Deformationsgeschwindigkeiten oberhalb $\dot{\varepsilon} \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ s}^{-1}$.

In diesem Zusammenhang besteht das Ziel des Vorhabens den sog. Schlag-Zug-Versuch [50] weiter zu entwickeln und für ausgewählte Materialien die Duktilitäts- und Festigkeitskennwerte (Streckgrenze bzw. Dehngrenze R_e , Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung A) bei dynamischer Belastung im bisher nicht untersuchten Dehngeschwindigkeitsbereich bei Raumtemperatur zu ermitteln.

Die Versuchsanlage besteht zunächst aus einer Druckluftanlage, die mit einem Luftdruck zwischen 2 und 30 bar den Hammer antreibt und der mit einer Endgeschwindigkeit von bis zu 70 m/s einer Spannvorrichtung den Druckimpuls weiter überträgt und 3 Proben gleichzeitig ziehen lässt (Bild 64).

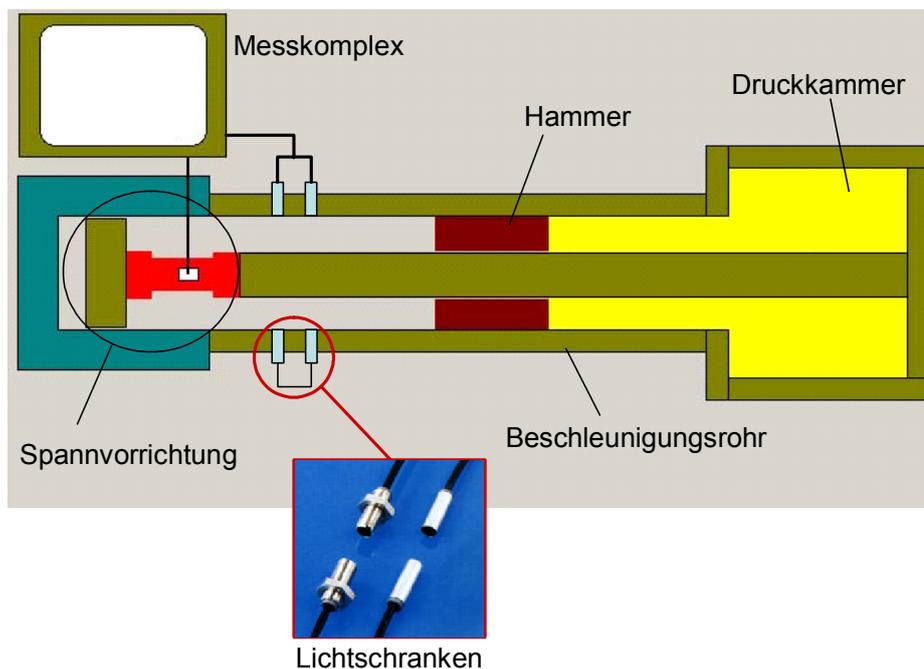


Bild 64: Versuchsanlage für dynamische Werkstoffuntersuchungen

Für die Messungen der elastischen Dehnung der Proben in Abhängigkeit von der Zeit wurden Dehnungsmessstreifen und der spezielle Messkomplex YOKOGAWA DL708E verwendet. Die Dehnungsmessstreifen wurden zu einem direkt auf der Zugprobe, zu anderen auf der

Probenhalterung unmittelbar vor und hinter der Probe platziert. Die Geschwindigkeit des Hammers wurde durch Lichtschranken registriert.

Für die dynamischen Zugversuche wurde eine spezielle Probenspanneinrichtung neu konstruiert und gefertigt (Bild 65). Mit Hilfe dieser Probenspanneinrichtung konnten gleichzeitig drei Proben gespannt und unter gleichen Bedingungen geprüft werden.

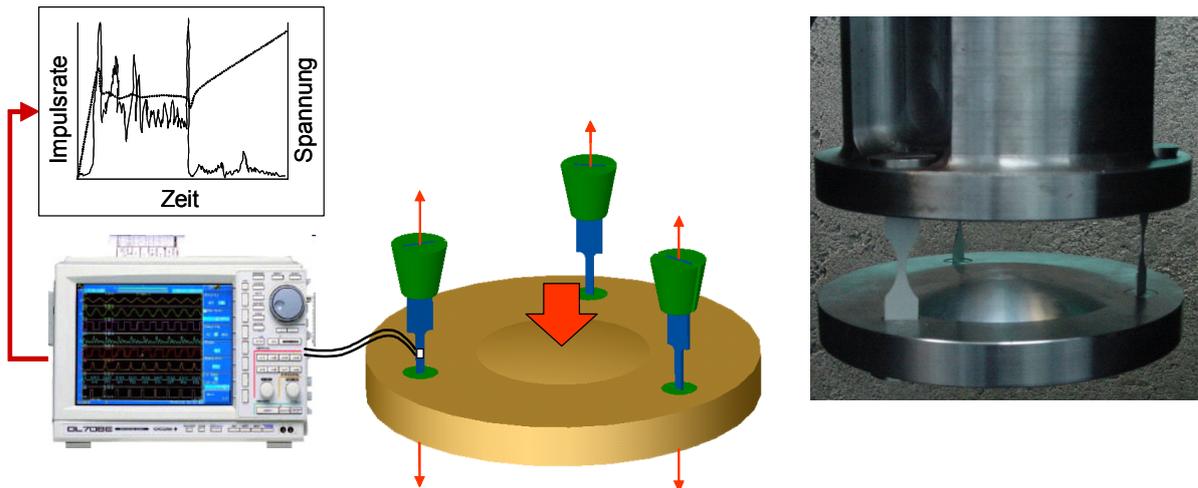


Bild 65: Probenspanneinrichtung und Messkomplex

Für die dynamischen Zugversuche wurden spezielle flache Zugproben verwendet (Bild 66). Der breitere Probenbereich ist so ausgelegt, dass er sich während der Belastung bis zum Bruch nur elastisch verformt [51]. Die dynamischen Zugversuche wurden bei den Prüfgeschwindigkeiten: $\dot{\epsilon} = 10^2 \text{ s}^{-1}$ und $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ durchgeführt und rechnergestützt ausgewertet. Zwischen den beiden Dehngeschwindigkeiten im dynamischen Bereich ist mit zunehmender Dehngeschwindigkeit auch eine Zunahme der Streckgrenze zu verzeichnen; Zugfestigkeit und Dehnung verändern sich nahezu nicht. Bei den unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten im dynamischen Belastungsbereich wurde das gleiche Ausgangsmaterial verwendet; hier stimmt die Tendenz ebenfalls.

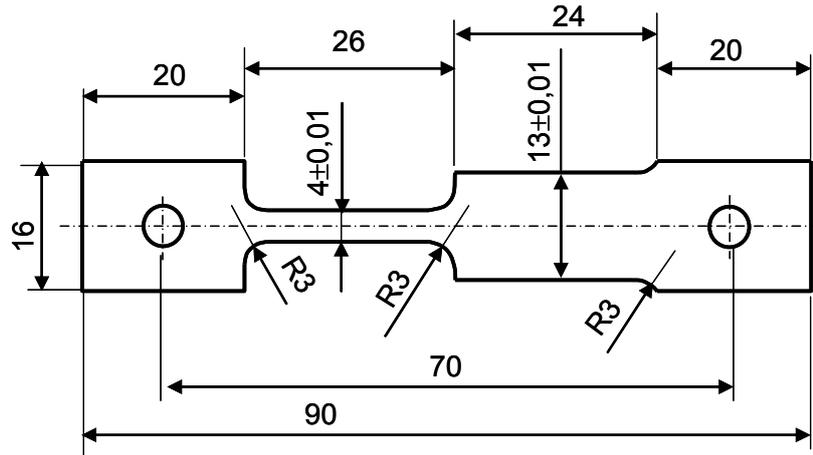


Bild 66: Zugprobe für dynamische Zugversuche

Weitere Details zu den dynamischen Werkstoffuntersuchungen sind in [52] dargestellt. Die so gewonnenen dynamischen Werkstoffkennwerte für die untersuchten Materialien wurden in die Simulationsberechnungen des HIU eingesetzt.

7.3 Spannungs-Effekte

Die dynamischen Spannungs-Effekte wurden zunächst am Beispiel des einachsigen Schlag-Zugversuchs ermittelt. Es wurde festgestellt, dass die im Blechmaterial entstehenden Spannungen vom Ablauf des Verformungsvorganges abhängen. Die während des Verformens laufende elastisch-plastische Welle ändert den Spannungszustand des Blechs. Ein Beispieldiagramm für den Verlauf der von-Mises-Spannungen während des dynamischen Zugversuchs bei der Geschwindigkeit $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ zeigt Bild 67.

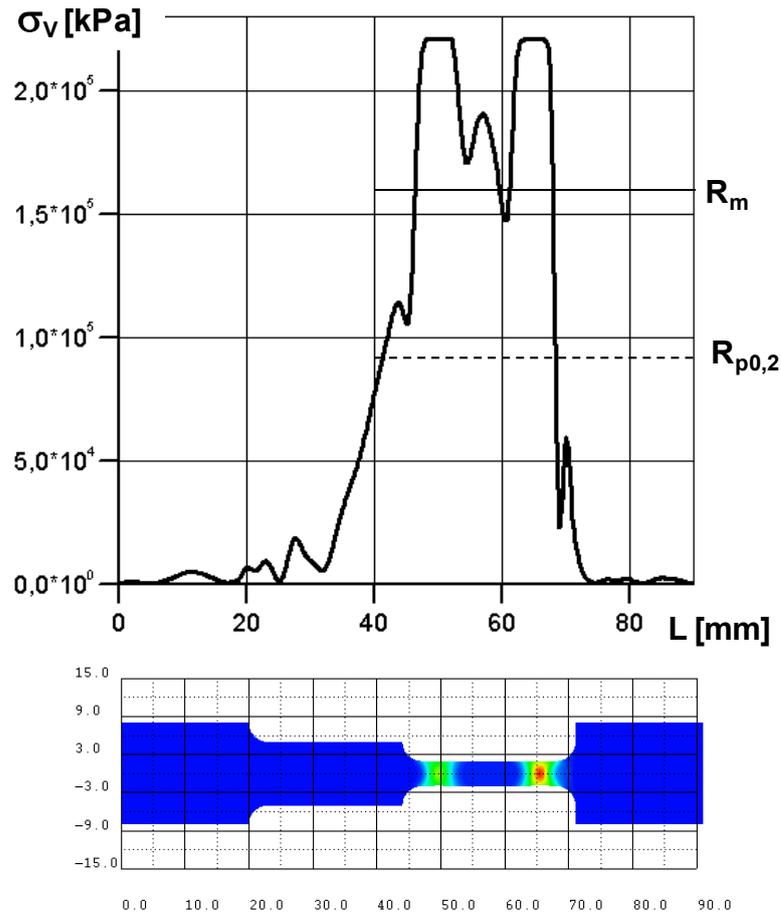


Bild 67: Spannungen $\sigma_v(t)$ für AZ91 kurz vor dem Bruch

Der gleiche Trend beim Spannungsverlauf wurde bei den komplizierten Beanspruchungen der Bleche in HIU-Prozess ermittelt. Es wurde festgestellt, dass die in den laufenden Wellen entstehenden Spannungen kurzfristig die $R_{p0,2}$ - sowie sogar R_m -Werte übersteigern können. An den Blechen bilden sich mehrere lokale Stellen mit einer großen plastischen Verformung. Durch diese kurzfristige lokale plastische Verformung können die Spannungen neu verteilt und teilweise abgebaut werden. Die Folge daraus ist, dass so die Restspannungen nach der Verformung niedriger als bei den konventionell quasistatisch verformten Blechen sind. Wurden die im Blechmaterial laufenden elastisch-plastischen Wellen zu intensiv und belasten diese das Blech mehrfach während der Verformung, so können die Wellen im Material die Bildung von Mikrorissen verursachen. Das passiert meistens bei der HGU mit extrem „scharfen“ Impulsen (Explosiv- oder Magnet-Impuls-Umformung) und ist für das HIU weniger relevant. Die o.g. Effekte wirken aber nur für den Fall der freien Verformung von Blechen ohne Zusammenstoß mit dem Werkzeug positiv. Stößt das dynamisch verformte Blech mit einer überflüssigen Geschwindigkeit auf die Matrize, entstehen an den

Kontaktzonen dadurch extrem hohe Spannungen, die weit über R_m - und sogar über R_{p02} -Niveau liegen können (Bild 68).

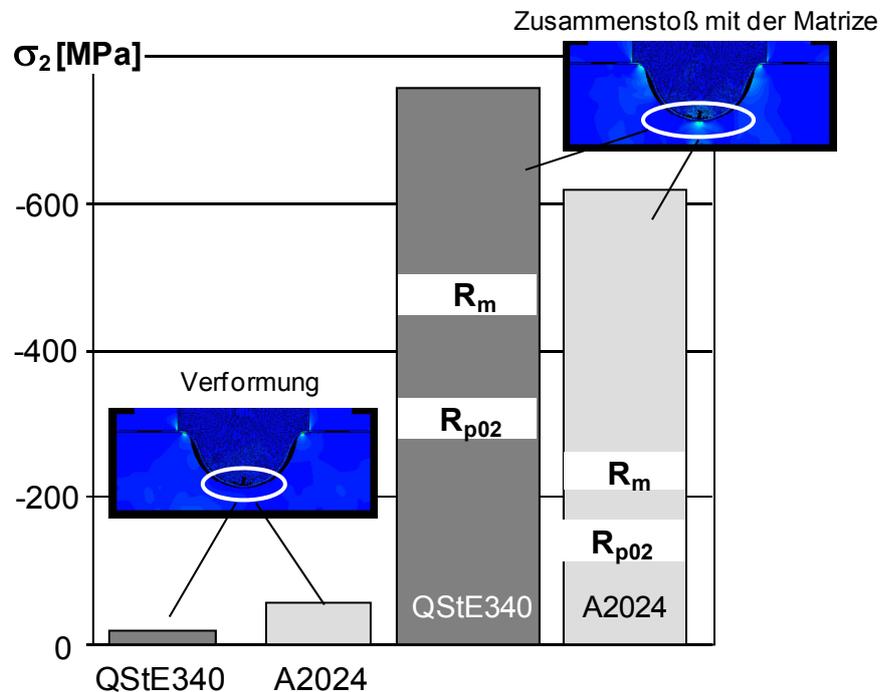


Bild 68: Vergleichsspannungen im Blech

Die Überlagerung von Spannungen, insbesondere beim Zusammenstoß vom Blech mit der Matrize können eine lokale Materialverformung und -verfestigung sowie die Bildung von Mikrorissen im Werkzeug verursachen. Bei der Berechnung der Rückfederung der HIU-verformten Bauteile sowie bei der Konstruktion der HIU-Werkzeuge müssen die Spannungsüberlagerungseffekte unbedingt berücksichtigt werden.

7.4 Thermische Effekte

Die thermischen Effekte beim HIU entstehen im Blech durch die hohe Intensität und die in sehr kurzer Zeit ablaufende Verformung. Während der freien Verformung wird das Blechmaterial in einer Längs- oder Biegewelle innerhalb einer extrem kurzen Zeit stark plastisch verformt (Bild 69).

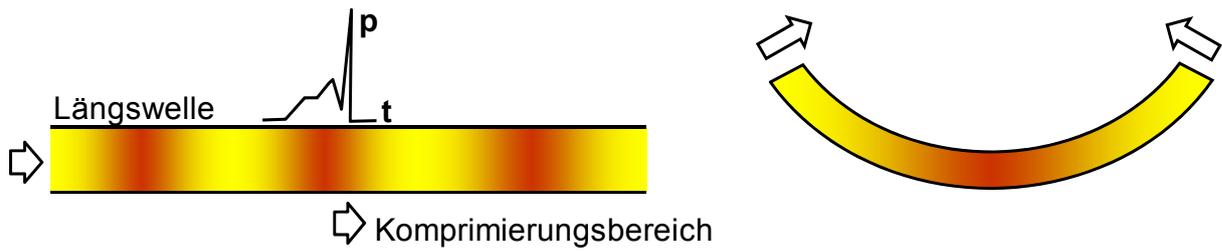


Bild 69: Komprimierung des Blechmaterials in einer Längs- oder Biegewelle

Die bei der plastischen Materialverformung entstandene Wärme wurde innerhalb der kurzen Verformungszeit nicht weiter geleitet. Dabei entsteht eine ungleichmäßige Temperaturverteilung, welche auch in Materialien mit guter oder sogar sehr guter Wärmeleitung (z.B. Aluminium) nicht ausgeglichen werden kann.

Die adiabatische Erwärmung des Blechs wurde am Beispiel der HIU-Verformung eines 1,5 mm dicken Blechs aus Al-Legierung A2024 untersucht. Es wurde festgestellt, dass schon bei einer Umformgeschwindigkeit unter 20 s^{-1} die lokale Temperatur im Al-Blech innerhalb von 0,3 ms auf bis zu 450 K steigen kann (Bild 70). Die Wärmeabfuhr in den mit dem Blech kontaktierenden Medien wie Wasser und Luft ist sehr gering und kann vernachlässigt werden.

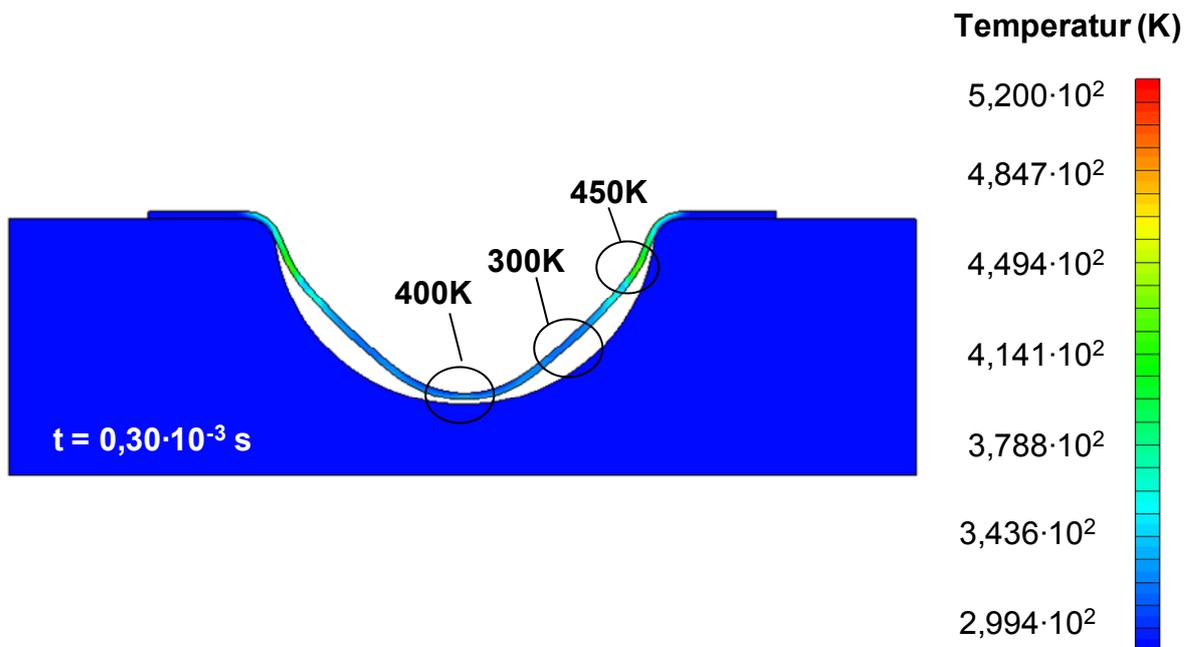


Bild 70: Thermische Effekte bei der Blechumformung

Beim Aufstoßen des beschleunigten Blechs auf der Matrize wurde das Blech wieder plastisch verformt und dadurch in den Kontaktbereichen weiter erwärmt (Bild 71).

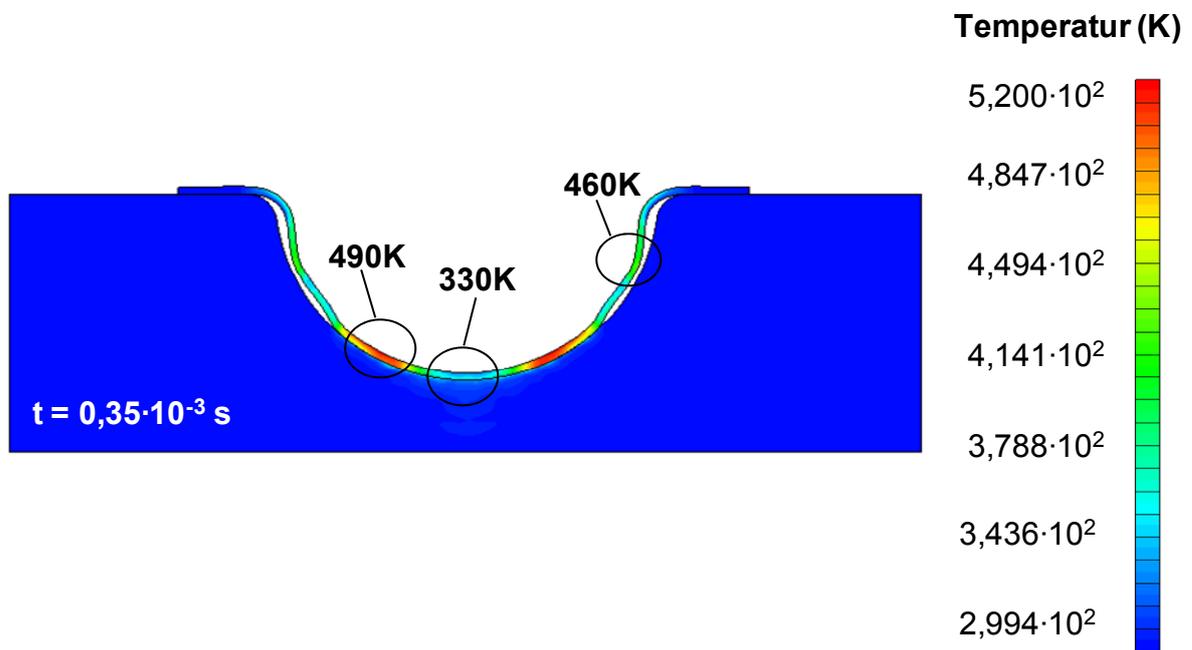


Bild 71: Thermische Effekte beim Zusammenstoß zwischen Blech und Matrize

Die Wärmeübertragung im Werkzeug (Stahl) erfolgt nach dem Zusammenstoß des Blechs mit der Matrize in einer ziemlich kurzen Zeit (ca. 20-100 ms) und führt zum schnellen Abkühlen des Blechs (Bild 72).

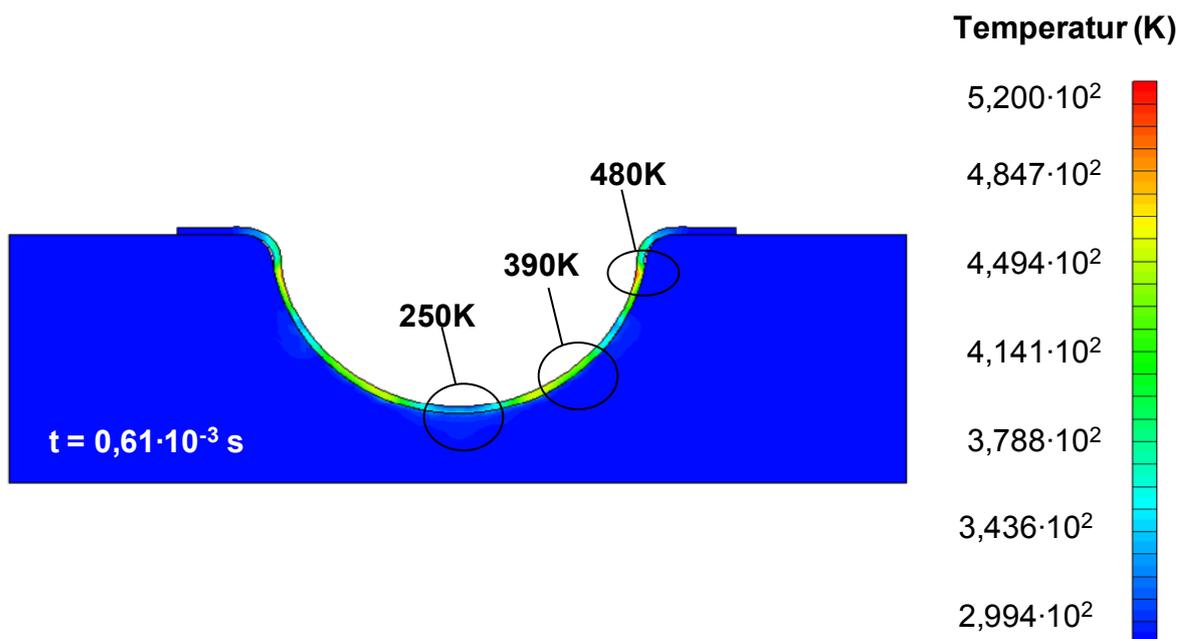


Bild 72: Abkühlung des Blechs

Die lokale Erwärmung des Al-Blechs ist schon bei einer Aufstoßgeschwindigkeit von ca. $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bedeutend und ist für Materialien mit schlechter Wärmeleitung (z.B. Edelstahl oder Titan) noch größer. Bei höheren Geschwindigkeiten können die thermischen Effekte sich auf das Umformverhalten des Blechs auswirken und müssen bei der Prozessauslegung berücksichtigt werden. Wegen der bedeutenden thermischen Effekte wurden die HGU als Alternative zur konventionellen Warmumformung für komplizierte Bauteile aus schwer umformbarer Materialien vorgesehen [53].

Weitere thermische Effekte entstehen im Blechmaterial und Werkzeug durch die Komprimierung der in der Matrizenkaverne eingeschlossenen Luft. Wurde das Werkzeug nicht evakuiert oder entstehen im Werkzeug nicht ausreichend Kanäle für die Entweichung von Luftresten, wurde die abgeschlossene Luft durch das verformte Blech komprimiert. Die dabei entstehende Wärme ist sehr groß und kann die thermischen Schädigungen bis zum Einschmelzen des Blechs oder sogar der Matrize verursachen (Bild 73).

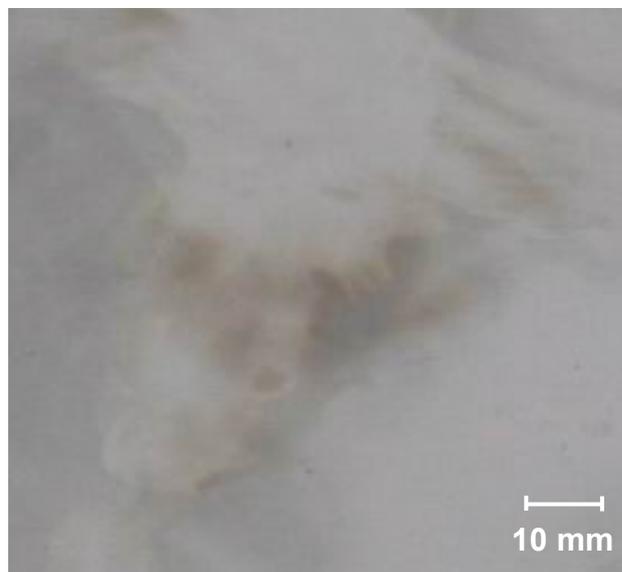


Bild 73: Thermische Schädigungen durch komprimierte Luftreste

Die weiteren Ergebnisse eigener Untersuchungen zu den thermischen Effekten beim HIU sind auch in eigenen Veröffentlichungen [49, 55,56] detailliert dargestellt.

7.5 Einfluss der Massenkräfte

Das Blech wurde bei den dynamischen Umformprozessen wie HIU innerhalb von ca. 0,1 ms vom Stylzustand bis zur Geschwindigkeit ca. $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ beschleunigt. Während des Verformungsprozess selbst änderten sich die globale Geschwindigkeit des Blechs sowie lokalen Geschwindigkeiten der einzelnen verformten Blechbereiche ständig. Beim Zusammenstoß mit der Matrize wurde das Blech innerhalb von einigen Mikrosekunden von der Restgeschwindigkeit ca. $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ schlagartig gebremst (siehe Bild 39). Bei solchen extremen Beschleunigungen haben die Massenkräfte im Blech einen wesentlichen Einfluss auf den Umformprozess. Da die Massenkräfte von der Werkstoffdichte sowie von der lokalen Beschleunigung des Blechs abhängig sind, ändert sich der gesamte Charakter des Verformens mit einem Werkstoffwechsel bzw. mit der Änderung der Belastungsparameter.

Die Modell-Versuche am 1,5 mm dicken Blech aus Stahl QStE340 zeigten, dass der Einfluss der Massenkräfte auf den Verlauf des Verformens sehr stark ist und unterschiedliche Zwischen- sowie Endformen des Bauteils verursacht (vergleiche Bild 74 und Bild 75).

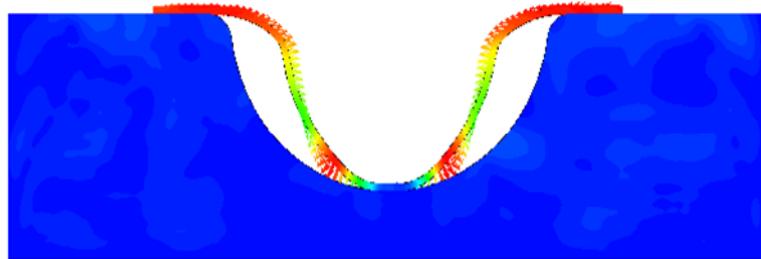


Bild 74: Verlauf des HIU- Tiefziehens bei einer Hammergeschwindigkeit von $75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

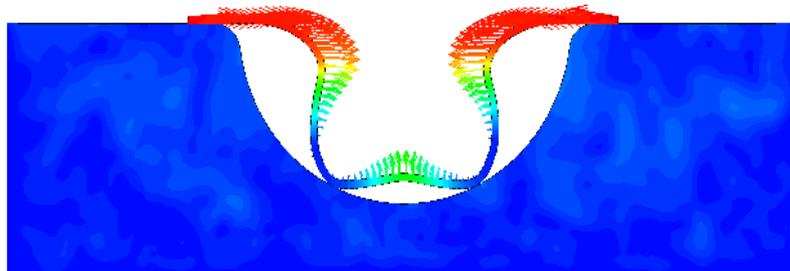


Bild 75: Verlauf des HIU- Tiefziehens bei einer Hammergeschwindigkeit von $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Besonders großen Einfluss haben die Massenkräfte in den Prozessen des Tiefziehens mit der Flanschverschiebung. Schematisch könnte der Einfluss von Massenkräften auf den Prozessverlauf beim HIU-Tiefziehen wie folgt dargestellt werden (Bild 76).

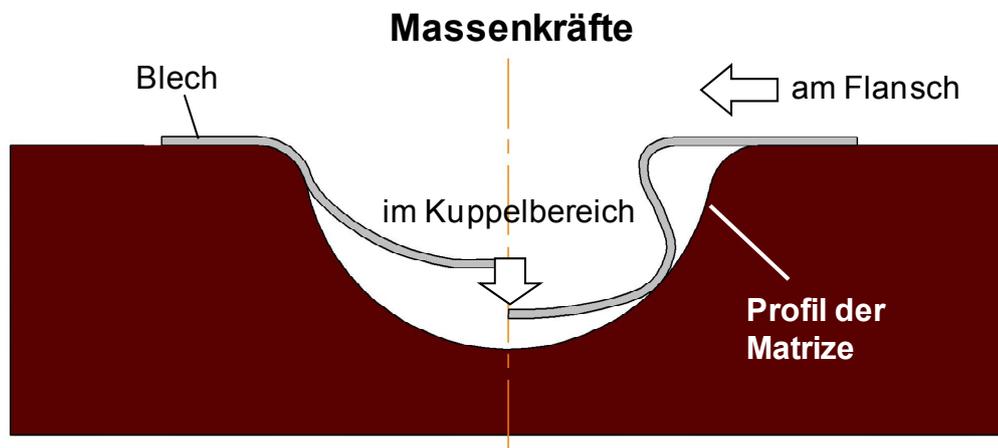


Bild 76: Schematische Darstellung des Prozessverlaufs beim Tiefziehen

Nach der Beschleunigung des Kuppelbereiches einer Ronde beschleunigt sich auch das Material im Flanschbereich in Richtung von Außen nach Innen und der Flansch bekommt einen Nachschub in der Matrizenkaverne. Die Massenkräfte unterstützen dadurch den Tiefziehprozess. Da die relative Geschwindigkeit der Blechverschiebung gegenüber dem Werkzeug sehr hoch ist, wurde bei den theoretischen Berechnungen dynamischer Reibungskoeffizienten für die geschmierten Reibungsflächen ein Blech-Werkzeug berücksichtigt.

Meistens werden bei dem HIU die flüssigen (Öle) bzw. dickflüssigen (Gel) Schmiermittel eingesetzt. Es wurde festgestellt, dass bei einer Geschwindigkeit der Flanschverschiebung ab ca. $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sich im Schmierpalt eine Art hydrodynamisches Lager bildet, was für die geringeren Reibungskräfte am Flansch sorgt. Durch geringere dynamische Reibungswerte im Vergleich zu quasistatischen Prozessen führt oft der Flanschnachschub zu dem überflüssigen Material in der Matrizenkaverne und zur Bildung von Falten (Bild 77). Fehler dieser Art sind ausschließlich für die dynamischen Prozesse typisch.

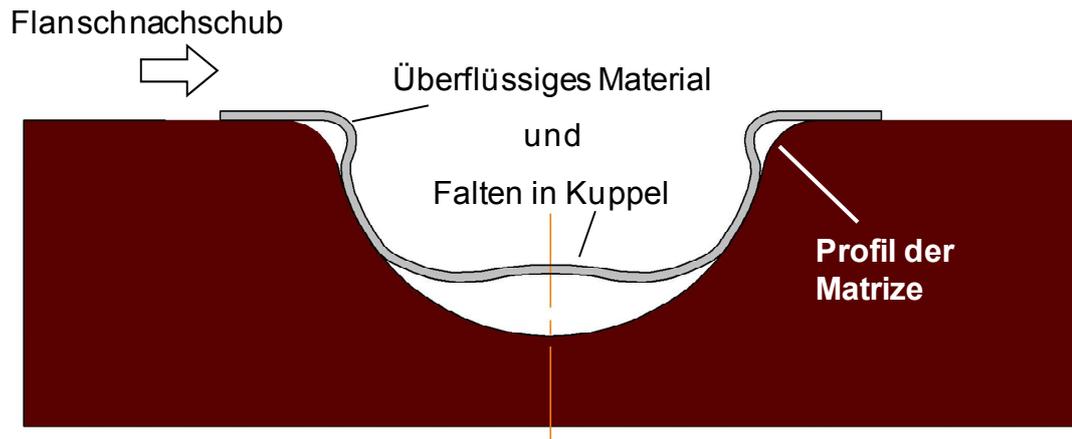


Bild 77: Faltenbildung am Ziehradius und in der Kuppel beim HIU-Tiefziehen einer Ronde

Es wurde festgestellt, dass die Drucksteigerungsgradienten des Belastungsimpulses einen wesentlichen Einfluss auf die Beschleunigung und den Nachschub des Flansches haben. Wurden die Belastungscharakteristiken zu steil, beschleunigt sich der Flansch mit einer Zeitverzögerung gegenüber dem Kuppelbereich des Werkstückes. Dadurch lokalisieren sich die Wirkkräfte und die Materialverformung an den Ziehradien, was Einschnürungen und Brüche in diesem Bereich verursachen kann (Bild 78).

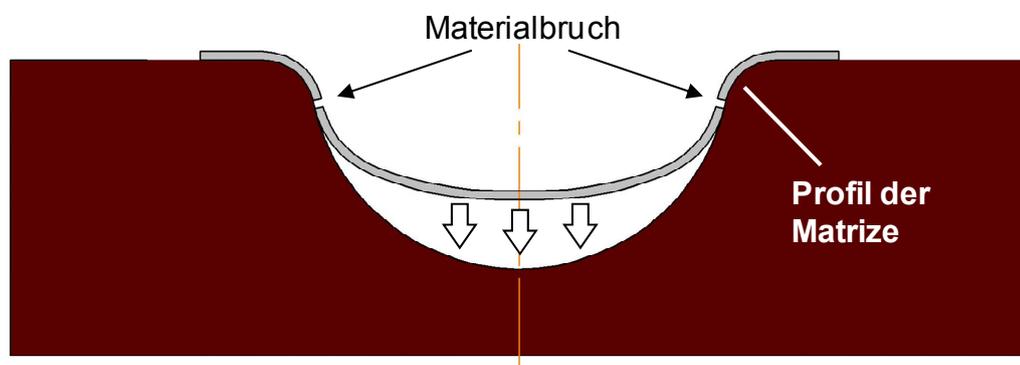


Bild 78: Materialbruch bei zu hoher Geschwindigkeit

Die mit dem FE-Modell eigener Entwicklung berechneten Effekte des Einflusses von Massenkräften und den dadurch verursachten Änderungen im Verlauf des Umformprozesses wurden auch experimentell bei der Umformung von 1,5 mm dickem Blech aus Stahl QStE340 für eine Hammergeschwindigkeit von $52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ qualitativ und quantitativ bestätigt. Dabei wurden die Grenzen der stabilen Verformung bestimmt. Ein typischer Versagensfall beim Übertreten der Verfahrensgrenzen zeigt Bild 79.



Bild 79: Materialnachschub und Faltenbildung beim HIU-Tiefziehen

Die Effekte des dynamischen Flanschnachschubs können zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen genutzt werden. Für einen praktischen Einsatz sind weitere detaillierte Untersuchungen dieser Effekte erforderlich.

8. Untersuchungen zu den HIU-Anlagen

Die durchgeführten Verfahrensuntersuchungen haben die Machbarkeit des Umformens von Blechen nach dem HIU-Prinzip nachgewiesen. Basierend auf den Ergebnissen der Prozessuntersuchungen wurde eine HIU-Anlage konzipiert und zunächst an FE-Modellen getestet. Das Konzept wurde für einzelne Baugruppen und -elemente (z.B. Hammer, Ventile usw.) in Varianten geprüft, danach für die Pilotanlage gebaut und unter realen Bedingungen getestet.

8.1 Untersuchung der Anlagevarianten

Durch die Nutzung der komprimierten Luft anstelle von Schießpulver bzw. Brenngasgemisch in der Hydro-Impuls-Maschine als Energiequelle wurden die für die Impulstechnik üblichen Sicherheitsprobleme beseitigt. Um die gespeicherte pneumatische Energie besser zu übertragen und mehr Energie für die Blechverformung zu bekommen sowie dadurch den Wirkungsgrad der Maschine wesentlich zu erhöhen, wird eine frei bewegliche Zwischenmasse (Hammer) getrieben. Die bessere Verteilung der beim Zusammenstoß

entstehenden Kräfte wird durch ein flüssiges bzw. elastisches Wirkmedium realisiert. Die HIU-Versuchsanlage (Bild 80) funktioniert wie folgt:

Im Ausgangszustand ist die Hammer (10) in der Schießposition und der Druckbehälter (1) entsprechend dem eingestellten Soll-Druck gefüllt. Im Anschluss daran wird die komprimierte Luft in das Beschleunigungsrohr (3) eingeleitet, die den Hammer (10) schlagartig bewegt und ihm am Ende eine hohe Geschwindigkeit verleiht.

Die HIU-Anlage wurde zunächst in einer horizontalen Variante (Bild 80 oben) entwickelt. Die horizontale Maschinenaufbereitung ist wegen der Realisierung längerer Beschleunigungsstrecken vorteilhaft, zeigt aber Probleme bei der Aufnahme der überflüssigen Stoßenergie. Die weiterentwickelte Anlagevariante mit Umlenkung der Strömungsrichtung des Wirkmediums (Bild 80 unten) erweitert die Möglichkeiten der Werkzeugpositionierung. Dadurch bestand eine Möglichkeit der indirekten Impulsübertragung über den Zwischenkolben auf das Werkstück sowie von stabilen Einspann-Ausgangsbedingungen für die Blechproben.

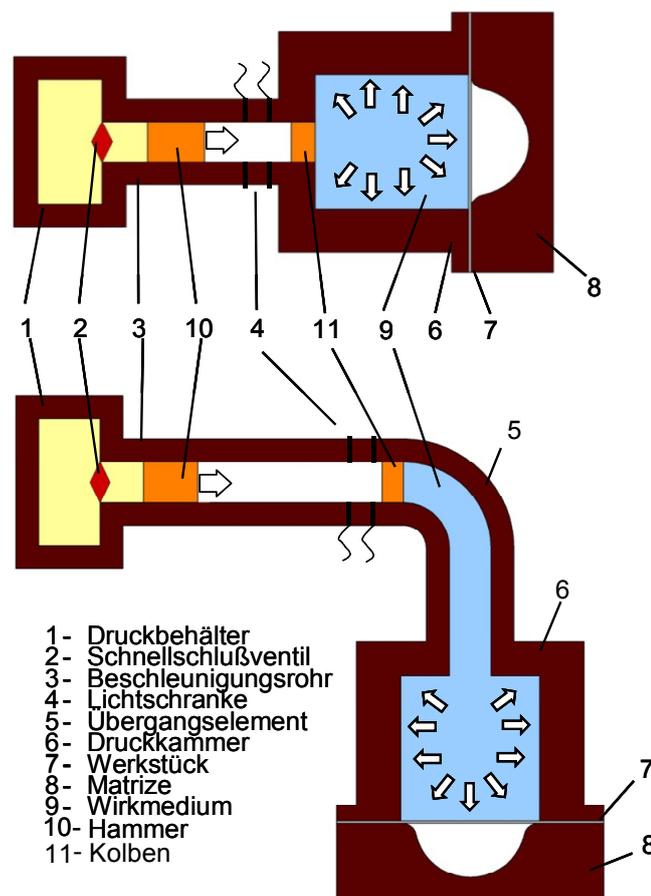


Bild 80: Konstruktive Varianten der HIU-Anlage

Nach den detaillierten Untersuchungen zur Stabilität des Umformprozesses kann geschlussfolgert werden, dass die Prozessparameter bei der waagerechten Anordnung des Werkzeugs bis zur Hammergeschwindigkeit ca. $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sicher einzustellen sind. Bei Geschwindigkeiten oberhalb von $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ist die stabile Prozessführung aufgrund der Reibung zwischen Hammer und Beschleunigungsrohr sowie hoher Energieverluste bei der Umlenkung des Wirkmediums erschwert.

Diese nachteiligen Einflüsse führten bei erhöhten Hammergeschwindigkeiten zu schwankenden Prozessparametern und Umformergebnissen. Aus diesem Grunde wurde eine weiterentwickelte Anlagenvariante mit senkrechter Einstellung des Beschleunigungsrohres konzipiert (Bild 81). Mit dieser Anordnung lassen sich sowohl eine exaktere Positionierung als auch eine relativ reibungsarme Beschleunigung des Hammers realisieren.

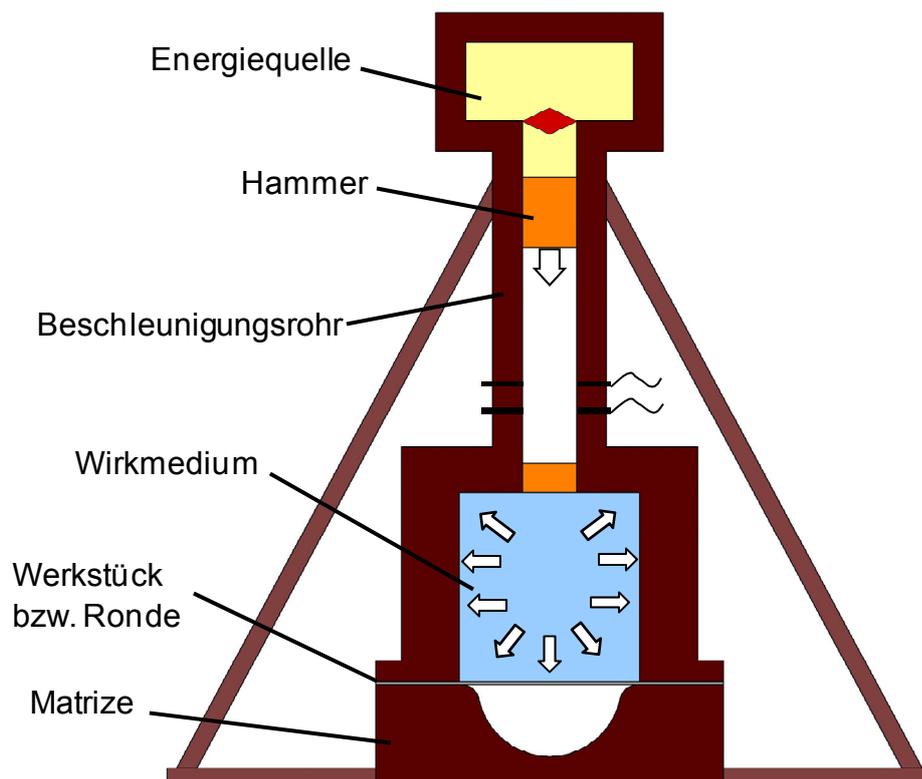


Bild 81: Konzept einer HIU-Anlage mit senkrecht stehendem Beschleunigungsrohr

Während der Beschleunigung des Hammers wird der Lufteinlass nach Einströmen einer vorher eingestellten Luftmenge wieder geschlossen, so dass die Luft nach Schließen des

Ventils im Beschleunigungsrohr expandiert und mit der Luftmenge eine stufenlose Regulierung der Beschleunigung möglich ist. Die im Beschleunigungsrohr befindliche Luftmenge zum Ende der Hammerbewegung, die immer noch unter hohem Druck steht, kann durch ein Entlüftungs- bzw. Vakuumsystem (Bild 82) entweichen.

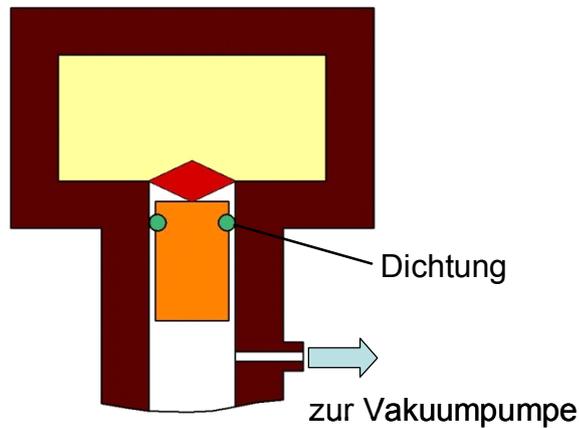


Bild 82: Entlüftung bzw. Evakuierung des Beschleunigungsrohrs

Für die experimentellen sowie praktischen industriellen Untersuchungen des Hydro-Impuls-Umformens wurde im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens SPP 1098 eine pneumatische HIU-Anlage (Bild 83) entwickelt und gebaut.

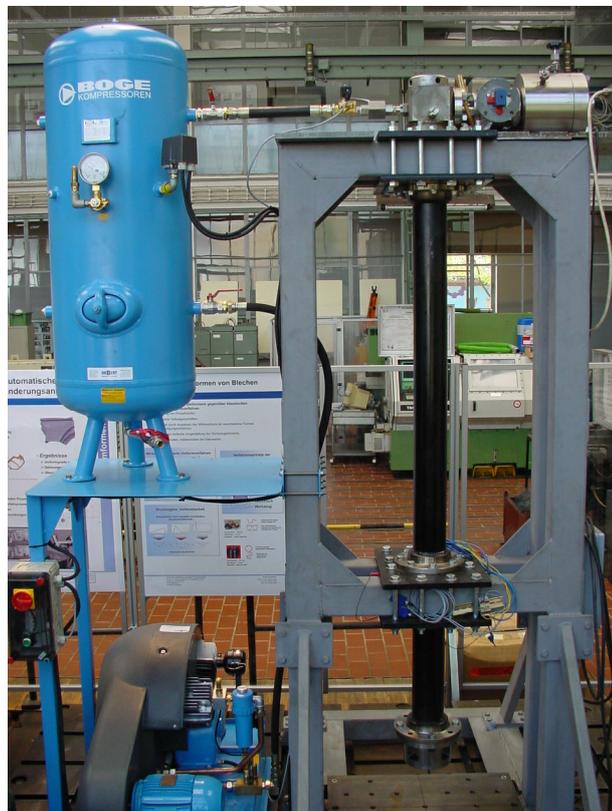


Bild 83: Ansicht der HIU-Anlage

Der Arbeitsraum der Anlage ist so gestaltet, dass darin die Prüfvorrichtungen (Bild 65) für den dynamischen Zugversuch sowie die Versuchswerkzeuge (Bild 84) auf der Montageplatte mit entsprechenden Führungsschienen angeordnet und mit der erforderlichen Messtechnik zur Erfassung der Geschwindigkeit, des Drucks usw. ausgerüstet werden können.



Bild 84: Montage eines Versuchswerkzeugs

Durch die zahlreichen experimentellen Tests wurde die Funktionalität der HIU-Versuchsanlage nachgewiesen. Das Prinzip dieser für die Blechumformung gebauten Maschine hat sich als praktikabel erwiesen und hat gezeigt, dass die einfache und variable Konstruktion zuverlässig ist.

9. Untersuchungen zur HIU-Werkzeugtechnik

In den werkzeugtechnischen Untersuchungen, insbesondere zu den dynamischen Effekten beim HIU, müssen möglichst alle Randbedingungen des Umformprozesses berücksichtigt werden. Speziell im Bereich der Abdichtung von Druckkammer und Blecheinzug haben die Drucksteigerungsgradienten sowie die Massenkräfte einen signifikanten Einfluss auf den Prozessverlauf. Diese Prozessgrößen wurden mit Hilfe von Umformsimulationen erfasst und in die Untersuchungen zur Werkzeugtechnik einbezogen.

9.1 Werkzeugkomponenten

Ein weiterer Aspekt bei der Entwicklung neuartiger Blechumformverfahren ist die Konstruktion und Bereitstellung prozesssicherer Werkzeugsysteme. Dazu müssen die einzelnen Werkzeugkomponenten hohe Anforderungen hinsichtlich Funktion, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erfüllen.

Bei dem wirkmedienbasierten Hydro-Impuls-Blechumformverfahren können die Werkzeugkomponenten in drei Gruppen unterteilt werden:

- formgebende,
- kraftübertragende und
- prozessrelevante.

Die formgebenden Werkzeugkomponenten umfassen den Bereich der Hohlformwerkzeuge. Diese enthalten die Werkstückform teilweise bzw. ganz als Positiv- oder Negativform [13]. Beim HIU gehören zu dieser Gruppe die Werkzeugelemente Matrize bzw. Stempel. Diese sollen eine im Vergleich zum Blech viel höhere dynamische Steifigkeit aufweisen, obwohl durch die Druckwellenbeanspruchung sowie den Zusammenstoß mit dem Blech eine vernachlässigbare elastische Verformung der formgebenden Werkzeugkomponenten zu erwarten ist.

Bei den kraftübertragenden Werkzeugkomponenten steht die Kraftwirkung auf das Blech im Vordergrund. Die Formübertragung ist dabei untergeordnet. Außer Niederhaltern gehört zu dieser Gruppe noch die Druckkammer und der Zwischenkolben.

Unter dem Begriff der prozessrelevanten Werkzeugkomponenten ordnen sich beim HIU alle Werkzeugelemente und -systeme ein, die die Besonderheiten des HIU-Verfahrens berücksichtigen und eine sichere Durchführung des Prozesses unterstützen. Das sind z.B. Dichtsysteme für die Druckkammer sowie Entlüftungs- und Evakuierungssysteme für die Matrize usw.

9.2 FE-Untersuchungen der HIU-Werkzeuge

Die werkzeugtechnischen Untersuchungen erfolgen durch parallele Simulationsberechnungen, mit denen das Betriebsverhalten der Werkzeugelemente einerseits und der Umformprozess andererseits analysiert werden.

Mit den FE-Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Werkzeugelemente durch die Druckwellen intensiv belastet werden (Bild 85). Die Reflexion und Überlagerung der Druckwellen führt zur Bildung lokaler Bereiche, wo die Werte von R_{p02} sogar R_m kurzfristig überschritten werden. Diese Bereiche unterscheiden sich deutlich von den kritischen Bereichen der quasistatisch belasteten Werkzeuge und sind spezifisch für den HIU-Prozess.

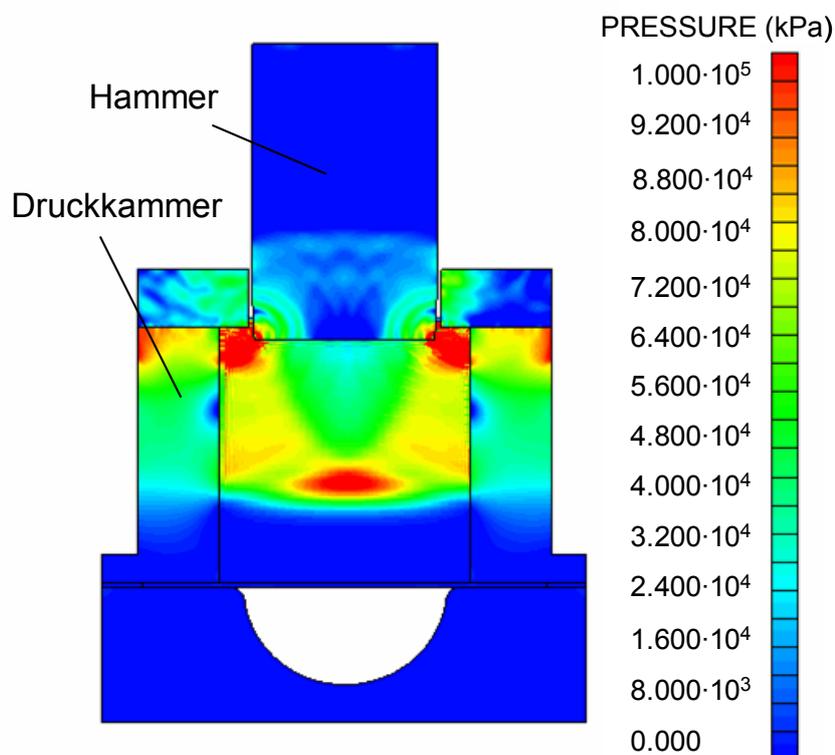


Bild 85: Druckwellen in den Werkzeugelementen

Eine weitere Besonderheit des dynamischen Prozessverlaufs besteht darin, dass das Blech mit einer hohen Geschwindigkeit auf die Matrize aufstößt (Bild 86).

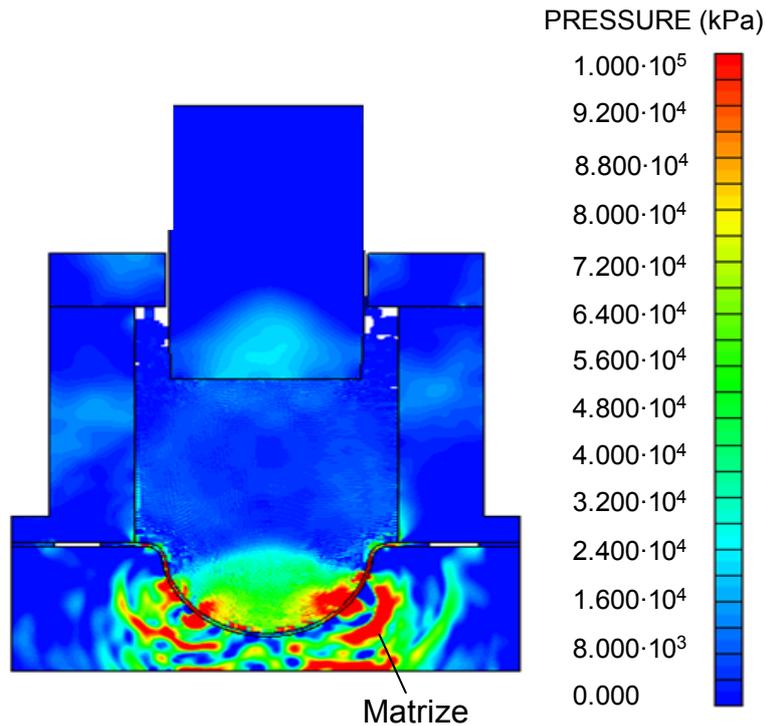


Bild 86: Zusammenstoß des Blechs mit der Matrize

Dadurch können in der Matrize die lokalen Bereiche mit extrem hohen Spannungen entstehen, die zum Werkzeugversagen führen können (Bild 87).



Bild 87: Zerrissene Werkzeulemente

Bei der Auslegung von HIU-Werkzeugen sollten für die Werkzeulemente die dynamischen FEM-Festigkeitsberechnungen vorgenommen werden.

Einen weiteren Schwerpunkt der Werkzeuguntersuchungen stellt die Dichtheit der Druckkammer dar (Bild 88).

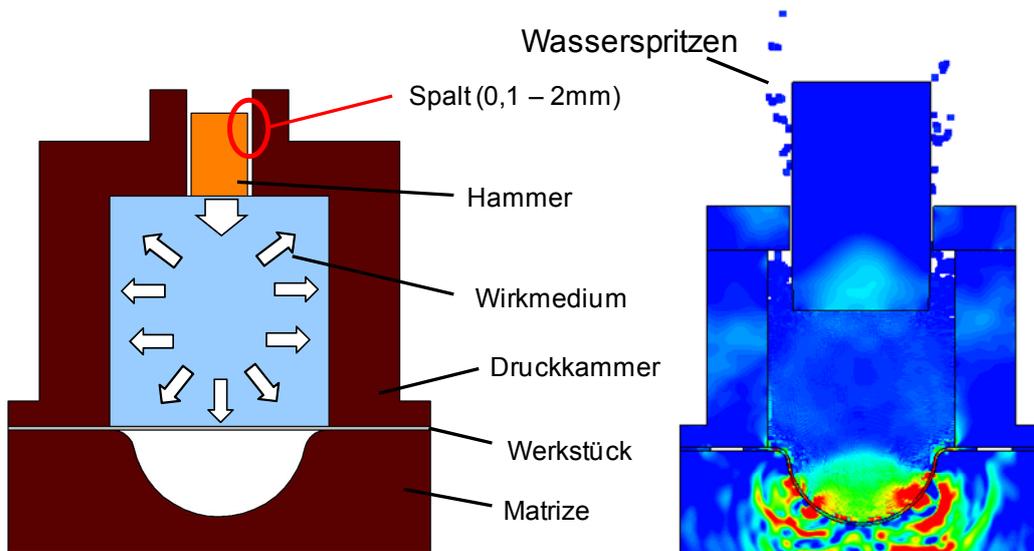


Bild 88: Undichtheiten in der Druckkammer

Ein ungewolltes Austreten des Wirkmediums aus der Druckkammer und dem damit verbundenen Druckverlust während des HIU-Prozesses wird durch den Einsatz eines geeigneten Dichtsystems verhindert. Eine Auslegung hinsichtlich Form und Anordnung des Spaltes in Abhängigkeit von der Hammerschwindigkeit ist Ziel der werkzeugtechnischen Untersuchungen. Während der HIU soll das Dichtsystem den Druckraum zur äußeren Umgebung nur für die Zeit des Blechumformens abdichten.

Der Druckaufbau in der Druckkammer ist vom Dichtspalt und von der Geschwindigkeit des Hammers abhängig. Eine Vergrößerung des Spaltes von 0,2 auf 2,0 mm verursachte fast eine zweifache Druck- und Impulssenkung (Bild 89).

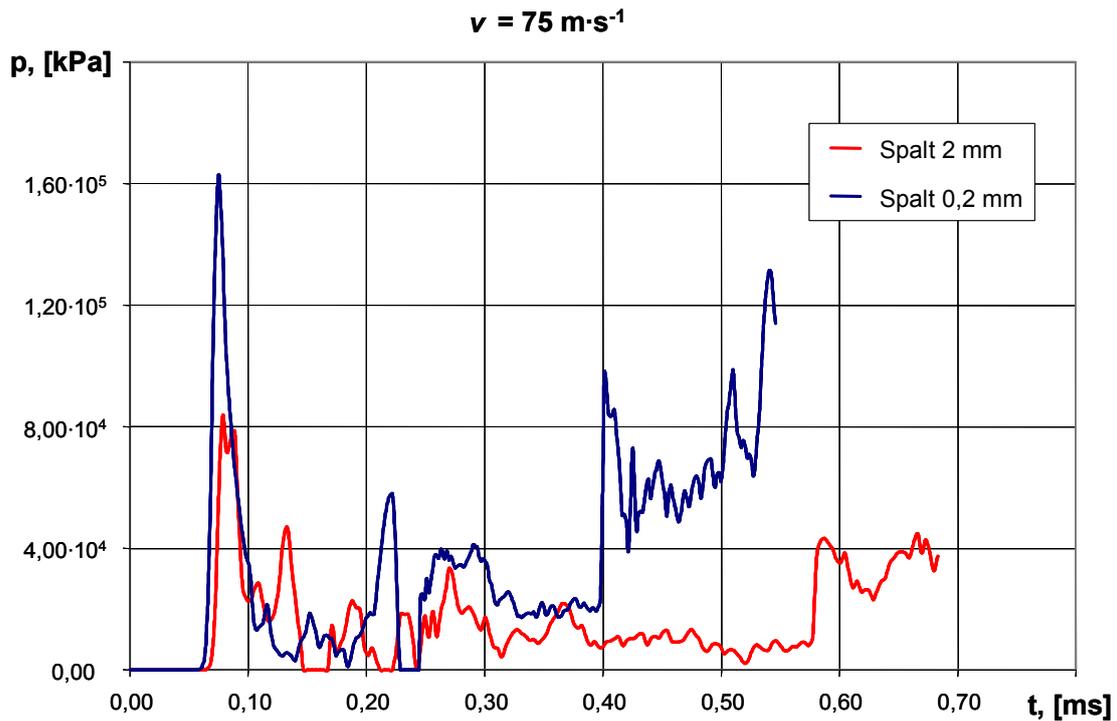


Bild 89: Einfluss der Undichtheiten in der Druckkammer

Wegen der hohen Geschwindigkeit der Verformung beim HIU wurde die Luft unter dem Blech stark komprimiert. Dies kann Beulen und andere Geometriefehler an den Bauteilen verursachen. Deshalb wird in HIU-Werkzeugen ein System zum Entlüften bzw. Evakuieren der Matrizenkaverne benötigt (Bild 90).

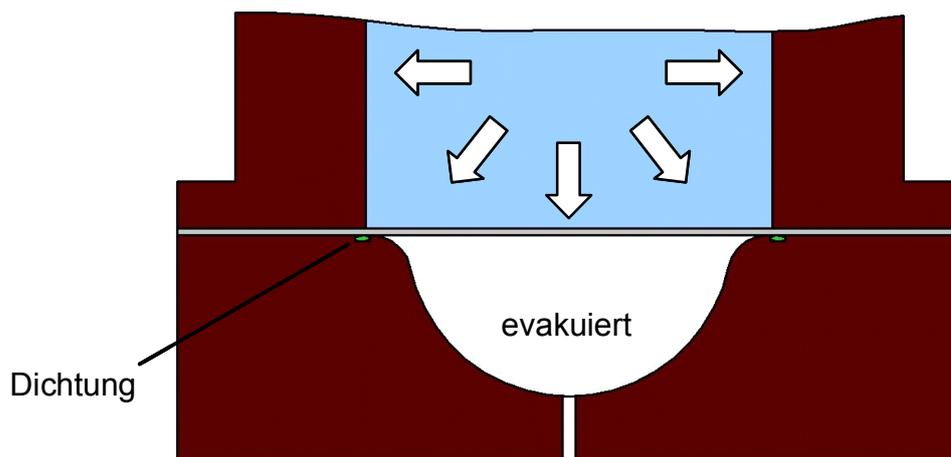


Bild 90: Vakuumsystem des HIU-Werkzeuges

Um die Ergebnisse der FE-Berechnungen verifizieren zu können, wurden kontinuierliche Vergleiche zu den Experimenten durchgeführt. Das Zusammenwirken von FE-Simulation und Experiment ermöglicht eine Festlegung der Konstruktion der Versuchswerkzeuge.

9.3 Konstruktion der HIU-Versuchswerkzeuge

Für die experimentellen Untersuchungen der HIU-Prozesse wurde ein universales modular gebautes Werkzeugsystem konstruiert und gefertigt. Beim Konzipieren des Versuchswerkzeugs wurde davon ausgegangen, dass es die Funktionalität sowie eine schnelle Installation in die Anlage, schnelles Einbringen des Werkstücks und Entnahme des Fertigteils, Kompaktheit und leichte Handhabung gewährleisten soll. Dieses Versuchswerkzeug (Bild 91) ist für die Messungen der Druckverteilung sowie für die umformtechnischen Experimente geeignet. Der austauschbare Matrizenblock, die Druckkammer und der Kolben des Werkzeugs sind für die Messungen von Impulscharakteristiken mit den Hochdrucksensoren Typ 6215 der Firma KISTLER vorgesehen.

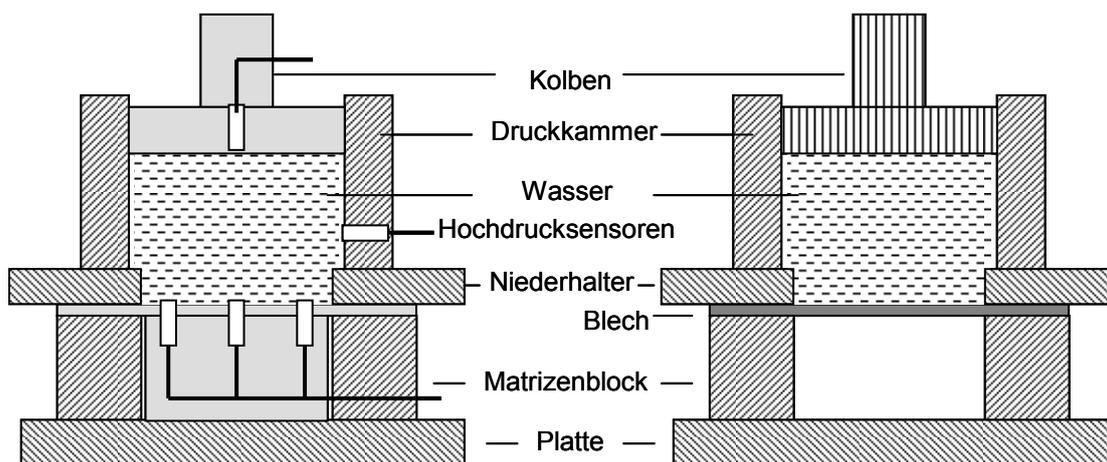


Bild 91: Konstruktion des Werkzeugsystems

Für die umformtechnischen Untersuchungen wurden im Werkzeugsystem die Matrizen für die Verformung eines zylindrischen Napfs oder eines elliptischen Bodens (Bild 92) eingesetzt. Die Versuchsmatrizen sind aus Stahl 40Cr gefertigt, erhalten eine zylindrisch/sphärische Innenkontur mit einem Radius von 50 mm und einem Ziehradius von 6 mm. Der Korrosionsschutz der Matrizen wird durch Phosphatieren der in Kontakt mit Wasser kommenden Flächen gewährleistet.



Bild 92: Matrizen mit einer halbsphärischen und zylindrischen Gravur

Für die werkstofftechnischen Untersuchungen wurden im gleichen Werkzeugsystem Matrizen mit variabler Elliptizität montiert (Bild 93). Dadurch wurde eine unterschiedliche Mehrachsigkeit des Spannung-Dehnung-Zustandes des Versuchsmaterials unter quasistatischen sowie unter dynamischen Bedingungen realisiert.



Bild 93: Austauschbare elliptische Matrizen für die werkstofftechnischen Versuche

Beim Schließen des Werkzeugsystems setzt der Niederhalter auf der Ronde/Messplatte und der Matrize auf. Die Druckkammer wird mit Wasser gefüllt und durch einen Kolben geschlossen. Der Druckimpuls im Wirkmedium wird durch den Zusammenstoß eines beschleunigten Hammers mit dem Kolben des Werkzeugs erzeugt. Dadurch wird das eigentliche Tiefziehen des Blechs realisiert. Für die Installation des Versuchswerkzeugs in der Arbeitskammer der HIU-Anlage, der Verbesserung der Stabilität und Dichtheit des Werkzeugs sind Montage- und Abdichtungselemente, Führungen, Platte und Verschlussdeckel vorgesehen (Bild 94).



Bild 94: Montiertes Werkzeugsystem

Die Untersuchungen haben die Funktionalität des Versuchswerkzeugsystems sowie die Material- und Geometrieauswahl bestätigt. Aus den Untersuchungen unterschiedlicher Werkzeuggeometrien wurde deutlich, dass die Auswahl von Radien und Kanten bei dynamischen Verfahren eine wesentlich größere Rolle als bei quasistatischen spielen. Bei einer falsch ausgewählten Geometrie der Werkzeugelemente kann die Behinderung des Werkstoffflusses entstehen, was einen Stabilitätsverlust und Faltenbildung am Flansch sowie im Kuppelbereich verursacht. Andererseits kann ein korrekt gesteuerter Materialnachschub den Tiefziehprozess unterstützen und daher werden größere Tiefziehverhältnisse als bei konventionellen Verfahren erreicht.

Die durchgeführten Messungen an Werkzeugelementen zeigten, dass die Festigkeitsberechnungen korrekt sind. Die erprobten geometrischen Verhältnisse können für eine weitere Nutzung für industrielle Werkzeuge empfohlen werden.

10. Praktische Erprobung der HIU

Eine Bewertung der Vorteile und Besonderheiten, die beim Einsatz der HIU auftreten, wurde an geeigneten Bauteiltypen durchgeführt. Die Auswahl umfasst einfache Geometrien sowie Teile mit komplexen Haupt- und Nebenformelementen. Um die Einsatzmöglichkeit des Verfahrens für den industriellen Bereich darzustellen, wurden die realen Teile auch in die FE-Untersuchungen einbezogen.

Aus der Übertragung charakteristischer Formelemente von industriellen Bauteilen entstand das Referenzteil „Wärmetauscher“. Der „Wärmetauscher“ ist einem realen Bauteil nachempfunden. Es weist eine flache Hauptform mit eingearbeiteten Formsicken auf. Die Größenverhältnisse eines realen Bauteils wurden durch die Skalierung der Radien im Modellteil „Wärmetauscher“ berücksichtigt. Der Ziehradius beträgt 0,5 mm und die kleinsten Radien der Geometrie betragen 0,1 mm. Das Werkzeug (Bild 95) besteht aus Matrize, Druckkammer und Niederhalter. Als Wirkmedium wurde das kombinierte Wirkmedium Wasser + Gummi eingesetzt.

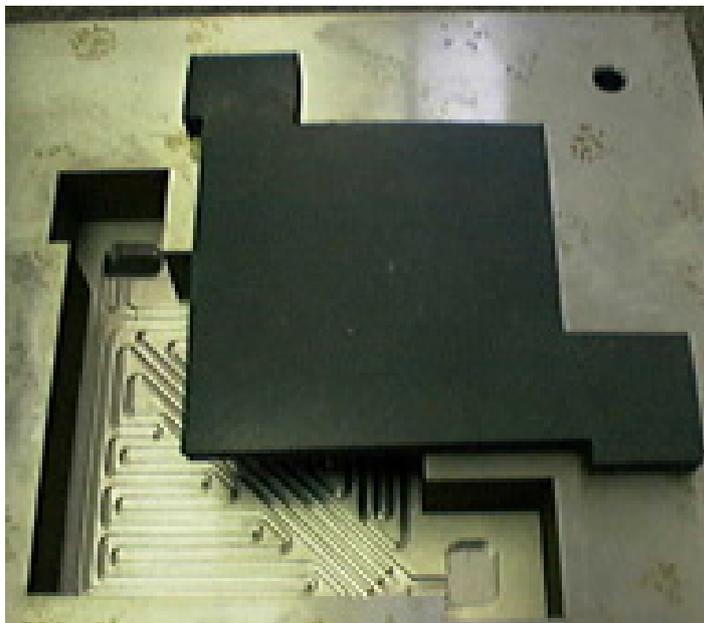


Bild 95: HIU-Werkzeug für das Referenzteil „Wärmetauscher“

Die Entwicklung des Werkzeugsystems erfolgte in einer iterativen Schleife, wobei eine Machbarkeitsprüfung mit einer FE-Simulation integriert wurde. Aus den Umformsimulationen wurden Aussagen über die erforderlichen Schließkräfte, den Materialeinzug und lokale Blechdickenänderungen getroffen. Da die Fertigung des Referenzbauteils „Wärmetauscher“ auf der vorhandenen HIU-Versuchsanlage erfolgen sollte, wurden die äußeren Abmessungen des Werkzeuges auf 300 mm bei einer maximalen Höhe von 50 mm festgelegt.

Die zwei Fertigungsverfahren HBU und HIU werden mit dem gleichen Werkzeugsystem realisiert um die beiden Verfahren miteinander zu vergleichen und den Einfluss der Prozessparameter auf die Bauteileigenschaften beurteilen zu können. Hierbei wird ein möglicher Geometrieinfluss ausgeschlossen.

Beim Einsatz des quasistatischen wirkmedienbasierten Verfahrens HBU entstanden am Bauteil zahlreiche Risse an der Ziehradien (Bild 96). Für das 0,19 mm dicke Blech aus dem Material S235JR wurde eine maximale Dehnung ca. 33% erreicht.

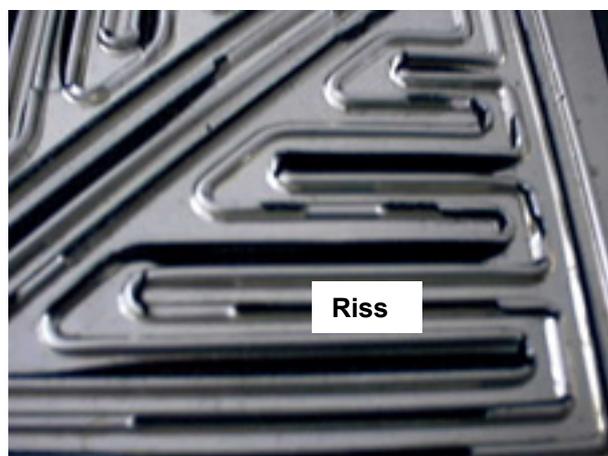


Bild 96: Ergebnis der quasistatischen Verformung

Es wurden dynamische HIU-Versuche mit Impulsen unterschiedlicher Intensität durchgeführt. Obwohl eine höhere Dehnrate bis zu ca. 40% für das gleiche Material erreicht wurde, sind unter der Nutzung von „scharfen“ Impulsen mit hohen Druckgradienten die Risse in Zentralbereich des Bauteils entstanden (Bild 97).

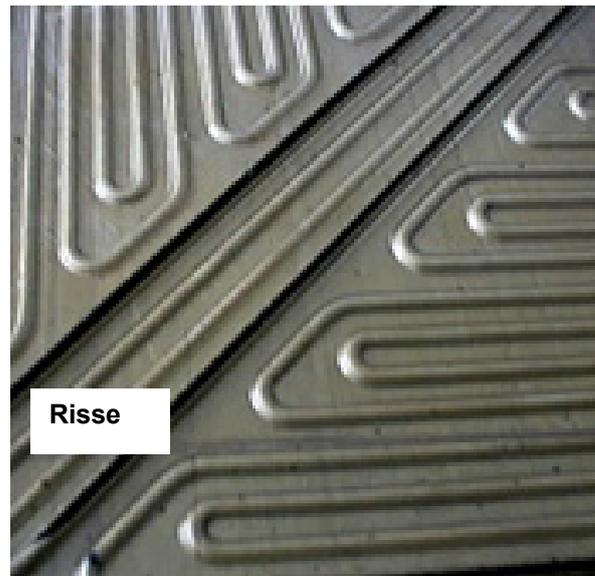


Bild 97: Verformungsergebnis beim HIU mit „scharfen“ Impulsen

Die Optimierung der Prozessparameter durch die Nutzung der Impulse mit geringeren Drucksteigerungsgradienten beim HIU sowie eine größere Gesamtdauer der Belastung hat die fehlerfreie Fertigung des Versuchsteils ermöglicht (Bild 98).

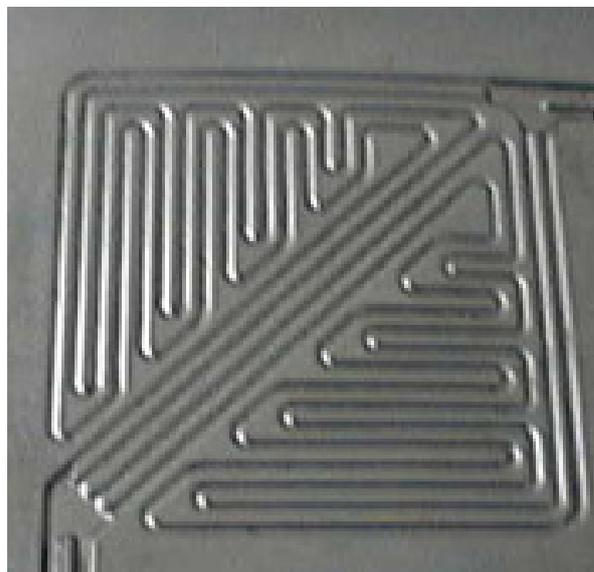


Bild 98: Verformungsergebnis unter der Nutzung optimierter Impulsbelastung

Die gefertigten Bauteile dienen dem direkten Vergleich zwischen experimentellen Untersuchungen und den Simulationen und haben eine gute bzw. sehr gute

Abbildungsqualität der Realprozesse mit den entwickelten FE-Modellen nachgewiesen. Die Praxistauglichkeit wurde an den Ergebnissen des Bauteils „Wärmetauscher“ aufgezeigt.

Basierend auf dem Ergebnis der praktischen Erprobung und Optimierung der HIU-Technologie wurde ein Realbauteil „Wärmetauscher“ aus dem Material „HILAN“ (St4 LG HG2E) gefertigt (Bild 99). Zwischen dem Versuchsbauteil „Wärmetauscher“ und Realbauteil ergibt sich ein Flächenverhältnis von ca. 1:1,32.

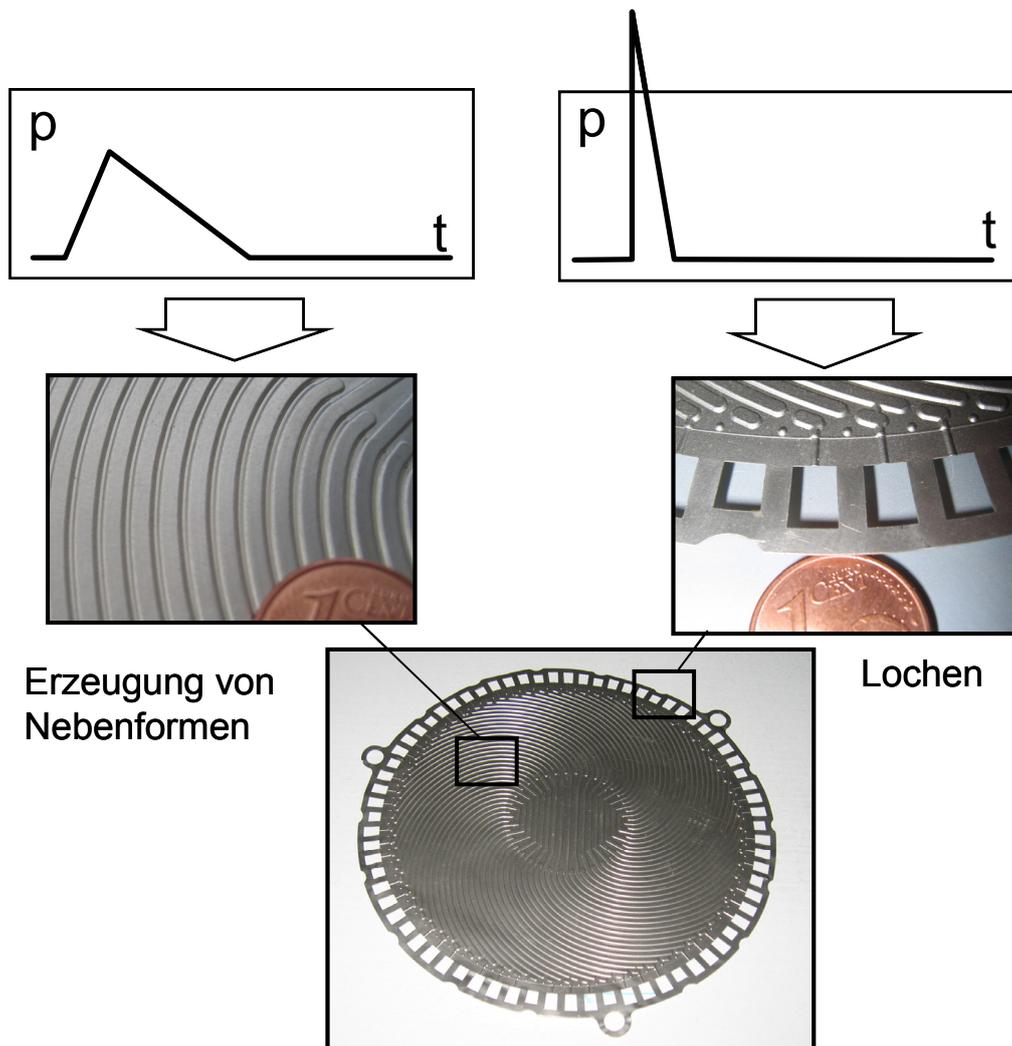


Bild 99: Realbauteil „Wärmetauscher“ aus dem Material HILAN

Um das HIU-Verfahren nicht nur für flache Geometrien sondern auch für Bauteile mit geschlossenen Konturen zu testen, wurde ein reales rohrförmiges Bauteil „Kugelgehäuse“ ausgewählt (Bild 100).

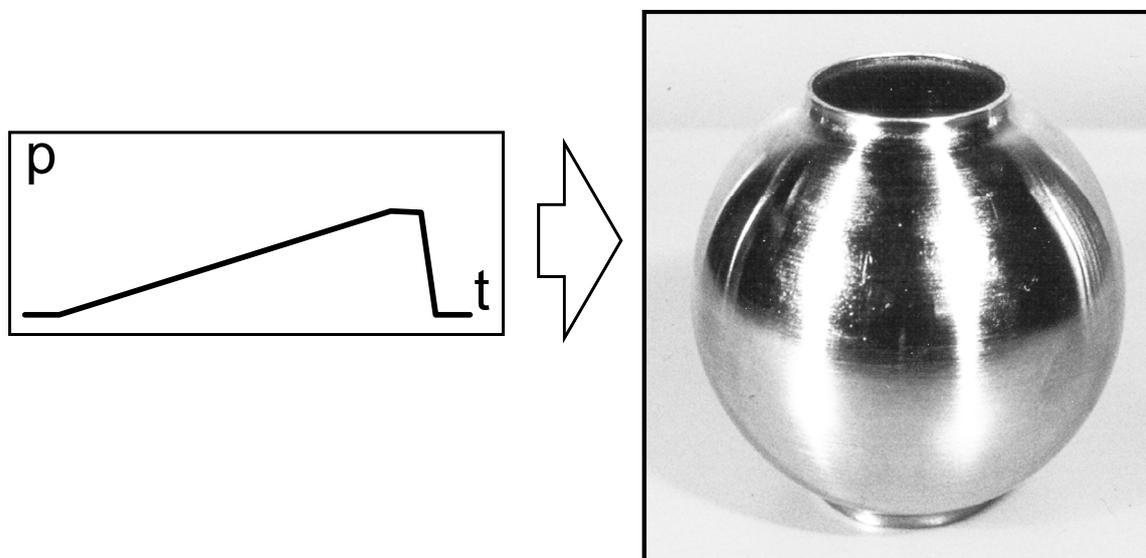


Bild 100: Realbauteil „Kugelgehäuse“

Das Kugelgehäuse aus Edelstahl 1.4301 hat einen Rohrdurchmesser von 84 mm, eine Wanddicke von 2,0 mm und wurde industriell in mehreren Stufen mit axialem Materialnachschiebung durch konventionelles quasistatisches Rohraufweiten gefertigt. Für das Bauteil „Kugelgehäuse“ wurde zunächst eine FE-Simulation durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Fertigung des Bauteils in einer Umformstufe möglich ist. Dafür ist aber ein möglichst intensiver Materialnachschiebung an den Rohrseiten erforderlich. Am Modell wurden die Prozessparameter so ausgewählt, dass der Materialnachschiebung durch den Einfluss von Massenkräften bis zu 34 mm je Seite betrug. Auf der Basis der durchgeführten Simulation wird ein Werkzeug konstruiert und gefertigt. Das Werkzeug bestand aus einer geteilten Matrize, einen Spannring, einer Übergang- und einer Druckkammer. Als Wirkmedium wurde Wasser eingesetzt. Die Versuche mit dem Bauteil „Kugelgehäuse“ haben die Ergebnisse der FE-Modellierung bestätigt. Die gefertigten Bauteile weisen eine relativ geringe Blechdickereduzierung, die unter 20% liegt, sowie enge Toleranzen auf, die den vorgeschriebenen Anforderungen entsprechen.

Ein weiteres reales Bauteil „Kompensator“ wurde aus geschweißtem Rohr mit einem Durchmesser von 187 mm, einer Wanddicke von 1,2 mm aus dem Werkstoff 1.4301 gefertigt (Bild 101).



Bild 101: Realbauteil „Kompensator“

Die Besonderheiten des Verformens eines dünnwandigen geschweißten Rohres im Bereich der Schweißnaht wurden zunächst am FE-Modell untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Schweißnaht eine unsymmetrische Verformung insbesondere in einem frühen Stadium des Umformprozesses verursachen kann. Das Umformvermögen und die Haltbarkeit der Schweißnaht sollten durch spezielle Wärmebehandlung nachgebessert werden. Für die Fertigung des Bauteils „Kompensator“ wurde das kombinierte Wirkmedium Wasser + Polyurethan eingesetzt. Unter Nutzung der Reflexion der Stoßwellen im Wirkmedium bestand die Möglichkeit, ein bauteilbezogenes Druckbild für die Impulsbelastung zu erzeugen und das Bauteil fehlerfrei in zwei Umformstufen zu fertigen.

11 Ergebnisse

Als Ergebnis der Untersuchungen wird eine Qualitätsbewertung des Hydro-Impuls-Umformungs-Verfahrens einschließlich der praktischen Nutzbarkeit der auftretenden Phänomene für die Blechumformung erreicht. Es werden verlässliche und wissenschaftlich begründete Angaben zur Bestimmung und Festlegung der Verfahrensparameter, zu den Verfahrensgrenzen sowie zu den erreichbaren Endteileigenschaften getroffen. Weiterhin werden Schlussfolgerungen für eine verfahrensgerechte Gestaltung der Anlage und der Werkzeuge sowie eine zweckmäßige Auswahl der Verfahrensvarianten abgeleitet.

Im Rahmen der Qualitätsuntersuchungen wurde eine geeignete Vorgehensweise zur Simulation dynamischer wirkmedienbasierter Umformverfahren vorgestellt. Für die Bereiche der virtuellen Verfahrens- und Werkzeugentwicklung erfolgte zunächst die Untersuchung zur Eignung unterschiedlicher FE-Programme, aus denen das Programm AUTODYN ausgewählt, weiterentwickelt und an die Aufgaben der Umformtechnik angepasst wurde.

Die Güte der Simulation mit unterschiedlichen Finite-Elemente-Typen und mathematischen Modellen wurde durch Vergleichsberechnungen und experimentelle Untersuchungen festgestellt. Eine gute Übereinstimmung bei entsprechender Wahl der numerischen Parameter hat die Erarbeitung von Empfehlungen für die weiteren praxisorientierten Berechnungen bezüglich der Modelle für die Bleche, Wirkmedien und Werkzeuge ermöglicht.

Erstmalig wurde für die dynamischen wirkmedienbasierten Umformverfahren eine gekoppelte Berechnung mit der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Anlageelementen (Hammer), Wirkmedien, Werkzeug und Blech durchgeführt. Mit deren Hilfe kann der Gesamtprozess HIU qualitätssicher abgebildet werden.

Die ermittelten Wirkmechanismen beim HIU zeigten einen deutlichen Unterschied zum quasistatischen sowie zu den hochdynamischen Verfahren. Die Umformung des Blechteiles erfolgt in zeitlich aufeinander folgenden Stufen, was dem Belastungscharakter entspricht. Es wurde nachgewiesen, dass durch eine gezielte Wahl der Impulsform die Verfahrensgrenzen der wirkmedienbasierten Umformung wesentlich erweitert werden können. Die Veränderung der Druckgradienten hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung von Rissen und Falten und dadurch auf die Bauteilqualität und Prozesssicherheit. Weiterhin wurde deutlich,

dass ein „weicher“ Impuls bei tieferen Werkstückgeometrien und ein „scharfer“ Impuls beim Kalibrieren bzw. Prägen von Nebenformen sinnvoll eingesetzt werden kann, da hierdurch eine gezielte Führung des Werkstoffflusses möglich wird.

Eine detaillierte Einflussstudie zeigte mögliche Prozesssteuerungen, wobei die Erweiterung der Grenzen für die wirkmedienbasierten Verfahren im Vordergrund stand. Mit Hilfe optischer Formänderungsanalysen für die geometrische Untersuchungen der Bauteilgeometrie sowie der Blechdickenverteilung konnte nachgewiesen werden, dass eine gezielte Einstellung des Formänderungszustandes in den untersuchten Bauteilen möglich ist. Mit neu entwickelten HIU-Verfahren lassen sich dabei höhere Vergleichsumformgrade erzielen, als mit dem konventionellen quasistatischen wirkmedienbasierten Umformen möglich ist. Es stellte sich dabei heraus, dass die Potentiale der Hochgeschwindigkeitsumformung hier besonders ausgeprägt sind.

Die Untersuchungen an den Werkstoffen QStE340 und A2024 zeigten, dass sich bei Verwendung dynamischer wirkmedienbasierter Verfahren ein größerer Spielraum hinsichtlich der Prozessparameter ergibt. Während beim quasistatischen Umformen die Höchstdrücke sowie der Materialnachschub durch die Dichtungsprobleme sowie durch die sehr hohen Zuhaltekräfte begrenzt sind, ergab sich insbesondere beim HIU eine relativ großes technologisches Fenster für eine versagensfreie Bauteilfertigung.

Die Erweiterung der Verfahrensgrenzen für die wirkmedienbasierten Umformverfahren konnte auch qualitativ für die Fertigung der realen Bauteile Wärmetauscher und Kugelgehäuse nachgewiesen werden. So konnte beispielsweise mit dem HIU eine größere Verformung in einer Stufe bei gleichmäßiger Formänderungsverteilung erzielt werden. Dadurch ergibt sich beim Einsatz des HIU die Möglichkeit, die umformtechnischen Grenzen konventioneller wirkmedienbasierten Verfahren zu erweitern.

Durch den Aufbau einer eigens dafür entwickelten Anlage konnten die theoretisch entwickelten Grundlagen des Hydro-Impuls-Umformens experimentell untersucht und schließlich für die Praxis realisiert werden. In umfangreichen Versuchen konnte die Machbarkeit des Verfahrens sowie die Funktionsfähigkeit der Anlage nachgewiesen werden. Das Konzept der Hochgeschwindigkeits-Versuchsanlage mit senkrecht stehendem

Beschleunigungsrohr zeigt wesentliche Vorteile bei extremen Umformparametern. Aus diesem Grunde wird für die weiteren Untersuchungen diese Anordnung favorisiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Werkzeugsystem entwickelt, mit dem die Herstellung eines Bauteils mittels konventioneller quasistatischer und neuartiger dynamischer Fertigungsverfahren möglich war. Dadurch wurde ein direkter Vergleich von unterschiedlichen Umformverfahren erreicht. Es ist dabei anzumerken, dass eine Umrüstung konventioneller IHU-Werkzeuge auf dynamische Umformung nach dem HIU-Verfahren durchaus möglich ist. Beim Einsatz der Hochdruck- und Hochgeschwindigkeits-Umformung bedarf es aber spezieller Werkzeugkomponenten.

Resultierend aus den besonderen Anforderungen an dynamische Umformprozesse und an die Werkzeugtechnik wurden dichtungstechnische Untersuchungen durchgeführt, die in gleichem Maße der Prozesssicherheit als auch Prozessstabilität dienen. Dabei ergab sich, dass durch einen definierten Spalt zwischen Hammer und Druckkammer sowie durch eine spezielle Geometrie des Hammers die Druckverluste stark minimiert werden können. Die Prozessstörungen wegen Restluft in der Matrizenkaverne können durch Evakuierung bzw. Entlüftung beseitigt werden

Mit dem Vergleich der HIU zu unterschiedlichen HBU- und HGU-Verfahrensvarianten wurden die Aussagen zur Effizienz der HIU-Realisierungsvarianten und spezifischer Vor- und Nachteile sowie Verfahrensgrenzen getroffen. Weiterhin konnten auch die Vorteile der HIU gegenüber den konventionellen Umformverfahren hinsichtlich der erzielbaren Bauteilqualität, wie z.B. verbesserte geringere Maß- und Lagetoleranzen, Rückfederung und Eigenspannungen sowie vielfältige Möglichkeiten der Prozessführung, aufgezeigt werden.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der weiter wachsenden Bedeutung des Leichtbaus nimmt die Komplexität von Blechformteilen bei gleichzeitiger Erweiterung der Werkstoffpalette und Erhöhung der Qualitätsanforderungen ständig zu. Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren zahlreiche neue Verfahren zur Herstellung von Blechformteilen entwickelt worden, die diesen Anforderungen gerecht werden sollen. Daher wurden mit der vorliegenden Arbeit die Grundlagen für das neue, an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg entwickelte, Fertigungsverfahren vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein dynamisches wirkmedienbasiertes Hydro-Impuls-Umformen (HIU) von Blechen.

Eine Tendenz der FE-Simulation auch für die konventionelle Umformtechnik wird durch die Entwicklung spezieller Simulationsmodule zum Berücksichtigen von thermischen und dynamischen Effekten deutlich. Neben dem stark gestiegenen Einsatz der Warmumformung, werden auch Simulationsmodule für den Bereich der Hochgeschwindigkeitsumformung z.B. Magnetimpulsformung und Explosivumformung notwendig, so dass weiterhin die Anzahl der aufwändigen und kostenintensiven experimentellen Arbeiten drastisch reduziert werden kann.

Durch die Integration bereits untersuchter dynamischer Effekte zur Steuerung des Werkstoffflusses in weitere innovative Technologien eröffnen sich zusätzliche Potentiale zur gezielten Einstellung von Bauteileigenschaften, insbesondere für schwer umformbare Werkstoffe. Besonders im Rahmen des HIU-Tiefziehens sind noch weitere Potentiale zur Steuerung des Werkstoffflusses durch die Nutzung von Massenkräften ersichtlich. Geeignete Verfahrenskonzepte befinden sich bereits in der Entwicklung oder sind schon für den Einsatz in der Praxis erprobt.

Was die Herstellung großflächiger Blechteile sowie Bauteile mit geschlossenen Konturen mittels HIU angeht, so muss darüber entschieden werden, ob es nicht sinnvoll ist, spezielle Anlagen für diese Verfahren zu entwickeln. Mit speziell entwickelten Maschinen werden zusätzliche Freiheitsgrade zur Optimierung des Prozessablaufs sowie eine wirtschaftliche Lösung für einen industriellen Einsatz von HIU geschaffen.

Die Umsetzung dieser Entwicklungen verspricht ein weiteres großes Potential sowohl bei der wirkmedienbasierten Umformung von geometrisch komplizierten Bauteilen aus schwer umformbaren Materialien als auch bei der simulationsunterstützten Erstellung von prozesstechnischen oder konstruktiven Maßnahmen zur Anlagentechnik und für Werkzeuge konventioneller und dynamischer Art.

13. Bildverzeichnis

Bild 1: Verfahrensprinzip der wirkmedienbasierten Blechumformung	3
Bild 2: Verfahrensprinzip der Explosivumformung	5
Bild 3: Verfahrensprinzip der Hydro-Impuls-Umformung	6
Bild 4: Wirkmedienbasierte Umformverfahren	7
Bild 5: Wirkprinzip des HIU-Verfahrens	18
Bild 6: HIU-Einflussgrößen	19
Bild 7: Volumenelement für die Beschreibung der Werkzeugkomponenten	23
Bild 8: Lagrange-Elemente	23
Bild 9: Das SPH-Elemente für die Beschreibung von Wirkmedium	25
Bild 10: HYDRO-Modell	26
Bild 11: Messgrößen in Experimenten	30
Bild 12: Hydraulische Tiefziehanlage	31
Bild 13: Geschlossenes (links) und offenes (rechts) Gesenk	31
Bild 14: Messungen der Druckcharakteristik	32
Bild 15: Anordnung des Modellversuchs	35
Bild 16: Geometrischer Vergleich für einen Boden	38
Bild 17: Geometrischer Vergleich für einen Napf	39
Bild 18: Vergleich der Blechdickenänderungen bei der dynamischen Umformung	40
Bild 19: Blechdickenreduzierung an eine Ronde	41
Bild 20: Impulsverteilung bei HIU	42
Bild 21: Charakteristische Bereiche für die Analyse der Druckverteilung	44
Bild 22: Druckverlauf in der Druckkammer. ($m_H = 5,0 \text{ kg}$, $v_H = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	45
Bild 23: Druckverlauf in der Druckkammer. ($m_H = 1,0 \text{ kg}$, $v_H = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	45
Bild 24: Maximaler Druck	46
Bild 25: Belastungsdauer	46
Bild 26: Maximaldruck abhängig von der Hammergeschwindigkeit	47
Bild 27: Druckwellenverbreitung im flüssigen Wirkmedium	48
Bild 28: Kavitationsbild	49
Bild 29: Druckaufbau an der Kontaktfläche des Hammers	51
Bild 30: Druckaufbau am Boden der Druckkammer	51
Bild 31: Druckaufbau an der Ecke der Druckkammer	52
Bild 32: Druckaufbau an der Wand der Druckkammer	53
Bild 33: Druckaufbau am Boden der Druckkammer bei geringerer Wassertiefe	54
Bild 34: Wirkmediumsvarianten	55
Bild 35: Druckverlauf im elastischen Wirkmedium	56
Bild 36: Druckverlauf im kombinierten Wirkmedium Wasser+Gummi	56
Bild 37: Druckverlauf im kombinierten Wirkmedium Gummi+Wasser	57
Bild 38: Druckverlauf bei unterschiedlichen Blechwerkstoffen	59
Bild 39: Die Geschwindigkeit des Blechs aus unterschiedlichen Materialien	59
Bild 40: Einfluss des verformbaren Blechs auf den Druckaufbau (MP5)	60
Bild 41: Einfluss des verformbaren Blechs auf den Druckaufbau (MP4)	61
Bild 42: Einfluss des verformbaren Blechs auf den Druckaufbau (MP2)	61
Bild 43: Druckaufbau am Blech (P3). Wirkmedium - Wasser	62
Bild 44: Druckaufbau am Blech. Wirkmedium - Gummi	63
Bild 45: Druckaufbau an der Ecke der Druckkammer. Wirkmedium - Gummi	63
Bild 46: Verlauf des Blechverformens beim HIU	64
Bild 47: Endformen des Blechs bei unterschiedlichen Impulsen	65
Bild 48: Bauteiltiefe bei unterschiedlichen Hammergeschwindigkeiten	66
Bild 49: Charakter des Bruchs bei unterschiedlichen Druckgradienten	67
Bild 50: Kritische Bereiche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten	68
Bild 51: Umformergebnisse für ein 3mm dickes Stahlblech	69
Bild 52: Bauteiltiefe bei unterschiedlichen Belastungsparametern	69
Bild 53: Erfassung der Umformgrade mit VIALUX	70
Bild 54: Formänderungsanalyse	71
Bild 55: Grenzformänderungsdiagramm	72

Bild 56: Blechdickenverteilung bei der Verformung	73
Bild 57: Mikrohärtemessungen der verformten Teile	74
Bild 58: Hohlrumbildung bei extremen Umformparametern (QStE340)	75
Bild 59: Analyse der Bruchstelle mit dem Rasterelektronenmikroskop	75
Bild 60: Elastisch-plastische Wellen bei einem Schlagzugversuch	76
Bild 61: Schwingung des dynamisch verformten Blechs	77
Bild 62: Schematische Darstellung einer dynamischen Blechverformung	77
Bild 63: Kritische Bereiche in dynamisch verformtem Blech	78
Bild 64: Versuchsanlage für dynamische Werkstoffuntersuchungen	79
Bild 65: Probenspanneinrichtung und Messkomplex	80
Bild 66: Zugprobe für dynamische Zugversuche	81
Bild 67: Spannungen $\sigma_v(t)$ für AZ91 kurz vor dem Bruch	82
Bild 68: Vergleichsspannungen im Blech	83
Bild 69: Komprimierung des Blechmaterials in einer Längs- oder Biege- welle	84
Bild 70: Thermische Effekte bei der Blechumformung	84
Bild 71: Thermische Effekte beim Zusammenstoß zwischen Blech und Matrize	85
Bild 72: Abkühlung des Blechs	85
Bild 73: Thermische Schädigungen durch komprimierte Luftreste	86
Bild 74: Verlauf des HIU- Tiefziehens bei einer Hammergeschwindigkeit von $75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	87
Bild 75: Verlauf des HIU- Tiefziehens bei einer Hammergeschwindigkeit von $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	87
Bild 76: Schematische Darstellung des Prozessverlaufs beim Tiefziehen	88
Bild 77: Faltenbildung am Ziehradius und in der Kuppel beim HIU-Tiefziehen einer Ronde	89
Bild 78: Materialbruch bei zu hoher Geschwindigkeit	89
Bild 79: Materialnachschiebung und Faltenbildung beim HIU-Tiefziehen	90
Bild 80: Konstruktive Varianten der HIU-Anlage	91
Bild 81: Konzept einer HIU-Anlage mit senkrecht stehendem Beschleunigungsrohr	92
Bild 82: Entlüftung bzw. Evakuierung des Beschleunigungsrohrs	93
Bild 83: Ansicht der HIU-Anlage	93
Bild 84: Montage eines Versuchswerkzeugs	94
Bild 85: Druckwellen in den Werkzeugelementen	96
Bild 86: Zusammenstoß des Blechs mit der Matrize	97
Bild 87: Zerrissene Werkzeugelemente	97
Bild 88: Undichtheiten in der Druckkammer	98
Bild 89: Einfluss der Undichtheiten in der Druckkammer	99
Bild 90: Vakuumsystem des HIU-Werkzeuges	99
Bild 91: Konstruktion des Werkzeugsystems	100
Bild 92: Matrizen mit einer halbsphärischen und zylindrischen Gravur	101
Bild 93: Austauschbare elliptische Matrizen für die werkstofftechnischen Versuche	101
Bild 94: Montiertes Werkzeugsystem	102
Bild 95: HIU-Werkzeug für das Referenzteil „Wärmetauscher“	103
Bild 96: Ergebnis der quasistatischen Verformung	104
Bild 97: Verformungsergebnis beim HIU mit „scharfen“ Impulsen	105
Bild 98: Verformungsergebnis unter der Nutzung optimierter Impulsbelastung	105
Bild 99: Realbauteil „Wärmetauscher“ aus dem Material HILAN	106
Bild 100: Realbauteil „Kugelgehäuse“	107
Bild 101: Realbauteil „Kompensator“	108

14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialeigenschaften für die untersuchenden Bleche	21
Tabelle 2: Materialeigenschaften für das Werkzeug	22
Tabelle 3: Materialeigenschaften für das Wirkmedium Wasser	26
Tabelle 4: Materialeigenschaften für das Wirkmedium Gummi	27
Tabelle 5: Materialeigenschaften für die Luft	27
Tabelle 6: Vergleich der Blechdickenreduzierung	41

15. Literatur

- [1] Kleiner M./Geiger M./Klaus A. (2003):
Annals of the CIRP, 52, No.2, pp. 521-542

- [2] Homberg W./Klimmek C./Kleiner M./Strauch A./Schulze T. (2001):
Wirkmedienbasierte Blechumformung – Umformtechnologien für die Anforderungen von morgen, Stahl No. 5, pp. 121-128

- [3] Maki T. (2003):
Current Status of Fluid Forming in the Automotive Industry, Proc. of the Int. Conf. on Hydroforming of Tubes and Sheet Metal, Stuttgart, 2003, pp.25-44

- [4] Geleghini M.(2004):
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie. Dr.-Ing. Thesis, University of Erlangen Nürnberg, Germany; Meisenbach Verlag, Bamberg

- [5] Groche P./Metz C./Kaufmann M. (2004):
DIN-Fachbericht 137: Einbindung der Innenhochdruck-Verfahren in die Normreihe der DIN 8580ff – Ausgabe 2003-09, Ed. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; 1. Vol. 2004; Beuth Verlag, Berlin-Wien-Zürich

- [6] Kleiner M./Homberg W. (2001):
Neue 10.000 kN-Pressen für die Hydro-Blechumformung, Proceedings of Int. Conf. on Hydroforming, Fellbach

- [7] Homberg W. (2000):
Untersuchungen zur Prozessführung und zum Fertigungssystem bei der Hochdruck-Blech-Umformung, Dr.-Ing. Thesis, University of Dortmund

- [8] Neubauer A./Stroppe H./Wolf H. (1988):
Hochgeschwindigkeitstechnologie der Metallbearbeitung.
VEB Verlag Technik, Berlin
- [9] Neubauer A./Schmicker H./Vovk V. (1990):
Nutzung der Explosivenergie zur Herstellung rohrförmige Werkstücke
Umformtechnik 24, Heft 4, S.164-170
- [10] Neubauer A./Schmicker H./ Vovk V. (1989):
Hochgeschwindigkeitsumformeinrichtungen in der Praxis.
Umformtechnik 23, Heft 6, S.232-240
- [11] Neubauer A./Vovk V./Stuivinga M. (1995):
Impulstechnologie:een snelle omformtechniek voor metaalprodukten (nied.), in: MB
Produktietechniek (61), Nr. 6/7, S. 196-203
- [12] Vovk V./Stuivinga M.; Kruijk H.(1998):
Explosive forming, an enabling technology (engl.),
Int. Conf. on Sheet Metal Twente The Netherlands
- [13] Beljaew W., I./Kowalewskij W., N./ Smirnow G., W. (1996):
Hochgeschwindigkeitsdeformation von Metallen (russ.), Verlag Wissenschaft und
Technik, Minsk
- [14] Stepanow G., W. (1979):
Elastisch - plastische Deformierung mit der Wirkung der impulsiven Auslastungen
(russ.), Verlag Nauk. Dumka, Kiew
- [15] Cordewener R. (1997):
Workshop Forming & Maschining (nied.),
Int. Duplex-Konferenz, Niederlande

- [16] Tominaga H./Takamatsu M. (1969):
Hydropunch, a pneumatic-hydraulic forming machine (engl.),
2. Intern. Conference of the Center for High Energy Forming, Estes Park USA
- [17] NN. (1976):
High-Energy-Rate Forming Machine Hydropunch, Druckschrift der Firma Tokyu Car
Manufacturing Co. Ltd., Yokohama
- [18] NN. (1979):
High-Energy-Rate Forming Method with Hydropunch, Druckschrift der Firma Tokyu
Car Manufacturing Co., Ltd., Yokohama. 2544 A
- [19] Ratjen, R./Takamatsu, M. (1971):
Hochenergie-Umformverfahren Hydropunch
Werkstatt und Betrieb 104, 1971, S. 40-44
- [20] Pile driving
Patent US3494160, Int. Cl. B25D 9/00, 1970
- [21] High-speed explosive hammer
Patent US3651685, Int. Cl. D21J 7/28, 1972
- [22] Apparatus for generating shock waves by means of a supersonic projectile
Patent US4049367, Int. Cl. B01J 3/06, 1977
- [23] Horizontal water pressure generating device
Patent JP56044838, Int. Cl. B30B 5/00, 1981
- [24] Hydropunch for use in a press
Patent US 4344313, Int. Cl. D21J 7/28, 1982
- [25] Drive point device
Patent US4807707, Int. Cl. F21B 7/20, 1989

- [26] Lange K./Roll K./Tekkaya A./Wanheim T. (1993):
Prozesssimulation und –optimierung, in: Umformtechnik Bd. 4: Sonderverfahren,
Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion, 2. Auflage, Heidelberg: Springer
Verlag, Berlin
- [27] Kleiner M. (1991):
Prozesssimulation in der Umformtechnik, Habilitationsschrift, Universität Dortmund
- [28] Dahl V./Kopp R./Pawelski O. (1993):
Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde, Verlag Stahleisen Düsseldorf
- [29] Hora P./Kubli W. (1998):
Prozessbegleitende Umformoptimierung in der Fahrzeugentwicklung, Numerisch
gestützte Prozesse (2). Bänder Bleche Rohre Bd. 45 Nr.1/2, S, 32-36
- [30] Sünkel R. (1998):
A decade of sheet forming simulation and the future impacts on the development
cycles in the automotive industry. Numiform 98, Proceedings of the 6th International
Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, 22-25.06.1998,
University of Twente, Enschede
- [31] Nagtegaal J.C./Engelmann B.E./Rebeleo N. (1998):
Development of industrial strength software for simulation of industrial forming
processes, Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Methods in
Industrial Forming Processes, 22-25.06.1998, University of Twente, Enschede
- [32] Pausch E.; Leib U.; Schuster G. (1994):
Prozesssimulation mit LS-DYNA3D, Vortrag auf dem 12. CAD-FEM Users Meeting,
19-21.10.1994. Miesbach
- [33] Bathe K-J. (1990):
Finite-Elemente-Methoden, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

- [34] Doege E./Besdo D./Tönshoff H. K./Wiendahl H.-P. (1995):
Fortschritte in der Werkzeugtechnik. Bericht DFG; Sonderforschungsbereich 300:
„Werkzeuge und Werkzeugsysteme der Metallbearbeitung“ Universität Hannover;
Meisenbach Bamberg
- [35] NN. (2005):
Handbuch LS-Dyna3D, Livermore Software Technology Corporation, Livermore
- [36] NN. (2004):
Handbuch INDEED, Inpro, Berlin
- [37] Hill R. (1971):
The Mathematical Theorie of Plasticity, Oxford University Press, London
- [38] Müller U.; Freytag P.; Rost A. (1998):
Einfluss der Werkstoffmodellierung auf die Ergebnisse von Umformsimulationen mit
der Methode der Finiten Elemente, Tagungsband 18, Genauigkeit in der
Blechverarbeitung, EFB- Kolloquium 10-11.03.1998, Fellbach. Hrsg. Europäische
Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.,Hannover
- [39] Doege E./Hütte H./Kröff A./Strache W. (1998):
Der simulierte und geregelte Prozess. Genauigkeit im Presswerk – Teil II, Blech
Rohre Profile Bd. 45 Nr. 7/8, S. 40-45
- [40] Engel U. (1996):
Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Massivumformung,
Meisenbach Bamberg
- [41] Szüchs E. (1997):
Einsatz der Prozesssimulation bei der Entwicklung eines neuen Umformverfahrens –
der Hochdruckblechumformung, Dr.-Ing. Thesis, University of Dortmund, Germany;
Shaker-Verlag, Aachen

- [42] NN. (2004):
Handbuch FLOW 3D
- [43] NN. (1995):
Analysis of Visco-Elastic and Elastomeric Materials, MARC Tutorial, MARC Analysis Research Corporation, Zoetermeer
- [44] Kasper K./Homberger K./Guth W. (1997):
User defined material models for an accurate simulation of elastomeric products.
Congress: ABAQUS User Meeting, Milano
- [45] Bogon P. (1998):
Wechselwirkungen Maschine-Werkzeug-Prozess- eine Aufgabe für die Simulation?
Tagungsband 18: Genauigkeit in der Blechverarbeitung. EFB-Kolloquium 10.-11.3.1998, Fellbach. Hrsg. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. Hannover
- [46] Guk S./Kawalla R. (2005):
Microstructurele Strain Localization during Sheet Metal Hydroforming Processes,
Steel research int. 76 No. 12, S. 843-851
- [47] NN. (2004):
Untersuchungen zum Duktilitäts- und Festigkeitsverhalten ausgewählter Al- und Mg-Legierungen bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten, Abschlussbericht 3280A/0080R, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [48] Herold K-P./Vovk V./Taran V./Vovk A. (2003):
Explosive Forming of High-Strength Sheet Materials. Conference SheMet, 14-16. April 2003

- [49] Vovk V./Taran V./Vovk A. (2002):
Hydro-impuls forming of sheet metals, VI International Forging Conference Metal forming, 23-24. Oktober 2002, Gramado/RS Brasil, S. 78-82
- [50] Schmidtman E. (1970):
Verfahren zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Stählen unter Schlagbeanspruchung. Neue wissenschaftliche Untersuchungsverfahren.
Verlag Stahleisen, Düsseldorf
- [51] Brede M. (2000):
Werkstoffprüfung bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten, Tagungsband
Werkstoffprüfung. Bad Nauheim
- [52] Vovk, V./Taran, V./Sabelkin, V./Stuivinga, M./Vovk, A. (2004):
Dynamisches Umformen von Verbundwerkstoffen auf Aluminium-Glasfaser-Basis,
Konferenz-Einzelbericht: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 1-4. Juli, 2003
Wien, Weinheim, New York: Wiley-VCH Verlag Verbundwerkstoffe und
Werkstoffverbunde (Ed.: H. P. Degischer), S. 879 – 883
- [53] Vovk V. (2002):
Hochgeschwindigkeitsumformen - alternative Lösungen für hochfeste Materialien,
Vortrag bei Inpro-Workshop Simulation der thermischen Blechumformung, Berlin 10-
11. Okt. 2002
- [54] Vovk V./Stroppe H./Taran V. (2001):
Untersuchungen zum Duktilitäts- und Festigkeitsverhalten ausgewählter Stähle bei
hohen Deformationsgeschwindigkeiten, in: Tagungsband Elektrodynamisches
Impulsumformen, Dortmund, S. 15 – 22.
- [55] Vovk V./Taran V./Vovk A. (2003):
Hydroimpulsumformen von Bauteilen mit scharfen Nebenkonturen (russ.), Herald of
Aeroenginebuilding, in: Sammelband der Staatlichen Technischen Universität
Saporosje S. 140-143

- [56] Vovk V./Taran V./Vovk A. (2006):
Grundlagen für das Hydro-Impuls- Umformen von Blechen. Wirkmedienbasierte
Fertigungstechniken zur Blechumformung, Abschlussbericht zum DFG-
Schwerpunktprogramm SPP 1098, 2000-2006. Shaker Verlag Aachen, S. 451-465
- [57] Vovk, V./Taran, V./Vovk, A. (2003):
Simulation des Hochgeschwindigkeitsumformvorganges, in: Konferenz-Einzelbericht
2. Kolloquium Elektromagnetische Umformung, Dortmund, S. 95-102
- [58] Vovk A./Sabelkin V./Vovk V./Taran, V. (2004):
Crash-simulation of profiles from aluminium and magnesium alloys, in: Konferenz-
Einzelbericht International Symposium Crashworthiness of Light-Weight Automotive
Structures, Trondheim, NTNU, S. 53-54
- [59] Vovk V./Taran V./Vovk A. (2004):
Impact testing of cast load-carrying structures of automobile, in: Konferenz-
Einzelbericht International Symposium Crashworthiness of Light-Weight Automotive
Structures, Trondheim, NTNU, S. 153-154
- [60] Vovk V./Taran V./Vovk A. (2004):
Methods of increase of ductility in explosion shaping of high-strength sheet material,
in: Konferenz-Einzelbericht 1-th International conference on High Speed Forming
(ICHSF), Dortmund, S. 253-258
- [61] Taran, V./Vovk, V./Vovk, A. (2004):
Dynamic Forming of Sheet Materials for Parts-Prototypes, in: Konferenz-
Einzelbericht International conference IDDRG 2004, Sindelfingen, Steel Institute
VDEh, S. 291-298
- [62] Vovk V./Taran V./Vovk A. (2005):
Effects of Hydro-Impulse Forming of Blanks, Steel Research 76, Nr. 12, S. 140-143