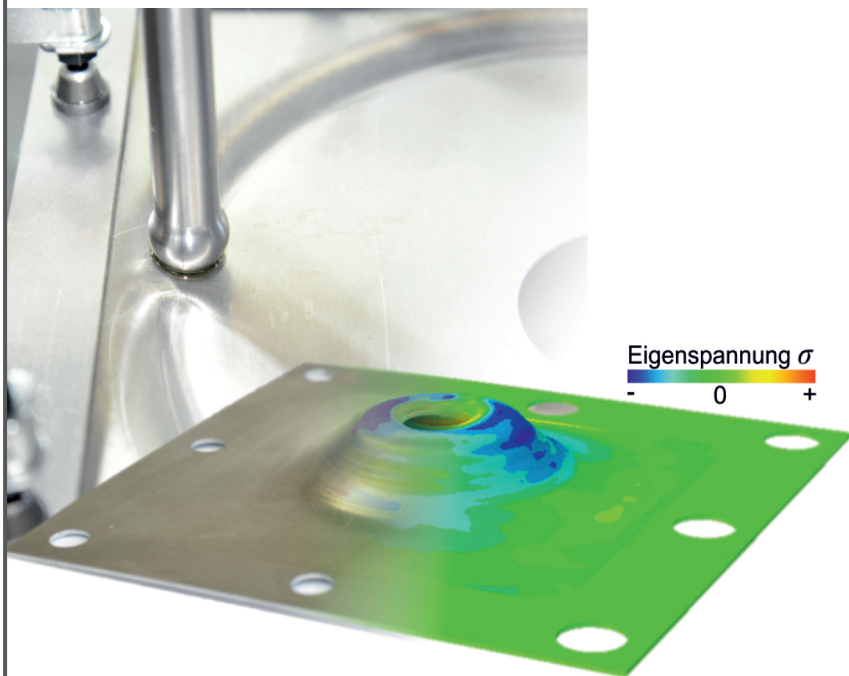


Fabian Maaß

Gezielte Eigenspannungseinstellung in der inkrementellen Blechumformung



Gezielte Eigenspannungseinstellung in der inkrementellen Blechumformung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Fabian Christian Maaß, M. Sc.

aus

Essen

Dortmund, 2023

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Handge

Berichter: Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Härtel

Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Oktober 2023

Dortmunder Umformtechnik

Band 121

Fabian Maaß

**Gezielte Eigenspannungseinstellung
in der inkrementellen Blechumformung**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2024

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9373-5

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit resultieren aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt „Verbesserung des Einsatzverhaltens inkrementell umgeformter Bauteile durch gezielte Eigenspannungs-induktion“ (Projektnummer 372803376) aus dem Schwerpunktprogramm 2013 (SPP 2013). Für die Unterstützung der DFG möchte ich mich herzlich bedanken.

An dieser Stelle möchte ich denjenigen danken, die die Entstehung dieser Arbeit gefördert und begleitet haben. Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter des IUL, Herrn Prof. A. Erman Tekkaya, für die wissenschaftliche Betreuung, die angeregten Diskussionen und das mir entgegengebrachte Vertrauen, die meine Promotion ermöglicht haben. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Sebastian Härtel für die Übernahme des Korreferats. Für die Übernahme der Vorsitzenden der Prüfungskommission und die Mitwirkung als Mitberichter danke ich zudem den Herren Prof. Ulrich Handge und Prof. Andreas Menzel. Herr Prof. Walter Reimers und Herr Dr.-Ing. Mateus Dobecki vom Fachgebiet Metallische Werkstoffe des Instituts für Werkstoffwissenschaften und –technologien der Technischen Universität Berlin seien erwähnt für die Kooperation im Rahmen des DFG Projekts. Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Wolfram Volk für die Initiierung des SPP 2013 sowie bei allen Projektpartnerinnen und Projektpartnern innerhalb des Schwerpunktprogramms für die Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen rund um diese Arbeit. Ebenso möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau für die abteilungsübergreifende fachliche Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit während meiner Promotion danken. Mein besonderer Dank gilt hier den Herren Dr.-Ing. Soeren Gies und Dr.-Ing. Marlon Hahn für die konstruktiven Diskussionen und die freundschaftliche Zusammenarbeit als Leiter der Abteilung Sonderverfahren. Des Weiteren danke ich auch meinen studentischen Hilfskräften Maximilian Sonntag, Till Hainmann, Martin Borek und allen ehemaligen Studenten für ihre tatkräftige Unterstützung. In diesem Zusammenhang danke ich auch den technischen Mitarbeitern Dirk Hoffmann, Andreas Herdt, Ilias Demertzidis, Steffen Strotzer, Frank Volk, Werner Feurer und Sven Lukies, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. In gleicher Weise danke ich Jeanette Brandt und Nina Hänisch für den organisatorischen Beistand und Frau Beate Ulm-Brandt die sprachliche Korrektur dieser Arbeit. Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihren Zuspruch und ihre Unterstützung. Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Ernst und Marlene für ihren uneingeschränkten Rückhalt und ihre immerwährende Unterstützung in allen Lebenslagen, die meinen wissenschaftlichen Werdegang erst ermöglichten.

Dortmund, im Oktober 2023

FABIAN MAAB

Abstract

Residual stresses are a result of any forming operation used to manufacture components. They are mechanical stresses that lead to an internal load on the component. Depending on the characteristics, the presence of residual stresses can significantly increase the performance of a component or lead to earlier failure under a specific load. The knowledge of the resulting residual stress state as a result of the forming step using suitable forecast models is therefore essential. Residual stresses are usually induced by subsequent mechanical processing steps or eliminated by thermal post-treatment processes. These downstream process steps to set residual stresses require additional resources.

The flexible forming process of incremental sheet metal forming is characterized by low tool costs and process forces with an increased formability compared to conventional forming processes. Due to the localized forming zone located below the forming tool, incremental sheet metal forming offers the possibility to induce locally defined residual stresses into components. The flexibility of incremental sheet metal forming enables the production of geometrically identical components with different process parameters that influence the forming mechanisms. The relationship between process parameters, forming mechanisms and the resulting residual stresses is not yet known. The aim of this work is therefore to develop a basic understanding of the residual stress formation during incremental sheet metal forming in order to introduce residual stresses into components in a stable and defined manner through this forming process and to quantify the improvement of the component's properties through selective induced residual stresses.

Using a numerical process model, the influence of the step-down increment and the tool radius on the forming mechanisms and the residual stresses of the component are identified. Based on these results, concepts of tensile and compressive stress superposition are analyzed and experimentally tested to increase the possibilities of residual stress adjustment through the forming process.

This knowledge of the residual stress state can be used to reach the full potential of increasing the component's stability under static and cyclic loads. This will open further possibilities for material savings through lower safety factors in component design, which meets the requirements for lightweight construction concepts to further increase resource efficiency.

Kurzzusammenfassung

Infolge einer inhomogenen Umformung zur Herstellung von Bauteilen verbleiben Spannungen im Material. Diese Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die zu einer inneren Belastung des Bauteils führen. Das Vorhandensein von Eigenspannungen kann die Leistungsfähigkeit eines Bauteils je nach Ausprägung signifikant steigern oder zu einem früheren Versagen im Belastungsfall führen. Daher ist die Kenntnis des resultierenden Eigenspannungszustands infolge des Fertigungsschritts durch geeignete Prognosemodelle unerlässlich. Eigenspannungen werden für gewöhnlich durch nachgelagerte mechanische Bearbeitungsschritte gezielt in Bauteile eingebracht oder durch thermische Nachbehandlungsprozesse eliminiert. Diese nachgelagerten Prozessschritte zur Eigenspannungseinstellung benötigen zusätzliche Ressourcen.

Das flexible Umformverfahren der inkrementellen Blechumformung zeichnet sich im Vergleich zu konventionellen Umformverfahren durch geringe Werkzeugkosten und Prozesskräfte bei gleichzeitig erhöhter Umformbarkeit aus. Durch die unterhalb des Werkzeugs lokalisierte Umformzone bietet die inkrementelle Blechumformung die Möglichkeit, Eigenspannungen lokal definiert in Bauteile einzubringen. Die Flexibilität der inkrementellen Blechumformung ermöglicht die Herstellung geometrisch identischer Bauteile mit unterschiedlichen Prozessparametern, welche die wirkenden Umformmechanismen beeinflussen. Der Zusammenhang von Prozessparametern, Umformmechanismen und den daraus resultierenden Eigenspannungen ist bislang nicht bekannt. Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein grundlegendes Verständnis über die Eigenspannungsbildung bei der inkrementellen Blechumformung zu erarbeiten, um Eigenspannungen durch diesen Umformprozess stabil und definiert in Bauteile einzubringen sowie die Verbesserung des Bauteileinsatzverhaltens durch gezielt induzierte Eigenspannungszustände zu quantifizieren.

Unter Zuhilfenahme eines numerischen Prozessmodells wird der Einfluss von Zustellinkrement und Werkzeugradius auf die Umformmechanismen und die Eigenspannungsbildung im Bauteil identifiziert. Basierend auf diesen Ergebnissen werden Konzepte der Spannungsüberlagerung analysiert und experimentell erprobt, um die Möglichkeiten der Eigenspannungseinstellung während des Umformprozesses zu vergrößern.

Eine gezielte Einstellung des Eigenspannungszustands kann genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit von Bauteilen unter statischer und zyklischer Last zu steigern. Dies eröffnet Möglichkeiten der Materialeinsparung durch niedrigere Sicherheitsfaktoren bei der Bauteilauslegung, um dem Leichtbaugedanken zur Steigerung der Ressourceneffizienz gerecht zu werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	viii
Vorabveröffentlichung von Inhalten	x
Formelzeichen und Abkürzungen	xii
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Inkrementelle Blechumformung	3
2.1.1 Prozessprinzip	3
2.1.2 Prozessparameter	4
2.1.3 Verfahrensvarianten	7
2.1.4 Anwendungen	9
2.2 Umformmechanismen	10
2.3 Eigenspannungen	13
2.3.1 Verfahren der Eigenspannungsermittlung	17
2.3.2 Röntgendiffraktometrie	18
2.3.3 Gezielte Eigenspannungseinstellung	20
2.3.4 Eigenspannungen in der inkrementellen Blechumformung	21
2.4 Fazit zum Stand der Kenntnisse	23
3 Zielsetzung	25
4 Analyse der Umformmechanismen	27
4.1 Experimentelle und numerische Randbedingungen	27
4.2 Bestimmung der Umformmechanismen	32
4.3 Analyse der Umformmechanismen	37
4.3.1 Einfache Zustellung	38
4.3.2 Texturanalyse	41
4.3.3 Mehrfache Zustellung	43
4.4 Zusammenfassung und Fazit	54
5 Gezielte Eigenspannungseinstellung	57
5.1 Experimentelle Eigenspannungsbestimmung	57
5.2 Numerische Eigenspannungsprognose	60
5.2.1 Erweiterte Materialmodellierung	60
5.2.2 Simulation des Ausspannprozesses	61
5.2.3 Einfache Zustellung	62
5.2.4 Mehrfache Zustellung	64
5.2.5 Werkzeugradius	69
5.3 Einfluss von Fließspannung und Blechdicke auf die Eigenspannung	70

5.3.1 Fließspannung	70
5.3.2 Blechdicke	72
5.4 Einfluss zeitabhängiger Prozessparameter auf die Eigenspannung	74
5.4.1 Vorschubgeschwindigkeit	76
5.4.2 Werkzeugrotation	78
5.5 Lokal begrenzte Eigenspannungseinstellung	80
5.6 Zusammenfassung und Fazit.....	89
6 Gezielte Eigenspannungseinstellung durch Spannungsüberlagerung	91
6.1 Druckspannungsüberlagerung.....	92
6.1.1 Prozessmodellierung und Prozessanalyse	95
6.1.2 Eigenspannungszustand.....	100
6.1.3 Eigenspannungsausbildung	101
6.1.4 Prozessgrenzen	103
6.2 Zugspannungsüberlagerung	107
6.2.1 Prozessmodellierung und Prozessanalyse	108
6.2.2 Eigenspannungszustand.....	110
6.2.3 Eigenspannungsausbildung	112
6.3 Zusammenfassung und Fazit.....	113
7 Stabilität und Leistungsfähigkeit	115
7.1 Stabilität der Eigenspannungen.....	115
7.1.1 Geometrieänderung durch Randbeschnitt	115
7.1.2 Eigenspannungsänderung durch Randbeschnitt.....	118
7.1.3 Zusammenfassung und Fazit	121
7.2 Bauteilleistungsfähigkeit.....	121
7.2.1 Überprüfung der Bauteilleistungsfähigkeit	122
7.2.2 Bauteilleistungsfähigkeit nach Prozesserweiterung	125
7.2.3 Versuchsdurchführung	126
7.2.4 Versuchsergebnisse	127
7.2.5 Zusammenfassung und Fazit	128
8 Zusammenfassung und Ausblick	129
Literaturverzeichnis	133
Lebenslauf	CXL