#### Nachruf: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Klaus Siegert



Kurz vor der Vollendung seines 75. Lebensjahres ist Professor Klaus Siegert, der ehemalige Leiter des Instituts für Umformtechnik der Universität Stuttgart, am 29. April 2014 nach langer Krankheit in Sindelfingen verstorben.

Klaus Siegert wurde am 17. Mai 1939 in Berlin-Wilmersdorf als Sohn eines Zahnarztes geboren. Nach dem Tod des Vaters zog die Familie nach Mecklenburg und nach Kriegsende nach Mölln. In Ratzeburg machte Klaus Siegert 1960 Abitur. Ab 1966 studierte Klaus Siegert Maschinenbau an der Technischen Universität in Berlin, wo er auch von 1969 bis 1975 als wissenschaftlicher Assistent tätig war. Seine Dissertation wurde von Professor Walter Panknin betreut. Seit 1975 war Dr. Siegert bei der Daimler-Benz AG in Sindelfingen im Presswerk beschäftigt.

Im August 1988 übernahm Professor Siegert die Leitung des Lehrstuhls und des Instituts für Umformtechnik an der Universität Stuttgart. In seine Amtszeit fiel die räumliche und anlagentechnische Erweiterung des Instituts. Er führte die Forschung in einigen Gebieten der Massivumformung weiter und setzte neue Akzente im Bereich Blechumformung. Er entwickelte die dafür geeignete Werkzeug- und Pressentechniken und baute neue Forschungsfelder in der Umformung von Blechen, Rohren und Profilen mit hydraulischen und pneumatischen Wirkmedien auf. Stets kooperierte er dabei eng mit der Industrie.

Sowohl auf dem Gebiet der Grundlagenforschung als auch auf dem Gebiet der anwendungstechnisch orientierten Forschung und Entwicklung erarbeitete sich Professor Siegert national und international ein hohes Renommee und kooperierte mit einer Vielzahl von in- und ausländischen Forschungsinstituten. In diesem Zusammenhang sind auch konsortiale Koperationsformen von vorwettbewerblicher Forschung mit dem Institut und Industriefirmen (Forschungskooperationen) zu nennen. In zahlreichen Veröffentlichungen und Vorträgen widmete sich Professor Siegert u.a. Themen wie reproduzierbare, robuste Umformprozesse, konstante Produktqualität durch Integration von Regelkreisen in den Umformprozess und Vorherbestimmbarkeit finaler Bauteileigenschaften.

Seine Forschungsergebnisse zum Strangpressen hat Herr Professor Siegert zusammen mit den Co-Autoren M. Bauser und G. Sauer in dem im Jahre 1999 im Aluminium-Verlag erschienenen Buch "Strangpressen" zusammengefasst. Zu erwähnen ist auch seine Autorenschaft für die Kapitel "Umformen" und "Maschinen der Umformtechnik" im Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau (Springer Verlag) bis 23. Aufl., und für das Kapitel "Blechumformen" in der Betriebshütte "Produktion und Management" (Springer Verlag) Teil 2

In Anerkennung seiner wissenschaftlichen Leistungen wurde Professor Siegert im Juli 1998 mit dem Titel "Doctor honoris causa" der Technischen Universität Cluj-Napoca, Rumänien, geehrt. Im November 1999 wurde Professor Siegert zudem zum "Doctor honoris causa" der Universität "Lucia Blaga" in Sibiu, Rumänien, ernannt. Damit wird die langjährige, enge wissenschaftliche und menschliche Verbundenheit von Professor Siegert mit seinen rumänischen Kollegen der Umformtechnik deutlich.

Professor Siegert leitete das Institut für Umformtechnik bis zu seinem Eintritt in den Ruhestand im Oktober 2004.

Trotz seiner Krankheit hat Professor Siegert noch bis kurz vor seinem Tode mit viel Engagement und Energie an seinem Buch "Blechumformung" gearbeitet, das er leider nicht mehr in Händen halten konnte. Das Buch erschien im Dezember 2014 im Springer Verlag. Seine wissenschaftlichen Leistungen sind weltweit geschätzt und anerkannt und werden auch über seinen Tod hinaus wirken.

Stuttgart, März 2015 Für das Institut für Umformtechnik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA

liewald

# Neuere Entwicklungen in der Massivumformung

Herausgegeben von Mathias Liewald



INSTITUT FÜR UMFORMTECHNIK DER UNIVERSITÄT STUTTGART



DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR MATERIALKUNDE E.V.



ISBN 978-3-88355-409-9

Vortragstexte zur Veranstaltung

Internationale Konferenz "Neuere Entwicklungen in der Massivumformung"

in Fellbach (bei Stuttgart), am 5. und 6. Mai 2015

unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Direktor des Instituts für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart

in Zusammenarbeit mit:

der Forschungsgesellschaft Umformtechnik mbH (FGU, Stuttgart), der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM)

Die einzelnen Beiträge der Konferenz werden in diesem Berichtsband unverändert in der von den Autoren zur Verfügung gestellten Fassung veröffentlicht. Inhalt und Orthographie liegen in der Verantwortung des jeweiligen Autors bzw. der jeweiligen Autoren.

© 2015 INVENTUM GmbH

Postfach 20 07 14, 53137 Bonn, Deutschland Alle Rechte vorbehalten

Herstellung und Druck in Deutschland



#### Vorwort

Die Internationale Konferenz "Neuere Entwicklungen in der Massivumformung" in Stuttgart findet alle zwei Jahre im Wechsel mit der Internationalen Konferenz "Neuere Entwicklungen in der Blechumformung" statt. Zielsetzung beider Veranstaltungen ist es, Ingenieure aus

Unternehmen und der Forschung zu einem Dialog zu den zu erwartenden Veränderungen von Produkten, Technologien und Märkten umformtechnischer Produkte und auch zu einer Bestimmung der Zielsetzung zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zusammenzuführen.

Eine weitere wesentliche Zielsetzung der vom Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart und der Forschungsgesellschaft Umformtechnik mbH (FGU) Stuttgart veranstalteten Konferenzen ist die frühzeitige Überführung von Ergebnissen aus anwendungstechnisch orientierter Hochschulforschung in heutige Märkte und industrielle Wertschöpfungsprozesse.

Bei der Auswahl der Leitthemen für unsere Konferenzen werden stets die aktuellen Forschungsschwerpunkte des Institutes im Kontext zu aktuellen Entwicklungen in der europäischen Forschungslandschaft einerseits und zu Tendenzen in globalen Wirtschaftsräumen andererseits ausgewählt. Auch sollen die Konferenzen dazu dienen, die in den Unternehmen der Branche erarbeiteten Erkenntnisse und die an den Forschungsstellen der Umformtechnik erarbeiteten Methoden und Lösungen einem fachkundigen Kreis von Ingenieuren vorzustellen und international zu verbreiten. Referenten aus der Industrie und aus Hochschulinstituten schlagen einen Bogen von der Grundlagenforschung über aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bis hin zum industriellen Einsatz neuer Verfahren und neuer Produktionstechnologien. Unser Leitthema für die diesjährige Konferenz vom 4.-6. Mai 2015 wurde nach zahlreichen Anregungen unserer Freunde und Förderer mit besonderem Fokus auf aktuelle, praktische Lösungen in der Warm- und Kaltmassivumformung, auf leistungsfähige Methoden zur Simulation von Umformvorgängen, moderne Werkstoffkonzepte und erste Ansätze zur Integration von Sensoren in Umformwerkzeuge zur Prozessüberwachung gelegt.

Ein weiterer Fokus der Konferenz bezieht sich auf die Identifikation von Potentialen einzelner Leichtbauwerkstoffe, die in unterschiedlichen Systemen der Transporttechnik und des Maschinenbaus zum Einsatz kommen. Insbesondere die Eröffnungsvorträge adressieren dazu sehr aktuelle Fragestellungen! Weiterhin soll das technologische Potential von neuen Werkstoffentwicklungen / Legierungen deutlich gemacht werden, um auch strategische Fragestellungen im eigenen Unternehmen der Schmiedeindustrie oder in den Häusern der heutigen Systemlieferanten leichter beantworten zu können.

Die neu im Konferenzprogramm aufgenommenen Beiträge von Assistenten verschiedener Forschungsinstitute der Umformtechnik in Deutschland (AGU, Arbeitsgemeinschaft Umformtechnik e.V.) dienen dazu, dem Konferenzbesucher über aktuelle Neuentwicklungen und Forschungsthemen an deren Instituten zu berichten.

Im Rahmen der Konferenz und des begleitenden Programms wie die Industriebesuche am ersten Konferenztag, die Ausstellungen und die eingerichteten "Speakers Corners" mit namhaften Vertretern aus der Industrie wird den Besuchern und Vortragenden am 2. und 3. Konferenztag ausreichend Gelegenheit für den fachlichen Disput, für Analysen und Trendbeobachtungen, den Meinungsaustausch und auch für die Pflege persönlicher Netzwerke gegeben.

Ich danke allen Autoren für ihre Beiträge, ihr Engagement und ihr Interesse an dieser Konferenz und hoffe, dass die in diesem Buch enthaltenen Beiträge einem möglichst großen Kreis von Ingenieuren international zugänglich gemacht werden können.

Ihr

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

M. liewald

#### Inhaltsverzeichnis

Vorwort  M. Liewald	V
Forschungsschwerpunkte und aktuelle Entwicklungen in der Massivumformung am Institut für Umformtechnik (IFU)  M. Liewald et al.	1
Internationale Konferenz, 5. bis 6. Mai 2015 Strategische Einführungsvorträge	
Kraftfahrzeugantriebe der Zukunft im Spannungsfeld zwischen Wunsch und Wirklichkeit  M. Bargende	43
Initiative Massiver Leichtbau – Beitrag der Branche zum automobilen Megatrend HW. Raedt, F. Wilke, CS. Ernst	45
Produktanalysen und Perspektiven der Prozesstechnik	
Praxiseinsatz moderner Entwicklungswerkzeuge E. Körner, F. Pingel	59
Präzisionskaltumformung und Peripherietechnologien zur Funktionsverbesserung von Automobilteilen K. Ito, K. Hida, Y. Haruna, N. Tsunekage	69
Funktionsintegration durch inkrementelle Kaltumformung am Beispiel von Hohlwellen für die Automobilindustrie  P. Grupp	79
Prozesssimulation, Schädigung, Schmiedefehler	
Die erweiterte Rolle der Simulation – Versuchsplanung, Optimierung und probabilistische Modellierung  P. E. J. Walters, M. Fiderer	93
Möglichkeiten und Grenzen der simulationsbasierten Prozesskettenoptimierung dargestellt am Beispiel eines Schmiedeerzeugnisses aus einer Nickel-Basislegierung zur Herstellung von Leichtbauprodukten N. Biba, A. Borowikow, D. Wehage	105

Simulation der gesamten Fertigungsprozesskette mit FORGE®  P. De Micheli, A. Settefrati, S. Marie, J. Barlier, P. Lasne, M. Bernacki, F. Bay	115
Neuere Entwicklungen in der Simulation des Strangpressens A. E. Tekkaya et al.	137
Werkstoffe, Wärmebehandlung und Mikrostrukturentwicklung	
Herstellung hochfester Schmiedeteile durch direkte Abkühlung aus der Schmiedehitze  B. Buchmayr, M. Eggbauer	149
Kühlstrategien in der Schmiedeprozesskette  T. Bucquet, M. Fritsching	159
Design neuer Schmiedestähle mit Integrative Computational Materials and Process Engineering (ICMPE)  U. Prahl, W. Bleck	169
Neues Herstellungskonzept für Gesenkschmiedeteile aus ultrahochfesten Stählen B. Mašek	185
Werkzeug- und Prozesstechnik	
Ansätze zur Optimierung von Kaltumformprozessen mittels der FE-Simulation und durch gezielten Einsatz von Tischkissenfunktionen <i>P. Schmitt, L. Pinotti, M. Carminatti, M. Kammerer, G. H. Arfmann</i>	195
Entwicklung eines Schmiedeprozesses für Servopressen mittels CAE-Technologie SY. Kim	211
Flexible Fertigungseinheiten mit direkt angetriebenen LASCO Spindelpressen J. Günnel	223
Sonderverfahren	
FEM-Simulation eines Warmfließpressenes einer Ti-6Al-4V-Legierung  T. Neizert, M. Ramezani	229
Wirtschaftliche Verarbeitung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen durch Kombination von Thixoschmieden und Direktsintertechnologien A. Storz, C. Seyboldt, K. Riedmüller, T. Schubert, T. Weißgärber	239
Leichtbau – Laseradditive Fertigung von metallischen Bauteilen  C. Emmelmann, T. Wischeropp, T. Schmidt, J. Kranz	253

#### Regelkreise in der Massivumformung

Funktionsintegration durch Rundkneten – Neue Möglichkeiten zur Struktur- überwachung und Lastermittlung bei rohrförmigen Maschinenelementen P. Groche, M. Krech	263
Geregelte Kaltfließpressprozesse – Anlagentechnik und Anwendungsbeispiele <i>T. Schiemann</i>	273
Vorstellung komplexer Kühlkörper und Steuergehäuse mit hoher Funktionsintegration in das Pressteil W. Kretz	303
Produktanalysen und Perspektiven der Kaltpresstechnik	
Anforderungen an Massivumformteile für Automatikgetriebe und den Antriebsstrang  R. Völkl, B. Wiedenmann	321
Blechmassivumformung und Präzisionsschneiden auf Kniehebelpressen mit Servoantrieb  K. Stahl	333
Einsatz des Hybridschmiedens bei der Herstellung von dünnwandigen Bauteilen R. Shivpuri	341
Untersuchungen zum Umformfügen mittels Quer-Fließpressen F. Dörr, M. Kannewurf, M. Liewald	355



Wenn es ums Schmieden geht: Wir fügen die Teile zusammen.





Angensteinerstr. 6 · CH-4153 Reinach · Schweiz · Fon +41 61 716 20 00 · Fax +41 61 716 20 10 info@presstrade.com · www.presstrade.com

## Forschungsschwerpunkte und aktuelle Entwicklungen in der Massivumformung am Institut für Umformtechnik

Vuniv.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. M. Liewald MBA, Dr.-Ing. A. Felde Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart

#### 1 Einleitung

Neben den Zielen, fossile Energie durch Energie aus erneuerbaren Quellen zu ersetzen und den Ausstoß an Treibhausgasen zu reduzieren, stellt die Europäische Kommission fest, dass dem Verkehrssektor 20% des Gesamtenergieverbrauchs an Primärenergie zuzuordnen sind und dass dessen Energieeinsparungspotenzial bis zum Jahr 2020 mit 26% zu bewerten ist. Als vorrangige Maßnahme wird daher die Erhöhung der Kraftstoffeffizienz gesehen /1/. Die Automobilhersteller werden verpflichtet, die Emissionswerte neuer Fahrzeuge auf einen Grenzwert von 130 g/km im laufenden Jahr 2015 auf 95 g/km bis zum Jahr 2020 zu reduzieren. Ein von den meisten Automobilherstellern gewählter Weg, die teilweise Elektrifizierung des Antriebsstranges sowie die gleichzeitig angestrebte Erhöhung der aktiven und passiven Sicherheit sowie des Fahrkomforts führen zu einer weiteren Gewichtszunahme aktueller und zukünftiger PKW, die durch strukturelle Maßnahmen an Motor, Fahrwerk und Karosserie kompensiert werden muss.

Eine der Schlüsseltechnologien zur Reduzierung des Fahrzeuggewichtes stellen der konstruktive und der stoffliche Leichtbau dar, wobei die angestrebte Ersparnis der Masse von umformtechnisch hergestellten Einzelkomponenten unter Beibehaltung der funktionalen Anforderungen erfolgen muss. Technologische Entwicklungen von massivumgeformten Leichtbau-Komponenten können hier in den Handlungsfeldern Verbrennungsmotor, Getriebe, Antriebsstrang und Fahrwerk zum angestrebten Fortschritt beitragen /2/. Die massiv umgeformten Bauteile können durch ihren verfahrensspezifischen, belastungsgerechten Faserverlauf sowie durch ihre ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften solchen hohen Anforderungen gerecht werden und daher ein hohes Potential für den konstruktiven Leichtbau bieten

Durch die aktuellen Anforderungen zum konstruktiven und stofflichen Leichtbau werden derzeit daher sowohl die Entwicklungsaktivitäten der produzierenden und dienstleistenden Unternehmen im Bereich der Massivumformung als auch die Forschungsinhalte der umformtechnisch orientierten wissenschaftlichen Einrichtungen geprägt. Die aktuellen und zukünftigen Forschungsaktivitäten des Institutes für Umformtechnik der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der Massivumformung werden in diesem Beitrag erläutert. Zunächst

werden einige neue technologische Lösungen für Verfahrensgruppen des Kaltfließpressens hohler Bauteile beleuchtet. Anschließend werden Untersuchungen zu neuartigen Massivumformverfahren, welche sich durch den Einsatz mehrerer Werkzeugachsen kennzeichnen, und Potentiale von servo-mechanischen Pressen beschrieben. Anschließend werden einige Forschungsaktivitäten des IFU auf dem Gebiet des stofflichen Leichtbaus und im Bereich des Fügens durch Umformen ausgeführt. Abschließend wird auf aktuelle Forschungsschwerpunkte der Formgebung im teilflüssigen Zustand eingegangen.

#### 2 Herstellung hohler Bauteile durch Fließpressen

Gesetzliche Vorschriften und Regelungen auf nationaler und internationaler Ebene erfordern heute eine verstärkte Bereitschaft zum Leichtbau in der Automobiltechnik, der Luftfahrtindustrie und dem Maschinen- oder Anlagenbau. In den meisten Fällen geht es dabei um eine Reduzierung von bewegten Massen. Einen wesentlichen Beitrag zur Gewichtsreduzierung rotierender Massen kann der konstruktive Leichtbau leisten. Eine Reduzierung der Masse von umformtechnisch hergestellten Einzelkomponenten unter Beibehaltung der funktionalen Anforderungen erfolgt konstruktiv oftmals durch eine hohle Ausführung oder die Zusammenfassung von Einzelkomponenten zu sogenannten funktionsintegrierten Baugruppen /3/. Gleichzeitig zur Reduzierung von Energiekosten im Betrieb solcher Bauteile wird aus wirtschaftlicher Sicht immer auch eine Reduzierung der Fertigungskosten (Material, Energie und Personal) angestrebt. Diese lässt sich oftmals durch einen geringeren Materialeinsatz und eine verkürzte bzw. weiter optimierte Prozesskette realisieren.

Hohle Wellen für Getriebe im Automobil- oder Anlagenbau werden heute in der Regel durch eine Verfahrenskombination aus Umformen und Spanen hergestellt. Sollen mehrere Formelemente (Innen- und Außenverzahnung) an derselben Welle hergestellt werden, so folgt dem Umformen meist eine spanende Fertigbearbeitung. Das Kaltfließpressen bietet die Möglichkeit, Formelemente an hohlen Wellen in einbaufertiger Qualität (net shape) zu erzeugen. Dies erlaubt eine Reduzierung der nachfolgenden Fertigungsschritte, einen reduzierten Materialeinsatz und geringere Fertigungskosten bei gleichbleibendem oder erhöhtem Anteil an der Wertschöpfungskette.

## 2.1 Faltenbildung beim Anstauchen von Flanschen und Bunden an hohlen Fließpressteilen

Ein fertigungstechnisches Problem beim Anstauchen von Bunden an hohlen Wellen, die z.B. als Lagersitz oder zur Weiterleitung von Drehmomenten dienen, stellt die Bildung einer Falte in der Äquatorialebene des Bundes während des Stauchens dar (Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1:

Visualisierung der Faltenbildung beim Anstauchen eines hohlen Fließpressteiles anhand eines Zustellmusters (EN AW 6082,  $\partial D_i/\partial D_a = 0.5$ ,  $h_s/\partial D_a = 0.65$ , links) und Werkzeugdarstellung für das einfache Bundanstauchen vor der Umformung und nach der Umformung mit geometrischen Größen (rechts)

Diese Verfahrensgrenze in Bezug auf ein fehlerfreies Bauteil schränkt die material- und kosteneffiziente Herstellung derartiger hohler Wellen durch Fließpressen stark ein und wurde von /4/ erstmals wissenschaftlich untersucht. Es ist durch verschiedene Untersuchungen (z.B. /4, 5, 6/) bekannt, dass die Verfahrensgrenze durch die sogenannte Faltenbildung 1. Art beim Stauchen von hohlen Halbzeugen hauptsächlich von geometrischen Einflussgrößen abhängt (Abbildung 2.1, rechts). Insbesondere das Verhältnis der freien Stauchhöhe  $h_s$  zur Wanddicke der hohlen Halbzeuge ist in diesem Zusammenhang zu nennen. In /5/ wurden weitere Einflussgrößen auf die Faltenbildung beim Bundanstauchen wie z.B. die Umformgeschwindigkeit sowie die Halbzeugtemperatur des hohlen Halbzeuges untersucht.

Ziel des Forschungsvorhabens in /5/ war eine Verschiebung der Verfahrensgrenze durch geeignete werkstoff- oder prozessspezifische Maßnahmen zur Vermeidung der Faltenbildung. Eine derartige Verschiebung würde das Geometriespektrum derartiger hohler Bundwellen hinsichtlich eines großen Bunddurchmessers unter Beibehaltung einer hinreichend großen Bunddicke erweitern und den Bestrebungen nach der Verwendung von Leichtbaukomponenten und effizienten Fertigungsverfahren gerecht werden. Neben der sogenannten Falte 1. Art konnte im Rahmen experimenteller Untersuchungen anhand metallographischer Analysen eine äquatoriale Falte in der zweiten Umformstufe nachgewiesen werden, die ihre Ursache nicht im Instabilitätsverhalten des hohlen Halbzeuges hat Diese sogenannte Falte 2. Art war mit kommerziellen Programmen und existierenden Schadenskriterien nicht darstellbar (Abbildung 2.2).

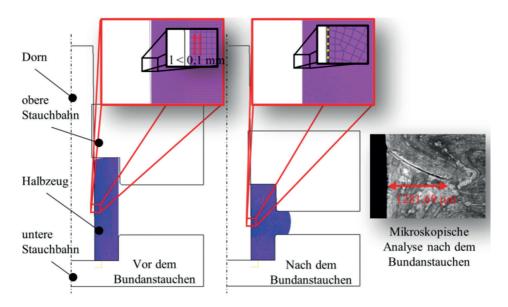


Abbildung 2.2: Ergebnisse einer numerischen Analyse einer mittels Prozessroute 2b hergestellten Bundwelle aus 16MnCrS5 ( $OD_1/OD_A=0.5$ ,  $h_S/s_0=2.2$ )

Im Rahmen von /7/ wurde daher ein empirisches Faltenkriterium entwickelt und in den kommerziellen Programmcode DEFORM implementiert. Mittels dieses entwickelten Faltenkriteriums sind solche Falten 2. Art heute prädiktiv darstellbar /8/. Diese Art der Faltenbildung, die ohne instabiles Ausknicken erfolgt, wird als Falte 2. Art bezeichnet und ist experimentell für alle untersuchten Versuchswerkstoffe nachweisbar.

#### 2.1.1 Einfluss der Fertigungsfolge auf die Faltenbildung

In Abbildung 2.3 ist die Fertigungsfolge der experimentell und numerisch untersuchten Prozessroute 1, bestehend aus den drei Umformstufen NRFP sowie erster und zweiter Stauchstufe gezeigt. Aus den gepressten Näpfen werden rohrförmige Halbzeuge mit unterschiedlichen Höhen  $h_{\scriptscriptstyle 0}$  durch spanende Fertigungsverfahren hergestellt, die hinsichtlich der Faltenbildung ein kritisches Verhältnis der auf den Außendurchmesser bezogenen freien Stauchhöhe  $h_{\scriptscriptstyle S}/\!\!\!/\!\!\!/\!\!\!/ D_{\scriptscriptstyle A}$  darstellen. Mittels des zweistufigen Stauchprozesses soll die Faltenbildung vermieden und eine Erweiterung der Verfahrensgrenze erzielt werden. Darüber hinaus kann anhand der Prozessroute 1 die Faltenbildung in Abhängigkeit des Verfestigungszustandes bzw. der Umformhistorie anhand von Wärmebehandlungen zur Rekristallisierung des umgeformten Gefüges abgeleitet werden. Die Nomenklatur der Prozessrouten in Abhängigkeit der Wärmebehandlung ist Tabelle 2.1 zu entnehmen.

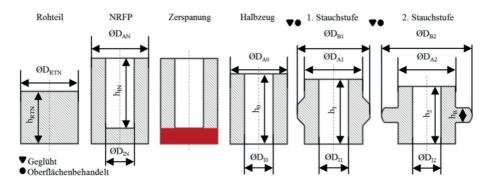


Abbildung 2.3: Prozessroute 1 (NRFP und zweistufiges Bundanstauchen)

In Abbildung 2.4 ist die Fertigungsfolge der Prozessroute 2, bestehend aus den zwei Umformstufen NRFP und Stauchen, gezeigt. Wie auch bei Prozessroute 1 werden aus den gepressten Näpfen rohrförmige Halbzeuge mit unterschiedlichen Höhen  $h_{\theta}$  hergestellt, die hinsichtlich der Faltenbildung und gemäß des Standes der Technik sowohl ein kritisches als auch ein unkritisches Verhältnis der auf den Außendurchmesser bezogenen freien Stauchhöhe  $h_{\phi}/OD_{\phi}$  darstellen.

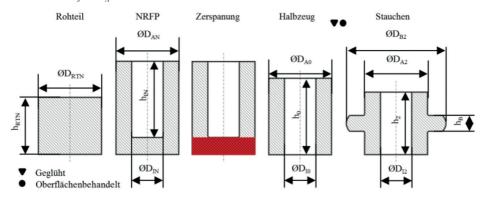
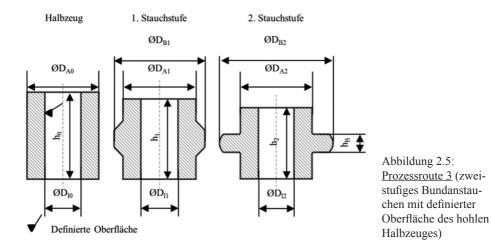


Abbildung 2.4: Prozessroute 2 (NRFP und einstufiges Bundanstauchen)

In Abbildung 2.5 ist die Fertigungsfolge der Prozessroute 3, bestehend aus einem zweistufigen Stauchprozess, gezeigt. Die rohrförmigen Halbzeuge werden ausschließlich spanend mit definierten Oberflächenqualitäten der inneren Mantelfläche hergestellt. Mittels dieses zweistufigen Stauchprozesses soll die Faltenbildung in Abhängigkeit von der Oberflächenqualität des hohlen Halbzeuges untersucht werden.



In Tabelle 2.1 ist die Nomenklatur der Prozessrouten in Abhängigkeit der durchgeführten Wärmebehandlungsoperation zur Rekristallisation des umgeformten Gefüges nach der vorangehenden Umformstufe gezeigt. Prozessroute 1-a-b bedeutet demnach, dass die Herstellung des hohlen Halbzeuges durch NRFP erfolgt und das Gefüge anschließend durch eine Wärmebehandlung rekristallisiert wird. Anschließend erfolgt ein Neuauftrag des Schmierstoffsystems. Im folgenden zweistufigen Stauchprozess wird keine erneute Zwischenbehandlung des Halbzeuges durchgeführt.

Tabelle 2.1: Nomenklatur der Prozessrouten in Abhängigkeit der durchgeführten Wärmbehandlungsoperation zur Rekristallisation des Gefüges

Prozessroute	Wärmebehandlung nach dem NRFP	Wärmebehandlung nach der 1. Stufe
1-a-a	ja	ja
1-a-b	ja	nein
1-b-b	nein	nein
1-b-a	nein	ja
2-a	ja	-
2-b	nein	-
3-b	-	nein

In Abbildung 2.6 ist die Faltentiefe in Abhängigkeit der *Prozessroute 1-x-x* sowie für das  $\mathcal{O}D_1/\mathcal{O}D_A=0,5$  gezeigt. Es ist für alle Versuchswerkstoffe ein signifikanter Zusammenhang zwischen der gewählten Prozessroute und der Faltenbildung ersichtlich. Die experimentellen Ergebnisse der *Prozessroute 1-a-a* zeigen, dass eine Eliminierung der Werkstoffverfestigung durch Rekristallisation des umgeformten Gefüges sowohl vor als auch nach der ersten Stauchstufe die Faltenbildung bzw. die Entstehung einer Falte 2. Art vermeidet. Für keinen der untersuchten Versuchswerkstoffe sind für dieses bezogene Stauchhöhenverhältnis Falten 2. Art im metallographischen Schliffbild nachweisbar. Es sei an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Prozessroute 1 nach Definition von /4/ ein überkritisches Verhältnis der auf den Außendurchmesser des hohlen Halbzeuges bezogenen freien Stauchhöhe darstellt und die Vermeidung der Faltenbildung 1. Art nur durch die Verwendung des zweistufigen Stauchprozesses mit geeigneter Massevorverteilung in der ersten Stauchstufe und in Wechselwirkung mit einer geeigneten Wärmebehandlung möglich ist.

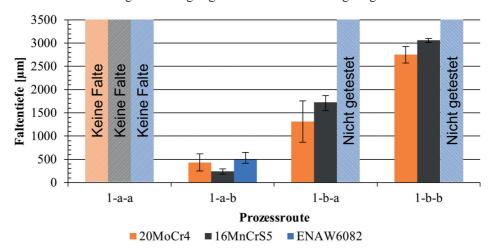


Abbildung 2.6: Faltentiefe in Abhängigkeit der Prozessroute ( $h_s/\emptyset D_A = 0,65,\emptyset D_1/\emptyset D_A = 0,5$ )

Für die *Prozessrouten 1-b-a* und *1-b-b* ergeben sich bei identischen bezogenen Stauchhöhenverhältnissen signifikante tiefere Falten als für die *Prozessroute 1-a-b*. In Abbildung 2.7 sind lichtmikroskopische Aufnahmen des faltengefährdeten Bereiches nach der zweiten Stauchstufe in Abhängigkeit der verschiedenen Prozessrouten für den Versuchswerkstoff 16MnCrS5 gegenübergestellt. Anhand der Schliffbilder ist die Falte 2. Art für die *Prozessrouten 1-a-b*, *1-b-a* und *1-b-b* zweifelsfrei zu bestimmen.

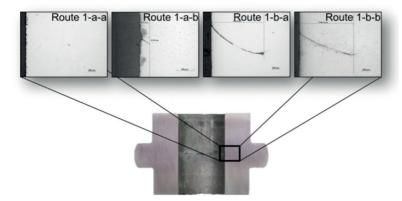


Abbildung 2.7: Visualisierung der Faltentiefe in Abhängigkeit der Prozessroute nach der 2. Stauchstufe  $(16\text{MnCrS5}, h_s/\Theta D_A = 0,65,\Theta D_I/\Theta D_A = 0,5)$ 

In Abbildung 2.8 ist eine Gegenüberstellung zwischen lichtmikroskopischen Aufnahmen der Falte 2. Art in Abhängigkeit der Prozessroute mit der Visualisierung im Post-Processor der numerisch berechneten Faltentiefen mittels des entwickelten Faltenkriteriums gezeigt. Berücksichtigt man die in den experimentellen Untersuchungen auftretenden Prozessschwankungen sowie die numerisch nicht abbildbare Beeinflussung des Stoffflusses durch die Falte 2. Art und auch mikrostrukturellen Vorgänge, so kann von einer sehr hohen Vorhersagekraft des entwickelten Faltenkriteriums gesprochen werden.

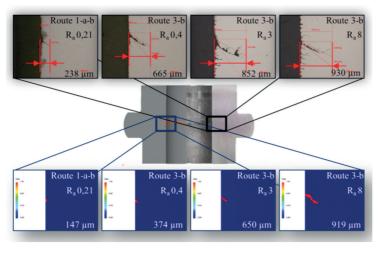


Abbildung 2.8: Gegenüberstellung zwischen lichtmikroskopischen Aufnahmen der Falte 2. Art (obere Reihe) und mittels FEM berechneter Faltentiefen 2. Art (untere Reihe) (16MnCrS5, hs/ØDa=0,65, ØDi/ ØDa=0,5)

#### 2.2 Fließpressen von hochgenauen hohlen Getriebewellen

Ein weiterer der Forschungsschwerpunkte auf dem Gebiet der Herstellung hohler Bauteile durch Fließpressen bildet die Verfahrensentwicklung für das Kaltfließpressen von innen- und außenverzahnten hohlen Wellen (Abbildung 2.9, a) gemäß der in Abbildung 2.9, b - e gezeigten Fertigungsfolge. Die Erzeugung eines rohrförmigen Halbzeuges erfolgte durch das Napf-Rückwärts-Fließpressen, die Entfernung des Napfbodens (Lochen) und

das Hohl-Vorwärts-Fließpressen. Das Einpressen einer inneren und einer äußeren Geradverzahnung erfolgt hierbei durch ein kombiniertes Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressen.

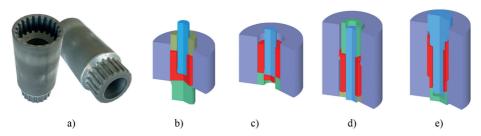


Abbildung 2.9: a) Versuchspressteil "doppelverzahnte hohle Welle" und seine Fertigungsfolge: b) Napf-Rückwärts-Fließpressen; c) Lochen; d) Hohl-Vorwärts-Fließpressen; e) kombiniertes Hohl-Vorwärts-Hohl-Rückwärts-Fließpressen

Zur experimentellen Untersuchung des kombinierten Hohl-Vorwärts-Hohl-Rückwärts-Fließpressvorgangs (Abbildung 2.9 e) wurde das in Abbildung 2.10 gezeigte Versuchswerkzeug entwickelt und aufgebaut. Mit dem Werkzeug können Verzahnungen mit Keilflanken und gleicher Zahnanzahl von 20 sowie Modulen von 1,85 mm innen bzw. 1,835 mm außen gepresst werden. Während des Umformens mit diesem Werkzeug ergeben sich in zwei Umformzonen Formänderungen von ca. 0,75 bzw. 0,7. Der Stempel enthält die negative Form der Innenverzahnung sowie ein dornartiges Element zur Abstützung des Hohlraums des Pressteils und ist in der oberen Werkzeughälfte montiert. Eine in der unteren Werkzeughälfte angeordnete Matrize besteht aus einer zylindrischen Aufnehmerhülse sowie aus einer verzahnten Hülse zur Erzeugung der Außenverzahnung des Bauteils. Der Stempel wird während des Pressvorgangs sowohl im oberen Bereich der Matrize als auch über einen federnd in der Matrize geführten Auswerfer zentriert. Dieser Auswerfer bildet zugleich einen Anschlag beim Einpressen der Außenverzahnung und führt schließlich das Ausstoßen des Pressteils aus.

Während der Pressversuche mit dem in Abbildung 2.10 dargestellten Versuchswerkzeug wurden sowohl die zuvor durch das Napf-Rückwärts-Fließpressen, Lochen und Hohl-Vorwärts-Fließpressen (Abbildung 2.9 b, c und d) erzeugten Halbzeuge mit unterschiedlicher Lagegenauigkeit des Hohlraums als auch geometrisch ähnliche zerspanend angefertigte Rohteile mit geringen Koaxialitäts- bzw. Konzentrizitätsfehlern aus 16MnCrS5 (GKZ) eingesetzt. Halbzeuge beider Arten wurden vor der Umformung mit einer Zink-Phosphatund Schmierschicht versehen. Auch wurden im Zuge der experimentellen Untersuchungen Rohteile mit verschiedenen Einlegespielen und Werkzeugkomponenten mit unterschiedlichen Passungsspielen eingesetzt.

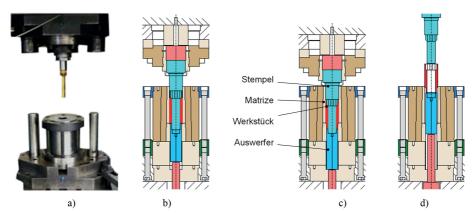
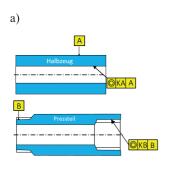


Abbildung 2.10: Versuchswerkzeug für das Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressen (a) und schematische Darstellung der typischen Prozessstadien: b) Aufsetzen des Stempels; c) Endstadium des Pressens; d) Auswerfen

Im nächsten Schritt wurde die finale Lagegenauigkeit der gepressten Außen- und Innenverzahnung zueinander und zu zwei Bezugsflächen in Abhängigkeit von der in den vorangegangenen Umformstufen entstandenen Fehlergröße und -verteilung analysiert. Abbildung 2.11 stellt einen exemplarischen Vergleich der Koaxialität der eingeformten Verzahnungen an den Pressteilen dar, die aus den Halbzeugen mit gezielt erzeugten unterschiedlichen Genauigkeiten hergestellt wurden. Hierbei ist nur eine schwache Abhängigkeit der finalen Koaxialität der Pressteile von der Koaxialität der Halbzeuge erkennbar. Beim Pressen mit genau gedrehten Teilen verschlechterte sich die Lagegenauigkeit und beim Umformen von fehlerbehafteten, gepressten Halbzeugen wurden an verzahnten Pressteilen signifikant geringere Koaxialitäts- bzw. Konzentrizitätsfehler als an den verwendeten Halbzeugen festgestellt. Als Ursachen für dieses Phänomen wurden die Einflüsse der Einlegespiele sowie die Passungsspiele zwischen den beweglichen Werkzeugteilen identifiziert.



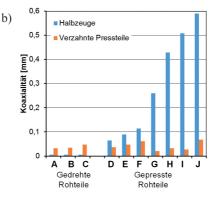


Abbildung 2.11:
a) Auswertungskriterien von
Halbzeug und
Pressteil und b)
Vergleich der
Koaxialität von
Halbzeugen und
der Koaxialität
von verzahnten
Pressteilen

Weitere Versuche mit variablen Rohteilabmessungen zeigten, dass reduzierte Einlegespiele zu keiner Verbesserung der finalen Genauigkeit führen. Im Gegensatz dazu ließen sich mit reduzierten Passungsspielen zwischen den beweglichen Werkzeugkomponenten (Matrize, Stempel und Auswerfer in Abbildung 2.10) genauere Pressteile erzeugen.

Die aktuellen Untersuchungen auf dem Gebiet der umformtechnischen Erzeugung hohler, verzahnter Bauteile liegt in der Entwicklung einer Werkzeugtechnik, mit der es möglich sein soll, Pressteile mit Koaxialitätsabweichungen zweier Profile kleiner als 0,04 mm zu fertigen. Einer der wesentlichen Ansätze dafür bildet die Minimierung der Lagegenauigkeitsfehler, die durch die Reduzierung der Fugenanzahl im Werkzeug sowie durch die Verkleinerung der Passungsspiele zwischen den Werkzeugkomponenten erreicht werden kann. Das in Abbildung 2.12 a dargestellte Werkzeugkonzept weist z.B. nur zwei spielbehaftete Fugen im Vergleich zur in Abbildung 2.10 gezeigten Werkzeuganordnung mit drei Fugen auf. Dadurch können die theoretisch möglichen Koaxialitätsfehler des Stempels zur Matrize prinzipiell reduziert werden. Eine weitere Verbesserung der Lagegenauigkeit der Pressteile wird vom in Abbildung 2.12 b gezeigten Werkzeugkonzept mit einer spielfreien Kugelführung des Stempels erwartet, da durch diese Führungsart die Verkippung des Stempels am Anfang des Pressvorgangs hypothetisch ausgeschlossen werden kann.

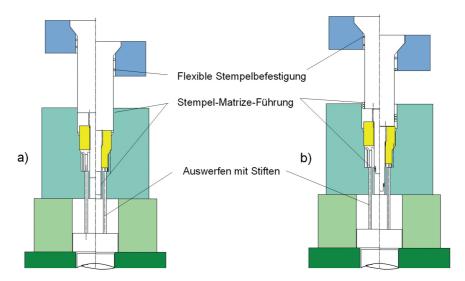


Abbildung 2.12: Werkzeuganordnungen für die Erzeugung hohler, verzahnter Pressteile mit minimierten Lagegenauigkeitsfehlern: a) mit reduzierter Fugenanzahl und b) mit spielfreien Kugelführungen

#### 3 "Geregeltes" Fließpressen mit zusätzlichen Werkzeugachsen

Im Vordergrund stand die Entwicklung einer geeigneten Prozess- und Anlagentechnik zur Regelung von Massivumformprozessen mittels in Werkzeugen integrierten, zusätzlichen hydraulischen Achsen unter Verwendung verschiedenartiger Prozessmessgrößen. Das Stoffflussregelsystem, bestehend aus Hydraulikaggregat, Steuerung, Regelung und Visualisierung sowie Massivumformwerkzeug wurde am IFU aufgebaut und ist in Abbildung 3.1 gezeigt. Das Hydraulikaggregat wurde von der Firma FMB Blickle GmbH unter den Gesichtspunkten Ressourceneffizienz und Online-Oil-Condition-Monitoring entwickelt. Die Anschlussleistung von 250 kW sowie die hohe Dynamik der Regelpumpen und Servoventile ermöglichen die Bereitstellung eines Ölvolumenstromes von 460 l/min bei einem Druck von 280 bar. Ölvolumenstrom und Öldruck werden anforderungsbezogen bereitgestellt.

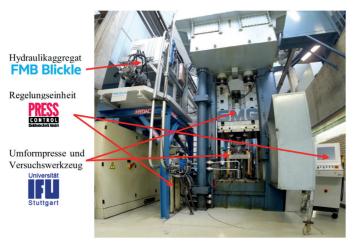


Abbildung 3.1: Hydraulikaggregat (links, oben), Hydraulikblock mit Schaltkasten (links, unten), hydraulische Presse mit Versuchswerkzeug (mittig), Einheit zur Regelung/ Steuerung (rechts, unten), aufgebaut im Versuchsfeld des IFU an der Universität Stuttgart

Das Hydrauliksystem verfügt über einen Tank mit 1.000 l Volumen, drei energieeffiziente Regelpumpen mit Bereitstellung bedarfsbezogener Ölvolumenströme und Drücke. Kühlkreislauf und Überwachungssensorik ermöglichen den Einsatz für Serienprozesse mit hohen Pressenhubzahlen. Der Steuerblock verfügt über vier hochdynamische Regelventile mit Überschneidung. Je zusätzlicher Werkzeugachse werden zwei Ventile eingesetzt. Steuerblock und Regelventile sind unabhängig vom Werkzeug einsetzbar, wodurch die geforderte Modularität gewährleistet werden kann. Die von der Firma Presscontrol Elektrotechnik GmbH entwickelte Steuerung zur Parametrisierung der Werkzeugkinematik stellt die Kommunikation zwischen Hydraulikaggregat, Servoventilen, Hydraulikachsen, den Prozessmessgrößen im Massivumformwerkzeug und der Umformprozess während des Pressenhubes gezielt beeinflusst bzw. geregelt werden. Pressen-, Aggregat- und Werkzeugsteuerung sind verknüpft und mit gegenseitigen Sicherheitsabfragen sowie sicheren Be-

triebszuständen versehen. Der im Rahmen des Projekts verfolgte Ansatz zur Regelung von Massivumformprozessen ist die Integration von zusätzlichen, hydraulischen und regelbaren Werkzeugachsen in Kaltmassivumformwerkzeuge, um mithilfe entsprechender Messeinrichtungen und entsprechender Aktoren auf den Umformprozess regelnd einwirken zu können. In /9, 10/ und /11/ sind Ergebnisse verschiedener experimenteller Untersuchungen zur Regelung von Massivumformprozessen gezeigt und im Einzelnen aufgeführt. Weitere detaillierte Informationen zu den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen finden sich in /12/

#### 3.1 Robustheitsverbesserung beim Napf-Rückwärts-Fließpressen

Die Robustheit von Umformprozessen und damit auch die Stabilität gegenüber signifikanten Streuungen der Eingangsparameter kann mit derartigen Werkzeugkonzepten erhöht werden ohne robuste Eingangsgrößenkombinationen anstreben zu müssen. Der experimentelle Nachweis erfolgte anhand der in Abbildung 3.2 gezeigten Vorgehensweise.

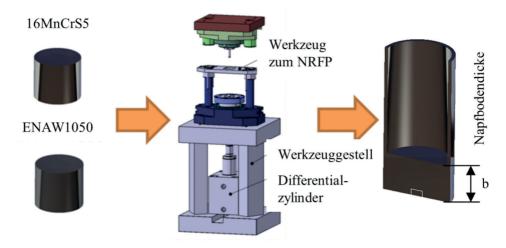


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zum Nachweis der Prozessrobustheitsverbesserung

Die Modellierung signifikanter Schwankungen der Prozesseingangsgrößen erfolgte durch Verwendung von Rohteilen aus EN AW 1050 und 16MnCrS5. Während des Umformvorganges wurde die Napfbodendicke unter Berücksichtigung der kraftabhängigen mechanischen Einfederung der Werkzeuge kontinuierlich überwacht. Während des Umformvorganges befindet sich der Gegenstempel in Lageregelung. Sobald die Zielbodendicke erreicht ist, nimmt der Gegenstempel eine Geschwindigkeit  $V_G > V_{St}$  an und der Umformprozess wird beendet. Anhand Abbildung 3.3 wird deutlich, dass ohne weitere Eingriffe (Zustellung oder mechanische Anschläge) die Zielbodendicke mit akzeptablen Schwankungen für beide Versuchswerkstoffe erreicht werden kann.

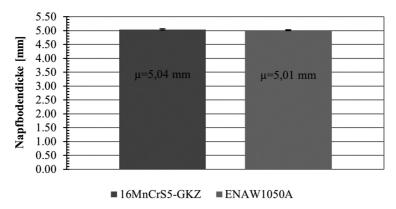


Abbildung 3.3: Napfbodendicke in Abhängigkeit von der Prozesseingangsgrößenschwankung /11/ ( $h_{16MnCrsS} = 5.04 \text{ mm} \pm 0.02$ ;  $h_{rNAW1050} = 5.01 \text{ mm} \pm 0.02$ ). Hier: zwei stark unterschiedliche Werkstoffe

Es konnte folglich gezeigt werden, dass eine Minimierung der Napfbodendickenschwankung mit dem Stoffflussregelsystem möglich und die Prozessrobustheit signifikant verbessert werden kann. Weiterhin konnte der Nachweis erbracht werden, dass trotz Verwendung eines auf einem Hydraulikzylinder montierten Gegenstempels die erzielbaren Maßabweichungen am Bauteil innerhalb industriell erreichbarer Maßtoleranzen liegen. Ferner kann in der Visualisierung eine Zielbodendicke vorgegeben werden, die mit hoher Genauigkeit erreicht wird und so eine flexible Produktion ermöglicht.

#### 3.2 Herstellung extrem dünner Näpfe aus Stahl

Der Einsatz einer zusätzlichen Werkzeugbewegungsachse beim Napf-Rückwärts-Fließpressen in Form des Gegenstempels kann zur Reduzierung der Napfstempelkraft genutzt werden. Grund dafür bilden die durch die zusätzliche Werkzeugbewegung in die Napfwand eingeleiteten Zugspannungen. Den Ausführungen in /13/ folgend, stellt das Verhältnis von Gegenstempel- zu Stempelgeschwindigkeit  $V = V_{CP}/V_P = 0.64$  ein hinsichtlich der maximalen Stempelkraftreduzierung ideales Verhältnis dar. Dieses Verhältnis vermeide eine Relativbewegung zwischen Napf und Matrize. Aufgrund der Tatsache, dass die Stößelgeschwindigkeit bauartbedingt nicht konstant ist, muss für die Einhaltung eines konstanten Verhältnisses V eine geregelte Gegenstempelbewegung erfolgen. In Abbildung 3.4 ist die im Rahmen einer numerischen Sensitivitätsanalyse generierte Antwortfläche der Stempelkraft in Abhängigkeit vom Reibfaktor sowie vom Geschwindigkeitsverhältnis von Gegenstempel- zu Stempelgeschwindigkeit gezeigt. Für Geschwindigkeitsverhältnisse V > 0.7kommt es zu einem signifikanten Abfall der für die Umformung benötigten Stempelkraft. Für Geschwindigkeitsverhältnisse V < 0.7 bildet sich bei konstanten Reibungsbedingungen ein plateauähnlicher Verlauf aus. Die in /13/ erzielten theoretischen Ergebnisse konnten anhand der numerischen Sensitivitätsanalyse bestätigt werden.

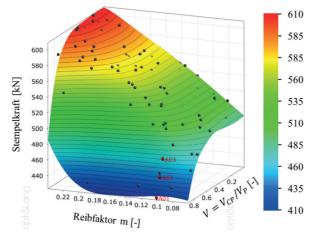


Abbildung 3.4: Stempelkraft in Abhängigkeit des Reibfaktors m und dem Geschwindigkeitsverhältnis (MLS Approximation, CoP: 93 %, 16MnCrS5,  $\varepsilon_{\rm A}$ =0.8, A01: (m=0.1, V=0.9), A02: (m=0.1, V=0.85), A03: (m=0.1, V=0.8))

Ziel der experimentellen Untersuchungen stellte die Herstellung extrem dünner Näpfe (Wanddicke s < 1 mm) dar. Nach /14/ sind Wanddicken von unter einem Millimeter bzw. bezogene Querschnittsänderungen von  $\varepsilon_{_{\! A}} = 0.8$  für Stahlwerkstoffe aufgrund der zu erwartenden Stempelüberbelastung nicht zu erreichen. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde daher in der Visualisierung eine Kraftüberwachung zum Schutz des Napfstempels vor Überlast vorgesehen. Die Grenze von 480 kN führt zu einer Stempelspannung von  $\sigma_{_{\! max}} = 2600$  MPa. Anhand Abbildung 3.5 wird deutlich, dass für das Geschwindigkeitsverhältnis V = 0.8 die voreingestellte Grenze erreicht und die Stößelbewegung unterbrochen wird. Geschwindigkeitsverhältnisse von V > 0.8 führen hingegen zu einer ausreichenden Reduzierung der Napfstempelkraft und erlauben die Herstellung von Näpfen mit extrem dünnen Napfwänden von s = 0.875 mm aus 16MnCrS5.

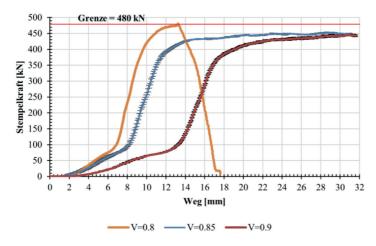


Abbildung 3.5: Stempelkraft in Abhängigkeit des Umformweges und des Geschwindigkeitsverhältnisses V (16Mn-CrS5,  $\varepsilon_A$ =0.8)

In Abbildung 3.6 wird noch einmal das Potential eines mitbewegten Gegenstempels beim Napf-Rückwärts-Fließpressen zur Senkung der Stempelbelastung gezeigt. Selbst bei Verwendung von hochfesten Werkzeugstählen stellt das Querschnittsverhältnis  $\epsilon_{\rm A}$ = 0.8 nach /14/ ein kritisches Verhältnis dar. Durch die Möglichkeit mittels des Stoffflussregelsystems die Napfstempelkraft signifikant zu senken, können Näpfe mit sehr dünnen Wänden hergestellt werden. Das hier erstmalig vorgestellte System leistet somit einen Beitrag zur Herstellung von Leichtbaukomponenten.

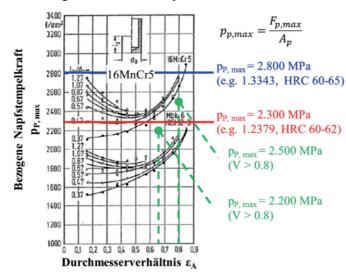


Abbildung 3.6: Bezogene Napfstempelkraft in Abhängigkeit des Verhältnis ε<sub>Λ</sub> nach /14/

#### 4 Fügen durch Umformen

Das Fügen durch Umformen (auch Umformfügen, mechanisches Fügen oder wärmearmes Fügen genannt) stellt nach DIN 8593-5 /15/ eine Sammelbenennung für die Verfahren dar, bei denen entweder die Fügeteile oder Hilfsfügeteile lokal oder auch vollständig umgeformt werden. Gemäß DIN8593-5 /15/ und Matthes /16/ sind derartig hergestellte Verbindungen im Allgemeinen durch Formschluss gegen ungewolltes Lösen gesichert. Zusätzlich tritt beim umformtechnischen Fügen im Bereich der Massivumformung ein Kraftschluss auf, wodurch eine Kombination aus mindestens zwei Verbindungstypen entsteht. Für die Prozesse des Kaltpressschweißens und des gemeinsamen Fließpressens treten lokal unter bestimmten Voraussetzungen zudem stoffschlüssige Verbindungen auf.

Wie die Bezeichnung "wärmearmes" Fügen erkennen lässt, besteht ein wesentlicher Vorteil dieser Verfahrenskombination darin, dass derartige Fügeverbindungen ohne thermische Energie hergestellt und somit metallurgische Kerben vermieden werden können /16/. Weitere wesentliche Vor- und Nachteile des Fügens durch Umformen sind:

- Herstellung gradierter Bauteile ohne Materialverlust
- Ausnutzung der Vorteile einer umformtechnischen Fertigung, wie Kaltverfestigung, kurze Taktzeiten, Fertigung in net-shape-Qualität (einbaufertig)
- Erweiterung der Vorteile der fügetechnischen Fertigung, wie das Verbinden artverschiedener Werkstoffe oder Fügen ohne thermische Belastung
- geringerer Fertigungsaufwand im Vergleich zu einer sequentiellen Fertigung, da ein Fügepartner bzw. der Fügebereich erst während des Umformfügeprozesses entsteht
- Vernachlässigung von Tolerierungsanforderungen an die Fügepartner
- die Herstellung von form-, reib-, bzw. kraft-, und bedingt stoffschlüssigen Verbindungen wird möglich
- · hohe Wirtschaftlichkeit
- bedingtes Fügen von Werkstücken mit Oberflächenbeschichtungen ohne Mehraufwand
- hohe Prozesssicherheit
- keine Emissionen

Am Institut für Umformtechnik wurden auf dem Gebiet des umformtechnischen Fügens im Bereich der Kaltmassivumformung zwei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekte bearbeitet.

Im Rahmen des ersten Projektes wird das umformtechnische Fügen einer gehärteten, dünnwandigen Nabe aus 42CrMo4 mittels Quer-Fließpressen einer Welle aus 16MnCrS5 (GKZ-Zustand) untersucht (s. Abbildung 4.1). Die Untersuchungen zu den Gebrauchseigenschaften derartig gefügter Verbindungen, wie beispielsweise der dynamischen Festigkeit und Lebensdauer und Torsionslast, erfolgt durch einen Projektpartner an der Universität Stuttgart. Eine derartige Herstellung von Welle-Nabe-Verbindungen erlaubt neben der Einsparung der meist spanenden Fertigbearbeitung der Fügefläche an der Wellenaußenseite den Einsatz last-optimierter Nabeninnenprofile. Zusätzlich zur formschlüssigen Verbindung beider Bauteile beim Einsatz innenprofilierter Naben ergibt sich infolge der Umformung der Welle ein Fugendruck in der Kontaktfläche zwischen Welle und Nabe. Derartige unlösbare form- und kraftschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen erlauben daher zusätzlich eine deutliche Steigerung der Verbindungsqualität hinsichtlich ihrer Lebensdauer unter Torsionslast. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens am Institut für Umformtechnik bildet somit primär die Verfahrensentwicklung und die Ermittlung relevanter Einflussparameter für das Umformfügen einer solchen Welle-Nabe-Verbindung durch Quer-Fließpressen.

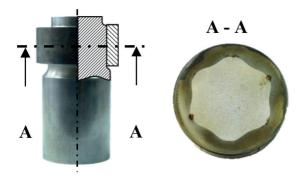


Abbildung 4.1: Vereinfachte Welle-Nabe-Verbindung mit einer Profilexzentrizität von 0,8 mm und 6 Mitnehmern (Profiltyp: komplexer Trochoid 1. Ordnung)

Die beiden wichtigsten Herausforderungen bei der Herstellung und den sich einstellenden späteren Gebrauchseigenschaften derartiger Verbindungstypen mittels Umformung der Welle liegen in der Einstellung optimaler tribologischer Bedingungen in der Kontaktfläche und der Auswahl eines optimierten Nabeninnenprofils. Während beim Prozess möglichst geringe Gleitreibungszahlen in der Kontaktfläche von Welle und Nabe auftreten sollten, um die Stempelkraft in Bezug auf die Formfüllung gering zu halten, wird für eine hohe Übertragungskapazität des kraftschlüssigen Anteils der Verbindung ein möglichst hoher Haftreibungswert gefordert. Hinsichtlich des Nabeninnenprofils sind sowohl die Übertragungsfähigkeit des formschlüssigen Anteils der Verbindung, die radiale Nabendeformation, ein homogener Kontaktfugendruck, die Kerbwirkung oder auch eine gleichmäßige Formfüllung bei geringen Stempelkräften bestmöglich aufeinander abzustimmen.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes betrachteten Nabeninnenprofile werden durch folgende direkte Profilparameter definiert:

- Nenndurchmesser
- · Profilexzentrizität e
- Mitnehmer- / Zähneanzahl n
- Profiltyp (Polygon, Epitrochoid, Hypotrochoid, komplexer Trochoid)
- Ordnung des Profils sowie die Anteile der unterschiedlichen Profiltypen

Mit Ausnahme des Nenndurchmessers, welcher mit 25 mm als konstant festgelegt wurde, wurden die Einflüsse der restlichen Parameter in den numerischen und experimentellen Untersuchungen ermittelt. Neben diesen "direkten" Profilparametern, die sich in den Grundgleichungen der Profile wiederfinden, werden zusätzlich "indirekte" Profilparameter zur Beurteilung des Einflüsses auf den Umformfügeprozess und die Gebrauchseigenschaften herangezogen, die durch Ableitung oder Integration der Grundgleichung ermittelt werden können. Hierzu zählen beispielsweise der Flankenwinkel, die Radien am Profiltief- bzw. -hochpunkt oder auch das Nabeninnenvolumen bzw. die Nabenquerschnittsfläche. Diese indirekten Profilparameter erlauben beispielsweise eine Betrachtung oder den Vergleich von Vorgangsgrößen oder Gebrauchseigenschaften über mehrere Versuchsreihen der direk-

ten Profilparameter hinweg. So beschreibt beispielswiese der Kennwert "Flankenwinkel/Kopfradius²" die Mitnehmerform. Je größer dieser Wert, desto spitzer ist die Mitnehmerform.

Bei der Betrachtung der axial übertragbaren Haftkräfte aufgrund der kraft- bzw. reibschlüssigen Art derartiger Verbindungen zeigt sich, dass mit zunehmender Stempelkraft beim Umformfügen auch höhere Haftkräfte zu erwarten sind. Beide Ergebnisse hängen stark von der Profilform ab, weswegen an dieser Stelle der indirekte Profilparameter "Flankenwinkel/Kopfradius2" als Vergleichsbasis herangezogen wird und die folgenden Untersuchungsergebnisse darauf bezogen werden. In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass mit Zunahme dieses Parameters höhere Auspress- bzw. Haftkräfte auftreten. Allerdings liegt kein proportionaler Zusammenhang vor. Vielmehr zeigt die Zunahme der Haftkraft mit spitzer werdendem Profil einen logarithmischen Verlauf. Aufgrund von Fertigungseinschränkungen für die Nabeninnenprofile, welche im Rahmen dieses Projektes durch Fräsen hergestellt wurden, hinsichtlich der Erzeugung sehr kleiner Kopfradien ergibt sich für den Parameter "Flankenwinkel/Kopfradius2" ein eher theoretischer Maximalwert von 100 °/mm2 (Flankenwinkel: 90°; Kopfradius: 0,95 mm). Somit ergibt sich durch Extrapolation der für diesen Verbindungstyp experimentell ermittelten Haftkraft, die maßgeblich durch die mittlere Wanddicke, das tribologische System, die Werkstoffkombination und die Werkzeugvorspannung definiert wird, ein maximaler Haftkraftwert in Höhe von 23,3 kN.

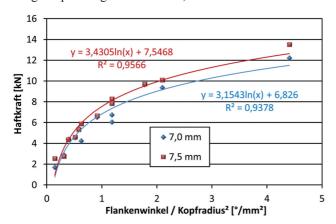
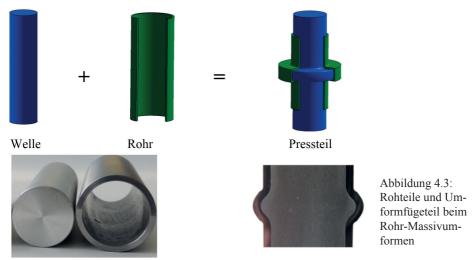


Abbildung 4.2: Haftkraft beim Auspressen der Nabe in Abhängigkeit indirekter Profilparameter

Als Teilprojekt des Schwerpunktprogramms 1640 "Fügen durch plastische Deformation" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird im zweiten Forschungsprojekt zum Umformfügen die "Verfahrensentwicklung zur Rohr-Massivumformung beim Quer-Fließpressen von Flanschen und Bunden mit und ohne Außenkontur" (DFG: LI 1556/33-1) am Institut für Umformtechnik betrachtet. Das Ziel dieses Projektes ist die Verfahrensentwicklung zum gemeinsamen Quer-Fließpressen zweier zylindrischer Rohteile, von denen eines rohrförmig mit deutlich geringerer Wanddicke ausgeführt ist und das andere entweder mit

Voll- oder ebenfalls Hohlquerschnitt eingesetzt werden soll. Das Verfahren ist angelehnt an das Innenhochdruckumformen jedoch mit dem Unterschied, dass der Innendruck auf das außenliegende Rohr nicht durch ein hydraulisches Medium erzeugt wird, sondern durch ein physisches Halbzeug. Das innenliegende Werkstück bildet mit dem außenliegenden Rohr jene Komponenten, die kraftschlüssig miteinander verbunden werden. Folgende Abbildung stellt die Fügekomponenten exemplarisch dar.



Anhand numerischer und experimenteller Untersuchungen wurde festgestellt, dass in Abhängigkeit von der Festigkeit des äußeren Rohres, der Dicke des äußeren Rohres und des Grades der Stößelzustellung ein Spalt im Bereich des Flansches zwischen dem inneren und äußeren Werkstück entsteht. Anhand von Abbildung 4.4 wird dieser Effekt exemplarisch dargestellt.



Abbildung 4.4: Größe des Flanschspaltes in Abhängigkeit von der Stößelzustellung

Dabei handelt es sich um die Werkstoffkombination eines Aluminiumstabes aus EN AW 6082 für das innere Werkstück und ein 1mm dickes Stahlrohr (42CrMoS4) auf der Außenseite. In diesem Fall entsteht der Spalt direkt zum Beginn des Quer-Fließpressprozesses und schließt sich wieder mit größer werdendem Flansch. Je nach Ausbildung des Flansches

und der damit verbundenen Größe der Reibkontaktfläche werden unterschiedliche Torsionsfestigkeiten zwischen den Komponenten erreicht. Um neben der Torsionsfestigkeit durch Reibschluss eine weitere Erhöhung derselben durch Formschluss zu erlangen, wird in einem weiteren Schritt eine Außenkontur am Flansch möglichst ohne weitere Spaltbildung angepresst. Das Fernziel dieses Projektes ist die Herstellung eines hohlen Werkstoffverbunds, indem zwei Rohre durch Quer-Fließpressen miteinander form- und kraftschlüssig verbunden werden.

Weitere ausführliche Untersuchungsergebnisse zu diesen beiden Forschungsprojekten finden sich in /18/.

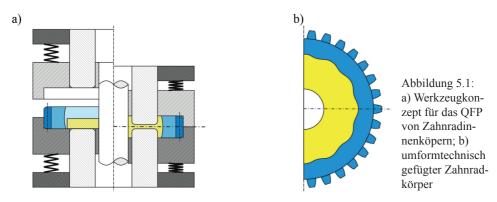
#### 5 Zukunftsprojekt Massiver Leichtbau

Der Automobilbau ist seit Jahrzehnten volkswirtschaftlich von hoher Wichtigkeit und steht gegenwärtig mit der Reduzierung des CO2-Ausstoßes vor großen Herausforderungen. Hinsichtlich der Karosserie eines Fahrzeugs leisten bereits seit Jahren innovative Verfahren oder Werkstoffe im Bereich der Blechumformung einen enormen Beitrag zum Automobilleichtbau. Besonders hervorzuheben sind hierbei die sogenannten Ultra Light Steel Auto (ULSA)-Projekte, die zwischen den Jahren 1994 und 2002 von internationalen Projektgruppen durchgeführt wurden. In einem Mittelklassefahrzeug machen die Karosserie sowie Türen und Anbauteile (Blechteile) mit einem Gewicht von ca. 400 kg einen großen Teil des Fahrzeuggesamtgewichts aus. Demgegenüber stellen massiv umgeformte Komponenten mindestens den gleichen Gewichtsanteil am Gesamtfahrzeug dar. Daher wurde ausgehend vom Gedanken der ULSA-Projekte im Jahr 2012 in Deutschland die Initiative "Massiver Leichtbau" gegründet. Bei dieser Initiative beteiligen sich neben neun Stahlherstellern auch elf Unternehmen aus der Massivumformung, die gemeinsam an einem Mittelklassefahrzeug das Potential zur Gewichtseinsparung unter Berücksichtigung von Alternativen in Werkstoffwahl, Fertigungstechnik und Bauteildesign aufzeigen konnten. Vorläufige Abschätzungen ergaben, dass bei einer Reihe von Bauteilen, bezogen auf den derzeitigen Stand der Technik, ca. 25 % signifikante primäre Gewichtseinsparungen sowie daraus resultierend sekundäre Einsparungen erzielt werden können /19/.

In der Kaltmassivumformung werden mittels des Kaltfließpressens dünnwandige hohle Bauteile (z.B. Kolbenbolzen) unter werkstofflichen und prozesstechnischen Ansätzen zur Steigerung der Bauteilfestigkeit bei gleichzeitiger Gewichtminimierung hergestellt. Dabei sollen technologische Grenzen bei der umformtechnischen Erzeugung von dünnwandigen Bauteilen durch das kombinierte Napf-Fließpressen und durch die Verwendung geregelter Bewegungen unterschiedlicher Werkzeugkomponenten erweitert werden. Die hier in Betracht gezogenen Prozesse stellen eine Kombination mehrerer elementarer Fließpressverfahren sowohl im Rahmen einer mehrstufigen Fertigungsfolge als auch innerhalb einer Umformstufe dar. Die Anwendung von konventionellen und neuartigen höherfesten Stahlsorten sowie die Einbringung der Kaltverfestigung bei der Erzeugung von hülsenförmigen

Bauteilen (Kolbenbolzen) ermöglicht eine Reduzierung der Wanddicke und somit des Bauteilgewichtes bei gleich bleibender zulässiger Bauteilbelastung.

Im Rahmen des Teilprojektes "Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponenten-Verfahren" soll beispielweise ein vergüteter Zahnkranz eingesetzt werden und simultan bei der umformtechnischen Herstellung des Zahnradkörpers mit diesem gefügt werden. Das Verfahrensprinzip ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Hierbei wird ein scheibenförmiges Rohteil mittels zweier geteilter, ringförmiger, lokal von beiden Seiten genapft und sowohl ein rückwärts als auch vorwärts gerichteter Werkstofffluss erzeugt. Zur Herstellung einer formschlüssigen, unlösbaren Verbindung soll der Zahnkranz in axialer Richtung einen Hinterschnitt und in tangentialer Richtung ein Innenprofil aufweisen.



Ein derartig hergestelltes Zahnrad mit einer zylindrischen Innenkontur wird dann mittels eines thermischen Quer-Pressverbandes mit einer Welle gefügt. Ebenfalls soll bei der umformtechnischen Herstellung des Zahnradkörpers gleichzeitig ein Innenprofil des Zahnradkörpers, z.B. eine Keilwelle, erzeugt werden, welches die formschlüssige Verbindung zu einer Welle erlaubt. Neben diesen beiden Verfahrensvarianten, welche beide eine weitere Fügeoperation zur Montage des Verbundzahnrades mit einer Welle benötigen, wird eine Verbindung von Zahnradkörper und Welle ebenfalls mit der Herstellung des Verbundzahnrades realisiert. Als Werkstoff für den Zahnradkörper soll sowohl Stahl als auch Aluminium betrachtet werden. Die im Rahmen dieser Untersuchung geplanten Verbundzahnradvarianten werden schließlich einer Funktions- und Lebensdauerprüfung unterzogen (Abbildung 5.2).

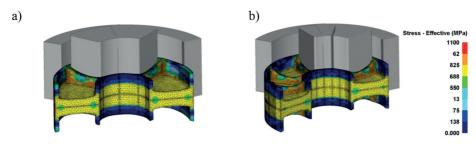


Abbildung 5.2: a) vierfach geteilter Stempel; b) neunfach geteilter Stempel zum Pressen eines Zahnradinnenkörpers

In einem weiteren Teilprojekt werden die lokalen Bauteileigenschaften nach dem Umformprozess für die Festigkeitsberechnung betrachtet. In der strukturmechanischen Untersuchung werden belastungsrichtungsabhängige Materialeigenschaften bestimmt, um die lokalen Festigkeitseigenschaften der Bauteile charakterisieren zu können. Weiterhin wird eine Methodik zur Bestimmung geeigneter Zielfunktionen zur effizienten virtuellen Prozessauslegung für die Herstellung leichterer Kaltfließpressteile entwickelt.

Neben der Minimierung der Bauteilmasse und der Erfüllung von Festigkeitsanforderungen müssen Nebenbedingungen aus der Umformung und Zerspanung erfüllt sein. Diese Erkenntnisse sollen zur Auslegung von optimierten und robusten Umformprozessen zur Herstellung von Demonstratorbauteilen unter Berücksichtigung und gezielten Einstellung der lokalen Bauteileigenschaften genutzt werden. Dazu müssen zunächst die signifikanten Prozess- und Werkzeugparameter der FEM-Umformsimulationsmodelle parametrisiert werden.

Die Berücksichtigung der Veränderung lokaler Bauteileigenschaften durch evtl. notwendige Zerspanprozesse erfolgt mithilfe integraler, analytischer Beziehungen. Die Bewertung der einzelnen Prozessdesigns erfolgt mithilfe der Zielfunktionen auf Basis der strukturmechanischen Berechnungen. Die Ergebnisse werden in einem Demonstratorbauteil umgesetzt, welches gefertigt wird und auf seine mechanischen Eigenschaften geprüft wird. Die mittels der Kalt- und Warmmassivumformung hergestellten, leichtbauoptimierten Bauteile können auf weitere Bauteile des Antriebsstrangs und Fahrwerks, die ähnlichen Belastungen ausgesetzt sind, übertragen werden und somit einen Beitrag zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Automobilen leisten.

## 6 Grundlagenuntersuchungen zum Hohl-Quer-Fließpressen von Nebenformelementen

Wie bereits ausgeführt, können zur Gewichtsreduktion von Bauteilen prinzipiell zwei Wege beschritten bzw. kombiniert werden. Zum einen kann die Masse durch Verwendung eines Werkstoffs mit geringerem spezifischem Gewicht und zum anderen durch topologi-

sche Optimierung, d.h. Aussparung von gering belasteten Werkstückbereichen reduziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei technologische Methoden untersucht, mit welchen hochfeste Leichtbaukomponenten mittels Quer-Fließpressen hergestellt werden können. Im engeren Fokus stehen das Hohl-Quer-Fließpressen von rohrförmigen Halbzeugen ohne Querdorn und zum anderen das Quer-Fließpressen mit Überlagerung einer Druckspannung.

Basierend auf etablierten Umformprozessen wird das Hohl-Quer-Fließpressen von rohrförmigen Rohteilen ohne Querdorn derzeit am IFU weiterentwickelt. Dieses Verfahren erweitert das mittels Hohl-Quer-Fließpressen herstellbare Bauteilspektrum um hohle, geometrisch komplexe Geometrien. Unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Formenordnung für das konventionelle Quer-Fließ-Pressen wurden für das Hohl-Quer-Fließpressen ohne Innendorn ebenfalls geeignete Bauteilgeometrien definiert (Abbildung 6.1 a). Untersucht werden Bauteile in 3 Komplexitätsstufen, deren Nebenformelemente jeweils senkrecht zur Hauptachse liegen.

Verwendet werden für die Untersuchungen vorgebohrte Rohlinge aus Aluminium (EN AW 6060) sowie aus Stahl (C4C) mit den Wanddicken 3mm, 5mm und 7mm. Um die Verfahrensgrenzen des neu entwickelten Quer-Fließ-Prozesses zu ermitteln wurden die ersten Versuche ohne geregelte Werkzeugaktivteile durchgeführt. Wie auch durch Simulationen bestätigt, sind hohe Formabweichungen zur Sollgeometrie im Bereich der Umformzone (Abbildung 6.1 b) sowie Abweichungen bei der Rundheit der Nebenformelemente (Abbildung 6.1 c) zu beobachten.

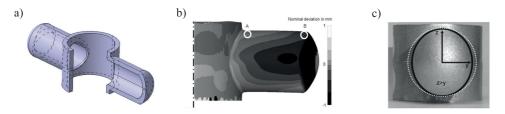


Abbildung 6.1: Bauteilabweichungen am gepressten Bauteil

Diese auftretende geometrische Abweichung der Nebenformelemente ist auf eine, für das Quer-Fließpressen typische, ungleichmäßig ausgeprägte Materialfließgeschwindigkeit zwischen Ober- bzw. Unterseite und in den Flanken der Nebenformelemente zurückzuführen.

Um den Formabweichungen entgegenwirken zu können, erfolgt in einem nächsten Arbeitsschritt eine Manipulation der formgebenden Werkzeugteile. Dies kann unter anderem durch eine Vorhaltegeometrie (Erhöhung des hydrostatischen Druckes) sowie durch eine gezielte Änderung der formgebenden Matrizenöffnung erfolgen. Eine weitere Möglichkeit, die Formabweichungen am Bauteil zu minimieren, besteht in der Aufbringung einer

konstanten oder weggesteuerten Gegenkraft auf die Stirnflächen der Nebenformelemente, wodurch eine Erhöhung des hydrostatischen Druckes hervorgerufen wird (siehe Abbildung 6.2). Neben der geringeren geometrischen Abweichung ist hierbei noch eine Anhebung der Versagensgrenze des Umformprozesses zu erwarten. Das Einleiten der Gegenkraft in das Werkstück geschieht mit der Hilfe von regelbaren hydraulischen Zylindern, die horizontal in der Schließebene des Werkzeugs angebracht sind.

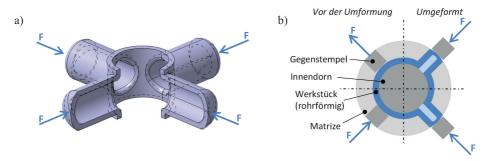


Abbildung 6.2: Funktionsprinzip des Querfließpressens mit überlagerter Gegenkraft

Ein weiteres Gebiet ist die Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf hohle Flansche (Abbildung 6.3 a). Hierbei soll ein Rohrabschnitt zusammengestaucht werden, so dass sich in der Bauteilmitte ein Flansch ausbildet. Im Folgenden wird erwartet, dass der hohle Flansch aufgrund mangelnder Stützwirkung in sich zusammenfällt (Abbildung 6.3 b). Durch das Aufbringen einer Stützkraft auf die Flanschstirnseite (Abbildung 6.3 c) bzw. des daraus folgenden axialasymmetrischen Spannungszustandes soll ein Zusammenfallen des Hohlflansches herausgezögert bzw. verhindert werden.

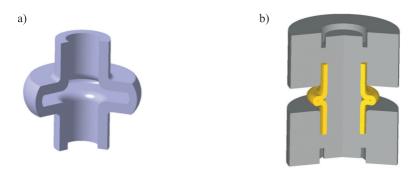


Abbildung 6.3: a) Sollgeometrie eines Bauteils mit hohlem Flansch b) Einfallen des Flansches am Bauteil (Knickbauchen)

Diese Arbeiten wurden einem gemeinsamen DFG-Projekt des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) aus Dortmund und des Instituts für Umformtechnik (IFU) aus Stuttgart entnommen.

### 7 Aktuelle Untersuchungen zur Verbesserung der Schnittqualität beim Hochgeschwindigkeitsscherschneiden

Im Rahmen eines ZIM-Projektes werden derzeit am Institut für Umformtechnik Hochgeschwindigkeitsscherversuche von Stangen und Draht durchgeführt. Bei diesen experimentellen Untersuchungen wird der Scherprozess mit einer zusätzlichen Kraftkomponente wie Zug, Druck, Biegung und Torsion überlagert, um eine Verbesserung der geometrischen Eigenschaften der Trennfläche für die weiteren umformtechnischen Fertigungsschritte zu erreichen.

#### 7.1 Stand der Technik

Das Hochgeschwindigkeitsscherschneiden (HGSS) gehört zu den Fertigungsverfahren zum Herstellen von hochpräzisen Halbzeugen für nachgeschaltete Verfahren wie das Kaltfließpressen oder Präzisionsschmieden. Die hohen Schergeschwindigkeiten nach der Definition /20/ v > 10 m/s haben verschiedene Auswirkungen auf Werkstoffe und auf den Trennprozess. In der gängigen Literatur wird hierbei die adiabatische Erwärmung in der Scherzone als Ursache identifiziert /21/. Bei hohen Geschwindigkeiten fließt die Wärme nicht schnell genug aus dem durch starke Scherung belasteten Querschnitt ab. Die kurzfristige lokale Erwärmung führt dort zu einem Abfall der Fließspannung und dies verursacht eine Lokalisierung der Dehnung in einer schmalen Werkstoffzone (<100 µm) und damit in einem schmalen adiabatischen Scherband /22/.



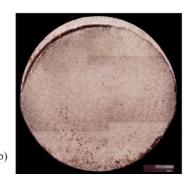


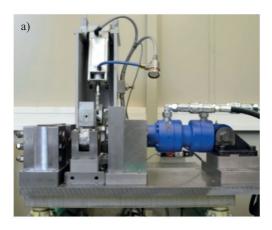
Abbildung 7.1: a) gescherte Probe (16MnCrS5) mit v = 0.1m/sec b) gescherte Probe (16MnCrS5) mit v = 8.0m/sec

Die Eingrenzung der plastischen Zone in Draht- bzw. Stangenquerschnitt hängt im Wesentlichen von den Faktoren Werkstofftemperatur, Formänderung und Formänderungsge-

schwindigkeit ab. Der einsetzende Riss folgt dann dieser entfestigten Fläche, Restrisse in der Scherfläche treten nicht auf. Adiabatische Scherbänder bilden sich bevorzugt in Werkstoffen mit geringer Verfestigung und mit starker Temperaturabhängigkeit der plastischen Fließspannung. Dazu gehören kubisch raumzentrierte Metalle, also zum Beispiel ferritische Stähle mit hoher Festigkeit. Mit hohen Schergeschwindigkeiten lassen sich nach /23/ Kohlenstoffstähle mit einem Kohlenstoffgehalt über 0,15 %, legierte und karbidreiche Stähle sowie ausscheidungsreiche Aluminiumlegierungen gut trennen.

# 7.2 Anlagenkonzept zum Hochgeschwindigkeitsscherschneiden mit Spannungsüberlagerung

In einer numerischen Untersuchung zum Hochgeschwindigkeitsscherschneiden wurde eine Spannungsüberlagerung mit einer Zugkraft untersucht. Durch diese axiale Belastung des Halbzeugs mit Zugkräften entstehen im Werkstoff Spannungen, durch welche das Formänderungsvermögen reduziert wird. Dadurch kann die Rissbildung früher initiiert werden und damit wird die Höhe des Kanteneinzugs reduziert. In einer weiteren numerischen Untersuchung wurde eine Spannungsüberlagerung mittels Torsion betrachtet. Auch hier konnte ein vorzeitiges Erreichen des Materialversagens detektiert werden. Basierend auf diesen numerischen Untersuchungen wurden zwei unabhängige Werkzeugkonzepte entwickelt. In Abbildung 7.2 a) ist das Werkzeugkonzept zur HGSS mit Zugspannungsüberlagerung und in Abbildung 7.2 b)ist das Konzept zum torsionsüberlagerten HGSS dargestellt.



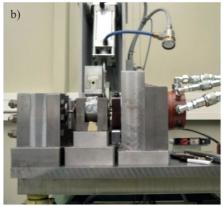
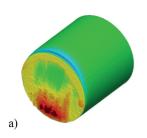


Abbildung 7.2: a) Versuchsanlage zum HGSS mit Zugspannung b) Versuchsanlage zum HGSS mit Torsionsspannung

# 7.3 Aktuelle Ergebnisse zum Hochgeschwindigkeitsscherschneiden7.3.1 Vergleich zwischen konventionellen und hochgeschwindigkeits Verfahren

In der ersten Untersuchungsreihe wurde der Einfluss der Geschwindigkeit auf die geometrischen Eigenschaften der Scherproben untersucht. Dabei wurden mit dem Versuchswerkzeug die Scherproben mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (0,1 mm/sec und 8,0 m/sec). getrennt. Hierbei wurde ein Einsatzstahl (16MnCrS5) betrachtet und anschließend mit der Idealgeometrie eines Zylinders verglichen (s. Abbildung 7.3). Anhand des Flächenvergleichs zeigt sich, dass die konventionell gescherte Probe eine größere Abweichung bzw. Unebenheit im Bereich der Scherfläche aufweist.



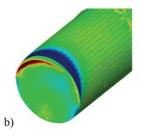
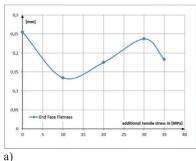


Abbildung 7.3: a) gescherte Probe (16MnCrS5) mit v=0,1mm/sec b) gescherte Probe (16MnCrS5) mit v=8,0m/sec

Dieses Verhalten des Werkstoffs in Bezug auf unterschiedliche Geschwindigkeiten wird in verschiedenen Publikationen erwähnt. Der einsetzende Riss entsteht bei hohen Prozessgeschwindigkeiten entlang der adiabatischen Scherbänder und somit entsteht eine deutlich bessere Trennfläche bzw. homogenere Bruchfläche. In diesem Beispiel beträgt die Unebenheit der Bruchfläche 0,39 mm beim konventionellen Verfahren (Abbildung 7.3 a) und 0,07 mm für das HGSS-Verfahren (Abbildung 7.3 b).

### 7.3.2 Vergleich zwischen konventionellen und Hochgeschwindigkeitsverfahren

In der zweiten Untersuchungsreihe wurde das modifizierte Werkzeugmodul (s. Abbildung 7.2 a) für die Zugspannungsüberlagerung beim HGSS verwendet /24/. Hierbei sollte ein früheres Materialversagen initiiert werden. Basierend auf einer numerischen Studie sollte der Kanteneinzug des Scherrohlings reduziert werden.



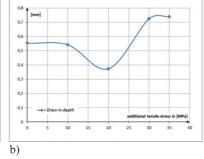


Abbildung 7.4: Einfluss einer Zugspannungsüberlagerung auf a) die Ebenheit b) den Kanteneinzugshöhe

Bei der bisher durchgeführten Versuchsreihe mit einer Aluminiumlegierung (EN AW 6082 weichgeglüht) konnten Verbesserungen erzielt werden. Bei der Zugspannungsüberlagerung konnte die Ebenheit der Scherproben deutlich verbessert werden (Abbildung 7.4 a). Die Unebenheit konnte von 0,25 mm für das HGSS ohne Spannungsüberlagerung auf einen Wert von ca. 0,13 mm für eine Spannungsüberlagerung mit 10 MPa reduziert werden. Der Kanteneinzug konnte von 0,55 mm auf einen Wert von 0,38 mm reduziert werden (Abbildung 7.4 b). Hierbei wurde eine Überlagerung mit 20 MPa benötigt.

Eine Spannungsüberlagerung zeigt eine Verbesserung der geometrischen Eigenschaften. Die Ebenheit der Scherflächen wird deutlich verbessert, solang die Streckgrenze der Probe durch die Zugkraft nicht überschritten wird. Sobald dieser Wert überschritten wird, werden die Ebenheit und der Kanteneinzug der Scherfläche wieder schlechter.

#### 7.3.3 Ausblick

In einer weiteren Untersuchungsreihe soll durch die Einbringung einer Schubspannung durch Torsionsbelastung das Halbzeug zusätzlich belastet werden (Abbildung 7.2 b). Dadurch wird eine geringere Scherkraft benötigt, da die Spannungen in der Querschnittsfläche des Werkstoffs bereits die Streckgrenze erreicht werden. Bei den numerischen Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass auch hier eine Reduzierung des Kanteneinzugs erreichbar ist. Diese Tatsachen müssen nun in einer experimentellen Studie noch verifiziert werden und mit den vorhandenen Messtechniken am Institut untersucht werden. Parallel zu den weiteren Versuchsreihen werden die Scherflächen der Proben bezüglich ihrer Oberflächenrauigkeiten untersucht. Hier werden insgesamt drei Bereiche der Probenoberfläche mit einem optischen Messsystem betrachtet. Dabei soll untersucht werden, ob eine Spannungsüberlagerung einen positiven Einfluss auf die Scherfläche hat und die Oberflächenrauigkeiten der Trennflächen reduziert werden können.

# 8 Arbeitskreis zur Erforschung und Entwicklung des Kaltpressens von Stahl

Der Arbeitskreis für Entwicklung und Erforschung des Kaltpressens wurde 1963 auf Initiative von Professor Kienzle gegründet und ist seither am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart beheimatet. Im Jahre 2001 wurde der Arbeitskreis in den Fördererkreis Umformtechnik e.V. eingegliedert. Themenschwerpunkte der Forschungsvorhaben des Arbeitskreises werden von den Mitgliedern definiert und sind in den Bereich der angewandten industriellen Forschung einzuordnen. Diese Aufgabenstellungen werden vom IFU, in Abstimmung mit einem projektbegleitenden Ausschuss, bearbeitet. Die Durchführung eines Forschungsvorhabens erfolgt in der Regel am Institut für Umformtechnik oder gegebenenfalls bei einem Arbeitskreismitglied in Zusammenarbeit mit dem IFU.

Der Arbeitskreis für Entwicklung und Erforschung des Kaltpressens hat in der jüngsten Vergangenheit folgende Forschungsschwerpunkte verfolgt:

- Experimentelle Untersuchungen zum Quer-Fließpressen mit Druckspannungsüberlagerung
- Einsatz von Keramikmatrizen für das Voll-Vorwärts-Fließpressen
- Ermittlung und Quantifizierung von Potentialen der Umformung im Temperaturbereich von 20°C bis 500 °C ("Lauwarmumformung")

Im Arbeitskreis wird derzeit das Projekt mit dem Titel *Untersuchungen zur Verlängerung der Werkzeugstandzeit beim Kaltfließpressen durch Einsatz einer servomechanischen Presse bearbeitet.* 

Erstes Teilziel bildet hierbei der Aufbau eines Prüfstandes zur experimentellen Untersuchung des Einflusses des Stoßimpulses auf die Oberflächenzerrüttung von Kaltmassivumformwerkzeugen. Es wird dabei bewusst auf einen realen Umformprozess verzichtet, um eine Trennung der Verschleißmechanismen zu gewährleisten. Zur Modellierung der Umformkraft wird der regelbare servohydraulische Tischauswerfer einer neuen, im Jahre 2014 installierten, servomechanischen Kaltfließpresse aus dem Hause SCHULER eingesetzt (Abbildung 8.1).

#### **Technische Daten**

Nennkraft: 5000 kN

Nennkraftweg: 15 mm

Arbeitsvermögen: 95 kJ

Hubzahl: 3 – 45 min<sup>-1</sup>

Tischfläche: 850 mm x 800 mm

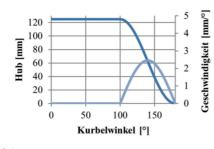
Einbauraum: 1160 mm

#### Servohydraulische Tisch- und Stößelauswerfer

Kraft: 500 kN

Hub: 125 mm bzw. 70 mm

Regelungsarten: Positionsgeregelt, Kraftgeregelt



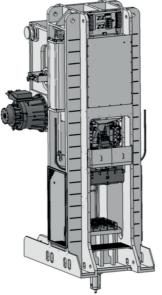


Abbildung 8.1: Technische Daten der servomechanischen Kaltfließpresse mit regelbaren, servohydraulischen Tischund Stößelauswerfern

Ferner wird eine Messmethodik zur Quantifizierung des Verschleisses in Form der Oberflächenzerrüttung infolge des Auftreffimpulses entwickelt, welche die Bestimmung des Stoßimpulses ermöglicht.

Nach Fertigstellung und Inbetriebnahme des Prüfstandes soll neben dem Einfluss des Auftreffstoßes der Einfluss verschiedener Werkzeugwerkstoffe, Oberflächenbehandlungen, Wärmebehandlungen sowie Prozesskräfte auf den Werkzeugverschleiss ab April 2015 untersucht werden

# 9 Arbeitskreis "Fließpressen von Aluminiumlegierungen" (in der Forschungsgesellschaft Umformtechnik mbh Stuttgart)

Die Fließpresstechnik mit dem Einsatz von Aluminiumlegierungen zählt zu einer Produktionstechnologie der Umformtechnik, mit der präzise Bauteile oft einbaufertig in einem Hub hergestellt werden können. Neben Kosteneffizienz und hoher Ausbringung zählt Aluminium wegen seiner geringen Dichte, hohen Korrosionsbeständigkeit oder Lebensmittelverträglichkeit neben Stahl zu dem wichtigsten Werkstoff in der Kaltfließpresstechnik. Zudem zeichnen sich Aluminiumlegierungen durch gute Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften aus, wie geringer Presskraftbedarf und hoher erreichbarer Umformgrad. Die weitere Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Kaltfließpressens von Aluminiumlegierungen ist eine wichtige Voraussetzung für den gezielten Einsatz von Leichtbauprodukten in mobilen Strukturen und die Zusammenarbeit von Industrie und Forschungsinstitut aufgrund der hohen Auslastung der Produktionsstandorte zum Teil unausweichlich. Nicht zuletzt deswegen besteht der Arbeitskreis "Fließpressen von Aluminiumlegierungen" seit mittlerweile 8 Jahren in der Forschungsgesellschaft Umformtechnik mbH und beschäftigt sich mit aktuellen Themen zum Umformen von Aluminiumlegierungen. Der Arbeitskreis ist ein Zusammenschluss von derzeit 9 Mitgliedern mit Vertreten aus der Fließpressindustrie, Pressenhersteller, Halbzeug- und Schmierstoffherstellern, der Oberflächenbearbeitung sowie Softwarehersteller für die Umformsimulation. Die derzeitigen Arbeitsfelder umfassen u.a. die Themen:

- Entwicklung neuer Schmierstoffe für die Lauwarmumformung von Aluminiumlegierungen
- Lauwarmumformung von Al- Legierungen in den Zustand T4- und T6 sowie Untersuchung des Einflusses der Wärmeentstehung auf die Festigkeit der umgeformten Komponenten
- Grundsatzuntersuchungen zum Umformfügen verschiedener Werkstoffe

In Hinblick auf die zukünftig höheren Produktionsmargen von Akkumulatorgehäusen für Elektroantriebe wurde zudem ein Schwerpunkt auf die Ermittlung von Verfahrensgrenzen beim Rückwärts-Fließpressen von rechteckigen Bauteilen gelegt. Dabei steht die Vorher-

sage von Rissen am Kragen des Rechteckbechers im Vordergrund, deren Entstehung durch numerische und experimentelle Untersuchungen näher betrachtet wird.

Die erarbeiteten Forschungsergebnisse stehen exklusiv den Mitgliedern des Arbeitskreises zur Verfügung, wobei dieser eine offene Gruppe ist, um gemeinsame, produktionstechnische Aspekte für die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Fließpressens von Aluminiumlegierungen zu bearbeiten.

# 10 Stand der Arbeiten auf dem Gebiet der Formgebung im teilflüssigen Materialzustand

Die Formgebung im teilflüssigen Zustand und insbesondere das Thixo-Schmieden bezeichnen die Formgebung von metallischen Werkstoffen zwischen der Solidus- und Liquidustemperatur. In Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität wird hierbei ein Flüssigphasenanteil zwischen 20 % und 60 % eingestellt. Das thixotrope Verhalten, welches vor allem für Metalllegierungen mit globularen Gefügen in diesem teilflüssigen Zustand charakteristisch ist, zeichnet sich dabei durch die Verringerung der Strukturstärke unter einer Scherbelastung sowie ihren vollständigen Wiederaufbau während der nachfolgenden Ruhephase aus /25/ und /26/.

Neben der Verarbeitung von Gusslegierungen ermöglicht dieses Fertigungsverfahren auch die Formgebung schwer gießbarer, hochschmelzender und auch partikelverstärkter Legierungen sowie die Integration metallischer und faserartiger Verstärkungskomponenten in Leichtmetallmatrizen. Aktuelle Projekte, die in diesem Zusammenhang am Institut für Umformtechnik (IFU) durchgeführt werden, sind übergeordnet in die Forschungsbereiche "Monolithische Werkstoffe", "Hybride Werkstoffsysteme" und "Fügen von Verbund- und Metallwerkstoffen" unterteilt.

### 10.1 Forschungsaktivitäten im Bereich "Monolithische Werkstoffe"

Die Herstellung von Bauteilen bzw. Komponenten aus schwer umformbaren, hochschmelzenden und hochfesten Metallwerkstoffen stellen eine große Herausforderung in der industriellen Fertigung dar. Aktuelle Projekte des IFU befassen sich in diesem Zusammenhang mit der Entwicklung neuartiger Prozessrouten sowie innovativer Werkzeugkonzepte für die Formgebung solcher Legierungssysteme im teilflüssigen Zustand. Insgesamt wird eine Erhöhung der Prozesssicherheit durch eine vereinfachte Prozesstechnik in Verbindung mit einer frühzeitigen simulativen Auslegung angestrebt. Des Weiteren sollen durch die Verringerung des Materialverlustes, die Reduktion der Prozessschritte und die Wiederverwertung von Sekundärwerkstoffen die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens erhöht und die Energiebilanz verbessert werden.

Vor diesem Hintergrund konnte im Rahmen des DFG-geförderten Forschungsvorhabens "Induktive Erwärmung und Formgebung von hochschmelzenden Werkstoffsystemen in deren Semi-Solid-Zustand" gezeigt werden, dass die Formgebung von Titanlegierungen im

teilflüssigen Zustand Vorteile gegenüber den alternativen Fertigungsverfahren hinsichtlich Materialeffizienz und Bearbeitungszeiten aufweist. Die durchgeführten Formgebungsuntersuchungen zeigten, dass die Herstellung von komplexen Bauteilgeometrien mittels der Formgebung im teilflüssigen Zustand grundsätzlich machbar ist. Durch eine volumenkonstante Menge an Einsatzmaterial und weniger Nachbearbeitungszeiten (net-Shape-Verfahren) ist somit eine höhere Effektivität und damit einhergehend eine höhere Produktivität des Verfahrens gegeben. Dabei sind die Haupteinflussgrößen auf den Formgebungsprozess neben der induktiven Rohteilerwärmung das Weg-Geschwindigkeits-Profil des Pressenstößels und die Werkzeugtemperierung. Zudem liegt im Gegensatz zur Formgebung niedrigschmelzender Aluminiumwerkstoffe ein zusätzliches Hauptaugenmerk auf der Verwendung geeigneter Werkzeugwerkstoffe und -beschichtungen, die eine ausreichende Warmfestigkeit und Verschleißbeständigkeit gegenüber der Titanlegierung besitzen müssen. Abbildung 10.1 zeigt Beispiele für Komponenten aus der Medizintechnik sowie dem Automobilbau, welche im Rahmen dieses Projektes hergestellt wurden /27-31/.

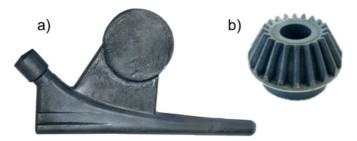


Abbildung 10.1: Am Institut für Umformtechnik hergestellte Ti-Al6V4-Bauteile: a) Modell eines Oberschenkelhals-Implantates; b) Kegelrad

Die weiteren Forschungsarbeiten im Rahmen dieses Projektes werden sich unter anderem mit der Ermittlung optimaler Erwärmungsparameter für biokompatible und hochschmelzende Werkstoffe und der damit einhergehenden Einstellung eines definierten, homogenen Fest-/Flüssigphasenanteils befassen. Weiterhin soll die Wärmebehandlung teilflüssig verarbeiteter Titanlegierungen untersucht und dabei der Einfluss einer kontrollierten Abkühlung auf die Gefügeausbildung ermittelt werden.

Ein weiteres Vorhaben des Forschungsbereiches "Monolithische Werkstoffe" soll sich zukünftig mit der Entwicklung eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung rotationssymmetrischer hohler Bauteile befassen. Hierbei sollen unterschiedlichste Rohmaterialien in den teilflüssigen Materialzustand erwärmt und in diesem verarbeitet werden. Die Ausgangswerkstoffe werden dabei nicht in Form von Bolzen, sondern in Form dickwandiger Rohre bereitgestellt, wodurch der induktive Erwärmungsprozess deutlich einfacher sowie zeitsparender gestaltet werden kann. Unter Verwendung dieses innovativen Ansatzes zur Materialerwärmung sollen zudem sowohl Stahllegierungen und schwer umformbare, partikelverstärkte Aluminiumlegierungen als auch recycelte Metallspäne und -chips im teilflüssigen Zustand verarbeitet und in nur einem einzigen Fertigungsschritt geformt werden

/32/. Das zu entwickelnde Formgebungsverfahren soll darüber hinaus zur Validierung von Formfüllsimulationen dienen. Mithilfe dieser Simulationen sollen künftig Aussagen darüber getroffen werden können, unter welchen Prozessbedingungen kritisches bzw. turbulentes Fließverhalten bei der Formgebung teilflüssiger Metallwerkstoffe zu erwarten ist.

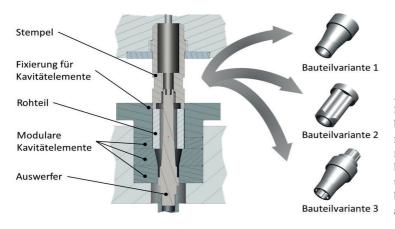


Abbildung 10.2: Schematischer Aufbau der austauschbaren Aktivteile eines modularen Formgebungswerkzeuges und damit realisierbare Bauteilvarianten

Ein wesentliches Ziel der Forschungsarbeiten ist es, den konstruktiven Leichtbaugedanken im Sinne maximaler Material- und Rohstoffeinsparungen nicht nur anhand der Bauteilgeometrie selbst umzusetzen, sondern darüber hinaus um einen materialeffizienten Fertigungsprozess sowie die ressourceneffiziente Wiederverwertung von Sekundärwerkstoffen zu erweitern. Grundlagen hierfür sind eine signifikante Vereinfachung der Rohteilerwärmung, die Entwicklung eines modularen Formgebungswerkzeuges und die Optimierung der numerischen Viskositäts- und Strömungsmodellierung. Ein erster schematischer Aufbau des im Rahmen des Forschungsvorhabens geplanten modularen Werkzeugaufbaus sowie die damit zu realisierenden Bauteilvarianten sind in Abbildung 10.2 dargestellt.

### 10.2 Forschungsaktivitäten im Bereich "Hybride Werkstoffsysteme"

Auf dem Gebiet der Herstellung und Analyse hybrider Werkstoffsysteme befassen sich aktuelle Forschungsarbeiten am IFU mit der Generierung strukturell verstärkter Aluminiumbauteile sowie der Formgebung gradierter Werkstoffsysteme im teilflüssigen Materialzustand. Bei den Verstärkungskomponenten handelt es sich sowohl um unterschiedliche Faserwerkstoffe wie Kohlenstoff- und Glasfasern sowie höherfeste Metallinlays, die während des Formgebungsprozesses in Aluminiummatrizes eingebettet werden, als auch um keramische SiC- oder  ${\rm Al_2O_3\text{--}Partikel}$ , die bereits bei der Herstellung des zu verarbeitenden Rohmaterials eingebracht werden.

Ein Vorhaben, welches in diesem Zusammenhang am IFU durchgeführt wird, trägt den Titel "Hybride Intelligente Konstruktions-Elemente (HIKE)" und wird im Rahmen der Forschergruppe FOR981 von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert.

Das Teilprojekt, welches hierbei am Institut für Umformtechnik (IFU) bearbeitet wird, befasst sich mit der Herstellung hybrider und adaptiver Konstruktionselemente mithilfe der Formgebung im teilflüssigen Zustand. Derartige Elemente sollen aus einer gezielten Kombination unterschiedlicher Verstärkungskomponenten, welche in eine Leichtmetallmatrix eingebettet werden, bestehen, um somit höhere Leichtbaugrade erzielen und darüber hinaus intrinsische und stoffliche Funktionen erzeugen zu können. Auf diese Weise sollen die hergestellten Bauteile durch die Variation der eingesetzten Verstärkungskomponenten auf ihr Anforderungsprofil bzw. den zu erwartenden Belastungszustand angepasst werden. Durch die fertigungstechnische Integration sensorischer und aktorischer Elemente soll es zudem möglich sein, diesen Belastungszustand intrinsisch während des Einsatzes messen und auf diesen reagieren zu können /33-35/.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes, welches sich bereits in der zweiten Förderperiode befindet, werden am IFU die in Abbildung 3 dargestellten Konstruktionselemente entwickelt und anschließend im abgebildeten Gesamtdemonstrator der Forschergruppe gemeinsam mit den Komponenten der beteiligten Institute appliziert.

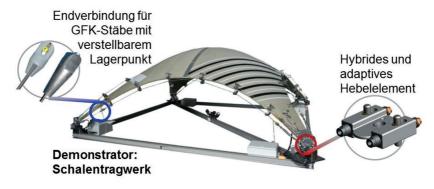


Abbildung 10.3: Demonstrator "Schalentragwerk" der Forschergruppe HIKE mit den hybriden, adaptiven Konstruktionselementen des IFU

Hierbei wurde zunächst eine adaptive Endverbindung entwickelt. Diese besteht aus einer Aluminiummatrix, welche auf einen Glasfaserstab aufgeschmiedet wurde und dabei eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Faser und Matrix erzeugt. Der Lagerpunkt der Endverbindung lässt sich mittels eines Miniaturhydraulikzylinders verschieben, um somit auf den jeweiligen Belastungsfall reagieren zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend zur Entwicklung eines "nachspannenden Hebelbauteils" verwendet, in welchem ebenfalls Aktoren zur Verschiebung der Lagerpunkte und zudem Sensoren zur Erfassung der aktuellen Lagerpositionen integriert werden.

Ein weiteres Forschungsvorhaben im Bereich "hybride Werkstoffsysteme" beschäftigt sich

mit der Umsetzung von Multimaterial- bzw. Hybridkonzepten für fortschrittliche Bauteile mittels der Formgebung im teilflüssigen Zustand. Dabei soll sowohl die Erwärmung von gradierten Rohlingen als auch die Herstellung hybrider Bauteile durch die Einbringung von Verstärkungskomponenten während des Thixo-Schmiedens erforscht werden. Die Zielsetzung besteht dabei in der Erlangung eines verbesserten Verständnisses hinsichtlich der Interaktionsmechanismen dieser unterschiedlichen Materialkonzepte sowie in der Entwicklung numerischer Simulationstechniken zur Viskositätsmodellierung bei der gleichzeitigen Formgebung mehrerer Werkstoffe.

Prinzipiell gibt es für die gemeinsame Erwärmung von Metallen zwei Konzepte (siehe Abbildung 10.4). Bei der "Gradienten-Technik" wird ein Rohr aus Material A mit einem zylindrischen Kern aus Material B gemeinsam in einer Spule erwärmt und anschließend umgeformt. Im Gegensatz dazu wird bei der "Sandwich-Technik" z.B. ein zylindrisches Rohteil aus Material A und ein zylindrisches Rohteil aus Material B aufeinandergestellt und gemeinsam erwärmt /36/. Die Herausforderung besteht bei der gemeinsamen Erwärmung der Materialien im Einstellen eines inhomogenen Temperaturfeldes aufgrund der unterschiedlichen Zieltemperaturen für die semi-solid-Formgebung.

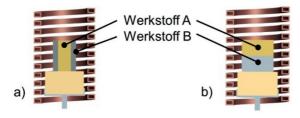


Abbildung 10.4: Beispielhafte Erwärmungskonzepte; a) "Gradienten-Bolzen" und b) "Sandwich-Bolzen"

Im Rahmen dieses Projekts wird die Untersuchung auf die Kombination von jeweils zwei Aluminiumlegierungen im selben Pressvorgang beschränkt, obwohl auch Kombinationen von drei und mehr Werkstoffen theoretisch möglich sind. Aufgrund des bei der induktiven Erwärmung auftretenden Skin-Effekts ist es von Vorteil, wenn bei der Gradiententechnik der Werkstoff im äußeren Bereich des Rohteils einen höheren Schmelzpunkt besitzt. Für unterschiedliche Materialkombinationen sind jeweils geeignete Erwärmungsstrategien zu ermitteln, sodass beide Werkstoffe in den teilflüssigen Zustand erwärmt und anschließend gemeinsam geformt werden können. Hier bietet es sich an eine duktile Aluminiumlegierung wie z.B. A356 oder AlSiMg1 im Kernbereich und dieselbe Legierung mit einem hohen Verstärkungsanteil an z.B. Siliziumkarbid zu verwenden. Somit ergibt sich nach der Umformung ein gradiertes Bauteil mit einem sehr verschleißfesten Randbereich bei einem gleichzeitig duktilen Kernbereich.

Typische Bauteile für einfache, gradierte Komponenten sind z.B. Bremsscheiben oder Zahnräder. So muss eine serientaugliche Bremsscheibe zwei wesentliche Hauptfunktionen mit widersprüchlichen Anforderungen erfüllen. Zum einen ist ein verschleißfester Werk-

stoff im Bereich der Reibfläche zwischen Scheibe und Bremssystem gefordert. Zum anderen sollten die Kernbereiche der Bremsscheibe und die Radnabe die während des Betriebs auftretenden Verformungen aufnehmen können. Abbildung 10.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Bremsscheibe.

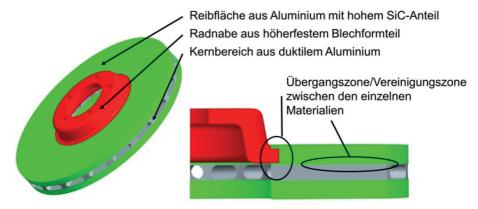


Abbildung 10.5: Prinzipieller Aufbau einer Bremsscheibe mit Innenbelüftung im Multimaterialdesign hergestellt durch das Thixo-Schmieden von gradierten Werkstoffen

# 10.3 Forschungsaktivitäten im Bereich "Fügen von Verbund- und Metallwerkstoffen"

Faserverbundwerkstoffe gewinnen aufgrund steigender Rohstoffpreise und immer strenger werdenden Richtlinien zunehmend an Bedeutung, nicht zuletzt in den Bereichen Bauwesen und Automobilbau. Die Entwicklung neuer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen stellt dabei jedoch nur einen Teil der erforderlichen Forschungsarbeit dar, ebenso wichtig ist die Integration der neuen Materialien in bestehende Systeme.

Vor diesem Hintergrund wurde, gefördert durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), das Forschungsvorhaben "Materialgerechtes Fügen von Faserverbundprofilen" durchgeführt. Ziel dieses Forschungsvorhabens war die materialgerechte Fügung von Faserverbundwerkstoffprofilen, welche durch den Übergang von Faserverbundwerkstoffen mit Polymermatrix zu Faserverbundwerkstoffen mit Metallmatrix in den Knotenpunkten der Lastübertragung ermöglicht werden sollte. Dazu wurde ein repräsentativer Beispielprozess für die Formgebung teilflüssiger Al/Si-Legierungen in mehreren Entwicklungsschritten konzipiert und anschließend ein entsprechendes Formgebungswerkzeug konstruiert, simuliert und gefertigt. Abbildung 10.6 zeigt das Werkzeug mit montierter Einspannvorrichtung, durch die neben der Positionierung und Fixierung auch die notwendige Vorspannung der Fasern erreicht wird, sowie ein hergestelltes Bauteil mit zugehörigen Schliffbildern.

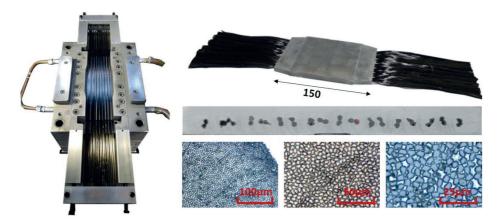


Abbildung 10.6: Im Werkzeug montierte Einspannvorrichtung mit Verstärkungsfaserhalbzeug

Das Formgebungswerkzeug ermöglicht die partielle Infiltration von faserartigen Verstärkungskomponenten in Form von endlosen Kohlenstoff- bzw. Glasfaser-Rovings durch teilflüssige bzw. flüssige Aluminiumwerkstoffe. Im Anschluss ist es möglich, eine Polymermatrix auf die freiliegenden Faserenden aufzubringen und somit den angestrebten Übergang für ein solches Zugelement zu realisieren.

Ein weiteres Vorhaben dieses Forschungsbereiches trägt den Titel "Fügen von Metall- und Faserkomponenten auf Basis der Semi-Solid-Formgebung" und befasst sich mit der Entwicklung eines neuen Verfahrens zum Fügen von Metall- und Faserstrukturen. Basierend auf der Formgebung im teilflüssigen Materialzustand wird hierbei eine direkte Verbindung zwischen Kohlenstofffasergewebe und einem Aluminiumprofil ermöglicht /37/. Dabei wird ein "Sandwich-Paket", bestehend aus zwei Aluminiumblechen und einer dazwischenliegenden Faserstruktur, mithilfe zweier Elektroden konduktiv in den Temperaturbereich zwischen Solidus- und Liquiduslinie erwärmt. Gleichzeitig üben die Elektroden eine definierte Presskraft auf den Schichtaufbau aus. Nach dem Übergang des Metalls in den teilflüssigen Materialzustand bewirkt die durch die Elektroden aufgebrachte Scherbelastung eine Viskositätsabnahme des Metalls (thixotropes Materialverhalten), woraufhin die Faserbündel des Carbongewebes infiltriert werden. Auf diese Weise entsteht sowohl eine form- als auch eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Fasergewebe und Metall. Als Versuchsanlage kommt hierbei das am IFU befindliche thermomechanische Prüfsystem *Gleeble 3800c* (DSI) zum Einsatz (siehe Abbildung 10.7).

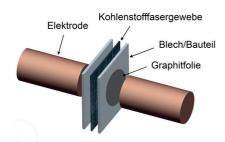




Abbildung 10.7: links: Versuchsaufbau aus Titanbolzen (Elektroden), Graphitfolie (Trennmittel), Blechen und Kohlenstoffgewebe; rechts: Versuchskammer der Gleeble 3800c

Die erfolgreiche Umsetzung dieses Fügeverfahrens wird durch die anschließende mikroskopische Betrachtung der gefügten Probe bestätigt. Abbildung 10.8 zeigt einen Probekörper, der im Bereich der Fügezone getrennt, geschliffen und poliert wurde (der Betrachter schaut auf die Schnittfläche).

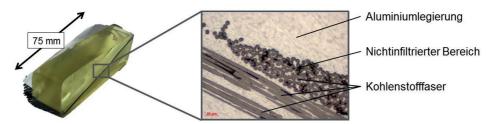


Abbildung 10.8: Lichtmikroskopische Aufnahme der Aluminium-Carbon-Lagenstruktur im Bereich der Fügezone

Während die beiden ehemals einzelnen Bleche (hell) nun eine stoffschlüssig verbundene Einheit darstellen, sind zwischen den einzelnen Kohlenstofffasern (dunkel) nur wenige schwarze Stellen zu erkennen. Diese Bereiche stellen nichtinfiltrierte Faserzwischenräume dar; ihr geringer Anteil am Gesamtbild weist auf einen hohen Infiltrationsgrad hin und belegt die grundsätzliche Machbarkeit des Fügens von Kohlestrukturen und Aluminiumbauteilen auf Basis der semi-solid-Formgebung.

Zukünftig soll dieses Verfahren von einem punktförmigen Prozess auf linienförmige/ kontinuierliche Fügevorgänge übertragen werden. Zudem soll erforscht werden, inwiefern CFK-Strukturen anstelle von reinen Fasergewebestrukturen mit Metall verbunden bzw. welche Fügeeigenschaften hierbei erzielt werden können.

#### Literatur

Europäisches Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und Parlament des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen. Amtsblatt der Europäischen Union. 5. Juni 2009, L140, S. 1-15 /2/ Brücher, T.; Megatrends im Automobilbau – Beitrag Massivumgeformter Komponenten, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Raedt, H.-W. 3. - 5. Juni 2013, Fellbach, ISBN 978-3-88355-395-5 Intelligent lightweight design by forged transmission compo-/3/ Weidel, S.; nents, VDI-Berichte 2130, International VDI-Congress Raedt, H.-W.; Linder, G. Transmissions in Vehicles 2011, Friedrichshafen, 7. und 8. Juni 2011, VDI Verlag Düsseldorf 2011, S. 311-322 Dieterle, K.: Faltenbildung als Verfahrensgrenze beim Stauchen /4/ Dieterle, K. von Hohlkörpern. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart, Verlag W. Girardet, 1975 /5/ Schiemann, T.: Schlussbericht des AiF Forschungsvorhabens Schiemann, T. IGF-16496N Erzeugen von Flanschen und Bunden an hohlen Fließpressteilen, Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., 2013 /6/ Schiemann, T.; Schiemann, T, Liewald, M.: Leichtbau durch Kaltmassivumfor-Liewald, M. mung – Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Bundanstauchen von hohlen Fließpressteilen, Schmiede-Journal o. Jg. (2013) H. 1 /7/ Schiemann, T. Schiemann, T.: Schlussbericht des GCFG Forschungsvorhabens 25: Experimentelle Untersuchung und numerische Abbildung der Faltenbildung 2. Art beim Anstauchen von Bunden an hohlen Fließpressteilen, German Cold Forging Group, 2014 Schiemann, T., Liewald, M., Beiermeister, C., Till, M.: Influence /8/ Schiemann, T.; of process chain on fold formation during flange upsetting Liewald, M.; Beiermeister, C.; of tubular cold forged parts, Procedia Engineering, Vol. 81, 2014, pp. 352 – 357, doi:10.1016/j.proeng.2014.10.005 Till, M. /9/ Liewald, M.; Liewald, M.; Schiemann, T.; Mletzko, C.: Regelung von (Kalt-) Massivumformprozessen (in German). wt Werkstattstechnik Schiemann, T.; Mletzko, C. online, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Oktober 2013, S. 764-769 /10/ Liewald, M.; Liewald, M.; Mletzko, C.; Schiemann, T.: Regelung von Kalt-Mletzko, C.; massivumformprozessen Verfahren, Werkzeuge, Maschinen, in: Schiemann, T. Tagungsband 29. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer VDI 2014. Düsseldorf 2014 T. Schiemann, M. Liewald, C. Mletzko: Automatically Controlled /11/ Schiemann, T.; Liewald, M.; (Cold-) Forging Processes, Procedia CIRP, Vol. 18, 2014, pp. 39-44, doi:10.1016/j.procir.2014.06.104 Mletzko, C.

/12/	Schiemann, T.; Liewald, M.; Mletzko, C.; Wälder, J.	Regelung von Kaltmassivumformprozessen, Anlagentechnik und Anwendungsbeispiele. in: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung 2015, Fellbach, 56. Mai 2015
/13/	A. G. Ovcinnikov; N. A. Makina	Investigations of backward cup extrusion with active friction forces (in russ). Kuznecno-stampovocnoe proizwodstwo., 1972, Nr. 6, S. 3-5
/14/	Lange, K. et al.	Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K; Schöck, J.: Fließpressen, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, ISBN 3-540-30909-3, 2008
/15/	N.N.	DIN 8593-5: Fertigungsverfahren Fügen Teil 5: Fügen durch Umformen Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) – Geometrische Produktspezifikation und -prüfung – im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., September 2003
/16/	KJ. Matthes; F. Riedel	KJ. Matthes und F. Riedel: Fügetechnik: Überblick – Löten – Kleben – Fügen durch Umformen. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 1. Auflage, 28. August 2003, ISBN-10: 3446221336 / ISBN-13: 978-3446221338
/17/	F. Dörr; M. Kannewurf; M. Liewald	Untersuchungen zum Umformfügen mittels Quer-Fließpressen. in: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung 2015, Fellbach, 56. Mai 2015
/18/	M. Dahme; HW. Raedt; F. Wilke; HJ. Wieland; T. L. Tutmann; D. Bachmann Osenberg	"Massiver Leichtbau" – Eine Strategie für Leichtbaulösungen durch Massivumformung, Schmiede-Journal, S. 14-17, 2013
/19/	Pampam, K. H.	Untersuchung der Verfahrensparameter beim Hoch-geschwindig- keitsscherschneiden von Rundprofilen. Dissertation TH "Otte v. Guericke", Magdeburg, 1986
/20/	Huml, P.	Hochgeschwindigkeitsschneiden – Eine Bruchtechnik für hohe Rohteilqualität, In DRAHT-Fachzeitschrift, 1976, 6, S. 273-276
/21/	Neugebauer, R.; Weigel, P.; Westkämper, E.; Verl, A.; Eicher, F.	Ermittlung der Einsatzpotentiale und -grenzen des adiabatischen Trennens für Schneid- und Lochoperationen. Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben 15319 BG, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2010
/22/	Solovcov, S. S.	Das Scheren von genauen Halbzeugen für die Warmumformung von Formstahl. In: Kuznečno-štampovočnoe proizvodstvo (dt. Übersetzung), Nr. 8, 1972, S. 33-46
/23/	Henry, R.; Liewald, M.	High-speed cropping of rods and wire with superposition of various stress conditions. In ESAFORM Conference 2015, Graz Austria

- /24/ Tietmann, A. L. Gießschmieden und Thixoschmieden von Aluminiumknetlegierungen. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1993
- /25/ Uggowitzer, P. J.; Metallkundliche Aspekte bei der Semi-Solid Formgebung von Gullo, G.-C.; Leichtmetallen. In: Vom Werkstoff zum Bauteilsystem", Hrsg.: H. Kaufmann und P.J. Uggowitzer, LKR-Verlag, Ranshofen, pp. 95-107, 2000
- /26/ Internationales Patent Method and Device for determining the type of microstructure of a metal work piece during heating. WO 2006/114316 A2, PCT/ EP2006/003925
- /27/ Liewald, M.; Tool and process technology for the semi-solid forming of biocompatible materials. Conference on Production Engineering FTK 2008 Stuttgart, Society for production engineering in Stuttgart, 2008
- /28/ Kertesz, L.; Production of titanium alloy components by semi-solid forming. 12th International Conference Semi-Solid Processing of Alloys and Composites (S2P2012), Cape Town, South Africa, October 8-11, 2012, pp. 515-520
- /29/ Kertesz, L. Untersuchung zur Einstellung eines Formgebungsprozesses einer α-β-Titanlegierung im teilflüssigen Zustand, Dissertation am Institut für Umformtechnik (Universität Stuttgart), 2012
- /30/ Gerlach, O.; Time-Constant-Based Control of Induction Heating Processes for Lechler, A.; Thixoforming. Measurement Science and Technology, Vol. 26, 025001, 2014
- /31/ Liewald, M.; Semi-Solid-Formgebung dickwandiger Rohrhalbzeuge Poten-Riedmüller, K.R. ziale der Formgebung im teilflüssigen Zustand für die Herstellung zylindrischer hohler Bauteile. In: wt Werkstatttechnik online, 10-2014; Springer-Verlag, 2014
- /32/ Kertesz, L.; Thixo-Forming Der Weg zum schlauen Bauteil Liewald, M. Journal "Umformtechnik", 3/2011, pp. 32-33
- /33/ Riedmüller, K. R.; Manufacturing of Composite and Hybrid Materials by Semi Solid Liewald, M.; Forming; in: 12th International Conference Semi-Solid Processing of Alloys and Composites (S2P2012), Cape Town, South Africa, October 8-11, 2012, pp. 89-94
- /34/ Liewald, M.; Material Property Modification of Continuous Fiber Reinforced Riedmüller, K. R. Aluminum Matrices Produced by Semi-Solid Forming.

  KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology, Vol. 7 Issue 3, S. 21-28, 2014
- /35/ Müller-Späth, H. Legierungsentwicklung unter Einsatz des SSP-Verfahrens und Umsetzung intelligenter Materialkonzepte beim Thixogießen.

  Dissertation am Gießerei-Institut, RWTH Aachen, 1999.
- /36/ Europäische Verfahren und Vorrichtung zur Verbindung von Faserwerkstoffen Patentanmeldung mit Metallwerkstoffen. Anmeldetag: 16.12.2014, Aktenzeichen DE 10 2014 118 747.4