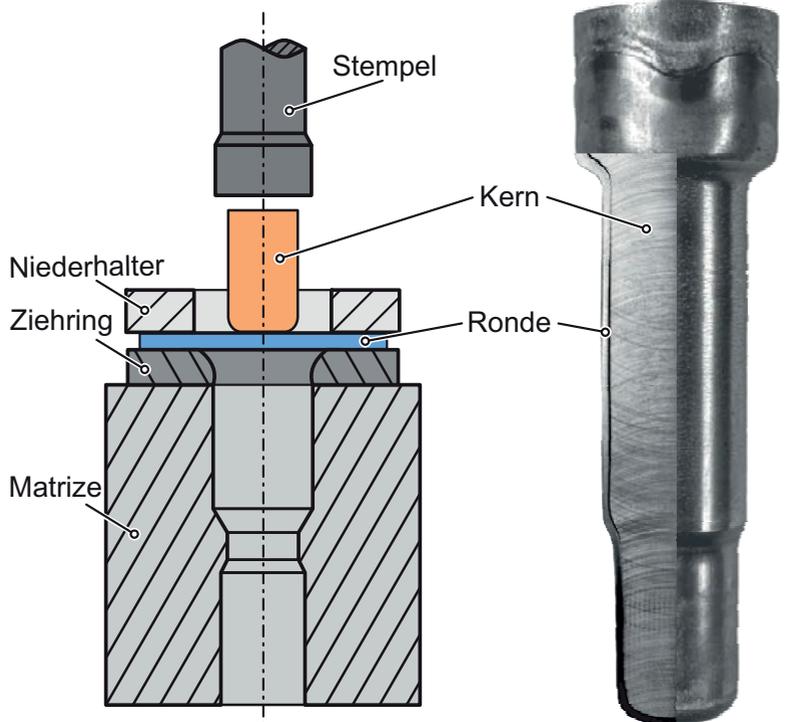


Oliver Napierala

## Tiefzieh-Verbundfließpressen

Analyse, Bauteileigenschaften  
und Potentiale



# **Tiefzieh-Verbundfließpressen Analyse, Bauteileigenschaften und Potentiale**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau  
der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Oliver Napierala, M. Sc.

aus

Lüdinghausen

Dortmund, 2020

Vorsitzende der Prüfungskommission: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer  
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya  
Mitberichter/-in: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math.  
Birgit Awiszus  
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform.  
Andreas Zabel  
Tag der mündlichen Prüfung: 23. Oktober 2020

Dortmunder Umformtechnik

Band 111

**Oliver Napierala**

**Tiefzieh-Verbundfließpressen**

Analyse, Bauteileigenschaften und Potentiale

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7856-5

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, der mich sowohl bei meinen Arbeiten am Institut als auch während meiner Promotion stets unterstützt hat.

Für die ausführliche Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Korreferates danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus, Leiterin des Lehrstuhls Virtuelle Fertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Für ihr Mitwirken in der Prüfungskommission bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel sowie bei Frau Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer.

Die Forschungsarbeiten wurden zum großen Teil im Rahmen des Projektes TE 508/58-1 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Dafür bedanke ich mich.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für die hilfsbereite und kollegiale Atmosphäre. Im Besonderen danke ich meinen Kollegen aus der Abteilung Massivumformung. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Christoph Dahnke für seinen Blick für das Wesentliche und Herrn Johannes Gebhard M. Sc. sowie Herrn Felix Kolpak M. Sc. für die anregenden fachlichen Diskussionen. Für die konstruktive und entspannte Zusammenarbeit im Versuchsfeld bedanke ich mich recht herzlich bei den Herren Dirk Hoffmann und Werner Feurer.

Weiterhin bedanke ich mich bei meiner Schwägerin Julie Matthias für die sprachliche Korrektur dieser Arbeit. Für die Organisation der mündlichen Prüfung bedanke ich mich sehr herzlich bei Frau Nina Hänisch und Frau Jeanette Brandt.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen studentischen Mitarbeitern Herrn Philip Bandura sowie Herrn Yavuz Yasar und meinen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern, insbesondere Herrn Martin Izydorczyk.

Meinen Eltern, Bärbel und Erich, spreche ich meinen persönlichen Dank aus, da sie mir meine Ausbildung ermöglicht und mich stets unterstützt haben.

Meiner Frau Anna danke ich vom ganzen Herzen für die ausnahmslose Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

Bad Sassendorf, im Dezember 2020

Oliver Napierala

## Kurzfassung

Die europaweiten Bestrebungen zur Senkung von Treibhausgasemissionen werden zu einem erhöhten Bedarf an Verbundbauteilen im Bereich der Mobilität und Energiedistribution führen. Das Tiefzieh-Verbundfließpressen hat das Potential, die Nachfrage nach der Herstellung dieser Verbundbauteile in Massen zu bedienen.

Das Verfahren Tiefzieh-Verbundfließpressen ermöglicht die Herstellung von Verbundwellen aus einem Kern- und einem Blechhalbzeug an der Oberfläche durch eine Kombination aus Tiefziehen und Fließpressen. Der Fokus der vorliegenden Dissertation liegt auf der Herstellung von hybriden stahummantelten Aluminiumwellen. Das entwickelte analytische Modell zur Vorhersage des Kraftbedarfs kann das untersuchte Verfahren mit Abweichungen von weniger als 16 % beschreiben. Das Modell ist robust gegenüber der Variation – sowohl der Geometrie- als auch der Werkstoffparameter – und kann somit bei der Werkzeugauslegung verwendet werden.

Als weiteres Teilziel werden die Verbundart und -festigkeit der erzeugten Hybridbauteile untersucht. Mittels numerischer Simulationen wird gezeigt, dass ein stoffschlüssiger Verbund bei der untersuchten Materialpaarung nicht erreicht werden kann. Aufgrund der sich durch den Tiefziehprozess einstellenden Zipfelbildung und der Entstehung einer inhomogenen Blechdickenverteilung kann jedoch ein Makroformschluss in axialer und tangentialer Richtung erzeugt werden. Zusätzlich kann die Entstehung eines Mikroformschlusses aufgrund einer durch Sandstrahlen strukturierten Halbzeugoberfläche festgestellt werden. Neben der formschlüssigen Verbindung stellt sich infolge der unterschiedlichen Elastizitätsmodule des Kern- und des Rondenwerkstoffs ein Kraftschluss ein. Die Verbundscherfestigkeit wird in Push-Out-Tests ermittelt und ist größer als 40 % der Scherfestigkeit des Kernwerkstoffs.

Auf Grundlage der experimentellen Versuchsreihen kann ein umfangreiches Prozessfenster aufgestellt werden. Es werden vier mögliche Prozessfehler ermittelt: Beim Tiefziehvorgang darf die Kraft zum Stauchen des Kernmaterials nicht kleiner oder gleich der benötigten Kraft zum Tiefziehen der Ronde sein. Des Weiteren werden die Prozessfehler, Riss der Ronde, Spalt zwischen Ronde und Kern und unvollständiges Ausformen des Bauteilkopfes, beobachtet. Durch gezielte Wahl der Prozessparameter können die Prozessfehler zuverlässig unterbunden werden.

Eine Vielzahl an Prozesspotentialen werden aus den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchung und Analyse der Bauteileigenschaften erkannt und technologisch umgesetzt. Beispielsweise kann mit dem im Rahmen dieser Arbeit patentierten Verfahren Aufweit-Tiefzieh-Verbundfließpressen jeder einzelne Absatz einer Welle mit unterschiedlichen, den Anforderungen an die Absatzoberfläche entsprechenden Werkstoffen umhüllt werden.



## Abstract

The Europe-wide efforts to reduce greenhouse gas emissions will lead to an increased demand for composite components in the field of mobility and energy distribution. Combined deep drawing and cold forging, called Draw-Forging, has the potential to meet the demand for mass production of these composite parts.

Draw-Forging enables the manufacturing of composite shafts from a core- and a sheet metal semi-finished product by a combination of deep drawing and extrusion. The focus of the basic research is on the manufacturing of steel-clad aluminium shafts. A comprehensive process window can be determined on the basis of the experiments. Four possible process failures are determined. During the deep drawing process, the force required to upset the core material must not be less than or equal to the force required to deep draw the blank. Furthermore, the process defects, crack of the blank, gap between blank and core and not sufficient formed component head are observed. The process errors can be reliably prevented by the specific selection of the process parameters.

The developed analytical model for predicting the punch force required is able to predict the punch force with deviations of less than 16%. The model is robust against variations of the geometry and material parameters and can be used for the tool design. In addition it gives an insight into the process mechanics.

Furthermore, both a force fit and a form fit, caused by the deep drawing and redrawing part of the process, were determined. Establishing a material bond by the use of aluminium-steel pairing could be ruled out based on experimental and numerical results. The joining strength is larger than 40% of the shear yield stress of the aluminium.

Alternative material-pairings, chip-cores, double stepped shafts manufactured by process extension of conventional redrawing, are explored demonstrating the technological potential of the process. In the course of this research the Expanding-Draw-Forging was developed and the patent is submitted. By utilising annular blanks, it is possible to cover each step of a shaft with a shell material that meets the load requirements of the step.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Formel- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Fließpressen.....	3
2.1.1 Voll-Vorwärts-Fließpressen .....	5
2.1.2 Stempelkraftberechnung.....	10
2.2 Tiefziehen.....	13
2.2.1 Tiefziehen mit starren Werkzeugen .....	13
2.2.2 Erweiterung der Tiefziehgrenzen .....	17
2.3 Fügen durch Umformen .....	20
2.3.1 Arten der Fügeverbindung.....	21
2.3.2 Fügen von gleichartigen Halbzeugen.....	24
2.3.3 Fügen von ungleichartigen Halbzeugen.....	28
2.4 Fazit zum Stand der Technik .....	31
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>33</b>
<b>4 Verfahrensprinzip des Tiefzieh-Verbundfließpressens</b>	<b>35</b>
<b>5 Experimentelle und numerische Prozessanalyse</b>	<b>39</b>
5.1 Versuchsaufbau und Bauteilherstellung.....	39
5.1.1 Maschine, Werkzeuge und Kennwertermittlung.....	39
5.1.2 Vorbereitung der Halbzeuge und Bauteilherstellung.....	42
5.1.3 Hergestellte Bauteile .....	44
5.2 Ermittlung der Prozessphasen .....	47
5.3 Aufbau und Validierung des Simulationsmodells .....	49
5.4 Ermittlung der Prozessgrenzen .....	52
5.4.1 Analyse der Prozessfehler .....	52
5.4.2 Prozessfenster.....	58
5.5 Fazit zur Prozessanalyse .....	60
<b>6 Analytische Beschreibung der Prozessphasen</b>	<b>63</b>
6.1 Modellbildung.....	63
6.1.1 Stempelkraftberechnung der zweiten Phase.....	64
6.1.2 Stempelkraftberechnung der dritten Phase.....	65
6.1.3 Stempelkraftberechnung der vierten Phase .....	69
6.2 Modellvalidierung und Analyse.....	70

6.2.1 Modellvalidierung hinsichtlich des Stempelkraftverlaufs.....	70
6.2.2 Modellvalidierung hinsichtlich der maximalen Stempelkraft.....	71
6.3 Modellerweiterung .....	77
6.4 Fazit zur analytischen Beschreibung.....	82
<b>7 Untersuchung der Verbundart und -festigkeit</b>	<b>85</b>
7.1 Untersuchungen zum Stoffschluss .....	85
7.2 Untersuchungen zum Formschluss .....	90
7.3 Untersuchungen zum Kraftschluss.....	98
7.4 Ermittlung der Verbundfestigkeit .....	101
7.5 Fazit zur Verbundart und –festigkeit .....	107
<b>8 Prozesspotentiale und technologische Konzepte</b>	<b>109</b>
8.1 Tiefzieh-Verbundfließpressen mit Gegendruck.....	109
8.2 Zweitstufiges Tiefzieh-Verbundfließpressen .....	114
8.3 Aufweitertiefzieh-Verbundfließpressen .....	120
8.4 Stoffschlüssiges Fügen mit plattierten Ronden.....	127
8.5 Späne als Kernwerkstoff .....	133
8.6 Fazit zum Prozesspotential und technologischen Konzepten .....	138
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>