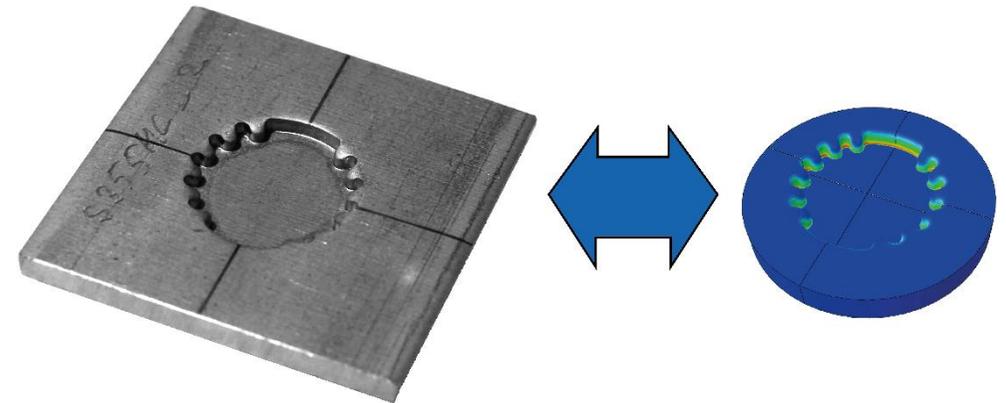


Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf
Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf

fosta@stahlforschung.de
www.stahlforschung.de



Machbarkeits- und Geometrievorhersage von Blechbauteilen mit Durchsetzungen aus hoch- und höchstfesten Stählen

Feasibility and geometry prediction of sheet
metal components with sheet metal extrusions
made of high- and ultra-high-strength steels

Forschung für die Praxis P 1114

Forschungsvorhaben P 1114 / IGF-Nr. 18625 N

Machbarkeits- und Geometrievorhersage von Blechbauteilen mit Durchsetzungen aus hoch- und höchstfesten Stählen

Feasibility and geometry prediction of sheet metal components with sheet metal extrusions made of high- and ultra-high-strength steels

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
Jens-Michael Stahl M.Sc.

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dipl.-Ing. Rainer Salomon

Das IGF-Vorhaben 18625 N der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München durchgeführt.

Beteiligte Unternehmen:

Albert Laux Präzisions-Werkzeugbau GmbH, München
Bayerische Motoren Werke AG, München
BÖHLER-UDDEHOLM Deutschland GmbH, Düsseldorf
data M Sheet Metal Solutions GmbH, Valley / Oberlindern
DYNAmore Gesellschaft für FEM Ingenieurdienstleistungen mbH, Stuttgart
Faurecia Autositze GmbH, Stadthagen
Feintool Technologie AG, Lyss
Fritz Schiess AG, Lichtensteig
Kistler Instrumente GmbH, Sindelfingen
SSAB EMEA AB, Borlänge
thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH, Hagen
Wöllner + Franz Werkzeug- und Automatisierungsmittelbau GmbH, Halsbrücke

Forschungsstelle:

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München

© 2020 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Printed in Germany

Bestell-Nr. P 1114
ISBN 978-3-946885-26-9

Ansprechpartner bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.:
Dipl.-Ing. Rainer Salomon
Tel.: +49 (0)211 / 6707-853; Fax: +49 (0)211 / 6707-840

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

Die Reduzierung der Herstellkosten ist ein zentraler Faktor zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen. In diesem Kontext bietet das Durchsetzen große Potentiale, da es mit diesem Verfahren möglich ist, Funktionsflächen in nur einem Fertigungsschritt und ohne Nachbearbeitung zu erzeugen.

Das Durchsetzen ist in DIN 8587 als ein Schubumformverfahren definiert, bei dem ein Werkstückteil gegenüber einem anderen mit einer geradlinigen Werkzeugbewegung verschoben wird. Die plastische Verformung wird, analog zum Feinschneiden oder Scherschneiden mit kleinem Schneidspalt, hauptsächlich durch einen Schubspannungszustand hervorgerufen. Ebenso ähneln sich die Werkzeugtechnik und Werkzeugkinematik der Verfahren. Dies lässt den Schluss zu, dass das Durchsetzen weitestgehend einem Schneidprozess ohne Durchschneiden des Werkstücks entspricht.

Zur Gewichtsreduktion von Bauteilen, sowie um auf einen Vergütungsprozess verzichten zu können, wird vermehrt auf Bleche aus hoch- und höchstfestem Stahl zurückgegriffen. In der Konstruktion und Entwicklung sind für diese Güten jedoch kaum Erfahrungswerte vorhanden. Um die Sicherheit des Prozesses bereits in der frühen Entwicklungsphase gewährleisten zu können, wird der Prozess mit der Finite-Elemente Methode simuliert. Hier ergeben sich besonders in der Materialmodellierung Herausforderungen.

Vom Scherschneiden ist bekannt, dass die Temperatur in der Scherzone auf über 300 °C steigen kann. Weiterhin sind Umformgrade und Dehnraten zu erwarten, die sich mit herkömmlichen Experimenten, wie dem Zugversuch, nicht abbilden lassen.

Um den experimentellen Aufwand zu reduzieren wird in diesem Forschungsprojekt eine Methodik vorgestellt und validiert, um dennoch eine effiziente Prognose von Geometrie- und Machbarkeit eines Blechbauteils mit Durchsetzungen zu ermöglichen. Dazu wird die Durchsetzlinie in wiederkehrende Formelemente zerlegt. Die charakteristische Ausformung dieser Durchsetzungen wird experimentell für vier verschiedene Blechwerkstoffe ermittelt. Eine anschließende Materialmodellierung ausgehend von einem einfachen Prüfverfahren wird als Ausgangspunkt für die Bestimmung des Korrekturmodells herangezogen. Dem folgt eine Anpassung dieses Modells, um die Abweichung zwischen Simulation und Experiment zu minimieren.

Durch Interpolation zwischen den Formelementen ist es möglich, das Materialmodell für komplexe Durchsetzgeometrien lokal anzupassen. Dies ermöglicht es, bereits in der frühen Entwicklungsphase die Machbarkeit und Geometrie von Durchsetzungen aus hoch- und höchstfesten Stählen zu beurteilen.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

März 2020

Abstract

The reduction of manufacturing costs is a primary aim for increasing the competitiveness of producing companies. In this context, embossing, also referred to as offsetting or sheet metal extrusion, shows great potential as it offers the possibility to create functional surfaces within a single manufacturing step and without any post-processing.

In DIN 8587, embossing is defined as a shear-forming process, in which one part of a work-piece is displaced relative to another with a linear tool motion. The plastic deformation is mainly caused by a state of shear stress, equivalent to fine blanking or blanking with a small die clearance. Similarly, the technology and tool kinematics are alike in these processes. This leads to the conclusion that embossing resembles a shear cutting process, though without completely cutting through the work-piece.

To reduce the weight of components as well as to waive a refinement process, high- and ultra-high-strength steels are being used increasingly. In engineering and design, there is almost no empirical data for these materials. In order to ensure process reliability in the early development phase, the process is simulated with the finite element method. Here, material modelling is the greatest challenge.

During the shearing process, the temperature in the shearing zone can rise to 300 °C. Furthermore, high strains and strain rates, which cannot be reproduced by conventional experiments like the tensile test, are to be expected.

To reduce the experimental effort, a methodology is presented and validated in this research project to allow a geometry and feasibility prognosis of sheet metal parts with embossings in spite of this challenges. This is accomplished by dividing the embossing line in recurrent geometrical elements. The characteristic shape of these embossings is identified experimentally. In the following, a material model is determined by simple tests and used as the initial point for the simulation. The difference between simulation and experiment is compensated by an adaptation of the material model.

By interpolating between these geometrical elements, it is possible to adapt the material model locally for complex embossing geometries. This enables to evaluate the feasibility and geometry of embossings out of high- and ultra-high-strength steels during the early development phase.

FOSTA - Research Association for Steel Application

March 2020

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	
	Introduction	1
1.1	Problemstellung	
	Problem definition.....	1
1.2	Motivation	
	Motivation	2
1.3	Zielsetzung	
	Objective	2
2	Stand der Technik	
	State of the art	4
2.1	Durchsetzen	
	Embossing.....	4
2.1.1	Verfahrenseinordnung und -beschreibung	
	Process classification and description.....	4
2.1.2	Ablauf des Durchsetzprozesses	
	Steps of the embossing process	5
2.1.3	Prozessparameter und Mechanik des Durchsetzprozesses	
	Process parameters and mechanics of the embossing process	8
2.1.4	Abgrenzung zu verwandten Verfahren	
	Separation of the embossing process to related processes	10
2.1.5	Schwierigkeitsgrad der Herstellung	
	Difficulty of the manufacturing process.....	11
2.2	Simulation und Materialmodellierung	
	Simulation and material modelling.....	13
2.2.1	Simulationsablauf	
	Simulation process	13
2.2.2	Beschreibung des Materialverhaltens	
	Material modelling	13
2.3	Forschungsgebiete des Durchsetzens	
	Research in Embossing	14
2.3.1	Durchsetzen und Zapfenpressen	
	Embossing and extrusion forming	14
2.3.2	Verwandte Verfahren	
	Related Processes	17
3	Vorgehensweise	
	Approach.....	19
4	Versuchs- und Messeinrichtungen	
	Experimental and measuring equipment.....	22

4.1	Versuchs- und Anlagentechnik für die Durchsetzversuche Equipment for the embossing experiments.....	22
4.1.1	Feinschneidpresse Fineblanking press.....	22
4.1.2	Durchsetzwerkzeug Embossing tool	23
4.1.3	Messtechnik Measurement equipment	24
4.2	Einrichtungen für die Vermessung der Durchsetzbauteile Equipment for the measurement of the embossed parts	25
4.2.1	Taktiles Oberflächenmessgerät Tactile surface measurement device	25
4.2.2	Auflichtmikroskop Incident light microscope	25
4.2.3	Optisches Emissionsspektrometer Optical emission spectrometer	26
4.3	Materialprüfeinrichtungen Material testing equipment.....	27
4.3.1	Universalprüfmaschine Universal test machine	27
4.3.2	Torsionsprüfmaschine Torsion test machine	27
5	Werkstoffe Materials.....	29
5.1	Blechwerkstoffe Sheet metal materials	29
5.2	Aktivelementwerkstoffe Active element materials.....	31
6	Zerlegen der Bauteilkontur in wiederkehrende Formelemente Partitioning of the embossing line in recurrent geometrical elements.....	32
6.1	Aufnahme des industriellen Ist-Zustandes Analysis of the industrial state of the art	32
6.2	Katalogisierung und Kategorisierung der Durchsetzbauteile Cataloging and categorization of the parts with embossings	33
6.3	Auswahl der Formelemente für die weiterführenden Untersuchungen Selection of geometrical elements for further investigations.....	34
7	Versuchsplan Design of experiments.....	36
7.1	Experimentelle Untersuchungen Experimental investigations	36

7.2	Simulationsgestützte Untersuchungen Numerical Investigations	38
8	Experimentelle Untersuchungen Experimental investigations	41
8.1	Einfluss der Prozessparameter auf die Durchsetzflächenkenngrößen Influence of the process parameters on the embossed surface characteristics	41
8.1.1	Einfluss von Werkstoff, Durchsetzliniengeometrie und Prozessparametern auf die Kanteneinzugshöhe Influence of material, embossing line geometry and process parameters on the die-roll height.....	42
8.1.2	Einfluss von Werkstoff und Durchsetzliniengeometrie und auf den Durchsetzflächenwinkel Influence of material and embossing line on the angle of the embossed surface	55
8.1.3	Fazit der experimentellen Untersuchungen der Durchsetzflächenkenngrößen Conclusion of the experimental investigation of the embossed surface characterisitic values	58
8.2	Einfluss der Prozessparameter auf die wirkenden Kräfte Influence of the process parameters on the acting forces	60
8.2.1	Verlauf der Durchsetzkraft Course of the embossing force	60
8.2.2	Einfluss der Durchsetzliniengeometrie Influence of the embossing line geometry	60
8.2.3	Einfluss der Stößelgeschwindigkeit Influence of the punch velocity	67
8.2.4	Einfluss der Beschichtung Influence of the coating	68
8.2.5	Fazit der experimentellen Untersuchungen der Prozesskräfte Conclusion of the experimental investigation of the process forces	69
8.3	Einfluss der Prozessparameter auf die Machbarkeit Influence of the process parameters on the feasibility.....	69
8.3.1	Einfluss der Durchsetzliniengeometrie und Durchsetztiefe Influence of the embossing line geometry	69
8.3.2	Einfluss der Beschichtung Influence of the coating	74
8.3.3	Fazit der Machbarkeitsuntersuchungen Conclusion of the experimental investiagtion of the feasibility	75
9	Simulationsgestützte Bestimmung der Formelementgeometrie Numerical determination of the embossed geometries	76
9.1	Simulationsmodelle Simulation models	76

9.1.1	Aufbau der Simulationsmodelle Simulation model setup	76
9.1.2	Materialmodellierung Material modelling	77
9.1.3	Beispielhafte Ergebnisse Exemplary results	78
9.2	Fehleruntersuchungen Error investigations	79
9.3	Fazit aus den numerischen Untersuchungen Conclusions of the numerical investigations	80
10	Korrekturmodell Adjustment model.....	82
10.1	Anpassung des Materialmodells Adjustment of the material model	82
10.1.1	Fließkurvenanpassung Flow curve adjustment.....	82
10.1.2	Auswirkungen auf den Kanteneinzug Influence on the die-roll height.....	83
10.1.3	Parameteridentifikationsalgorithmus und Ergebnisse Parameter identification algorithm and results	84
10.2	Kraftberechnung Force calculation.....	86
10.3	Fazit der Korrekturmodellerstellung Conclusions of adjustment model development.....	87
11	Validierung und Aufbau eines mit der Datenbank verknüpften Simulationsmodells Validation and setup of a simulation model linked to a database	88
11.1	Validierung Validation	88
11.1.1	Kraftberechnung Force calculation	88
11.1.2	Berechnung der Kanteneinzugshöhe Die-roll height calculation.....	90
11.2	Aufbau eines mit der Datenbank verknüpften Simulations-modells Setup of a simulation model linked to a database.....	92
11.2.1	Programmaufbau und Datenbankimplementierung Program setup and database implementation	92
11.2.2	Verknüpfung mit dem Simulationsmodell Link with the simulation model.....	96
11.2.3	Einschränkungen Limitations	97

11.3 Fazit der Validierung und der GUI-Implementierung Conclusions of the validation and the GUI-implementation	97
12 Zusammenfassung Summary	99
13 Ausblick Perspective	101
14 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project	102
15 Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to the economy	103
16 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept.....	108
17 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry	109
18 Literaturverzeichnis Bibliography	110
19 Verwendete Normen Used Standards	114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Blechbauteil einer Sitzverstellung mit Durchsetzungen.	2
Abbildung 2-1: Einordnung des Fertigungsverfahrens Durchsetzen gemäß DIN 8580 und 8587 [DIN8580, DIN8587]	5
Abbildung 2-2: Verschieben mit einseitiger (a) und beidseitiger Einspannung (b) nach [DIN8587] und [Hof12].	5
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Durchsetzprozesses ohne (links) und mit Gegenhalter (rechts) nach [Sch07] (a) und exemplarisches Durchsetzbauteil mit Geometrie nach [Vol13] (b).	6
Abbildung 2-4: Durchsetzflächenkenngrößen in Anlehnung an [Vol13] und [VDI2906-5].	7
Abbildung 2-5: Beispielhafter Stempelkraft-Stempelweg-Verlauf (oben) und Phasen des Durchsetzprozesses nach [Fei14] (unten).	8
Abbildung 2-6: Mögliche Ausprägungen des Durchsetzspaltes nach [Vol13].	9
Abbildung 2-7: Kräfte, Flächenlasten und Momente beim Durchsetzen in Anlehnung an [Tim56]; [Rom59] und [Lan90].	9
Abbildung 2-8: Abgrenzung des Durchsetzens zu den verwandten Verfahren Tiefziehen, Zapfenpressen, Feinschneiden und Strangpressen nach [Vol13]. ...	10
Abbildung 2-9: Beurteilung des Schwierigkeitsgrades von ebenen Feinschnittteilen aus [Sch07].	12
Abbildung 2-10: Verschiedene Extrapolationsansätze für einen Messwertsatz.	14
Abbildung 2-11: Bauteil mit geätztem Muster aus [Zhe05].	15
Abbildung 2-12: Kombiniertes Feinschneid - Zapfenpressprozess aus [Zhe06].	15
Abbildung 2-13: Kanteneinzugshöhe in Abhängigkeit des Durchsetzspaltes aus [Hir09].	16
Abbildung 2-14: Einfluss des Durchsetzspaltes auf die Rissentstehung aus [Vol13].	17
Abbildung 2-15: 3D-Simulation des Feinschneidprozesses mit Ringzacken aus [Man11].	18
Abbildung 3-1: Vorgehensschaubild des Forschungsprojekts.	21
Abbildung 4-1: Feinschneidpresse Feintool HFA 3200 plus	23
Abbildung 4-2: Eingesetztes Durchsetzwerkzeug.	23
Abbildung 4-3: Ins Durchsetzwerkzeug integrierte Kraft- und Wegmesstechnik.	24
Abbildung 4-4: Oberflächenmessplatz MarSurf PCV der Firma Mahr GmbH.	25
Abbildung 4-5: Auflichtmikroskop Axioplan 2 der Firma Carl Zeiss AG.	26
Abbildung 4-6: Optisches Emissionsspektrometer Foundry-Master der Firma WAS AG.	26
Abbildung 4-7: Universal Zug-Druck-Prüfmaschine 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co. KG.	27
Abbildung 4-8: Torsionsprüfmaschine am IUL.	28
Abbildung 5-1: Vergleich der Verfestigung der Blechwerkstoffe durch den n-Wert. ..	31
Abbildung 6-1: Auszug aus dem für den industriellen Ist-Zustand aufgenommenen Bauteilspektrum.	33

Abbildung 6-2: Methodik zur Zerlegung von Durchsetzlinien (oben) mit Beispielen (unten).....	34
Abbildung 6-3: Zählung der in den Durchsetzbauteilen enthaltenen Formelemente. .	34
Abbildung 6-4: Auswahl der Formelemente für die weiterführenden Untersuchungen.	35
Abbildung 7-1: Ritzelgeometrie zur Validierung.	37
Abbildung 7-2: Bearbeitung der Aktivelementkanten.	37
Abbildung 7-3: Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen.....	38
Abbildung 7-4: Plan der simulationsgestützten Untersuchungen	39
Abbildung 8-1: Hergestellte Bauteile am Beispiel des Blechwerkstoffes 22MnB5.....	42
Abbildung 8-2: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die kleine Kreisgeometrie ($r = 7,5$ mm).	42
Abbildung 8-3: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die große Kreisgeometrie ($r = 15$ mm).	43
Abbildung 8-4: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konvexen Messstelle.	44
Abbildung 8-5: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konkaven Messstelle.	44
Abbildung 8-6: Geometrieabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konkaven und konvexen Messstelle für S355MC und 22MnB5.....	45
Abbildung 8-7: Geometrieabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konkaven und konvexen Messstelle für S355MC und 22MnB5.....	45
Abbildung 8-8: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Langlochgeometrie an der runden Messstelle.....	46
Abbildung 8-9: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Langlochgeometrie an der geraden Messstelle.....	47
Abbildung 8-10: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Quadratgeometrie an der geraden Messstelle.....	47
Abbildung 8-11: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Quadratgeometrie an der Ecke.....	48
Abbildung 8-12: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus S355MC.	49
Abbildung 8-13: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus 22MnB5.	49
Abbildung 8-14: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus S700MC-mod.	50
Abbildung 8-15: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus S700MC.	50
Abbildung 8-16: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Ritzelgeometrie am Formelement mit einem Radius von 11,38 mm.	51
Abbildung 8-17: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Ritzelgeometrie am konkaven Formelement mit einem Radius von 1 mm.	52

Abbildung 8-18: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Ritzelgeometrie am konvexen Formelement mit einem Radius von 1 mm.....	52
Abbildung 8-19: Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf die Kanteneinzugshöhe für eine Durchsetztiefe von 90 % an der großen Kreisgeometrie.	53
Abbildung 8-20: Einfluss der Aktivelementbeschichtung auf die Kanteneinzugshöhe für eine Durchsetztiefe von 90 % an der kleinen Kreisgeometrie.	54
Abbildung 8-21: Einfluss der Aktivelementbeschichtung auf die Kanteneinzugshöhe für eine Durchsetztiefe von 90 % an der großen Kreisgeometrie.	54
Abbildung 8-22: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Durchsetzflächenwinkel für die kleine Kreisgeometrie ($r = 7,5$ mm).....	55
Abbildung 8-23: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Durchsetzflächenwinkel für die große Kreisgeometrie ($r = 15$ mm).....	56
Abbildung 8-24: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Durchsetzflächenwinkel der konkaven Messstelle der Kettengliedgeometrie.....	56
Abbildung 8-25: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff S355MC.	57
Abbildung 8-26: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff 22MnB5.....	57
Abbildung 8-27: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff S700MC-mod.	58
Abbildung 8-28: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff S700MC.	58
Abbildung 8-29: Exemplarischer Verlauf der Durchsetzkraft über den Stößelweg für die vier Blechwerkstoffe.....	60
Abbildung 8-30: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft der kleinen Kreisgeometrie.	61
Abbildung 8-31: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft der großen Kreisgeometrie.	62
Abbildung 8-32: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Kettengliedgeometrie.....	62
Abbildung 8-33: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Langlochgeometrie.	63
Abbildung 8-34: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Quadratgeometrie.....	64
Abbildung 8-35: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Ritzelgeometrie.....	64
Abbildung 8-36: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff S355MC.	65
Abbildung 8-37: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff 22MnB5.....	65
Abbildung 8-38: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff S700MC-mod.	66
Abbildung 8-39: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff S700MC.	67

Abbildung 8-40: Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf die maximale bezogene Durchsetzkraft.	67
Abbildung 8-41: Einfluss der Aktivelementbeschichtung auf die maximale bezogene Durchsetzkraft.	68
Abbildung 8-42: Einfluss der Beschichtung auf die maximale Rückzugskraft.	68
Abbildung 8-43: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der kleinen Kreisgeometrie ($R = 7,5 \text{ mm}$).	70
Abbildung 8-44: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der großen Kreisgeometrie ($r = 15 \text{ mm}$).	70
Abbildung 8-45: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Kettengliedgeometrie (konkave Trennstelle).	71
Abbildung 8-46: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Kettengliedgeometrie (konvexe Trennstelle).	71
Abbildung 8-47: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Langlochgeometrie (gerade Trennstelle).	72
Abbildung 8-48: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Quadratgeometrie (Ecke).	73
Abbildung 8-49: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Ritzelgeometrie (Trennstelle am großen Radius mit $r = 11,35 \text{ mm}$).	73
Abbildung 8-50: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Ritzelgeometrie (Trennstelle am kleinen konvexen Radius mit $r = 1 \text{ mm}$).	74
Abbildung 8-51: Schliffbilder der Durchsetzzone der großen Kreisgeometrie ($r = 15 \text{ mm}$) mit unbeschichteten Aktivelementen und einer Durchsetztiefe von 90 %. ...	74
Abbildung 9-1: Schematische Darstellung eines Simulationsmodells.	76
Abbildung 9-2: Extrapolationen nach Voce und Swift an den Fließkurven der Werkstoffen S355MC und 22MnB5 in drei Orientierungen zur Walzrichtung.	77
Abbildung 9-3: Extrapolationen nach Voce und Swift an den Fließkurven der Werkstoffen S700MC-mod und S700MC in drei Orientierungen zur Walzrichtung.	78
Abbildung 9-4: Beispielhafte Simulationsergebnisse für eine Durchsetztiefe von 90 % und dem Blechwerkstoff S355MC.	79
Abbildung 9-5: Abhängigkeit der Kanteneinzugshöhe vom Massenskalierungsfaktor am Beispiel der großen Kreisgeometrie.	79
Abbildung 9-6: Unterschiedliche Simulationsergebnisse durch zwei verschiedene Massenskalierungsfaktoren.	80
Abbildung 9-7: Einfluss der Elementanzahl in der Scherzone auf die Kanteneinzugshöhe am Beispiel der großen Kreisgeometrie.	80
Abbildung 10-1: Einfluss des Materialmodells auf die Ausbildung des Kanteneinzugs am Beispiel des Blechwerkstoff S700MC und der großen Kreisgeometrie.	83
Abbildung 10-2: Veränderung der Kanteneinzugshöhe durch die Anpassung der Fließkurve.	83
Abbildung 10-3: Schematisches Vorgehen zur Detektion der Kanteneinzugshöhe nach [Sta17].	84
Abbildung 10-4: Ablauf des Parameteridentifikationsalgorithmus nach [Sta17].	85
Abbildung 10-5: Gleichung zur Beschreibung der Abhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft vom Formelementradius.	86

Verzeichnisse

Lists

Abbildung 11-1: Vergleich der experimentell ermittelten und berechneten maximalen spezifischen Durchsetzkraft für die Ritzelgeometrie mit einer Durchsetztiefe von 70 %.	89
Abbildung 11-2: Vergleich der experimentell ermittelten und berechneten maximalen spezifischen Durchsetzkraft für die Ritzelgeometrie mit einer Durchsetztiefe von 90 %.	89
Abbildung 11-3: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinzugshöhen an der Ritzelgeometrie am Formelement mit einem Radius von 11,38 mm.	90
Abbildung 11-4: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinzugshöhen an der Ritzelgeometrie am konkaven Formelement mit einem Radius von 1 mm.	90
Abbildung 11-5: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinzugshöhen an der Ritzelgeometrie am konvexen Formelement mit einem Radius von 1 mm.	91
Abbildung 11-6: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinzugshöhen an der Unterseite der Ritzelgeometrie am Formelement mit einem Radius von 11,38 mm.	92
Abbildung 11-7: Registerkarte „Durchsetzgeometrieerstellung“.	93
Abbildung 11-8: Registerkarte „Werkzeug“.	94
Abbildung 11-9: Registerkarte „Blech“.	95
Abbildung 11-10: Fenster „Geometrie prüfen“.	95
Abbildung 11-11: Erstelltes Modell in Abaqus.	96
Abbildung 11-12: Erstelltes Modell in Abaqus mit sichtbarer Verfeinerungszone.	97
Abbildung 12-1: Untersuchte Durchsetzliniengeometrien am Beispiel des Blechwerkstoffes 22MnB5.	99
Abbildung 12-2: Simulationsmodelle der untersuchten Geometrien.	100

List of figures

Figure 1-1: Sheet metal part of a seat adjuster with embossings.....	2
Figure 2-1: Classification of the embossing process according to DIN 8580 and DIN 8587 [DIN8580, DIN8587].....	5
Figure 2-2: Offsetting with one- (a) and double-sided clamping (b) according to [DIN8587] and [Hof12].	5
Figure 2-3: Schematic illustration of the embossing process without (left) and with counter punch (right) according to [Sch07] (a) and exemplary part with embossing according to [Vol13] (b).....	6
Figure 2-4: Characteristic values of an embossed surface according to [Vol13] and [VDI2906-5].....	7
Figure 2-5: Exemplary punch-force – punch-travel diagram (top) and phases of the embossing process according to [Fei14] (bottom).	8
Figure 2-6: Possible configurations for the die clearance in embossing according to [Vol13].....	9
Figure 2-7: Forces, surface loads and torques in embossing according to [Tim56]; [Rom59] and [Lan90].....	9
Figure 2-8: Separation of the embossing process to the related manufacturing processes deep drawing, extrusion forming, fineblanking and extrusion [Vol13].	10
Figure 2-9: Classification of the difficulty of flat fineblanked parts according to [Sch07].	12
Figure 2-10: Different extrapolation models for a measured curve.....	14
Figure 2-11: Part with etched pattern taken from [Zhe05].	15
Figure 2-12: Combined fineblanking – sheet metal extrusion process taken from [Zhe06].....	15
Figure 2-13: Die-roll height in dependence of the die clearance taken from [Hir09]...	16
Figure 2-14: Influence of the die clearance on fracture taken from [Vol13].	17
Figure 2-15: 3D-Simulation of the fineblanking process with V-rings taken from [Man11].	18
Figure 3-1: Illustration of the research project’s approach.....	21
Figure 4-1: Fineblanking press Feintool HFA 3200 plus	23
Figure 4-2: Embossing tool used for the experiments.	23
Figure 4-3: Force and displacement measurement devices integrated in the embossing tool.....	24
Figure 4-4: Surface measuring station MarSurf PCV by the company Mahr GmbH...	25
Figure 4-5: Incident light microscope Axioplan 2 by the company Carl Zeiss AG.	26
Figure 4-6: Optical emission spectrometer Foundry Master by the company WAS AG.	26
Figure 4-7: Universal test machine 1484/DUPS-M by the company Zwick GmbH & Co. KG.	27
Figure 4-8: Torsion test machine at the IUL	28
Figure 5-1: Comparison of the strain hardening of the sheet metal material by the n-value.	31
Figure 6-1: Extract of the parts recorded for the industrial state of the art.....	33

Figure 6-2: Methodology for the dissection of embossed lines (top) with examples (bottom).....	34
Figure 6-3: Counting of the geometrical elements contained in the embossed parts.	34
Figure 6-4: Selection of geometrical elements for further investigations.	35
Figure 7-1: Pinion geometry for the validation.	37
Figure 7-2: Edge condition of the active elements.....	37
Figure 7-3: Design of the experimental investigations.	38
Figure 7-4: Design of the numerical investigations.....	39
Figure 8-1: Manufactured parts made of 22MnB5.	42
Figure 8-2: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the small circle geometry ($r = 7,5$ mm).	42
Figure 8-3: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the big circle geometry ($r = 15$ mm).....	43
Figure 8-4: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the convex measuring position.	44
Figure 8-5: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the concave measuring position.	44
Figure 8-6: Geometry dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the concave and convex measuring position for S355MC and 22MnB5.	45
Figure 8-7: Geometry dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the concave and convex measuring position for S355MC and 22MnB5.	45
Figure 8-8: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the slot geometry at the round measuring position.	46
Figure 8-9: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the slot geometry at the straight measuring position.	47
Figure 8-10: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the square geometry at the straight measuring position.....	47
Figure 8-11: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the square geometry at the corner.	48
Figure 8-12: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel S355MC.	49
Figure 8-13: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel 22MnB5.....	49
Figure 8-14: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel S700MC-mod.....	50
Figure 8-15: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel S700MC.	50
Figure 8-16: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the pinion geometry at the geometrical element with a radius of 11,38 mm.....	51
Figure 8-17: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the pinion geometry at the concave geometrical element with a radius of 1 mm.....	52
Figure 8-18: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the pinion geometry at the convex geometrical element with a radius of 1 mm.....	52
Figure 8-19: Influence of the punch velocity on the die-roll height of the big circle geometry for an embossing depth of 90 %.	53

Figure 8-20: Influence of the active element coating on the die-roll height of the small circle geometry for an embossing depth of 90 %.	54
Figure 8-21: Influence of the active element coating on the die-roll height of the big circle geometry for an embossing depth of 90 %.	54
Figure 8-22: Material and embossing depth dependency of the angles of the embossed surface for the small circle geometry ($r = 7,5$ mm).	55
Figure 8-23: Material and embossing depth dependency of the angles of the embossed surface for the big circle geometry ($r = 15$ mm).	56
Figure 8-24: Material and embossing depth dependency of the angles of the embossed surface on the concave measuring position of the chain link geometry.	56
Figure 8-25: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material S355MC.	57
Figure 8-26: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material 22MnB5.	57
Figure 8-27: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material S700MC-mod.	58
Figure 8-28: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material S700MC.	58
Figure 8-29: Exemplary course of the embossing force plotted against the punch travel for the four sheet metal materials.	60
Figure 8-30: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the small circle geometry.	61
Figure 8-31: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the big circle geometry.	62
Figure 8-32: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the chain link geometry.	63
Figure 8-33: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the slot geometry.	63
Figure 8-34: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the square geometry.	64
Figure 8-35: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the pinion geometry.	64
Figure 8-36: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force the the sheet metal material S355MC.	65
Figure 8-37: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force the the sheet metal material 22MnB5.	65
Figure 8-38: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force the the sheet metal material S700MC-mod.	66
Figure 8-39: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force the the sheet metal material S700MC.	67
Figure 8-40: Influence of the punch velocity on the maximum of the specific embossing force.	67
Figure 8-41: Influence of the active element's coating on the maximum of the specific embossing force.	68
Figure 8-42 Influence of the active element's coating on the retraction force.	68

Figure 8-43: Microsections for different embossing depths of the small circle geometry (R = 7,5 mm).	70
Figure 8-44: Microsections for different embossing depths of the big circle geometry (r = 15 mm).	70
Figure 8-45: Microsections for different embossing depths of the chain link geometry (concave cutting position).	71
Figure 8-46: Microsections for different embossing depths of the chain link geometry (convex cutting position).	71
Figure 8-47: Microsections for different embossing depths of the slot geometry (straight cutting position).	72
Figure 8-48: Microsections for different embossing depths of the square geometry (cutting position at the corner).	73
Figure 8-49: Microsections for different embossing depths of the pinion geometry (cutting position at the big radius with r = 11,35 mm).	73
Figure 8-50: Microsections for different embossing depths of the pinion geometry (cutting position at the small convex radius with r = 1 mm).	74
Figure 8-51: Microsections of the embossing zone of the big circle geometry (r = 15 mm) for an embossing depth of 90 % and uncoated active elements.	74
Figure 9-1: Schematic illustration of a simulation model.	76
Figure 9-2: Extrapolation models according to Voce and Swift on the flow curves of the materials S355MC and 22MnB5 for three different orientations to the rolling direction.	78
Figure 9-3: Extrapolation models according to Voce and Swift on the flow curves of the materials S700MC-mod and S700MC for three different orientations to the rolling direction.	78
Figure 9-4: Exemplary simulation results for an embossing depth of 90 % and the sheet metal material S355MC.	79
Figure 9-5: Dependency of the die-roll height from the mass scaling factor on the example of the big circle geometry.	79
Figure 9-6: Different simulation results caused by two different mass scaling factors.	80
Figure 9-7: Influence of the number of elements in the shearing zone on the die-roll height on the example of the big circle geometry.	80
Figure 10-1: Influence of the material model on the shape of the die-roll on the example of the sheet metal material S700MC and the big circle geometry.	83
Figure 10-2: Changes in the die-roll height due to a different flow curve.	83
Figure 10-3: Schematic procedure for the detection of the die-roll height according to [Sta17].	84
Figure 10-4: Parameter identification algorithm according to [Sta17].	85
Figure 10-5: Equation for the calculation of the maximum of the specific embossing force for different geometrical element radii.	86
Figure 11-1: Comparison of the experimentally determined and calculated maxima of the specific embossing force for the pinion geometry and an embossing depth of 70 %.	89

Figure 11-2: Comparison of the experimentally determined and calculated maxima of the specific embossing force for the pinion geometry and an embossing depth of 90 %.....	89
Figure 11-3: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the pinion geometry at the geometrical element with a radius of 11,38 mm.	90
Figure 11-4: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the pinion geometry at the concave geometrical element with a radius of 1 mm.	91
Figure 11-5: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the pinion geometry at the convex geometrical element with a radius of 1 mm.	91
Figure 11-6: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the lower side of the pinion geometry at the geometrical element with a radius of 11,38 mm.	92
Figure 11-7: Tab „Durchsetzgeometrieerstellung“	93
Figure 11-8: Tab „Werkzeug“	94
Figure 11-9: Tab „Blech“	95
Figure 11-10: Tab „Geometrie prüfen“.....	95
Figure 11-11: Generated model in Abaqus.	96
Figure 11-12: Generated model in Abaqus with visible refinement zone.	97
Figure 12-1: Investigated embossing line geometries on the example of the sheet metal material 22MnB5.	99
Figure 12-2: Simulation models of the investigated geometries.	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe in Massenprozent.	30
Tabelle 5-2: Mechanische Kennwerte der Blechwerkstoffe mit Standartabweichung.	30
Tabelle 5-3: Chemische Zusammensetzung der Aktivelementwerkstoffe in Massenprozent aus [Böh09] und [Böh14].	31
Tabelle 10-1: Interpolationsfaktoren der verschiedenen Materialien und Formelemente.	85
Tabelle 10-2: Modellparameter der Formelementkraftberechnung.	87

List of tables

Table 5-1: Chemical composition of the test materials in percentage by mass.	30
Table 5-2: Mechanical properties of the sheet metal materials with standard deviation.	30
Table 5-3: Chemical composition of the active element materials in percentage by mass taken from [Böh09] and [Böh14].	31
Table 10-1: Interpolation factors of the different materials and geometrical elements.	85
Table 10-2: Model parameters of the geometrical element's force calculation.	87

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

A_{FE}, B_{FE}	Modellparameter der Kraftberechnungsformel
A_S, B_S	Modellparameter des Swift-Modells
A_V, B_V	Modellparameter des Voce-Modells
DIN	Deutsches Institut für Normung
F_{GH}	Gegenhalterkraft
F_H	Stempelseitige Normalspannungsergebnis in horizontaler Richtung
F_H'	Matrizenseitige Normalspannungsergebnis in horizontaler Richtung
F_{NH}	Niederhalterkraft
F_S	Stempelkraft
F_{Smax}	Maximale Stempelkraft
F_S'	Kraft auf Matrize
F_V	Stempelseitige Normalspannungsergebnis in vertikaler Richtung
F_V'	Matrizenseitige Normalspannungsergebnis in vertikaler Richtung
FEM	Finite-Elemente Methode
f_{FE}	Maximale spezifische Durchsetzkraft aus der Kraftberechnungsformel
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
h_D	Stempelseitige relative Durchsetztiefe
$h_{D,S}$	Stempelseitige Durchsetztiefe
$h_{F,S}$	Stempelseitige Fasenhöhe
$h_{K,S}$	Stempelseitige Kanteneinziehungshöhe
$h_{R,M}$	Matrizenseitige Anrisshöhe
IUL	Institut für Umformtechnik und Leichtbau
k	Korrekturfaktor
k_f	Wahre Fließspannung
k_{fS}	Fließspannung nach Swift
k_{fV}	Fließspannung nach Voce
k_{f0}	Fließgrenze in wahrer Spannung
l	Hebelarm
l_D	Länge der Durchsetzlinie
M_{GH}	Gegenhalterseitiges Biegemoment
M_{NH}	Niederhalterseitiges Biegemoment

n	Verfestigungsexponent
r	Radius
r_M	Matrizenverrundung
r_S	Stempelverrundung
s	Stößelweg
R_m	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	0,2%-Streckgrenze
t	Blechdicke
u	Durchsetzspalt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
v	Stößelnenngeschwindigkeit
x, y	Koordinaten
x_{rot}, y_{rot}	Rotierte Koordinaten
α	Interpolationsfaktor
α_S	Stempelseitiger Durchsetzflächenwinkel
μ	Reibzahl
φ	Logarithmischer Umformgrad

1 Einleitung Introduction

Kurzfassung

Durchsetzen ist ein Schubumformverfahren in dem in nur einem Fertigungsschritt und ohne Nachbearbeitung Funktionsflächen erzeugt werden können. Zur Gewichtsreduzierung werden hierbei vermehrt hoch- und höchstfeste Stähle eingesetzt, die durch die unzureichende Vorhersagegenauigkeit gängiger Simulationsmodelle unter anderem zu erhöhten Kosten und längeren Einarbeitungszeiten führen. Dem wird durch das Forschungsziel, der verbesserten Geometrie- und Machbarkeitsvorhersage von Blechbauteilen mit Durchsetzungen begegnet.

Abstract

Embossing is a shear forming process which is capable of manufacturing functional surfaces in a single step and without any postprocessing. To reduce a part's weight, the usage of high- und ultra-high-strength steels is increasing. Caused by the insufficient results of current simulation models, this leads, among others, to higher costs and additional time for the tool tryout. The objective of this project is to face this challenge by an improved geometry and feasibility prediction of sheet metal parts with embossings.

1.1 Problemstellung Problem definition

Hoch- und höchstfeste Stahlwerkstoffe bieten erhebliches Potential zur Gewichtseinsparung von Personenkraftwagen. Gerade bei sicherheitsrelevanten Bauteilen mit Durchsetzungen wie Sitzverstellern, dargestellt in Abbildung 1-1, kann durch den Einsatz derartiger Stahlwerkstoffe die Blechdicke und damit das Bauteilgewicht bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften reduziert werden. Um bereits in der frühen Entwicklungsphase die Machbarkeit und die Geometrie von Bauteilen mit Durchsetzungen abschätzen zu können wird die Finite-Elemente-Methode zur Prozesssimulation herangezogen. Weiterhin wird hierdurch die Auslegung der Werkzeuge hinsichtlich der auftretenden Belastungen und der Maßhaltigkeit des Bauteils unterstützt. Dies ist für das Durchsetzen hoch- und höherfester Stähle jedoch nicht Stand der Technik, wofür besonders die hohen zu erwartenden Dehnungen, Dehnraten und Temperaturen in der Scherzone verantwortlich sind, die eine klassische Materialmodellierung nur in beschränkten Bereichen beziehungsweise unter hohem Aufwand erlauben. Erschwerend kommt hinzu, dass zu diesen Stahlgütern kaum Expertenwissen vorhanden ist. Um dennoch gewichtsreduzierte Blechbauteile bei gleichzeitiger Senkung der Kosten herstellen zu können sind Berechnungsmodelle für den Durchsetzprozess von Nöten.



Abbildung 1-1: Blechbauteil einer Sitzverstellung mit Durchsetzungen.

Figure 1-1: Sheet metal part of a seat adjuster with embossings.

1.2 Motivation Motivation

Das Durchsetzen bietet, ähnlich wie das Feinschneiden, große Potentiale da es mit diesem Verfahren möglich ist Funktionsflächen in nur einem Fertigungsschritt und ohne Nachbearbeitung zu erzeugen. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Senkung der Herstellkosten und Ressourceneffizienz ein entscheidender Vorteil. Durch den zusätzlichen Einsatz hoch- und höchstfester Stähle kann weiterhin das Bauteilgewicht unter Beibehaltung oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erreicht werden. Gerade im Einsatz in Personen- und Nutzfahrzeugen kann dies, verstärkt durch Sekundäreffekte, zur Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsreduzierung beitragen. Dem stehen lediglich die oben beschriebenen Herausforderungen in der Materialmodellierung und Simulation entgegen. Somit sind durch eine verbesserte Geometrie- und Machbarkeitsvorhersage von Blechbauteilen mit Durchsetzungen aus hoch- und höchstfesten Stählen folgende Vorteile zu erwarten:

- Kürzere Einarbeitungszeit durch angepasste Werkzeuge
- Höhere Standzeiten durch belastungsgerecht konstruierte Werkzeuge
- Beibehaltung oder Verbesserung der mechanischen Bauteileigenschaften bei gleichzeitiger Reduzierung des Gewichts
- Weniger Ausschuss durch die Identifikation kritischer Bauteilbereiche
- Reduktion des Kanteneinzuges durch angepasste Bauteilgeometrien und damit erhöhte Sicherheit durch größere zur Verfügung stehende Funktionsfläche
- Schaffung von Expertenwissen durch breite experimentelle Basis

1.3 Zielsetzung Objective

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens ist die verbesserte Geometrie- und Machbarkeitsvorhersage von Blechbauteilen mit Durchsetzungen aus hoch- und höchstfesten Stählen für komplexe Geometrien. Dies wird durch den Ansatz verfolgt, Standardgeometrien aus experimentellen Durchsetzversuchen durch empirisch angepasste Materialkarten anhand von Finite-Elemente-Simulationen abzubilden. Somit werden für unterschiedliche Formelemente verschiedene, angepasste Materialmodelle erarbeitet. Für die Simulation von komplexen industriellen Bauteilen werden dann, zur Verbesserung der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Formelemente, partielle Materialeigenschaften zugeordnet. Anhand eines alternativen,

praxisorientierten Lösungsansatzes sollen Simulation qualitativ und quantitativ hinreichend genau approximiert werden. Im Detail werden im Rahmen des Forschungsvorhabens vier Forschungsziele angestrebt:

1. Erarbeitung einer Methodik zur Zerlegung der Bauteilkontur von industriellen Durchsetzbauteilen in wiederkehrende Form- bzw. Geometrieelemente.
2. Abbilden der Formelemente mittels FE-Simulation und Validierung durch experimentell hergestellte Durchsetzbauteile. Ableiten von empirischen bauteilgeometrieabhängigen Korrekturfaktoren zur Modifikation der Materialkarte.
3. Aufbau eines Simulationsmodells für komplexe industrielle Durchsetzoperationen, in dem partiell in Abhängigkeit von Formelementen angepasste Materialeigenschaften zugeordnet werden können.
4. Aufbau einer Datenbankstruktur zur automatisierten Zuweisung von Formelementen und den dazugehörigen modifizierten Materialeigenschaften zur Ausführung einer automatisierten Durchsetzsimulation von komplexen industriellen Bauteilen.

2 Stand der Technik State of the art

Kurzfassung

Zuerst erfolgt eine Vorstellung und Zuordnung des Durchsetzprozesses innerhalb der in DIN 8580 definierten Verfahren. Anschließend wird der Ablauf, die Prozessparameter und die Mechanik des Durchsetzens näher betrachtet, gefolgt von einer Abgrenzung zu verwandten Verfahren, insbesondere dem Feinschneiden. Die Schwierigkeit der Herstellung wird anhand letzterem beleuchtet. Wichtige Begriffe der FEM-Simulation und der zugehörigen Materialmodellierung werden erklärt. Zuletzt wird der Stand der Forschung präsentiert.

Abstract

At first, an introduction and classification of the embossing processes within the production techniques defined in DIN 8580 is presented. Afterwards, typical steps, process parameters, and the mechanics of embossing are explained followed by a separation to related processes, in particular fine-blanking. The level of difficulty is clarified using the example of shear cutting. Important terms of the FEM-simulation and material modelling are enlightened. At last, the research field focusing on embossing is presented.

2.1 Durchsetzen Embossing

2.1.1 Verfahrenseinordnung und -beschreibung Process classification and description

Die Einordnung des Fertigungsverfahrens Durchsetzen nach [DIN8587] ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

Dort wird es definiert als das Verschieben eines Werkstückteiles gegenüber angrenzenden Werkstückteilen.

Beim Verschieben wiederum werden benachbarte Schnittflächen des Werkstücks in Krafrichtung durch geradlinige Bewegung zueinander verlagert [DIN8587]. Durchsetzen ist hierbei das Verschieben mit beidseitiger Einspannung beziehungsweise mit geschlossener Werkzeugkante. Dies ist Schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt. [Hof12]

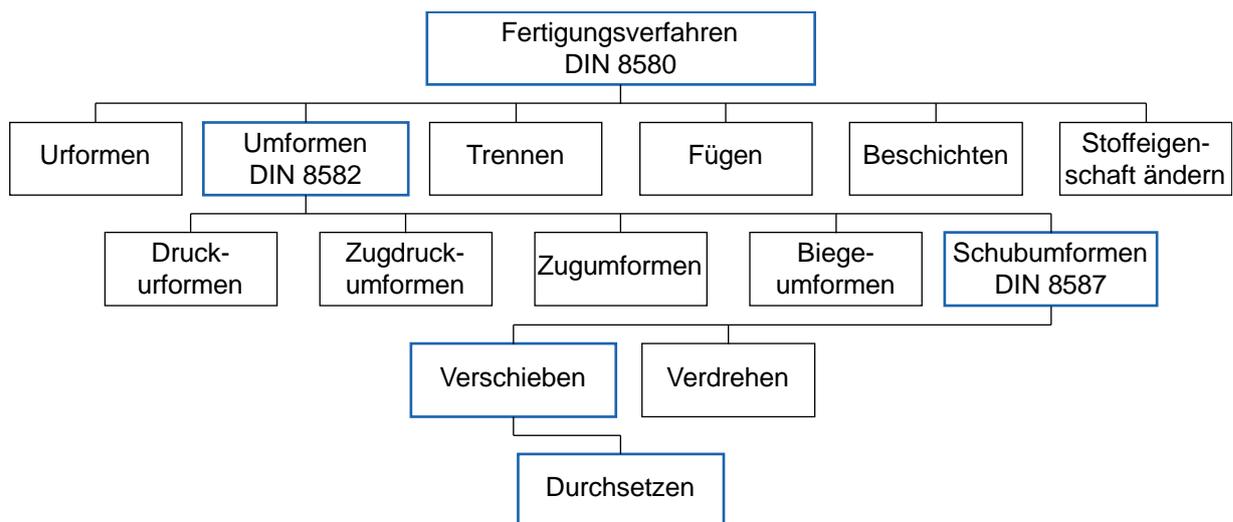


Abbildung 2-1: Einordnung des Fertigungsverfahrens Durchsetzen gemäß DIN 8580 und 8587 [DIN8580, DIN8587]

Figure 2-1: Classification of the embossing process according to DIN 8580 and DIN 8587 [DIN8580, DIN8587]

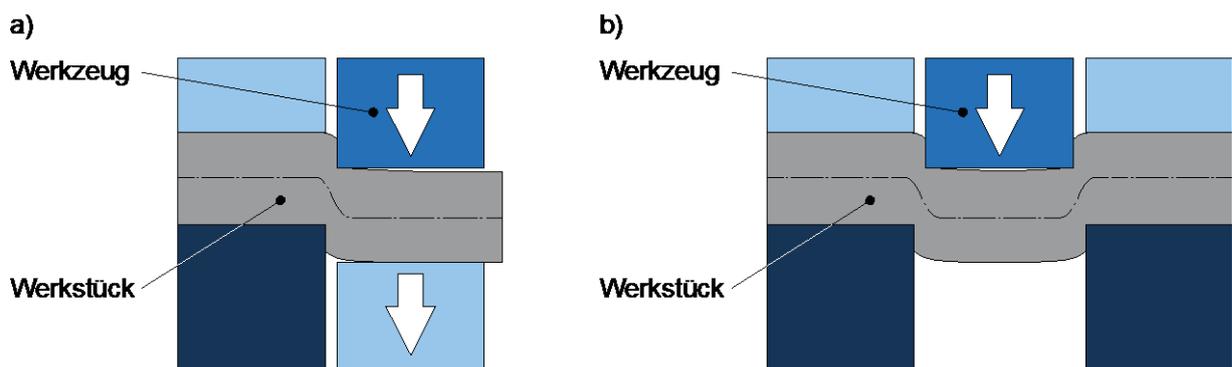


Abbildung 2-2: Verschieben mit einseitiger (a) und beidseitiger Einspannung (b) nach [DIN8587] und [Hof12].

Figure 2-2: Offsetting with one- (a) and double-sided clamping (b) according to [DIN8587] and [Hof12].

Die für die Verlagerung nötige plastische Verformung wird hierbei hauptsächlich durch Schubbeanspruchung verursacht, weshalb das Durchsetzen den Schubumformverfahren zugeordnet wird. Die in [DIN8582] beschriebene Übergruppe, das Umformen, kennzeichnet dass die Form des Werkstücks beim Durchsetzen unter Beibehaltung von Masse und Stoffzusammenhalt geändert wird. Dabei bleibt der Faserverlauf weitestgehend erhalten, was sich positiv auf die mechanischen Bauteileigenschaften auswirkt [Klo06]. [DIN8582], [DIN8587]

2.1.2 Ablauf des Durchsetzprozesses Steps of the embossing process

Das Durchsetzen ist mit allen am Prozess beteiligten Elementen ist zusammen mit einem beispielhaften Blechbauteil mit Durchsetzung in Abbildung 2-3 illustriert.

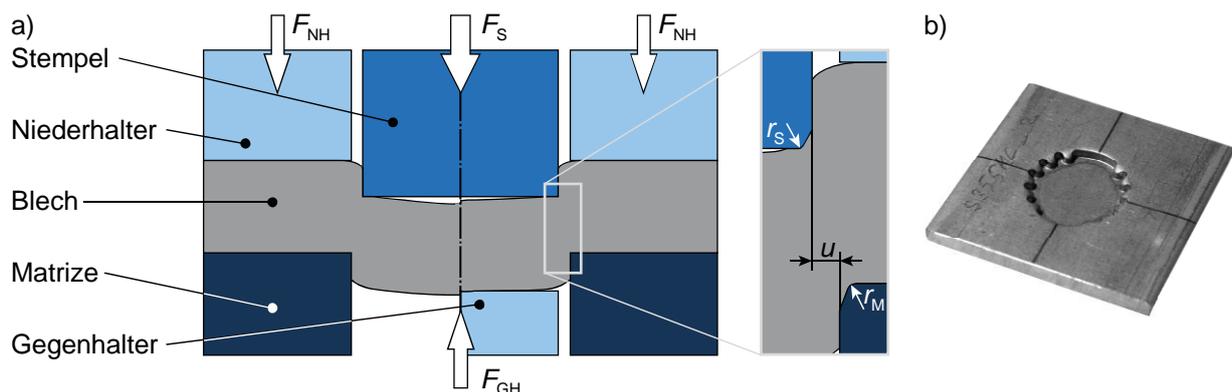


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Durchsetzprozesses ohne (links) und mit Gegenhalter (rechts) nach [Sch07] (a) und exemplarisches Durchsetzbauteil mit Geometrie nach [Vol13] (b).

Figure 2-3: Schematic illustration of the embossing process without (left) and with counter punch (right) according to [Sch07] (a) and exemplary part with embossing according to [Vol13] (b).

Die Formgebung findet hauptsächlich durch Stempel und Matrize statt. Diese beiden Werkzeugbestandteile, auch Aktivelemente genannt, bewirken durch eine geradlinige Relativbewegung zueinander die Ausformung der gewünschten Kontur im Blech. Die dafür nötige Kraft F_S wird als Stempelkraft bezeichnet. Der Durchsetzspalt u , der Abstand von Stempel und Matrize senkrecht zur Bewegungsrichtung, ist hierbei der wichtigste Prozessparameter. Falls der Stempel kleiner als die Matrize ist spricht man von einem positiven Durchsetzspalt, andernfalls von einem negativen (siehe Kapitel 2.1.3). Weiterhin weisen beide Aktivelemente eine auf den Prozess abgestimmte Kanten geometrie auf. Diese kann zum Beispiel eine Kantenverrundung mit Radius r_S am Stempel und r_M an der Matrize mit zusätzlicher Fase sein. Niederhalter und Gegenhalter werden zur Verringerung der Aufbiegung des Bleches eingesetzt. Hierfür sind die Niederhalterkraft F_{NH} und die Gegenhalterkraft F_{GH} erforderlich. Der zugrundeliegende Mechanismus wird in Kapitel 2.1.3 genauer erläutert. Ringzacken an Niederhalter, Matrize oder beiden können eingesetzt werden um das Nachfließen des Werkstoffs beim Eindringen des Stempels zu behindern. Insbesondere das Durchsetzen mit Gegenhalter und Ringzacken ähnelt dem Feinschneiden hinsichtlich Werkzeugaufbau, Kraftwirkung und den prozessbeeinflussenden Parametern, allerdings ohne die Werkstofftrennung. Durch diese Ähnlichkeit, welche in Kapitel 2.1.4 genauer betrachtet wird, bezeichnet man das Durchsetzen auch als partiellen Feinschneidprozess. [Hof12]; [Sch07]

Die Anforderungen an ein Bauteil mit Durchsetzungen ergeben sich aus dem Anwendungsfall. Hierzu gehört zum Beispiel die Belastbarkeit des Restquerschnittes, die für eine Kraftübertragung zu Verfügung stehende Fläche und andere konstruktive Merkmale [Sch07]. Zur Bewertung einer Durchsetzung lassen sich charakteristische Merkmale in Anlehnung an [Vol13] und [VDI2906- 5] definieren. Diese sind in Abbildung 2-4 dargestellt.

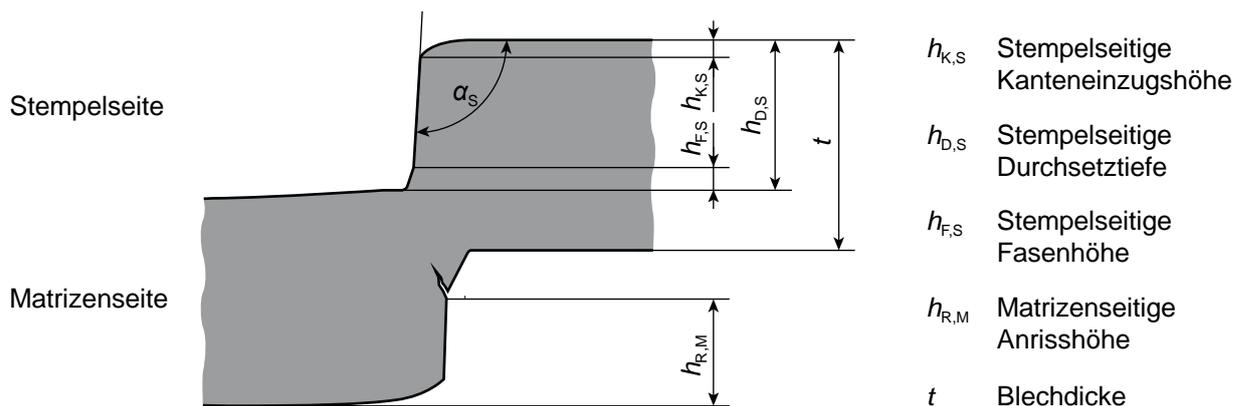


Abbildung 2-4: Durchsetzflächenkenngrößen in Anlehnung an [Vol13] und [VDI2906-5].

Figure 2-4: Characteristic values of an embossed surface according to [Vol13] and [VDI2906-5].

Stempel- und Matrizenseitig bilden sich die aufgeführten Kenngrößen in unterschiedlicher Ausprägung aus. Die Ursache hierfür ist unter anderem die Volumenerhaltung. Bei einem Durchsetzspalt $u > 0$ und Fasen an den Aktivelementen macht sich dies durch eine geringere matrizenseitige Durchsetztiefe bemerkbar. Analog zu dem Ablauf des Feinschneidens lässt sich der Durchsetzprozess mit Gegenhalter und ohne Ringzacken in vier Phasen untergliedern, welche in Abbildung 2-5 zusammen mit dem Stempelkraft-Stempelweg-Diagramm beispielhaft dargestellt sind: [Sch07], [Vol13]

1. Einlegen der Blechplatte: Zu Beginn wird das Werkstück, im Einzelhubversuch eine Blechplatte, in das geöffnete Werkzeug gelegt und positioniert. Im Dauerhub wird stattdessen das Blechband vorgeschoben.
2. Werkzeug schließen und klemmen des Werkstücks: Durch aufbringen der Niederhalterkraft wird das Blech zwischen Matrize und Niederhalter eingeklemmt. Durch die Gegenhalterkraft und die Stempelkraft wird das Werkstück zusätzlich zwischen Stempel und Gegenhalter eingeklemmt.
3. Umformen: Der Stempel dringt in einer geradlinigen Bewegung in das Blech ein und verdrängt dadurch den Gegenhalter. Bis zum Erreichen der Fließgrenze erfolgt zunächst eine elastische Verformung. Dies macht sich in einem nahezu linearen Anstieg der Stempelkraft bemerkbar. Die anschließende plastische Verformung wird durch das Verfahren des Stempels bis zum unteren Totpunkt erreicht. Die Zone in der die Scherung des Materials erfolgt wird als Scherzone bezeichnet. Der Werkstoffzusammenhalt bleibt, im Gegensatz zum Scher- oder Feinschneiden, erhalten. Mit zunehmender Durchsetztiefe nimmt die Kaltverfestigung zu, während der Blechquerschnitt zwischen Stempel und Matrize abnimmt. Vor dem Erreichen des Kraftmaximums überwiegt hierbei der Kraftanstieg durch Kaltverfestigung, danach die Querschnittsverkleinerung [Dem14]. Wurde das Formänderungsvermögen des Werkstoffs überschritten, können sich Anrisse bilden [Tim57].
4. Rückhub: Der Stempel verfährt anschließend wieder in den oberen Totpunkt. Dies macht sich durch einen raschen, nahezu linearen Abfall der Stempelkraft bemerkbar. Durch die elastische Rückfederung umklammert das Werkstück den

Stempel und muss daher vom Niederhalter abgestreift werden. Dies macht sich in einer negativen, durch Reibung bedingten Kraft im Stempelkraft-Stempelweg-Diagramm bemerkbar. Der Gegenhalter stößt das Werkstück aus der Matrize aus.

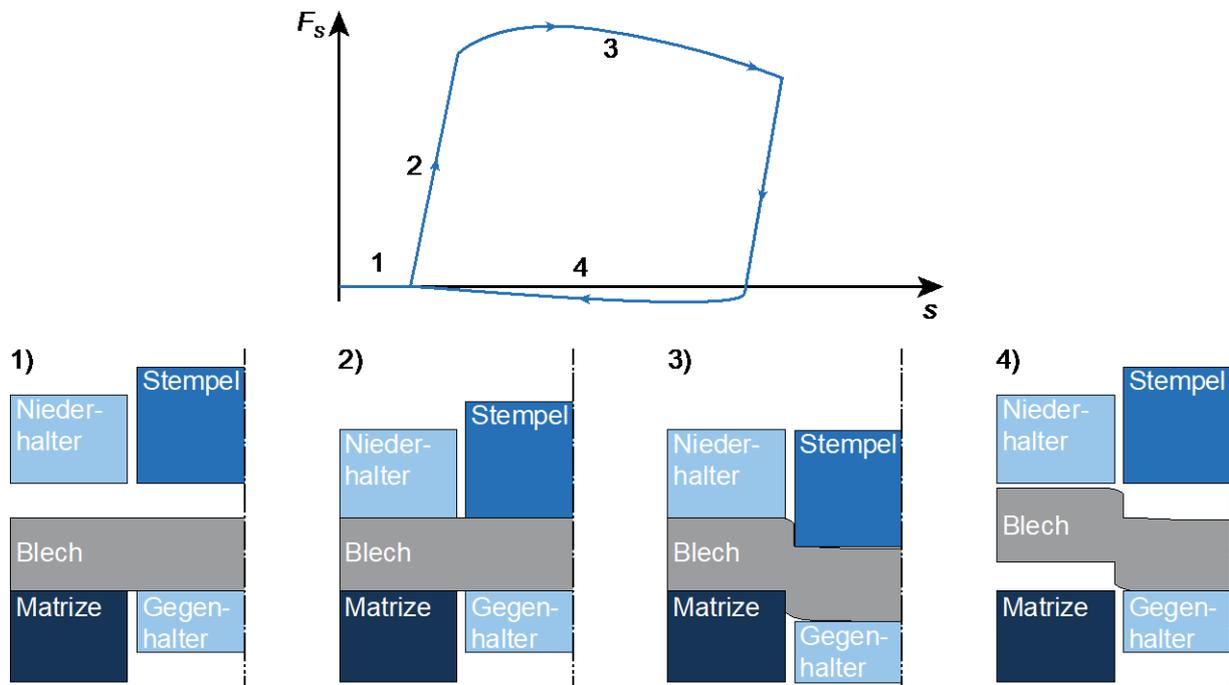


Abbildung 2-5: Beispielhafter Stempelkraft-Stempelweg-Verlauf (oben) und Phasen des Durchsetzprozesses nach [Fei14] (unten).

Figure 2-5: Exemplary punch-force – punch-travel diagram (top) and phases of the embossing process according to [Fei14] (bottom).

Die maximale Stempelkraft lässt sich nach [Vol13] mit der Formel für die maximale Schneidkraft aus der Blechdicke t , der Länge der Durchsetzlinienkontur l_D und der Zugfestigkeit des Blechwerkstoffs R_m bestimmen:

$$F_{S_{\max}} = k t l_D R_m$$

Der Korrekturfaktor k muss dabei für verschiedene Werkstückwerkstoffe und Prozessparameter angepasst werden. Bei der Verwendung eines Gegenhalters ist zu dieser Kraft noch die Gegenhalterkraft F_{GH} zu addieren.

2.1.3 Prozessparameter und Mechanik des Durchsetzprozesses Process parameters and mechanics of the embossing process

Prozessparameter des Durchsetzens sind unter anderen die Niederhalterkraft, die Gegenhalterkraft, die Stempelgeschwindigkeit, die Durchsetztiefe, der Durchsetzspalt, die Aktivelement- und Ringzackengeometrie, die Durchsetzlinienkontur sowie die verwendeten Werkstoffe.

Der Durchsetzspalt u hat hierbei maßgeblichen Einfluss auf die maximal erreichbare Durchsetztiefe. Er kann, wie in Abbildung 2-6 dargestellt, positiv, negativ oder gleich null sein. Ein positives u bedeutet dass der Stempel kleiner ist als die Matrize während bei negativem u die Matrize kleiner als der Stempel ist. Der Durchsetzspalt kann auch

als relativer Durchsetzspalt in Prozent bezogen auf die Blechdicke angegeben werden. [Vol13]; [Sch07]

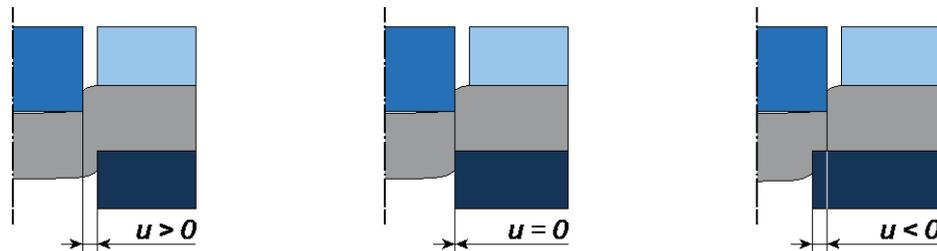


Abbildung 2-6: Mögliche Ausprägungen des Durchsetzspaltes nach [Vol13].

Figure 2-6: Possible configurations for the die clearance in embossing according to [Vol13].

In der Regel führt ein kleinerer bzw. negativerer Durchsetzspalt zu erhöhten Druckspannungen in der Scherzone, die ein längeres Fließen des Werkstücks und damit eine spätere Rissbildung zur Folge haben. Der gleiche Effekt kann durch Fasen und Verrundungen an den Aktivelementkanten erreicht werden.

Beim Durchsetzen auftretende Kräfte, Flächenlasten und Momente sind in Abbildung 2-7 visualisiert.

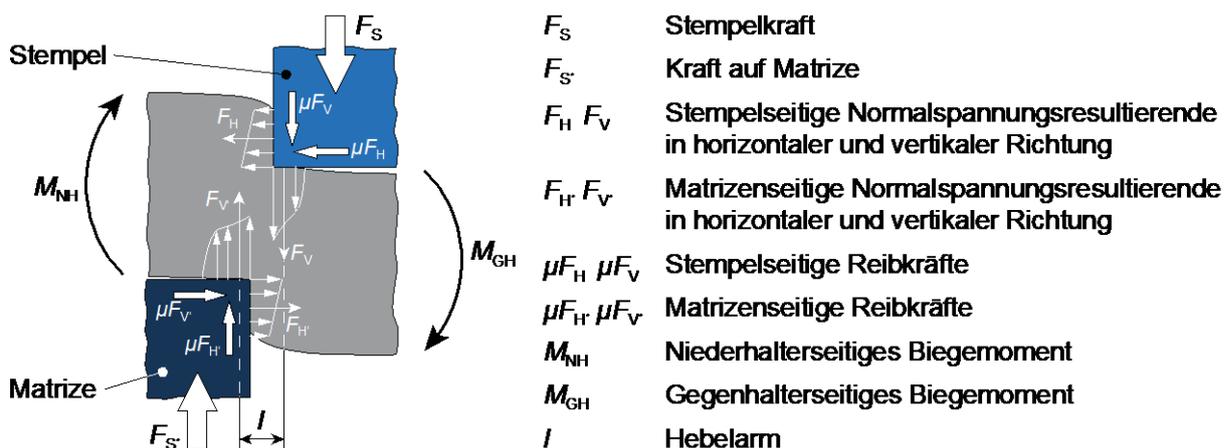


Abbildung 2-7: Kräfte, Flächenlasten und Momente beim Durchsetzen in Anlehnung an [Tim56]; [Rom59] und [Lan90].

Figure 2-7: Forces, surface loads and torques in embossing according to [Tim56]; [Rom59] and [Lan90].

Hier wird die Wirkung von Niederhalter und Gegenhalter zur Verringerung der Aufbiegung des Werkstücks deutlich. Die Flächenlasten an den Stirnflächen von Stempel und Matrize lassen sich in den Resultierenden F_V und F_V' zusammenfassen, die in geringem Abstand zur Werkzeugkante angreifen. Dieser Abstand zusammen mit dem Durchsetzspalt wirkt als Hebelarm l und induziert ein Moment im Blech, welches zur Aufbiegung führt. Der Nieder- und Gegenhalter wirken dem durch F_{NH} und F_{GH} entgegen. [Doe10]; [Lan90]

Weiterhin rufen die normal auf den Aktivelementoberflächen angreifenden Flächenlasten die Reibkräfte μF_V , $\mu F_V'$, μF_H und $\mu F_H'$ hervor. [Rom59]; [Lan90]

2.1.4 Abgrenzung zu verwandten Verfahren Separation of the embossing process to related processes

Das Durchsetzen weist viele Ähnlichkeiten mit anderen Fertigungsverfahren wie dem Feinschneiden, dem Tiefziehen, dem Zapfenpressen und dem Strangpressen auf. Eine Abgrenzung ist nötig, da nur wenig Fachliteratur zum Durchsetzen existiert und Forschungsergebnisse verwandter Verfahren oft auf das Durchsetzen übertragbar sind. Die in [Vol13] vorgestellte Abgrenzung wird hier kurz erläutert und erweitert. Die relevanten Verfahren sind in Abbildung 2-8 illustriert.

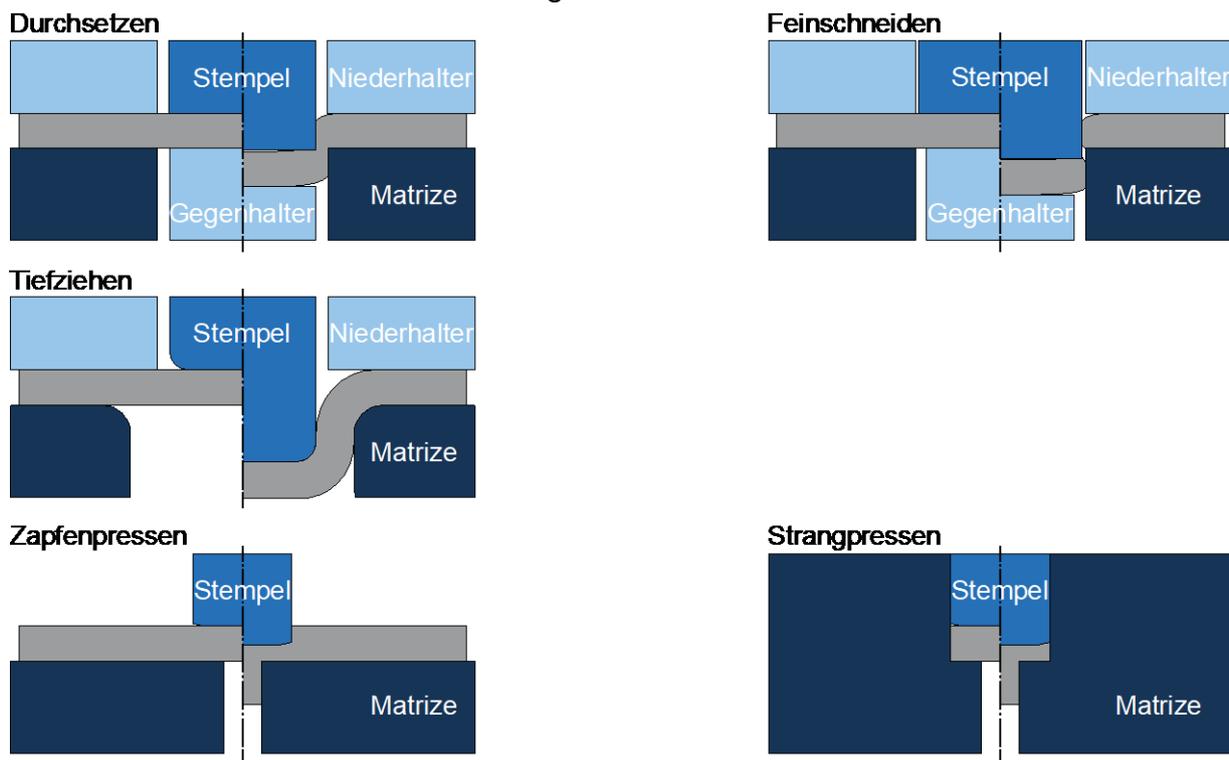


Abbildung 2-8: Abgrenzung des Durchsetzens zu den verwandten Verfahren Tiefziehen, Zapfenpressen, Feinschneiden und Strangpressen nach [Vol13].

Figure 2-8: Separation of the embossing process to the related manufacturing processes deep drawing, extrusion forming, fineblanking and extrusion [Vol13].

Die Gemeinsamkeit aller Verfahren liegt in der geradlinigen Werkzeugbewegung sowie in dem Vorhandensein von Stempel und Matrize. Das Tiefziehen, ein Zugdruckumformverfahren nach [DIN8584-1] und genauer spezifiziert in [DIN8584-3], kann wie das Durchsetzen einen Niederhalter aufweisen, ein Gegenhalter findet jedoch keine Anwendung. Der Spalt zwischen den Aktivelementen ist größer als die Blechdicke. Als Werkstück kommen ebenfalls Blechplatinen zum Einsatz.

Das Zapfenpressen ist nach [Lan88] und [Sch07] eine Kombination aus dem Einsenken und dem Vorwärtsfließpressen und lässt sich somit nach dem Spannungszustand dem Druckumformen nach [DIN8583-5] und [DIN8583-6] zuzuordnen. Hier fehlen Gegenhalter und Niederhalter, meist werden jedoch Bleche verarbeitet. Die Matrizenöffnung ist signifikant kleiner als die Stempelkontur um die erforderlichen Druckspannungen zu erzeugen.

Das Strangpressen nach [DIN8583-6] gleicht dem Zapfenpressen in vielerlei Hinsicht, beim Werkstück handelt es sich jedoch nicht um Blechplatten. Auch hier ist die Matrizenöffnung bedeutend kleiner als der Stempel.

Die meisten Ähnlichkeiten weist das Durchsetzen mit dem Feinschneiden auf. Aufgrund des nahezu identischen Werkzeugaufbaus, werden beide Verfahren oft in Folgeverbundwerkzeugen kombiniert. Der bedeutendste Unterschied liegt darin, dass beim Feinschneiden der Werkstoffzusammenhalt aufgelöst wird, es sich also nach [DIN8588] um ein zerteilendes Verfahren handelt. Der Spalt zwischen Stempel und Matrize beträgt meist wenige Prozent der Blechdicke. Ein negativer Spalt (analog zu Abbildung 2-6) ist jedoch nicht zu finden, da für die Materialtrennung meist ein Eintauchen des Stempels in die Matrize nötig ist, was bei einem negativen Spalt zu einer Zerstörung des Werkzeugs führen würde.

2.1.5 Schwierigkeitsgrad der Herstellung **Difficulty of the manufacturing process**

Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen Durchsetzen und Feinschneiden kann der Schwierigkeitsgrad von Bauteilen mit Durchsetzungen anhand den Tabellen für Feinschnittteile, wie in [Sch07] vorgestellt, abgeschätzt werden. Die Grundlage hierfür bilden die geometrischen Formelemente der Schnittlinien wie Lochdurchmesser, Stegbreiten, Zahnmodule, Innen- und Außenradien sowie deren Winkel, Schlitz- und Stege unter Berücksichtigung der Blechdicke. Das schwierigste Formelement bestimmt den Schwierigkeitsgrad des Bauteils, wobei zwischen folgenden Kategorien unterschieden wird:

- Schwierigkeitsgrad S1: Leicht
- Schwierigkeitsgrad S2: Mittel
- Schwierigkeitsgrad S3: Schwierig
- Schwierigkeitsgrad > S3: Sehr schwierig

Bauteile mit Schwierigkeitsgrad > S3 sind dabei nur in Einzelfällen herstellbar. Der Einteilung liegt weiterhin die Annahme zu Grunde, dass Aktivelemente mit einer Härte von 63 HRC und $R_{p0,2} \geq 3000$ MPa sowie ein Blechwerkstoff mit $R_m \leq 500$ MPa verwendet werden. Die Schaubilder zur Beurteilung sind in Abbildung 2-9 dargestellt. [Sch07]

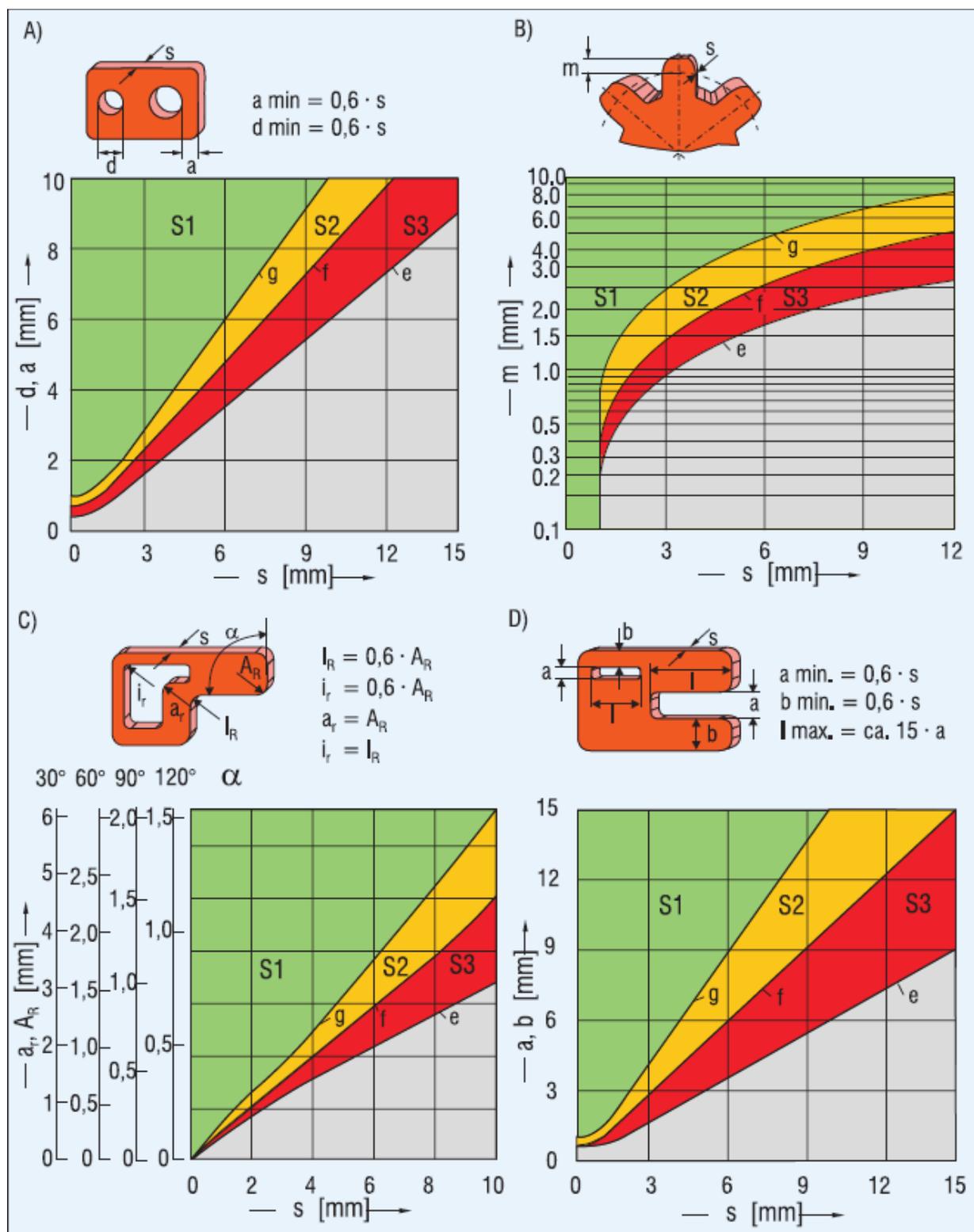


Abbildung 2-9: Beurteilung des Schwierigkeitsgrades von ebenen Feinschnittteilen aus [Sch07].

Figure 2-9: Classification of the difficulty of flat fineblanked parts according to [Sch07].

2.2 Simulation und Materialmodellierung Simulation and material modelling

2.2.1 Simulationsablauf Simulation process

Der Ablauf einer typischen Finite-Elemente Simulation gliedert sich in die drei Schritte Preprocessing, Mainprocessing und Postprocessing. [Kle10]

Im Preprocessing findet die Modellbildung statt. Hier werden die zu untersuchenden Geometrien erstellt und mit Materialeigenschaften versehen. Neben der Vernetzung dieser Geometrien und der Auswahl der Elementtypen werden Anfangs- und Randbedingungen festgelegt. [Kle10]

Im Mainprocessing findet die eigentliche Berechnung des Problems statt. Die Berechnungsdauer hängt bei den expliziten Lösungsverfahren maßgeblich von der Anzahl der Freiheitsgrade, der Netzverzerrung und der Netzfeinheit ab. Letztere begrenzt die Zeitschrittweite durch die Zeit die eine Schallwelle durch ein Element benötigt. Diesem Problem kann durch eine künstliche Erhöhung der Dichte begegnet werden, was als Massenskalierung bezeichnet wird. Dadurch erhöht sich die Schallgeschwindigkeit wodurch auch die kleinste Zeitschrittweite größer wird. Diese Annahme führt jedoch nur in einem gewissen Rahmen zu vernachlässigbaren Fehlern. [Ste07], [Olo05], [Kle10]

Im letzten Schritt, dem Postprocessing, werden Kriteriumsfunktionen berechnet und die Ergebnisse grafisch dargestellt oder exportiert. [Ste07]

2.2.2 Beschreibung des Materialverhaltens Material modelling

Um eine Berechnung zu ermöglichen muss das Verhalten der zu untersuchenden Materialien mathematisch beschrieben werden. Bei metallischen Werkstoffen wird in der Regel ein elastischer und plastischer Dehnungsanteil beobachtet. Während der elastische Anteil meist über das Elastizitätsmodul und die Poissonzahl beschrieben wird, gibt es für das plastische Materialverhalten eine Vielzahl von Modellierungsmöglichkeiten die, je nach geforderter Komplexität und Genauigkeit, unter anderem auch die Temperatur-, Geschwindigkeits- und Richtungsabhängigkeit des Werkstoffverhaltens berücksichtigen.

Da die experimentell ermittelte Fließkurve, der Zusammenhang zwischen logarithmischer Dehnung φ und wahrer Spannung k_t , meist nur bis zu einem unzureichend großen Dehnungswert ermittelt werden kann, kommen Extrapolationsansätze zur Anwendung. Diesen können jedoch, wie in Abbildung 2-10 dargestellt, für große Umformgrade stark unterschiedliche Ergebnisse liefern.

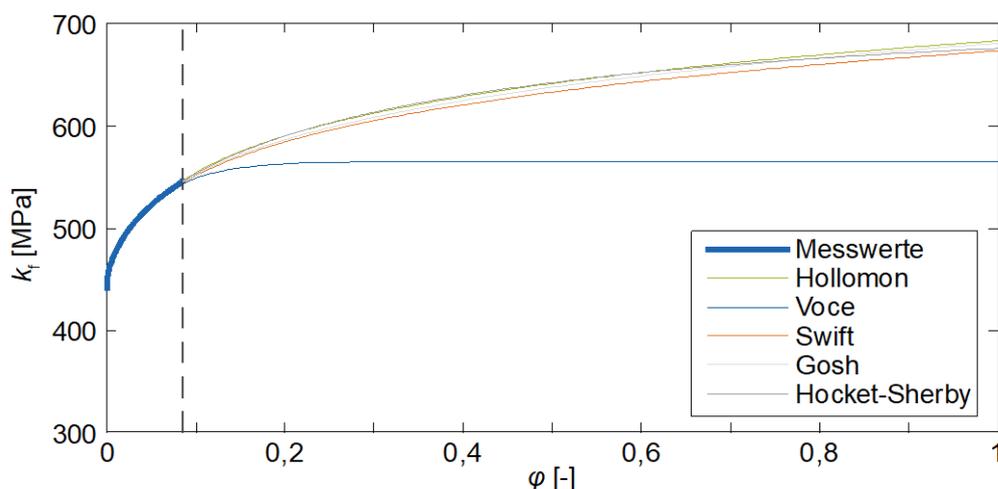


Abbildung 2-10: Verschiedene Extrapolationsansätze für einen Messwertsatz.

Figure 2-10: Different extrapolation models for a measured curve.

Für dieses Forschungsprojekt sind die in Gleichung 2-1 und 2-2 aufgeführten Extrapolationsansätze nach Voce und Swift von besonderer Bedeutung.

$$k_{fV} = k_{f0} + A_V \left(1 - \exp\left(-\frac{\varphi}{B_V}\right) \right) \quad (2-1)$$

$$k_{fS} = A_S (B_S + \varphi)^n \quad (2-2)$$

Diese zeichnen sich durch ein gänzlich unterschiedliches Verfestigungsverhalten aus. Während der Ansatz nach Voce für große Dehnungen nahezu ideal-plastisch ist verfestigt die Fließkurve nach Swift weiterhin stark.

2.3 Forschungsgebiete des Durchsetzens Research in Embossing

2.3.1 Durchsetzen und Zapfenpressen Embossing and extrusion forming

Eine frühe Untersuchung zur Abbildbarkeit des Zapfenpressprozesses mithilfe der Finite-Elemente-Methode wurde von [Che99] veröffentlicht. Hier wurde der Enhanced-Assumed-Strain Ansatz zusammen mit einem impliziten Gleichungslöser eingesetzt. Anhand eines rotationssymmetrischen Stahlbauteils konnte nachgewiesen werden, dass selbst die stark verformten Bereiche nahe den Aktivelementkanten numerisch abgebildet werden können. Weiterhin wurde durch den Vergleich mit einem experimentell hergestellten Bauteil eine qualitative Übereinstimmung zwischen Realität und Berechnung aufgezeigt.

In [Zhe05] wurde das Zapfenpressen bzw. Durchsetzen mit stark negativen Durchsetzspalt mithilfe von Experimenten und der Finite-Elemente-Methode untersucht. Dabei wurden Platinen aus S235JR unterschiedlich tief durchgesetzt. Ein so hergestelltes Bauteil mit geätztem Muster ist in Abbildung 2-11 zu sehen.

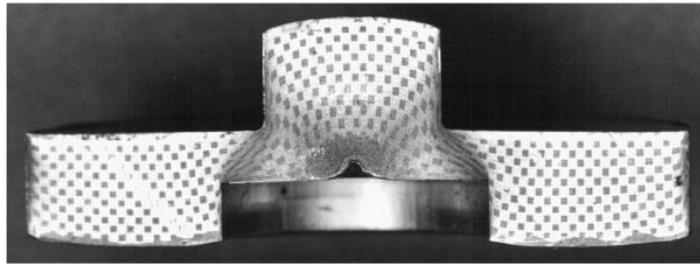


Abbildung 2-11: Bauteil mit geätztem Muster aus [Zhe05].

Figure 2-11: Part with etched pattern taken from [Zhe05].

In dieser Darstellung ist die extreme Umformung zwischen Stempel- und Matrizenkante gut zu erkennen. In der Simulation konnte bereits bei einer Durchsetztiefe von 50 % ein Umformgrad von 1,5 festgestellt werden, ein Bruch erst für eine Durchsetztiefe von 70 %.

Diese Untersuchung wurde in [Zhe06] um die Effekte in einem kombinierten Feinschneid- und Zapfenpressprozess am gleichen Blechwerkstoff erweitert. Hier konnte in der Simulation für Durchsetztiefen von 30 % und 70 % kein Unterschied in der Kanteneinziehungshöhe des Zapfens beobachtet werden. Durch abrechnen des Feinschneidprozesses wurde weiterhin eine Durchsetzung mit leicht positivem Durchsetzspalt erzeugt. Dies ist in Abbildung 2-12 dargestellt.

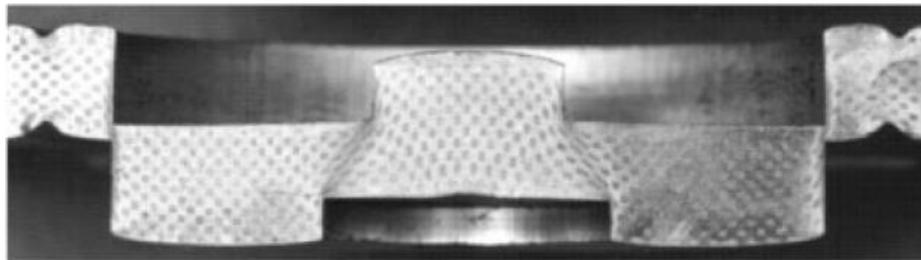


Abbildung 2-12: Kombiniertes Feinschneid - Zapfenpressprozess aus [Zhe06].

Figure 2-12: Combined fineblanking – sheet metal extrusion process taken from [Zhe06].

Hier wurde die Dehnung sowohl für den Zapfen als auch für die abgebrochene Feinschneidoperation experimentell bestimmt, wobei Maximalwerte von 0,9 am Zapfen und einer Durchsetztiefe von 30 % bzw. 1,2 bei einer Durchsetztiefe von 80 % an den schergeschnitten Flächen.

Die numerische Abbildung des Zapfenpressprozesses mithilfe der Arbitrary-Lagrangian-Eulerian Methode stand im Fokus von [Zhu08]. Diese Methode bietet den Vorteil, dass das Material nicht starr an das Finite-Elemente-Netz gekoppelt ist sondern sich beliebig zu diesem bewegen kann. Dadurch können große Deformationen besser abgebildet werden. In den Simulationen wurden am Stahl S235JR drei unterschiedliche Durchsetzspalte von -1,25 mm, -2 mm und -2,75 mm bei einer Blechdicke von 5 mm und einem konstanten Durchmesser der Matrizenöffnung untersucht. Dabei wurden signifikant höhere Stempelkräfte für größere Stempeldurchmesser und somit negativere Durchsetzspalte beobachtet. Weiterhin wurde für Durchsetztiefen von 30 % und 50 % ein mit der Stößeindringtiefe leicht abnehmender Vergleichsumformgrad von mehr als 3 berechnet.

Dies wurde in [Zhu10] um Effekte beim Zapfenpressen von vorgelochten Blechen aus dem Werkstoff C15E erweitert. Das Materialmodell wurde dabei durch den Vergleich verschiedener Extrapolationen des Zugversuchs mit Torsionsversuchsdaten ermittelt. In den Simulationen konnten Umformgrade bis über 7 berechnet werden.

Die Messung der durch die Umformung entstehenden Deformationen wurde in [Leu04] an einem kaltgewalzten Blech durchgeführt. Auch hier wurde ein Feinschneidprozess ohne Durchschneiden untersucht. Nach der Kalibrierung der Methode an Zugproben wurde für eine Stößeleindringtiefe von 80 % der Blechdicke eine Dehnung von nahezu 12 an der Stempelkante gemessen.

Der Einfluss eines negativen Schneid- bzw. Durchsetzspaltes war Gegenstand der Untersuchungen von [Hir09]. Der Spalt wurde von 1 mm bis -1,5 mm (20 % bis -30 % der Blechdicke) beim Schneiden von zwei Aluminiumlegierungen variiert. Die Auswirkungen auf die Kanteneinzugshöhe der rotationssymmetrischen Bauteile ist in Abbildung 2-13 dargestellt.

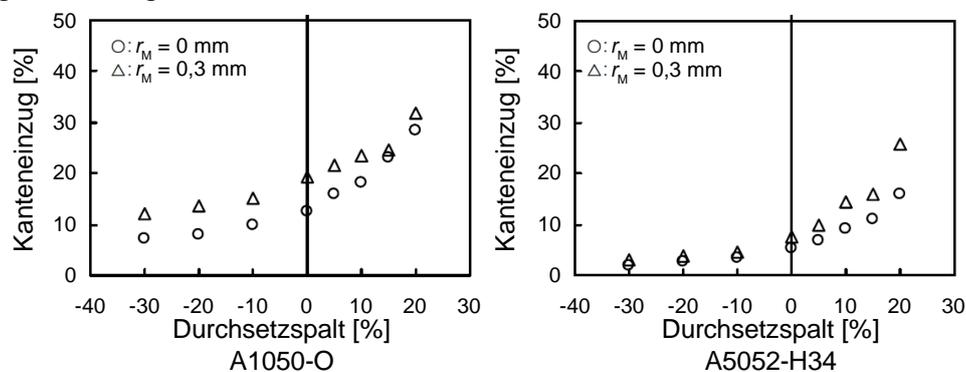


Abbildung 2-13: Kanteneinzugshöhe in Abhängigkeit des Durchsetzspaltes aus [Hir09].

Figure 2-13: Die-roll height in dependence of the die clearance taken from [Hir09].

Hier wurde eine zunehmende Kanteneinzugshöhe mit größer werdendem Durchsetzspalt und größerer Aktivelementkantenverrundung beobachtet.

Eine numerische Untersuchung des Einflusses der Aktivelementkantenverrundung auf die Qualität von Durchsetzungen am Blechwerkstoff 1.0503 wurde von [Sur10] veröffentlicht. Während die Verrundung nur kleine Unterschiede in der Durchsetzkraft verursacht, beeinflusst sie die Rissinitiation deutlich.

Dies wurde in [Sur15] um den Einfluss des Prozesses auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften erweitert.

Das Durchsetzen hochfester Stähle zur Identifizierung geeigneter Prozessparameter war Gegenstand der Untersuchungen veröffentlicht in [Vol13] und [Fei14]. Hier wurden vier Stähle S355MC, Domex 700 und S700HD unter Variation der Geometrie, des Durchsetzspaltes und der Aktivelementkantenbearbeitung in Experiment und Simulation beleuchtet. Während der Durchsetzspalt einen nahezu vernachlässigbaren Einfluss auf die maximale Durchsetzkraft aufweist, ist er maßgeblich für die Rissentstehung, wie in Abbildung 2-14 dargestellt.

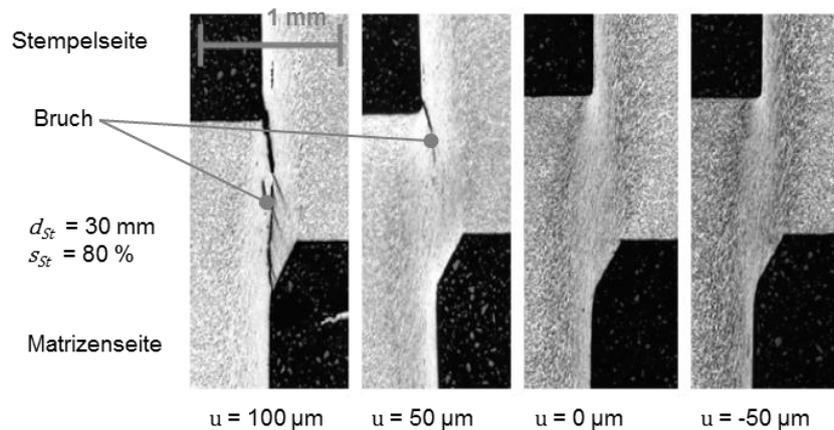


Abbildung 2-14: Einfluss des Durchsetzspaltes auf die Rissentstehung aus [Vol13].

Figure 2-14: Influence of the die clearance on fracture taken from [Vol13].

Je nach verwendeten Blechwerkstoff konnten stark unterschiedliche Kanteneinziehungshöhen festgestellt werden, während die Durchsetztiefe einen vernachlässigbaren Einfluss auf jene hat. Ähnlich wie in [Hir09] konnte eine Abnahme der Kanteneinziehungshöhe mit kleiner bzw. negativ werdendem Durchsetzspalt beobachtet werden. Die Geometrieabhängigkeit der Kanteneinziehungshöhe wurde an einer Verzahnungsgeometrie untersucht, wobei die Wahl des Krümmungsradius als wesentlich für die Ausbildung des Kanteneinzuges beschrieben wird.

Für die Abschätzung der Durchsetzkraft wurden für die untersuchten Werkstoffe empirisch ermittelte Berechnungsfaktoren angegeben.

Weiterhin zeigte sich, dass mit einer flachen Fase an der Mantelfläche des Stempels die Rückzugskräfte reduziert und damit die Standzeit des Aktivelements erhöht werden kann.

Zuletzt wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die Werkstoffaufhärtung untersucht. Hier zeigte sich, dass aus einer Verringerung des Durchsetzspaltes eine höhere Maximalhärte im Bauteil resultiert. Den gleichen Effekt hatte eine größere Durchsetztiefe.

2.3.2 Verwandte Verfahren

Related Processes

Wie bereits von [Vol13] beschrieben, ist eine ausführliche Behandlung des Durchsetzens in der Fachliteratur selten, weshalb für dieses Forschungsprojekt relevante Untersuchungen an verwandten Verfahren, vornehmlich dem Feinschneiden, folgend vorgestellt werden.

In [Lee97] wurde der Feinschneidprozess mithilfe der Finite-Elemente-Methode unter Zuhilfenahme eines Neuvernetzungsalgorithmus simuliert und analysiert. Dadurch konnte eine starke Lokalisierung von Spannung und Dehnung in der Nähe der Schneidkanten identifiziert werden. Der Vernetzungsalgorithmus wurde in [Cha04] verbessert, wodurch größere Stempelerdringtiefen erreicht werden konnten.

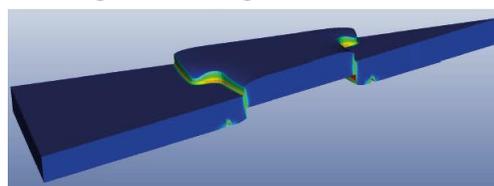
[Kwa02] untersuchte die Ausbildung der Schnittflächen beim Feinschneiden anhand eines rotationssymmetrischen Simulationsmodells und einem Vergleich mit einem

Realbauteil aus dem Werkstoff 1.0503. Der Einfluss des Schneidspaltes auf die Schnittflächenkenngrößen konnte mit dem Simulationsmodell qualitativ bestimmt werden. Hierbei wurde ideale Plastizität angenommen und das Bruchkriterium durch den Vergleich von Simulation und Experiment bestimmt.

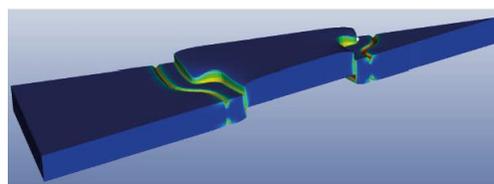
Die Ausbildung der Scherbänder beim Feinschneiden wurde von [Che03] betrachtet. Hier wurden durch unterbrochene Feinschneidoperationen Durchsetzungen hergestellt, bei denen anschließend die Ausbildung des Gefüges nahe der Aktivelementkanten unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht wurde. Hier zeigte sich eine extreme Verformung, bereits für 70 % Eintauchtiefe, mit vermuteten Temperaturen um 600 °C in der Scherzone.

Die Ausbildung der Scherzone während des Feinschneidens wurde weiterhin von [Thi07] genauer analysiert. Hier wurde insbesondere der Einfluss von Gegenhalter und Niederhalter in Simulationen untersucht. Diese verhindern einen rotierenden Materialfluss und erhöhen damit den hydrostatischen Druck auf den Blechwerkstoff wodurch ein höherer Glattschnittanteil erreicht werden kann.

Der Einsatz der ALE-Formulierung für die dreidimensionale Simulation des Feinschneidens wurde in [Man11] betrachtet, wodurch die Ausbildung der Schnittflächenkenngrößen in dreidimensionalen Bauteilen berechnet werden kann. Dies ist beispielhaft in Abbildung 2-15 dargestellt.



Ringzacke am Niederhalter



Ringzacke an Niederhalter und Matrize

Abbildung 2-15: 3D-Simulation des Feinschneidprozesses mit Ringzacken aus [Man11].

Figure 2-15: 3D-Simulation of the fineblanking process with V-rings taken from [Man11].

Das Materialmodell für den Blechwerkstoff C35E wurde dabei durch Zugversuche und einer Extrapolation mit dem Ansatz nach Gosh ermittelt. Weiterhin wurde der Einfluss der Ringzacken, der Aktivelementverrundung und weiterer Parameter auf die Bauteilqualität untersucht.

3 Vorgehensweise Approach

Kurzfassung

Die Vorgehensweise zur Erreichung des Forschungsziels gliedert sich in sechs Abschnitte. Nach der Identifikation relevanter Durchsetzungen durch die Aufnahme des industriellen Ist-Zustandes wurden repräsentative Formelemente in Experiment und Simulation untersucht. Die Abweichung zwischen diesen wurde ein Korrekturmodell erarbeitet das eine verbesserte Geometrievorhersage erlaubt. Weiterhin wurden die so ermittelten Korrekturfaktoren in einer Datenbank zusammengetragen und diese mit dem Simulationsmodell verknüpft.

Abstract

In this project, the investigation can be structured in six sections. After the identification of relevant embossed geometries by a research of the state of the art, representative geometrical elements were chosen and investigated by experiments and simulations. The deviation between those was compensation by a model to improve the prediction of the part's geometry. Additionally, these adjustment factor were collected in a database which was linked with the simulation model.

Ein graphischer Vorgehensplan des Forschungsprojekts ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Zur Erreichung des Forschungsziels wird zuerst der industrielle Ist-Zustand aufgenommen um relevante Durchsetzgeometrien und Prozessparameter zu identifizieren. Zusätzlich werden folgende Blechwerkstoffe festgelegt:

- S355MC (1.0976): Feinkornbaustahl als Referenz
- 22MnB5 (1.5528): Vertreter der Gruppe der vergütbaren Stähle
- S700MC (1.8974): Hochfester mikrolegierter Feinkornbaustahl
- S700MC-mod (1.8974): Hochfester Konstruktionsstahl

Diese repräsentieren ein breites Spektrum der für Durchsetzbauteile verwendeten Stähle. Für Stempel und Matrizen wurde K490 microclean sowie 1.2379 für Niederhalter und Gegenhalter gewählt.

Weiterhin werden industrielle Durchsetzbauteile katalogisiert und kategorisiert. Durch die in diesem Arbeitspaket erarbeitete Zerlegungsmethodik können relevante Formelementgeometrien identifiziert werden, die die Basis für die weiteren Untersuchungen bilden. Ausgehend davon werden Aktivelemente konstruiert, die es erlauben die Ausbildung dieser Formelemente zu untersuchen.

Anschließend werden diese Geometrien in Durchsetzexperimenten unter Variation der Prozessparameter hergestellt. Hierbei konnten die auftretenden Kräfte und die sich ausbildenden Durchsetzflächenkenngrößen bestimmt werden.

Diese Experimente werden mithilfe der Finiten-Elemente-Methode nachgebildet um ausgehend von Materialmodellen aus Zugversuchen die gleichen Kenngrößen

ermitteln zu können. Um Fehler durch die Modellbildung zu minimieren wird eine Robustheitsanalyse durchgeführt.

Anschließend wird ein Korrekturmodell erarbeitet, das durch iterative Anpassung des Materialmodells eine Verbesserung der Übereinstimmung von Experiment und Simulation ermöglicht. Die so ermittelten Korrekturfaktoren werden in einer Datenbank zusammengetragen, wobei auf eine einfache Erweiterbarkeit geachtet wurde.

Zuletzt wird diese Datenbank mit dem Simulationsmodell verknüpft um eine automatisierte Zuweisung der korrigierten Materialmodelle zu den jeweiligen Formelementen zu erreichen. Dazu wird eine Benutzeroberfläche in quellenoffener Software implementiert. Mit dieser kann eine beliebige Durchsetzgeometrie gezeichnet werden deren Formelementen automatisiert die zugehörigen Materialdaten zugewiesen werden. Eine integrierte Durchsetzkraftberechnung und Machbarkeitsbeurteilung erlauben eine schnelle Analyse der jeweiligen Geometrie.

Zuletzt werden das Korrekturmodell und die Kraftberechnung anhand eines industrienahen Bauteils validiert.

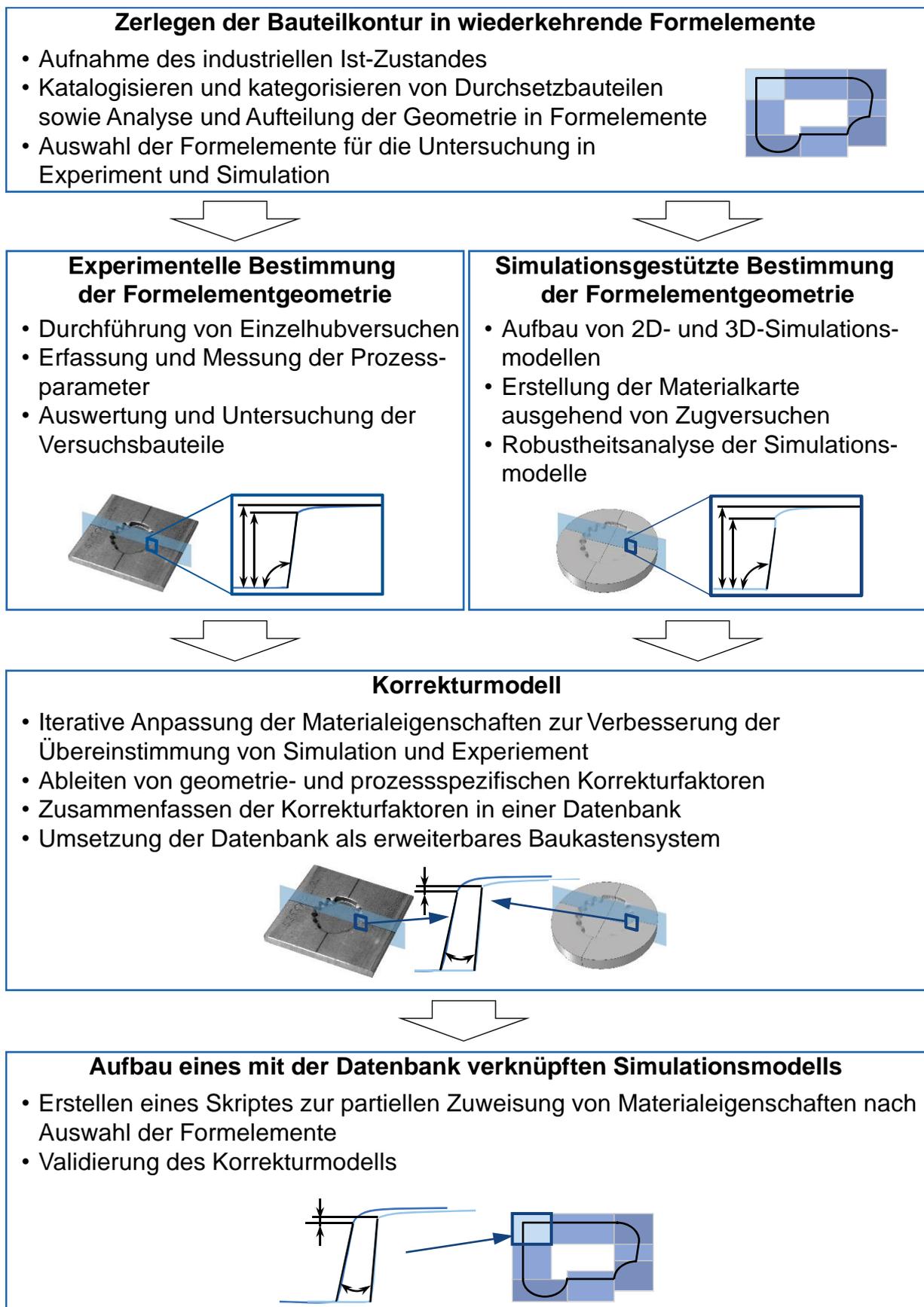


Abbildung 3-1: Vorgehensschaubild des Forschungsprojekts.

Figure 3-1: Illustration of the research project's approach.

4 Versuchs- und Messeinrichtungen Experimental and measuring equipment

Kurzfassung

Die für die Durchsetzexperimente nötigen Versuchs- und Messeinrichtungen werden in diesem Kapitel vorgestellt. Dies umfasst die Feinschneidpresse, das Durchsetzwerkzeug und die darin integrierte Messtechnik. Anschließend werden die Messgeräte für die Ermittlung der Durchsetzflächenkenngrößen, der chemischen Zusammensetzung und der Detektion von Rissen präsentiert, gefolgt von den Zug- und Torsionsprüfständen für die Materialprüfung.

Abstract

The experimental equipment necessary for the embossing experiments is introduced in this chapter. This includes the fineblanking press, the embossing tool and the integrated sensors. Afterwards, the instruments for the determination of the embossed surface characteristics, the chemical composition and the detection of cracks are presented, followed by tensile and torsion test machines for the material characterization.

4.1 Versuchs- und Anlagentechnik für die Durchsetzversuche Equipment for the embossing experiments

4.1.1 Feinschneidpresse Fineblanking press

Die Durchsetzexperimente wurden auf der dreifach wirkenden, hydraulischen Feinschneidpresse HFA 3200 plus der Firma Feintool Technologie AG durchgeführt. Diese ist in Abbildung 4-1 zu sehen.

Eine präzise Führung, eine hohe Steifigkeit des Pressenrahmens und eine ausgezeichnete Parallelität der Werkzeugaufspanflächen sind charakteristisch für diese Bauform [Sch96]. Die maximal mögliche Gesamtkraft beträgt 3200 kN und ist damit weit über den Durchsetzkräften die im Experiment zu erwarten sind. Somit können Ergebnisverfälschungen z.B. durch die elastische Deformation der Presse nahezu ausgeschlossen werden. Die Gesamtkraft teilt sich in eine Ringzackenkraft von maximal 1400 kN, eine Gegenhalterkraft von maximal 700 kN und die Stößelkraft auf. Folgend sind die wichtigsten technischen Daten zusammenfassend aufgeführt:

- Gesamtkraft: 2000 – 3200 kN
- Ringzackenkraft: 140 – 1400 kN
- Gegenhalterkraft: 70 – 700 kN
- Schneidgeschwindigkeit: 5 – 70 mm/s
- Werkzeugaufspanfläche oben: 630 x 600 mm
- Werkzeugaufspanfläche unten: 640 x 900 mm
- Werkzeugeinbauhöhe: 330 x 410 mm



Abbildung 4-1: Feinschneidpresse Feintool HFA 3200 plus
Figure 4-1: Fineblanking press Feintool HFA 3200 plus

4.1.2 Durchsetzwerkzeug Embossing tool

Für die Herstellung der Versuchsbauteile stand ein hochpräzises Feinschneidwerkzeug zur Verfügung. Dieses ist in Abbildung 4-2 illustriert.

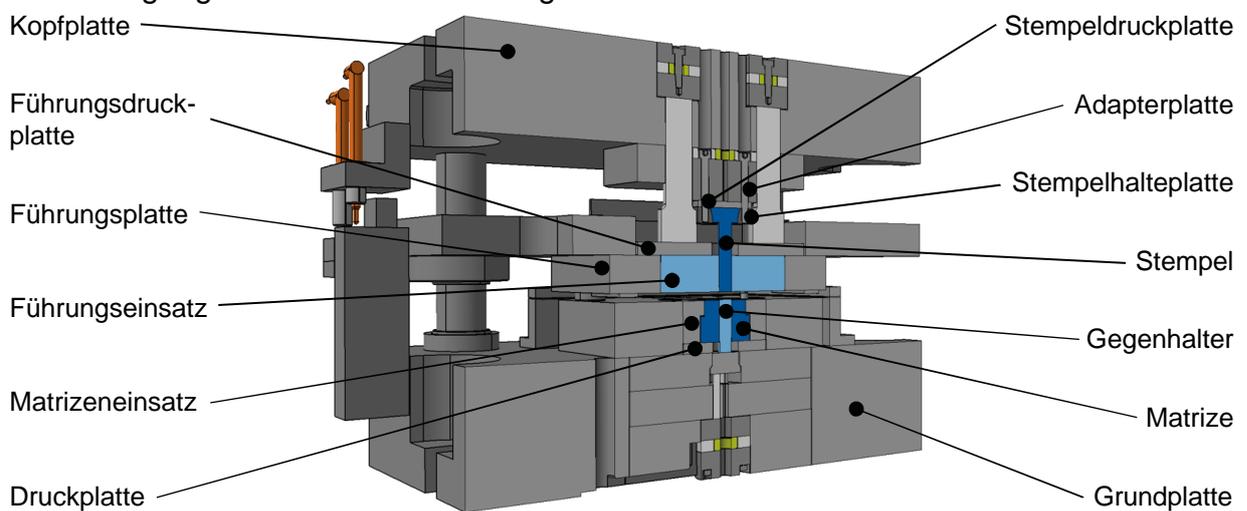


Abbildung 4-2: Eingesetztes Durchsetzwerkzeug.

Figure 4-2: Embossing tool used for the experiments.

Die hohe Genauigkeit wird durch die steife Viersäulenbauweise in Kombination mit einer dicken Kopf- und Grundplatte sowie einer sehr direkten Krafteinleitung von der Presse über den Führungseinsatz, der hier auch als Niederhalter dient, zum Blech erreicht. Durch enge Toleranzen wird das Positionier- und Führungsspiel minimal gehalten.

4.1.3 Messtechnik Measurement equipment

Weiterhin ist das Werkzeug vollständig instrumentiert um alle relevanten Kräfte und Verlagerungen während des Durchsetzprozesses zu messen. Die verbaute Sensorik ist in Abbildung 4-3 zu sehen.

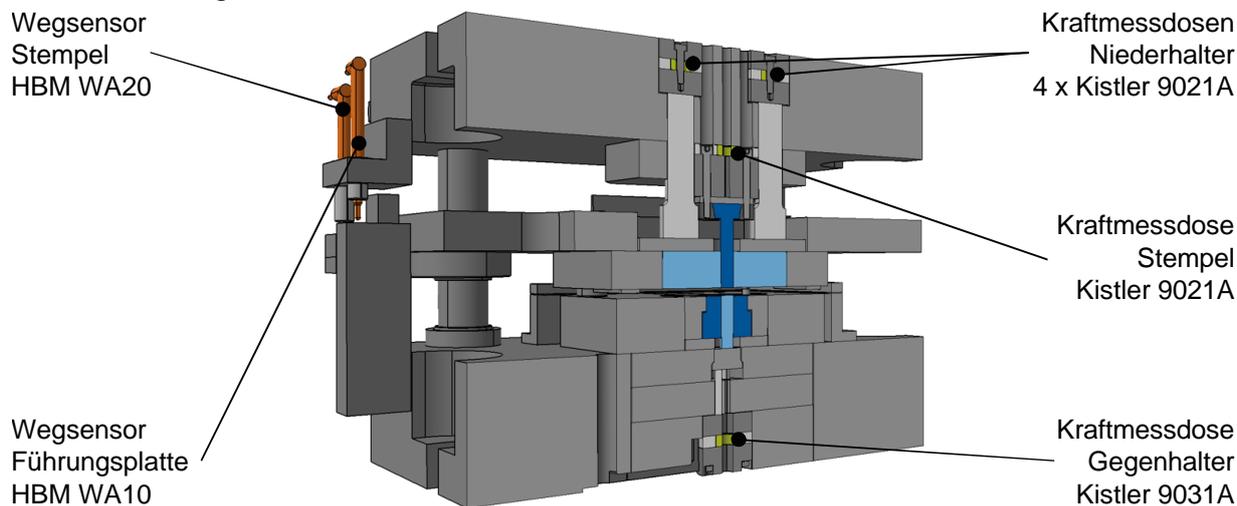


Abbildung 4-3: Ins Durchsetzwerkzeug integrierte Kraft- und Wegmesstechnik.

Figure 4-3: Force and displacement measurement devices integrated in the embossing tool.

Es sind zwei induktive Wegaufnehmer mit Tastspitze der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH im Werkzeug verbaut. Ein Sensor des Typs WA20 misst die Position von Kopf- und Grundplatte zueinander während ein weiterer des Typs WA10 die Verlagerung zwischen Kopfplatte und Führungsplatte detektiert.

Die Prozesskräfte können über diverse piezoelektrische Kraftmessdosen, jeweils im Kraftnebenschluss verbaut, der Firma Kistler Instrumente AG bestimmt werden. Diese weisen einen großen Messbereich bei vergleichsweise kleinen Abmessungen auf. Die Integration im Kraftnebenschluss entspricht einer mechanischen Parallelschaltung mit einer Stahlplatte. Diese nimmt zusätzlich Kraft und Drehmoment auf, wodurch der Messbereich vergrößert und die Empfindlichkeit gegenüber Biegemomenten reduziert wird. Zur Messung der Niederhalterkraft sind vier Sensoren des Typs 9021A, ins Werkzeug integriert. Diesen sind im Kraftfluss zwischen der oberen Aufspannfläche und der Führungsplatte installiert. Die Stempelkraft wird ebenfalls über Kraftaufnehmer des Typs 9021A, bestimmt. Zur Ermittlung der Gegenhalterkraft ist eine Messdose des Typs 9031A integriert.

Über einen Laborladungsverstärker des Typs 5017, ebenfalls von der Firma Kistler Instrumente AG, wird die Ladung der piezoelektrischen Sensoren abgegriffen und in ein Spannungssignal umgewandelt, das anschließend mit einer Messkarte aufgezeichnet wird.

Über die integrierte Sensorik ist eine detaillierte Messung aller relevanten Prozesskräfte mit den zugehörigen Wegsignalen während des Durchsetzens möglich.

4.2 Einrichtungen für die Vermessung der Durchsetzbauteile Equipment for the measurement of the embossed parts

4.2.1 Taktiler Oberflächenmessgerät Tactile surface measurement device

Zur Ermittlung der Durchsetzflächenkenngößen und zum Vermessen der Aktivelementkanten kam ein taktiler Oberflächenmessgerät der Firma Mahr GmbH, Göttingen, zum Einsatz. Die Messplatzkombination MarSurf XC 20 MarWin zusammen mit dem linearen Konturvorschubgerät PCV 200 erlaubt eine präzise Ermittlung der Bauteilkontur nach dem Tastschnittverfahren. Dies geschieht mithilfe einer an einem Tastarm mit 350 mm Länge befestigten Nadel mit einem Kopfradius von 25 μm und einem Kegelwinkel von 30°. Die Nadel wird über die Oberfläche der zu vermessenden Probe bewegt während die Auslenkung über den Tastarm detektiert wird. Der Profilmessplatz ist in Abbildung 4-4 zu sehen.



Abbildung 4-4: Oberflächenmessplatz MarSurf PCV der Firma Mahr GmbH.

Figure 4-4: Surface measuring station MarSurf PCV by the company Mahr GmbH.

4.2.2 Auflichtmikroskop Incident light microscope

Um die Durchsetzbauteile auf eventuell entstandene Risse zu überprüfen und um das Gefüge zu beurteilen kam das in Abbildung 4-5 dargestellte Auflichtmikroskop zum Einsatz.

Das Mikroskop des Typs Axioplan 2 der Firma Carl Zeiss AG, Göttingen, arbeitet mit Licht das von der Oberseite der Probe reflektiert und anschließend über das Objektiv betrachtet bzw. aufgezeichnet werden kann. Es können Vergrößerungen von 12,5 bis 1000 über verschiedene Linsen eingestellt werden.



Abbildung 4-5: Auflichtmikroskop Axioplan 2 der Firma Carl Zeiss AG.

Figure 4-5: Incident light microscope Axioplan 2 by the company Carl Zeiss AG.

4.2.3 Optisches Emissionsspektrometer Optical emission spectrometer

Zur Überprüfung der chemischen Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe kam ein optisches Emissionsspektrometer Foundry-Master der Firma WAS AG, Uedem, zum Einsatz. Dieses verdampft das Probenmaterial und regt es anschließend an. Das resultierende Spektrum kann optisch gemessen und den jeweiligen Legierungselementen zugeordnet werden, woraus die Zusammensetzung des Werkstoffs bestimmt werden kann. Das Messgerät ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

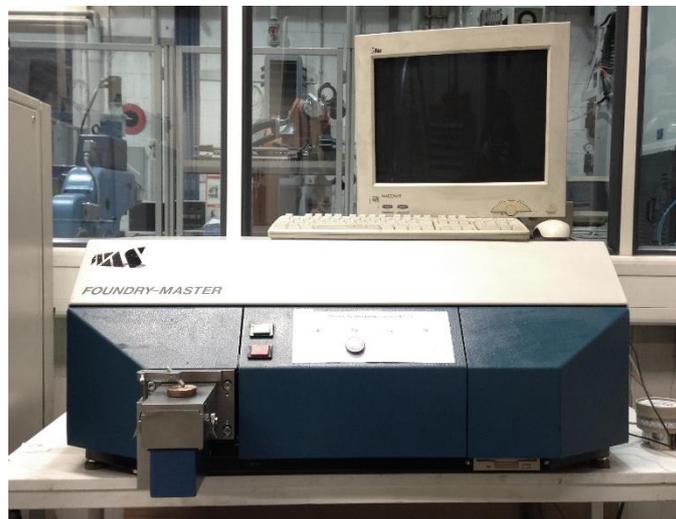


Abbildung 4-6: Optisches Emissionsspektrometer Foundry-Master der Firma WAS AG.

Figure 4-6: Optical emission spectrometer Foundry Master by the company WAS AG.

4.3 Materialprüfeinrichtungen Material testing equipment

4.3.1 Universalprüfmaschine Universal test machine

Die Zugversuche für die Materialcharakterisierung wurden auf der am Lehrstuhl vorhandenen Zug-Druck-Universalprüfmaschine 148/DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, durchgeführt. Diese ist in Abbildung 4-7 illustriert.



Abbildung 4-7: Universal Zug-Druck-Prüfmaschine 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co. KG.

Figure 4-7: Universal test machine 1484/DUPS-M by the company Zwick GmbH & Co. KG.

Die Zugproben können in zwei verschiedenen Prüfkammern mit 20 und 200 kN Maximalkraft geprüft werden, welche durch eine Fahrtraverse getrennt sind. Diese wird über zwei motorgetriebene Trapezspindeln bewegt. Die Kraftaufnehmer weisen eine Auflösung von 0,05 % der jeweiligen Nennprüfkraft auf. Die Längenveränderung der Proben kann über ein Extensometer aufgezeichnet werden. Durch die integrierte Geschwindigkeitsregelung sind konstante Dehnraten bis zur Gleichmaßdehnung möglich.

4.3.2 Torsionsprüfmaschine Torsion test machine

Um die Verfestigung der Blechwerkstoffe nach der Gleichmaßdehnung bestimmen zu können wurde ein Prüfstand zur ebenen Torsionsprüfung verwendet, welcher am IUL in Dortmund vorhanden ist. Bei diesem wird das Blech in der Mitte mit einer definierten Kraft eingespannt, während der äußere Ring rotiert wird. Dies ist schematisch, zusammen mit dem Prüfstand, in Abbildung 4-8 dargestellt.

Optische Dehnungsmessung
(GOM Aramis)

Einspannungen

Blech

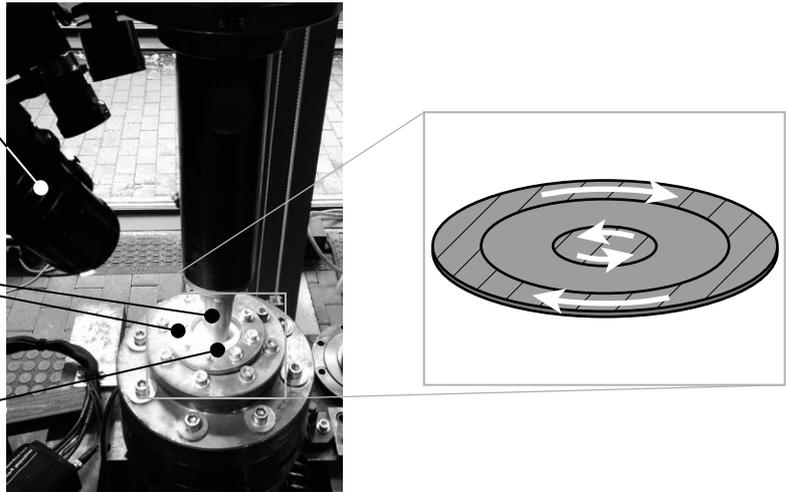


Abbildung 4-8: Torsionsprüfmaschine am IUL

Figure 4-8: Torsion test machine at the IUL

Über ein vorher aufgebracht stochastisches Muster auf der Blechoberseite kann über ein Aramis Messsystem der GOM GmbH, Braunschweig, die Dehnung zwischen den Einspannungen bestimmt werden. Gleichzeitig wird über einen Drehmomentsensor, die für die plastische Deformation nötige Kraft gemessen werden. Da diese Torsions- oder Scherprüfung, im Gegensatz zum einachsigen Zugversuch, keine Einschnürung aufweist, kann das Materialverhalten bei bedeutend höheren Umformgraden geprüft werden. [Yin14]

5 Werkstoffe Materials

Kurzfassung

In den Durchsetzversuchen wurden die Blechwerkstoffe S355MC, 22MnB5, S700MC und S700MC-mod verwendet. Deren mechanische Kennwerte und chemische Zusammensetzungen wurden untersucht und die Einhaltung der von den Herstellern spezifizierten Eigenschaften bestätigt. Anschließend werden die Aktivelementwerkstoffe 1.2379 und K490 microclean näher beschrieben.

Abstract

In the embossing experiments the sheet metal materials S355MC, 22MnB5, S700MC and S700MC-mod were used. Their mechanical and chemical properties were investigated and the compliance with the manufacturer's specifications confirmed. Afterwards, the active element materials 1.2379 and K490 microclean are presented.

5.1 Blechwerkstoffe Sheet metal materials

Für die Durchsetzversuche wurden vier verschiedene Blechwerkstoffe verwendet. Die Blechdicke betrug jeweils 4 mm. Als Referenzwerkstoff kam S355MC der Firma thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH zum Einsatz. Dieser mikrolegierte, warmgewalzte Feinkornbaustahl mit der Werkstoffbezeichnung S355MC und der Werkstoffnummer 1.0976 weist eine gute Umformbarkeit und Feinschneidbarkeit auf, wodurch er sich auch für das Durchsetzen besonders eignet. Weiterhin entspricht er den in [DIN10149-2] spezifizierten Lieferbedingungen. [Thy13b]

Der warmgewalzte, borlegierte 22MnB5 mit der Werkstoffbezeichnung 22MnB5 und der Werkstoffnummer 1.5528 kam als Repräsentant der Vergütungsstähle zum Einsatz. Diese können, z.B. durch Presshärten, eine Zugfestigkeit von über 1500 MPa erreichen. Im geglühten Zustand, wie der Werkstoff im vorliegenden Projekt verwendet wurde, weist er jedoch eine gute Umformbarkeit auf. Dieser ebenfalls von der thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH gelieferte Stahl erfüllt Lieferspezifikationen in Anlehnung an [DIN10083-3]. [Thy13a]

Vom gleichen Produzenten kam weiterhin der warmgewalzte, mikrolegierte Feinkornbaustahl S700MC zum Einsatz. Dieser weist eine hohe Duktilität auf aus der erstklassige Umformbarkeit und Feinschneidbarkeit bei einer, im Vergleich zu S355MC und 22MnB5, deutlich höheren Streckgrenze resultieren. Die Lieferspezifikationen des Werkstoffs mit der Bezeichnung S700MC und der Nummer 1.8974 sind in [DIN10149-2] zu finden. [Thy13c]

Der letzte verwendete Versuchswerkstoff ist S700MC-mod, ein hochfester Konstruktionsstahl der sich ebenfalls durch eine gute Umformbarkeit auszeichnet. Er

erfüllt oder übertrifft die Anforderungen die in [DIN10149-2] an einen S700MC gestellt werden. [SSA17]

Um die Qualität der Stähle und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden chemische Analysen mit dem in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Emissionsspektrometer durchgeführt. Die Resultate sind in Tabelle 5-1 zu finden. Alle Legierungsanteile liegen innerhalb der von den Herstellern spezifizierten Grenzen.

Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe in Massenprozent.

Table 5-1: Chemical composition of the test materials in percentage by mass.

Legierungselement	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	B	Nb	V	Ti
S355MC	0,020	0,010	0,163	0,009	<0,002	0,024	0,069	<0,001	0,024	<0,002	<0,001
22MnB5	0,205	0,230	1,260	0,012	<0,002	0,038	0,150	0,001	<0,005	0,005	0,042
S700MC	0,041	0,060	1,630	0,013	<0,002	0,036	0,054	<0,001	0,033	0,009	0,112
S700MC-mod	0,048	0,060	1,842	0,007	<0,002	0,026	0,061	<0,001	0,044	0,047	0,111

Die mechanischen Kennwerte wurden in Zugversuchen nach [DIN6892-1] auf der in Kapitel 4.3.1 präsentierten Universalprüfmaschine ermittelt. Die Geometrie der Zugproben wurde gemäß [DIN50125] mit Form E gewählt. Es wurden jeweils zehn Proben mit einer Orientierung von 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung entnommen. Die so gewonnen Kennwerte sind in Tabelle 5-2 aufgelistet. Alle Werkstoffe erfüllen die in Datenblättern und Normen spezifizierten Zugfestigkeiten und Streckgrenzen.

Tabelle 5-2: Mechanische Kennwerte der Blechwerkstoffe mit Standardabweichung.

Table 5-2: Mechanical properties of the sheet metal materials with standard deviation.

Entnahmewinkel	$R_{p0.2}$ [MPa]			R_m [MPa]		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
S355MC	379±9,0	398±8,7	402±9,8	449±7,9	452±4,6	458±8,2
22MnB5	366±8,6	362±5,3	374±4,2	499±9,0	496±1,8	509±6,0
S700MC	756±9,9	760±12	836±13	858±3,8	823±5,1	881±15
S700MC-mod	737±5,6	748±3,8	804±4,2	823±5,8	817±3,8	875±3,6

Die verwendeten Blechwerkstoffe unterscheiden sich signifikant durch ihr Verfestigungsverhalten. Da der Zugversuch hier nur eine Aussage bis hin zur Gleichmaßdehnung erlaubt, wurde zusätzlich der ebene Torsionsversuch zur Prüfung bei höheren Umformgraden angewandt. Hier kamen Proben mit einer einseitig eingefrästen Nut zur Reduzierung der Prüfkraft zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-1 zu sehen. Die Verfestigung wurde hier durch die Bestimmung der durchschnittlichen Steigung der Fließkurve in der semilogarithmischen Auftragung (Abbildung 5-1 rechts), wie in [Klo06] beschrieben, ermittelt.

Das unterschiedliche Verfestigungsverhalten zwischen S355MC und 22MnB5 auf der einen und S700MC und S700MC-mod auf der anderen Seite sind hier gut zu erkennen. Während die ersten beiden stark verfestigen ist dies bei den hochfesten Werkstoffen bedeutend geringer ausgeprägt.

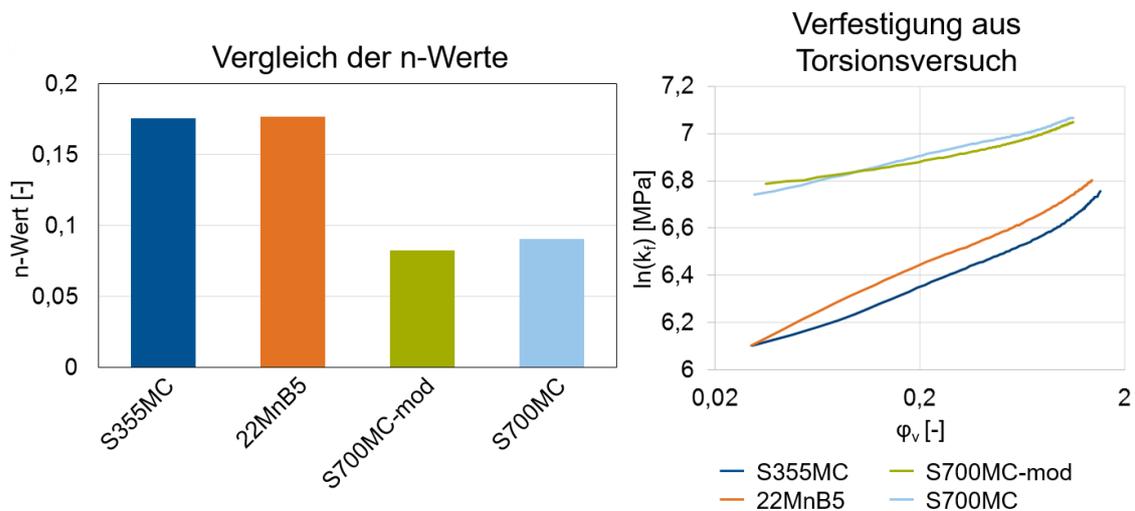


Abbildung 5-1: Vergleich der Verfestigung der Blechwerkstoffe durch den n-Wert.

Figure 5-1: Comparison of the strain hardening of the sheet metal material by the n-value.

5.2 Aktivelementwerkstoffe Active element materials

Der Kaltarbeitsstahl 1.2379 der Firma Böhler Edelstahl GmbH & Co. Kg. wurde für die Führungseinsätze bzw. den Niederhalter und die Gegenhalter verwendet. Dieser ledeburitische Chromstahl mit der Bezeichnung X153CrMoV12 und der Werkstoffnummer 1.2379 weist eine gute Zähigkeit bei gleichzeitiger Verschleißfestigkeit auf, wodurch konstante Bedingungen für die Versuche gewährleistet werden können. Die Eigenschaften des Werkstoffs sind in [DIN4957] genormt. [Böh09]

Für Stempel und Matrizen kam der pulvermetallurgisch hergestellte Kaltarbeitsstahl K490 microclean, ebenfalls von der Firma Böhler Edelstahl GmbH & Co. Kg. zum Einsatz. Dieser Werkstoff weist eine sehr gute Zähigkeit bei gleichzeitig hoher möglicher Härte auf. Damit eignet er sich besonders für die stark belasteten Aktivelemente. In den Simulationen wurde ein Elastizitätsmodul von 223 GPa verwendet. [Böh14]

Die chemische Zusammensetzung von 1.2379 und K490 microclean gemäß den Datenblättern sind in Tabelle 5-3 aufgeführt.

Tabelle 5-3: Chemische Zusammensetzung der Aktivelementwerkstoffe in Massenprozent aus [Böh09] und [Böh14].

Table 5-3: Chemical composition of the active element materials in percentage by mass taken from [Böh09] and [Böh14].

Legierungselement	C	Si	Mo	Mn	Cr	V	W
1.2379	1,55	0,30	0,75	0,30	11,30	0,75	
K490 microclean	1,40		1,50		6,40	3,70	3,50

6 Zerlegen der Bauteilkontur in wiederkehrende Formelemente

Partitioning of the embossing line in recurrent geometrical elements

Kurzfassung

Zunächst wurde der industrielle Ist-Zustand anhand einer Vielzahl von Durchsetzbauteilen aufgenommen. Dem folgte eine Katalogisierung und Kategorisierung der in den Durchsetzungen vorkommenden Formelemente entsprechend einer erarbeiteten Methodik. Davon ausgehend wurden relevante Formelemente für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt.

Abstract

At first the industrial state of the art was investigated on the basis of a multitude of parts with embossings. Afterwards, a cataloguing and categorization of the part's embossing was carried out according to a developed methodology. Furthermore, relevant geometrical elements were chosen for further investigations.

6.1 Aufnahme des industriellen Ist-Zustandes

Analysis of the industrial state of the art

Um einen Überblick über die industriell relevanten Durchsetzungen zu schaffen wurde in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses eine Vielzahl von Durchsetzbauteilen aufgenommen. Ein Auszug hieraus ist in Abbildung 6-1 zu sehen.

Die Durchsetzungen kommen ausschließlich in Kombination mit einer Scher- oder Feinschneidoperation vor. Das Größenspektrum der Bauteilaußenkontur reicht dabei von circa 30 mm bis 200 mm. Die Blechdicken bis 12 mm können beobachtet werden, allerdings dominieren Dicken im Bereich von 4 bis 6 mm. Die Durchsetztiefe variiert von wenigen Zehntelmillimeter, was eher einem Prägeprozess entspricht, bis hin zu 100 % der Blechdicke. Hier sind Blech und Durchsetzung nur noch durch speziell gestaltete Stege verbunden.

Durchsetzbauteile werden nahezu ausschließlich aus Stahl hergestellt. Dabei kommen, je nach Anforderung verschiedene Legierungen zum Einsatz. Dies sind bei kaltumgeformten Bauteilen, bei denen auf einen Vergütungsprozess verzichtet werden soll, zum Beispiel mikrolegierte HD-Stähle. Alternativ können auch Kohlenstoffstähle wie ein C15 zum Einsatz kommen. Ist ein Vergütungsprozess zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit nötig, wird meist C35, C45, 22MnB5 oder 16MnCr5 verwendet.

Der Schwierigkeitsgrad entsprechend der in Kapitel 2.1.5 aufgeführten Norm reicht dabei von S1 bis S3.

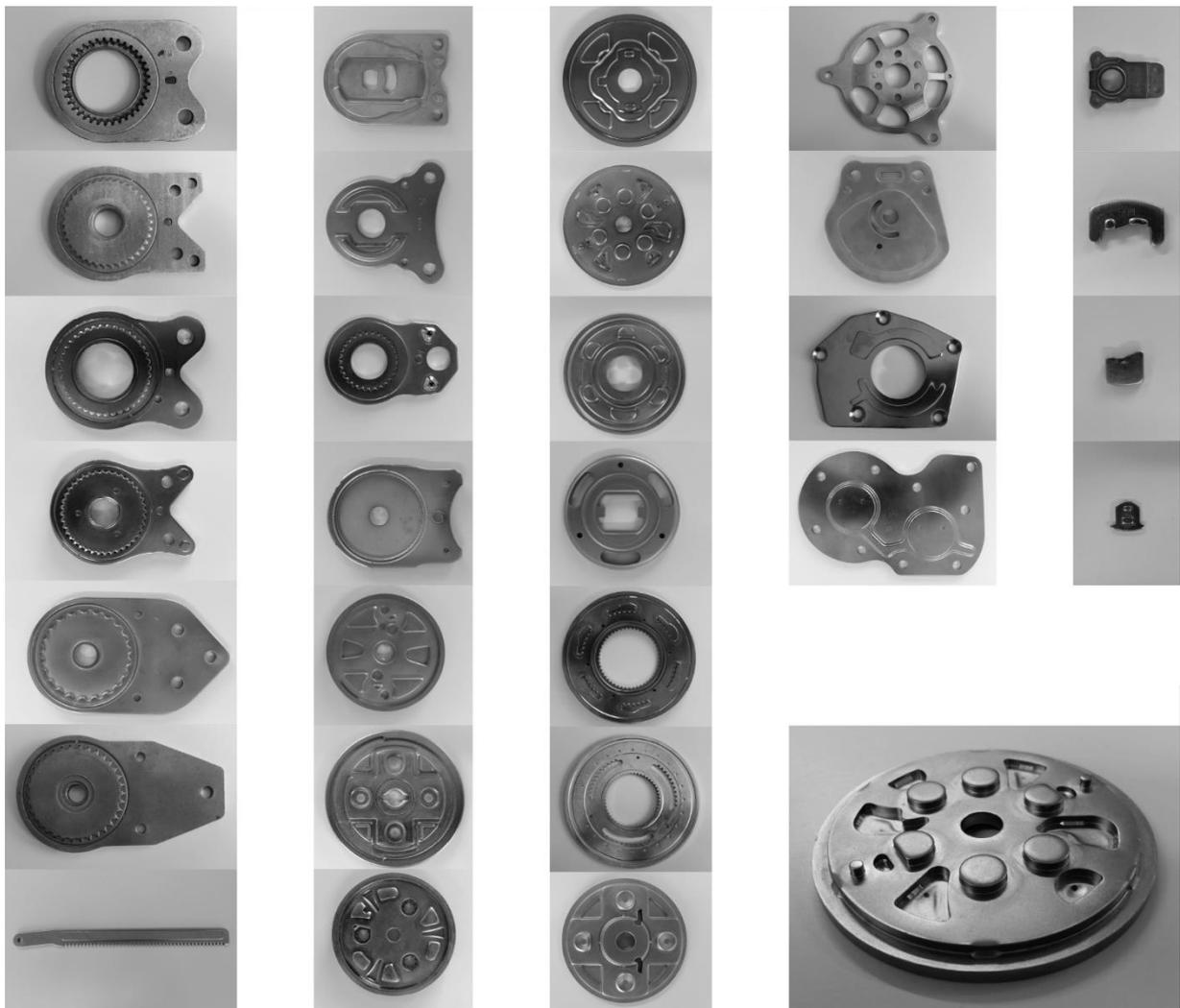


Abbildung 6-1: Auszug aus dem für den industriellen Ist-Zustand aufgenommenen Bauteilspektrum.

Figure 6-1: Extract of the parts recorded for the industrial state of the art.

6.2 Katalogisierung und Kategorisierung der Durchsetzbauteile Cataloging and categorization of the parts with embossings

Basis für die Katalogisierung und Kategorisierung der Durchsetzbauteile, beziehungsweise der Durchsetzungen, ist eine Zerlegung der Durchsetzlinienkontur in verschiedene Formelemente. Hier wurde, wie beispielhaft in Abbildung 6-2 dargestellt, zwischen Rundungen, Geraden, Verzahnungen und Ecken unterschieden. Da eine echte Ecke nicht herstellbar ist, wurden Radien kleiner 1 mm als Ecke definiert. Da Verzahnungen, die ja eine Kombination von Rundungen, Geraden und Ecken sind, die Ergebnisse der folgenden Zählung massiv verfälschen würden, wurden diese extra gezählt.

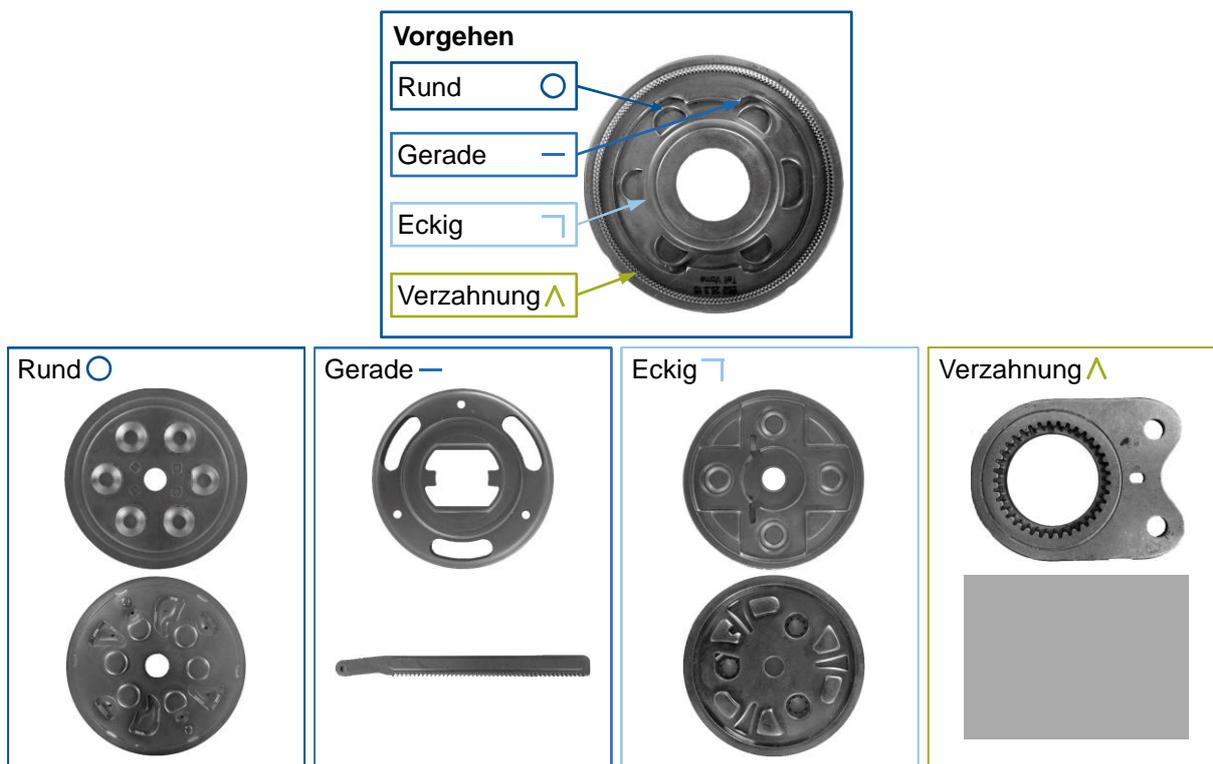


Abbildung 6-2: Methodik zur Zerlegung von Durchsetzlinien (oben) mit Beispielen (unten).

Figure 6-2: Methodology for the dissection of embossed lines (top) with examples (bottom).

Entsprechend dieser Methodik wurden die Formelemente an insgesamt 37 Bauteilen gezählt. Das Ergebnis dieser Katalogisierung ist in Abbildung 6-3 zu sehen.

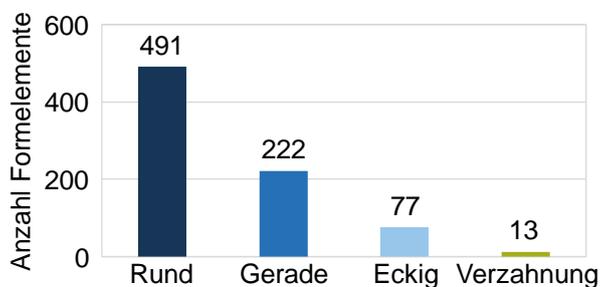


Abbildung 6-3: Zählung der in den Durchsetzbauteilen enthaltenen Formelemente.

Figure 6-3: Counting of the geometrical elements contained in the embossed parts.

Hier überwiegen runde Formelemente mit 491 Stück bei weitem. Gerade Durchsetzlinienabschnitte kommen mit einer Anzahl von 222 in etwa halb so häufig vor, während Ecken mit 77 Zählungen nur noch relativ selten auftreten. Am seltensten sind Verzahnungen zu finden, von denen nur 13 gezählt werden konnten.

6.3 Auswahl der Formelemente für die weiterführenden Untersuchungen

Selection of geometrical elements for further investigations

Ausgehend von dieser Zählung werden die zu untersuchenden Formelemente ausgewählt. Diese sind in Abbildung 6-4 illustriert.

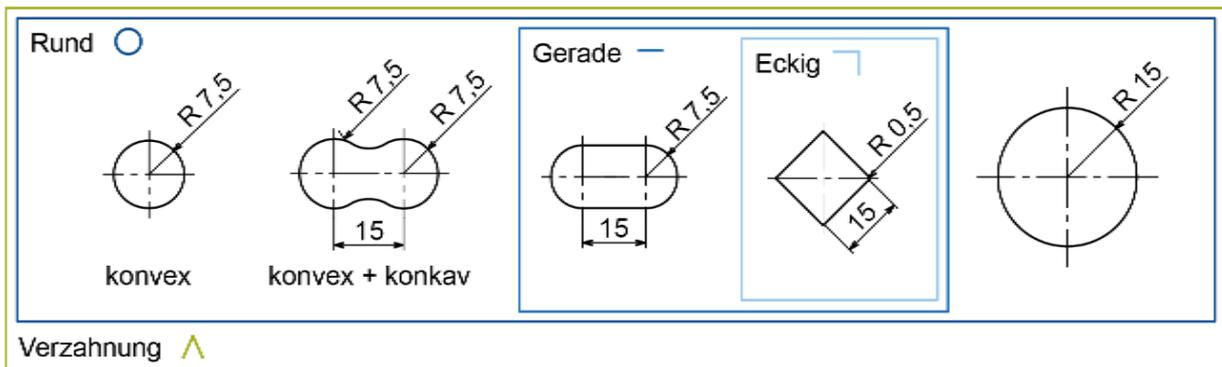


Abbildung 6-4: Auswahl der Formelemente für die weiterführenden Untersuchungen.

Figure 6-4: Selection of geometrical elements for further investigations.

Da runde Abschnitte überwiegen, sollen diese detaillierter charakterisiert werden. Hierzu wird zum einen der Einfluss von konvexen und konkaven Formelementen abgebildet. Durch die Auswahl mehrerer Rundungen mit verschiedenen Radien von 7,5 mm und 15 mm kann zwischen diesen interpoliert werden.

Da gerade Konturelemente als die zweithäufigste Durchsetzlinienform identifiziert wurden, sollen diese ebenfalls genauer charakterisiert werden. Ist der Einfluss des Formelements mit $r = 7,5$ mm bekannt, kann über eine Langlochgeometrie der Einfluss einer Geraden identifiziert werden.

Die relativ seltenen Ecken können über einen kleinen Radius von 0,5 mm abgebildet werden. Dies wird mit einem Quadratstempel erreicht, wozu jedoch das Materialmodell der Geraden bekannt sein muss. Dies bietet weiterhin den Vorteil dass zwischen dem Formelement mit Radius 7,5 mm und dem Radius mit 0,5 mm interpoliert werden kann.

Sind die geometrischen Grundformen bekannt, können mit diesen beliebig komplexe Durchsetzlinien, wie zum Beispiel eine Verzahnung, abgebildet werden.

7 Versuchsplan Design of experiments

Kurzfassung

Der Versuchsplan orientiert sich an den in der Aufnahme des industriellen Ist-Zustandes gewonnenen Erkenntnissen. Dies wurde in den Experimenten mit industrienahen Prozessparametern und Randbedingungen berücksichtigt. Zusätzlich wird eine Ritzelgeometrie zur Validierung vorgestellt. Die simulationsgestützten Untersuchungen greifen dies auf, wobei zusätzlich eine Materialcharakterisierung benötigt wird.

Abstract

The design of experiments is based on the results of the analysis of the industrial state of the art. This was considered in the experiments by choosing process parameters and boundary conditions common in industrial applications. Additionally, a pinion geometry for the validation is presented. The numerical investigations replicate this with the difference that a material characterization is needed.

7.1 Experimentelle Untersuchungen Experimental investigations

Um eine Geometrie- und Machbarkeitsanalyse von Durchsetzungen zu bewerkstelligen, müssen experimentelle Referenzen geschaffen werden. Hierzu gehören die Verläufe der Durchsetzkraft über den Stempelweg für die vier verschiedenen Werkstoffe S355MC, 22MnB5, S700MC und S700MC-mod. Weiterhin müssen die Durchsetzflächenkenngößen ermittelt und, um die Machbarkeit beurteilen zu können, Risse in der Scherzone detektiert werden.

Die Randbedingungen für die Versuche wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt um praxisrelevante Ergebnisse zu erhalten. Um den Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf den Prozess ermitteln zu können wurden zwei Nenngeschwindigkeiten von 10 mm/s (quasistatisch) und 50 mm/s an der Presse eingestellt.

Die Durchsetztiefe wurde zu 70 % und 90 % der Blechdicke eingestellt. Diese Werte basieren aus den Erkenntnissen aus dem Vorgängerprojekt. Dort konnten bei $h_D = 70\%$ prozesssicher Bauteile hergestellt werden während bei 90 % Risse zu beobachten waren. Somit kann die Machbarkeit der Durchsetzungen beurteilt werden.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde ein Durchsetzspalt von umlaufend $-25\ \mu\text{m}$ gewählt. Der negative Spalt erhöht Druckspannungen in der Scherzone, wodurch rissfreie Bauteile zumindest bei der kleineren Durchsetztiefe zu erwarten sind.

Alle Experimente wurden praxisnah mit einer Beölung des Blechwerkstoffes durchgeführt. Hierfür wurde das chlorfreie Feinschneidöl ZO 3180 der Firma Fuchs Wisura GmbH, Bremen, gewählt.

Weiterhin wurden fünf Durchsetzliniengeometrien festgelegt mit denen es möglich ist die in Kapitel 6.3 definierten Formelemente abzubilden. Hierzu gehören zwei Kreisgeometrien mit Radien von 7,5 mm und 15 mm, eine Quadratgeometrie mit 0,5 mm Eckenradien, eine Langlochgeometrie und eine Kettengliedgeometrie (siehe Abbildung 6-4). Zur Validierung der Ergebnisse wurde eine Ritzelgeometrie ausgewählt. Diese enthält, wie in Abbildung 7-1 dargestellt, sowohl einspringende als auch ausspringende Ecken (konvex/konkav) mit Radien die in den Kalibrierformelementen nicht enthalten sind.

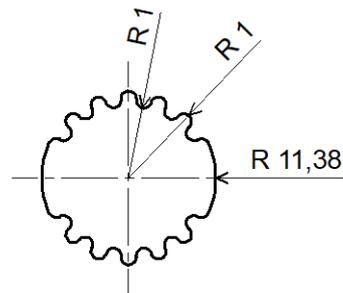


Abbildung 7-1: Ritzelgeometrie zur Validierung.

Figure 7-1: Pinion geometry for the validation.

Sowohl Stempel als auch Matrize wurden aus dem Werkstoff K490 microclean mit einer Härte von 63 ± 2 HRC gefertigt. Dabei wurden die Aktivelementkanten mit einem Radius von $50 \mu\text{m}$ versehen. Zusätzlich ist am Stempel eine Fase mit einer Höhe von 0,3 mm und an der Matrize eine mit einer Höhe von 1 mm angebracht. Beide weisen einen Winkel von 30° zur Vertikalen auf. Die Kante am Übergang von der Mantelfläche zur Fase wurde gebrochen. Die Kantenbearbeitung ist schematisch in Abbildung 7-2 illustriert.

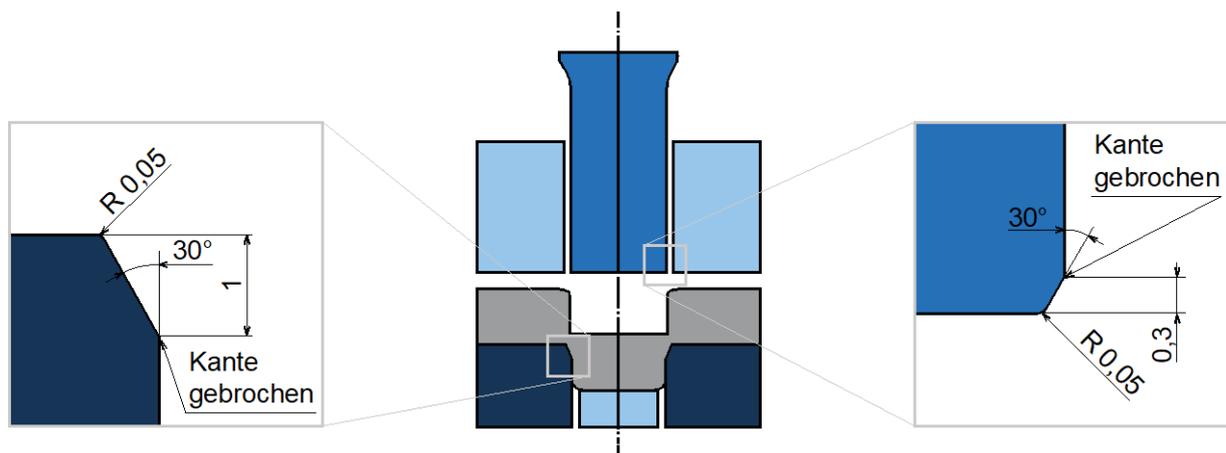


Abbildung 7-2: Bearbeitung der Aktivelementkanten.

Figure 7-2: Edge condition of the active elements.

Die Oberfläche wurde jeweils spiegelnd poliert. Weiterhin wurde der Einfluss der Aktivelementbeschichtung untersucht. Hierzu kamen unbeschichtete und mit FeinAl der Firma Blösch AG, Grenchen (Schweiz), beschichtete Stempel und Matrizen zum Einsatz. Diese Beschichtung aus Aluminiumchromnitrid wurde speziell für das Feinschneiden entwickelt und kombiniert hohe Härte mit Zähigkeit. Dadurch kann der

Einfluss von abrasivem Verschleiß auf den Durchsetzprozess nahezu ausgeschlossen werden. [Blö14]

Sofern nicht anders vermerkt wurden von jeder untersuchten Parameterkonfiguration 10 Bauteile hergestellt und die zugehörigen Messgrößen ausgewertet.

Der komplette Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen ist in Abbildung 7-3 aufgeführt.

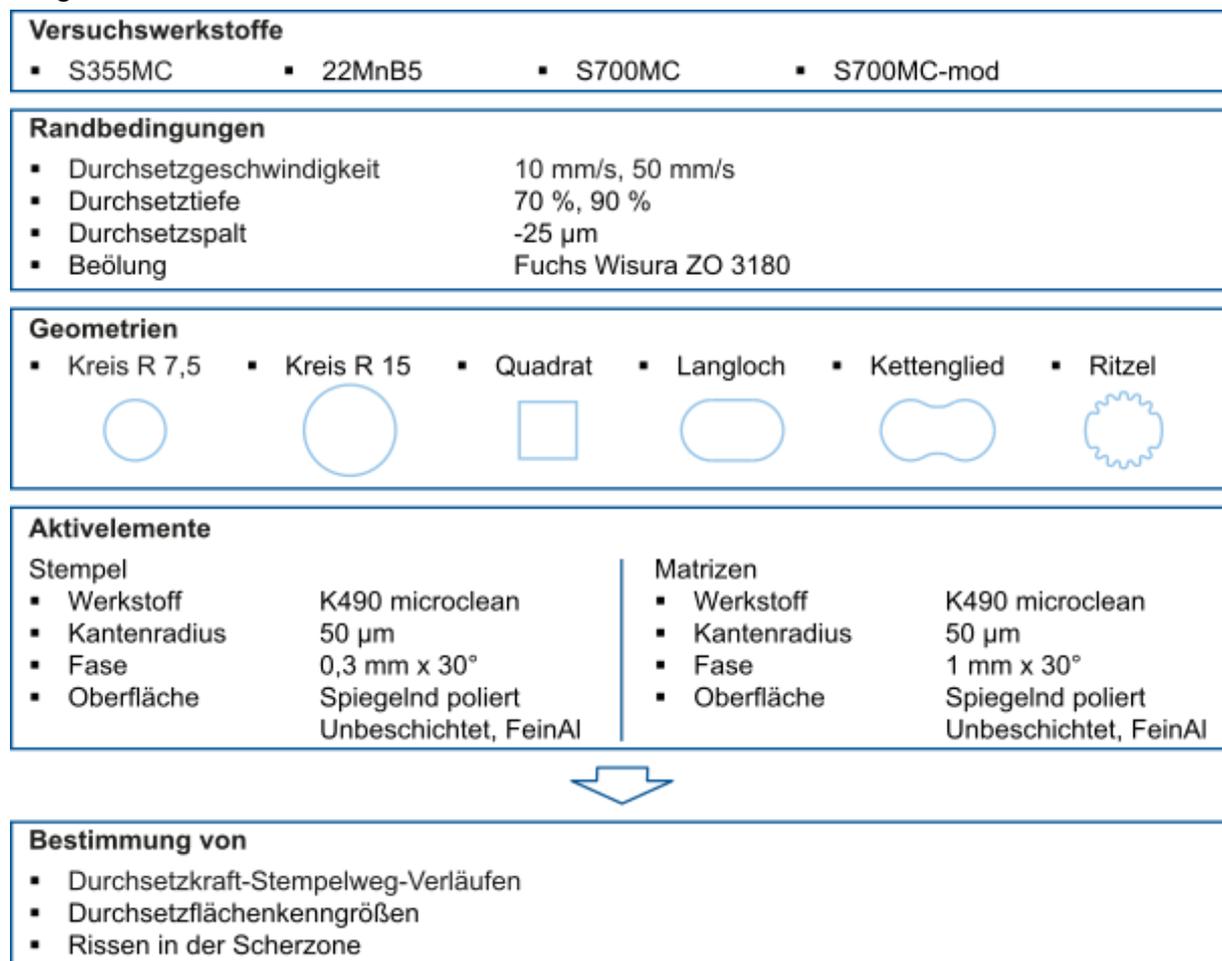


Abbildung 7-3: Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen.

Figure 7-3: Design of the experimental investigations.

7.2 Simulationsgestützte Untersuchungen Numerical Investigations

Die simulationsgestützten Untersuchungen orientieren sich eng am experimentellen Versuchsplan. Um die praxisnahe der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden im Vergleich zu den Experimenten industriennahe Prozessparameter und Randbedingungen ausgewählt.

Der gesamte Plan der simulationsgestützten Untersuchungen ist in Abbildung 7-4 illustriert.

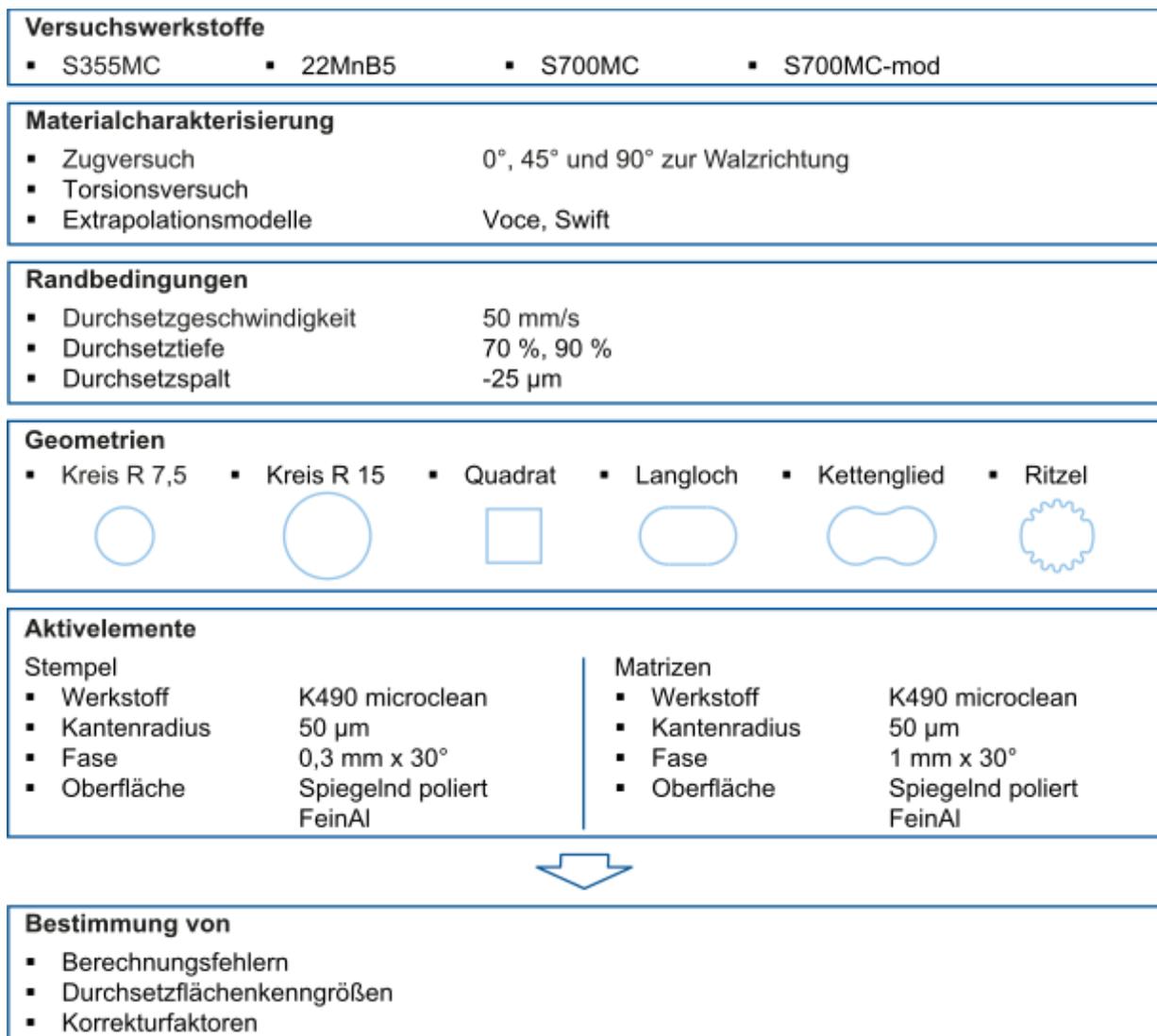


Abbildung 7-4: Plan der simulationsgestützten Untersuchungen

Figure 7-4: Design of the numerical investigations.

Um einen Startpunkt für das Korrekturmodell zu erhalten, ist eine Charakterisierung des mechanischen Verhaltens der Blechwerkstoffe nötig. Dies wurde in Zugversuchen bewerkstelligt, wobei die Proben in 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung entnommen wurden. Diese wurden zur Kalibrierung der Extrapolationsmodelle nach Voce und Swift herangezogen. Um eine Fließkurve über einen größeren Dehnungsbereich zu erhalten, was vor allem für die Untersuchung des Verfestigungsverhaltens interessant ist, wurden zusätzlich Torsionsversuche durchgeführt.

Die Prozessrandbedingungen wurden beibehalten, wobei auf die Nachbildung nicht relevanter und numerisch nur mit unverhältnismäßigem Aufwand modellierbaren Konfigurationen verzichtet wurde. So wurde nur die industriell interessierende Geschwindigkeit von 50 mm/s herangezogen und zum Beispiel die Beölung nicht im Modell berücksichtigt. Durchsetztiefen, Durchsetzspalt, Aktivelementkantenbearbeitung sowie die beobachteten Niederhalter- und Gegenhalterkräfte wurden wie im Experiment gewählt. Ebenso wurden die gleichen Durchsetzliniengeometrien untersucht.

Dies diente zunächst zur Bestimmung von Berechnungsfehlern, welche durch Massenskalierung und Netzfeinheit hervorgerufen werden.

Anschließend wurden, ausgehend von den in der Materialcharakterisierung gewonnenen Fließkurven die Durchsetzflächenkenngößen ermittelt und der Einfluss der Korrekturparameter auf diese bestimmt.

Anschließend wurde eine Vielzahl von Simulationen durchgeführt um die exakten Werte des Korrekturmodells iterativ zu berechnen. Um dies automatisiert zu bewerkstelligen wurde ein Optimierungsalgorithmus implementiert.

8 Experimentelle Untersuchungen Experimental investigations

Kurzfassung

Zuerst wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die Durchsetzflächenkenngrößen untersucht, wobei insbesondere bei den Werkstoffen S700MC und S700MC-mod eine stark ausgeprägte Geometrieabhängigkeit des Kanteneinzugs beobachtet werden konnte. Zusätzlich wurde die Auswirkung von Stößelgeschwindigkeit und der Beschichtung untersucht auf den Prozess überprüft. Anschließend wurden die Auswirkungen einer Parameterveränderung auf die Durchsetzkraft betrachtet. Auch hier wurde wieder die Geometrie-, die Geschwindigkeit und Beschichtungsabhängigkeit beleuchtet. Zuletzt wurde die Machbarkeit für die verschiedenen Durchsetztiefen und Konfigurationen durch Schliffbilder untersucht.

Abstract

At first, the influence of the process parameters on the embossed surface characteristic values was investigated. Here, a significant geometry dependency of the die-roll could be observed, especially for the sheet-metal materials S700MC and S700MC-mod. Additionally, the influence of the punch velocity and the coating on the process was examined. Changes in the embossing force with varying parameters were investigated afterwards by changing the geometry, the velocity and the coating. Finally, the feasibility of the embossings was considered by microsections for the different embossing depths and configurations.

8.1 Einfluss der Prozessparameter auf die Durchsetzflächenkenngrößen Influence of the process parameters on the embossed surface characteristics

Folgend wird der Einfluss der Durchsetzliniengeometrie auf die Durchsetzflächenkenngrößen, mit Fokus auf den besonders interessierenden Kanteneinzug, diskutiert. Für den Durchsetzflächenwinkel wurde eine von [Vol13] abweichende Definition verwendet. Der Bezug des Winkels ist nicht die an der Stempelstirnfläche gelegene Fläche, sondern die unter dem Niederhalter gelegene Außenfläche des Blechs. Hierdurch konnte die Streuung der Messergebnisse bedeutend reduziert werden.

Sofern nicht anders vermerkt werden die Ergebnisse für eine pressenseitig eingestellte Stößelgeschwindigkeit von 50 mm/s mit beschichteten Aktivelementen diskutiert.

Es wurden jeweils zehn Bauteile, wie in Abbildung 8-1 exemplarisch illustriert, hergestellt und an zufälligen Positionen an der dem Stempel zugewandten Bauteilseite vermessen.



Abbildung 8-1: Hergestellt Bauteile am Beispiel des Blechwerkstoffes 22MnB5.

Figure 8-1: Manufactured parts made of 22MnB5.

8.1.1 Einfluss von Werkstoff, Durchsetzliniengeometrie und Prozessparametern auf die Kanteneinziehungshöhe Influence of material, embossing line geometry and process parameters on the die-roll height

8.1.1.1 Kreisgeometrie mit Radius 7,5 mm Circle geometry with a radius of 7,5 mm

Die gemessenen Kanteneinziehungshöhen für die kleine Kreisgeometrie mit Radius 7,5 mm sind in Abbildung 8-2 aufgeführt.

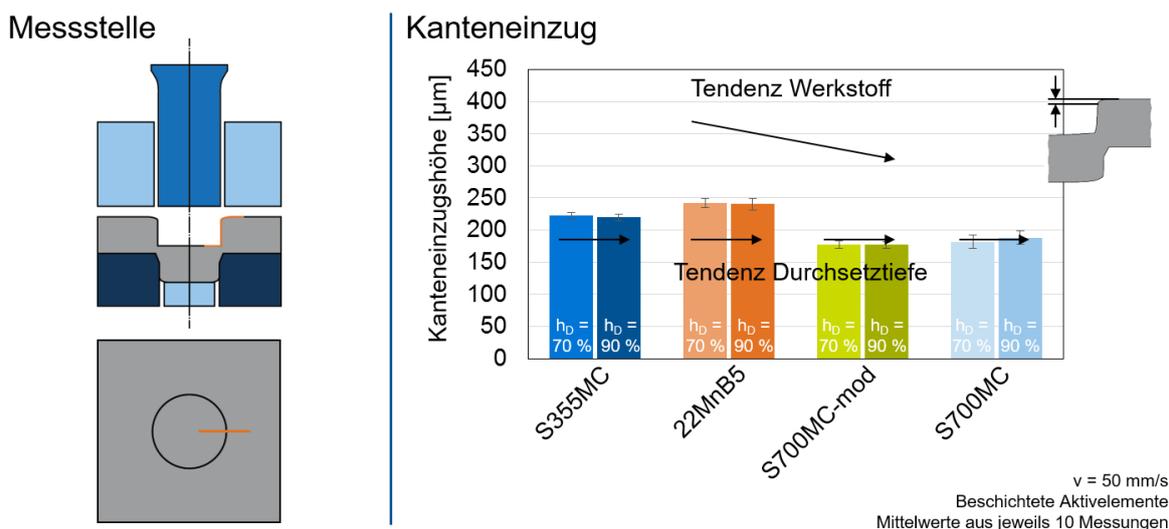


Abbildung 8-2: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinziehungshöhen für die kleine Kreisgeometrie ($r = 7,5 \text{ mm}$).

Figure 8-2: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the small circle geometry ($r = 7,5 \text{ mm}$).

Die größte Kanteneinziehungshöhe kann bei 22MnB5 mit $242 \mu\text{m}$ beobachtet werden, gefolgt von S355MC und S700MC-mod welcher sich auf einem nahezu identischen Niveau befindet wie S700MC. Die beiden verschiedenen Durchsetztiefen haben nahezu keinen Einfluss auf den Kanteneinziehung.

8.1.1.2 Kreisgeometrie mit Radius 15 mm Circle geometry with a radius of 15 mm

Die Kanteneinziehungshöhen für die große Kreisgeometrie mit einem Radius von 15 mm sind in Abbildung 8-3 dargestellt.

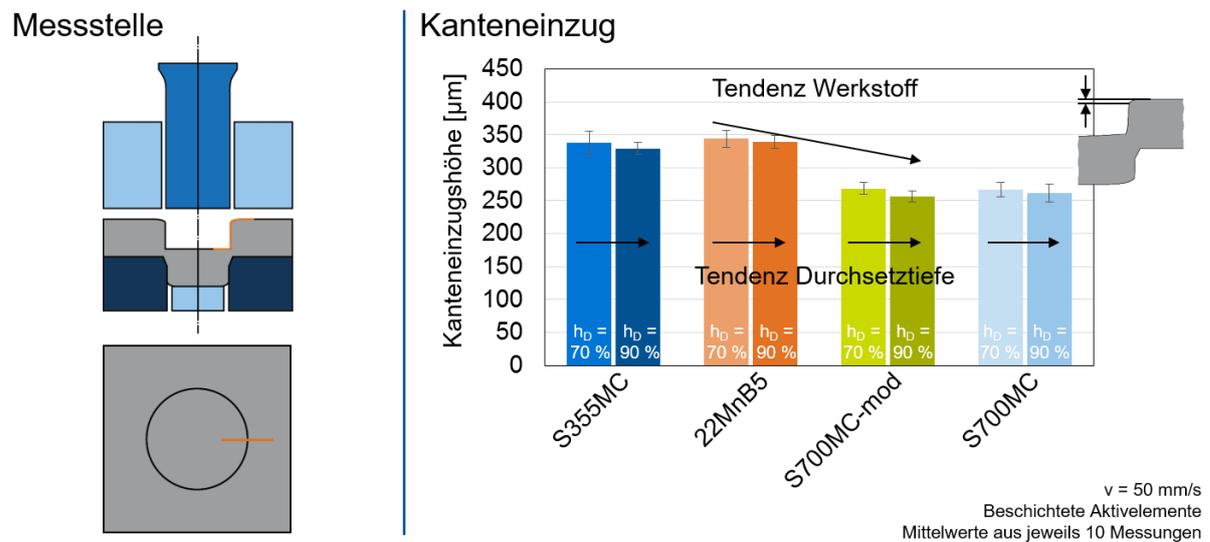


Abbildung 8-3: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die große Kreisgeometrie ($r = 15 \text{ mm}$).

Figure 8-3: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the big circle geometry ($r = 15 \text{ mm}$).

Wieder wird nur eine minimale Änderung der Kanteneinzugshöhe mit einer Veränderung der Durchsetztiefe beobachtet.

Auch hier weisen die beiden hochfesten Werkstoffe einen bedeutend kleineren Kanteneinzug auf als S355MC und 22MnB5.

Weiterhin fällt auf, dass der Kanteneinzug für die einzelnen Werkstoffe bedeutend größer ist als für die kleine Kreisgeometrie ($r = 7,5 \text{ mm}$). Im Mittel beträgt diese Differenz nahezu 50 %, ein Unterschied von 115 μm im Falle von S355MC und $h_D = 70 \%$.

8.1.1.3 Kettenglied geometrie Chain link geometry

Bei der Kettenglied geometrie wurden zwei Messstellen, jeweils mit einem Radius von 7,5 mm betrachtet. Einmal wurde an der Symmetrielinie des einspringenden Ecks (konvex) und zusätzlich an der Symmetrielinie des ausspringenden Ecks (konkav) gemessen. Dabei ähnelt die konvexe Messstelle geometrisch der kleinen Kreisgeometrie. Die zugehörigen Kanteneinzugshöhen sind in Abbildung 8-4 zu finden.

Wieder kann nahezu keine Abhängigkeit des Kanteneinzugs von der Durchsetztiefe beobachtet werden. Die beiden Werkstoffgruppen S355MC und 22MnB5 auf der einen und S700MC und S700MC-mod auf der anderen Seite weisen zwei unterschiedliche Niveaus auf, wobei bei den hochfesten niedrigere $h_{K,S}$ zu beobachten sind.

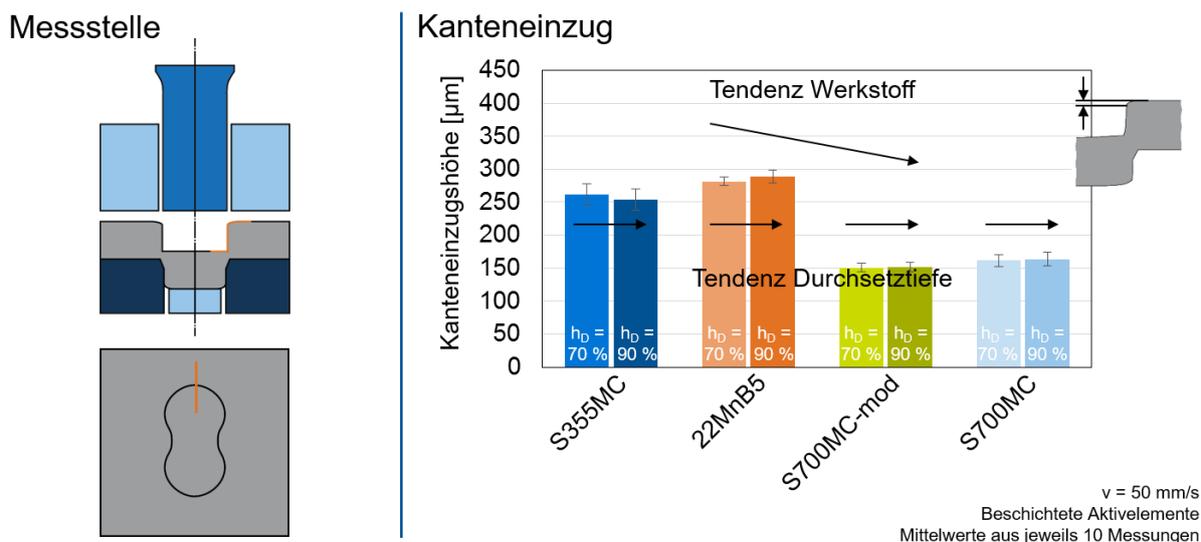


Abbildung 8-4: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konvexen Messstelle.

Figure 8-4: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the convex measuring position.

Eine komplett andere Ausprägung ist an der konkaven Messstelle zu sehen. Dies ist in Abbildung 8-5 dargestellt.

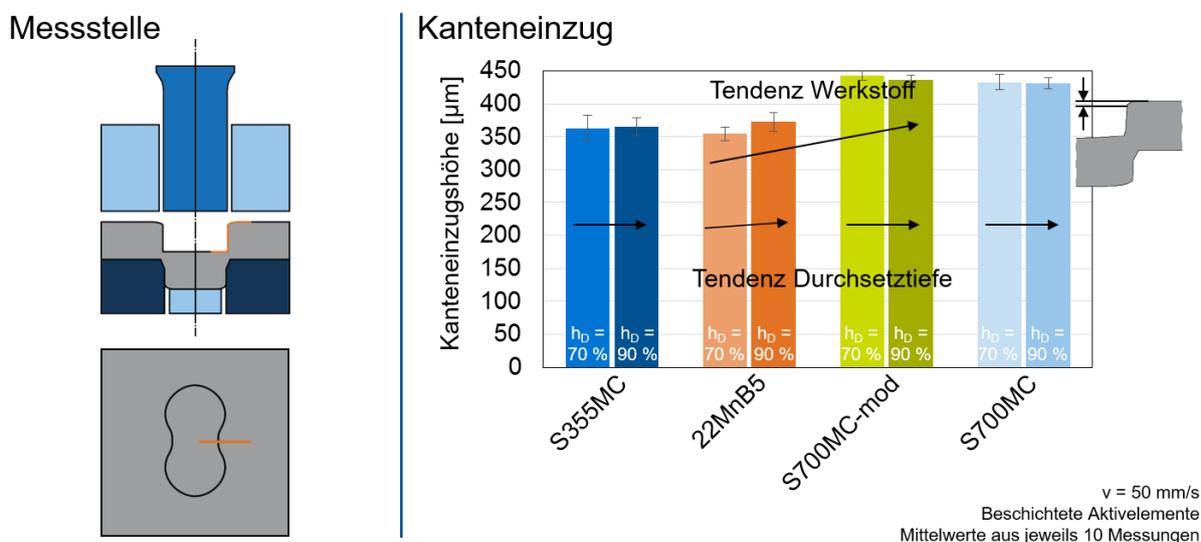


Abbildung 8-5: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konkaven Messstelle.

Figure 8-5: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the concave measuring position.

Auch hier ist der Einfluss der Durchsetztiefe wieder vernachlässigbar, generell sind die Kanteneinzugshöhen aber größer als bei den zuvor betrachteten Geometrien.

Bemerkenswert ist, dass die Kanteneinzüge der beiden hochfesten Werkstoffe an dieser Messstelle größer sind als die der Güten mit niedrigerer Fließgrenze. Zusätzlich sind die Unterschiede zwischen konvexer und konkaver Messstelle bedeutend größer

ausgeprägt als bei S355MC und 22MnB5. Dies ist in Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7 illustriert.

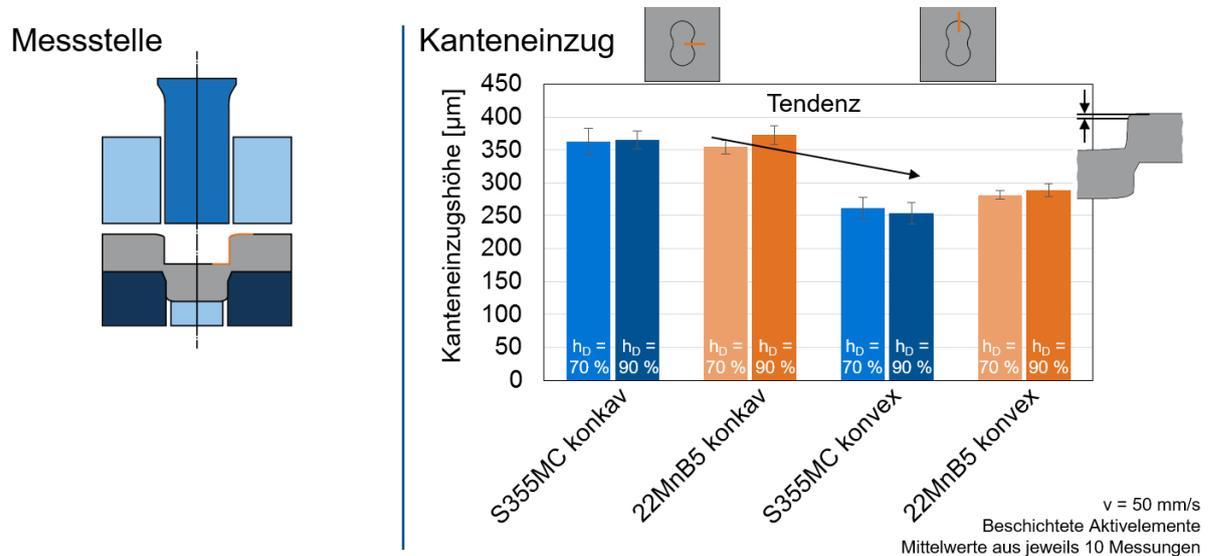


Abbildung 8-6: Geometrieabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konkaven und konvexen Messstelle für S355MC und 22MnB5.

Figure 8-6: Geometry dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the concave and convex measuring position for S355MC and 22MnB5.

Der Unterschied zwischen den Messstellen beträgt für S355MC durchschnittlich $107 \mu\text{m}$ während er für 22MnB5 einen Wert von $79 \mu\text{m}$ annimmt.

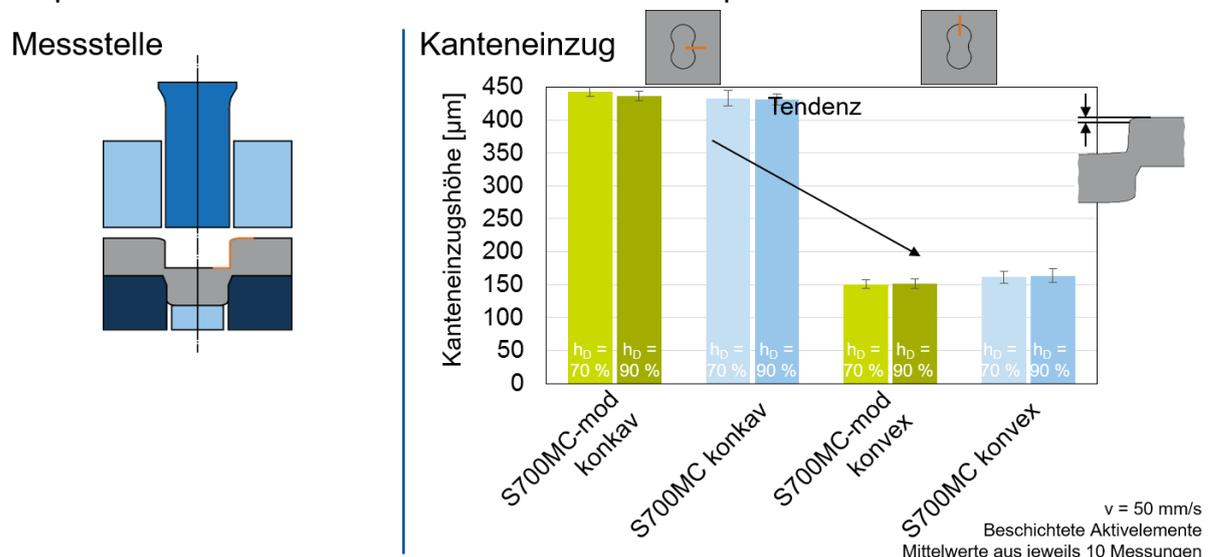


Abbildung 8-7: Geometrieabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Kettengliedgeometrie an der konkaven und konvexen Messstelle für S355MC und 22MnB5.

Figure 8-7: Geometry dependency of the die-roll heights for the chain link geometry at the concave and convex measuring position for S355MC and 22MnB5.

Deutlich ausgeprägter ist dies für S700MC und S700MC-mod. Für ersteren wird im Mittel ein Unterschied von $269 \mu\text{m}$ beobachtet. Bei S700MC-mod sind es sogar $289 \mu\text{m}$. Diese Differenzen sind in etwa dreimal so groß wie bei S355MC und 22MnB5.

8.1.1.4 Langlochgeometrie Slot geometry

Die Langlochgeometrie weist neben zwei Halbkreisen mit Radius 7,5 mm gerade Abschnitte mit jeweils 7,5 mm Länge auf. Die Kanteneinzugshöhen der Rundung an der Symmetrielinie sind in Abbildung 8-8 aufgeführt.

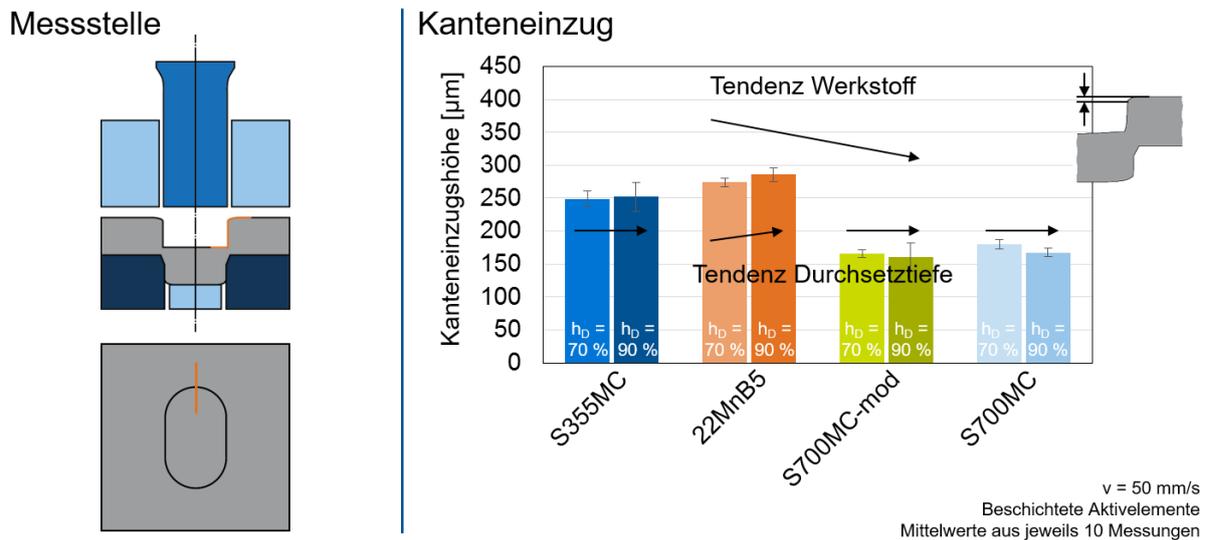


Abbildung 8-8: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Langlochgeometrie an der runden Messstelle.

Figure 8-8: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the slot geometry at the round measuring position.

Hier können wieder ähnliche Tendenzen wie bei der konvexen Messstelle der Kettengliedgeometrie sowie der großen und kleinen Kreisgeometrie beobachtet werden. Die Durchsetztiefe hat wieder nahezu keinen Einfluss während die Kanteneinzüge der Bauteile aus S355MC und 22MnB5 bedeutend größer sind als die von S700MC und S700MC-mod.

Eine andere Ausprägung kann an der geraden Messstelle beobachtet werden. Dies ist in Abbildung 8-9 dargestellt. Hier sind die Kanteneinzugshöhen der verschiedenen Werkstoffe und Durchsetztiefen nahezu auf einem Niveau. So beträgt der Unterschied bei $h_D = 90\%$ zwischen S355MC und S700MC lediglich $18\ \mu\text{m}$ im Vergleich zu $85\ \mu\text{m}$ Differenz an der runden Messstelle. Insgesamt sind die Kanteneinzugshöhen an der geraden Messstelle größer, im Falle der beiden hochfesten Werkstoffe sogar nahezu doppelt so groß wie an der runden Messposition.

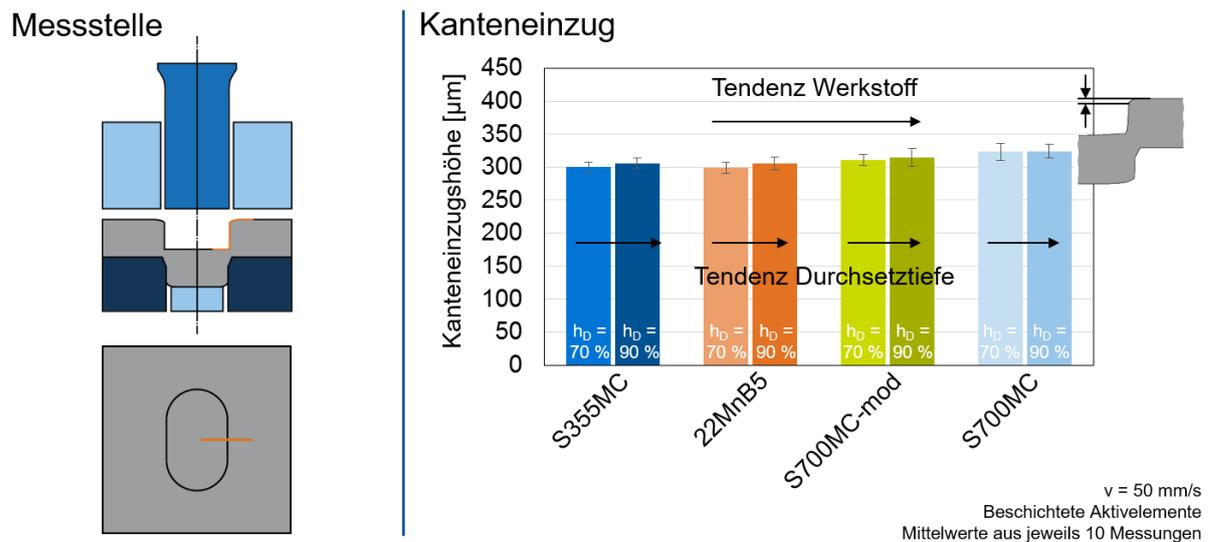


Abbildung 8-9: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Langlochgeometrie an der geraden Messstelle.

Figure 8-9: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the slot geometry at the straight measuring position.

8.1.1.5 Quadratgeometrie Square geometry

An der Quadratgeometrie wurden wieder zwei unterschiedliche Messstellen betrachtet. Zum einen wurde an der 7,5 mm langen Geraden und zum anderen an der Ecke, einem kleinen Radius von 0,5 mm, gemessen. Die Ergebnisse für die Gerade sind in Abbildung 8-10 zu sehen.

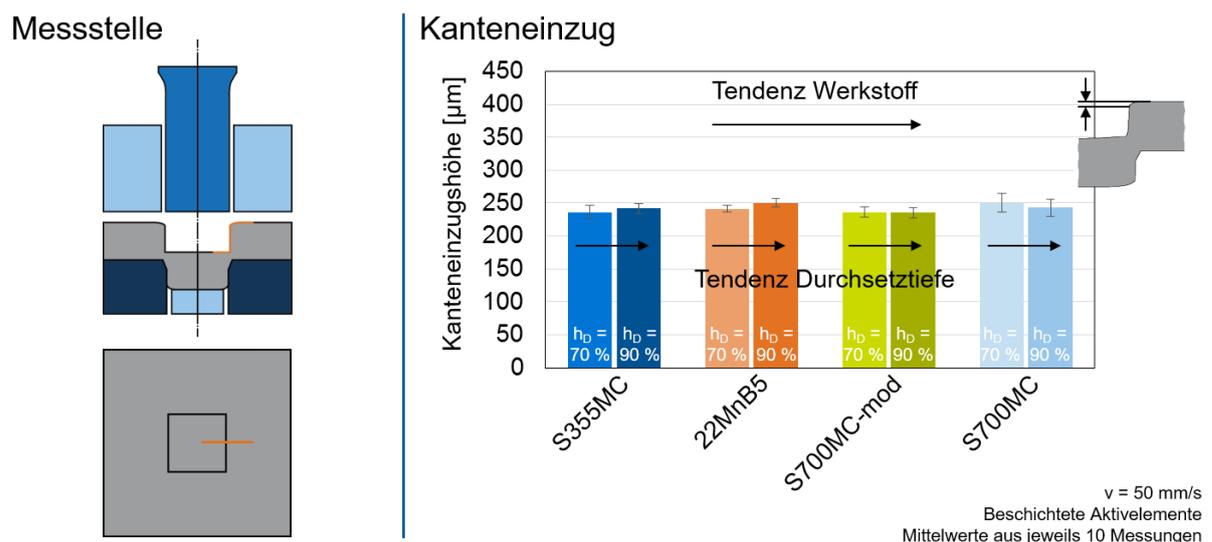


Abbildung 8-10: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Quadratgeometrie an der geraden Messstelle.

Figure 8-10: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the square geometry at the straight measuring position.

An dieser Messstelle kann wieder das gleiche Phänomen wie beim geraden Abschnitt der Langlochgeometrie beobachtet werden. Die Kanteneinzugshöhen für die

verschiedenen Werkstoffe und Durchsetztiefen sind nahezu gleich groß. Insgesamt liegt das Niveau jedoch circa 50 μm unter dem des Langlochs.

Am engen Radius zeigt sich ein komplett anderes Verhalten, wie in Abbildung 8-11 aufgeführt. Hier sind extreme Unterschiede zwischen den Werkstoffen zu sehen. Während S355MC und 22MnB5 für $h_D = 90\%$ mit 130 und 182 μm einen relativ großen Kanteneinzug aufweisen, ist er bei S700MC-mod und S700MC mit 15 und 23 μm verschwindend gering. Generell liegen die Werte aber deutlich unter den für die anderen Geometrien gemessenen Kanteneinzugshöhen.

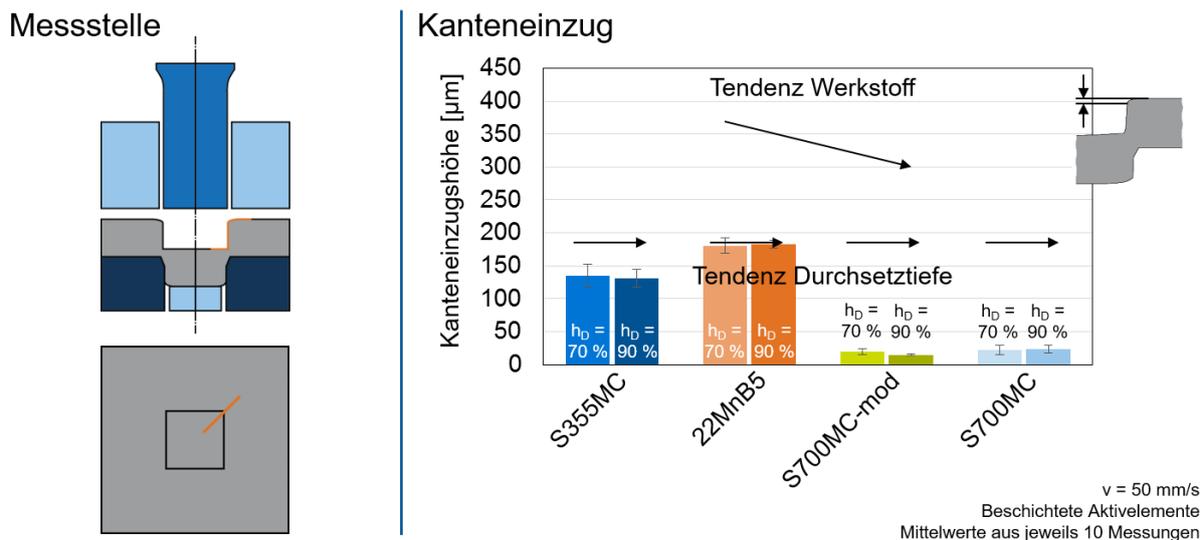


Abbildung 8-11: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Quadratgeometrie an der Ecke.

Figure 8-11: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the square geometry at the corner.

8.1.1.6 Gegenüberstellung der Radien mit 7,5 mm Comparison of the geometries with a radius of 7,5 mm

In der kleinen Kreisgeometrie, der Langlochgeometrie und der Kettengliedgeometrie sind konvexe Formelemente mit einem Radius von 7,5 mm enthalten. Diese werden folgend für die vier verschiedenen Blechwerkstoffe miteinander verglichen.

Für S355MC ist dies in Abbildung 8-12 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass sich alle Messungen auf einem ähnlichen Niveau befinden. Die größte Differenz von nur 35 μm ist hierbei zwischen der Kreisgeometrie und der Kettengliedgeometrie zu finden. Die Kanteneinzüge von Kettenglied und Langloch sind nahezu identisch. Die Annahme dass ähnliche Formelemente zu ähnlichen Ausprägungen der Durchsetzflächenkenngrößen führen findet sich also schon in den Experimenten.

Messstelle

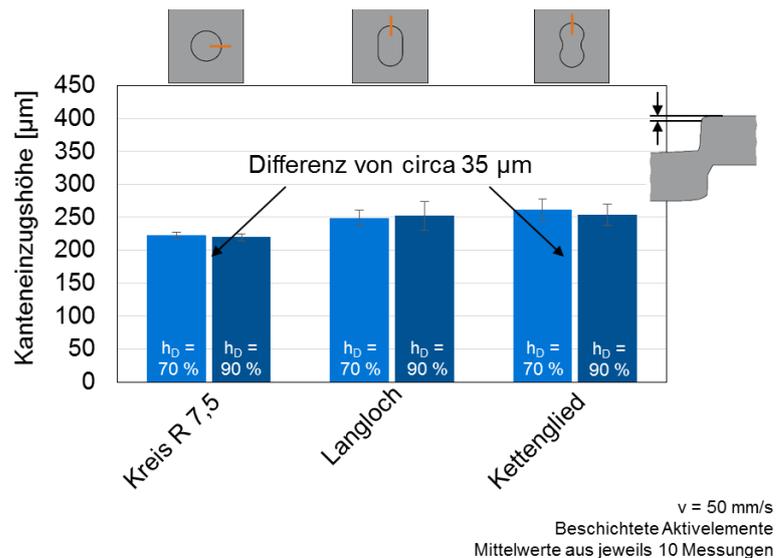
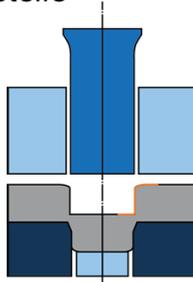


Abbildung 8-12: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus S355MC.

Figure 8-12: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel S355MC.

Eine gleiche Beobachtung kann, wie in Abbildung 8-13 zu sehen, für 22MnB5 gemacht werden. Trotz der stark variierenden Ausprägung des Kanteneinzugs, zum Beispiel von der konkaven zur konvexen Messstelle der Kettengliedgeometrie, beträgt auch hier die maximale Differenz lediglich 40 µm. Ebenso kann eine ansteigende Kanteneinzugshöhe von der kleinen Kreisgeometrie zur Langlochgeometrie festgestellt werden.

Messstelle

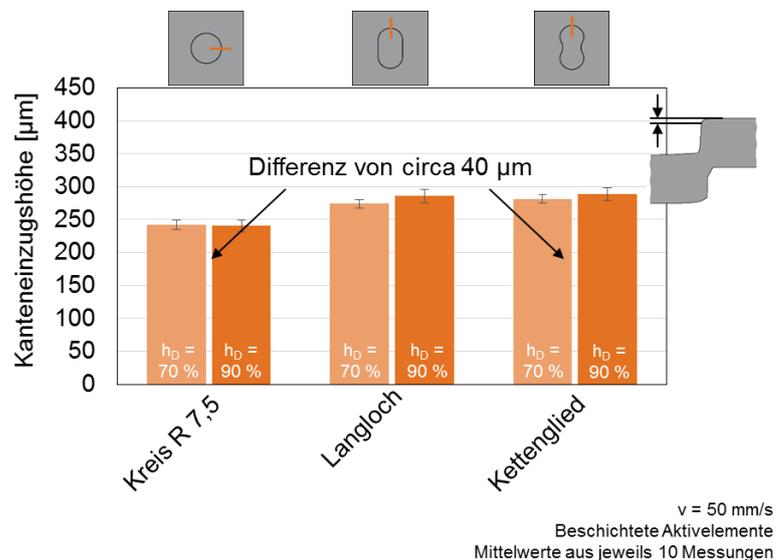
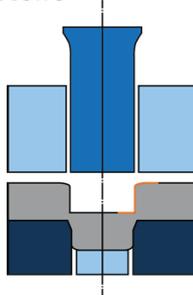


Abbildung 8-13: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus 22MnB5.

Figure 8-13: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel 22MnB5.

Bei S700MC-mod, dargestellt in Abbildung 8-14, ist die Differenz mit 25 μm sogar noch geringer. Hier ist jedoch die Kanteneinzugshöhe der Kreisgeometrie am größten und die der Kettengliedgeometrie am kleinsten.

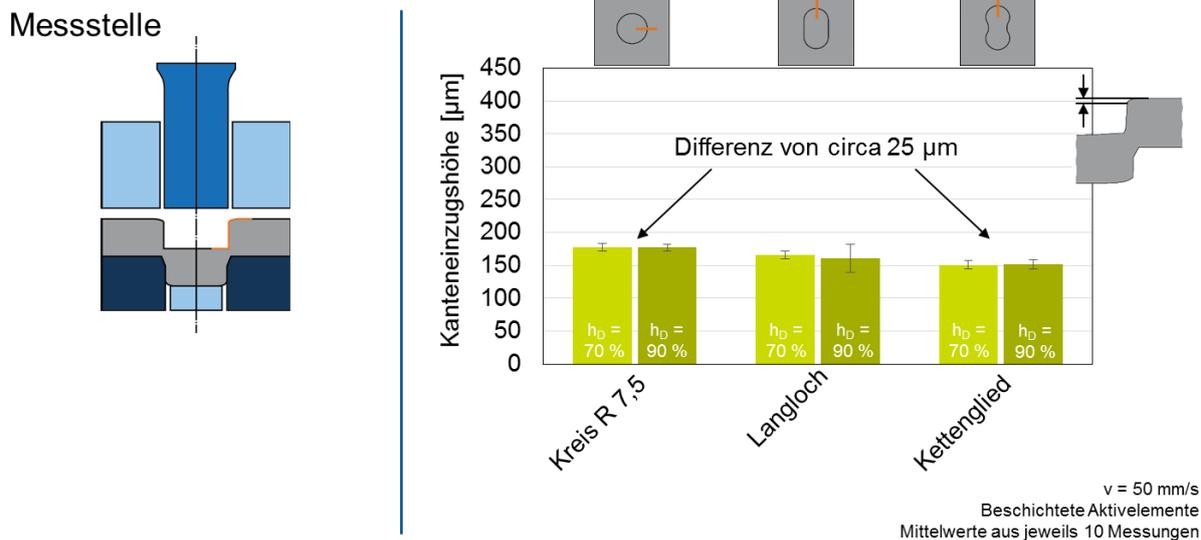


Abbildung 8-14: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus S700MC-mod.

Figure 8-14: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel S700MC-mod.

Dieses Verhalten findet sich auch beim Blechwerkstoff S700MC wieder. Dies ist in Abbildung 8-15 illustriert. Die maximale Differenz zwischen den Formelementen ist mit 25 μm genauso gering wie bei S700MC-mod. Auch die fallende Tendenz der Kanteneinzugshöhe von der Kreisgeometrie über die Langlochgeometrie hin zur Kettengliedgeometrie kann festgestellt werden.

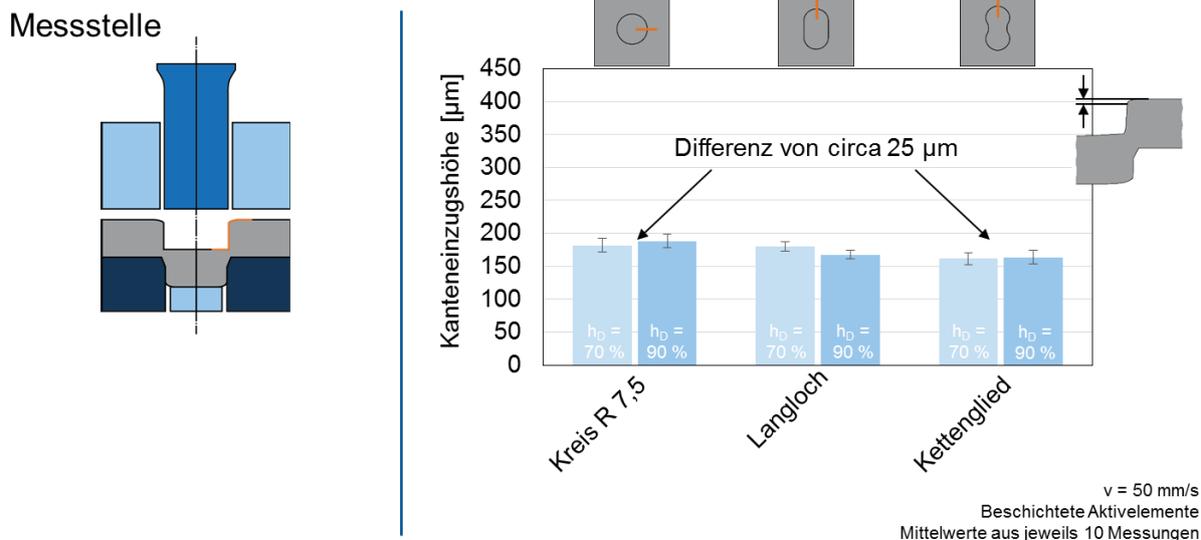


Abbildung 8-15: Vergleich der Kanteneinzugshöhen an drei verschiedenen konvexen Geometrien mit Radien von 7,5 mm hergestellt aus S700MC.

Figure 8-15: Comparison of the die-roll heights of three different convex geometries with radii of 7,5 mm made of the steel S700MC.

Wie schon bei anderen Messungen beobachtet finden sich also auch bei den ähnlichen Formelementen wieder zwei Materialklassen, bestehend aus S355MC und 22MnB5 auf der einen Seite und S700MC-mod und S700MC auf der anderen, mit jeweils stark unterschiedlichem Verhalten hinsichtlich der Ausprägung des Kanteneinzuges.

8.1.1.7 Ritzelgeometrie Pinion geometry

Die zur Validierung herangezogenen Ritzelgeometrie weist drei verschiedene Formelemente auf. Neben zwei großen Radien mit 11,38 mm sind diverse konvexe und konkave Zähne mit jeweils einem Radius von 1 mm zu finden. Der große Radius wurde an der Symmetrieebene vermessen. Die Ergebnisse hierfür sind in Abbildung 8-16 zu sehen.

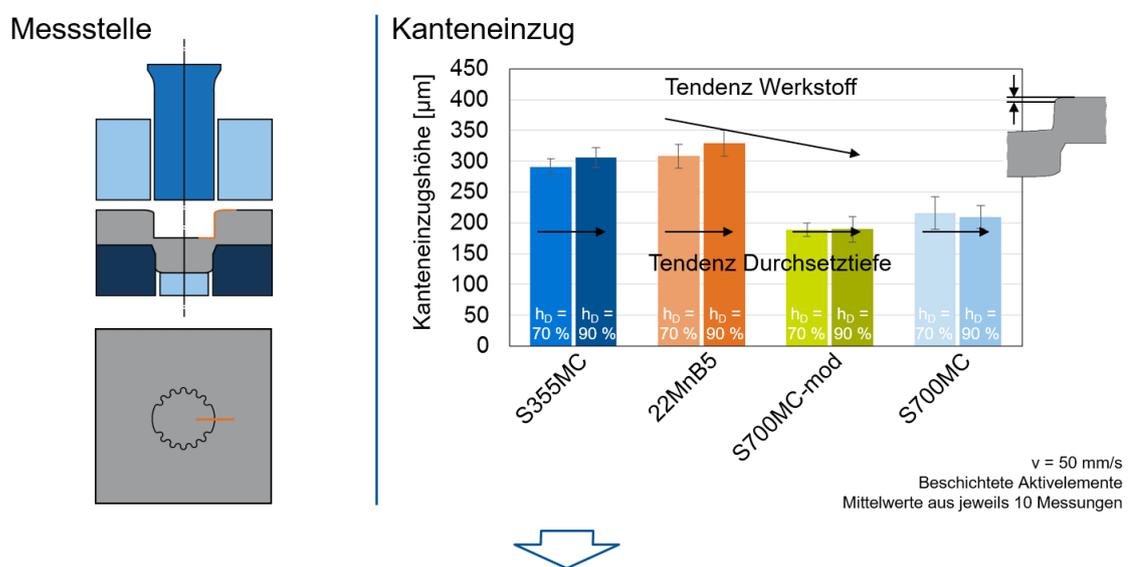


Abbildung 8-16: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinziehungshöhen für die Ritzelgeometrie am Formelement mit einem Radius von 11,38 mm.

Figure 8-16: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the pinion geometry at the geometrical element with a radius of 11,38 mm.

Die Abhängigkeiten der Kanteneinziehungshöhe sind hier nahezu identisch zu den Ergebnissen der kleinen und großen Kreisgeometrie. Neben den zwei Werkstoffklassen kann wieder ein vernachlässigbarer Einfluss der Durchsetztiefe beobachtet werden.

An der konkaven Messstelle, abgebildet in Abbildung 8-17, können ähnliche Phänomene wie beim der konkaven Rundung der Kettengliedengeometrie festgestellt werden. Zu beachten ist die angepasste Skala die für die extrem großen Kanteneinziehungshöhen von bis zu 1,2 mm nötig ist.

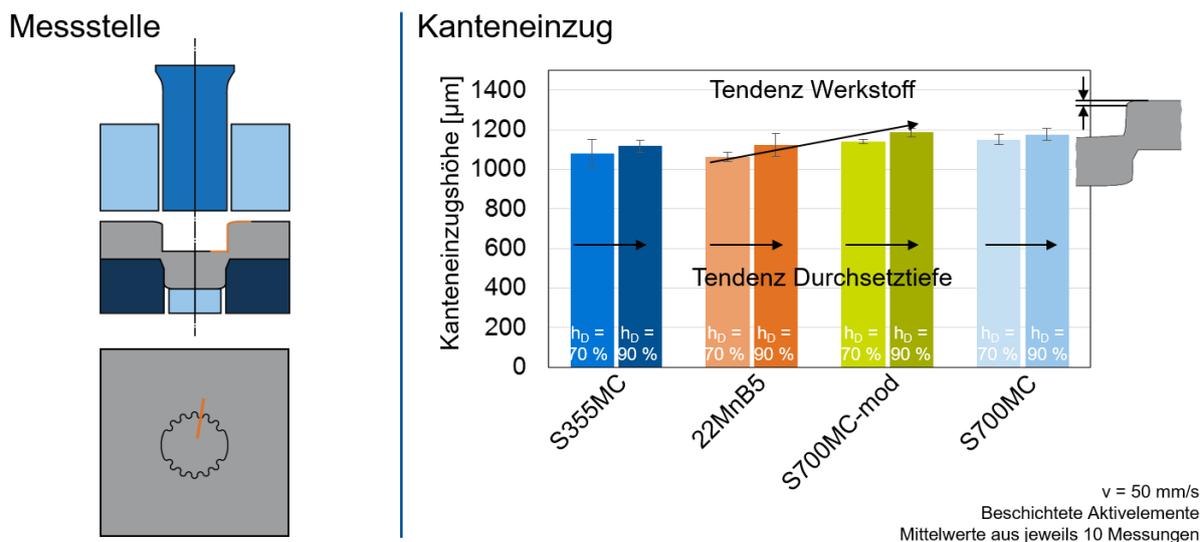


Abbildung 8-17: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Ritzelgeometrie am konkaven Formelement mit einem Radius von 1 mm.

Figure 8-17: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the pinion geometry at the concave geometrical element with a radius of 1 mm.

In Abbildung 8-18 sind die Kanteneinzugshöhen der konvexen Rundung mit einem Radius von 1 mm zu sehen. Hier können ähnliche Effekte wie bei der Ecke der Quadratgeometrie beobachtet werden. Bauteile aus S700MC und S700MC-mod weisen wieder nahezu keinen Kanteneinzug auf während dieser bei den beiden anderen Werkstoffen deutlicher ausgeprägt ist.

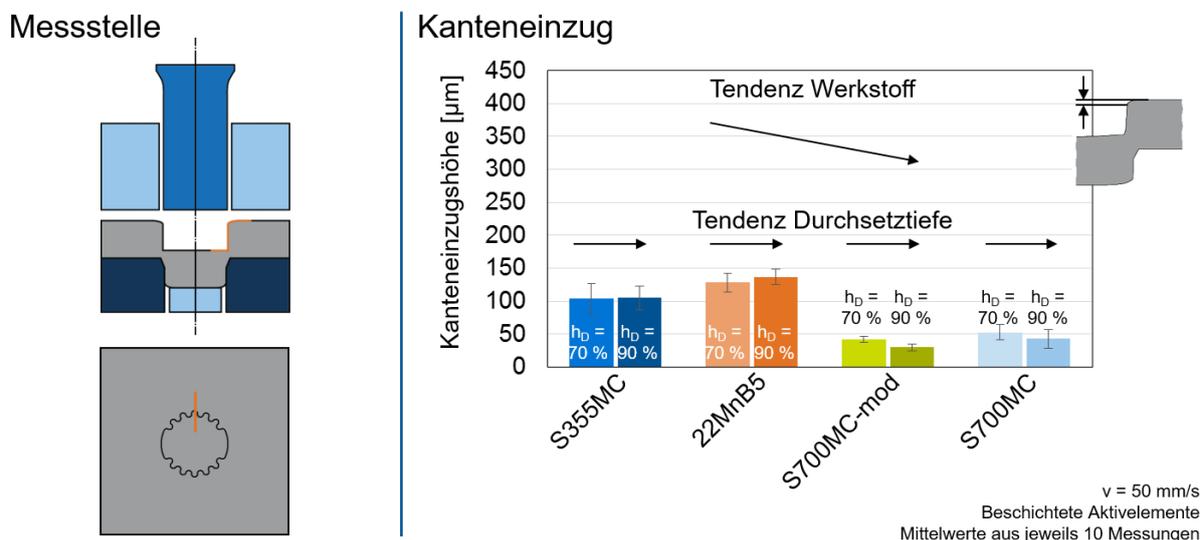


Abbildung 8-18: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Kanteneinzugshöhen für die Ritzelgeometrie am konvexen Formelement mit einem Radius von 1 mm.

Figure 8-18: Material and embossing depth dependency of the die-roll heights for the pinion geometry at the convex geometrical element with a radius of 1 mm.

8.1.1.8 Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf die Kanteneinziehungshöhe Influence of the punch velocity on the die-roll height

Um den Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf die Kanteneinziehungshöhe identifizieren zu können, wurde die auf Nennwerte von 10 und 50 mm/s an der Presse eingestellt. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 8-19 für die Kreisgeometrie mit einem Radius von 15 mm illustriert. Weiterhin wurden beschichtete Aktivelemente und eine Durchsetztiefe von 90 % festgelegt.

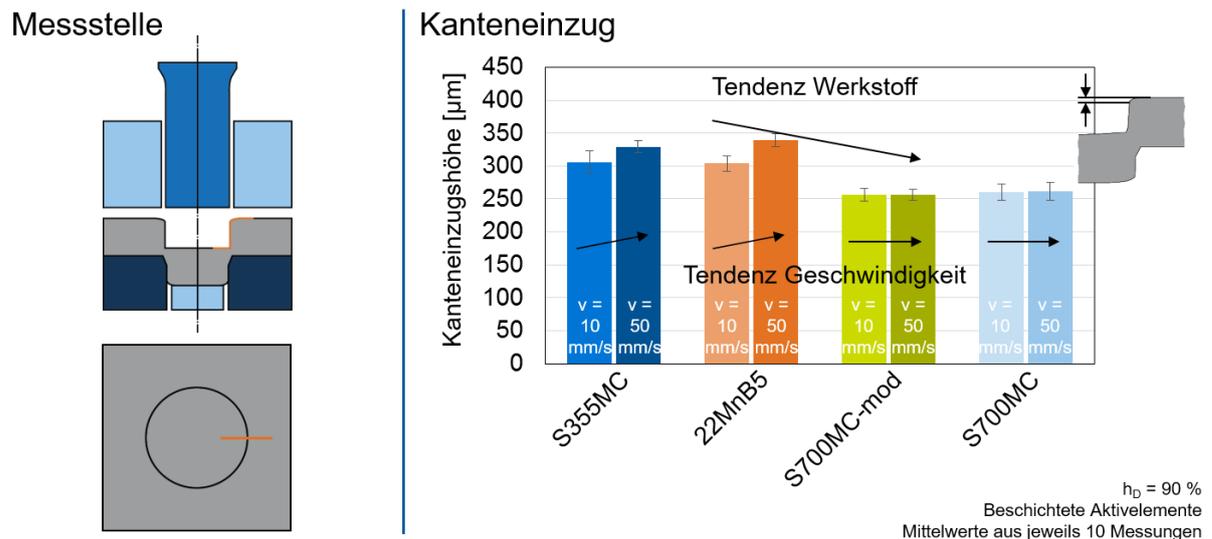


Abbildung 8-19: Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf die Kanteneinziehungshöhe für eine Durchsetztiefe von 90 % an der großen Kreisgeometrie.

Figure 8-19: Influence of the punch velocity on the die-roll height of the big circle geometry for an embossing depth of 90 %.

Bei den Werkstoffen S355MC und 22MnB5 kann eine leichte Zunahme der Kanteneinziehungshöhe beobachtet werden. Der Unterschied beträgt hierbei circa 35 µm. Für die beiden hochfesten Güten ist der Unterschied vernachlässigbar gering.

8.1.1.9 Einfluss der Beschichtung Influence of the coating

In der industriellen Praxis werden Aktivelemente in der Regel beschichtet um den Verschleiß zu reduzieren. Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen wurden daher die Kanteneinziehungshöhen von unbeschichteten und beschichteten Werkzeugaktivelementen miteinander verglichen. Für eine Durchsetztiefe von 90 % und einer Stößelgeschwindigkeit von 10 mm/s ist dies für die kleine Kreisgeometrie in Abbildung 8-20 dargestellt. Der Unterschied zwischen den beschichteten und unbeschichteten Aktivelementen ist, verglichen mit der Standardabweichung, vernachlässigbar gering.

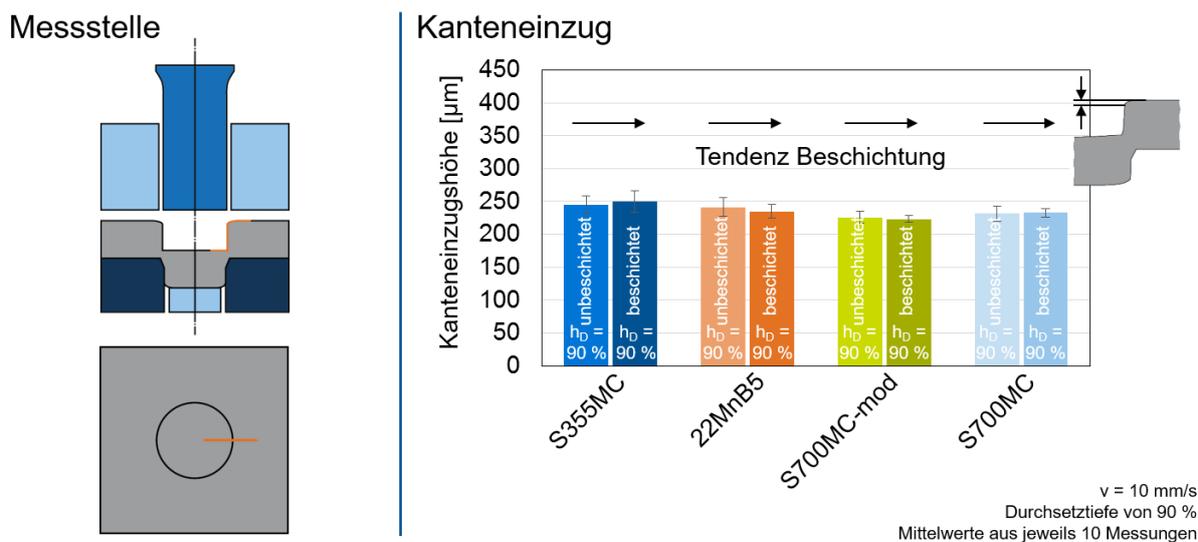


Abbildung 8-20: Einfluss der Aktivelementbeschichtung auf die Kanteneinzugshöhe für eine Durchsetztiefe von 90 % an der kleinen Kreisgeometrie.

Figure 8-20: Influence of the active element coating on the die-roll height of the small circle geometry for an embossing depth of 90 %.

Anders verhält es sich bei den Ergebnissen für die große Kreisgeometrie, welche in Abbildung 8-21 zu sehen sind.

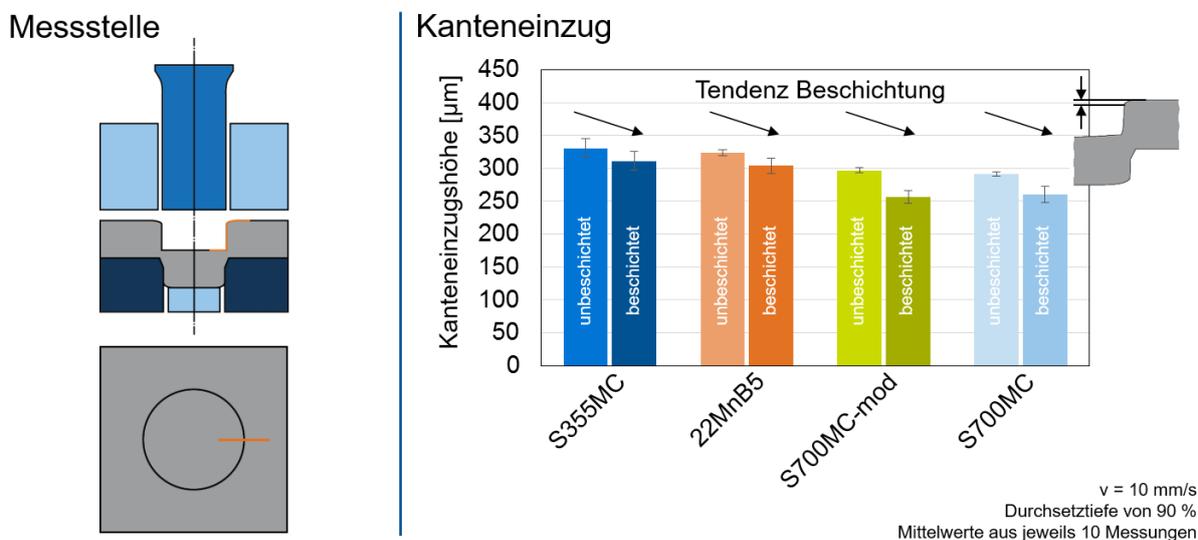


Abbildung 8-21: Einfluss der Aktivelementbeschichtung auf die Kanteneinzugshöhe für eine Durchsetztiefe von 90 % an der großen Kreisgeometrie.

Figure 8-21: Influence of the active element coating on the die-roll height of the big circle geometry for an embossing depth of 90 %.

Hier kann eine deutliche Abnahme der Kanteneinzugshöhe durch die Beschichtung, insbesondere bei den hochfesten Werkstoffen, festgestellt werden.

8.1.2 Einfluss von Werkstoff und Durchsetzliniengeometrie und auf den Durchsetzflächenwinkel Influence of material and embossing line on the angle of the embossed surface

Da die Unterschiede des Durchsetzflächenwinkels vergleichsweise gering sind im Vergleich zu den Änderungen der Kanteneinzugshöhe, werden im Folgenden nur die Material- und Geometrieabhängigkeit diskutiert.

8.1.2.1 Werkstoffabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels Influence of the material on the die-roll height

Die Werkstoffabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels kann gut anhand der kleinen und großen Kreisgeometrie beurteilt werden. Für die Geometrie mit einem Radius von 7,5 mm kann für eine Durchsetztiefe von 70 % zwischen dem größten und dem kleinsten Wert eine Differenz von nur 0,3° beobachtet werden. Dies ist in Abbildung 8-22 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Blechwerkstoffen sind somit gering. Dies ist für $h_D = 90\%$ sogar noch schwächer ausgeprägt. Tendenziell weisen die beiden hochfesten Werkstoffe S700MC und S700MC-mod jedoch einen etwas geringeren Durchsetzflächenwinkel auf als S355MC und 22MnB5. Generell bewirkt eine größere Durchsetztiefe einen etwas geringeren Durchsetzflächenwinkel.

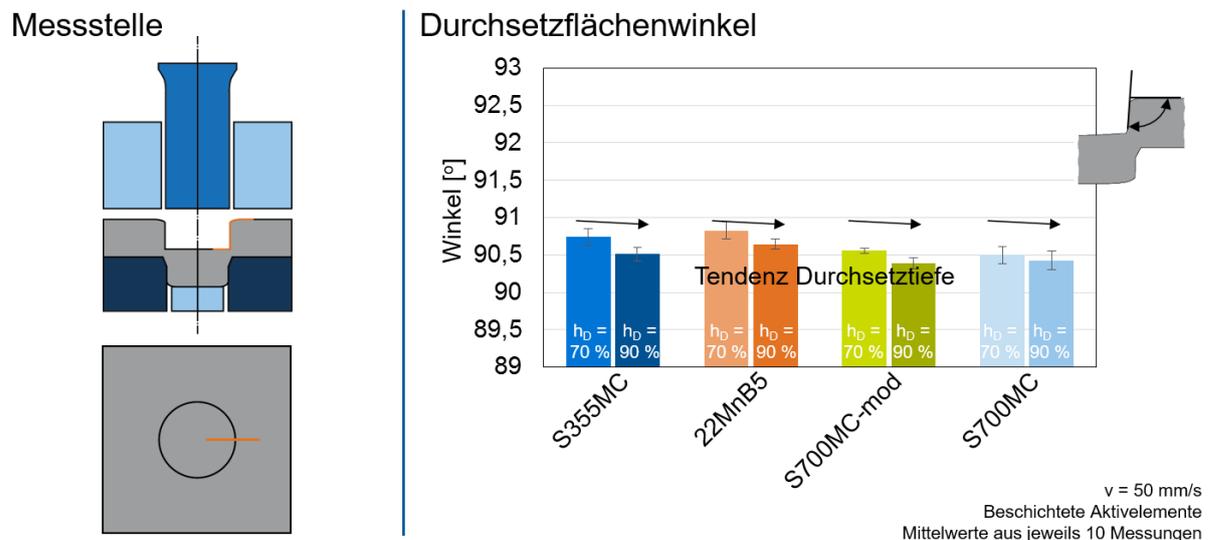


Abbildung 8-22: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Durchsetzflächenwinkel für die kleine Kreisgeometrie ($r = 7,5 \text{ mm}$).

Figure 8-22: Material and embossing depth dependency of the angles of the embossed surface for the small circle geometry ($r = 7,5 \text{ mm}$).

Der Einfluss des Blechwerkstoffes auf den Winkel ist bei der großen Kreisgeometrie sogar noch schwächer ausgeprägt. Die Ergebnisse hierfür sind in Abbildung 8-23 zu finden. Besonders in Relation zur Standardabweichung befinden sich die Werte auf nahezu einem Niveau. Eine höhere Durchsetztiefe bewirkt auch hier wieder einen etwas geringeren Durchsetzflächenwinkel.

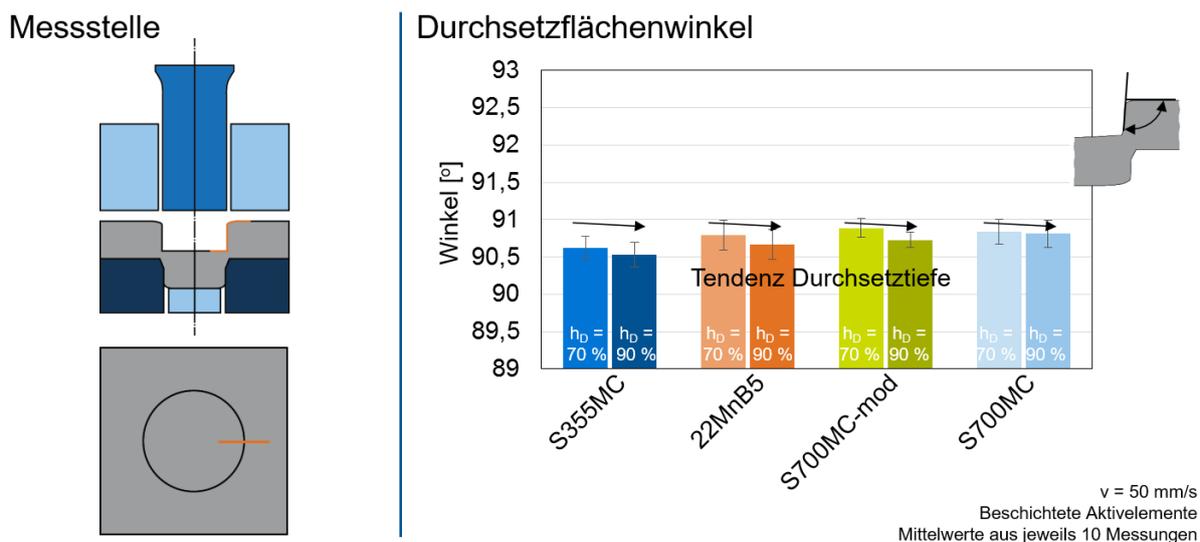


Abbildung 8-23: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Durchsetzflächenwinkel für die große Kreisgeometrie ($r = 15 \text{ mm}$).

Figure 8-23: Material and embossing depth dependency of the angles of the embossed surface for the big circle geometry ($r = 15 \text{ mm}$).

Eine ausgeprägtere Werkstoffabhängigkeit kann bei der Kettengliedgeometrie an der konkaven Messstelle beobachtet werden. Die Unterschiede hierfür sind in Abbildung 8-24 dargestellt.

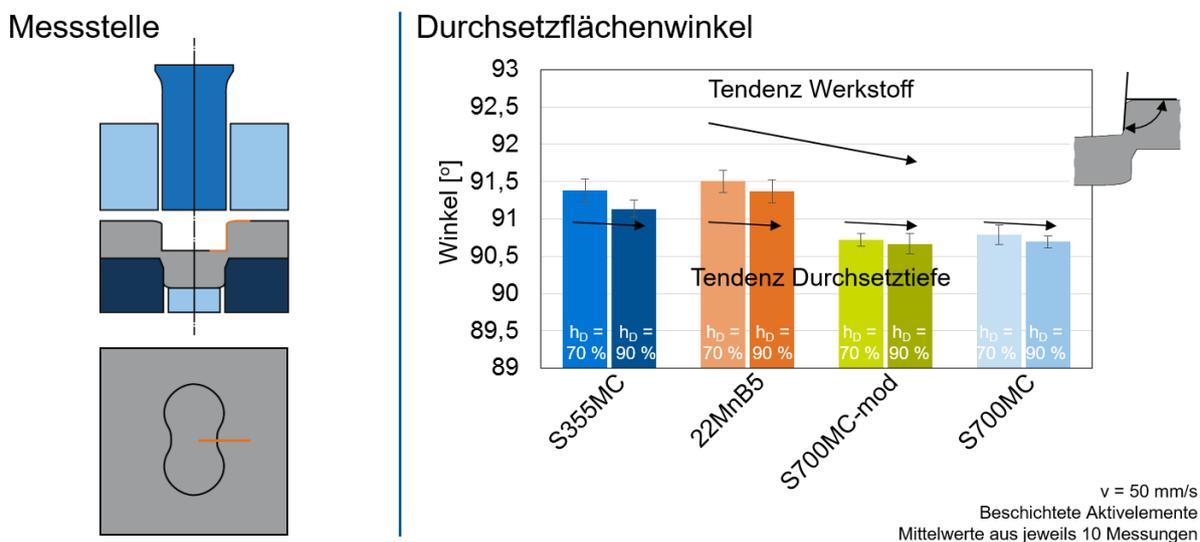


Abbildung 8-24: Werkstoff- und Durchsetztiefenabhängigkeit der Durchsetzflächenwinkel der konkaven Messstelle der Kettengliedgeometrie.

Figure 8-24: Material and embossing depth dependency of the angles of the embossed surface on the concave measuring position of the chain link geometry.

Hier weisen die hochfesten Werkstoffe einen etwas niedrigeren Durchsetzflächenwinkel im Vergleich zu S355MC und 22MnB5 auf. Der Unterschied ist mit maximal $0,7^\circ$ jedoch wieder gering.

8.1.2.2 Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels Influence of the geometry on the angle of the embossed surface

Die Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für die verschiedenen Werkstoffe wird folgend anhand von fünf Formelementen verglichen. Für S355MC ist dies in Abbildung 8-25, und für 22MnB5 in Abbildung 8-26 zu finden.

Messstelle

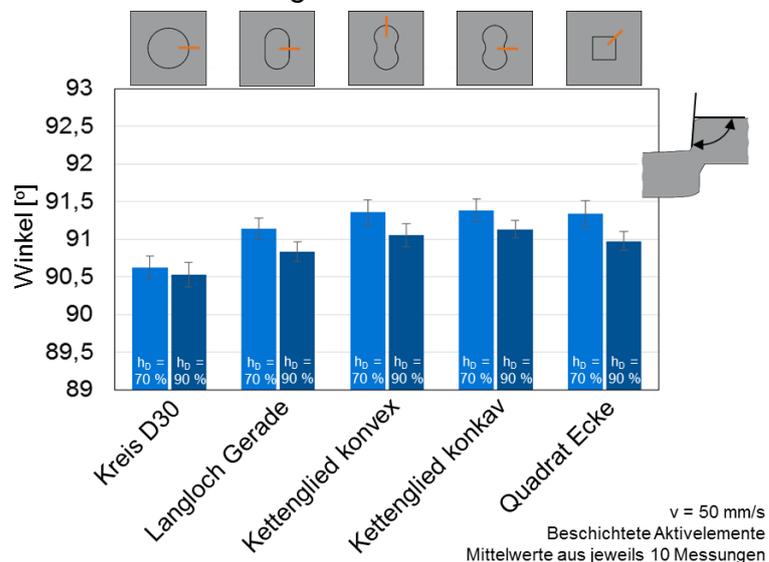
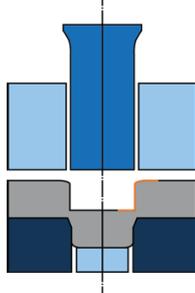


Abbildung 8-25: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff S355MC.

Figure 8-25: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material S355MC.

Messstelle

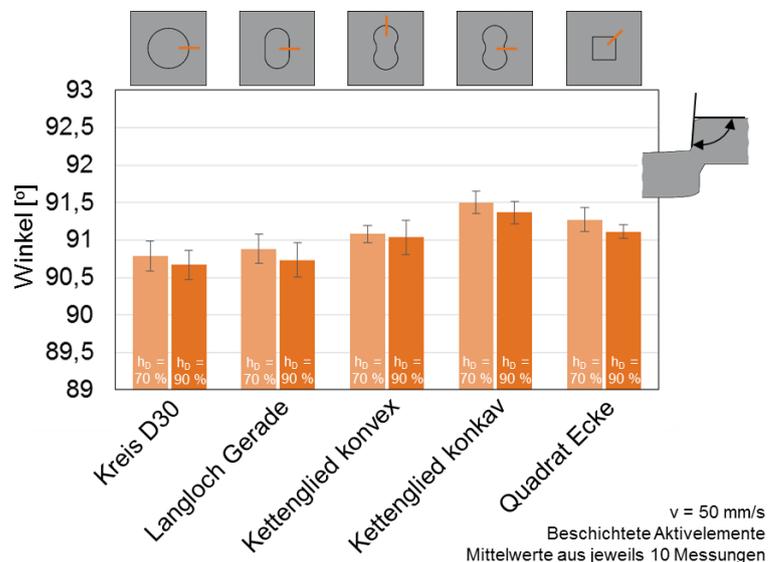
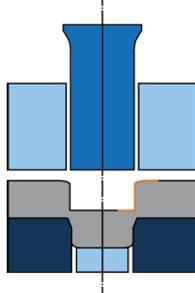


Abbildung 8-26: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff 22MnB5.

Figure 8-26: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material 22MnB5.

Bei beiden Werkstoffen ist der Durchsetzflächenwinkel für die große Kreisgeometrie und das gerade Formelement der Langlochgeometrie am geringsten. Ein Anstieg lässt sich für die Radien mit 7,5 mm beobachten, welche sich auf einem ähnlichen Niveau befinden wie der Winkel der Ecke des Quadrats. Der Wertebereich umfasst dabei mit 90,5° bis 91,5° einen Bereich von nur einem Grad.

Die Ergebnisse für die hochfesten Werkstoffe sind in Abbildung 8-27 und Abbildung 8-28 zu finden.

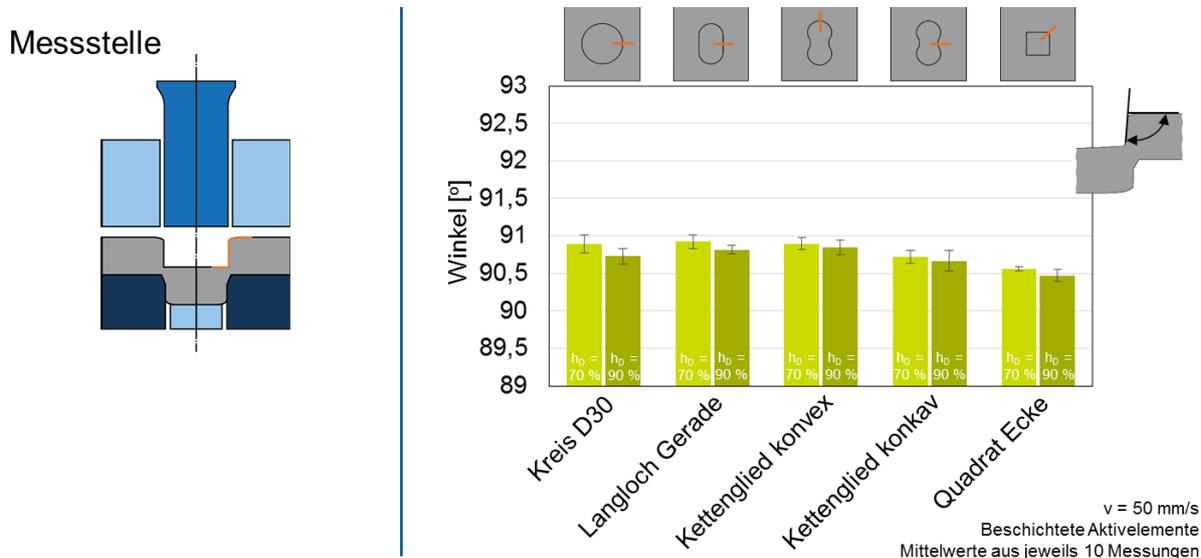


Abbildung 8-27: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff S700MC-mod.

Figure 8-27: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material S700MC-mod.

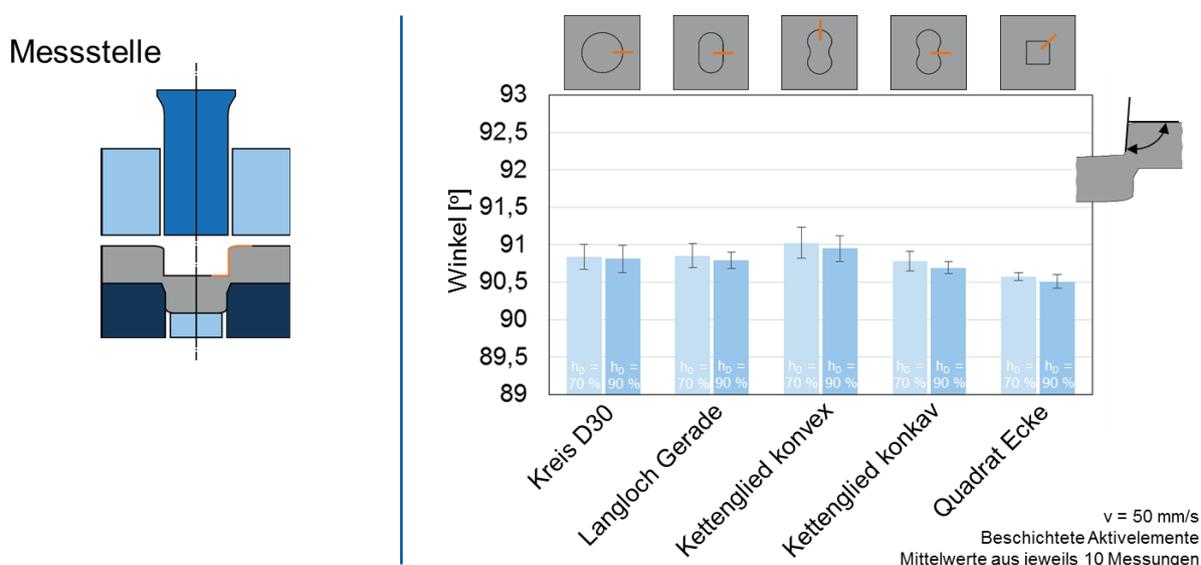


Abbildung 8-28: Geometrieabhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels für den Blechwerkstoff S700MC.

Figure 8-28: Geometry dependency of the angles of the embossed surface of the sheet metal material S700MC.

Die Winkel reichen hier von $90,5^\circ$ bis 91° und schwanken somit bedeutend weniger als bei S355MC und 22MnB5. Eine ausgeprägte Geometrieabhängigkeit ist hier nicht zu erkennen. Lediglich der Durchsetzflächenwinkel des Radius der Quadratgeometrie liegt etwas unterhalb dem Mittel.

8.1.3 Fazit der experimentellen Untersuchungen der Durchsetzflächenkenngrößen

Conclusion of the experimental investigation of the embossed surface characterisitc values

Auf Basis der Untersuchung ergeben sich folgend aufgeführte Schlussfolgerungen:

Die Durchsetztiefe beeinflusst die Kanteneinzugshöhe nur relativ gering. Dies ist damit zu begründen, dass der Kanteinzug bereits in der frühen Phase des Durchsetzprozesses gebildet wird und sich anschließend nur noch minimal ändert. Der Durchsetzflächenwinkel hingegen verkleinert sich mit zunehmender Durchsetztiefe durch den gleichbleibenden Kanteinzug als obere Begrenzung und die weiter ausgeformte Funktionsfläche.

Die Durchsetzliniengeometrie hat einen signifikanten Einfluss auf die Kanteneinzugshöhe. Wie vom Scher- oder Feinschneiden bekannt bewirkt ein kleinerer Durchsetzlinienradius an konvexen Messstellen einen niedrigeren Kanteinzug. Bei konkaven Messstellen hingegen steigt der Kanteinzug mit kleiner werdendem Radius. Weiterhin haben ähnliche Formelemente ähnliche Kanteneinzugshöhen zur Folge. Eine leichte Abhängigkeit des Durchsetzflächenwinkels von der Geometrie kann beobachtet werden. Die Schwankung bewegt sich jedoch in einem sehr kleinen Bereich.

Ähnlich verhält es sich mit dem Einfluss des Blechwerkstoffes auf den Durchsetzflächenwinkel. Allerdings ist hier der Winkel der hochfesten Werkstoffe etwas näher an 90° . Die Kanteneinzugshöhe jedoch wird teilweise stark von der Wahl des Materials beeinflusst. An konvexen Messstellen verhindert eine niedrige Verfestigung das Nachfließen von Werkstoff und verringert den Kanteinzug dadurch. Dies ist bei S700MC und S700MC-mod zu beobachten. Der gleiche Effekt bewirkt an konkaven Messstellen ein vermehrtes Nachfließen des Werkstoffes und dadurch einen erhöhten Kanteinzug. Bei hoher Verfestigung, wie sie bei S355MC und 22MnB5 beobachtet wird, sind diese Effekte nicht so stark ausgeprägt.

Somit ist die Ausbildung des Kanteinzuges bei sonst gleichbleibenden Prozessparametern sowohl von der Durchsetzliniengeometrie als auch dem Blechwerkstoff abhängig.

Die Beschichtung der Aktivelemente ändert den Kanteinzug bei der kleinen Kreisgeometrie kaum während er bei der großen eine leichte Reduktion verursacht. Dies kann vermutlich auf die veränderte Reibungssituation zwischen Blech- und Aktivelementen zurückgeführt werden.

Bei der großen Kreisgeometrie bewirkt eine höhere Stößelgeschwindigkeit bei S355MC und 22MnB5 einen etwas größeren Kanteinzug, was durch eine veränderte Temperatur- und Dehnratenverteilung in der Scherzonen zurückzuführen ist. Bei S700MC und S700MC-mod kann jedoch nahezu keine Veränderung beobachtet werden.

8.2 Einfluss der Prozessparameter auf die wirkenden Kräfte Influence of the process parameters on the acting forces

8.2.1 Verlauf der Durchsetzkraft Course of the embossing force

Ein exemplarischer Verlauf der Durchsetzkraft über den Stempelweg ist in Abbildung 8-29 abgebildet. Hier sind die charakteristischen Phasen des Durchsetzens gut erkennbar. Nach einem starken Anstieg der durch die elastische Verformung von Werkzeug und Werkstück verursacht wird findet plastische Deformation statt. Durch die Fasen an Stempel und Matrize ist dieser Bereich nicht so glatt wie vom Feinschneiden her bekannt sondern durch unterschiedlich starke Anstiege und Abflachungen der Kurve gekennzeichnet. Ist die gewünschte Durchsetztiefe erreicht stoppt der Stößel und ändert seine Bewegungsrichtung. Die dabei maximal wirkende Rückzugskraft, verursacht durch Reibung zwischen Aktivelementen und Werkstück, findet sich dementsprechend nahe dem unteren Totpunkt.

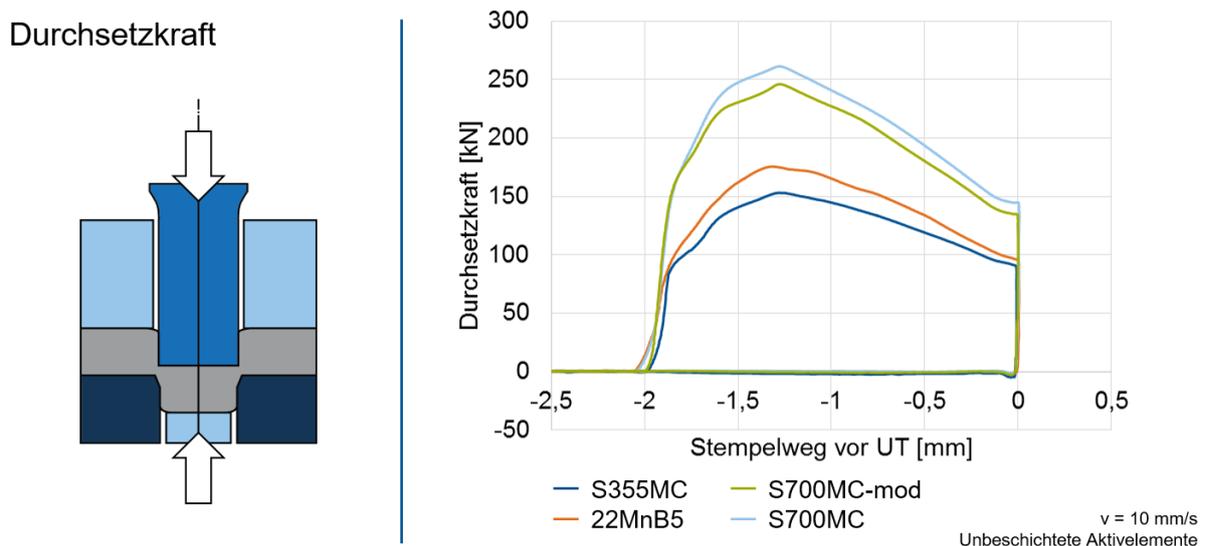


Abbildung 8-29: Exemplarischer Verlauf der Durchsetzkraft über den Stößelweg für die vier Blechwerkstoffe.

Figure 8-29: Exemplary course of the embossing force plotted against the punch travel for the four sheet metal materials.

8.2.2 Einfluss der Durchsetzliniengeometrie Influence of the embossing line geometry

Der Einfluss der Durchsetzliniengeometrie auf die Durchsetzkraft wird im Folgenden diskutiert. Um eine geometrieunabhängige Vergleichsgröße zu bekommen wird die bezogene Durchsetzkraft, also die Durchsetzkraft durch die stempelseitige Durchsetzlinienlänge, herangezogen.

8.2.2.1 Kreisgeometrie mit Radius 7,5 mm Circle geometry with a radius of 7,5 mm

Zunächst wird die maximale bezogene Durchsetzkraft der kleinen Kreisgeometrie mit einem Radius von 7,5 mm betrachtet. Die Ergebnisse für diese sind in Abbildung 8-30 dargestellt.

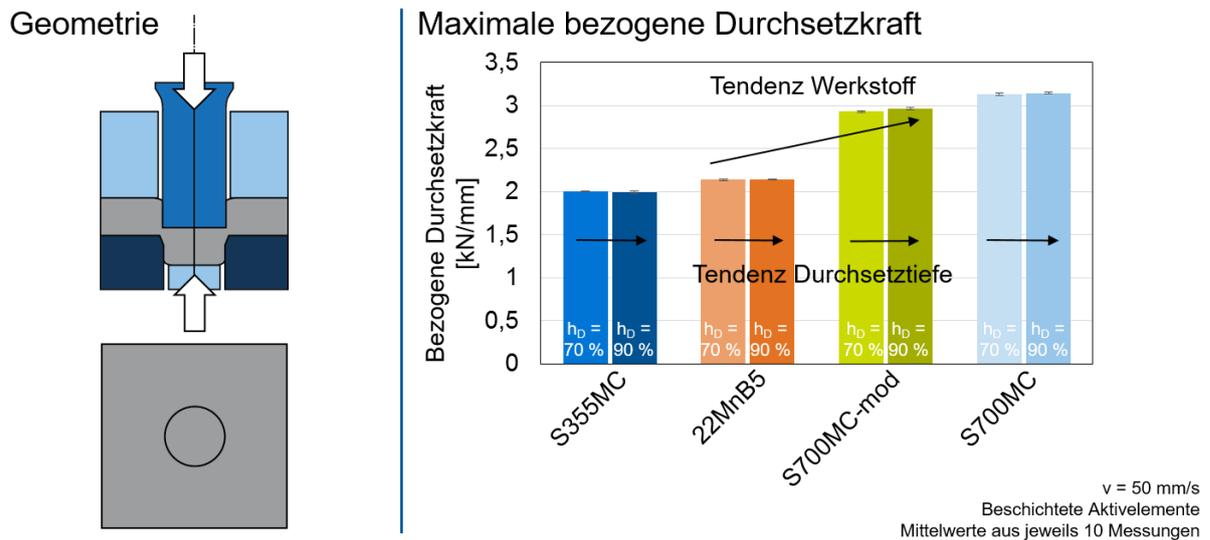


Abbildung 8-30: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft der kleinen Kreisgeometrie.

Figure 8-30: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the small circle geometry.

Die Beobachtungen für diese Durchsetzliniengeometrie lassen sich bei den anderen Geometrien in nahezu gleicher Form anstellen. So ist der Einfluss der Durchsetztiefe auf die maximale bezogene Durchsetzkraft vernachlässigbar gering, was mit dem vergleichsweise frühen Kraftmaximum bei circa $h_D \sim 30\%$ im Vergleich zu den hohen untersuchten Durchsetztiefen zu begründen ist. Wie schon bei den Kanteneinzugshöhen finden sich auch hier wieder zwei Messwertniveaus. Auf dem niedrigeren bewegen sich S355MC und 22MnB5, wobei 22MnB5 leicht über ersterem liegt. Auf dem zweiten befinden sich S700MC-mod und etwas darüber S700MC.

8.2.2.2 Kreisgeometrie mit Radius 15 mm Circle geometry with a radius of 15 mm

Die maximalen bezogenen Durchsetzkraft der großen Kreisgeometrie sind in Abbildung 8-31 zu finden.

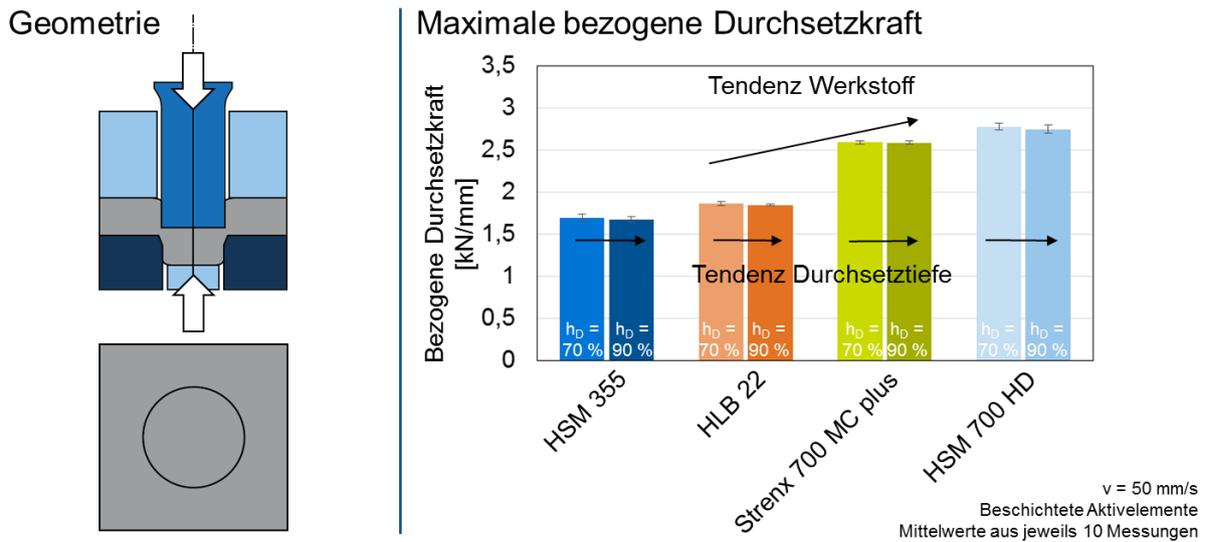


Abbildung 8-31: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft der großen Kreisgeometrie.

Figure 8-31: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the big circle geometry.

Hier finden sich die beiden Festigkeitsklassen der verwendeten Werkstoffe wieder, wobei die Werte der jeweiligen Werkstoffe etwas unter denen der großen Kreisgeometrie liegen. S355MC und 22MnB5 weisen wieder ein ähnliches Niveau auf, während S700MC und S700MC-mod bedeutend darüber liegen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Durchsetztiefe nahezu keinen Einfluss auf das Kraftmaximum hat.

8.2.2.3 Kettengliedgeometrie Chain link geometry

Die gleichen Beobachtungen können für die Kettengliedgeometrie in Abbildung 8-32 gemacht werden. Wieder sind die unterschiedlich hohen Zugfestigkeiten und der geringe Durchsetztiefeneinflusses zu erkennen.

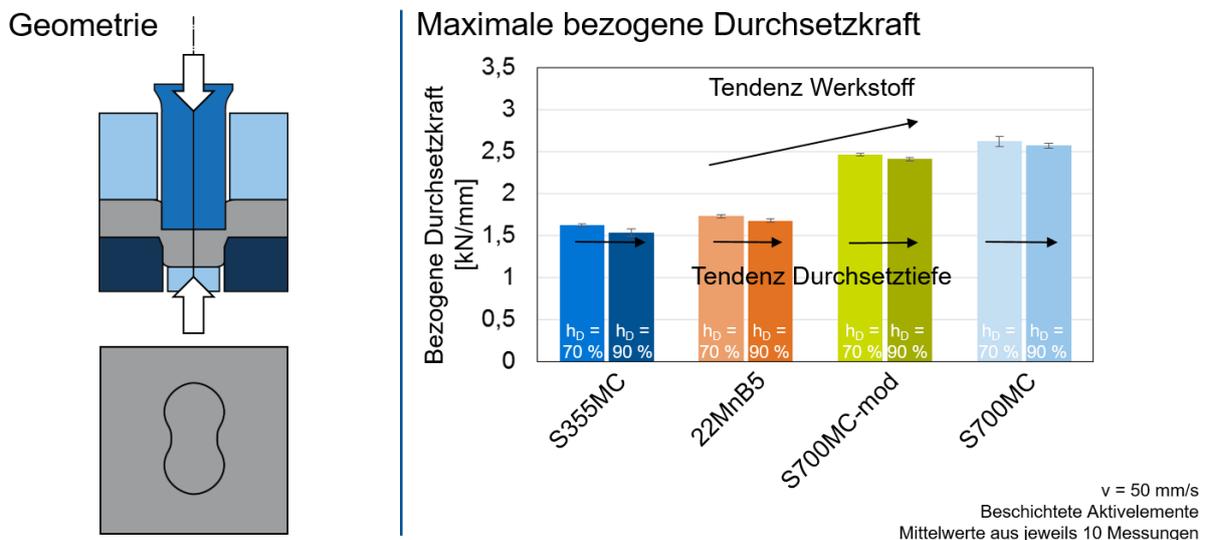


Abbildung 8-32: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Kettengliedgeometrie.

Figure 8-32: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the chain link geometry.

8.2.2.4 Langlochgeometrie Slot geometry

Die gleichen Beobachtungen wie bei den vorherigen Geometrien können auch wieder für die Langlochgeometrie gemacht werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8-33 zu finden.

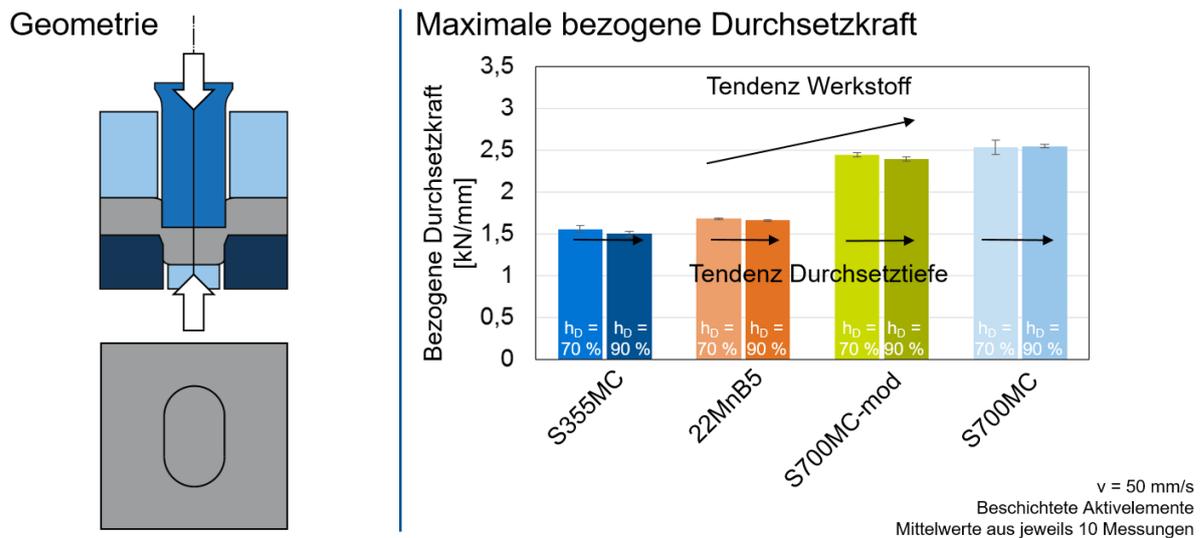


Abbildung 8-33: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Langlochgeometrie.

Figure 8-33: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the slot geometry.

8.2.2.5 Quadratgeometrie Square geometry

Gleiches gilt für die Quadratgeometrie. Dies ist in Abbildung 8-34 dargestellt.

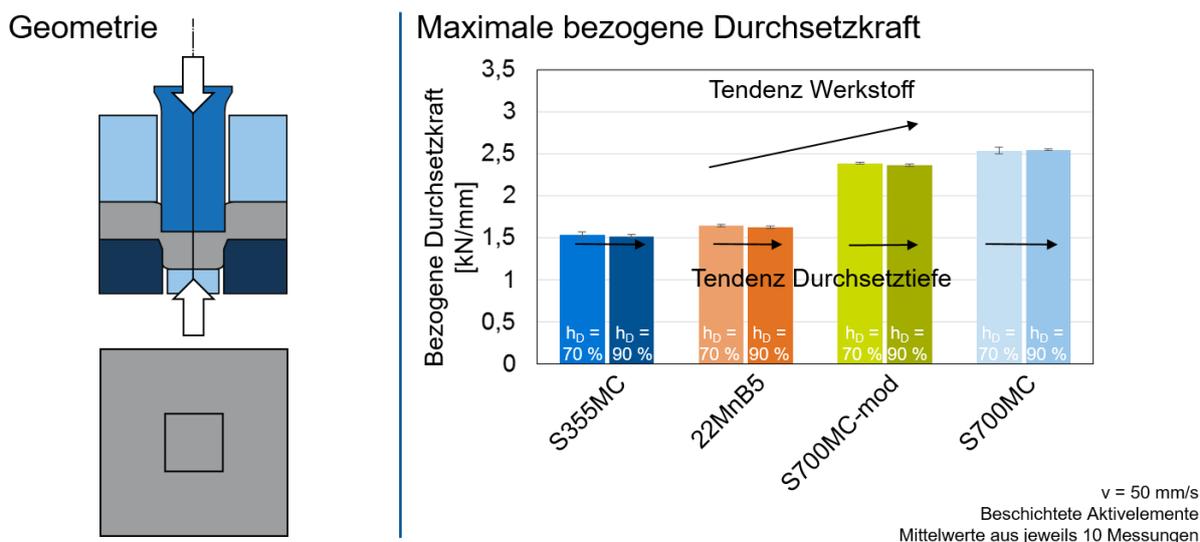


Abbildung 8-34: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Quadratgeometrie.

Figure 8-34: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the square geometry.

8.2.2.6 Ritzelgeometrie Pinion geometry

Auch bei den maximalen bezogenen Durchsetzkraften kann eine ausgeprägte Werkstoffabhängigkeit beobachtet werden. Das Niveau liegt dabei etwas höher als bei den meisten vorherigen Geometrien. Dies ist in Abbildung 8-35 abgebildet.

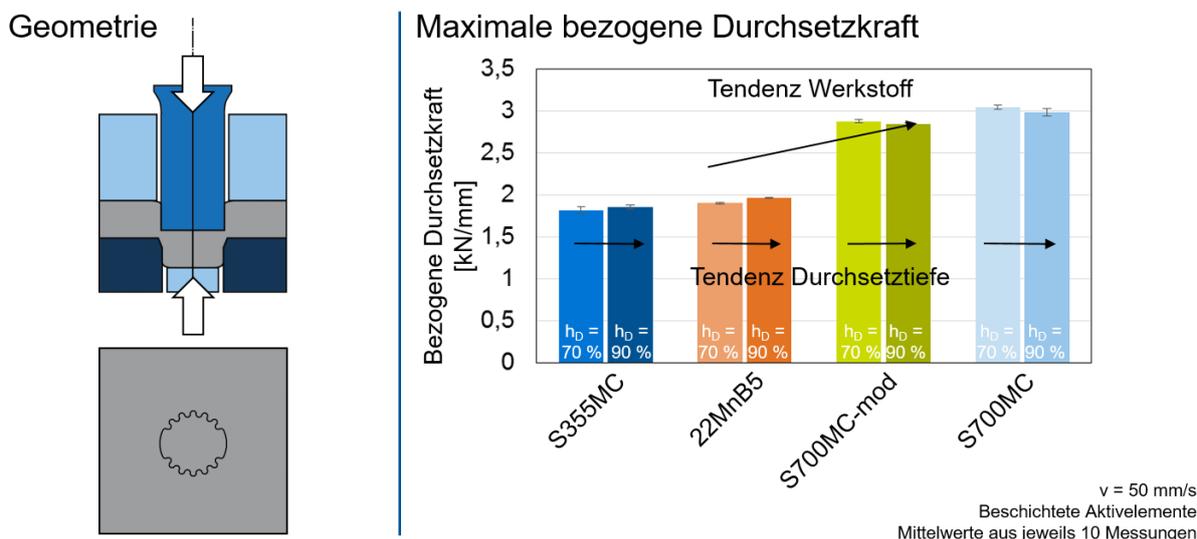


Abbildung 8-35: Werkstoffabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für die Ritzelgeometrie.

Figure 8-35: Material dependency of the maximum of the specific embossing force of the pinion geometry.

8.2.2.7 Gegenüberstellung der Formelemente Comparison of the geometrical elements

Die Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft wird anhand von fünf Geometrien exemplarisch untersucht. Für die beiden Werkstoffe S355MC und 22MnB5 können ähnliche Beobachtungen gemacht werden. Dies ist in Abbildung 8-36 und Abbildung 8-37 zu finden.

S355MC

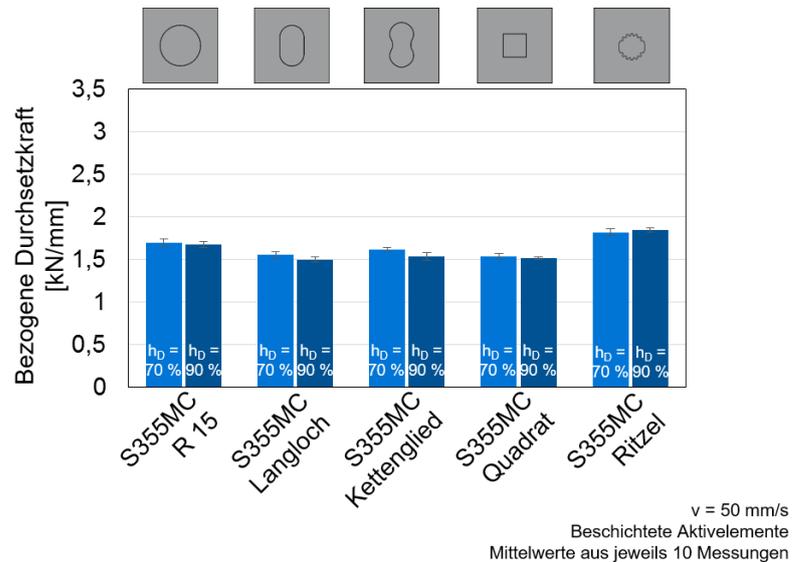
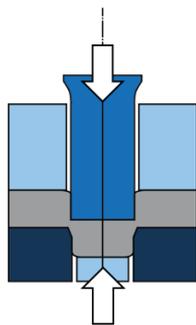


Abbildung 8-36: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff S355MC.

Figure 8-36: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force for the sheet metal material S355MC.

22MnB5

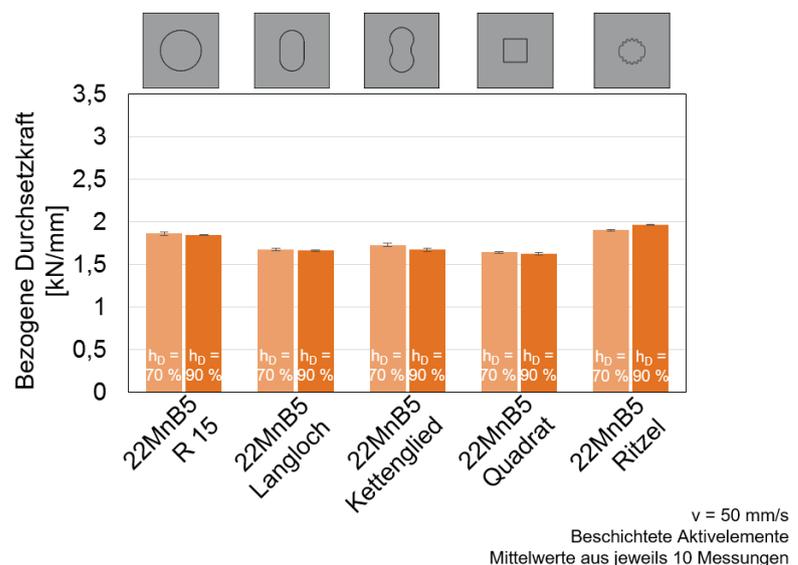
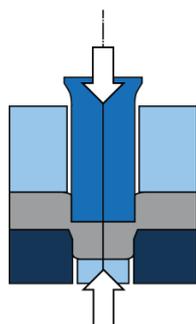


Abbildung 8-37: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff 22MnB5.

Figure 8-37: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force for the sheet metal material 22MnB5.

Die größten Kräfte werden jeweils für die Ritzelgeometrie mit ihren vielen engen Radien beobachtet. Dies stimmt gut mit anderen Veröffentlichungen überein, in denen eine

Zunahme der Kraft für kleine Radien beschrieben wurde [Sch07]. Erstaunlich sind jedoch die hohen bezogenen Kräfte die für die Kreisgeometrien nötig sind. Bei der Quadratgeometrie hingegen überwiegen die geraden Formelemente den Einfluss des scharfen Radius, wodurch hier eine vergleichsweise niedrige Kraft beobachtet wird.

Die maximale Differenz der fünf in den Abbildungen gegenübergestellten Geometrien beträgt für S355MC 0,35 kN/mm und für 22MnB5 0,34 kN/mm.

Ein ähnliche Abhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft von der Geometrie, jedoch auf einem höheren Kraftniveau, findet sich bei S700MC-mod und S700MC: Die jeweiligen Ergebnisse sind in Abbildung 8-38 und Abbildung 8-39 dargestellt. Bei beiden Werkstoffen weist die Kreisgeometrie einen vergleichsweise hohen Kraftbedarf auf, der nur noch von dem der Verzahnung übertroffen wird. Bei den anderen drei Geometrien können annähernd gleiche Werte beobachtet werden.

S700MC-mod

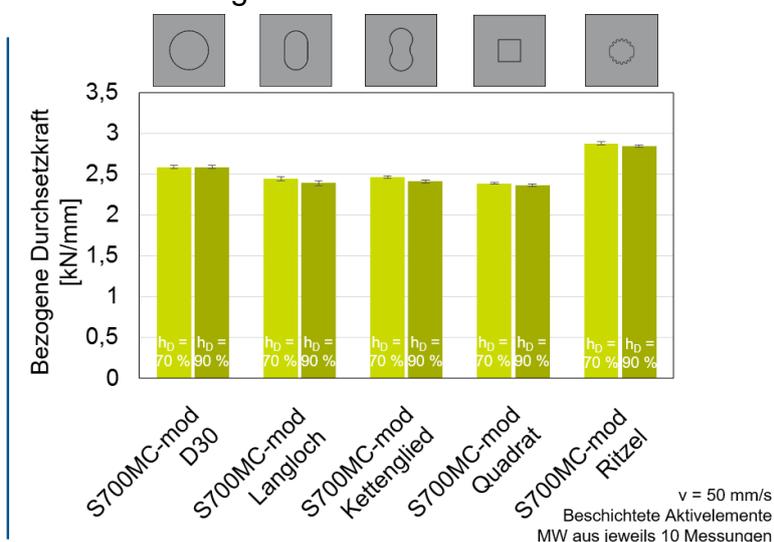
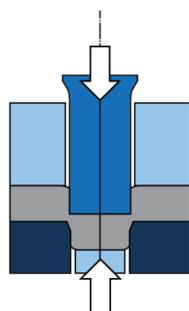


Abbildung 8-38: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff S700MC-mod.

Figure 8-38: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force the the sheet metal material S700MC-mod.

Für beide Werkstoffe wird eine maximale Differenz von 0,51 kN/mm. Diese Schwankung ist prozentual nahezu die gleiche wie bei S355MC und 22MnB5 mit einer Abweichung von $\pm 10\%$ vom Mittelwert der fünf abgebildeten Geometrien.

S700MC

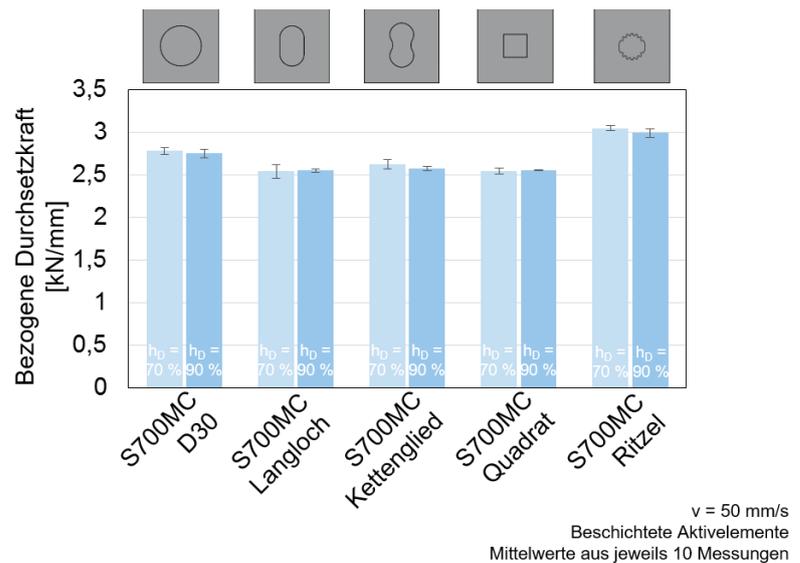
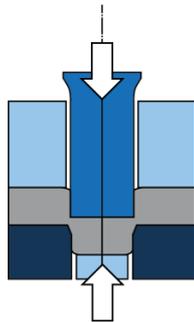


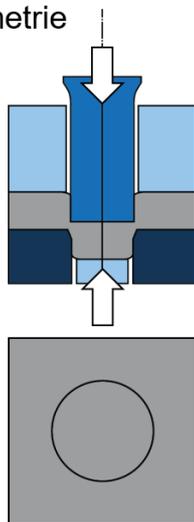
Abbildung 8-39: Geometrieabhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft für den Blechwerkstoff S700MC.

Figure 8-39: Geometry dependency of the maximum of the specific embossing force the the sheet metal material S700MC.

8.2.3 Einfluss der Stößelgeschwindigkeit Influence of the punch velocity

In Abbildung 8-40 ist der Einfluss der pressenseitig eingestellten Stößelgeschwindigkeit für die große Kreisgeometrie und eine Durchsetztiefe von 90 % abgebildet.

Geometrie



Maximale bezogene Durchsetzkraft

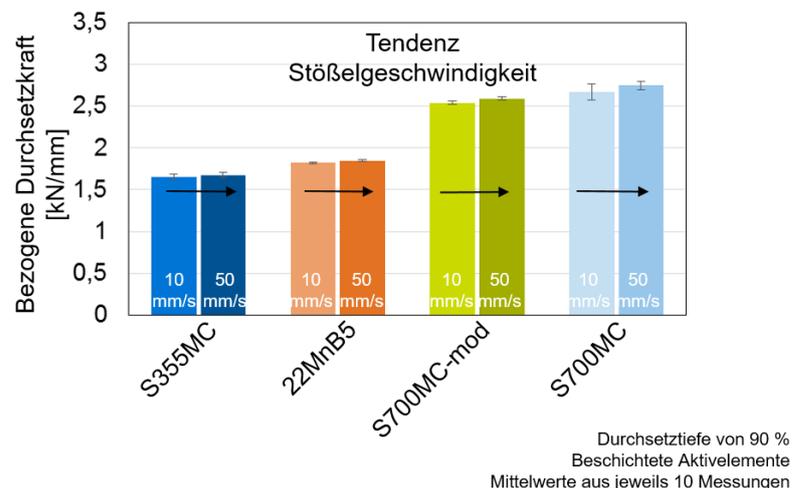


Abbildung 8-40: Einfluss der Stößelgeschwindigkeit auf die maximale bezogene Durchsetzkraft.

Figure 8-40: Influence of the punch velocity on the maximum of the specific embossing force.

Hier ist gut zu erkennen dass selbst eine Verfünfachung der Geschwindigkeit keine, im Vergleich zur Standardabweichung signifikante, Abweichung der Maximalkräfte zur Folge hat.

8.2.4 Einfluss der Beschichtung Influence of the coating

Ähnlich gering ist der Einfluss der Beschichtung auf die maximale bezogene Durchsetzkraft. Wie in Abbildung 8-41 dargestellt ist die Änderung vernachlässigbar.

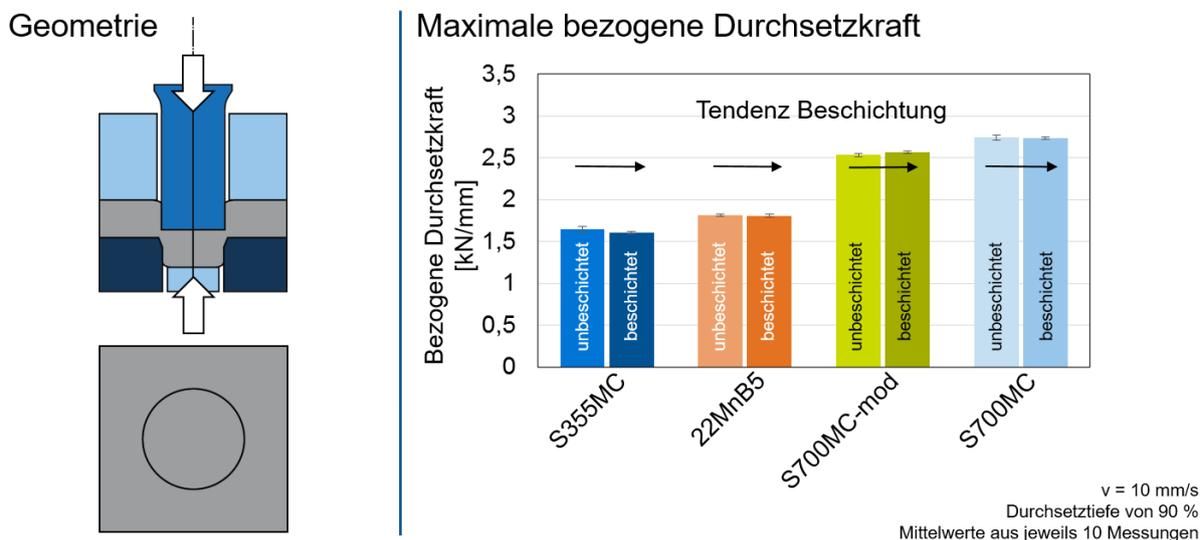


Abbildung 8-41: Einfluss der Aktivelementbeschichtung auf die maximale bezogene Durchsetzkraft.

Figure 8-41: Influence of the active element's coating on the maximum of the specific embossing force.

Anders verhält es sich bei der maximalen Rückzugskraft. Diese wird, beispielhaft an der großen Kreisgeometrie in Abbildung 8-42 demonstriert, teilweise deutlich reduziert.

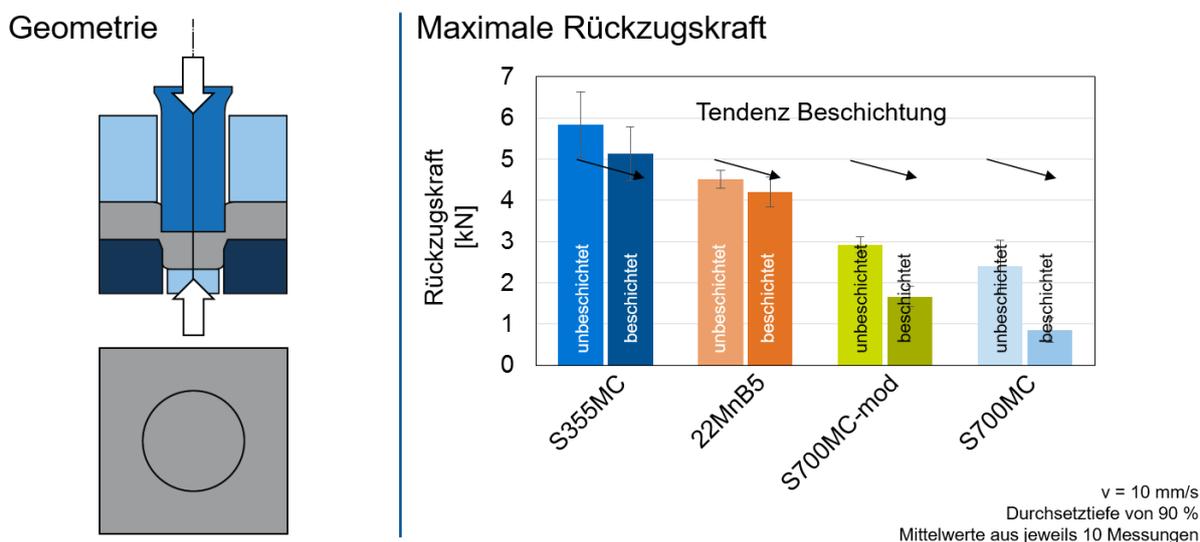


Abbildung 8-42: Einfluss der Beschichtung auf die maximale Rückzugskraft.

Figure 8-42 Influence of the active element's coating on the retraction force.

Während der Unterschied bei S355MC und 22MnB5 gering ist im Vergleich zur Standardabweichung, wird bei S700MC-mod und S700MC eine Verringerung von 40 % bzw. 60 % erzielt.

8.2.5 Fazit der experimentellen Untersuchungen der Prozesskräfte **Conclusion of the experimental investigation of the process forces**

Ähnlich wie bei den Kanteneinzugshöhen können wieder deutliche Unterschiede zwischen den Werkstoffen beobachtet werden. So ist die maximale bezogene Durchsetzkraft bei S700MC und S700MC-mod bedeutend höher als bei S355MC und 22MnB5. Die Durchsetztiefe hingegen hat keinen Einfluss auf die Maximalwerte. Dies ist damit zu begründen dass das Kraftmaximum im Vergleich zu den untersuchten Durchsetztiefen relativ früh im Prozess zu finden ist.

Es kann ein Einfluss der Durchsetzliniengeometrie auf die bezogene Durchsetzkraft beobachtet werden. Hier ist die Kraft für die Ritzelgeometrie mit ihren vielen engen Radien bedeutend höher als die der Kettenglied-, Langloch- oder Quadratgeometrie.

Weiterhin hat die Stößelgeschwindigkeit für die Nenngeschwindigkeiten von 10 mm/s und 50 mm/s keine messbare Auswirkung auf die Maximalkräfte.

Ebenso kann kein Unterschied in den maximalen bezogenen Durchsetzkräften zwischen beschichteten und unbeschichteten Aktivelementen registriert werden. Anders verhält es sich bei der Rückzugskraft. Diese wird, insbesondere bei den hochfesten Blechwerkstoffen, signifikant reduziert.

8.3 Einfluss der Prozessparameter auf die Machbarkeit **Influence of the process parameters on the feasibility**

Die Machbarkeit verschiedener Durchsetzgeometrien wurde mithilfe von Schliffbildern beurteilt. Dazu wurden Durchsetzbauteile der verschiedenen Geometrien an definierten Stellen getrennt und anschließend poliert um Risse erkennen zu können.

Hierbei wurden nur klassische Anrisse als Ausschusskriterium herangezogen.

8.3.1 Einfluss der Durchsetzliniengeometrie und Durchsetztiefe **Influence of the embossing line geometry**

8.3.1.1 Kreisgeometrie mit Radius 7,5 mm **Circle geometry with a radius of 7,5 mm**

Die Ergebnisse der Rissuntersuchungen für die kleine Kreisgeometrie mit einem Radius von 7,5 mm sind in Abbildung 8-43 zu sehen. Dabei können diverse Beobachtungen gemacht werden die sich auch bei den folgenden Trennstellen wiederfinden.

So sind die beiden Fasen gut zur erkennen, stempelseitig mit 0,3 mm und matrizenseitig 1 mm Höhe.

Weiterhin ist der extrem schmale Steg bei 90 % Durchsetztiefe bemerkenswert. Risse sind trotzdem bei allen Werkstoffen und Durchsetztiefen nicht zu erkennen.

Auffällig sind außerdem die Einfallstellen direkt nach dem Kanteneinzug auf der dem Stempel zugewandten Seite bei S355MC und 22MnB5. Bei S700MC-mod und S700MC sind diese nicht zu erkennen. Auch in [Vol13] wurde dieses Phänomen beschrieben.

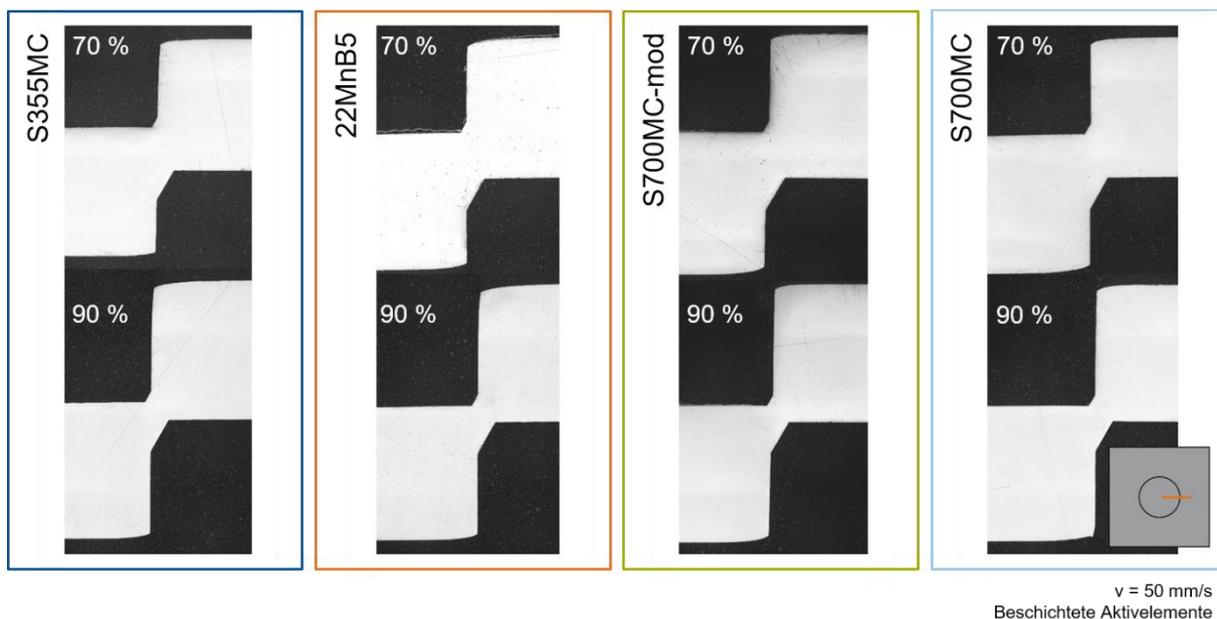


Abbildung 8-43: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der kleinen Kreisgeometrie ($R = 7,5 \text{ mm}$).

Figure 8-43: Microsections for different embossing depths of the small circle geometry ($R = 7,5 \text{ mm}$).

8.3.1.2 Kreisgeometrie mit Radius 15 mm Circle geometry with a radius of 15 mm

Die nahezu gleichen Beobachtungen können für die große Kreisgeometrie gemacht werden. Die zugehörigen Schliffbilder sind in Abbildung 8-44 dargestellt. Auch hier konnten für alle Werkstoffe und Durchsetztiefen keine Risse festgestellt werden.

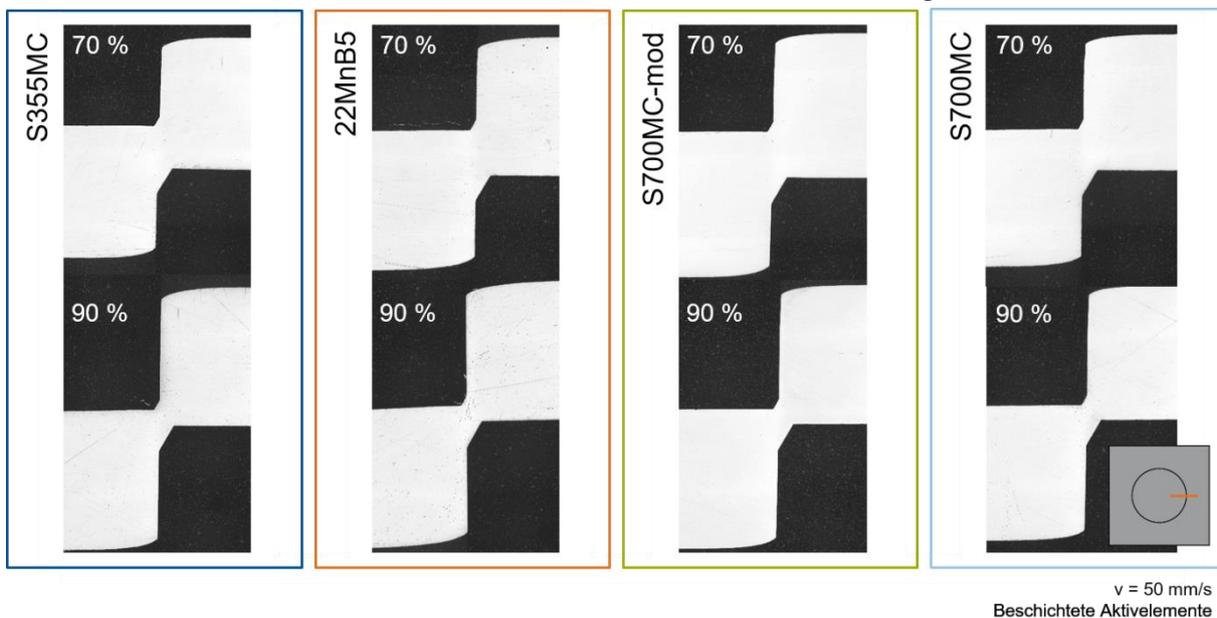


Abbildung 8-44: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der großen Kreisgeometrie ($r = 15 \text{ mm}$).

Figure 8-44: Microsections for different embossing depths of the big circle geometry ($r = 15 \text{ mm}$).

8.3.1.3 Kettengliedgeometrie Chain link geometry

Die konkaven Trennstellen der Kettengliedgeometrie sind in Abbildung 8-45 zu sehen.

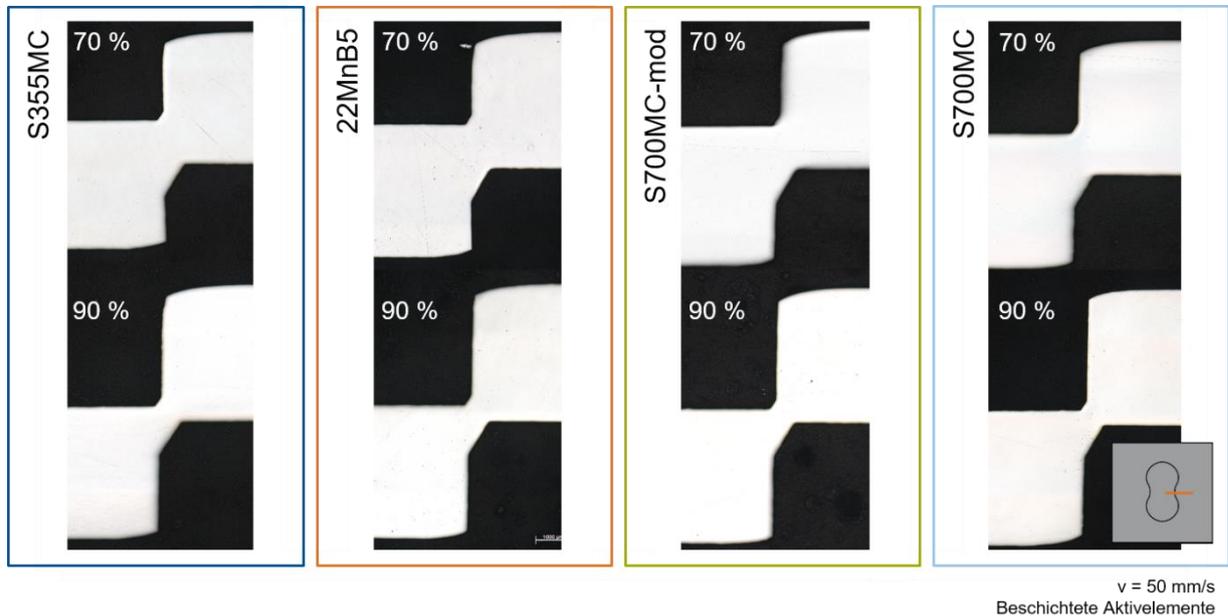


Abbildung 8-45: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Kettengliedgeometrie (konkave Trennstelle).

Figure 8-45: Microsections for different embossing depths of the chain link geometry (concave cutting position).

In Abbildung 8-46 sind die Schliffbilder der konvexen Trennposition zu finden.

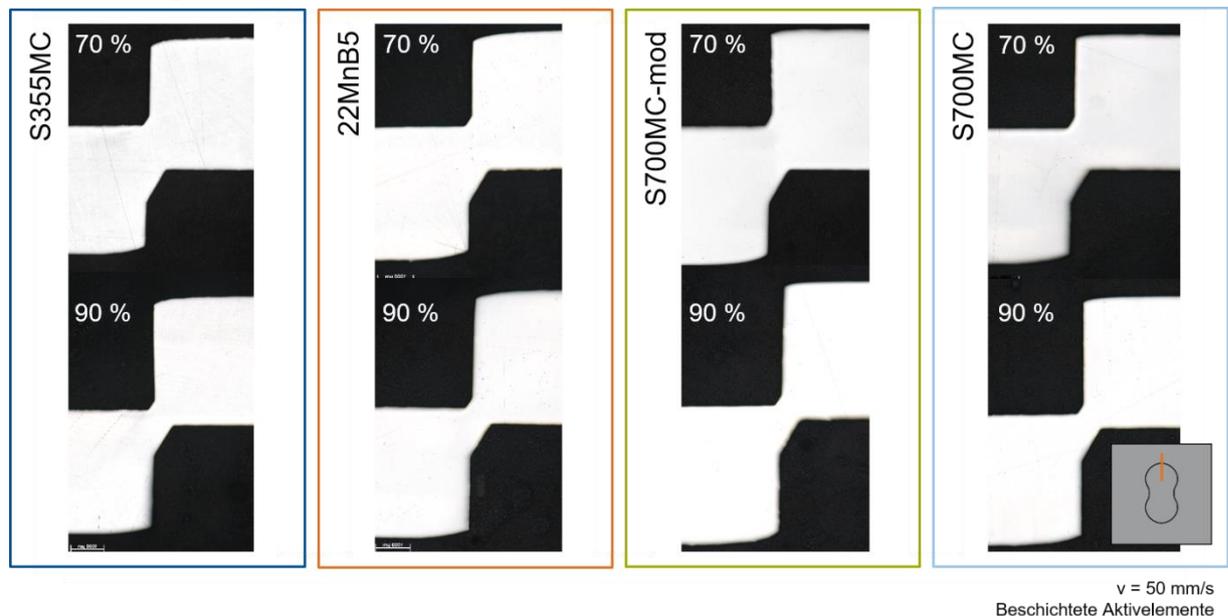


Abbildung 8-46: Schliffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Kettengliedgeometrie (konvexe Trennstelle).

Figure 8-46: Microsections for different embossing depths of the chain link geometry (convex cutting position).

Wieder sind keine Risse erkennbar. Gut zu sehen, insbesondere bei den hochfesten Werkstoffen S700MC und S700MC-mod, sind die stark unterschiedlichen stempelseitigen Kanteneinzugshöhen zwischen konvexer und konkaver Trennstelle.

8.3.1.4 Langlochgeometrie Slot geometry

Die Ergebnisse der Langlochgeometrie an der kritischeren geraden Stelle sind in Abbildung 8-47 dargestellt.

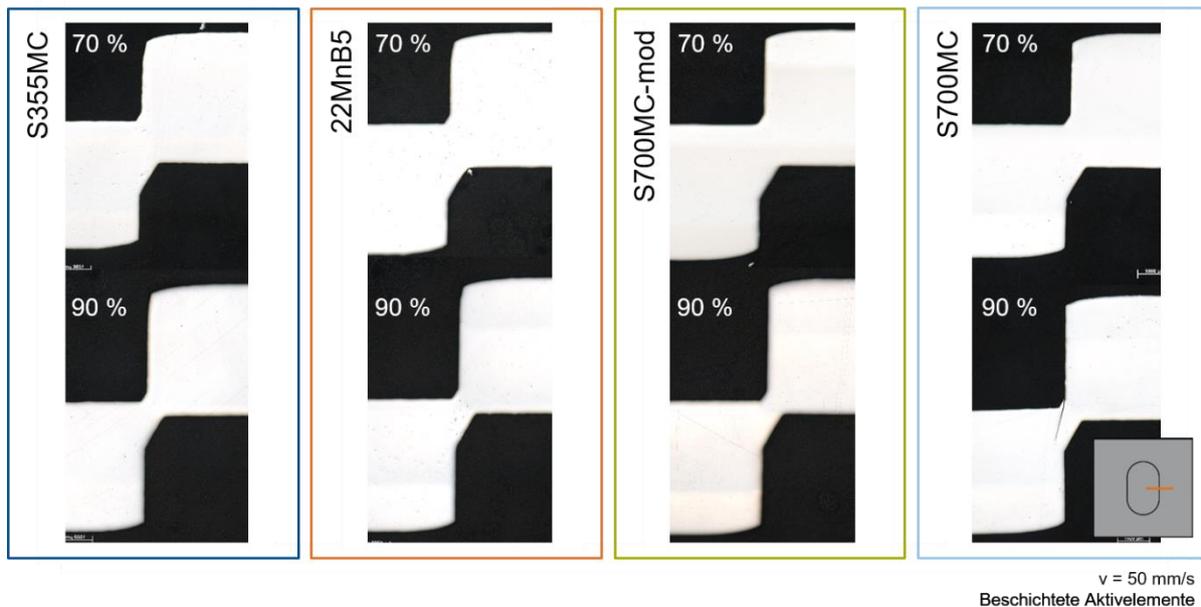


Abbildung 8-47: Schlifffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Langlochgeometrie (gerade Trennstelle).

Figure 8-47: Microsections for different embossing depths of the slot geometry (straight cutting position).

Hier konnte für eine Durchsetztiefe von 90 % beim Blechwerkstoff S700MC ein klassischer Anriss festgestellt werden. Dieser reicht vom Übergang zwischen der kleinen Fase und der Mantelfläche des Stempels in die Durchsetzzone hinein. Eine vollständige Trennung liegt jedoch nicht vor. Bei allen anderen Werkstoffen ist wird ähnliches wie bei den vorherigen Trennstellen beobachtet.

8.3.1.5 Quadratgeometrie Square geometry

Nach dem ein gerades Formelement betrachtet wurde, wurden noch der enge Radius der Quadratgeometrie untersucht. Die zugehörigen Bilder sind in Abbildung 8-48 illustriert. Auffällig sind die extrem stark ausgebildeten Einfallsstellen bei S355MC und 22MnB5 am Übergang zwischen Kanteneinzug und Funktionsfläche. Bei den hochfesten Werkstoffen hingegen sind diese nicht zu finden. Zusätzlich ist der Kanteneinzug bei diesen nur minimal ausgeprägt. Risse sind jedoch bei allen Werkstoffen und Durchsetztiefen nicht zu erkennen.

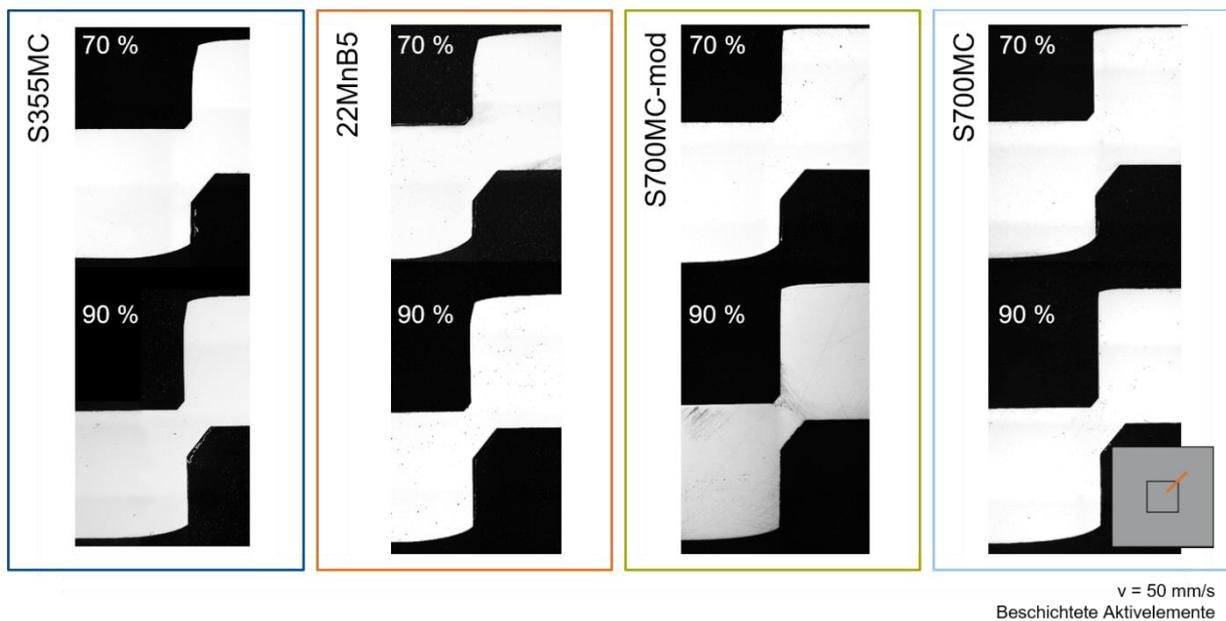


Abbildung 8-48: Schlifffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Quadratgeometrie (Ecke).
Figure 8-48: Microsections for different embossing depths of the square geometry (cutting position at the corner).

8.3.1.6 Ritzelgeometrie Pinion geometry

An der Ritzelgeometrie wurden zwei stark unterschiedliche Trennstellen untersucht. Dies war zum einen der große Radius mit $r = 11,35$ mm und zum anderen der kleine konvexe mit $r = 1$ mm. Beide Trennebenen befinden sich auf einer Symmetrieebene. Die Ergebnisse für die große Rundung sind in Abbildung 8-49 aufgeführt.

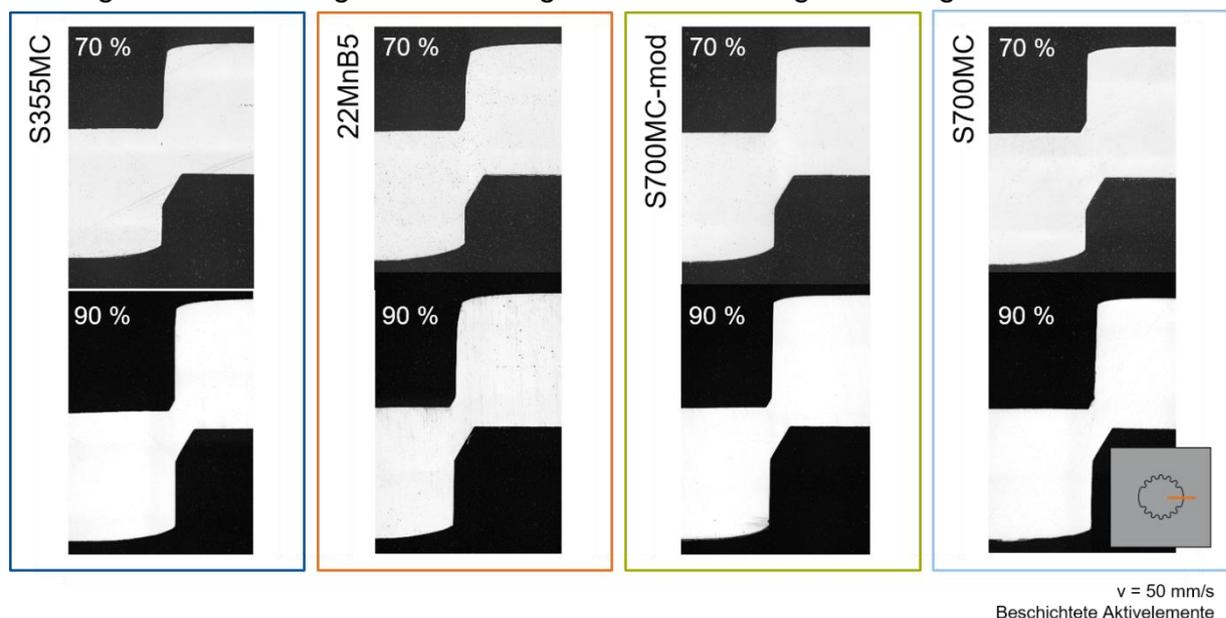


Abbildung 8-49: Schlifffbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Ritzelgeometrie (Trennstelle am großen Radius mit $r = 11,35$ mm).

Figure 8-49: Microsections for different embossing depths of the pinion geometry (cutting position at the big radius with $r = 11,35$ mm).

Wie von der vorherigen Schlibfbildern her zu erwarten war, sind auch hier für alle Durchsetztiefen und Werkstoffe keine Risse zu erkennen.

Die Resultate des kleinen Radius sind in Abbildung 8-50 illustriert. Ebenfalls konnten keine Risse registriert werden. Auffällig sind wieder die stark unterschiedlichen Kanteneinzüge und die Einfallstellen bei S355MC und S700MC-mod.

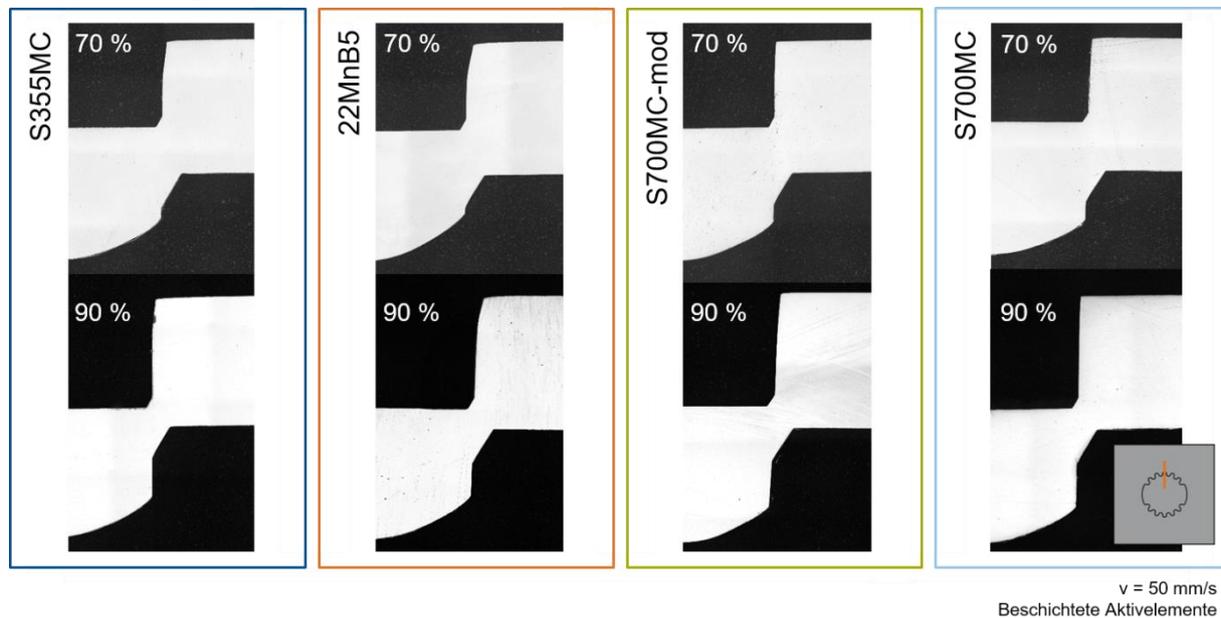


Abbildung 8-50: Schlibfbilder für verschiedene Durchsetztiefen an der Ritzelgeometrie (Trennstelle am kleinen konvexen Radius mit $r = 1 \text{ mm}$).

Figure 8-50: Microsections for different embossing depths of the pinion geometry (cutting position at the small convex radius with $r = 1 \text{ mm}$).

8.3.2 Einfluss der Beschichtung Influence of the coating

Während bei der Verwendung von beschichteten Aktivelementen mit einer Ausnahme keine Risse festgestellt werden konnten, zeigten die Schlibfbilder der mit unbeschichteten Aktivelementen hergestellten Bauteile deutliche Anrisse. Dies ist in Abbildung 8-51 zu sehen.

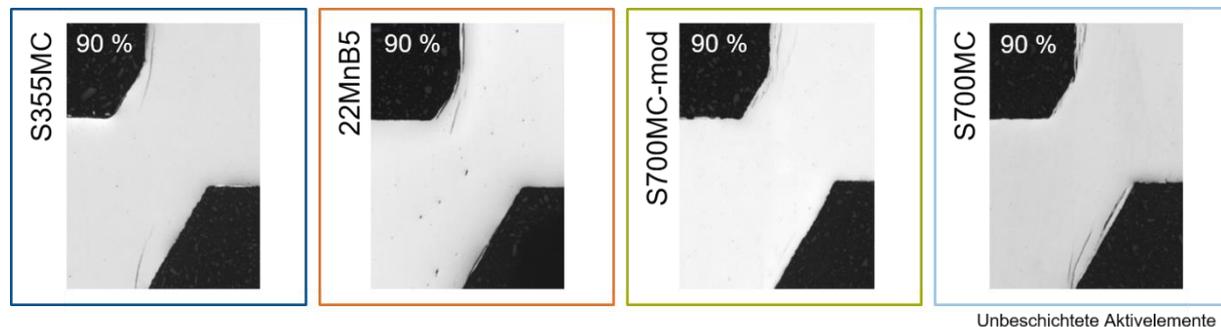


Abbildung 8-51: Schlibfbilder der Durchsettzzone der großen Kreisgeometrie ($r = 15 \text{ mm}$) mit unbeschichteten Aktivelementen und einer Durchsetztiefe von 90 %.

Figure 8-51: Microsections of the embossing zone of the big circle geometry ($r = 15 \text{ mm}$) for an embossing depth of 90 % and uncoated active elements.

Interessant ist, dass hier keine klassischen Anrisse von den Aktivelementkanten aus zu sehen sind, sondern die Risse sich meist leicht unter der Oberfläche befinden und die Orientierung der Risse für die verschiedenen Werkstoffe recht ähnlich ist.

8.3.3 Fazit der Machbarkeitsuntersuchungen

Conclusion of the experimental investigation of the feasibility

Bei der Verwendung von beschichteten Aktivelementen ist die Machbarkeit bei gewählten Prozessparametern und einer Durchsetztiefe von 70 % bei allen Geometrien und Werkstoffen gegeben. Lediglich bei $h_D = 90\%$ konnte beim geraden Abschnitt der Langlochgeometrie bei S700MC ein Anriss vom Übergang zwischen Fase und Stempelmantelfläche beobachtet werden.

Bei der großen Kreisgeometrie und unbeschichteten Aktivelementen konnten bei allen Werkstoffen und einer Durchsetztiefe von 90 % Risse unter der Oberfläche festgestellt werden. Ein Grund hierfür ist die unterschiedliche Reibungssituation zwischen Blech und Stempel bzw. Matrize. Weiterhin ist denkbar, dass sich durch die fehlende Beschichtung Riefen auf den Aktivelementen bilden, welche sich auch im Blech abformen. Diese werden im Laufe des Prozesses wieder zugeedrückt. Durch eine leichte Abweichung der Trennebene zur Symmetrieebene, welche durch Positionierfehler zustande kommt, erscheinen diese Riefen als kurze Anrisse.

9 Simulationsgestützte Bestimmung der Formelementgeometrie Numerical determination of the embossed geometries

Kurzfassung

Zuerst wird die verwendete Simulationssoftware und der Aufbau der Modelle vorgestellt, gefolgt von den Materialmodellen der verwendeten Werkstoffe. Anschließend werden beispielhafte Simulationsergebnisse präsentiert. Anschließend wird eine Fehleruntersuchung zur Identifikation des Einflusses numerischer Stellgrößen auf die Kanteneinzugshöhe durchgeführt.

Abstract

At first, the simulation software and the simulation model setup is presented, followed by the material models of the used sheet metal materials. Afterwards, exemplary results are presented. An error investigation is carried out to identify the influence of numerical parameters on the die-roll height.

9.1 Simulationsmodelle Simulation models

9.1.1 Aufbau der Simulationsmodelle Simulation model setup

Die Simulationsmodelle der verschiedenen untersuchten Geometrien wurden mithilfe der Simulationsumgebung Abaqus 6.12-3 der Firma Simulia, Johnston (USA), aufgebaut und berechnet. Diese zeichnet sich durch eine gute Automatisierbarkeit über Python-Skripte und Möglichkeiten zur Verringerung der Netzverzerrung aus. Eine schematische Darstellung eines Simulationsmodells findet sich in Abbildung 9-1.

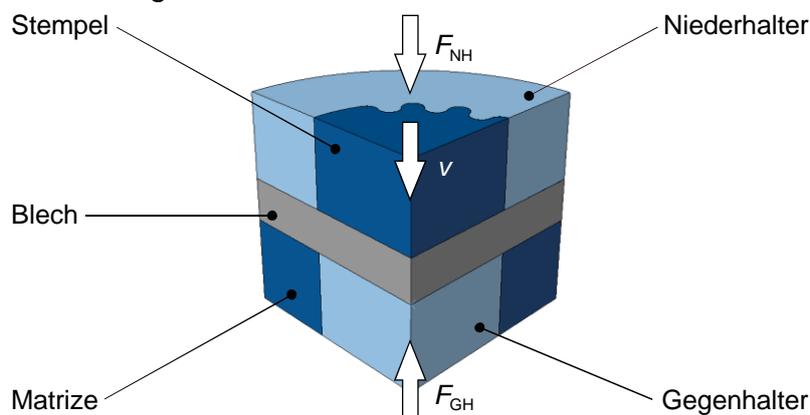


Abbildung 9-1: Schematische Darstellung eines Simulationsmodells.

Figure 9-1: Schematic illustration of a simulation model.

Bei allen Modellen wurden Niederhalter und Gegenhalter als Starrkörper modelliert und mit den in den Experimenten eingestellten Kräften belastet. Stempel und Matrize wurden als elastisch deformierbare Körper eingefügt, wobei die Matrize an den

Rändern im Raum fixiert wurde. An der Oberseite des Stempels wurde eine Geschwindigkeitsrandbedingung eingefügt, die die pressenseitig gewählten Stoßelgeschwindigkeiten nachbildet. Das Blech wurde elastoplastisch verformbar modelliert.

Symmetrien wurden soweit möglich ausgenutzt. Die Kreisgeometrien mit den Radien 7,5 mm und 15 mm wurden rotationssymmetrisch berechnet. Hierbei kamen für das Blech, Matrize und Stempel Elemente des Typs CAX4R zum Einsatz. Die Starrkörper Gegenhalter und Niederhalter wurden mit RAX2-Elementen vernetzt. Bei Kettenglied-, Langloch-, Quadrat- und Ritzelgeometrie wurde jeweils ein Viertelmodell aufgebaut. C3D8R-Elemente wurden für die elastisch- und elastoplastisch deformierbaren Körper gewählt während die Starrkörper mit R3D4-Elementen versehen wurden.

Kontaktbedingungen zwischen Blech und Niederhalter, Gegenhalter, Stempel und Matrize wurden eingefügt. Dafür wurde die Penalty-Kontaktmethode mit einer Gleitreibungszahl von 0,1 verwendet.

Um Elementverzerrungen beherrschen zu können wurde Distortion-Control und die ALE-Methode untersucht, wobei für die finalen Ergebnisse erstere herangezogen wurde.

9.1.2 Materialmodellierung Material modelling

Zur Identifikation der Ausgangsfließkurven wurden Zugversuche nach [DIN6892-1] mit Zugprobengeometrien der Form E gemäß [DIN50125] durchgeführt. Anschließend wurde die Kurve mit der geringsten Verfestigung mit dem Materialmodell nach Voce und die mit der stärksten Verfestigung mit dem Modell nach Swift extrapoliert. Die Ergebnisse für S355MC und 22MnB5 sind in Abbildung 9-2 und die für S700MC und S700MC-mod in Abbildung 9-3 dargestellt.

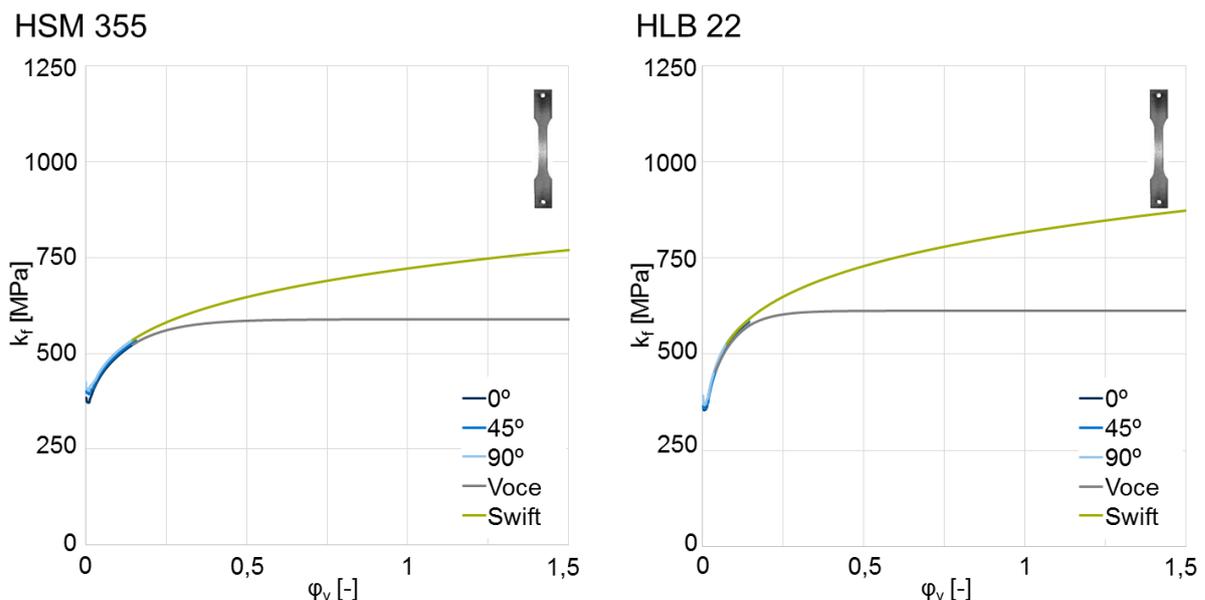


Abbildung 9-2: Extrapolationen nach Voce und Swift an den Fließkurven der Werkstoffen S355MC und 22MnB5 in drei Orientierungen zur Walzrichtung.

Figure 9-2: Extrapolation models according to Voce and Swift on the flow curves of the materials S355MC and 22MnB5 for three different orientations to the rolling direction.

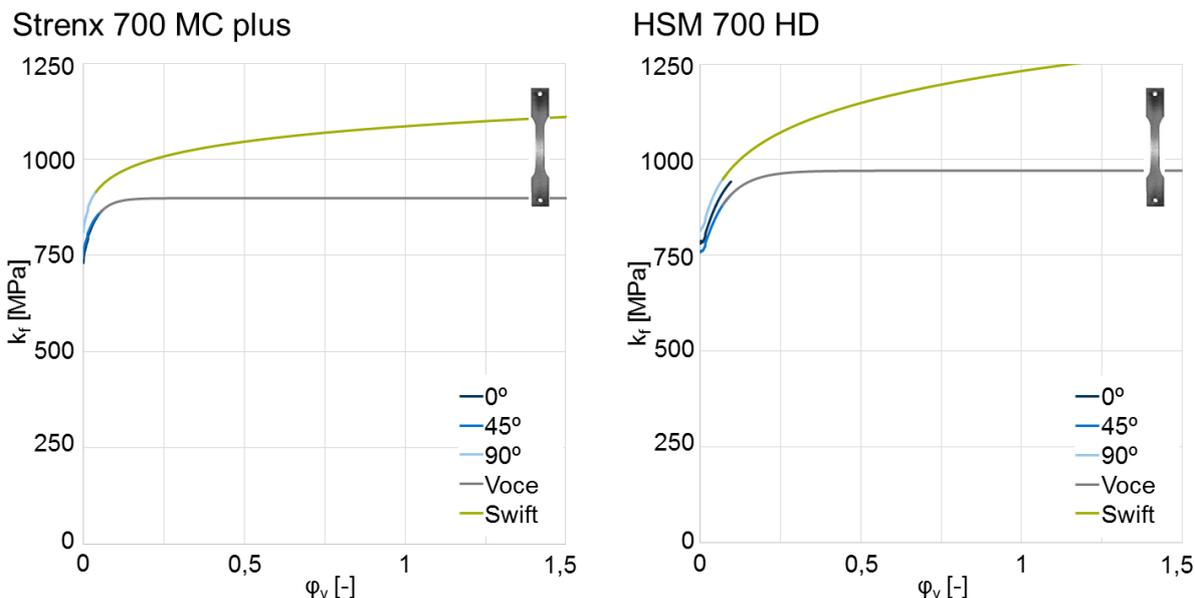


Abbildung 9-3: Extrapolationen nach Voce und Swift an den Fließkurven der Werkstoffe S700MC-mod und S700MC in drei Orientierungen zur Walzrichtung.

Figure 9-3: Extrapolation models according to Voce and Swift on the flow curves of the materials S700MC-mod and S700MC for three different orientations to the rolling direction.

In beiden Abbildungen ist das gegensätzliche Verhalten der Extrapolationen gut zu erkennen. Während sich das Model nach Voce nach kurzer Verfestigung nahezu ideal plastisch verhält, steigt die Fließkurve nach Swift auch für höhere Umformgrade noch deutlich an. Bei den Werkstoffen S355MC und 22MnB5 ist kaum ein Unterschied zwischen den für die verschiedenen Entnahmerichtungen gewonnenen experimentellen Daten erkennbar, während bei S700MC und S700MC-mod eine ausgeprägtere Anisotropie beobachtet werden kann.

Die beiden Extrapolationsmodelle legen die obere und untere Grenze fest, zwischen denen sich die Fließkurve für die unterschiedlichen Formelemente bewegen kann. Hierauf wird in Kapitel 10 näher eingegangen.

9.1.3 Beispielhafte Ergebnisse Exemplary results

In Abbildung 9-4 sind beispielhaft Simulationsergebnisse für den Blechwerkstoff S355MC und eine Durchsetztiefe von 90 % dargestellt. Dabei wurden die rotationssymmetrischen Kreisgeometrien zur besseren Darstellung als Viertelmodell illustriert. Gut zu erkennen ist, dass die Simulationssoftware selbst bei der komplizierten Ritzelgeometrie in der Lage ist, die mit dem hohen Umformgrad von 6,5 einhergehenden Netzverzerrungen zu beherrschen.

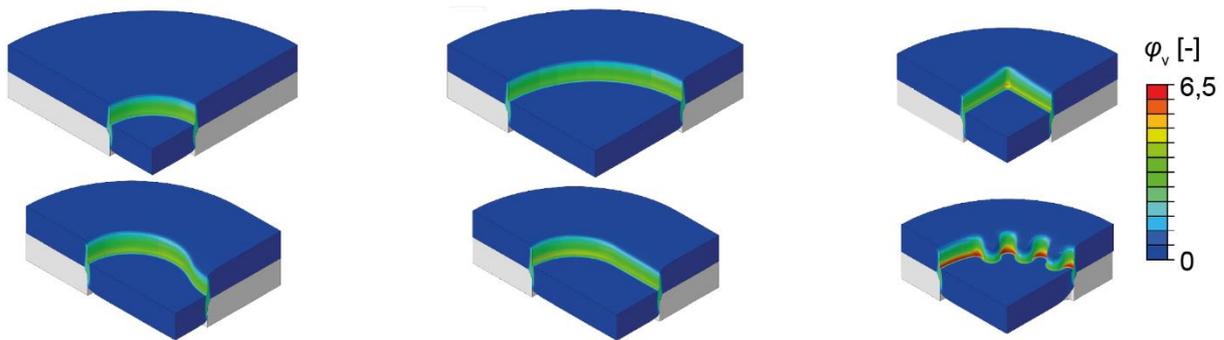


Abbildung 9-4: Beispielhafte Simulationsergebnisse für eine Durchsetztiefe von 90 % und dem Blechwerkstoff S355MC.

Figure 9-4: Exemplary simulation results for an embossing depth of 90 % and the sheet metal material S355MC.

9.2 Fehleruntersuchungen Error investigations

Die folgenden Fehleruntersuchungen wurden alle am Beispiel des Blechwerkstoffes S355MC durchgeführt. Da der Kanteneinzug als zentrale Größe bei der Geometrievorhersage festgelegt wurde, werden anschließend Einflussgrößen auf diesen präsentiert. So ist der Einfluss der Massenskalierung auf die Kanteneinzugshöhe an der Kreisgeometrie mit einem Radius von 15 mm in Abbildung 9-5 dargestellt.

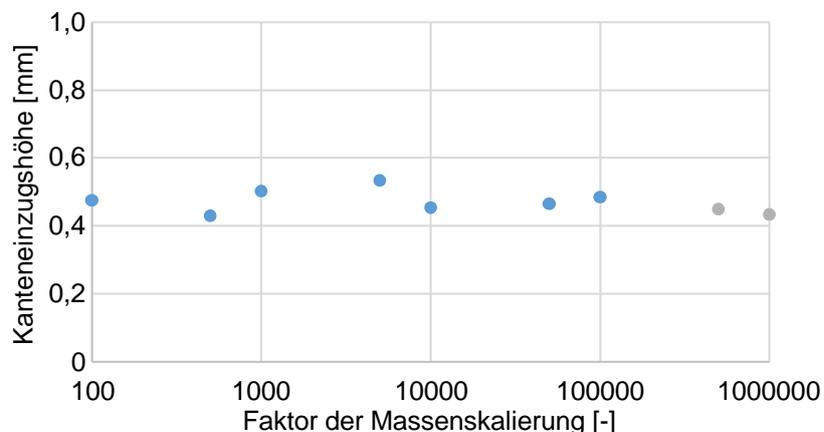


Abbildung 9-5: Abhängigkeit der Kanteneinzugshöhe vom Massenskalierungsfaktor am Beispiel der großen Kreisgeometrie.

Figure 9-5: Dependency of the die-roll height from the mass scaling factor on the example of the big circle geometry.

Abgesehen von einer gewissen Streuung, verursacht durch die Netzverfeinerung, ist die Änderung der Kanteneinzugshöhe bei steigender Massenskalierung gering. Die ausgegrauten Punkte bei einem Massenskalierungsfaktor von 500000 und 1000000 stehen für unrealistische Ergebnisse. Bei diesen beiden Simulationen zeigte sich eine starke Durchbiegung des Bauteils. Dies ist in Abbildung 9-6 zu finden. Auch das Spannungsfeld ist bei diesen hohen Massenskalierungen stark verändert. Daher wurden derart große Werte, trotz der Unabhängigkeit der Kanteneinzugshöhe vom Skalierungsfaktor nicht verwendet.

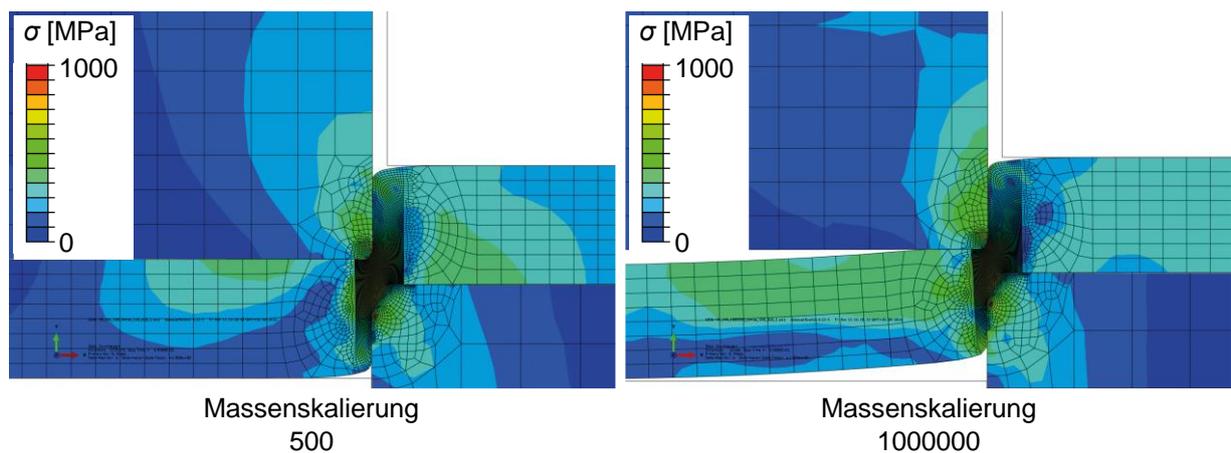


Abbildung 9-6: Unterschiedliche Simulationsergebnisse durch zwei verschiedene Massenskalierungsfaktoren.

Figure 9-6: Different simulation results caused by two different mass scaling factors.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Elementanzahl in der Scherzone. Hier wurden Simulationen am Model der großen Kreisgeometrie mit 450 bis 80000 Elementen durchgeführt. Dies entspricht einer Elementbreite von 53 μm bis 4 μm . Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 9-7 dargestellt.

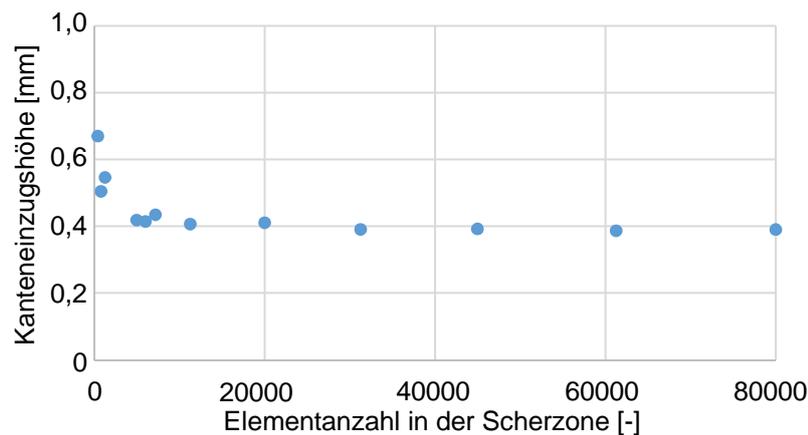


Abbildung 9-7: Einfluss der Elementanzahl in der Scherzone auf die Kanteneinziehungshöhe am Beispiel der großen Kreisgeometrie.

Figure 9-7: Influence of the number of elements in the shearing zone on the die-roll height on the example of the big circle geometry.

Hier ist klar zu erkennen dass für zu große Elemente eine zu große Kanteneinziehungshöhe berechnet wird die mit steigender Elementanzahl gegen einen konstanten Wert konvergiert. Da kleine Elemente eine längere Rechenzeit zur Folge hat wurde die Elementbreite bei den rotationssymmetrischen Modellen kleiner 16 μm gewählt, was einer Elementanzahl von mindestens 6000 Elementen entspricht.

9.3 Fazit aus den numerischen Untersuchungen Conclusions of the numerical investigations

Es wurden zwei rotationssymmetrische Modelle, für die große und kleine Kreisgeometrie, sowie vier Viertelmodelle für die Quadrat-, Langloch-, Kettenglied- und

Ritzelgeometrie aufgebaut. Diese sind in der Lage die großen beim Durchsetzen auftretenden Netzverzerrungen zu beherrschen.

Weiterhin wurde der Einfluss von Vernetzung und Massenskalierung auf das Simulationsergebnis untersucht. Hier zeigte sich, dass die Kanteneinzugshöhe nahezu unabhängig vom Massenskalierungsfaktor ist. Selbst für extrem große Skalierungsfaktoren, bei denen sich das Spannungs- und Dehnungsfeld stellenweise signifikant ändern, bleibt der Kanteneinzug davon größtenteils unberührt.

Die Feinheit der Vernetzung hat hingegen einen starken Einfluss auf das Berechnungsergebnis. Während die Kanteneinzugshöhe für eine fein vernetzte Scherzone gegen einen konstanten Wert konvergiert, steigt sie für ein grobes Netz stark an.

10 Korrekturmodell Adjustment model

Kurzfassung

In diesem Kapitel wird die Methodik, die Herangehensweise und zugehörige Ergebnisse der Anpassung des Materialmodells vorgestellt. Dazu wird zwischen den Fließkurven nach Voce und Swift interpoliert, was den Kanteneinzug entscheidend beeinflusst und teilweise eine automatisierte Ermittlung der Korrekturparameter erlaubt. Anschließend wird die zur Kraftberechnung herangezogene Formel und deren Parameteridentifikation vorgestellt.

Abstract

In this chapter, the methodology, the procedure and the corresponding results of the material model adjustment are presented. At first, an interpolation between the material models according to Voce and Swift is used, which significantly influences the die-roll height. This allows to automatically identify the adjustment parameters in most cases. Afterwards, the formula for the calculation of the geometrical element's specific force and its parameter identification are presented.

10.1 Anpassung des Materialmodells Adjustment of the material model

10.1.1 Fließkurvenanpassung Flow curve adjustment

Das Materialmodell für die jeweiligen Formelemente wird zwischen den in Kapitel 9.1.2 vorgestellten Extrapolationsansätzen variiert. Dazu werden folgende Formeln verwendet:

$$k_{fV} = k_{f0} + A_V \left(1 - \exp\left(\frac{\varphi}{B_V}\right) \right) \quad (10-1)$$

$$k_{fS} = A_S (B_S + \varphi)^n \quad (10-2)$$

$$k_f = \alpha k_{fV} + (1 - \alpha) k_{fS} \quad (10-3)$$

Während Gleichung 10-1 und 10-2 schon aus Kapitel 2.2.2 bekannt sind, beschreibt Gleichung 10-3 eine Kombination aus beiden. Der Wert des Interpolationsfaktors α kann hier Werte zwischen null und eins annehmen, wobei für null nur das Modell nach Swift und für eins nur jenes nach Voce betrachtet wird. Somit ist es mit diesem Ansatz möglich zwischen nahezu ideal plastischem Materialverhalten und einer starken Verfestigung der Fließkurve zu variieren.

10.1.2 Auswirkungen auf den Kanteneinzug Influence on the die-roll height

Um die Auswirkungen des Materialmodells beziehungsweise des Interpolationsfaktors auf die Kanteneinzugshöhe zu untersuchen wurden diverse Simulationen berechnet. Exemplarische Ergebnisse sind für S700MC an der großen Kreisgeometrie in Abbildung 10-1 dargestellt.

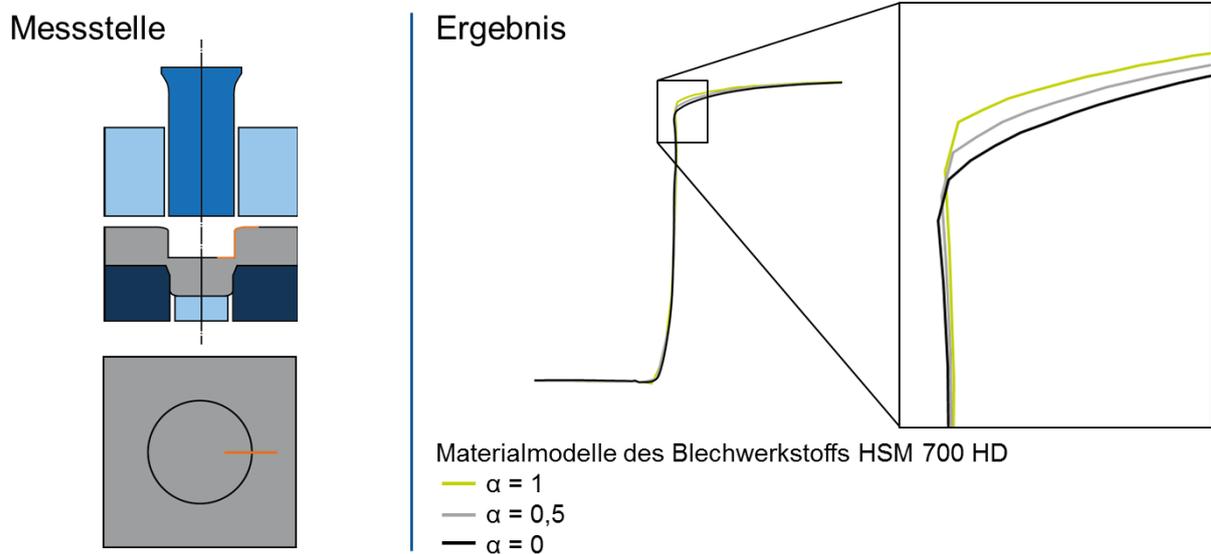


Abbildung 10-1: Einfluss des Materialmodells auf die Ausbildung des Kanteneinzugs am Beispiel des Blechwerkstoff S700MC und der großen Kreisgeometrie.

Figure 10-1: Influence of the material model on the shape of the die-roll on the example of the sheet metal material S700MC and the big circle geometry.

Eine genauere Untersuchung des Zusammenhangs von Interpolationsfaktor und Kanteneinzugshöhe für 22MnB5 und S700MC an der kleinen Kreisgeometrie ist in Abbildung 10-2 dargestellt.

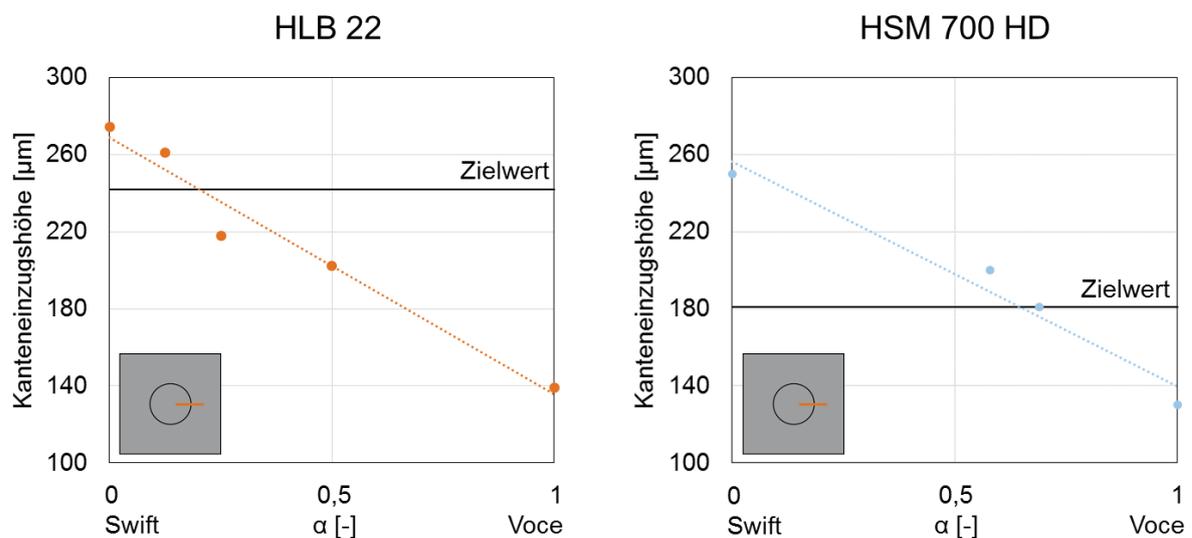


Abbildung 10-2: Veränderung der Kanteneinzugshöhe durch die Anpassung der Fließkurve.

Figure 10-2: Changes in the die-roll height due to a different flow curve.

Für beide Werkstoffe kann die gleiche Tendenz beobachtet werden. Mit zunehmendem Voce-Anteil sinkt die Kanteneinzugshöhe was den Schluss zulässt, dass in diesem Fall eine stärkere Verfestigung eine größere Kanteneinzugshöhe verursacht. Weiterhin lässt sich beobachten, dass der Zusammenhang zwischen α und der Kantenzugshöhe nahezu linear ist. Dies erleichtert die Identifikation enorm, da der Zielwert von α bereits von den Extremwerten $\alpha = 1$ und $\alpha = 0$ mit relativ hoher Genauigkeit abgeschätzt werden kann.

10.1.3 Parameteridentifikationsalgorithmus und Ergebnisse Parameter identification algorithm and results

Der in Python™ Version 2.7.11 implementierte Algorithmus zur Parameteridentifikation wurde in [Sta17] veröffentlicht und wird daher nur in Grundzügen vorgestellt. Da die Kanteneinzugshöhe die Zielgröße des Algorithmus ist, wird eine Methodik benötigt um diesen automatisiert bestimmen zu können. Das schematische Vorgehen ist in Abbildung 10-3 aufgeführt.

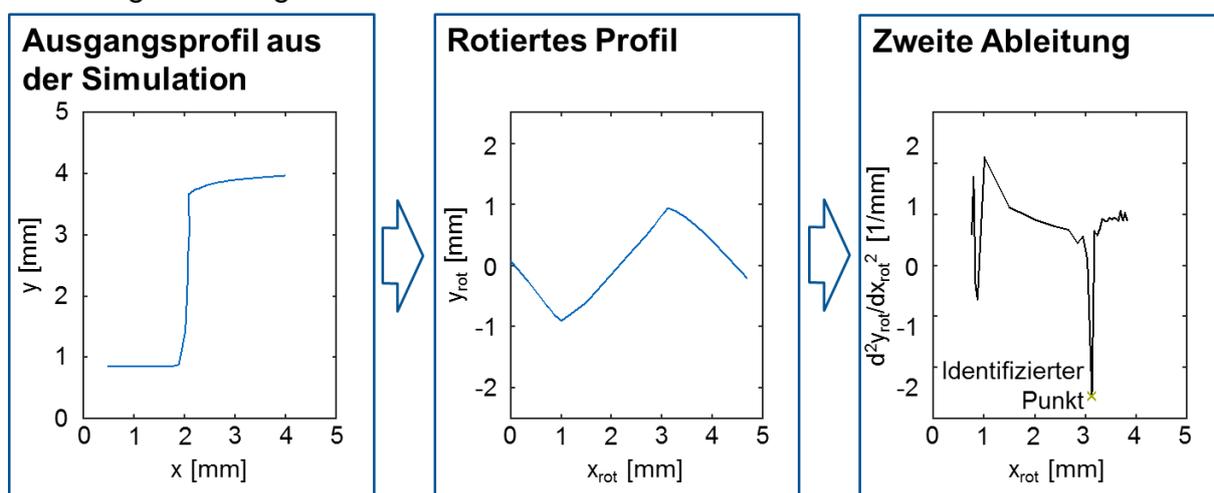


Abbildung 10-3: Schematisches Vorgehen zur Detektion der Kanteneinzugshöhe nach [Sta17].

Figure 10-3: Schematic procedure for the detection of the die-roll height according to [Sta17].

Das Profil aus der Simulation wird zuerst geladen und anschließend um 45° rotiert. Anschließend wird die zweite Ableitung berechnet. Der Übergang zwischen Blechoberseite und der Glattschnittfläche ist eine scharfe Kante. Daher weist die zweite Ableitung genau in diesem Punkt ein Minimum auf. Nun muss nur noch der Abstand zwischen diesem Punkt und der Oberseite des Blechs berechnet werden um die Kanteneinzugshöhe zu bestimmen.

Der Ablauf des kompletten Algorithmus ist in Abbildung 10-4 zu finden. Zuerst werden die Zielgrößen, also die experimentell ermittelten Kanteneinzugshöhen, und die mit den Ansätzen von Voce und Swift extrapolierten Materialmodelle definiert. Ausgehend von diesen wird für einen gegebenen Startwert von α ein neues Materialmodell berechnet und in das Simulationsmodell eingefügt, welches anschließend berechnet wird. Ausgehend von dem so gewonnen Oberflächenprofil wird die Kanteneinzugshöhe bestimmt und mit den Zielgrößen verglichen. Ist die ermittelte Kanteneinzugshöhe noch nicht ausreichend genau, wird ein neuer Parameter α abgeschätzt. Diese Prozedur wird so lange wiederholt bis eine die Genauigkeit im Bereich der Netzfeinheit liegt. Daraufhin

werden der Interpolationsfaktor und das zugehörige Materialmodell exportiert. Der Algorithmus kam bei allen Modellen zum Einsatz bei denen dies einen zeitlichen Vorteil gegenüber der Expertise des Bediener hatte.

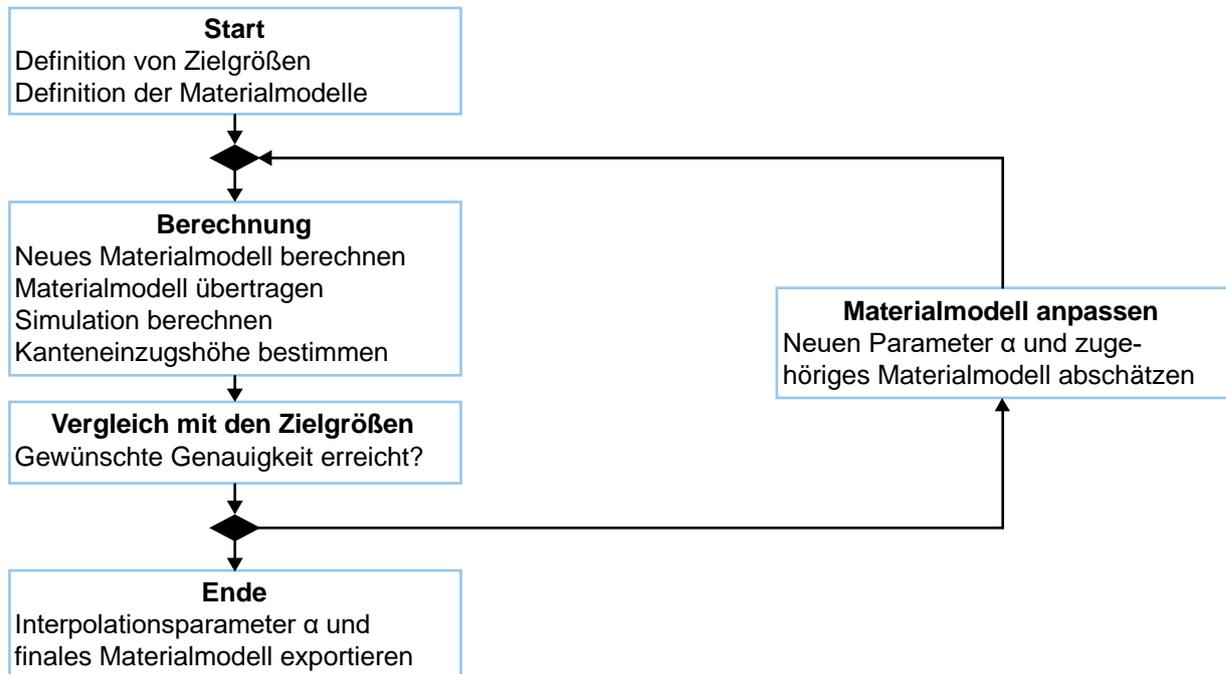


Abbildung 10-4: Ablauf des Parameteridentifikationsalgorithmus nach [Sta17].

Figure 10-4: Parameter identification algorithm according to [Sta17].

Die ermittelten Korrekturfaktoren für die verschiedenen Modelle und Werkstoffe sind in Tabelle 10-1 zu finden.

Tabelle 10-1: Interpolationsfaktoren der verschiedenen Materialien und Formelemente.

Table 10-1: Interpolation factors of the different materials and geometrical elements.

Geometrie	Formelement	Interpolationsfaktor [-]			
		S355MC	22MnB5	S700MC	S700MC-mod
Kleine Kreisgeometrie	$r = 7,5 \text{ mm}$	0	0,1	0,55	0
Große Kreisgeometrie	$r = 15 \text{ mm}$	0	0,25	0,45	0
Langloch	Gerade $r = \infty$	0,43	1	1	1
Kettenglied	Konkav $r = 7,5 \text{ mm}$	0,42	0,85	0,85	0,47
Quadrat	Ecke $r = 0,5 \text{ mm}$	0	0	0	0

Hier fällt auf, dass für die Gerade der Langlochgeometrie und die Ecke der Quadratgeometrie meist Extremwerte angenommen werden. Auffällig ist weiterhin das konvexe und konkave Geometrien zum Teil deutliche Unterschiede in den Korrekturfaktoren bewirken.

10.2 Kraftberechnung Force calculation

Um die Kraft zu berechnen wurden die spezifischen Kräfte der jeweiligen Formelemente ermittelt, über den Radius aufgetragen und anschließend eine Formel bestimmt, die diesen Zusammenhang möglichst gut beschreiben kann. Hierfür wurde eine Gleichung des folgenden Typs herangezogen:

$$f_{FE} = A_{FE} + B_{FE} \frac{1}{r^2} \quad (10-4)$$

Hier ist f_{FE} die spezifische Durchsetzkraft und r der Radius des jeweiligen Formelements während A_{FE} und B_{FE} die zugehörigen Modellparameter sind. Für die Ermittlung dieser Parameter wurden die spezifischen Kräfte vom kleinen Radius der Quadratgeometrie ($r = 0,5$), der kompletten Kettengliedgeometrie ($r = 7,5$), der großen Kreisgeometrie ($r = 15$) und der Gerade der Langlochgeometrie ($r = \infty$) herangezogen. Dabei wurde zuerst die spezifische Kraft der Kettengliedgeometrie berechnet. Diese ist durch den ein- und ausspringenden Radius repräsentativer für reale Bauteile als die kleine Kreisgeometrie. Ausgehend hiervon wurde die Kraft der Geraden der Langlochgeometrie durch abziehen der spezifischen Kraft der Radien multipliziert mit deren Länge identifiziert. Anschließend wurde mit diesem Ergebnis die Kraft der kleinen Radien der Quadratgeometrie ermitteln. Das Resultat ist in Abbildung 10-5 aufgeführt.

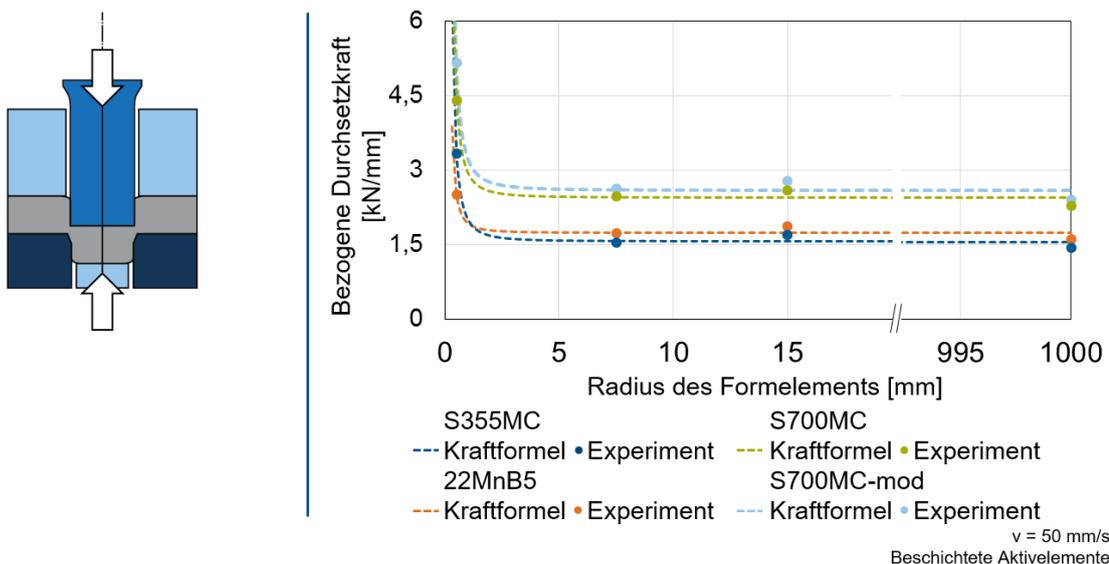


Abbildung 10-5: Gleichung zur Beschreibung der Abhängigkeit der maximalen bezogenen Durchsetzkraft vom Formelementradius.

Figure 10-5: Equation for the calculation of the maximum of the specific embossing force for different geometrical element radii.

Der Geraden wurde dabei ein sehr großer Radius von 1000 mm zugewiesen, da der Parameteridentifikationsalgorithmus nicht mit unendlich großen Werten arbeiten kann. Weiterhin fällt auf das die Kraft der großen Kreisgeometrie leicht oberhalb der der 7,5 mm Radien liegt. Alle Punkte können jedoch mit ausreichender Genauigkeit von der Ausgleichsformel erfasst werden. In folgender Tabelle sind die zugehörigen Parameter für die verschiedenen Werkstoffe zu finden:

Tabelle 10-2: Modellparameter der Formelementkraftberechnung.

Table 10-2: Model parameters of the geometrical element's force calculation.

	S355MC	22MnB5	S700MC	S700MC-mod
A_{FE} [kN/mm]	1,556	1,731	2,597	2,442
B_{FE} [kN mm]	0,4439	0,1927	0,6416	0,4902

10.3 Fazit der Korrekturmodellerstellung Conclusions of adjustment model development

Das Korrekturmodell zur Geometrieangepassung basiert auf der Interpolation zwischen den Extrapolationsmodellen nach Voce und Swift. Hier wurde beobachtet, dass eine stärkere Verfestigung eine größere Kanteneinziehungshöhe hervorruft. Weiterhin ist der Zusammenhang zwischen Interpolationsfaktor und Kanteneinziehungshöhe nahezu linear, was in einem in Python™ implementierten Parameteridentifikationsalgorithmus ausgenutzt wird. Für diesen wurde eine Methodik erarbeitet, mit der die Kanteneinziehungshöhe automatisch aus den berechneten Oberflächenprofilen der Simulationen bestimmt werden kann. Weiterhin wurden die Korrekturfaktoren für die verschiedenen untersuchten Geometrien und Messstellen ermittelt.

Ausgehend von den experimentellen Daten wurden die spezifischen maximalen Durchsetzkräfte für die verschiedenen Formelemente berechnet. Durch die vorgestellte Formel kann die formelementabhängige Durchsetzkraft berechnet werden. Die zugehörigen Parameter wurden ebenfalls vorgestellt.

11 Validierung und Aufbau eines mit der Datenbank verknüpften Simulationsmodells

Validation and setup of a simulation model linked to a database

Kurzfassung

Zunächst werden die berechneten und experimentell ermittelten maximalen spezifischen Durchsetzkkräfte anhand der Ritzelgeometrie für die vier Blechwerkstoffe miteinander verglichen. Anschließend wird die Kanteneinziehungshöhe an derselben Geometrie an vier unterschiedlichen Messstellen zur Beurteilung der Validität herangezogen. Dem folgt die Vorstellung der in diesem Projekt erarbeiteten Benutzeroberfläche, die zugleich als Datenbank und Verknüpfung zum Simulationsmodell dient.

Abstract

At first, the calculated and experimentally determined maxima of the specific embossing force are compared on the example of the pinion geometry for the four different sheet metal materials. Afterwards, the die-roll height is compared between experiment and simulation on the same geometry at four different measuring positions. Furthermore, an introduction to the user interface implemented in this project, which also acts as the database and the link to the simulation model, is given.

11.1 Validierung

Validation

11.1.1 Kraftberechnung

Force calculation

Um die formelementabhängige Kraftberechnung zu bestätigen, wurde die Kraft der Ritzelgeometrie mit dieser berechnet und anschließend mit dem Experiment verglichen. Dies ist in Abbildung 11-1 für eine Durchsetztiefe von 70 % dargestellt.

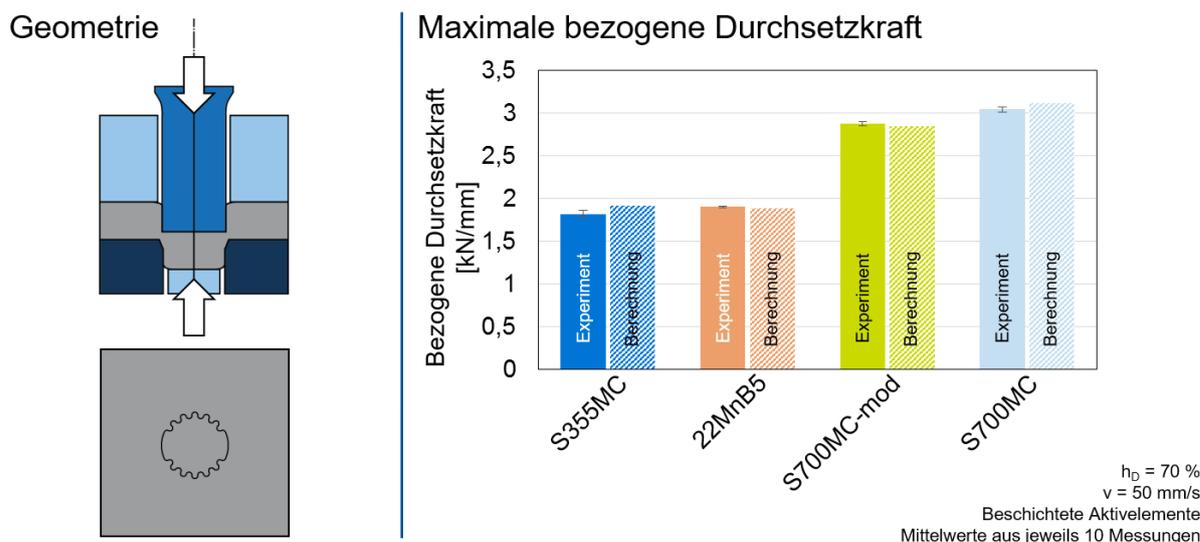


Abbildung 11-1: Vergleich der experimentell ermittelten und berechneten maximalen spezifischen Durchsetzkraft für die Ritzelgeometrie mit einer Durchsetztiefe von 70 %.

Figure 11-1: Comparison of the experimentally determined and calculated maxima of the specific embossing force for the pinion geometry and an embossing depth of 70 %.

Hier ist ersichtlich, dass die Kraft mit sehr hoher Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Die größte Abweichung zwischen Berechnung und Experiment wird bei S355MC beobachtet und beträgt 5,4 %. Bei allen anderen Werkstoffen werden bedeutend niedrigere Differenzen von 2,2 % bei S700MC, 1,2 % bei S700MC-mod und nur 0,97 % bei S700MC festgestellt.

Aufgrund der geringen Schwankung der Durchsetzkraft für verschiedene Durchsetztiefen ist die Übereinstimmung bei $h_D = 90\%$ ähnlich gut. Dies ist in Abbildung 11-2 zu sehen.

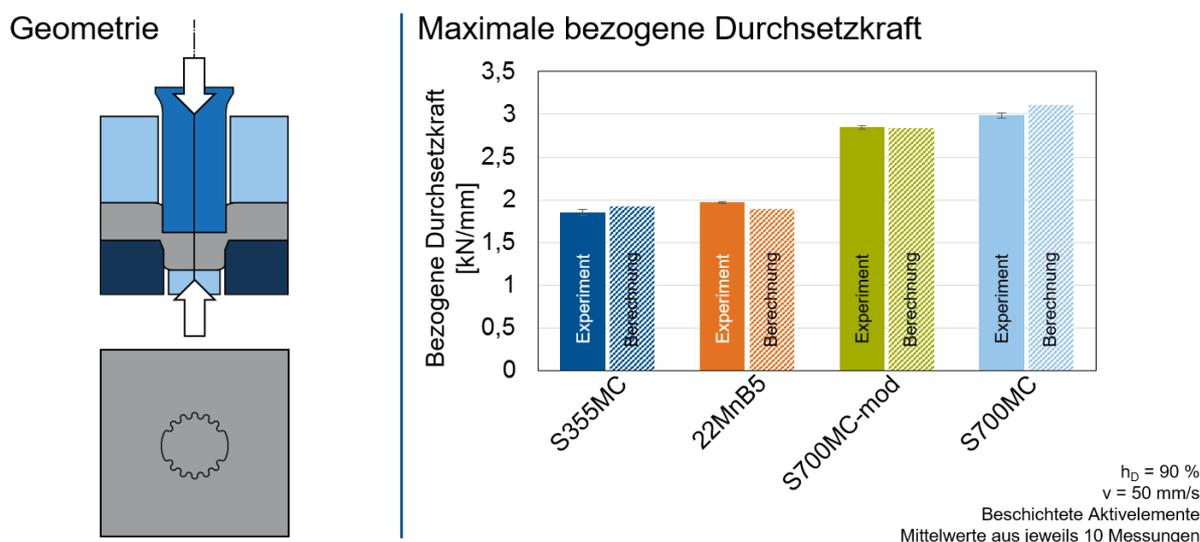


Abbildung 11-2: Vergleich der experimentell ermittelten und berechneten maximalen spezifischen Durchsetzkraft für die Ritzelgeometrie mit einer Durchsetztiefe von 90 %.

Figure 11-2: Comparison of the experimentally determined and calculated maxima of the specific embossing force for the pinion geometry and an embossing depth of 90 %.

11.1.2 Berechnung der Kanteneinziehungshöhe Die-roll height calculation

Um die Validität der Fließkurvenanpassung zu bestätigen wurde die Ritzelgeometrie mit den ermittelten Fließkurven der einzelnen Formelemente für die vier Werkstoffe berechnet und mit dem Experiment verglichen. Für die Messstelle auf der dem Stempel zugewandten Seite am großen Radius ist dies in Abbildung 11-3 dargestellt.

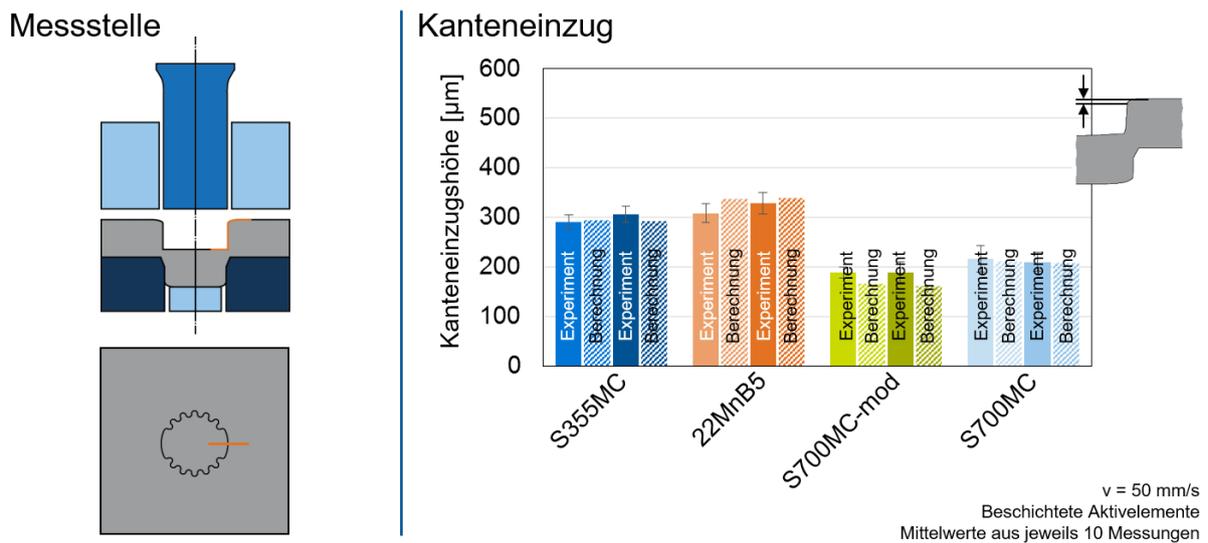


Abbildung 11-3: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinziehungshöhen an der Ritzelgeometrie am Formelement mit einem Radius von 11,38 mm.

Figure 11-3: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the pinion geometry at the geometrical element with a radius of 11,38 mm.

Hier wird, insbesondere für S355MC und S700MC eine sehr gute Übereinstimmung beobachtet.

Ähnlich verhält sich dies bei der konkaven Messstelle. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 11-4 zu finden.

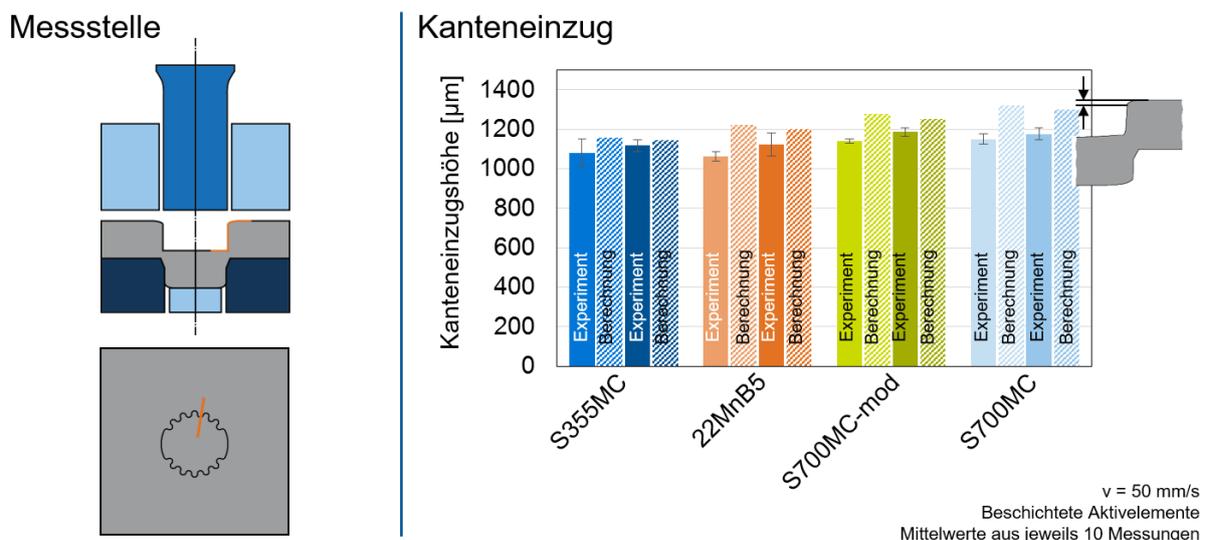


Abbildung 11-4: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinziehungshöhen an der Ritzelgeometrie am konkaven Formelement mit einem Radius von 1 mm.

Figure 11-4: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the pinion geometry at the concave geometrical element with a radius of 1 mm.

Die Abweichungen sind hier tendenziell etwas größer als beim großen Radius. In jedem Fall wird die Kanteneinziehungshöhe leicht überschätzt. Der geringe Einfluss der Durchsetztiefe und der größer werdende Kanteneinzug für S700MC und S700MC-mod wird ebenfalls wiedergegeben.

Am konvexen Formelement mit einem Radius von 1 mm ist hingegen eine sehr geringe Abweichung zwischen Simulation und Experiment feststellbar. Dies ist in Abbildung 11-5 dargestellt. Insbesondere S355MC und S700MC-mod werden mit ausgezeichneter Genauigkeit vorausgesagt. Auch hier werden die werkstoffabhängigen Unterschiede gut wiedergespiegelt.

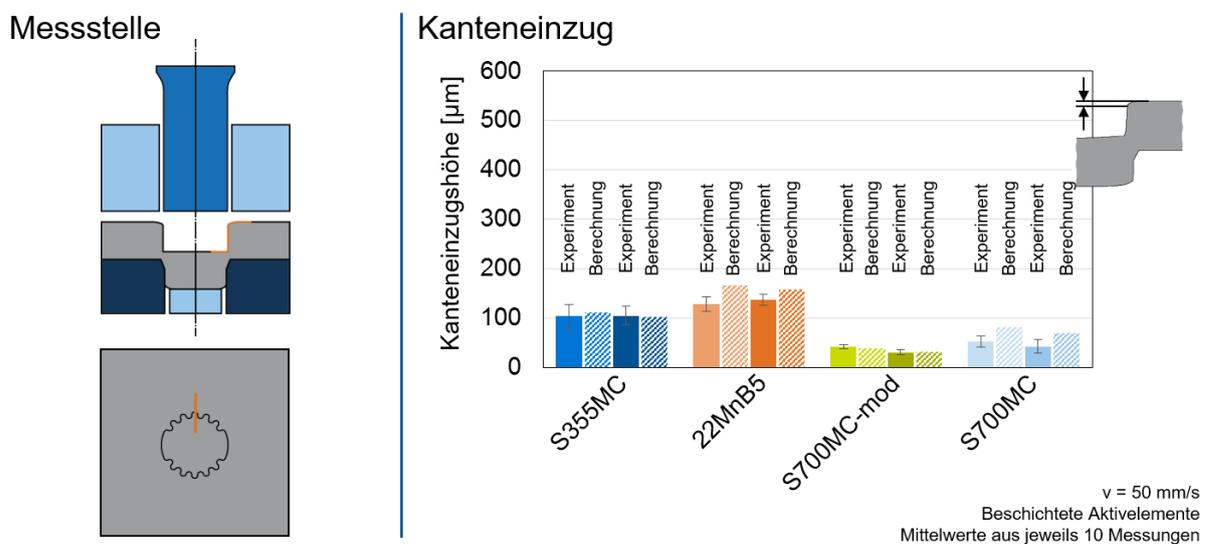


Abbildung 11-5: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinziehungshöhen an der Ritzelgeometrie am konvexen Formelement mit einem Radius von 1 mm.

Figure 11-5: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the pinion geometry at the convex geometrical element with a radius of 1 mm.

Um die Robustheit der Methode zu untersuchen, wurde zusätzlich der Kanteneinzug auf der Blechunterseite betrachtet. Dies ist in Abbildung 11-6 zu sehen. Hier wird der Kanteneinzug tendenziell unterschätzt. Verglichen mit der großen Streuung im Experiment kann dennoch eine akzeptable Vorhersagegenauigkeit erreicht werden.

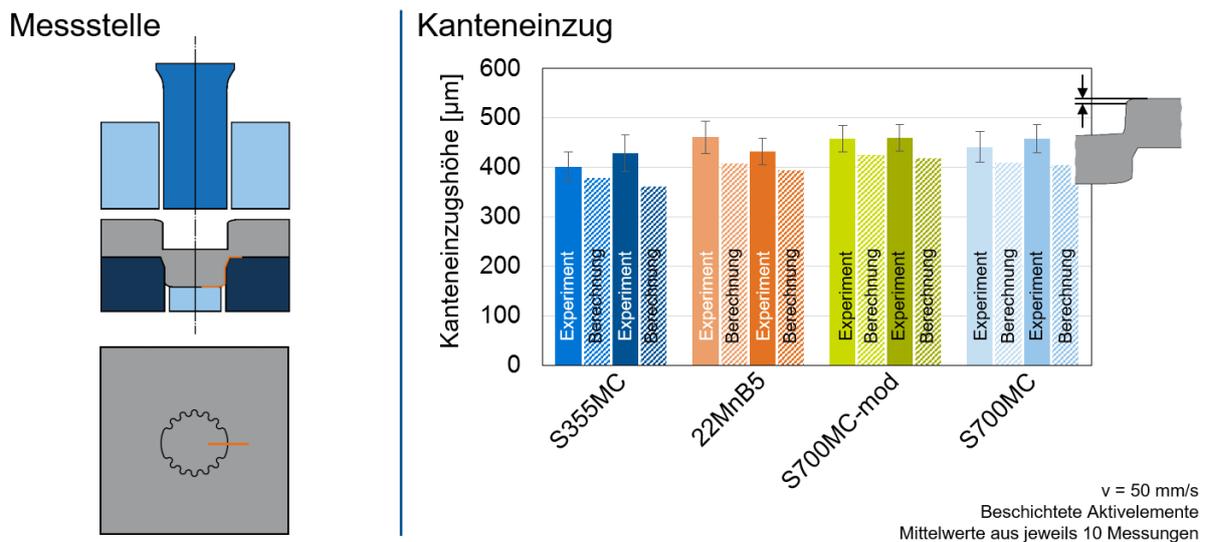


Abbildung 11-6: Vergleich der experimentell und rechnergestützt ermittelten Kanteneinzugshöhen an der Unterseite der Ritzelgeometrie am Formelement mit einem Radius von 11,38 mm.

Figure 11-6: Comparison of the experimentally and numerically determined die-roll heights for the lower side of the pinion geometry at the geometrical element with a radius of 11,38 mm.

11.2 Aufbau eines mit der Datenbank verknüpften Simulationsmodells

Setup of a simulation model linked to a database

11.2.1 Programmaufbau und Datenbankimplementierung

Program setup and database implementation

Die Datenbank wurde in Form einer quellenoffenen Benutzeroberfläche in Python™ Version 2.7.11 und PyQt Version 4.11.4 implementiert. Im Folgenden wird die Funktionsweise erläutert.

Die Geometrierstellung findet nach dem Programmstart in der Registerkarte „Durchsetzgeometrie“ statt. Diese ist in Abbildung 11-7 dargestellt. Hier kann ausgewählt werden ob die Stempel- oder Matrizen seitige Durchsetzlinie definiert werden soll. Der Unterschied beträgt später den durch den Durchsetzspalt verursachten Abstand. Anschließend können Linien, Bögen oder Symmetrielinien in den jeweils erscheinenden Fenstern erstellt werden. Die Option „Ecken verrunden“ erlaubt es entweder ausgewählte Kanten oder alle in der Geometrie vorkommenden Ecken mit einem gewünschten Radius zu verrunden. Zur besseren Bedienbarkeit finden sich unter den für die Geometrierstellung verantwortlichen Schaltflächen noch Optionen zum rückgängig machen der letzten Aktion, zum Löschen der kompletten Geometrie und um die Geometrie zu überprüfen. Auf letzteres wird später noch genauer eingegangen.

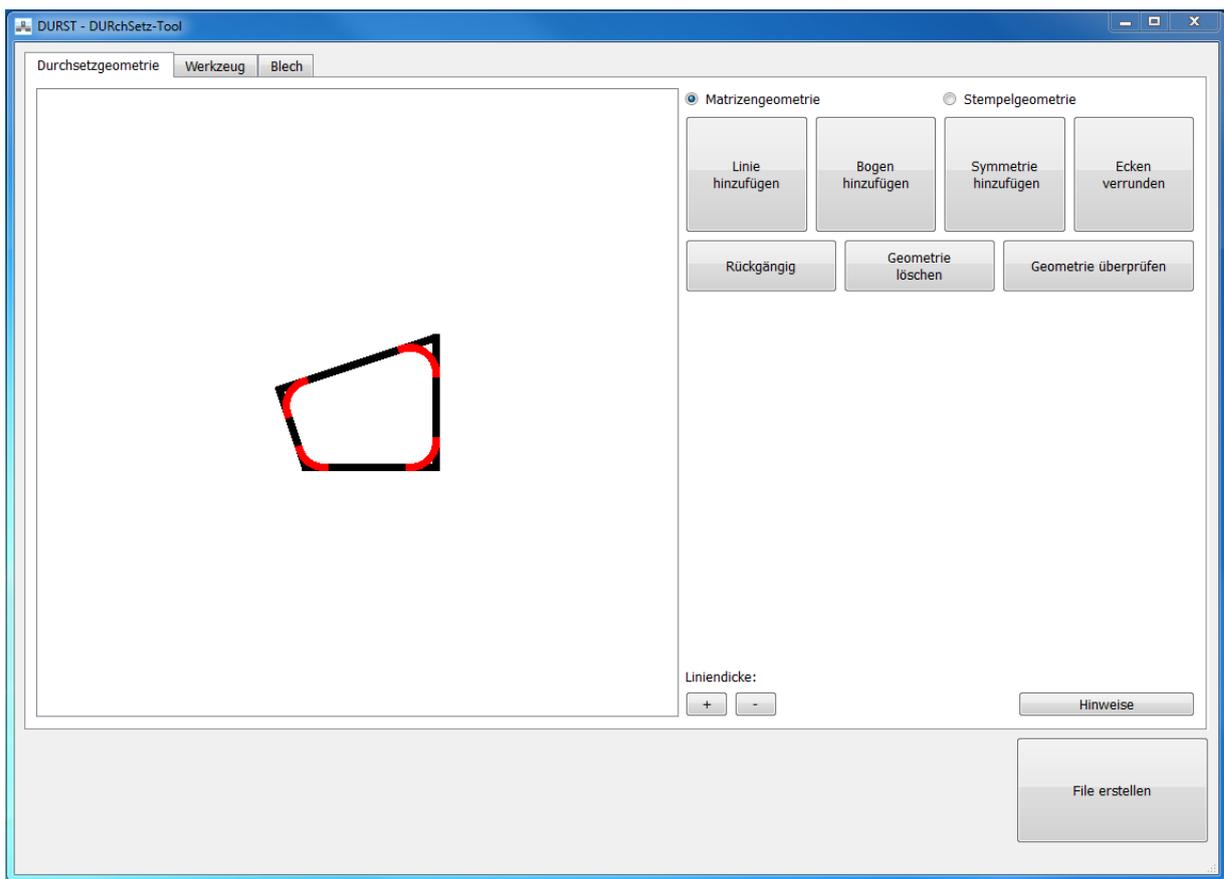


Abbildung 11-7: Registerkarte „Durchsetzgeometrieerstellung“.

Figure 11-7: Tab „Durchsetzgeometrieerstellung“.

Die Durchsetzliniengeometrie erscheint nach dem hinzufügen von Formelementen im linken großen Fenster. In diesem ist es möglich zu zoomen und das Konstrukt zu verschieben. Gerade bei kleinen Geometrien kann eine Anpassung der Liniendicke für eine bessere Sichtbarkeit nötig sein. Dies lässt sich mit den Schaltflächen rechts der Geometrie bewerkstelligen. Weiterhin findet sich noch eine Schaltfläche „Hinweise“, die den Benutzer auf die in diesem Abschlussbericht untersuchten Parameter und die Einschränkungen des Modells hinweisen soll (siehe Kapitel 11.2.3). Zuletzt befindet sich hier noch die Option „File erstellen“ die es erlaubt die erstellte Geometrie als Pythonscript zu speichern. Hierfür ist jedoch eine erfolgreiche Geometrieüberprüfung nötig.

In Abbildung 11-8 ist die Registerkarte „Werkzeuge“ zu sehen. In dieser können Prozessparameter wie der Durchsetzspalt, der Niederhalterspalt oder die Aktivelementverrundung eingegeben werden. Zusätzliche für das Simulationsmodell wichtige geometrische Größen wie die Stempelhöhe oder die Matrizenhöhe können hier definiert werden.

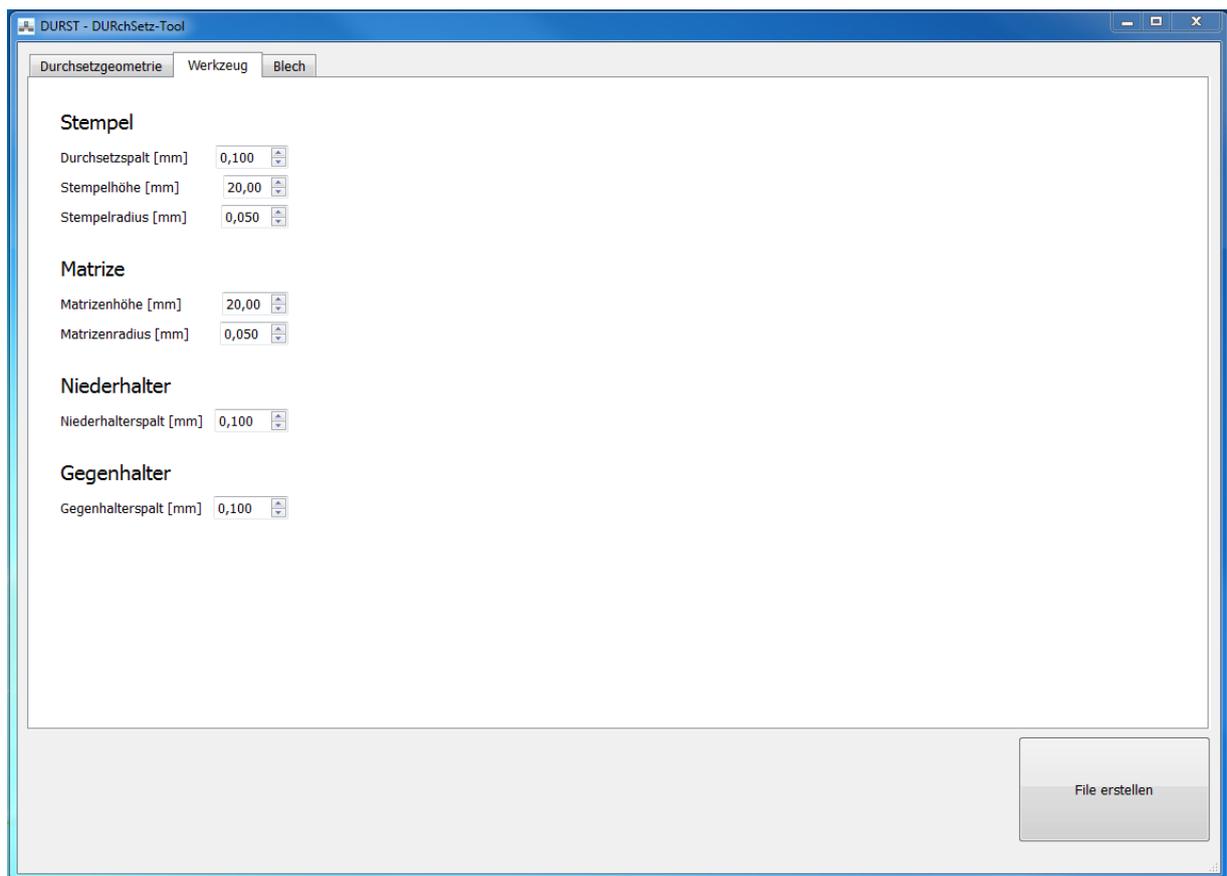


Abbildung 11-8: Registerkarte „Werkzeug“.

Figure 11-8: Tab „Werkzeug“.

Die Registerkarte „Blech“, dargestellt in Abbildung 11-9, ist für die Festlegung des Blechwerkstoffes, der Blechdicke und der Breite der Verfeinerungszone zuständig.

Validierung und Aufbau eines mit der Datenbank verknüpften Simulationsmodells

Validation and setup of a simulation model linked to a database

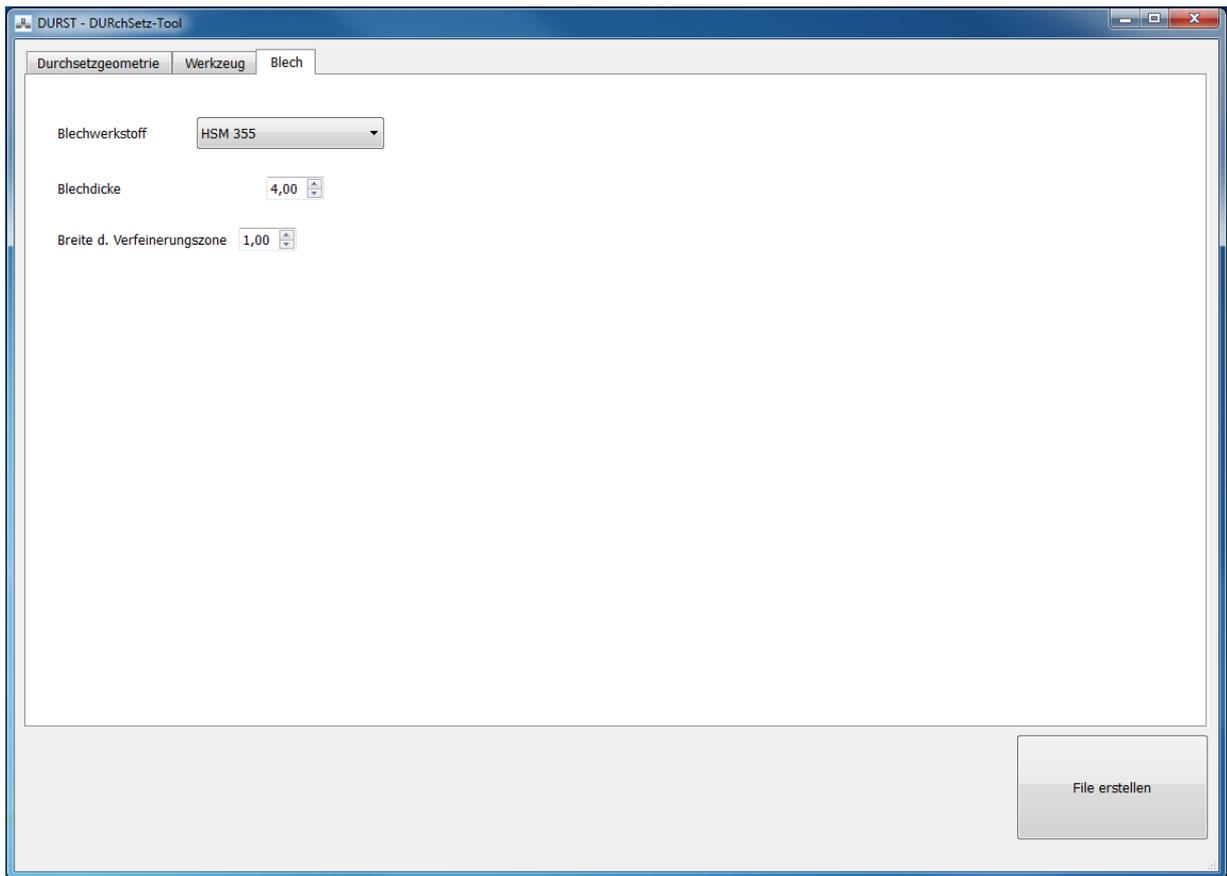


Abbildung 11-9: Registerkarte „Blech“.

Figure 11-9: Tab „Blech“.

Nach der Betätigung der Schaltfläche „Geometrie überprüfen“ in der Registerkarte „Durchsetzgeometrie“ erscheint das in Abbildung 11-10 dargestellte Fenster.

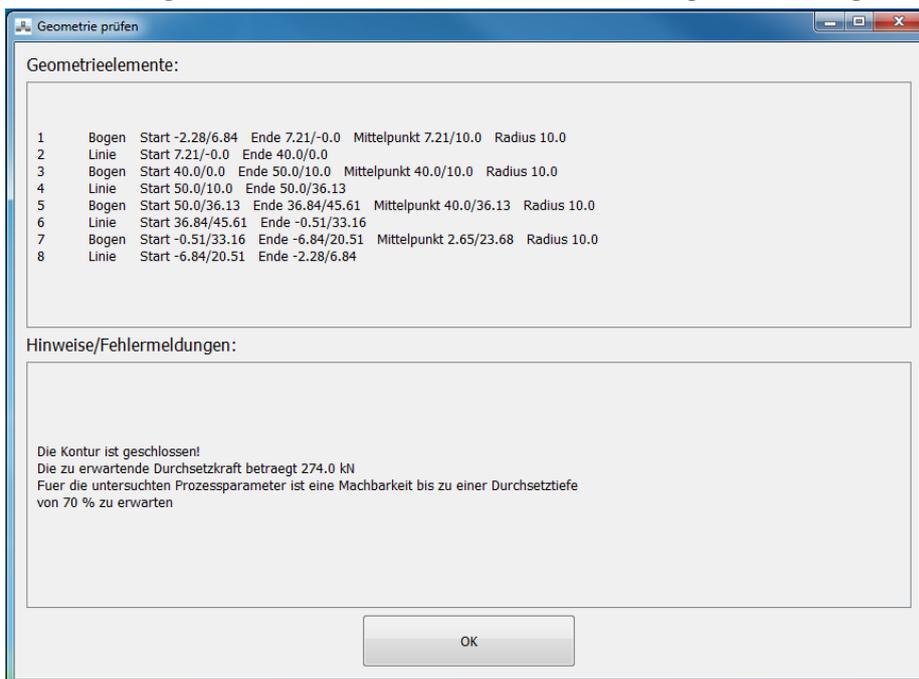


Abbildung 11-10: Fenster „Geometrie prüfen“.

Figure 11-10: Tab „Geometrie prüfen“.

Dieses beinhaltet diverse Informationen zur erstellten Geometrie. Im oberen Teil sind alle enthaltenen Geometrielemente mit ihren Anfangs- und Endkoordinaten bzw. Mittelpunkten und Radien zu finden. Wurde die Option „Kanten verrunden“ gewählt, erscheinen hier zusätzlich die in der Ansicht der Durchsetzliniengeometrie rot markierten Bögen. Eine Geometrie mit unverrundeten Kanten führt zur Ausgabe einer Fehlermeldung.

Im unteren Teil findet sich zunächst ein Hinweis ob die Geometrie offen oder geschlossen ist. Eine geschlossene Durchsetzlinie ist eine Voraussetzung für die Erstellung des Simulationsmodells. Weiterhin wird anhand der in Kapitel 10.2 vorgestellten Formel die zu erwartende Durchsetzkraft berechnet. Ausgehend von den in Kapitel 8.3 untersuchten Schlifffbildern wird eine Empfehlung für die maximal mögliche Durchsetztiefe gegeben.

11.2.2 Verknüpfung mit dem Simulationsmodell

Link with the simulation model

Die Verknüpfung der Datenbank mit dem Simulationsmodell erfolgt mit Hilfe der Benutzeroberfläche. Die Korrekturfaktoren sind im quellenoffenen Script hinterlegt und können beliebig um weitere Einträge ergänzt werden. Ausgehend von der gezeichneten Durchsetzliniengeometrie wird ein komplettes Simulationsmodell automatisiert erstellt. Hierbei werden die im letzten Kapitel vorgestellten Eingabeparameter berücksichtigt und den einzelnen in der Geometrie enthaltenen Formelementen die jeweils angepassten Fließkurven zugewiesen. Das Ergebnis ist in Abbildung 11-11 zu sehen.

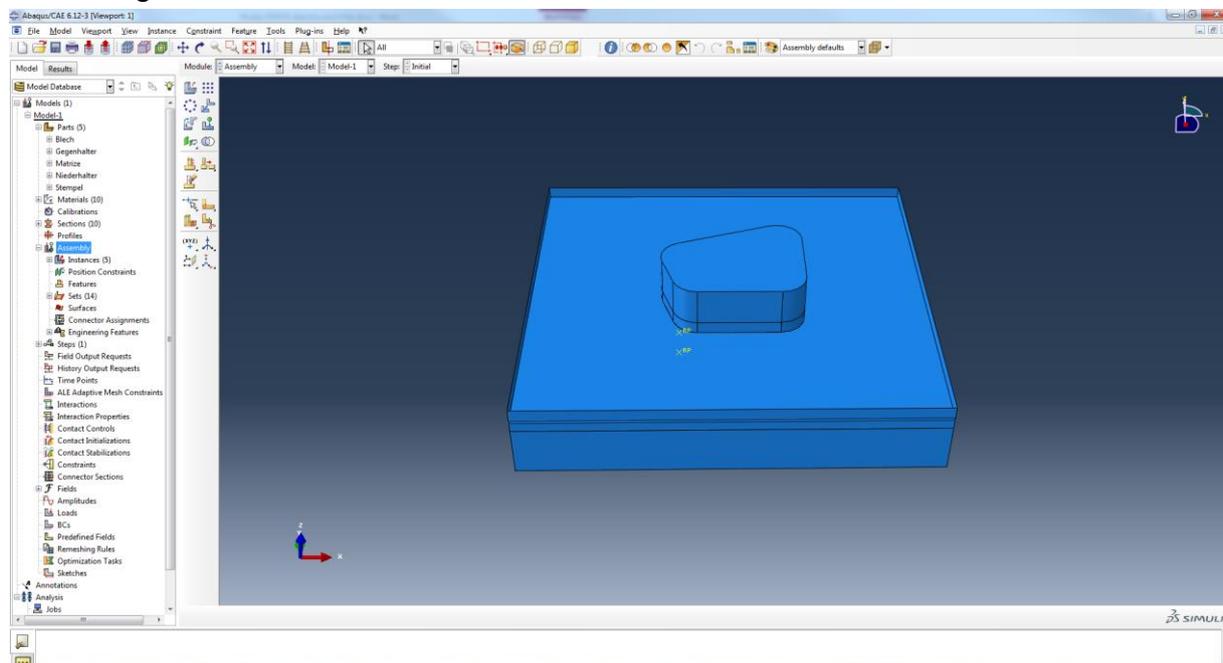


Abbildung 11-11: Erstelltes Modell in Abaqus.

Figure 11-11: Generated model in Abaqus.

Wie rechts im Strukturbaum in Abbildung 11-12 zu sehen ist, existiert für jedes Formelement ein eigenes Materialmodell. Hier ist weiterhin die automatisch erstellte Verfeinerungszone des Blechs zu beobachten.

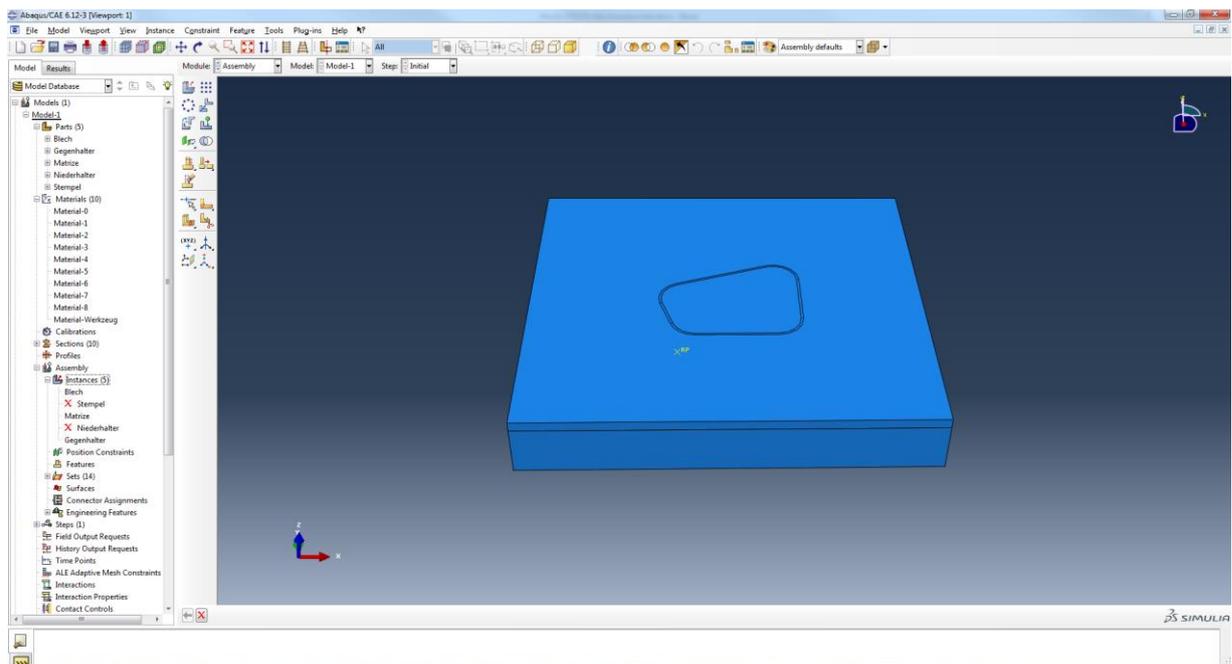


Abbildung 11-12: Erstelltes Modell in Abaqus mit sichtbarer Verfeinerungszone.

Figure 11-12: Generated model in Abaqus with visible refinement zone.

11.2.3 Einschränkungen Limitations

Für nicht im Projekt untersuchte Parameter ist ein schlechteres Ergebnis zu erwarten. Dies ist auch der Fall wenn der für die Kalibrierung herangezogenen Wertebereich verlassen wird. Dies ist zum Beispiel bei der Kraft- und Kanteneinzugsberechnung für Formelemente mit Radien kleiner 0,5 mm der Fall. Bei Aktivelementgeometrien die von den im Projekt untersuchten abweichen sind Fehler ebenfalls wahrscheinlich. Weiterhin konnte der Einfluss von Chargenschwankungen im Rahmen dieses Projekts nicht betrachtet werden.

11.3 Fazit der Validierung und der GUI-Implementierung Conclusions of the validation and the GUI-implementation

Um die Validität der Kraftberechnungsmethode zu bestätigen wurde die experimentell ermittelte maximale Durchsetzkraft mit der berechneten verglichen. Hier konnte eine sehr gute Genauigkeit erreicht werden.

Anschließend wurden die gemessenen Kanteneinziehungshöhen an vier verschiedenen Messpositionen der Ritzelgeometrie den Simulationen gegenübergestellt. In allen Fällen konnte die durch die Materialabhängigkeit hervorgerufenen Tendenzen korrekt wiedergegeben werden. Insbesondere am konvexen kleinen Radius und dem großen konvexen Radius auf der Blechoberseite konnte eine sehr gute Übereinstimmung beobachtet werden. Selbst auf der, nicht in der Kalibrierung betrachteten, Blechunterseite kann akzeptable Genauigkeit erreicht werden.

Anschließend wurde die in diesem Projekt erarbeitete Benutzeroberfläche, die zugleich als Datenbank für die Korrekturfaktoren dient, vorgestellt und die Funktionsweise erläutert. Die Verknüpfung mit dem Simulationsmodell erfolgt über ein Pythonscript,

das automatisiert Simulationsmodelle für die Berechnung mit Abaqus erzeugt. Die Einschränkungen der Gültigkeit von Methode und Benutzeroberfläche wurden zuletzt erläutert.

12 Zusammenfassung Summary

Das Durchsetzen zeichnet sich durch die Möglichkeit zur endkonturnahen Herstellung von Funktionsflächen in nur einem Fertigungsschritt aus. Durch die Verwendung von hoch- und höchstfesten Blechwerkstoffen kann das Bauteilgewicht bei gleichbleibender Sicherheit reduziert werden. Den Herausforderungen die durch fehlendes Expertenwissen und die mangelnde Vorhersagegenauigkeit der Finite-Elemente Methode begründet sind wurde in diesem Projekt begegnet.

Hinsichtlich der Werkzeugtechnik und Kinematik ähnelt der Durchsetzprozess dem Feinschneiden und dementsprechend die Funktionsfläche dem Glattschnittanteil. Dieser bestimmt die Größe der für eine Kraftübertragung zur Verfügung stehenden Fläche. Durch den Kanteneinzug wird diese Fläche reduziert, weshalb die Identifikation der Kanteneinzugshöhe neben den Prozesskräften und der Machbarkeit im Fokus stand.

Zu deren Bestimmung wurde eine Methodik erarbeitet, die unter Berücksichtigung der in der Industrie vorherrschenden Geometrien eine Zerlegung von komplexen Durchsetzliniengeometrien in einfache Formelemente erlaubt. Ausgehend hiervon wurden Durchsetzlinienkonturen entworfen, mit denen ein breites Spektrum an Geometrien untersucht werden kann. Diese sind in Abbildung 12-1 dargestellt.

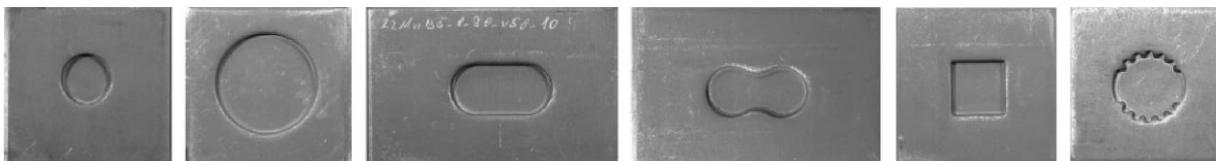


Abbildung 12-1: Untersuchte Durchsetzliniengeometrien am Beispiel des Blechwerkstoffes 22MnB5.

Figure 12-1: Investigated embossing line geometries on the example of the sheet metal material 22MnB5.

Es wurden die vier Blechwerkstoffe S355MC, 22MnB5, S700MC und S700MC-mod in den Experimenten verwendet. In den taktilen Oberflächenvermessung zeigte sich ein stark unterschiedliches Verhalten zwischen den beiden Werkstoffen mit niedriger Fließgrenze (S355MC und 22MnB5) und den hochfesten (S700MC und S700MC-mod). So ist die Kanteneinzugshöhe an konvexen Messstellen bei S355MC und 22MnB5 größer als die von S700MC und S700MC-mod während dieser Effekt bei konkaven Messstellen genau umgedreht ist. Die Ausbildung des Kanteneinzugs wird also nicht nur von den Prozessparametern sondern auch vom Blechwerkstoff und der Geometrie entscheidend beeinflusst. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die Durchsetztiefe einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Kanteneinzugshöhe hat. Auch auf die maximale Durchsetzkraft ist der Einfluss der Durchsetztiefe vernachlässigbar. Es konnte außerdem eine geringe Abhängigkeit der spezifischen Durchsetzkraft von der Durchsetzliniengeometrie beobachtet werden. Die Machbarkeit ist für die untersuchten Aktivelementgeometrien, Blechwerkstoffe und Messstellen bis zu einer Durchsetztiefe von 70 % gegeben. Bei unbeschichteten Aktivelementen ist die Rissgefahr höher als bei beschichteten.

Ausgehend von diesen Experimenten wurden Simulationsmodelle aufgebaut, mit denen die Ermittlung der Kanteneinziehungshöhe für verschiedene, lokal an das jeweilige Formelement angepasste Fließkurven möglich ist.

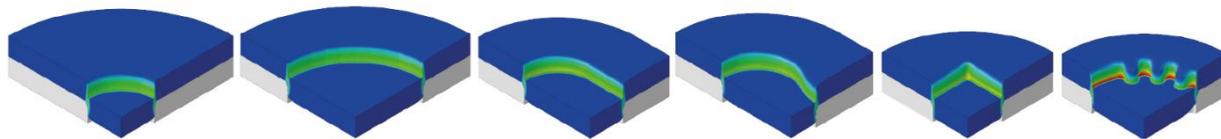


Abbildung 12-2: Simulationsmodelle der untersuchten Geometrien.

Figure 12-2: Simulation models of the investigated geometries.

Das jeweilige Materialmodell wurde durch einen Vergleich von Simulation und Experiment ermittelt. Weiterhin wurde die spezifische Durchsetzkraft für die verschiedenen Formelemente bestimmt und mit einer geometrieabhängigen Gleichung beschrieben.

Zuletzt wurde gezeigt, dass durch die vorgestellten Methoden eine Vorhersage der maximalen Durchsetzkraft und Geometrie mit hoher Genauigkeit möglich ist. Die Ergebnisse wurden zur einfacheren Verwendbarkeit in einer erweiterbaren Benutzeroberfläche zusammengefasst. Diese dient somit sowohl als Werkzeug zur einfachen Abschätzung von Durchsetzkraft und Machbarkeit als auch als Datenbank für die ermittelten Korrekturmodelle. Durch eine Option zur automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen mit der Zuweisung der formelementspezifischen Materialeigenschaften wurde eine Verknüpfung zur Simulationsumgebung geschaffen. Durch eine regelmäßige Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss konnte das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht werden.

13 Ausblick Perspective

In diesem Projekt wurde eine praxisnahe Vorgehensweise erarbeitet die es erlaubt die Kanteneinzugshöhe zu ermitteln. In weiteren Untersuchungen wäre es interessant die Grundlagen, die zu den je nach Geometrie unterschiedlichen Ausbildungen des Kanteneinzugs führen für hoch- und höchstfeste Werkstoffe zu betrachten.

Wie gezeigt wurde, ist eine Parameteridentifikation des Materialmodells durch den Vergleich von Simulation und Durchsetzexperiment möglich. Durch eine Erweiterung um Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit könnten so allgemeingültigere Materialmodelle mit einer ähnlichen Vorgehensweise kalibriert werden. Dies bietet den Vorteil, dass auf Experimente zur Materialcharakterisierung weitestgehend verzichtet werden kann. Weiterhin ist es mit diesen Prüfverfahren aktuell nicht möglich die hohen beim Durchsetzen beobachteten Umformgrade abzubilden. Das gleiche Schema kann auch für die Ermittlung der Parameter eines Schadensmodells herangezogen werden. Damit wäre eine Übertragbarkeit auf das Scherschneiden denkbar.

Insbesondere bei der Verwendung negativer Durchsetzspalte sind extrem hohe Druckspannungen auf die Aktivelemente zu erwarten. Damit geht in der Regel hoher abrasiver Verschleiß einher. Damit wäre es denkbar, den Durchsetzprozess als Modellprozess zur Beurteilung der Verschleißfestigkeit von Aktivelementwerkstoff und -beschichtung heranzuziehen. Insbesondere der große Zeit- und Materialaufwand für Dauerhubuntersuchungen könnte somit reduziert werden.

Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen
List of publications related to the project

14 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- [Ste15] Steinlehner F.: Vergleichende Simulation des Umformprozesses Durchsetzen mit der Finiten-Elemente-Methode in Abaqus, LS-Dyna und simufact.forming, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2015
- [Li15] Li Y.: Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften von hoch- und höchstfesten Stählen für die Durchsetzsimulation, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2016
- [Som16] Sommer K.: Experimentelle Bestimmung des Einflusses der Aktivelementgeometrie auf die Eigenschaften durchgesetzter Bauteile aus hoch- und höchstfesten Stählen, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2016
- [Ata16] Atanasov T.: Theoretischer und simulationsgestützter Vergleich verschiedener Scherprüfverfahren an hochfesten Werkstoffen für das Fertigungsverfahren Durchsetzen, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2016
- [Kin16] Kindsmüller A.: Implementierung einer mit einem FEM-Tool vernetzten Benutzeroberfläche zur Berechnung von Durchsetzbauteilen, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2016
- [Sta17] Stahl, J., Tröber, P., Feistle, M., Golle, R., Volk, W.: An inverse approach for the geometry prediction of sheet metal parts with embossings made of high- and ultra-high strength steels, IDDRG 2017, 2017

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung der Ergebnisse der Parameteridentifizierungsroutine im Journal of Physics
- Veröffentlichung der experimentellen Ergebnisse im Journal of Materials Processing Technology

15 Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to the economy

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss PbA

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die genauen Forschungsdetails sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PbA ausführlich diskutiert.	A1 1. PbA-Sitzung in Garching	21.04.'15
	A2 2. PbA-Sitzung in Garching	04.11.'15
	A3 3. PbA-Sitzung in Darmstadt	27.04.'16
	A4 4. PbA-Sitzung in Darmstadt	07.12.'16
	A5 5. PbA-Sitzung in Darmstadt	26.04.'17

Maßnahme B: Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PbA

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstelle zu einer Vielzahl von Unternehmen.	B1 Ansprache und Akquirieren der Firma Fritz Schiess AG für den projektbegleitenden Ausschuss	09.07.'15
	B2 Vorstellung des Forschungsprojekts auf der <i>utg</i> -Hausmesse durch Plakat und Handzettel	16.07.'15
	B3 Präsentation des Forschungsprojekts durch Handzettel auf dem Kongress Stanztechnik	11.04.'16
	B4 Vorstellung des Forschungsprojekts auf der <i>utg</i> -Hausmesse durch Plakat und Handzettel	14.07.'16
	B5 Vorstellung des Forschungsprojekts auf dem Forming Technology Forum durch Handzettel	12.09.'16

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse auf Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	D1 Ergebnispräsentation auf der Homepage des Produktionskongress 2016	seit November 2016
	D2 Präsentation mit Demonstration im Rahmen einer Lehrstuhlführung während des Produktionskongress 2016	30.11.'16

Maßnahme E: Publikation der Ergebnisse auf der Projekthomepage

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	E1 Präsentation des Forschungsthemas auf der Homepage des <i>utg</i>	seit August 2015
---	--	---------------------

Maßnahme F: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Die Technische Universität München bildet Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Bachelor- und Semesterarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.	F1 Übernahme in die akademische Lehre (Vorlesungen) <ul style="list-style-type: none"> - Virtuelle Prozessgestaltung in Umformtechnik und Gießereiwesen - Fertigungstechnologien - Umformende Werkzeugmaschinen 	seit WS 15/16
	F2 Übernahme in Hochschulpraktika: <ul style="list-style-type: none"> - Praktikum Umformtechnik - Praktikum Messen von Eigenspannungen und Verformungen 	seit WS 15/16

Maßnahmen (G) Nutzung und Industrialisierung der Projektergebnisse

Bereitstellung der Ergebnisse an die Industriepartner, die die Ergebnisse zur Verbesserung Ihrer Produkte nutzen können	G1 Weitergabe der Ergebnisse im Rahmen von PbA Treffen	seit April 2015
---	---	--------------------

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme B: Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PbA

Kontinuierlicher und zielgerichteter Transfer der Ergebnisse durch den engen Kontakt der Forschungsstellen zu einer Vielzahl von Unternehmen.	B6 Ausgabe des Abschlussberichtes an interessierte Unternehmen, die im Bereich der Forschungsschwerpunkte tätig sind.	Ab Juli 2017
	B7 Präsentation der Ergebnisse durch Poster und Handzettel auf der <i>utg</i> -Hausmesse	20.07.'17

Maßnahme C: Publikation der Ergebnisse durch Veröffentlichungen in Zeitschriften

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	C1 Veröffentlichung im Journal of Materials Processing Technology	Oktober 2017
	C2 Veröffentlichung in weiteren, wissenschaftlichen Magazin	Dezember 2017

Maßnahme D: Publikation der Ergebnisse durch Beiträge bei Tagungen und Kongressen

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	D3 IDDRG 2017, München	Juni 2017
---	-------------------------------	-----------

Maßnahme E: Publikation der Ergebnisse auf der Projekthomepage

Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft	E2 Information über Ende des Forschungsprojekts auf der Homepage des <i>utg</i>	Seit Mai 2017
---	--	---------------

Maßnahme F: Übernahme in Lehre und Ausbildung

Die Technische Universität München bildet Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Bachelor- und Semesterarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.	F3 Übernahme in die akademische Lehre (Vorlesungen) - Virtuelle Prozessgestaltung in Umformtechnik und Gießereiwesen	WS 17/18
	F4 Übernahme in die akademische Lehre (Übungen) - Übungstermin „Sensitivitätsanalyse“ in Virtuelle Prozessgestaltung in Umformtechnik und Gießereiwesen	WS 17/18

Maßnahmen (H) Beratung von Unternehmen

Forschungseinrichtungen und erarbeitete Methoden stehen den Partnerunternehmen und Forschungsstellen zur weiteren Erprobung zur Verfügung	G1 Die Versuchseinrichtungen stehen auch nach Projektende den jeweiligen PbA-Mitgliedern sowie dem <i>utg</i> für eine weiterführende Forschung zur Verfügung. Darüber hinaus bietet sich für das Institut auf Basis der bereits im Projekt gewonnenen Erkenntnisse die Möglichkeit zur Beratung von Wirtschaftsunternehmen bei ähnlich gelagerten praktischen Problemstellungen	seit Mai 2017
---	---	---------------

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten
Transferkonzepts

Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

16 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

17 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry

Im Rahmen des Projekts wurden für verschiedene Werkstoffe und Prozessparameter Korrekturmodelle vorgestellt, die eine Vorhersage der Geometrie- und Machbarkeit von Durchsetzungen erlauben.

Durch die Abschätzung der Machbarkeit kann bereits während der Auslegung des Durchsetzprozesses eine Aussage über das Auftreten von Rissen und damit einhergehenden Ausschussteilen getroffen werden. Damit können Kosten durch aufwendige Nacharbeit und fehlerhafte Bauteile vermieden werden. Die Ergebnisse stehen auch kleinen und mittleren Unternehmen zur Verfügung. Gerade da diese in der Regel keine kostenintensive Forschungsabteilung unterhalten, kann ihnen dadurch ein Wettbewerbsvorteil entstehen.

Durch die präzisere Vorhersage der Durchsetzkraft kann die Auslegung der Werkzeuge optimiert erfolgen, wodurch ebenfalls unnötige Kosten durch Über- oder Unterdimensionierung vermieden werden können. Weiterhin ist dies durch die erarbeitete Benutzeroberfläche mit geringem Zeitaufwand möglich.

Auch die Modellerstellung kann dadurch beschleunigt werden. Die automatisierte Zuweisung von Materialmodellen verhindert weiterhin Fehler. Dies macht die Ergebnisse auch für in der FEM unerfahrenere Nutzer zugänglich, wie sie teilweise in kleinen und mittleren Unternehmen ohne Simulationsabteilung angetroffen werden.

Die quellenoffene Implementierung der Benutzeroberfläche erlaubt es der Forschungsgemeinschaft für weitere Werkstoffe und Prozessparameter die zugrundeliegende Datenbank beliebig zu erweitern. Weiterhin können die bereitgestellten Daten zur Überprüfung bestehender Modelle herangezogen werden.

18 Literaturverzeichnis Bibliography

- [Blö14] Blösch AG: *FeinAl : Neue Spezial-Beschichtung für Feinschneiden*. URL <https://www.bloesch.ch/public/media/filer/2014/12/09/feinal.pdf> –
Überprüfungsdatum 2017-05-29
- [Böh09] Böhler Edelstahl GmbH & Co KG: *Böhler 1.2379 : Kaltarbeitsstahl –
Überprüfungsdatum 2017-05-23*
- [Böh14] Böhler Edelstahl GmbH & Co KG: *Böhler K490 microclean :
Kaltarbeitsstahl – Überprüfungsdatum 2017-05-23*
- [Cha04] Chan, L. C., Leung, Y. C., Lee, T. C., Fan, J. P., Tang, C. Y.: *Numerical
simulation for fine-blanking—a new approach*. In: *Materials Science and
Engineering: A* 364 (2004), 1-2, S. 207–215
- [Che03] Chen, Z. H., Chan, L. C., Lee, T. C., Tang, C. Y.: *An investigation on the
formation and propagation of shear band in fine-blanking process*. In:
Journal of Materials Processing Technology 138 (2003), 1-3, S. 610–
614
- [Che99] Chen, Z. H., Tang, C. Y., Chan, L. C., Lee, T. C.: *Simulation of the sheet
metal extrusion process by the enhanced assumed strain finite element
method*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 91 (1999), 1-3,
S. 250–256
- [Dem14] Demmel, P.: *In-situ Temperaturmessung beim Scherschneiden*.
Dissertation. München, 2014. – Dissertation
- [Doe10] Doege, E., Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik : Grundlagen,
Technologien, Maschinen*. 2., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer,
2010 (VDI-Buch)
- [Fei14] Feistle, M., Demmel, P., Goller, R., Volk, W.: *Bestimmung und
Optimierung der prozessbeeinflussenden Parameter beim Durchsetzen
hochfester Stähle*. In: *NEBU, Neuere Entwicklungen in der
Blechumformung* (2014)
- [Hir09] Hirota, K., Yanaga, H., Fukushima, K.: *Experimental and Numerical
Study on Blanking Process with Negative Clearance*. In: *Journal of Solid
Mechanics and Materials Engineering* 3 (2009), Nr. 2, S. 247–255
- [Hof12] Hoffmann, H. Neugebauer, R. Spur, G.: *Handbuch Umformen*. München
: Hanser, 2012 (Edition Handbuch der Fertigungstechnik)
- [Kle10] Klein, Bernd: *FEM : Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-
Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau : mit 12 Fallstudien und 20
Übungsaufgaben*. 8., verb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg +
Teubner, 2010 (Studium)

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der
erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und
ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten
Presentation of the scientific-technological and econo

- [Klo06] Klocke, F., König, W.: *Fertigungsverfahren*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2006 (VDI)
- [Kwa02] Kwak, T.S., Kim, Y.J., Bae, W.B.: *Finite element analysis on the effect of die clearance on shear planes in fine blanking*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 130-131 (2002), S. 462–468
- [Lan88] LANGE, K. (Hrsg.): *Umformtechnik : Band 2: Massivumformung*. 2. völlig Neubearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 1988 (Umformtechnik)
- [Lan90] LANGE, K. (Hrsg.): *Umformtechnik : Band 3: Blechbearbeitung*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1990 (Umformtechnik)
- [Lee97] Lee, T. C., Chan, L. C., Zheng, P. F.: *Application of the finite-element deformation method in the fine blanking process*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 63 (1997), 1-3, S. 744–749
- [Leu04] Leung, Y. C., Chan, L. C., Tang, C. Y., Lee, T. C.: *An effective process of strain measurement for severe and localized plastic deformation*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (2004), 7-8, S. 669–676
- [Man11] Manopulo, N.; HORA, Pavel (Mitarb.); WEGENER, Konrad (Mitarb.) : *An ALE based FE formulation for the 3D simulation of the fineblanking process*. Zürich : ETH/Institut für virtuelle Produktion, 2011
- [Olo05] Olovsson, L. Simonsson, K., Unosson, M.: *Selective mass scaling for explicit finite element analyses*. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 63 (2005), Nr. 10, S. 1436–1445
- [Rom59] Romanowski, W.: *Handbuch der Stanzereitechnik*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1959
- [Sch07] Schmidt, Rolf-A: *Umformen und Feinschneiden : Handbuch für Verfahren, Stahlwerkstoffe, Teilgestaltung*. München [u.a.] : Hanser, 2007
- [Sch96] Schuler GmbH: *Handbuch der Umformtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1996
- [SSA17] SSAB AB: *Strenx Performance Steel : S700MC-mod – Überprüfungsdatum 2017-05-23*
- [Sta17] Stahl, J., Tröber, P., Feistle, M., Golle, R., Volk, W. (Hrsg.): *An inverse approach for the geometry prediction of sheet metal parts with embossings made of high- and ultra-high strength steels*, 2017
- [Ste07] Steinke, Peter: *Finite-Elemente-Methode : Rechnergestützte Einführung ; mit 39 Tabellen*. 2., neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2007
- [Sur15] Suriyapha, C., Bubphachot, B., Rittidech, S.: *Study of Microstructure and Mechanical Properties Effects on Workpiece Quality in Sheet Metal*

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Presentation of the scientific-technological and economic

- Extrusion Process*. In: *TheScientificWorldJournal* 2015 (2015), S. 848126
- [Sur10] Suriyapha, C., Yiemchaiyaphum, S., Bubphachot, B.: *Die Radius Affecting Sheet Metal Extrusion Quality for Fine Blanking Process*. In: *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 3 (2010), Nr. 2, S. 476–481
- [Thi07] Thipprakmas, S., Jin, M., Murakawa, M.: *An investigation of material flow analysis in fineblanking process*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007), S. 237–242
- [Thy13a] Thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH: *Warmgewalztes Mittelband - 22 Mn B 5 : Werkstoffdatenblatt – Überprüfungsdatum 2017-05-23*
- [Thy13b] Thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH: *Warmgewalztes Mittelband - S355MC : Werkstoffdatenblatt – Überprüfungsdatum 2017-05-23*
- [Thy13c] Thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH: *Warmgewalztes Mittelband - S700MC : Werkstoffdatenblatt – Überprüfungsdatum 2017-05-23*
- [Tim56] Timmerbeil, F.: *Der Einfluss der Scheidkantenabnutzung auf den Schneidvorgang am Blech*. In: *Werkstattstechnik und Maschinenbau* 46 (1956), Heft 2, S. 58–66
- [Tim57] Timmerbeil, F.: *Untersuchung des Scheidvorganges bei Blech insbesondere beim geschlossenen Schnitt*. Hannover, Technische Hochschule Hannover. Dissertation. 01.01.1957
- [Vol13] Volk, W., Feistle, M.: *Bestimmung der werkstoffspezifischen prozessbeeinflussenden Parameter und Optimierung der Prozessparameter für das Durchsetzen hochfester Stähle : IGF-Nr. 17103 N = Determination and optimization of the process influencing material specific parameters for the sheet metal extrusion process of high strength steels, 2013 (Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. 892)*
- [Yin14] Yin, Qing: *Verfestigungs- und Schädigungsverhalten von Blechwerkstoffen im ebenen Torsionsversuch*. 1. Aufl. Aachen : Shaker, 2014 (Dortmunder Umformtechnik)
- [Zhe05] Zheng, P. F., Chan, L. C., Lee, T. C.: *Numerical analysis of the sheet metal extrusion process*. In: *Finite Elements in Analysis and Design* 42 (2005), Nr. 3, S. 189–207
- [Zhe06] Zheng, P. F., Chan, L. C., Lee, T. C.: *Finite-element analysis of a combined fine-blanking and extrusion process*. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 66 (2006), Nr. 3, S. 404–430
- [Zhu10] Zhuang, X.-C., Xiang, H., Zhao, Z.: *Analysis of sheet metal extrusion process using finite element method*. In: *International Journal of Automation and Computing* 7 (2010), Nr. 3, S. 295–302

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der
erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und
ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten
Presentation of the scientific-technological and econo

- [Zhu08] Zhuang, X.-C., Zhao, Z., Xiang, H., Li, C.-X.: *Simulation of sheet metal extrusion processes with Arbitrary Lagrangian-Eulerian method*. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 18 (2008), Nr. 5, S. 1172–1176

19 Verwendete Normen Used Standards

- [DIN4957] DIN 4957: Werkzeugstähle
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 02/2001
- [DIN6892-1] DIN 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren
bei Raumtemperatur
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 02/2017
- [DIN8580] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8582] DIN 8580: Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung, Unterteilung,
Begriffe, Alphabetische Übersicht
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8583-5] DIN 8583-5: Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 5: Eindrücken;
Einordnung, Unterteilung, Begriffe
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8583-6] DIN 8583-6: Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 6:
Durchdrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8584-1] DIN 8584-1: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen – Teil 1:
Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8584-3] DIN 8584-3: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen – Teil 3:
Tiefziehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8587] DIN 8587: Fertigungsverfahren Schubumformen – Einordnung,
Unterteilung, Begriffe
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 09/2003
- [DIN8588] DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung,
Begriffe
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 08/2013
- [DIN10083-3] DIN 10083-3: Vergütungsstähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen
für legierte Stähle
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 01/2007
- [DIN10149-2] DIN 10149-2: Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher
Streckgrenze zum Kaltumformen - Teil 2: Technische
Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 12/2013
- [DIN50125] DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 12/2016

[VDI2906-5] VDI 2906 Blatt 5: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall; Feinschneiden
Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag, Berlin, 05/1994