

Patrick Sacher

Rückfederungsreduzierung durch simulationsbasierte
Methodenoptimierung in der Blechumformung

Patrick Sacher

**Rückfederungsreduzierung durch simulationsbasierte
Methodenoptimierung in der Blechumformung**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz
2017**

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Titelgrafik: Patrick Sacher
Satz/Layout: Patrick Sacher

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-96100-030-2

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-227023>

Rückfederungsreduzierung durch simulationsbasierte Methodenoptimierung in der Blechumformung

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Patrick Sacher, M.Eng.
geboren am 21.03.1987 in Salzwedel
eingereicht am 31.12.2016

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus
Prof. Dr.-Ing. Martin Rambke

Tag der Verteidigung: 21.04.2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit habe ich größtenteils als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der *Ostfalia-Hochschule für angewandte Wissenschaften* in Wolfenbüttel angefertigt. An dieser Stelle möchte ich mich bei *Prof. Dr.-Ing. Martin Rambke* herzlich bedanken, da er mich auf diesem Weg begleitet und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat. Weiterhin möchte ich einen Dank an *Prof. Dr.-Ing. Birgit Awiszus* aussprechen, da sie die Betreuung seitens der *TU Chemnitz* übernommen hat.

Ohne das herzliche Umfeld im *Institut für Produktionstechnik* und der tatkräftigen Unterstützung wäre das Ableisten dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Daher gilt mein besonderer Dank den Mitarbeitern *Heinrich Turk, Egbert & Marianne Homeister, Manfred Grochholski, Sven Pape* und *Rainer Brozio*. Ferner möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die mich mit ihren Abschlussarbeiten zu dieser Thematik vorangetrieben haben. Ein besonderer Dank gilt hier *Marc Scholz*. Ohne dich wäre der Werkzeugbau nicht möglich gewesen.

Ein weiterer Dank geht an die Projektpartner *Faurecia* und *Westfalia Presstechnik*, die mit finanziellen Mitteln und ihrem Know diese Arbeit ebenfalls vorangetrieben haben. Vielen Dank an *Wolfgang Harmening, Martin Heuse* und *Kai Kittner*.

Mein größter Dank geht jedoch an meine Familie und meine Freunde. Ihr habt stets Verständnis aufgebracht, wenn ich nicht bei euch sein konnte. Ohne eure Liebe, Ratschläge und aufmunternden Worte wäre ich auf dem halben Weg hängen geblieben. Daher gilt mein besonderer Dank *Cathrin Sacher, Matthias Sacher, Lisa Marie Sacher, Brigitte Beyer* und *Wolfgang Beyer*. Ihr habt mir ein tolles familiäres Umfeld gegeben und mich stets ermuntert weiter zu machen und nicht aufzugeben. Mein ausdrücklicher Dank geht an *Lisa Ritzmann*, die meine physische und teilweise auch geistige Abwesenheit ertragen musste und mir mit ihrer liebevollen Art dennoch stets zur Seite gestanden hat. Vielen Dank an alle meine Freunde. Leider reicht der Platz nicht aus, um euch alle namentlich aufzuzählen. Jedoch möchte ich mich besonders bei *Karsten Schulz* bedanken, der mir bei einer netten Unterhaltung am *Neptunbrunnen in Trient* einen entscheidenden Motivationsschub gegeben hat.

Kurzfassung

Bisherige Bemühungen zur Reduzierung der Rückfederung von Blechbauteilen begrenzten sich hauptsächlich auf die Gestaltung der letzten Formgebungsstufe. In der vorliegenden Arbeit wird ein innovativer Ansatz zur Erhöhung der Maßhaltigkeit durch die Modifikation der Vorziehstufe untersucht. Dabei wird auf Grundlage eines beispielhaften Industriebauteils ein Demonstrator mit einer offenen und einer geschlossenen Kontur entwickelt. Durch die Abbildung der Herstellungsmethode in der Simulation (FEM) lässt sich die Rückfederung beurteilen. Durch die Charakterisierung des Werkstoffverhaltens wird die Qualität der Simulation gesteigert, da die Materialkennwerte (Fließkurve & Grenzformänderungskurve) für die Simulation genauer spezifiziert werden können. Es erfolgt die Variation der Vorziehstufe hinsichtlich geometrischer (Radius & Grad der Vorziehstufe) und prozesstechnischer Parameter (Niederhalterkraft & Schließabstand), sodass nach der Auswertung der Rückfederungsergebnisse Gestaltungshinweise erarbeitet werden. Die Validierung der Simulationsergebnisse wird vorgenommen, indem die Bauteile real hergestellt werden. Dadurch ist es möglich, die Rückfederungen der Simulation und der realen Herstellungsmethode zu vergleichen und die Gestaltungshinweise zu bewerten.

Schlüsselwörter: Blechumformung, Tiefziehen, Rückfederung, Simulation, Methodenplanung

Abstract

Approaches to reduce springback of sheet metal parts are mainly focused on the last forming stage. This study deals with modifications made on the pre-drawing stage so that an increased dimensional accuracy results. A demonstrator with an open and a closed contour is developed based on an exemplary industrial part. The assessment of springback is conducted by incorporating the manufacturing method into simulation (FEM). To increase the quality of the simulation the characterization of materials is set and hence more information about material properties (flow curve and forming limit curve) is specified. Variations of geometric (radius & proportion of pre-drawing stage) and process parameters (blankholder force & closing distance) are made which purpose the development of design guidelines after evaluation. The simulation results are validated by producing real sheet metal parts. The design guidelines will be feasible/can be assessed if the comparison of the springback results converges between simulation and reality.

Keywords: sheet metal forming, deep-drawing, springback, simulation, die design

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	1
2	<i>Stand der Technik</i>	3
2.1	Blechwerkstoff	4
2.2	Fertigungsverfahren	5
2.3	Spannungen und Formänderungen	9
2.4	Rückfederung	13
2.4.1	Ursachen und Mechanismen	13
2.4.2	Rückfederungsreduzierung	17
2.5	Methodenplanung	21
2.5.1	Einordnung und Vorgehensweise	21
2.5.2	Werkzeuge der Methodenplanung	22
2.6	Simulation	23
2.6.1	Simulation im Produktentstehungsprozess.....	23
2.6.2	Einflussfaktoren auf die Rückfederungssimulation.....	24
2.7	Zwischenfazit Stand der Technik	28
3	<i>Zielsetzung und Vorgehensweise</i>	29
3.1	Zielsetzung	29
3.2	Vorgehensweise	29
4	<i>Demonstrator- und Methodenentwicklung</i>	31
4.1	Praxisbauteil	32
4.2	Hydraulische Presse	34
4.3	Konzept Demonstrator	35

4.4	CAD-Konstruktion	36
4.5	Inverse Simulation	38
4.6	Inkrementelle Simulation.....	39
4.7	Offener Demonstrator	41
4.8	Methodenentwicklung.....	42
4.9	Variationsmöglichkeiten	44
5	<i>Charakterisierung des Werkstoffverhaltens</i>	47
5.1	Ermittlung der Fließkurve	47
5.2	Ermittlung der Grenzformänderungskurve	53
6	<i>Simulationsbasierte Variationsrechnungen</i>	57
6.1	Aufbau der Referenzsimulation.....	57
6.1.1	Platine OP10.....	57
6.1.2	Vorziehstufe OP 20.....	59
6.1.3	Beschnitt OP30.....	61
6.1.4	Ziehstufe OP40	62
6.1.5	Rückfederung OP50.....	64
6.2	Rückfederungsergebnisse der Referenzsimulation	65
6.3	Fließkurvenstreuung und Modifikation der Vorziehstufe	73
6.3.1	Fließkurvenstreuung	74
6.3.2	Radius.....	76
6.3.3	Grad der Vorziehstufe	81
6.3.4	Niederhalterkraft	83
6.3.5	Schließabstand	86
6.4	Hauptspannungsdifferenz	89

7	<i>Validierung der Simulationsergebnisse</i>	93
7.1	Werkzeugkonstruktion	93
7.1.1	Konzeptionierung.....	93
7.1.2	CAD-Konstruktion.....	95
7.2	Werkzeugbau	97
7.2.1	Fertigung der Werkzeugelemente	98
7.2.2	Normalien.....	99
7.2.3	Zusammenbau des Werkzeuges.....	100
7.2.4	Einbau des Werkzeuges	100
7.2.5	Umbau des Werkzeuges.....	101
7.3	Try-Out	102
7.3.1	Faltenreduzierung	102
7.3.2	Überprüfung Ziehtiefe Innenkontur.....	104
7.4	Versuchsreihe	106
7.4.1	Vorziehstufe OP20.....	106
7.4.2	Beschnitt OP30.....	109
7.4.3	Ziehstufe OP40.....	110
7.4.4	Methodenvergleich Simulation und Realität	111
7.5	Auswertung reale Versuche	112
7.5.1	Versuchsvorbereitung.....	112
7.5.2	Plausibilisierung Wiederholbarkeit	114
7.5.3	Ergebnisse Referenzversuche.....	116
7.5.4	Ergebnisse Niederhaltervariation.....	116
7.5.5	Ergebnisse Variation Schließabstand	118
7.5.6	Ergebnisvergleich Simulation und Realität.....	119
7.5.7	Zusammenfassung der reale Versuche	122
8	<i>Methodische Gestaltungshinweise</i>	123

9 Zusammenfassung und Ausblick.....	125
Literaturnachweis	129
Anhang 1: Messpunkte Demonstrator	139
Anhang 2: Materialkennwerte Zugversuch	140
Anhang 3: Fließspannung über Umformgrad	141
Anhang 4: Fertigungszeichnung Distanz	142
Anhang 5: Versuchsplan offener Demonstrator	143
Anhang 6: Werkzeugkomponenten.....	144

Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

A	Austenit
BH	Bake Hardening
BTL	Bauteil
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CP	Complexphasenstahl
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Dualphasenstahl
F	Ferrit
FB	Funktionsbereich
Fe	Eisen
FEM	Finite-Elemente-Methode
GK	Grundkontur
GFD	Grenzformänderungsdiagramm
GFK	Grenzformänderungskurve
HSD	Hauptspannungsdifferenz
IF	Interstitial Free
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
KMG	Koordinatenmessgerät
LP	Lagerpunkt
M	Martensit
MA	Matrize
MAX	Maximale Fließkurve (DP1000)
MB	Messbereich
MID	Mittlere Fließkurve (DP1000)
MIN	Minimale Fließkurve (DP1000)

XVI

MP	Messpunkt
MS	Martensitphasenstähle
NC	Numeric Control
NH	Niederhalter
OP	Operation
RPS	Referenz-Punkt-System
S	Schnittebene
ST	Stempel
St	Steg
TRIP	Transformation Induced Plasticity
UT	Unterer Totpunkt der Presse
WR	Walzrichtung
WZG	Werkzeug
Za	Zarge
ZSB	Zusammenbau
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild

Einheiten

kg	Kilogramm
m	Meter
s	Sekunde
mm	Millimeter
$N = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$	Newton

Lateinische Buchstaben

A_0	mm^2	Ausgangsquerschnittsfläche Zugprobe
A_{80}	%	Bruchdehnung
A_g	%	Gleichmaßdehnung
b_0	mm	Ausgangsbreite Zugprobe

b_1	mm	aktuelle Zugprobenbreite
b_{Btl}	mm	Bauteilbreite Demonstrator
C	N^*s/mm	Dämpfungsmatrix
c_1	mm	Stegbreite Demonstrator
d_0	mm	Ausgangsdurchmesser
d_1	mm	großer Ellipsendurchmesser
d_2	mm	kleiner Ellipsendurchmesser
$d_{gro\beta}$	mm	großer Durchmesser Grundkontur
d_{klein}	mm	kleiner Durchmesser Grundkontur
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
e	mm	Schließabstand
F	N	Kraft
F_A	N	Auflagerkraft
F_{ext}	N	Äußere Kraft
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
F_{St}	N	Stempelkraft
F_{SU}	N	Supportkraft
h_1	mm	Bauteilhöhe Demonstrator
K	N/mm	Steifigkeitsmatrix
k	N/mm^2	Werkstoffbeiwert
k_f	N/mm^2	Fließspannung
l_0	mm	Ausgangslänge Zugprobe
l_1	mm	aktuelle Zugprobenlänge
l_{Btl}	mm	Bauteillänge Demonstrator
l_{Kr}	mm	Konstruktionskrümmungsabstand Demonstrator
l_{max}	mm	maximale Elementenkantenlänge
M	kg	Massenmatrix
M_b	Nm	Biegemoment
M_e	Nm	Entlastungsmoment
n	-	Verfestigungsexponent

XVIII

$R_{p0.2}$	N/mm^2	Dehngrenze
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
R_z	μm	gemittelte Rauhtiefe
r	-	senkrechte Anisotropie
Δr	-	ebene Anisotropie
r_0	-	Anisotropie längs zur Walzrichtung
r_{45}	-	Anisotropie diagonal zur Walzrichtung
r_{90}	-	Anisotropie quer zur Walzrichtung
r_1	mm	Innenradius Innenkontur Demonstrator
r_2	mm	Außenradius Innenkontur Demonstrator
r_3	mm	Außenradius Außenkontur Demonstrator
r_4	mm	Innenradius Außenkontur Demonstrator
r_{St}	mm	Stempelkantenradius
r_m	mm	Ziehkantenradius
r_{min}	mm	minimaler Werkzeugradius
s_0	mm	Ausgangsblechdicke Zugprobe
s_1	mm	aktuelle Zugprobendicke
t	s	Zeit
t_1	mm	Ziehtiefe Innenkontur Demonstrator
t_2	mm	Ziehtiefe Außenkontur Demonstrator
T	$^{\circ}C$	Temperatur
x	mm	Verschiebung
\dot{x}	mm/s	Geschwindigkeit
\ddot{x}	mm/s ²	Beschleunigung

Griechische Buchstaben

α	$^{\circ}$	Zargenwinkel
β	$^{\circ}$	Flanschwinkel
γ	$^{\circ}$	Öffnung des Innenzargenwinkels

δ	°	Krümmungswinkel
ε	%	Dehnung
ε_b	%	Biegedehnung
ε_{res}	%	Restdehnung
μ	-	Reibfaktor
ν	-	Querkontraktion
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_1	1/m	Zargenkrümmung
σ	N/mm ²	Spannung
σ_b	N/mm ²	Biegespannung
σ_{Haupt_diff}	N/mm ²	Hauptspannungsdifferenz
σ_{Haupt_oben}	N/mm ²	Hauptspannungen obere Membran
σ_{Haupt_unten}	N/mm ²	Hauptspannungen untere Membran
σ_n	N/mm ²	Normalspannungen
σ_r	N/mm ²	Radialspannungen
σ_{res}	N/mm ²	Restspannung
σ_t	N/mm ²	Tangentialspannungen
σ_{x+}	N/mm ²	Zugspannungen in x-Richtung
σ_{x-}	N/mm ²	Druckspannungen in x-Richtung
σ_{y+}	N/mm ²	Zugspannungen in y-Richtung
σ_{y-}	N/mm ²	Druckspannungen in y-Richtung
σ_{z+}	N/mm ²	Zugspannungen in z-Richtung
σ_{z-}	N/mm ²	Druckspannungen in z-Richtung
φ	-	Logarithmische Formänderung
φ_1	-	Hauptformänderung
φ_2	-	Nebenformänderung

1 Einleitung

Betrachtet man die Kundenanforderungen an ein Fahrzeug in der heutigen Zeit, so stellt man fest, dass neben dem Preis vor allem ein geringer Kraftstoffverbrauch und eine niedrige Umweltbelastung für die Kaufentscheidung verantwortlich sind. Weiterhin gibt es gesetzliche Forderungen, den CO₂-Ausstoß zu senken. Durch die Gewichtsreduzierung von Autos können diese Ansprüche erfüllt werden. Der größte Masseanteil in einem Fahrzeug befindet sich in der Karosserie [BRA11, S.392]. Daher unternehmen Automobilhersteller enorme Anstrengungen, den Leichtbau voranzutreiben. Neben alternativen Materialien wie Aluminium und kohlefaserverstärkten Kunststoffen werden vor allem weiterhin Stähle eingesetzt, um eine Gewichtsreduktion zu erzielen [GOE07]. Dabei nimmt trotz steigender Bedeutung der Warmumformprozesse die Kaltumformung den größten Anteil der Blechumformung ein. Dies ist besonders in der geringeren Anlagenkomplexität, der einfacheren Prozessbeherrschung und den geringeren Zykluszeiten begründet [WIL12].

Durch den Einsatz von hochfesten Stahlsorten lassen sich konventionelle Tiefziehstähle substituieren. Der Vorteil besteht darin, dass bei gleichen Festigkeits- und Craschanforderungen geringere Blechdicken eingesetzt werden können. Somit besteht ein großes Potential, das Karosseriegewicht zu senken und somit Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emission zu reduzieren [THY99][WEB11].

Problematisch bei dieser Entwicklung ist, dass geringere Blechdicken und höhere Festigkeiten der Blechwerkstoffe zu erhöhten Rückfederungen der Blechbauteile führen [HÜT01][DOE10]. Durch die zunehmende Automatisierung im Karosseriebau besteht jedoch die Forderung nach maßhaltigen Blechformteilen. Ferner befindet sich die Umformung am Anfang der Prozesskette, womit die Herstellung von Bauteilen innerhalb vorgegebener Toleranzen essentiell ist. Die Beherrschung der Rückfederung nimmt somit einen immensen Stellenwert ein.

Es gibt einige Maßnahmen zur Reduzierung von rückfederungsbedingten Formabweichungen. Zielführend können hierbei geometrische und prozesstechnische Änderungen sein. Beispielsweise werden Bauteilradien verkleinert [HÜT01] oder Niederhalterkräfte erhöht, um den plastischen Dehnungsanteil der Umformung zu steigern und die Rückfederung zu reduzieren. Dabei besteht das Problem, dass oftmals die Herstellbarkeit mit diesen Maßnahmen verschlechtert wird [CAR11]. Ferner wird die Rückfederungskompensation angewendet. Das Bauteil springt nach der Umformung in die richtige Bauteillage, da die Werkzeugwirkflächen eine andere Form aufweisen. Auch dieser Anwendungsbereich ist begrenzt, da zur Herstellung bestimmter Formen ein Hinterschnitt notwendig wäre [ROL04].

Die Methodenplanung ist ein wichtiger Bestandteil, bei der aus der Vorgabe des Fertigteils das Umformteil abgeleitet wird. Zudem werden die einzelnen Operationen festgelegt, die für die Herstellung des Karosserieteils erforderlich sind [FLE09]. Hochfeste Strukturbauteile werden oft in mehrstufigen Umformprozessen hergestellt. Besonders die Auslegung der Vorziehstufe erfolgt bislang zum größten Teil erfahrungsbasiert.

Ein wichtiges Werkzeug des Methodenplaners ist die Umformsimulation. Hiermit kann dieser die Herstellbarkeit seiner gewählten Methode absichern. Auch die Rückfederungsvorhersage mittels Simulation hat sich in den letzten Jahren etabliert. Die steigende Anzahl von Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet verbessert die Prognosemöglichkeiten der Rückfederung.

Da die Modifikation der Vorziehstufe und die Bewertung hinsichtlich der Rückfederung nach der Gesamtumformung bisher noch nicht Forschungsgegenstand war, soll dieser Sachverhalt mit der vorliegenden Arbeit erörtert werden. Dabei sollen mittels Umformsimulation eine Vielzahl an Variationsrechnungen virtuell vorgenommen werden, um rückfederungsreduzierende Gestaltungshinweise abzuleiten. Der Abgleich der Simulationsergebnisse soll durch Realversuche verifiziert und sichergestellt werden.

2 Stand der Technik

An Hand der Produktion und der Entwicklung eines beispielhaften Karosserieblechbauteils ergeben sich die Themengebiete, die mit dem Stand der Technik betrachtet werden. Es ergibt sich eine reale Prozesskette zur Herstellung und eine virtuelle Prozesskette zur Entwicklung des Bauteils. Dieser Zusammenhang wird in *Abbildung 2.1* visualisiert.

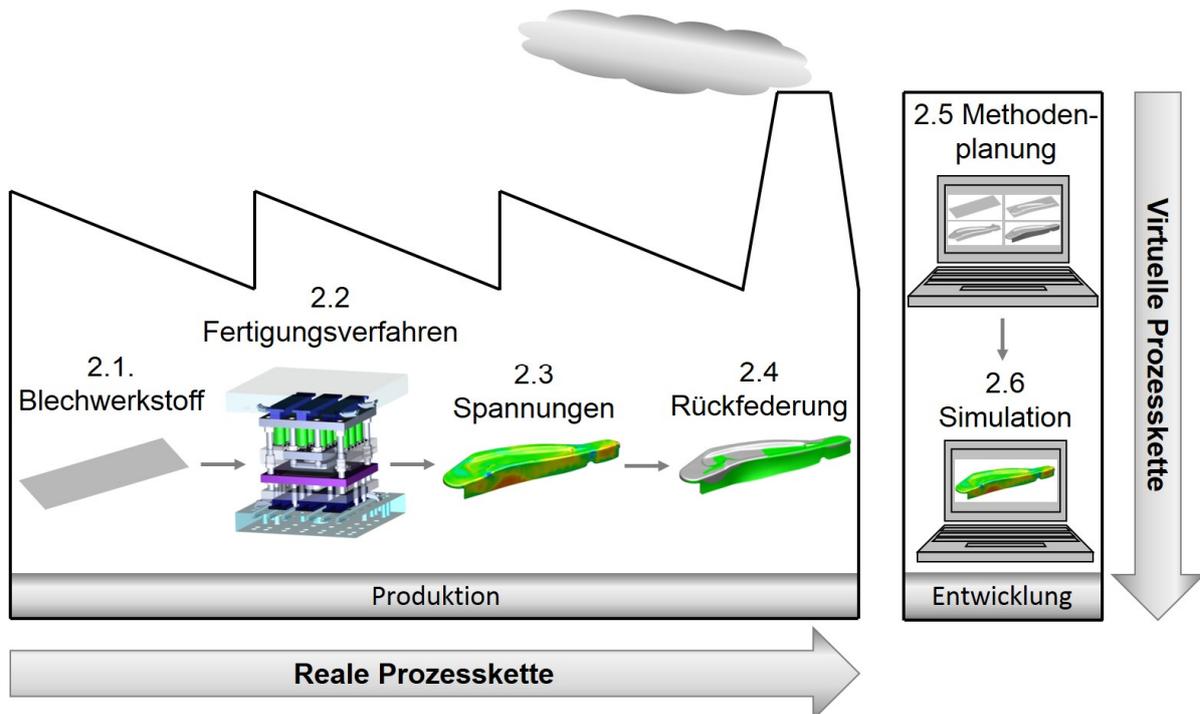


Abbildung 2.1: Produktion und Entwicklung eines Karosseriebauteils

Zur Produktion des Bauteils ist der Blechwerkstoff (*siehe Abschnitt 2.1*) erforderlich. Die Erzeugung der Bauteilgeometrie erfolgt durch unterschiedliche Fertigungsverfahren (2.2). Auf Grund der Bauteilspannungen (2.3), die während der Formgebung initialisiert werden, tritt die Rückfederung (2.4) nach der Bauteilentnahme auf.

Da die Karosseriebauteilfertigung kosten- und zeitintensiv ist, erfolgt die Entwicklung mittels virtueller Prozessauslegung. Dazu wird das digitale Bauteil an die Methodenplanung (2.5) übergeben. Die Mitarbeiter dieser Abteilung erarbeiten unter anderem die notwendigen Fertigungsprozesse und die dazugehörigen Werkzeugwirkflächen. Die Prozessabsicherung wird im Anschluss mittels Simulation (2.6) vorgenommen. Dies hat den Vorteil, dass die Beurteilung des Herstellungsprozesses vor der eigentlichen Fertigung erfolgen kann.

Folgend werden die Themengebiete zur Produktion und Entwicklung eines Karosseriebauteils detailliert betrachtet.

2.1 Blechwerkstoff

Am Anfang der Prozesskette zur Herstellung von Karosseriebauteilen steht das Halbzeug und somit der Blechwerkstoff. *Tabelle 2-1* zeigt eine Auswahl von Werkstoffen, die häufig in der Automobilindustrie eingesetzt werden.

Tabelle 2-1: Auswahl Blechwerkstoffe Automobilbau

Klassifizierung	Norm	Stahlsorte	Beispiel	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
weich	DIN EN 10130	weiche Tiefziehgüten	DC04	270-350	38
höherfest	DIN EN 10268	IF-Stahl	HC180Y	340-400	36
		Bake Hardening Stahl	HC180B	300-360	34
		Isotroper Stahl	HC220I	300-380	34
		Mikrolegierter Stahl	HC260LA	350-430	26
		Phosphorlegierter Stahl	HC300P	400-480	26
Mehrphasenstahl	DIN EN 10338	Dualphasenstahl	HCT780X	780	14
		Complexphasenstahl	HCT780C	780	10
		TRIP-Stahl	HCT780T	780	21

Weiche Stahlwerkstoffe weisen auf Grund der ferritischen Matrix ein hohes Verformungsvermögen bei geringer Festigkeit auf [MOE14]. Hierzu zählen die konventionellen Tiefziehgüten wie DC04. Eine Festigkeitssteigerung kann durch Zugabe von Legierungselementen (z.B. bei mikrolegierten oder phosphorlegierten Stählen) oder durch das Einbrennlackieren (BH-Stähle) erreicht werden. Jedoch bedeutet eine Vergrößerung der Festigkeit auch eine geringere Bruchdehnung und somit ein schlechteres Umformvermögen. Diese Stähle werden als höherfest bezeichnet, da eine Zugfestigkeit über 300 MPa vorhanden ist [KLO06]. Im Zuge der steigenden Festigkeitsanforderungen durch die Automobilindustrie sind hochfeste Mehrphasenstähle entwickelt worden. Hierzu zählen beispielsweise Dualphasenstähle (DP), Complexphasenstähle (CP) und TRIP-Stähle. Diese hochfesten Werkstoffe werden mit steigender Tendenz im Karosseriebau verwendet, da reduzierte Blechdicken bei gleichbleibenden Festigkeitsanforderungen eingesetzt werden können.

Da in dieser Untersuchung ein HCT980X ausgewählt wurde, werden die Grundlagen des Dualphasenstahls näher betrachtet. Neben der ferritischen Grundmatrix gibt es eine zweite Phase, die aus Martensit besteht. Diese kann einen Anteil von bis zu 25% ausmachen und liegt fein verteilt in einer inselartigen Form vor [MOE14].

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten, Dualphasenstahl herzustellen. Die konventionelle Abkühlung beruht darauf, dass der Werkstoff aus dem reinen Austenitbereich beschleunigt in den Ferritbereich abgekühlt wird. Anschließend erlaubt eine definierte Kühlpause die Umwandlung in Ferrit. Im letzten Schritt gibt es wieder eine beschleunigte Abkühlphase, damit der restliche Austenit in Martensit umgewandelt wird [HEL04].

Die zweite Herstellungsmethode beruht auf dem interkritischen Glühen. Dabei wird ein ferritisch-perlitischer Grundwerkstoff in das Zweiphasengebiet von Ferrit und Austenit aufgeheizt. Die anschließende beschleunigte Abkühlung sorgt dafür, dass in den Austenitkörnern eine Martensitbildung einsetzt. Durch unterschiedliche Abkühlraten kann der Martensitgehalt gesteuert werden [LIE03].

Abbildung 2.2 verdeutlicht die unterschiedlichen Herstellungsmethoden der konventionellen Abkühlung und des interkritischen Glühens im Zeit- Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU). Außerdem werden der Verlauf im Eisenkohlenstoffdiagramm und das erzielte Gefügeschaubild aufgezeigt.

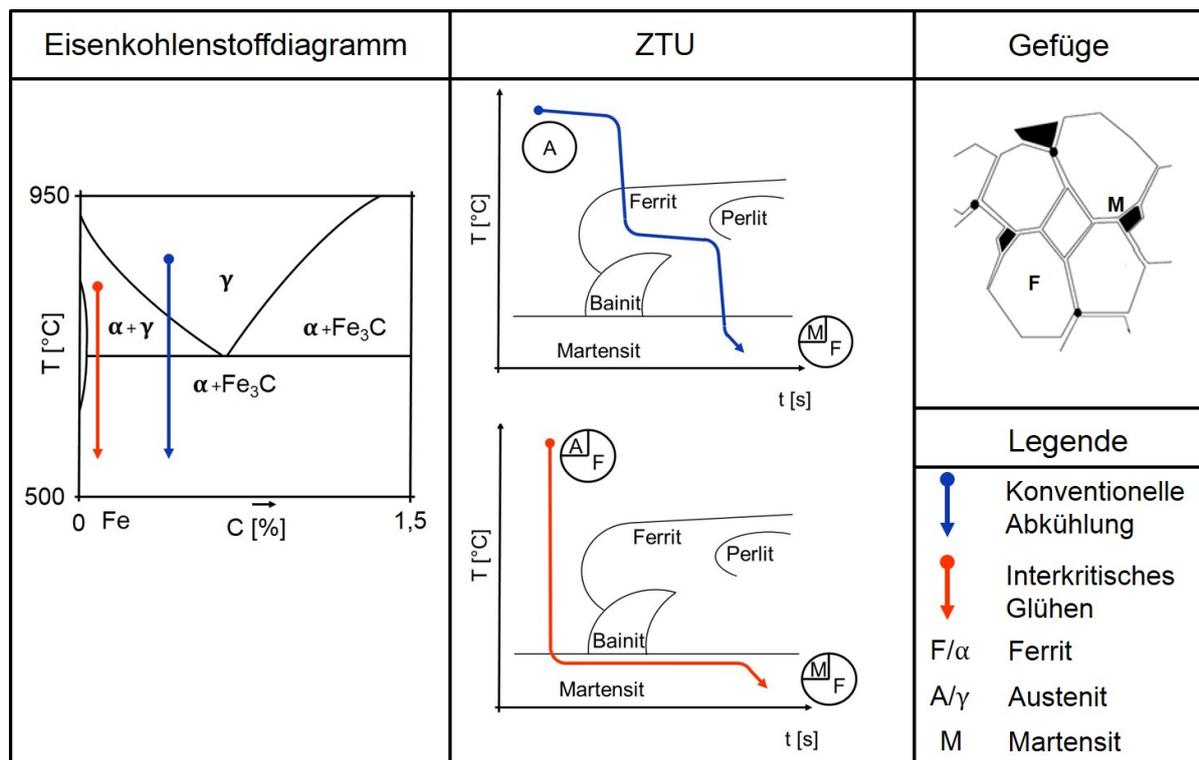


Abbildung 2.2: Herstellung DP

Die Charakteristik der Dualphasenstähle besteht darin, dass eine starke Verfestigung schon bei sehr kleinen plastischen Dehnungen auftritt. Weiterhin ist eine Quasi-Isotropie vorhanden. Das bedeutet, dass bei einem Näpfcenzug nahezu keine Zipfelbildung beobachtet wird [BUS07]. Ferner wirkt sich ein relativ hoher Kohlenstoffgehalt von bis zu 0,14% auf die Schweißbarkeit des Stahls aus. Eine ausführliche Beschreibung der Eigenschaften von Mehrphasenstählen nehmen Gerber und Horn vor [GER98].

2.2 Fertigungsverfahren

Um die erforderliche Produktgestalt eines Karosseriebauteils herzustellen, sind verschiedene Fertigungstechnologien notwendig. *Abbildung 2.3* zeigt auf, dass das Deutsche Institut für Normung (DIN) die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen

differenziert [DIN03a]. In der Automobilindustrie sind umformende Arbeitsschritte zur Herstellung von Blechbauteilen unerlässlich. Beim Umformen wird die Form eines festen Körpers plastisch geändert. Hierbei bleiben die Masse und der Stoffzusammenhalt unverändert.

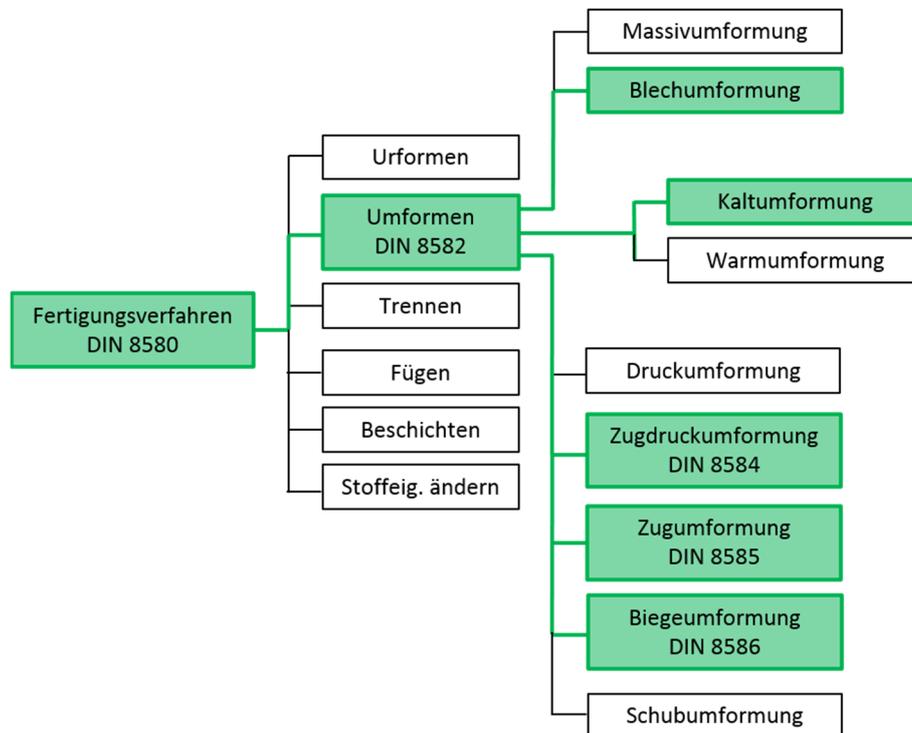


Abbildung 2.3: Einordnung Umformen

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der praxisnahen Unterscheidung des eingesetzten Halbzeuges für das Umformverfahren. Demnach kann in Massiv- und Blechumformung differenziert werden. Die Massivumformung ist für die Karosseriebauteilherstellung nur von peripherer Bedeutung, da durch einen Walzprozess aus einer massiven Bramme das Halbzeug Blech hergestellt wird. Kennzeichnend für das Ausgangsmaterial der Blechumformung ist eine geringe Blechdicke im Verhältnis zur Breite und Länge des Materials. Da die meisten Karosserieblechteile eine kleinere Blechdicke als 3 mm aufweisen, können diese den Feinblechen zugeordnet werden [DIN06b]. Mit zunehmender Fertigungstiefe steigt die Bedeutung der Blechumformung [LAN90]. Obwohl die Blechumformung in andauernder Konkurrenz zur Kunststoffverarbeitung steht [KLO06], wird die Herstellung von Karosseriebauteilen nahezu ausschließlich von diesem Verfahren bestimmt. Im Vergleich zur Massivumformung treten in der Regel geringere Umformgrade, Werkzeugbelastungen, Werkstoffverfestigungen und Wanddickenänderungen auf.

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit von umformenden Verfahren zur Herstellung von Karosseriebauteilen ist in der Temperatur begründet. Wird das Blech vor der Umformung erhitzt, kann man von Warmumformung sprechen. Beispielsweise erlangt das Presshärten eine zunehmende Bedeutung in der Automobilproduktion

[OLL10]. Da die Kaltumformung jedoch einen einfacheren und oftmals wirtschaftlicheren Prozess darstellt, ist dies die Hauptanwendung zur Herstellung von Karosseriebauteilen. Da in der Warmumformung die Rückfederungsproblematik quasi nicht vorhanden ist, beschränkt sich diese Untersuchung auf den Bereich der Kaltumformung.

Eine mögliche Einteilung der Hauptgruppen in Untergruppen kann durch die auftretenden Spannungszustände in der Hauptformzone des Bauteils geschehen. Zur Herstellung von Blechformteilen in der Automobilindustrie werden vorwiegend Tiefzieh- und Streckziehoperationen angewendet [DEN06]. Zur Herstellung von Außenhautteile werden diese Verfahren kombiniert. Besonders zur Strukturbauteilherstellung ist zusätzlich die Biegeumformung [DIN03e] ein weiteres wichtiges Verfahren. Während das Tiefziehen der Zugdruckumformung [DIN03c] zugeordnet wird, ist das Streckziehen eine Zugumformung [DIN03d].

Des Weiteren ist das Scherschneiden (Untergruppe Zerteilen [DIN03f]) als trennendes Fertigungsverfahren von weiterer Bedeutung für die Herstellung von Karosseriebauteilen. Die Einordnung der trennenden Verfahren ist in *Abbildung 2.4* ersichtlich.

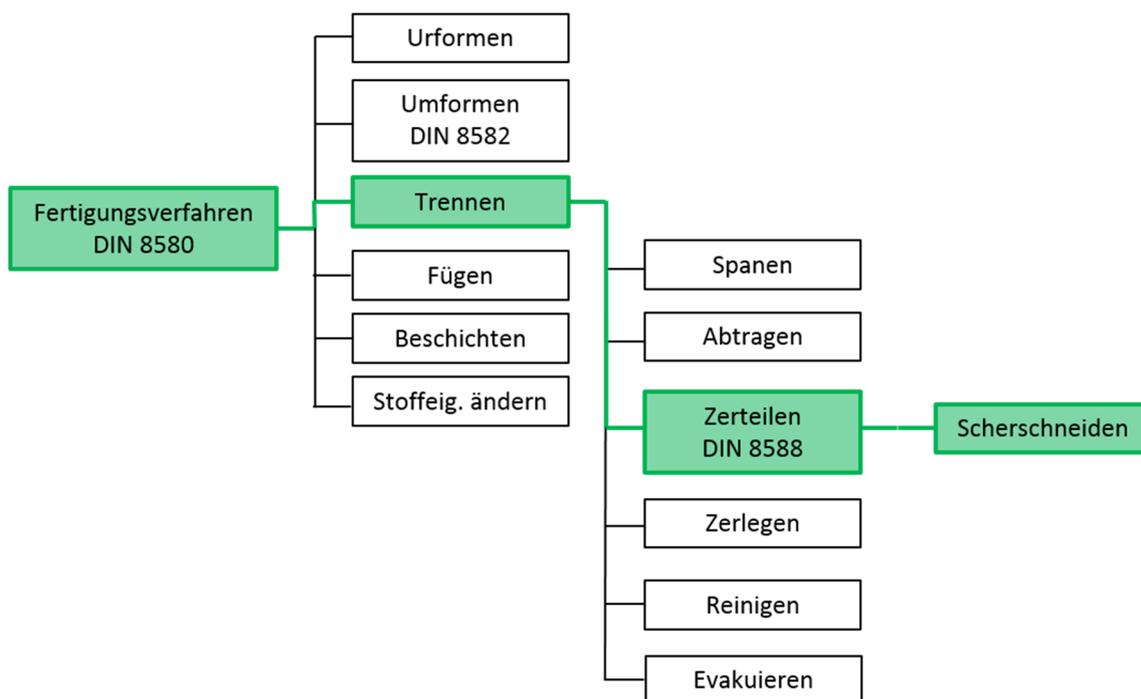


Abbildung 2.4: Einordnung Trennen

Einen Überblick der umformenden und trennenden Fertigungsverfahren, die für die Herstellung von Karosseriebauteilen und dementsprechend für diese Forschungsarbeit relevant sind, gibt *Abbildung 2.5*.

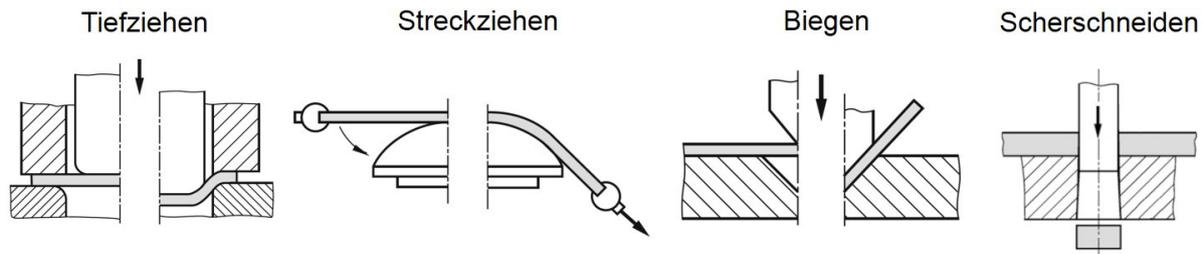


Abbildung 2.5: Übersicht relevanter Fertigungsverfahren nach [FRI12]

Folgend werden die umformenden Fertigungsverfahren vorgestellt, die für die Herstellung von Karosserieblechteilen von entscheidender Bedeutung sind. Das wichtigste Formgebungsverfahren zur Herstellung von hohlkörperförmigen Blechteilen in der Automobilindustrie ist das Tiefziehen [LAN90][KLO06][MUN08][DOE10]. In *Abbildung 2.6* ist der Tiefziehvorgang beispielhaft an einem rotationssymmetrischen Bauteil dargestellt. Weiterhin sind die benötigten Werkzeugkomponenten ersichtlich.

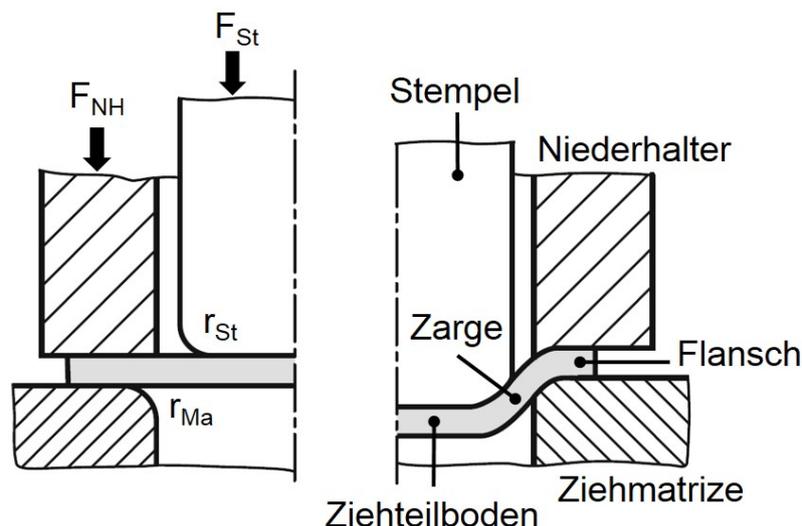


Abbildung 2.6: Tiefziehen

Die Platine ist ein zugeschnittenes Blech. Da es sich um einen runden Zuschnitt handelt, ist auch der Begriff Ronde zutreffend. Diese wird auf der Ziehmatrize platziert. Im nächsten Verfahrensschritt übt der Niederhalter (NH) eine definierte Kraft (F_{NH}) aus, sodass das Blech fixiert ist. Die Wahl der Niederhalterkraft ist dabei von entscheidender Bedeutung, um ein Bauteil ohne Umformfehler wie Falten oder Reißen herzustellen. Der Stempel verfährt Richtung Ronde und übt nach dem Kontakt mit dieser eine definierte Stempelkraft (F_{St}) aus. Zunächst werden durch das Streckziehen der Ziehteilboden und die Zarge ausgebildet. Anschließend wird durch den Flanscheinzug die Tiefziehphase eingeleitet. In den Bereichen des Stempelkantenradius r_{St} und des Matrizenradius r_{Ma} treten Biegevorgänge am Napf auf.

Bei der Herstellung von realen Karosseriebauteilen unterscheiden sich die Anteile der unterschiedlichen Belastungen [DIE94]. Besonders bei der Herstellung von groß-

flächigen Karosseriebauteilen wie Motorhauben kann die Streckziehbeanspruchung die Tiefziehbeanspruchung überschreiten [BRA11, S.421]. Bei Strukturbauteilen erfolgt hauptsächlich die Kombination aus Tiefzieh- und Biegebeanspruchungen.

2.3 Spannungen und Formänderungen

Die Charakterisierung für den einachsigen Spannungszustand von Blechwerkstoffen wird in erster Linie durch den Flachzugversuch bestimmt [DIN09a]. Die genormte Zugprobe wird unter Krafteinwirkung bis zum Bruch gelängt. Die Spannung σ berechnet sich aus der Kraft und der Querschnittsfläche der Ausgangsprobe A_0 .

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{b_0 * s_0} \quad (2.1)$$

Die Dehnung entspricht der Längenänderung der Probe bezogen auf die Ausgangslänge.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

Somit ergibt sich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Das elastische Verhalten von metallischen Werkstoffen kann durch das Hookesche Gesetz beschrieben werden, da die Spannung und die Dehnung einen nahezu linearen Zusammenhang aufweisen.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.3)$$

Die schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms und der Flachzugproben vor und während der Umformung erfolgen in *Abbildung 2.7*.

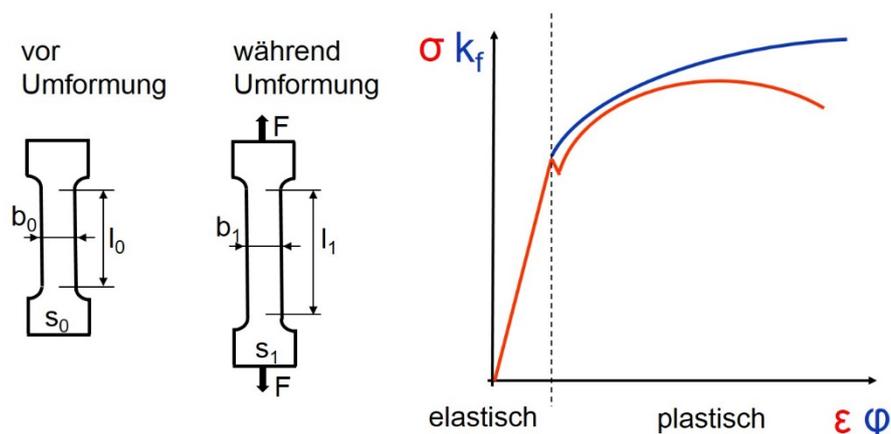


Abbildung 2.7: Flachzugversuch

Die Fließspannung k_f eines Werkstoffes ist die Spannung, die zur Einleitung bzw. zur Aufrechterhaltung einer bleibenden Formänderung im einachsigen Spannungszustand notwendig ist. Hierzu wird die Kraft nicht auf den Ausgangsquerschnitt bezogen, sondern auf den aktuellen Probenquerschnitt während der Umformung. Dies hat zur Folge, dass die wahren Spannungen ermittelt werden.

$$k_f = \frac{F}{A_1} = \frac{F}{b_1 * s_1} \quad (2.4)$$

Die logarithmische Formänderung ist ein Maß für die plastische Formänderung.

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (2.5)$$

Trägt man demnach die Fließspannung k_f über der Formänderung φ auf, erhält man die Fließkurve. Der Verlauf der Fließkurve ist von dem Werkstoff, dem Umformgrad, der Temperatur und der Umformgeschwindigkeit abhängig [LAN90][HAR01]. Die Ermittlung der Fließkurve durch den Zugversuch ist gebräuchlich, jedoch sollte auf Grund der verhältnismäßig kleinen Umformgrade eine Extrapolation der Kurve erfolgen [LAN84].

Bei der Umformung von Blechbauteilen treten jedoch nicht einachsige, sondern mehrachsige Spannungszustände auf. Die unterschiedlichen Beanspruchungen sollen an Hand eines Tiefziehvorganges im Anschlag idealisiert beschrieben werden.

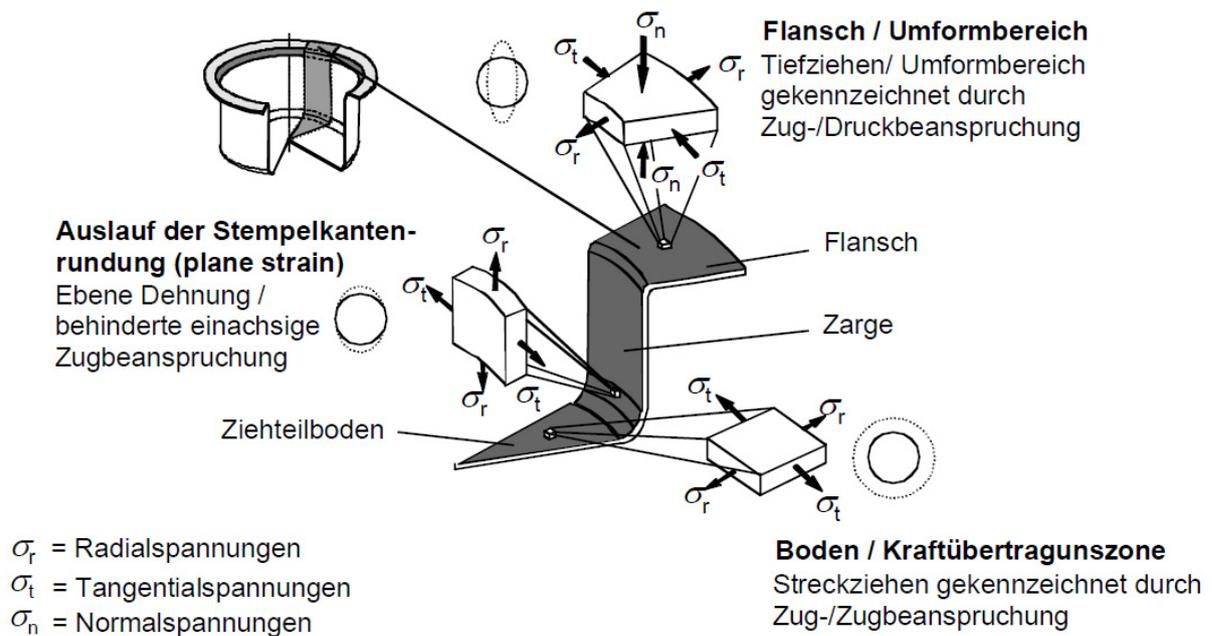


Abbildung 2.8: Beanspruchungen beim Tiefziehen im Anschlag [SIM89][DOE10]

Da im Ziehteilboden während der Umformung eine Streckziehbeanspruchung vorhanden ist, treten hier sowohl tangentiale als auch radiale Zugspannungen auf. Im Auslaufbereich der Stempelkantenrundung (Zarge) findet die ebene Dehnung (Plane Strain) statt. Im Flansch befindet sich die Hauptumformzone. Durch die typische Tiefziehbeanspruchung werden tangentiale Druckspannungen und radiale Zugspannungen erzeugt. Die Normalspannungen werden durch die Niederhalterkraft hervorgerufen.

Beim Tiefziehen sind jedoch auch die Spannungen über der Blechdicke von Bedeutung. Beispielsweise tritt im Bereich des Stempelkantenradius eine einfache Biegebeanspruchung auf. Im Bereich des Matrizenradius wird während der Umformung sogar eine doppelte Biegebeanspruchung hervorgerufen. Dies geschieht, da das Blech am Kanteneinlauf hingebogen und am –auslauf zurückgebogen wird [FRI12][KRA05]. Ein idealisierter Spannungsverlauf über der Blechdicke durch das Biegen ist in *Abbildung 2.9* visualisiert.

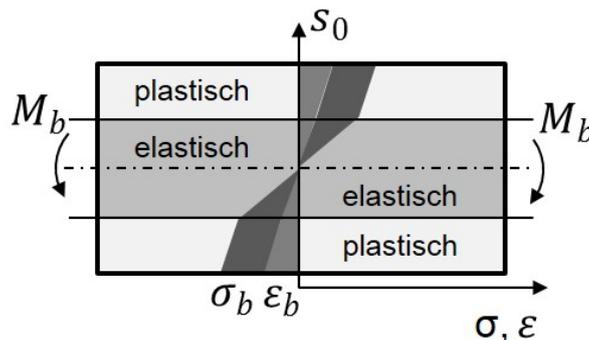


Abbildung 2.9: Spannungs- und Dehnungsverlauf beim Biegen nach [SCH02]

Durch das Biegemoment M_b tritt an der Blechoberseite eine Dehnung ($+\epsilon$) und an der Blechunterseite eine Stauchung ($-\epsilon$) auf. In der Blechmitte befindet sich die neutrale Faser. Von dort aus steigen die Spannungen zur Blechaußenseite an. Überschreiten die Spannungen die Streckgrenze, erfolgt eine plastische Umformung. Im Bereich der neutralen Faser wird lediglich elastisch umgeformt.

Wird ein Blech über eine konkave oder konvexe Biegekante gezogen, so treten neben den Biegespannungen über der Blechdicke zusätzlich Membranspannungen auf.

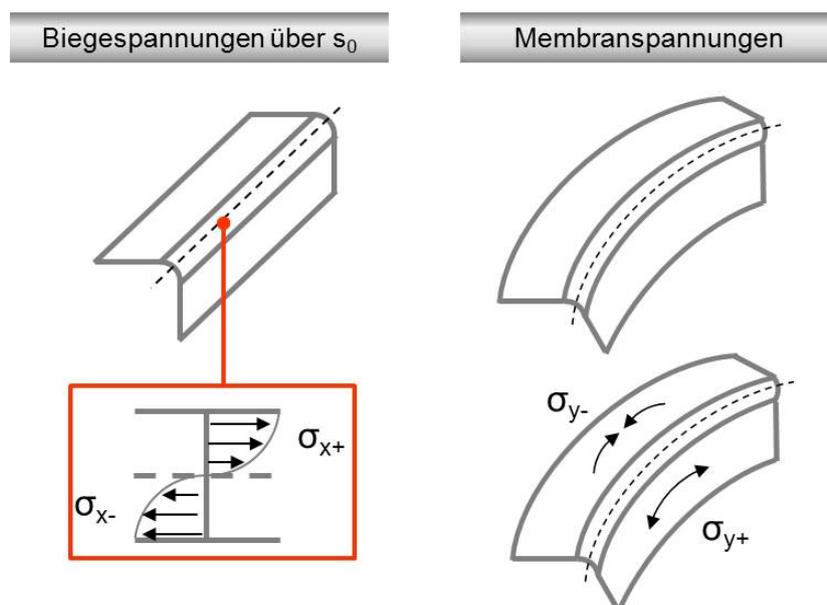


Abbildung 2.10: Biege- und Membranspannungen nach [ROL00]

Die Membranspannungen sind in den unterschiedlichen Blechbereichen entgegengesetzt. Das bedeutet, dass in der einen Blechregion Druckspannungen (σ_{y-}) und in der anderen Blechregion Zugspannungen (σ_{y+}) vorhanden sind.

Ein weiteres Spannungsphänomen sind eingeschlossene Eigenspannungen bei geschlossenen Bauteilkonturen [ROH01][WEI09].

Beim Tiefziehen hat sich zur Einschätzung der Umformbarkeit vor allem das Grenzformänderungsdiagramm (GFD) durchgesetzt [TSC08]. In *Abbildung 2.11* ist das GFD schematisch dargestellt, wobei die Hauptformänderung φ_1 über der Nebenformänderung φ_2 aufgetragen ist.

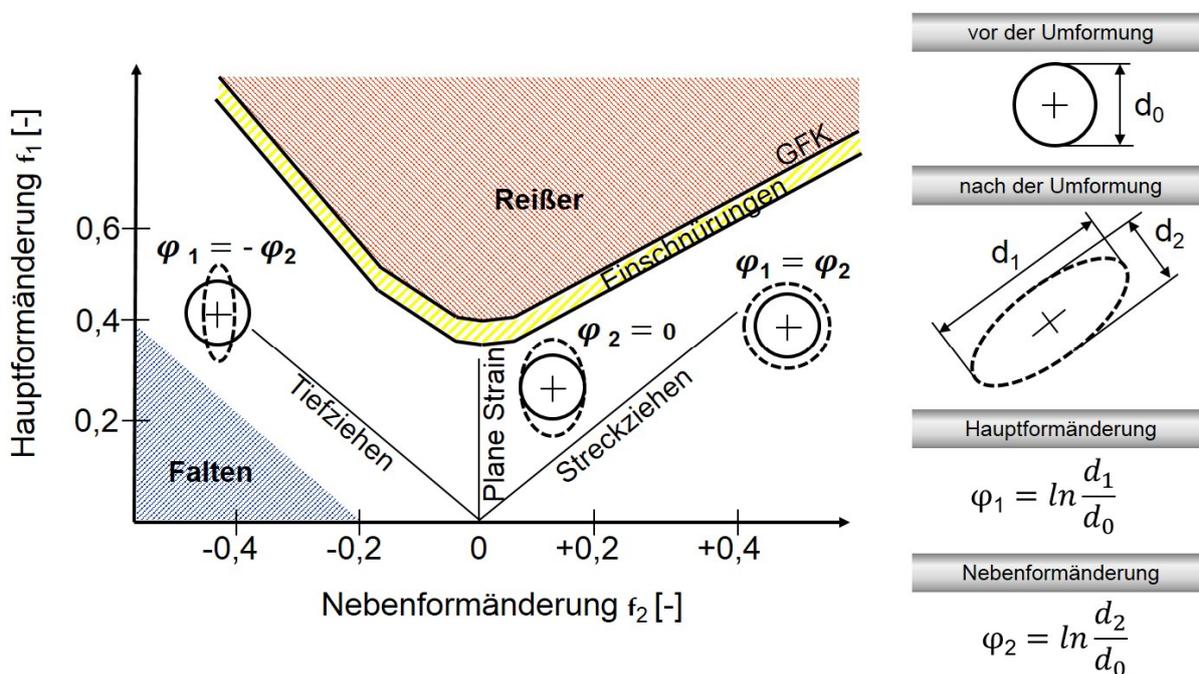


Abbildung 2.11: Grenzformänderungsdiagramm nach [DOE10]

In der Formänderungsanalyse wird bei der konventionellen Vorgehensweise vor der Umformung ein Kreisraster auf das Blech aufgebracht. Nach der Umformung hat sich die Form beispielsweise in eine elliptische Gestalt geändert. Durch das Ausmessen der Längen können die Haupt- und Nebenformänderungen lokal bestimmt werden. Ferner kann eine optische Vermessung mittels Bildverarbeitung geschehen.

Erfolgt eine gleichmäßige Dehnung nach allen Seiten, so kann der Belastungspfad dem Streckziehen zugeordnet werden. Eine ebene Dehnung (Plane Strain) ist vorhanden, wenn keine Nebenformänderungen auftreten. Der Belastungspfad des Tiefziehens entsteht, wenn positive Hauptform- und negative Nebenformänderungen im gleichen Maße festgestellt werden können.

Die Einschätzung der Herstellbarkeit kann durch die Grenzformänderungskurve (GFK) vorgenommen werden. Hiermit lassen sich die Versagensgrenzen wie Reißer bei unterschiedlichen Formänderungen visualisieren. Die Aufnahme der Grenzfor-

mänderungskurve und die Verwendung genormter Probengeometrien sind in der DIN EN ISO 12004-2 beschrieben [DIN09b]. Bevor die Formänderungen die GFK überschreiten und Reißer verursachen, treten Einschnürungen auf. Das kann zur Folge haben, dass das Bauteil nicht verwendbar ist. Ferner ist der Faltenbereich ersichtlich, der ebenfalls zum Ausschuss des Bauteils führen kann.

2.4 Rückfederung

Um den Vorgaben der Teilekonstruktion gerecht zu werden und Gutteile zu produzieren, müssen Umformfehler ausgeschlossen werden. Dazu gehört neben Blechreiern, Falten, Oberflächenfehlern und Einfallstellen auch die Rückfederung [DOE10]. Als Rückfederung versteht man die Differenz vom vorgegebenen Nominalmaß eines Bauteils zur tatsächlich produzierten Geometrie. Die Rückfederungseffekte äußern sich in Winkel- und Maßabweichungen des Bauteils, indem die Geometrie aufspringt oder sich zusammenschnürt. Ein weiterer Effekt ist das Verdrehen des Bauteils nach der Umformung [VDI13]. Die rückfederungsbedingten Maß- und Formabweichungen können dazu führen, dass das Bauteil außerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegt und somit unbrauchbar wird.

Die Problematik der Rückfederung und deren Beherrschung nimmt einen großen Stellenwert ein. Da das Umformen der Einzelbauteile am Anfang der Prozesskette steht, wirken sich geringe Maßabweichungen auf weitere Bearbeitungsschritte aus. Beispielsweise erfordert das automatisierte Fügen zur Baugruppe enge Mavorgaben. Weitere Probleme durch die Rückfederung treten bei der Werkzeugeinarbeitung auf. Manuelle Korrekturen der Werkzeugwirkfläche zur Erreichung der Mavorgaben sind zeit- und kostenintensiv. Die Rückfederungsproblematik verschärft sich zudem auf Grund des angestrebten Leichtbaus. Durch die Substitution von konventionellen Tiefziehstählen durch hochfeste Werkstoffe und die damit verbundene Blechdickenreduzierung erhöhen sich die Rückfederungsneigung und somit die Werkzeugherstellkosten beim Umformen hochfester Stähle [WER02].

2.4.1 Ursachen und Mechanismen

Bei der Betrachtung eines idealisierten Biegevorgangs (*Abbildung 2.12 links*) wird ersichtlich, dass auf Grund der Stempelkraft F_{St} und der Auflagerkräfte F_A ein Biegemoment M_b entsteht. Während der Umformung wird die Blechoberseite gedehnt. Im Bereich der Blechmitte befindet sich die ungelängte neutrale Faser. Mit zunehmendem Abstand von der neutralen Faser zur Blechoberseite steigen die Zugspannungen an. Die Blechunterseite wird hingegen gestaucht, sodass hier wachsende Druckspannungen auftreten. Überschreiten die vorhandenen Spannungen die Dehn-

grenze, erfolgt die Plastifizierung des Materials in den Außenbereichen. Im Gebiet der neutralen Faser wird hingegen lediglich elastisch umgeformt.

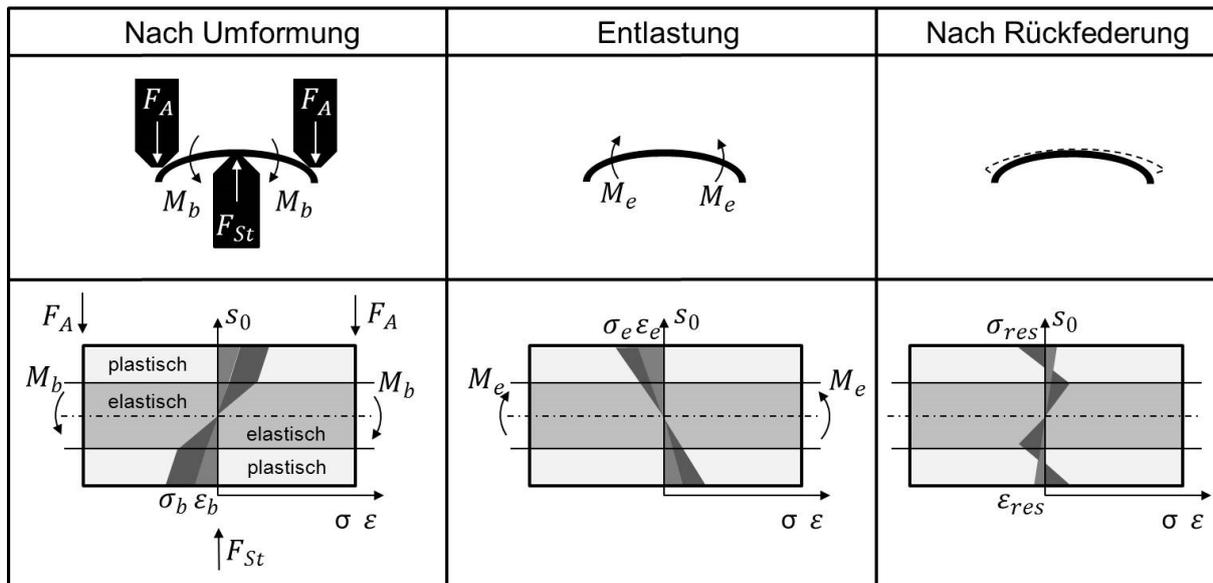


Abbildung 2.12: Spannungen und Dehnungen im Blechquerschnitt beim Biegen nach [GÖS10]

Nachdem die äußere Belastung zurückgenommen wird, kommt es zu einem Entlastungsmoment M_e (Abbildung 2.12 Mitte). Dieses entspricht bei einer reinen elastischen Verformung dem Betrag des Biegemoments und ist entgegengerichtet. Bei einem elastisch-plastischem Verhalten ergibt sich der Restspannungsverlauf σ_{res} aus der Superposition der Spannungen (Abbildung 2.12 rechts). Dabei handelt es sich um die Spannungen nach Umformung und Entlastung. Die bleibenden Dehnungen ϵ_{res} werden durch die Addition von ϵ_b und ϵ_e ermittelt [SCH02][GÖS10].

Die elastischen Anteile in der Nähe der neutralen Faser sind die Ursache für die Rückfederung, da diese das Bestreben haben, ihren Ausgangszustand zurückzuerlangen. Hinzu kommt, dass die äußeren Fasern eine elastisch-plastische Umformung erhalten haben und somit einen elastischen Entlastungsanteil aufweisen. Als Resultat federt das gebogene Bauteil zurück [GÖS10].

Wird ein Blech über eine konkave oder eine konvexe Biegekante gezogen, treten Membranspannungen nach der Umformung im Bauteil auf. Die Inhomogenität der entgegengesetzten Zug- und Druckspannungen werden nach der Belastungswegnahme durch die Rückfederung ausgeglichen. Dies äußert sich in der Regel durch eine Verdrehung (Torsion) des Bauteils [ROL00].

Eine steigende Komplexität der Rückfederungseffekte ist beim Tiefziehen vorhanden. Krasovskyy [KRA05] beschreibt die auftretenden Rückfederungserscheinungen nach einem Streifenziehbiegeversuch, da hier die Elemente des Tiefziehvorgangs in vereinfachter Form vorliegen. Die Visualisierung dieser Thematik erfolgt in *Abbildung 2.13*.

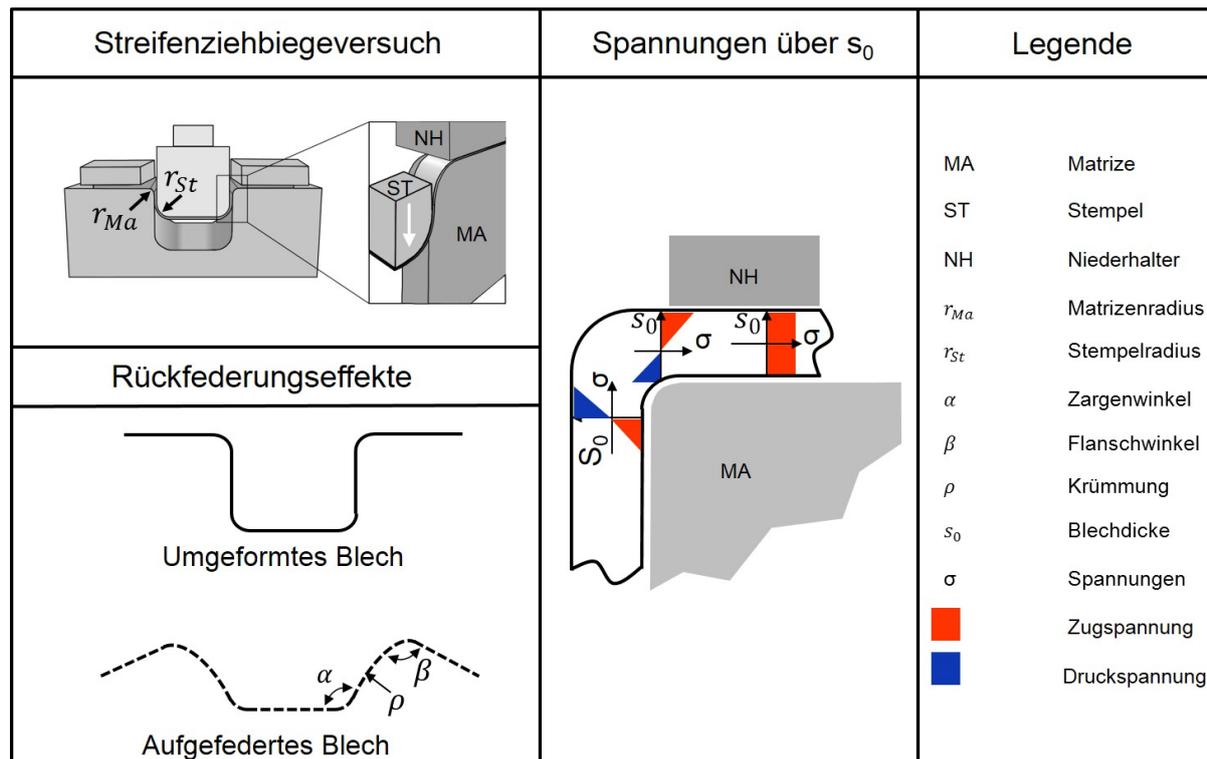


Abbildung 2.13: Rückfederung Tiefziehen nach [KRA05]

Das Blech wird um den Bereich des Stempelradius r_{st} gebogen. Dadurch entstehen Spannungsunterschiede und es kommt nach der Werkzeugentnahme zu einem Rückfederungseffekt im Zargenwinkelbereich α . Auch im Bereich des Matrizenradius wird zum Prozessende das Material gebogen. Dieser Vorgang ist zum größten Teil für den Aufsprung im Flanschbereich β zuständig.

Um die Zargenkrümmung ρ zu erklären, müssen die Spannungen über der Blechdicke und somit die Entstehung der Spannungsgeschichte näher betrachtet werden. Da der Niederhalter mit einer Kraft das Blech auf die Matrize drückt, sind im Blechquerschnitt Zugspannungen vorhanden. Diese liegen jedoch im elastischen Bereich. Fließt der Blechwerkstoff weiter, werden am Beginn des Matrizenradius an der Blechaußenseite Zug- und an der Blechinnenseite Druckspannungen initiiert. Da hier die Spannungen die Dehngrenze überschreiten, treten plastische Formänderungen auf. Folgt man dem Werkstofffluss am Ende des Matrizenradius, erkennt man eine Rückbiegung des Materials. Diese ist verantwortlich für die Änderung des Spannungsgradienten, da an der Blechaußenseite nun Druck- und an der Innenseite Zugspannungen vorhanden sind. Die Inhomogenität dieser Spannungen bewirkt ein weiteres Biegemoment bei der Entlastung, sodass eine Zargenkrümmung entsteht. Diese ist in der Regel nach außen gekrümmt¹. Ist der Matrizenradius im Verhältnis zur Blechdicke jedoch klein, kann in der Zarge eine weitere Umkehr des Spannungsgra-

¹ Rückfederung mit positiver Zargenkrümmung= engl.: curl-out

dienten erfolgen, sodass ein weiteres Entlastungsmoment auftritt. Unter diesen Umständen ist die Zarge nach innen gekrümmt² [KRA05].

Neben der Wegnahme der Belastung ruft eine weitere Ursache Rückfederungen hervor. Durch den Verbleib von Eigenspannungen in einer geschlossenen Bauteilkontur treten zunächst geringe Rückfederungswerte auf. Wird jedoch anschließend in diesen Eigenspannungszustand eingegriffen, treten erneut Rückfederungseffekte auf. Ein typisches Beispiel hierfür sind Beschnittoperationen. Fertigt man einen Napf im Tiefziehprozess an und entnimmt horizontal aus der Zarge einen Ring, so kann nach einem axialen Schnitt festgestellt werden, dass dieser Ring aufedert [ROH01].

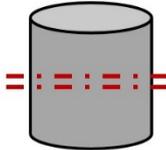
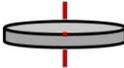
Benennung	Visualisierung	Beschnitt
Tiefgezogener Napf		Horizontaler Schnitt
Ringentnahme aus Napf		Axialer Schnitt
Rückgefederter Ring nach axialer Schnitt		

Abbildung 2.14: Rückfederung Beschnitt nach [ROH01]

Bei den umformenden und trennenden Fertigungsverfahren von Karosseriebauteilen treten alle diese Rückfederungseffekte und Entstehungsursachen gemeinsam auf. Durch die unregelmäßige Formgebung werden komplexe Dehnungs- und Spannungszustände in das Bauteil initiiert. Die Spannungsverteilung im Blechteil steht mit den äußeren Kräften der Werkzeugflächen im Gleichgewicht. Werden jedoch die äußeren Belastungen weggenommen oder der Eigenspannungszustand geändert, stellt sich eine Deformation im Bauteil und somit ein erneuter makroskopischer Gleichgewichtszustand der Spannungen ein [ROH01][WEI09]. Inhomogene Spannungsverteilungen werden dabei durch unterschiedliche Biege-, Tiefzieh-, Streckzieh- und Beschnittoperationen hervorgerufen. Die entstehenden Rückfederungseffekte der Blechformteile stellen vor allem für den automatisierten Karosseriebau ein beträchtliches Problem dar. Aber auch der Werkzeugbau unternimmt enorme Anstrengungen, um die Rückfederung zu beherrschen. Aus diesem Grund werden in dem folgenden Unterkapitel rückfederungsreduzierende Maßnahmen aufgezeigt.

² Rückfederung mit negativer Zargenkrümmung= engl.: curl-in

2.4.2 Rückfederungsreduzierung

Die Rückfederung des Blechbauteils ist von einer großen Anzahl von Einflussfaktoren abhängig. Dazu zählen der Werkstoff, die Geometrie und der Prozess [HEI98][HÜT01][ROH01]. In der *Abbildung 2.15* ist erkennbar, ob ein Einflussparameter erhöht oder verkleinert werden muss, um die Rückfederung zu reduzieren.

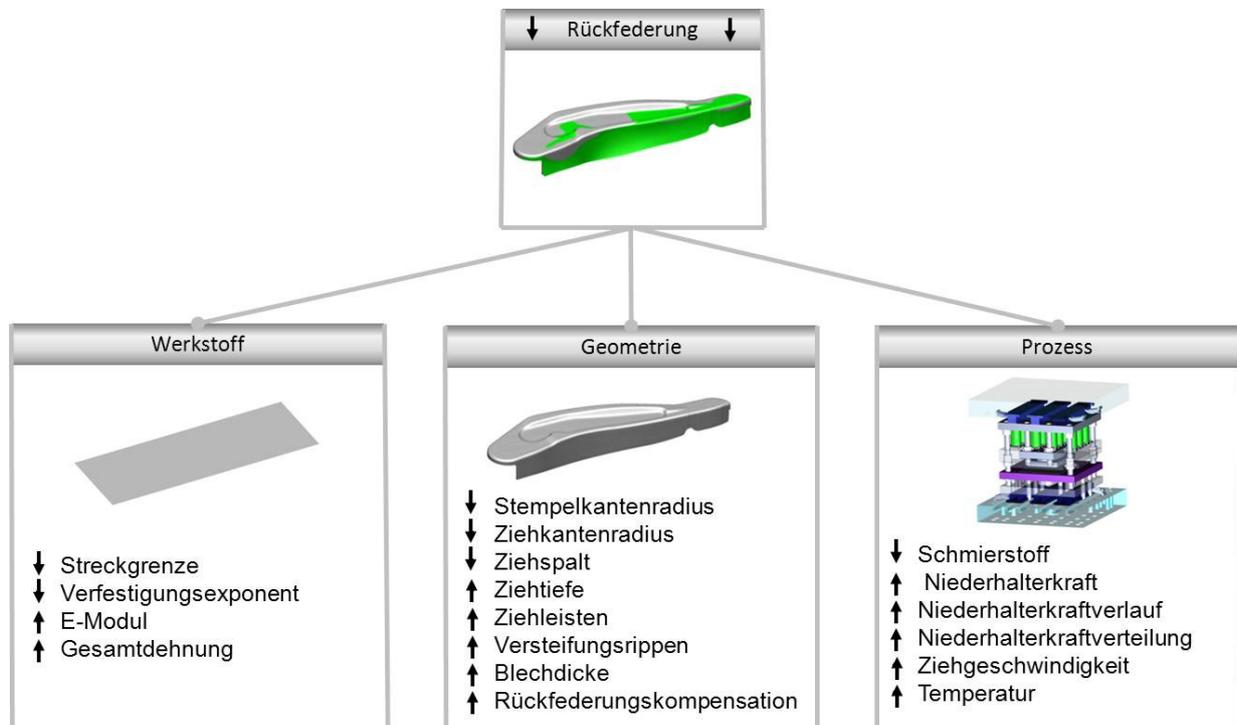


Abbildung 2.15: Rückfederungsreduzierung

Demnach lassen sich die rückfederungsbedingten Maß- und Formabweichungen reduzieren, indem man diese Einflussfaktoren bewusst modifiziert.

Der Anteil der elastischen Dehnung an der Gesamtdehnung bestimmt in erster Linie die Quantität der Rückfederung [ROH01]. Vergrößert man die Gesamtdehnung, reduziert sich der Anteil der elastischen Dehnung und somit die Rückfederungseffekte. Die Wahl des Werkstoffes trägt entscheidend zur Ausprägung der Maß- und Formabweichung bei. Bei der Verwendung eines Materials mit geringer Streckgrenze und geringem Verfestigungsexponenten wird ebenfalls der elastische Dehnungsanteil gesenkt und somit die Rückfederung reduziert.

Weist der Werkstoff einen großen Elastizitätsmodul auf, sinkt der elastische Dehnungsanteil und somit erhält man nach der Umformung höhere Maßhaltigkeiten. Hierbei ist zu beachten, dass der E-Modul während der Umformung nicht konstant ist sondern dehnungsabhängig sinkt [BUS07]. Dieses Verhalten wurde auch bei höherfesten Stählen beobachtet [HÜT01][NEU08][KAR12].

Eine praktikable Rückfederungsreduzierung durch Werkstoffparameter ist jedoch nicht umsetzbar, da das Material durch die Festigkeitsanforderungen vorgegeben wird. Zudem werden im Zuge des Leichtbaus Stahlsorten mit steigenden Streckgrenzen gefordert. Ferner haben solche hochfesten Stahlsorten kleinere Bruchdehnungen, sodass tendenziell geringere Gesamtdehnungen erzielt werden können. Zusammenfassend verschärft dieser Sachverhalt die Beherrschung der Rückfederung.

Die Modifikation geometrischer Einflussfaktoren zur Reduzierung rückfederungsbedingter Maß- und Formabweichung bietet weiteres Potential. Um den plastischen Dehnungsanteil zu erhöhen, sind Bauteilradien grundsätzlich zu verkleinern [BOI97]. Hierbei wurde in mehreren Untersuchungen festgestellt, dass der Matrizenradius einen größeren Einfluss auf die Rückfederung als der Stempelkantenradius hat [BET93][BOI97]. Jedoch wird auch aufgezeigt, dass größere Matrizenradien bei hochfesten Stählen rückfederungsreduzierend wirken können [HÜT01][NEU08]. Die Beschränkung der Modifikationsmöglichkeiten hinsichtlich der Radien besteht darin, dass der Stempelkantenradius durch die Bauteilgeometrie vorgegeben wird und zu kleine Radien Reißen im Bauteil verursachen können.

Die Verkleinerung des Ziehspaltes bewirkt ebenfalls ein verbessertes Rückfederungsverhalten, da eine vollständige Überbiegung am Ziehkantenradius die Zargenkrümmung reduziert. Diese Maßnahme kann jedoch nicht nach der Werkzeuganfertigung nachträglich umgesetzt werden. Die Brauchbarkeit dieser Maßnahme beschränkt sich lediglich auf die Neuanfertigung eines Werkzeuges [HÜT01].

Generell ist zu erkennen, dass bei großen Ziehtiefen erhöhte Ziehkräfte aufgebracht werden müssen und dass durch die ansteigende Gesamtformänderung die Rückfederung reduziert wird [HÜT01]. Bei Untersuchungen an einem gekrümmten Hutprofil erwiesen sich hingegen geringe Ziehtiefen als zielführend [NEU08]. Da jedoch durch die Bauteilgestalt die Ziehtiefe weitestgehend vorgegeben ist, werden diese rückfederungsreduzierenden Maßnahmen selten verwendet.

Die Erhöhung der Ziehsicke (Ziehleiste) führt bei konventionellen Tiefziehstählen zu einer rückfederungsreduzierenden Wirkung, da inhomogene Vorverfestigungen durch die Wechselbiegung beseitigt werden [HÜT01]. Außerdem verursachen Ziehleisten einen gleichmäßigen Materialeinzug, sodass ein weiterer rückfederungsreduzierender Einfluss vorhanden ist [CAO93][DOE10, S.325]. Bei hochfesten Stählen wird hingegen zu einem Verzicht auf Ziehsicken geraten, da eine verbesserte Maßhaltigkeit mit einer Niederhalterkrafteerhöhung mit höherer Herstellsicherheit erzielt werden kann.

Eine weitere rückfederungsreduzierende Maßnahme ist das Einbringen von Versteifungsrippen oder -sicken in die Bauteilgeometrie [CAR05]. Dadurch erfolgt die Erhöhung des Flächenträgheitsmomentes. Folglich können während der Entlastung weni-

ger Eigenspannungen freigesetzt werden und die Rückfederung fällt geringer aus [WEI09]. Die Restriktionen liegen hierbei in der Änderung der Bauteilgeometrie, wenn nachträglich solche Maßnahmen angewendet werden. Außerdem könnte die Herstellbarkeit durch eine erhöhte Reißerwahrscheinlichkeit gefährdet werden.

Mit zunehmender Blechdicke steigen die plastischen Dehnungsanteile quasilinear an, sodass geringere Rückfederungswerte auftreten [RAM11a]. Da jedoch im Zuge des Leichtbaus sinkende Blechdicken gefordert und eingesetzt werden, steigt die Rückfederungsproblematik an.

Eine weitere geometrische Maßnahme ist die Rückfederungskompensation. Hierbei wird mit Hilfe der numerischen Simulation der Aufsprung des Bauteils bestimmt und in einem anschließenden iterativen Prozess die Werkzeugkontur angepasst (Displacement-Adjustment-Methode). Das Bauteil springt nach der Entlastung in die Soll-Lage [GÖS10]. Hierzu ist eine robuste Simulation notwendig. Es muss Reißer- und Faltenfreiheit bestehen [CAR11]. Diese Methode wird in der industriellen Praxis eingesetzt, wobei zum jetzigen Stand der Technik lediglich die erste Beschnitt- und die Hauptumformstufe betrachtet werden [RUD08]. Auch bei der Rückfederungskompensation liegen Grenzen des Verfahrens vor. Ist beispielsweise eine senkrechte Zarge im Bauteil erforderlich, tritt bei der Werkzeugmodifikation ein erforderlicher Hinterschnitt auf. Die Umsetzung eines solchen Konzeptes ist nicht oder nur mit erhöhtem Kostenaufwand umsetzbar, da die Arbeitsrichtung des Werkzeuges nicht senkrecht verlaufen kann [ROL04].

Ferner gibt es weitere prozesstechnische Maßnahmen zur Rückfederungsreduzierung. Hierbei wird hauptsächlich der Spannungszustand im Blech so beeinflusst, dass eine erhöhte Maßhaltigkeit nachgewiesen werden kann [GÖS10]. Verzichtet man beispielsweise auf einen Schmierstoff, bewirkt die erhöhte Reibung eine vergrößerte Zargenspannung und somit eine erhöhte Maßhaltigkeit [HÜT01].

Weiterhin ist die Niederhalterkraft eine wichtige prozesstechnische Größe. Generell bewirkt eine Erhöhung der Niederhalterkraft eine größere Ausstreckung im Material und somit einen rückfederungsreduzierenden Einfluss [HÜT01][BEC04]. Neben der Höhe ist auch der Kraftverlauf entscheidend. Untersuchungen zeigten, dass der sprunghafte Anstieg der Niederhalterkraft zum Prozessende neben einer rückfederungsreduzierenden Wirkung keine signifikante Verschlechterung der Herstellbarkeit aufweist [BEC04][NEU08][SCH93]. Auch die Niederhalterkraftverteilung spielt eine wesentliche Rolle zur Erreichung der Maßhaltigkeit. Verwendet man einen elastischen Niederhalter mit unterschiedlicher Kraftverteilung über dem Umfang anstatt eines starren Niederhalters, so lässt sich eine rückfederungsreduzierende Wirkung nachweisen. Eine Verminderung der Haltekräfte in den Eckbereichen eines recht-

eckigen Napfes bewirkt eine homogenere Dehnungs- und Spannungsverteilung im Bauteil und somit eine höhere Maßhaltigkeit nach der Entlastung [HÜT01].

Bei einem Anstieg der Formänderungsgeschwindigkeit tritt eine Erhöhung der Dehngrenze auf. Dies hat zur Folge, dass während der Umformung ein Kraftmehraufwand aufgebracht werden muss, der sich günstig auf die Radialspannungen und somit auf die Rückfederung auswirkt [LIU82]. Generell wird jedoch der Ziehgeschwindigkeit eher eine untergeordnete Rolle der Rückfederungsreduzierung beigemessen [BET93].

Weiterhin besteht die Möglichkeit, Bauteilbereiche nach der Umformung und vor der Werkzeugöffnung lokal zu erwärmen. Eigenspannungen können beseitigt und Rückfederungen minimiert werden. Jedoch ist die aufwändige Werkzeuggestaltung kosten- und zeitintensiv [STR08].

Der Vorteil der prozesstechnischen Modifikationen zur Rückfederungsreduzierung besteht darin, dass die Design-Vorgaben nicht geändert werden müssen. Nachteilig ist hingegen, dass diese Maßnahmen meist mit einer erhöhten Materialausstreckung verbunden sind und durch eine erhöhte Reißerwahrscheinlichkeit die Herstellbarkeit gefährdet sein kann. Die geometrischen Modifikationen haben den Nachteil, dass die Vorgaben der Produktgestalt nicht eingehalten werden, da die Bauteilgeometrie durch rückfederungsreduzierende Maßnahmen verändert wird. Ferner ist eine Verschlechterung der Herstellbarkeit bei der Verkleinerung der Radien zu erwarten. Auch die Rückfederungskompensation, die in der Praxis angewendet wird, weist einige Einschränkungen auf. Dazu zählt die Vermeidung des Hinterschnitts.

Es ist seit langer Zeit bekannt, dass beim Abkantprozess eine erhöhte Maßhaltigkeit nachgewiesen werden kann, wenn abgestufte Zweifach-Biegevorgänge zur Anwendung kommen [BET93][CHU86]. Demnach gibt es Potential zur Rückfederungsreduzierung bei mehrstufigen Umformprozessen. Jedoch beschränken sich bisherige Maßnahmen zur Erreichung der Maßvorgaben meist auf die letzte Formgebungsstufe. Die bewusste Modifikation der Vorziehstufe könnte sich ebenfalls als zielführend erweisen. An der Simulation eines offenen Strukturteils konnte aufgezeigt werden, dass nach einer Vorziehstufenmodifikation der Spannungszustand und somit die Rückfederung des Bauteils beeinflusst werden kann [RAM11][SAC12]. An Hand eines geschlossenen Strukturteils konnte ebenfalls mit Hilfe einer Radienvariation in der Vorziehstufe ein rückfederungsreduzierender Einfluss festgestellt werden [RAM13]. Auch die Variation prozesstechnischer Parameter wie die Niederhalterkraft zeigten einen Einfluss auf die Rückfederung [SAC13]. Ferner wurde bei der Umformung von Sickenblechen eine geringere Rückfederung festgestellt, wenn beim Vorformen kleinere Radien verwendet werden [LIE12]. Demnach lässt sich feststellen, dass die bewusste Modifikation von Einflussparametern in der Vorziehstufe großes

Potential zur Rückfederungsreduzierung hat. Die Methodenoptimierung erfasst somit nicht nur die Änderung der letzten Formgebungsstufe, sondern die bewusste Gestaltung der Vorziehstufe zur Erhöhung der Maßhaltigkeit.

2.5 Methodenplanung

Da tendenziell eine steigende Anzahl von hochfesten Materialien im Karosseriebau verarbeitet wird und sich die Rückfederungsproblematik dadurch verschärft, sind vor der Werkzeugherstellung rückfederungsreduzierende Maßnahmen notwendig. Hierbei nimmt die Methodenplanung eine wichtige Rolle ein.

2.5.1 Einordnung und Vorgehensweise

Die Einordnung der Methodenplanung erfolgt nach der Konstruktion & Entwicklung und vor der Werkzeugkonstruktion (*Abbildung 2.16*).

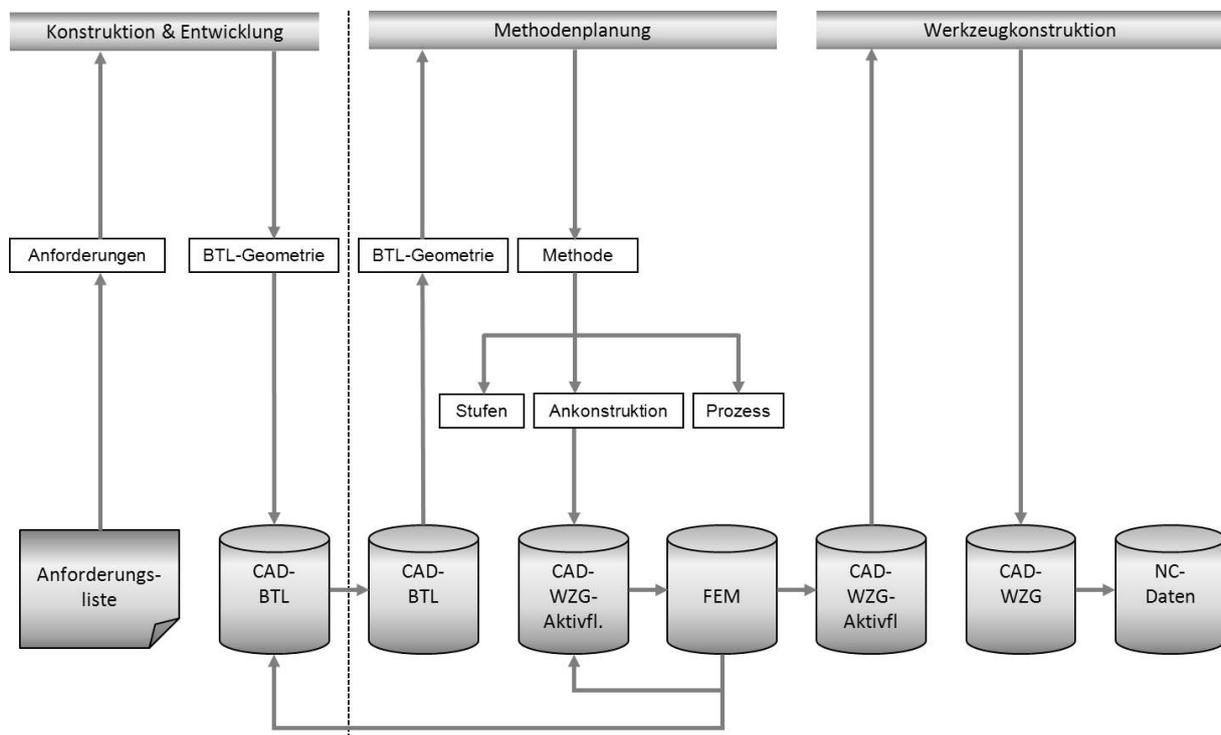


Abbildung 2.16: Einordnung der Methodenplanung

Die Karosseriebauteile werden nach den Design- und Funktionsvorgaben der Entwicklung konstruiert. Die CAD-Daten werden anschließend der Methodenplanung übergeben. Unter der Methodenplanung versteht man die Festlegung der Fertigungsschritte auf Basis des geforderten Bauteils [ENG06]. Hierbei erfolgen beispielsweise die Auslegung der Umformstufen, die Ankonstruktion und eine Prozessvorauslegung. Die Methodenplanung nimmt einen immensen Stellenwert ein, da durch die Definition der Fertigungsschritte die Werkzeugkonstruktion entscheidend beeinflusst wird. Somit erfolgt die Festlegung der Werkzeug- und der Produktkosten

in dieser frühen Phase der Methodenplanung. Auf Basis dieser Daten können die einzelnen Werkzeugwirkflächen abgeleitet werden. Diese werden in die Umformsimulation eingelesen. Stellt sich nach der FEM-Analyse heraus, dass die Machbarkeit nicht gewährleistet ist, kann die Werkzeugwirkfläche angepasst werden. Weiterhin kann die Geometrie des Bauteils verändert werden. Diese Korrekturschleifen führen zu einem erhöhten Zeit- und Kostenbedarf. Erst nach positiver Beurteilung erfolgt die Weitergabe der CAD-Werkzeugaktivflächen, sodass die Werkzeugkonstruktion die notwendige Ausarbeitung der Werkzeuge übernimmt. Anschließend erfolgt die Ableitung der NC-Daten, mit denen das Umformwerkzeug hergestellt werden kann. Zur Durchführung der Methodenplanung stehen dem Planer verschiedene Werkzeuge als Hilfsmittel zur Verfügung.

2.5.2 Werkzeuge der Methodenplanung

Bei der Auslegung des Methodenplanes gibt es eine Vielzahl von fachspezifischer Literatur, die hilfreich ist. Hierbei gibt es meist die formale Unterscheidung zwischen umformtechnischer [DOE10] und werkzeugrelevanter [KRA09] Auslegung. Die Problematik besteht darin, dass die Adaption auf ein komplexes Bauteil erschwert ist, da das Wissen meist für einfache Anwendungen vorliegt.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass der Methodenplaner hauptsächlich auf seine Erfahrung zurückgreifen muss [HIT12][NAR10]. Demnach gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen, die subjektive Entscheidungsfindungen hervorrufen. Vor allem die Bewertung vorangegangener Projekte hilft dem Methodenplaner, das empirische Wissen auf weitere Projekte zu übertragen. Die vorhandenen Methodenpläne können genutzt werden, um ein neues Projekt zu realisieren. Es handelt sich hierbei um firmenspezifisches Wissen. Nachteilig ist, dass oftmals an bestehenden Methoden festgehalten wird und Innovationspotential verloren geht. Daher sollten die Methodenpläne lediglich als Anregungen dienen. Ferner ist die Katalogisierung erschwert, da bei steigender Anzahl eine nachvollziehbare Archivierung geschaffen werden muss.

Eine teilautomatisierte Unterstützung erhält der Methodenplaner durch Expertensysteme. *Hitz* [HIT12] beschreibt, dass vor allem in den frühen Phasen der Methodenplanung computerunterstützende Werkzeuge selten sind. Dieser entwickelt darauf ein metamodellbasiertes Planungssystem, welches Umformfeatures beinhaltet und in der frühen Phase der Methodenplanung den Anwender unterstützt. Es erfolgt eine Kopplung zwischen Validierungsschritt und der ausgelegten Methode. *Danzberg* [DAN02] entwickelt ein Konstruktionssystem für den Karosseriebau, welches umformtechnische Aspekte bei der Erstellung der Aktivelemente berücksichtigt. Beispielsweise erfolgte die automatisierte Flächenberechnung der Ankonstruktion. Fer-

ner wurde der Nachweis geführt, dass der Konstruktionsaufwand somit sehr stark vermindert werden kann. *Naranje* [NAR10] listet unter anderem die Expertensysteme auf, die bei der Gestaltung der Werkzeugwirkflächen computerunterstützend einsetzbar sind. Hierbei wird festgestellt, dass es vor allem für mehrstufige Prozesse an solchen Systemen mangelt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Methodenplanung zum größten Teil erfahrungsbasiert abläuft und je nach Anwender unterschiedlich ausfallen kann. Besonders die Stufenauslegung erfordert eine gewisse Routine. Hierbei erfolgte bisher noch keine systematische Untersuchung zur Modifikation der Vorziehstufe hinsichtlich der Wirkung auf die Rückfederung nach der Gesamtumformung. Das wichtigste Werkzeug zur Rückfederungsoptimierung in der Methodenplanung ist die Simulation des Umformprozesses und die anschließende Rückfederungsberechnung.

2.6 Simulation

Folgend sollen die grundsätzlichen Simulationsmöglichkeiten im Produktentstehungsprozess aufgezeigt werden. Dabei wird zwischen inversen und inkrementellen Methoden unterschieden. Ferner werden die Einflussfaktoren auf das Rückfederungsergebnis dargestellt, damit eine korrekte Spannungs- und Rückfederungsberechnung durchgeführt werden kann.

2.6.1 Simulation im Produktentstehungsprozess

Im klassischen Produktentstehungsprozess erfolgt eine konventionelle Auslegung der Umformwerkzeuge. Hierbei wird an Hand des Bauteils eine erfahrungsbasierte Voraussmethode entwickelt [ROH01]. Die Absicherung dieser Methode erfolgt durch die Konstruktion eines Prototypenwerkzeugs. Erst nach dem Abpressen der Prototypenbauteile kann die gewählte Methode überprüft werden. Reißen und Falten werden analysiert, sodass in einem *Trial and Error* Prozess eine Optimierung stattfindet. Anschließend kann der Serienprozess entwickelt werden. Da die Bedingungen in der Serie jedoch von denen in der Prototypenfertigung abweichen (z.B. Werkzeuggeschwindigkeit), erfolgt eine weitere Einarbeitung der Werkzeuge im Serienprozess. Diese Vorgehensweise ist sehr zeit- und kostenintensiv, da mehrere Einarbeitungsschleifen erforderlich sind [WEI09].

Die fortschreitende Steigerung der Leistungsfähigkeit von Computern und deren flächendeckende Bereitstellung ermöglichte es, die Simulation von Blechumformungen industriell einzusetzen. Die Entwicklung und Verbesserung von kommerziellen Programmen wurde maßgeblich durch die Automobilindustrie vorangetrieben [ROL97].

Der Simulationseinsatz übt einen entscheidenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit von blechverarbeitenden Unternehmen aus, da Bauteilqualitäten gesteigert, Entwicklungszeiten verkürzt und Kostenreduktionen erzielt werden können [SCH99].

In den frühen Designphasen kann eine Bauteiloptimierung erfolgen, indem inverse Einschnittverfahren eingesetzt werden. Das Bauteil wird in die Platinenebene abwickelt. Da die Werkzeuggeometrie noch nicht benötigt wird, sind relativ kurze Antwortzeiten mit ausreichender Genauigkeit erzielbar [RAM05]. Jedoch führt der fehlende Werkzeugkontakt dazu, dass die Faltenvorhersage nur eingeschränkt möglich ist [VIP12].

In einem späteren Entwicklungsschritt kann die Methode per inkrementeller Simulation geprüft werden, sodass eine Werkzeug- und Prozessoptimierung stattfinden kann [ROL07]. Der Grundsätzliche Unterschied besteht darin, dass die Werkzeuggeometrie bzw. die Werkzeugwirkflächen benötigt werden und die Simulation vorwärts aufgebaut wird. Neben den Werkzeugkomponenten werden die Daten der Platine eingegeben, sodass der Umformprozess nachgebildet wird. Durch Auswertung der Simulation kann eine Bauteil- und Werkzeugflächenoptimierung erfolgen. Während bei dem Einschnittverfahren nur eine Ergebnisdatei vorhanden ist, können bei der inkrementellen Simulation viele Zwischenschritte angezeigt werden. Die Einführung der Simulation des Blechumformprozesses führte zur schnelleren Werkzeugentwicklung und zu einem reduzierten Aufwand im *Trial and Error* Prozess, sodass eine Kosteneinsparung bei der Werkzeugerstellung um bis zu 50% möglich ist [ROL97].

Die Simulation dient dem Methodenplaner zur Überprüfung der festgelegten Fertigungsschritte und somit zur Absicherung der Umformoperationen. Jedoch erfolgt keine standardisierte Hilfestellung bei der Auslegung der Vorziehstufen. Die Qualität der Rückfederungsberechnung in der Simulation ist ein wesentlicher Bestandteil zur korrekten Vorhersage des Aufsprungverhaltens des Bauteils und somit auch zur Optimierung der Werkzeugkonstruktion.

2.6.2 Einflussfaktoren auf die Rückfederungssimulation

Die während der Umformung entstehenden elastischen Eigenspannungen müssen möglichst genau in der Simulation berechnet werden, da dies die Grundlage für eine korrekte Rückfederungsvorhersage ist. Es ist jedoch problematisch, dass die Ermittlung der Spannungen sehr empfindlich auf die Wahl von numerischen Einflussparametern reagiert [BES99][LEE98][WAG97].

In *Abbildung 2.17* sind beispielhafte numerische Einflussgrößen auf die Rückfederungssimulation dargestellt. Hierzu zählen die Zeitdiskretisierung, die Ortsdiskretisierung und das Materialmodell.

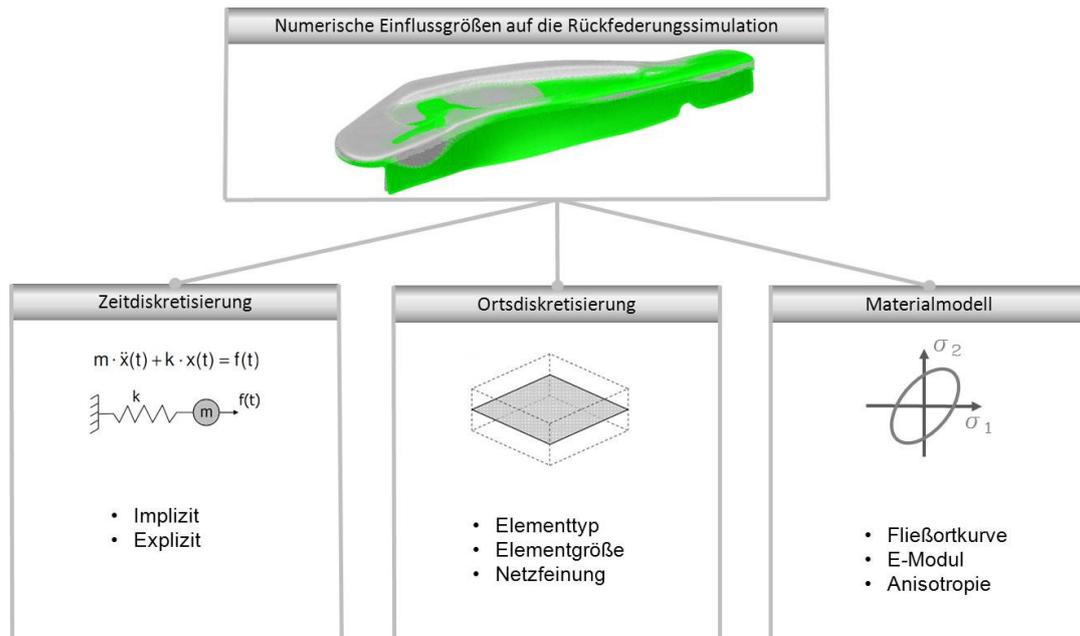


Abbildung 2.17: Beispielhafte Einflussgrößen auf die Rückfederungssimulation

Einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Rückfederungsberechnung hat die Wahl der Zeitdiskretisierung. Diese ist notwendig, da bei der Simulation von umformtechnischen Prozessen nichtlineare Randbedingungen vorherrschen. Da die Kontaktbedingungen vorab nicht bekannt sind, muss der Belastungspfad in diskrete Zeitschritte eingeteilt werden [HÄR12]. Grundsätzlich stehen dem Anwender der Simulation die explizite und die implizite Zeitintegrationen zur Verfügung. Der Unterschied besteht darin, dass bei der impliziten im Vergleich zur expliziten Methode ein iteratives Lösungsverfahren angewendet wird, welches numerisch immer stabil ist. Jedoch können hier Konvergenzprobleme auftreten. In der industriellen Praxis hat sich für die Blechumformsimulation die explizite und für die Rückfederungsberechnung die implizite Zeitdiskretisierung etabliert. Der Grund dafür ist das gute Verhältnis zwischen Simulationsaufwand und den erzielbaren Genauigkeiten [GÖS10][HÜT01][KRA05][NAG91].

Einen weiteren Einfluss auf die Genauigkeit der Rückfederungsvorhersage übt die Ortsdiskretisierung aus. Der Anwender der Simulation kann zwischen den Elementtypen, der Elementgröße und der Netzfeinung wählen. In *Abbildung 2.18* sind verschiedene Elementtypen dargestellt, die in der Simulation Anwendung finden. Für die Blechumformung sind grundsätzlich Membran-, Schalen- und Volumenelemente geeignet. Für die Rückfederungsberechnung empfiehlt sich jedoch nur ein Elementtyp, da die anderen Nachteile aufweisen.

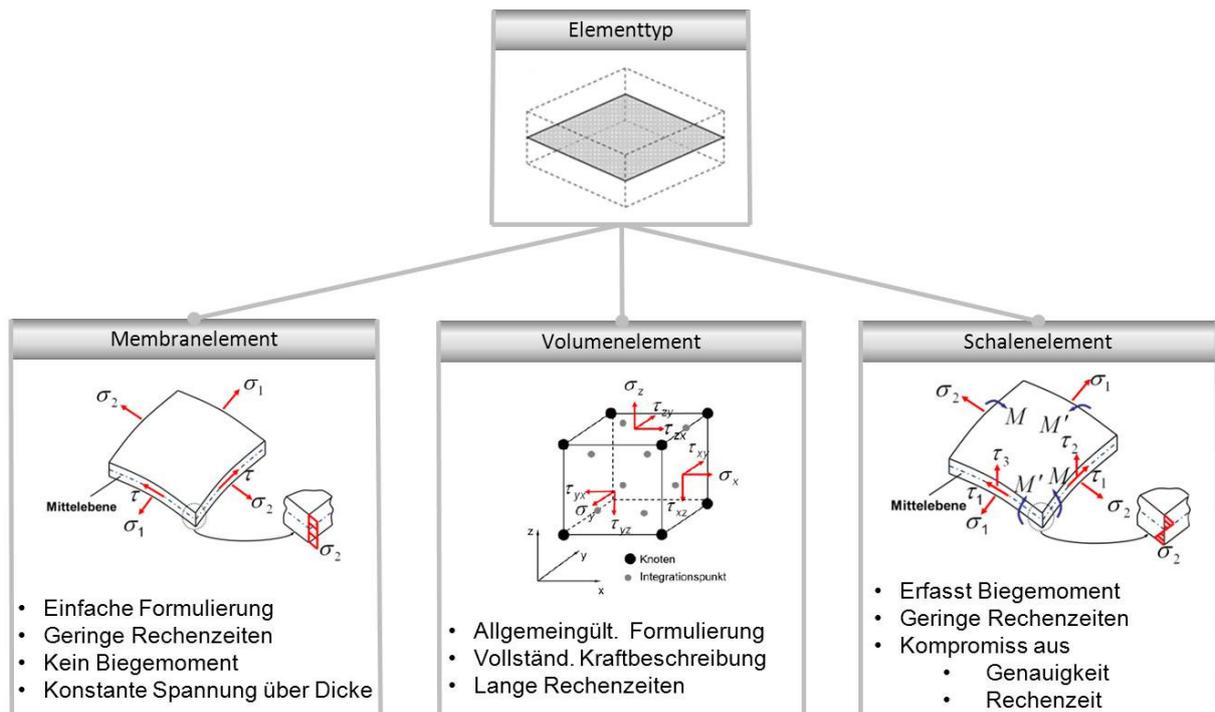


Abbildung 2.18: Elementtypen der Blechumformung nach [HÄR12]

Da Membranelemente nicht in der Lage sind, Biegemomente zu übertragen, ist die Rückfederungsberechnung eines Strukturteils mit dieser Elementformulierung nicht empfehlenswert. Es entstehen somit große Abweichungen zwischen Simulationsergebnis und Realität [ADA03]. Bei der Verwendung von Volumenelementen treten bei feiner Diskretisierung inakzeptabel lange Rechenzeiten auf [SCH02][HÜT01]. Für Rückfederungsberechnungen hat sich in der industriellen Praxis die Schale als Elementformulierung etabliert [GÖS10].

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für eine genaue Rückfederungsvorhersage ist die maximale Elementkantenlänge l_{max} . Diese ist vom kleinsten Werkzeugradius r_{min} und der Blechdicke s_0 abhängig [GÖS10][SCH02].

$$l_{max} = \frac{1}{4} * (r_{min} + \frac{1}{2} * s_0) \quad (2.6)$$

Um die Spannungen des Bauteils korrekt wiederzugeben, ist ein ausreichend feines Netz erforderlich. Da dies aber zu langen Rechenzeiten führt, hat sich die adaptive Netzfeinung als praktikabel erwiesen. Hierbei wird in notwendigen Bereichen wie Radien die Knotenanzahl schrittweise erhöht. Empfehlungen zur hohen Ergebnisqualität der Rückfederungsberechnungen besagen, dass zur Netzfeinung das Winkelkriterium von 10° angemessen ist [HÜT01][NEU04][ROLL00].

Auch die Wahl des Materialmodells übt einen entscheidenden Einfluss auf die Spannungsermittlung und somit auf die Rückfederungsgenauigkeit aus. Der Grund hierfür ist, dass die Platine ein elastisch-plastisches Stoffmodell aufweist und die elastischen

Formänderungsanteile die Größe der Rückfederung bestimmen. Eine ausführliche Beschreibung des Materialmodelleinflusses auf die Genauigkeit der Rückfederung ist in der Untersuchung von *Krasovskyy* [KRA05] dargestellt.

Für hochfeste Stahlwerkstoffe wie H340x (DP 600) konnte nachgewiesen werden, dass die Fließortbedingung nach Hill 48 ausreichend gute Ergebnisse erzielt und somit angewendet werden kann [GÖS10]. Vorteilhaft ist, dass die Kennwerte für das Materialmodell nach Hill 48 durch drei Zugversuche bestimmt werden können. Bei der Verwendung von Barlat 89 ist hingegen ein aufwändiger biaxialer Zugversuch notwendig [GER12].

Der E-Modul ist eine weitere wichtige Größe zur Beschreibung des Materialmodells. Auch hier werden die Spannungen und die Rückfederung entscheidend beeinflusst. Da der E-Modul mit zunehmender Dehnung sinkt [NEU08][HÜT01][KAR12], sollte dies auch in der Simulation berücksichtigt werden. Jedoch zeigt eine intensive Untersuchung von *Schmidt-Jürgens*, dass auf Grund des höheren Simulationsaufwandes und den kaum verbesserten Ergebnissen ein dehnungsabhängiger E-Modul in der Simulation nicht empfehlenswert ist. Ein von vornerein herabgesetzter E-Modul erweist sich als zielführend [SCH02]. *Kardes Sever* [KAR12] untersucht mittels V- und U-Biegeversuchen die Rückfederungsvorhersage eines beispielhaften Dualphasenstahls. Hierbei wird festgestellt, dass der E-Modul mit zunehmender Dehnung von 207 GPa auf 150 GPa sinkt. Jedoch zeigt die Simulation mit PAM-STAMP sehr gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Werten bei der Verwendung eines konstanten E-Moduls von 207 GPa.

Auch die Anisotropiekennwerte sind dehnungsabhängig. Die Untersuchung von *Schmidt-Jürgensen* [SCH02] zeigt hingegen, dass die Berücksichtigung von dehnungsabhängigen r -Werten kaum einen nennenswerten Einfluss auf die Rückfederungssimulation hat.

In weiteren Untersuchungen wird der numerische Einfluss der Reibung analysiert. Hierbei sei lediglich auf die Quellen verwiesen, da dies nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist [SCH02][VOL93].

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich die Simulation in der Methodenplanung der Blechumformung etabliert hat und ein probates Mittel ist, um Rückfederungsausagen mit hinreichender Genauigkeit zu tätigen. Voraussetzung ist jedoch, dass die numerischen Einflussfaktoren auf die Spannungsberechnung und die anschließende Rückfederungsermittlung bewusst ausgewählt werden. Dadurch wird die Grundlage geschaffen, eine Vielzahl von Versuchen virtuell abzubilden, ohne alle Umformteile fertigen zu müssen. Es ist lediglich erforderlich, die gewonnenen Ergebnisse über den Realversuch zu validieren.

2.7 Zwischenfazit Stand der Technik

Bei der Herstellung von Karosseriebauteilen sind umformende und trennende Fertigungsverfahren notwendig. Hierbei werden komplexe Formänderungs- und Spannungszustände in das Material eingeleitet. Nach der Werkzeugentlastung treten bei Karosseriebauteilen Rückfederungseffekte auf, da ein Ausgleich von Spannungsunterschieden stattfindet. Vor allem der elastische Dehnungsanteil an der Gesamtdehnung bestimmt dabei die Höhe der Rückfederung. Eine Verschärfung der Problematik besteht darin, dass auf Grund des Leichtbaus Materialien wie Dualphasenstahl mit hohen Festigkeiten und geringen Blechdicken verwendet werden.

Um die Maß- und Formhaltigkeit der Bauteile zu gewährleisten, stehen verschiedene rückfederungsreduzierende Maßnahmen zur Verfügung. Geometrische Ansätze sind beispielsweise die Modifikation von Bauteilradien oder die Einbringung von Versteifungsrippen. Diese Maßnahmen haben den Nachteil, dass Design-Vorgaben geändert werden und die Herstellbarkeit verschlechtert wird. Bei der Rückfederungskompensation können Einschränkungen bezüglich der Gefahr auftretender Hinterschnitte vorhanden sein. Prozesstechnische Maßnahmen wie beispielsweise die Erhöhung der Niederhalterkraft oder die Reduzierung der Schmierstoffmenge verschlechtern ebenfalls die Herstellbarkeit, sodass neue rückfederungsreduzierende Ansätze benötigt werden. Bisherige Maßnahmen beschränken sich meist auf die Modifikation der letzten Formgebungsstufe.

Die Auslegung der Ziehstufen ist die Aufgabe des Methodenplaners. Dabei wird mit Hilfe der Produktgestalt die prozesstechnische Umsetzung ermittelt. Hiermit wird ein Großteil der Kosten für die anschließende Werkzeugkonstruktion festgelegt. Die Auslegung der einzelnen Ziehstufen erfolgt größtenteils erfahrungsbasiert und kann demnach vom Anwender abhängig sein.

Ein Werkzeug des Methodenplaners zur Vorhersage von Spannungen und Rückfederungen des Karosseriebauteils ist die Simulation. Hiermit lassen sich mit hinreichender Genauigkeit die Maß- und Formabweichungen vorab bestimmen. Da jedoch die Wahl numerischer Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Vorhersage hat, müssen gewisse Einstellungen im Simulationsprogramm beachtet werden. Um einen guten Kompromiss zwischen Simulationsaufwand und Genauigkeit zu erzielen, wird für die Blechumformsimulation eine explizite und für die Rückfederungssimulation eine implizite Zeitintegration angewendet. Außerdem werden Schalenelemente genutzt, um auftretende Biegespannungen möglichst korrekt abzubilden. Bezüglich der Diskretisierung weisen die Netzelemente eine maximale Kantenlänge auf und werden adaptiv verfeinert. In dieser Untersuchung wird zudem stets das Hill-Materialmodell in Kombination mit einem konstanten E-Modul verwendet.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Durch die Einführung hochfester Stahlbleche im Karosseriebau und der damit verbundenen Reduzierung der Blechdicke ist eine Verschärfung der Rückfederungsproblematik festzustellen. Nur durch die Beherrschung des Umformprozesses und der anschließenden Rückfederung ist der erfolgreiche Einsatz hochfester Materialien gewährleistet. Daher sind neue Ansätze der Rückfederungsreduzierung notwendig, um den Leichtbau auch zukünftig voranzutreiben.

3.1 Zielsetzung

Da die bisherigen Maßnahmen zur Erreichung der vorgegebenen Maß- und Formtoleranzen von Blechbauteilen Nachteile und Einschränkungen aufweisen, soll ein neuer Ansatz zur Rückfederungsreduzierung untersucht werden. Schon in der Vorziehstufe werden die Spannungszustände des Bauteils und somit die Rückfederung entscheidend beeinflusst. Die bewusste Modifikation der Vorziehstufe war bisher noch nicht Forschungsgegenstand. Durch verschiedene Variationsrechnungen in der Simulation sollen rückfederungsreduzierende Gestaltungshinweise für den Methodenplaner erarbeitet werden. Dadurch wird die bisherige erfahrungsbasierte Auslegung der Vorziehstufe auf die Maßhaltigkeit des Bauteils nach der Gesamtumformung bewertet. Durch die systematischen Empfehlungen zur Gestaltung der Vorziehstufe wird ein Beitrag geleistet, die Rückfederung von hochfesten Stahlwerkstoffen zu beherrschen. Der Leichtbau wird weiter vorangetrieben, sodass die produzierten Fahrzeuge ein geringeres Gewicht aufweisen.

3.2 Vorgehensweise

Um diese rückfederungsreduzierenden Gestaltungshinweise für die Vorziehstufe zu erarbeiten, werden zwei Demonstratoren von einem realen Blechbauteil abgeleitet. Hierbei handelt es sich um ein offenes und ein geschlossenes Strukturprofil aus hochfestem Material. Anschließend wird die erfahrungsbasierte Methode der Bauteile abgeleitet und als Referenz angenommen. Im nächsten Schritt werden Modifikationsmöglichkeiten der Vorziehstufe entwickelt. Nachdem die Variationen mittels Simulation berechnet werden, können die rückfederungsbedingten Maß- und Formabweichungen ermittelt und verglichen werden. Durch die elasto- und plastomechanische Deutung und die Interpretation der Ergebnisse können abschließend allgemeingültige Gestaltungshinweise zur Rückfederungsreduzierung von hochfesten Strukturblechteilen ausgewiesen werden. Der Abgleich der Simulationsergebnisse erfolgt, indem das Werkzeug für den Realversuch entwickelt und gebaut wird. Dieser Realversuch erlaubt die Verifikation der Simulationsergebnisse.

4 Demonstrator- und Methodenentwicklung

Zunächst erfolgt die Erarbeitung eines Konzeptes für den Demonstrator. Hierzu wird ein beispielhaftes Praxisbauteil benötigt. Es erfolgt die Übertragung der wesentlichen Geometriemerkmale, wobei die Komplexität des Bauteils reduziert werden soll. Hierbei handelt es sich um den pragmatischen Ansatz, dass durch die Analyse eines einfachen Bauteils allgemeingültige Gestaltungshinweise erarbeitet werden können. Ferner müssen die Randbedingungen der Presse bekannt sein, um einen Realversuch gewährleisten zu können. Eine Übersicht zur Demonstrator- und Methodenentwicklung ist in der *Abbildung 4.1* visualisiert.

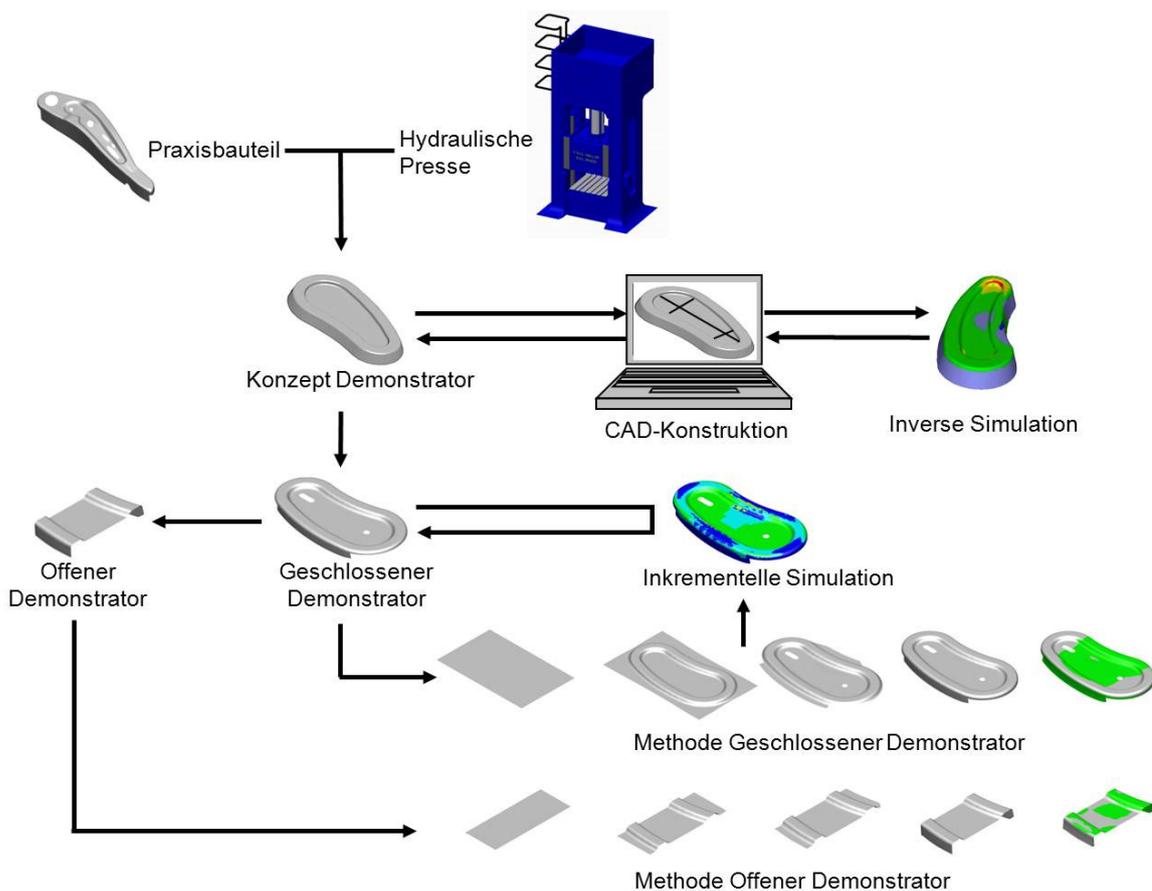


Abbildung 4.1: Übersicht Demonstrator- und Methodenentwicklung

Nach der CAD-Konstruktion des Demonstrators ist es in einem ersten Schritt möglich, die Geometrie hinsichtlich der Herstellbarkeit im inversen Simulationsprogramm zu prüfen. Folglich kann bei Bedarf die Bauteilgestalt verändert werden, bis die Herstellbarkeit zufriedenstellend ist. Durch die Ausarbeitung der Methode ist es möglich, auch die inkrementelle Simulation anzuwenden. Somit kann neben der Geometrie auch der Herstellprozess beurteilt werden. Bei dieser Methode ist eine Vorziehstufe zwingend erforderlich, um die rei3erfreie Herstellbarkeit zu gewährleisten. Dieser

Sachverhalt ist darin begründet, dass das hochfeste Material in Kombination der definierten Ziehtiefe und Bauteilradien ohne Vorziehstufe nicht fehlerfrei gefertigt werden kann. Die Ableitung eines offenen Demonstrators erfolgt auf der Basis des geschlossenen Demonstrators, damit beide mit einem Werkzeug gefertigt werden können. Abschließend ergibt sich die Methode des offenen Demonstrators.

4.1 Praxisbauteil

Zur Entwicklung der Demonstratoren wird ein beispielhaftes Tiefziehteil herangezogen, welches sich für die Untersuchung eignet. In der Sitzstruktur befindet sich der Lehnenseitenholm. Die Zuordnung dieses Industriebauteils wird in *Abbildung 4.2* visualisiert.



Abbildung 4.2: Leichtbaukonzept Lehnenseitenholm nach [HAR10]

Dieses Bauteil wird im derzeitigen Herstellungsprozess unter anderem aus dem Material H400LA gefertigt³. Die Charakteristik besteht in einer gekrümmten und asymmetrischen Geometrie. Um das Gesamtgewicht der Karosserie zu senken, müssen Leichtbaumaßnahmen an den einzelnen Strukturbauteilen angewendet werden. In einer Konzeptstudie wird eine Konstruktion mit Tailored Blanks untersucht. Maßgeschneiderte Platinen werden durch Beachtung der Funktionsanforderungen gewichtsoptimiert [BRA11, S.404]. Der untere Bauteilbereich, der höheren Belastungen standhalten muss, weist ein Material (HCT 980 X) mit einer Mindestzugfestigkeit von 980 MPa und einer Blechdicke von 1,2 mm auf. Der obere Bauteilbereich kann hingegen mit einer reduzierten Blechdicke von 0,8 mm ausgelegt werden. Auch hier wird ein hochfester Dualphasenstahl (HCT 780 X) eingesetzt. Durch die geringeren Blechdicken kann eine Gewichtsreduzierung gegenüber der Herstellung mit dem konventionellen Material erreicht werden.

³ Je nach Kundenanforderungen unterschiedliche Materialien und Blechstärken

Bei dem anschließenden Fügeprozess der Einzelbauteile zur Sitzstruktur wird das Laserschweißen angewendet. Die lokale Erwärmung der Schweißstelle wird durch einen präzise fokussierbaren Laserstrahl vorgenommen, sodass nur eine begrenzte Wärmeeinbringung mit geringem Verzug erreicht werden kann [KAL12]. Jedoch setzt dieses Verfahren geringe Toleranzen bei der Maßhaltigkeit der Einzelbauteile voraus, um einen einwandfreien Fügevorgang zu gewährleisten. Dabei werden gängige Spaltmaße bis maximal 0,3 mm vorausgesetzt [LÖF12].

Um die Maßhaltigkeit des Lehnenseitenholms mit hochfestem Material zu prüfen, wird neben der Simulation auch ein Try-Out-Versuch angewendet. Die Ergebnisse werden in *Abbildung 4.3* ersichtlich.

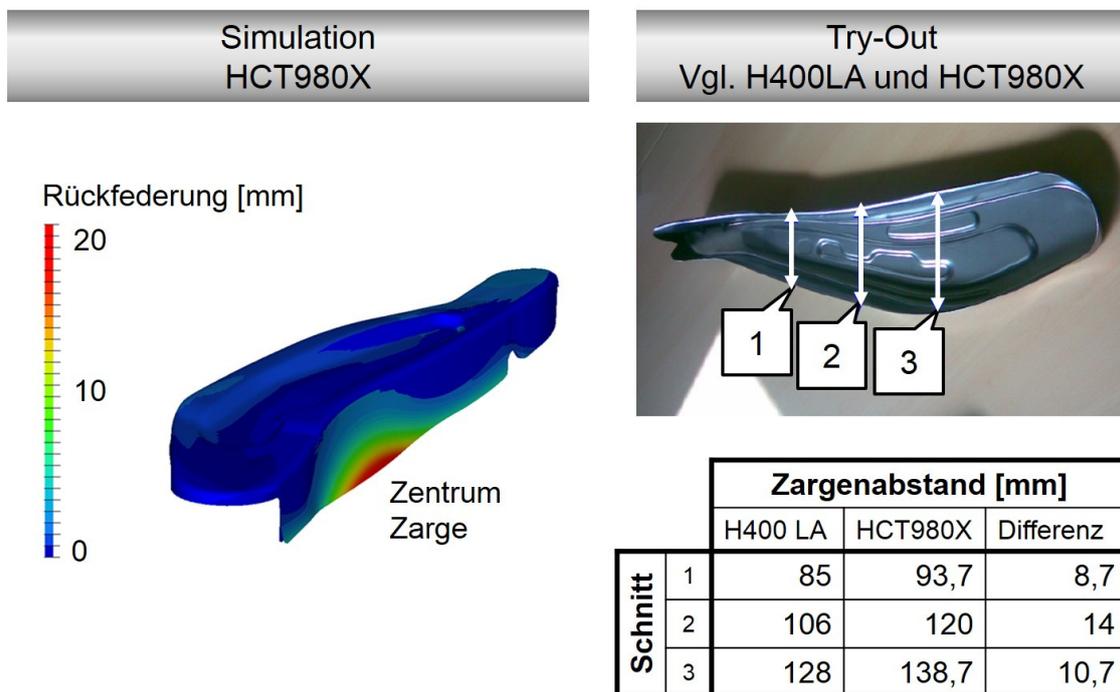


Abbildung 4.3: Rückfederung des Industriebauteils nach [HAR10]

Die Simulationsergebnisse nach der Rückfederungsberechnung eines Lehnenseitenholms aus DP 1000 zeigen auf, dass bis zu 20 mm Maßabweichungen zu erwarten sind. Dies betrifft vor allem den Zentrumsbereich der Zarge. An dieser Stelle wird der größte Abstand von der Soll-Geometrie zum aufgefedernten Bauteil lokalisiert. Der Versuch im Try-Out bestätigt diese Annahme. Hier erfolgt der Vergleich der Zargenabstände in drei verschiedenen Schnitten. Das konventionelle Material H400LA weist geringere Zargenabstände und somit Rückfederungseffekte als der hochfeste Dualphasenstahl HCT980X auf. Besonders im Schnitt 2 (Zentrumsbereich Zarge) zeigt das hochfeste Material mit 14 mm Differenz zum konventionellen Material eine erhöhte Aufsprungneigung.

Da die erforderlichen Maßtoleranzen für das Laserschweißen nicht gewährleistet werden können, besteht keine Umsetzbarkeit für das Leichtbaukonzept. Neue rück-

federungsreduzierende Ansätze sind notwendig, um die Realisierung durchzusetzen. Da der Lehnseitenholm eine große Komplexität aufweist, soll für weitere Untersuchungen auf dessen Basis ein geschlossener und eine offener Demonstrator entwickelt werden.

Zunächst sollen jedoch kurz die relevanten Maschinendaten der Hydraulischen Presse aufgezeigt werden, damit diese als Randbedingungen bei der Demonstratorentwicklung einfließen können.

4.2 Hydraulische Presse

Für den Realversuch steht eine hydraulische Presse zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um eine ehemalige Produktionspresse der *Audi AG*. Diese wurde für den Laborbetrieb umgerüstet und befindet sich nun an der Ostfalia Hochschule in Wolfenbüttel. Die allgemeinen Maschinendaten sind in der *Abbildung 4.4* ersichtlich.

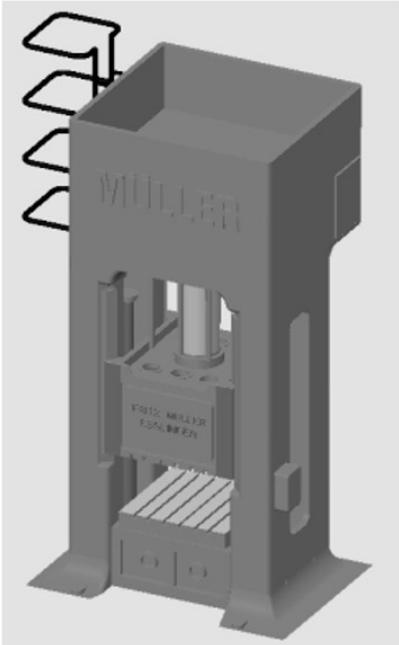
Hydraulische Presse	Allgemeine Maschinendaten
	<ul style="list-style-type: none"> • Zweifach wirkend • Fritz Müller Pressenfabrik Esslingen • Typ: ZE 160/200 – 10.3.1 • Höhe: 4700 mm • Breite: 2400 mm • Tiefe: 1600 mm • Gewicht: 23000 kg
	Geometrische Daten
	<ul style="list-style-type: none"> • Tischlänge: 1000 mm • Tischbreite: 1000 mm • Stößelhub: 600 mm • Ziehkissenhub: 250 mm
	Prozesstechnische Daten
	<ul style="list-style-type: none"> • Stößelkraft: 2000 kN • Niederhalterkraft: 630 kN

Abbildung 4.4: Maschinendaten der hydraulischen Presse

Die relevanten geometrischen Daten der hydraulischen Presse sind für die Konstruktion des Demonstrators von Bedeutung. So begrenzen die Tischlänge und –breite die äußeren Werkzeugabmessungen für den Realversuch (max. 1000 mm x 1000 mm). Ferner wirken Stößel- und Ziehkissenhub begrenzend auf die Bauteilhöhe des Demonstrators.

Die prozesstechnischen Daten sind ebenfalls von Bedeutung. So muss mittels inkrementeller Simulation geprüft werden, ob die vorhandenen Presskräfte ausreichen, um die Umformung des hochfesten Demonstrators durchzuführen. Hierbei weist die

hydraulische Presse eine Stößelkraft von 2000 kN und eine Niederhalterkraft von 630 kN auf.

Mit Hilfe des Praxisbauteils und der geometrischen Daten der hydraulischen Presse ist es möglich, einen Demonstrator zu konzipieren. Die Überprüfung der Prozessparameter wie die notwendige Presskraft erfolgt in Kapitel „6.1 Aufbau der Referenzsimulation“.

4.3 Konzept Demonstrator

Um den Demonstrator zu entwickeln, wurde die Konstruktion des Lehnenseitenholms als beispielhaftes Strukturbauteil herangezogen. In einem ersten Schritt werden die wesentlichen charakteristischen Merkmale ermittelt. Anschließend erfolgt die Übernahme der Eigenschaften auf den Demonstrator.

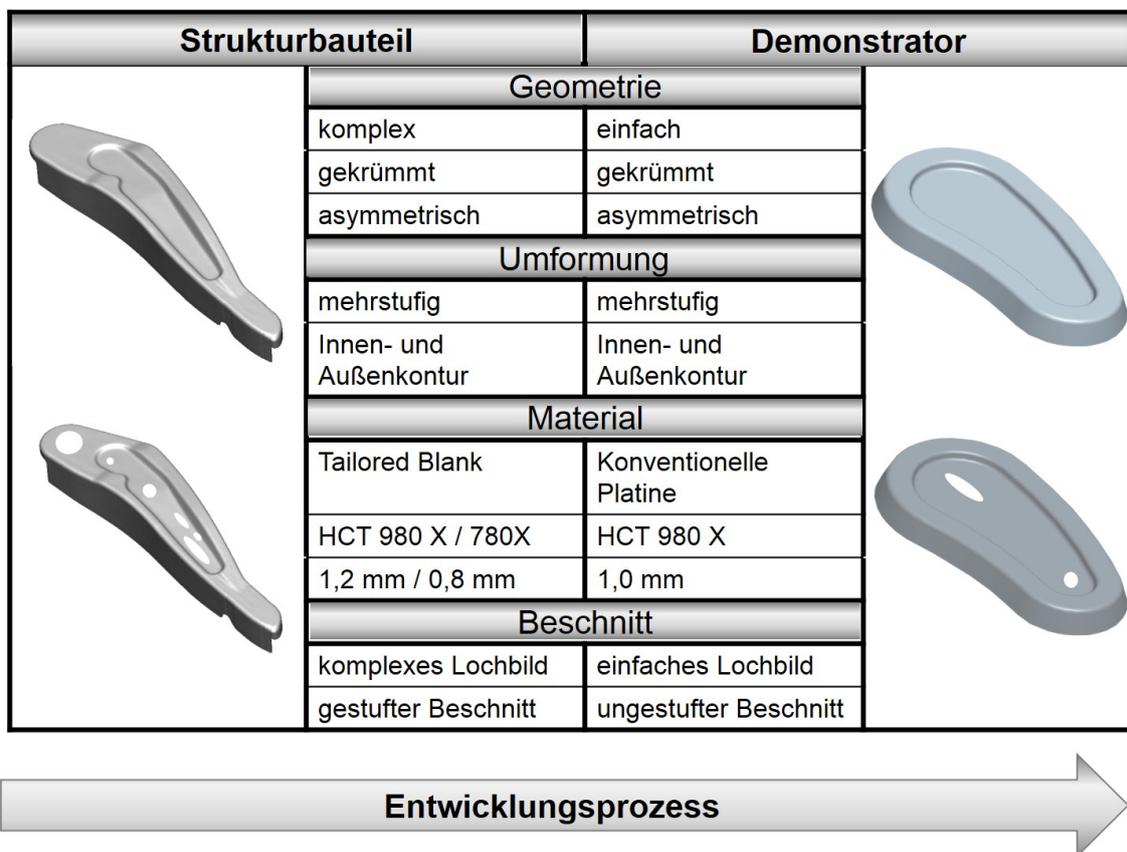


Abbildung 4.5: Entwicklungsprozess Demonstrator

Die Geometrie des Lehnenseitenholms erweist sich als sehr komplex. Um den Demonstrator zu vereinfachen, wird lediglich die gekrümmte und asymmetrische Charakteristik übernommen. Versteifungselemente, variable Radien und Höhenunterschiede in Bauteilbereichen werden nicht berücksichtigt. Da die Variation der Vorziehstufe erfolgen soll, ist ein mehrstufiger Umformprozess erforderlich. Demnach weist auch der Demonstrator eine Innen- und eine Außenkontur auf. Eine weitere Vereinfachung bezieht sich auf die verwendeten Materialien. Die Komplexität durch

den Einsatz von Tailored Blanks wird reduziert, indem für die Fertigung des Demonstrators lediglich eine konventionelle Platine eingesetzt wird. Die einheitliche Blechstärke des hochfesten Dualphasenstahls HCT980X beträgt 1,0 mm. Das komplexe Lochbild des Lehnenseitenholms beschränkt sich beim Demonstrator auf ein Rund- und ein Langloch, damit eine definierte RPS-Aufnahme⁴ zum Vermessen gewährleistet werden kann. Der gestufte Beschnitt wird ebenfalls im ersten Entwicklungsschritt vernachlässigt.

4.4 CAD-Konstruktion

Durch die Ausarbeitung des Konzeptes sind die Anforderungen an die Geometrie des Demonstrators definiert. Durch die Bildung der Grundkontur kann gewährleistet werden, dass die Gestalt sowohl gekrümmt als auch asymmetrisch ist. Das Ergebnis der Konstruktion ist in *Abbildung 4.6* ersichtlich.

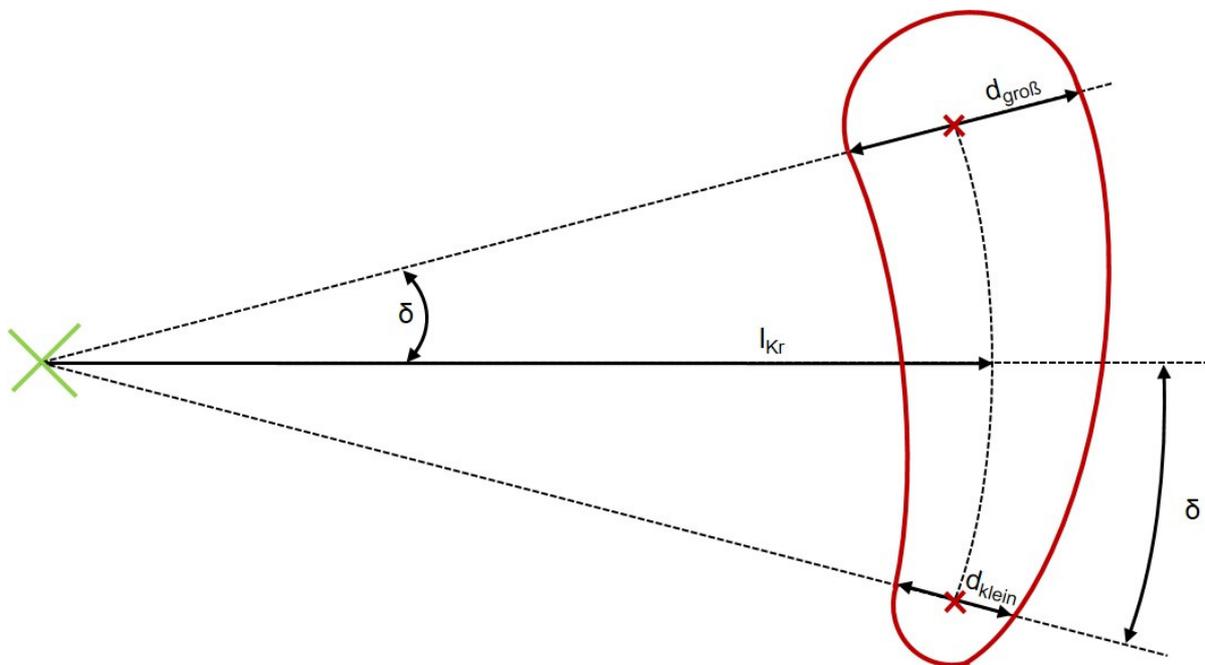


Abbildung 4.6: Grundkontur

Dazu wurde zum Konstruktionsursprung (*grünes Kreuz*) mit dem Konstruktionskrümmungsabstand l_{Kr} eine kreisbogenförmige Hilfslinie errichtet. Zwei weitere Hilfslinien weisen einen Krümmungswinkel δ zur horizontalen Hilfslinie auf. Die Schnittpunkte der Hilfslinien bilden die neuen Konstruktionsmittelpunkte (*rote Kreuze*). Mit Hilfe dieser Konstruktionsmittelpunkte wird ein Halbkreis mit großem Durchmesser $d_{gro\ddot{u}\beta}$ und mit kleinem Durchmesser d_{klein} entworfen. Diese Durchmesser sind ungleich groß, um die Achsensymmetrie zu vermeiden. Um die Grundkontur (GK) zu erzeu-

⁴ RPS (Referenz-Punkt-System): Einschränkung aller rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade zur eindeutigen Lagefixierung. Bezug erfolgt aufs Fahrzeugkoordinatensystem [VW96].

gen (*roter Linienverbund*), werden die Halbkreise durch tangenzenstetige Verbindungslinien geschlossen.

Im nächsten Entwicklungsschritt wird diese Grundkontur genutzt, um einen Demonstrator als dreidimensionales Objekt zu konstruieren. Die Vorgehensweise wird in *Abbildung 4.7* verdeutlicht.

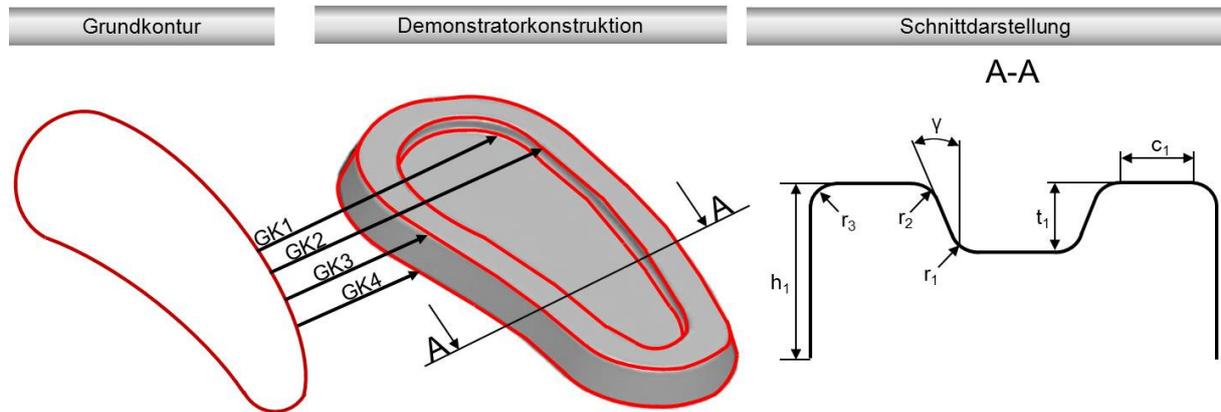


Abbildung 4.7: Konstruktion Demonstrator

Hierbei wird die erste Grundkontur (GK1) als Basis der Innenkontur verwendet. Mit Hilfe der zweiten Grundkontur (GK2) kann die Innenkontur zarge gebildet werden. Bei der Konstruktion der GK2 wurde diese auf einer anderen Ebene angelegt. Hierbei entspricht der Abstand der Konstruktionsebenen der Ziehtiefe der Innenkontur t_1 . Außerdem besitzt die GK2 ein umlaufendes Offset, sodass eine Öffnung des Innenzargenwinkels γ umsetzbar ist. Durch die Konstruktion der GK3 kann der Stegbereich des Demonstrators ausgebildet werden. In einer weiteren Ebene wird die GK4 angelegt. Durch den Flächenverbund von GK4 und GK3 wird die Außenkontur zarge erstellt. Ferner werden die scharfkantigen Übergänge der Konstruktion mit Radien versehen.

Die Wahl der Konstruktionsparameter des Demonstrators (*Tabelle 4-1: Konstruktionsparameter Demonstrator*) ist auf eine Vielzahl von Gründen zurückzuführen. Beispielsweise wurden die Tischabmaße der hydraulischen Presse als maximale geometrische Ausdehnung festgelegt, um eine spätere Herstellung zu gewährleisten. Die weitere Definition der Parameter orientierte sich am Praxisbauteil (z.B. Ziehtiefe, Radien, Stegbreite, Innenzargenwinkel) und wurden teilweise erfahrungsbasiert angepasst. Außerdem wurden pragmatische Ansätze gewählt, um eine Asymmetrie zu gewährleisten. So erfolgte die Festlegung, dass der große Durchmesser der Grundkontur doppelt so groß ist wie der kleine Durchmesser der Grundkontur. Folgende Tabelle gibt eine Übersicht aller definierten Konstruktionsparameter für den Demonstrator der ersten Generation.

Tabelle 4-1: Konstruktionsparameter Demonstrator

Konstruktionsparameter	Formelzeichen	Einheit	Wert
Krümmungswinkel	δ	°	20
Konstruktionskrümmungsabstand	l_{kr}	mm	290
großer Durchmesser Grundkontur	$d_{gro\beta}$	mm	80
kleiner Durchmesser Grundkontur	d_{klein}	mm	40
Öffnung des Innenzargenwinkels	γ	°	15
Ziehtiefe Innenkontur	t_1	mm	20
Bauteilhöhe	h_1	mm	60
Stegbreite	c_1	mm	20
Innenradius Innenkontur	r_1	Mm	8
Außenradius Innenkontur	r_2	Mm	8
Außenradius Außenkontur	r_3	mm	8

Nachdem die Konstruktionsparameter des Demonstrators definiert sind, wird die Herstellbarkeit in der inversen und in der inkrementellen Blechumformsimulation untersucht.

4.5 Inverse Simulation

Eine wichtige Anforderung an den Demonstrator ist die rei\erfreie Herstellung. Dies ist erforderlich, da f\ur eine genaue R\uckfederungsberechnung ein robuster Herstellungsprozess vorausgesetzt wird [CAR11]. Die Beurteilung der Herstellbarkeit zur Grundgeometrieauslegung mittels inversem Einschrittverfahren erfolgt in *Abbildung 4.8*.

Hierzu werden die Geometriedaten des Demonstrators (erste Generation) in das Programm *Forming Suite 10.0* eingelesen. Da keine Werkzeuggeometrie ben\otigt wird und keine weiteren Zwischenergebnisse ausgegeben werden, sind sehr kurze Berechnungszeiten bei ausreichender Genauigkeit zu erwarten. Da eine Vielzahl der Punkte oberhalb der Grenzform\anderungskurve liegt und somit die Rei\erwahrscheinlichkeit sehr hoch ist, werden im ersten Entwicklungsschritt zur Demonstratorauslegung die Bauteilh\ohe und die Ziehtiefe der Innenkonturh\ohe reduziert. Weiterhin werden die Durchmesser der Innenkontur vergr\o\ert, um den gef\ahrdeten Rei\erbereich zu entsch\arfen.

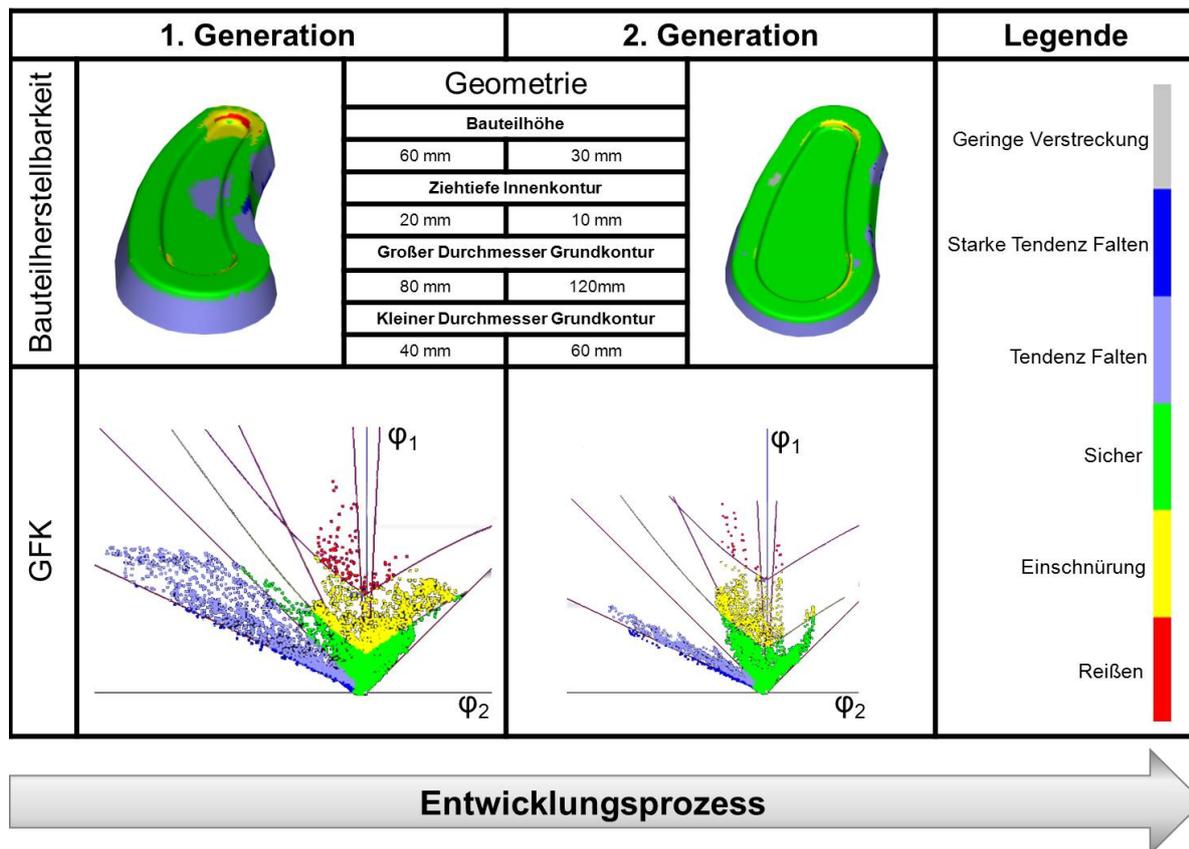


Abbildung 4.8: Demonstratorauslegung mit inversem Einschrittverfahren

Als Ergebnis ist erkennbar, dass der Demonstrator der zweiten Generation eine geringere Reißerwahrscheinlichkeit aufweist. Da die inverse Simulation lediglich eine begrenzte Bewertung der Herstellbarkeit zulässt, wird diese Grundgeometrie zu weiteren Auslegung verwendet und mit den Ergebnissen der inkrementellen Simulation weiter optimiert.

4.6 Inkrementelle Simulation

Nachdem erste Optimierungen der Grundgeometrie mittels inversem Einschrittverfahren vorgenommen wurden, erfolgt die weitere Beurteilung mit Hilfe der inkrementellen Simulationssoftware *PAM-STAMP 2G v2012.0*. Die höhere Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zum inversen Einschrittverfahren ergibt sich, da die Werkzeugwirkflächen in der Simulation berücksichtigt und mehrere Berechnungsschritte ausgegeben werden. Somit ist es möglich, neben Geometrieoptimierungen auch Optimierungen des Werkzeuges und des Prozesses durchzuführen.

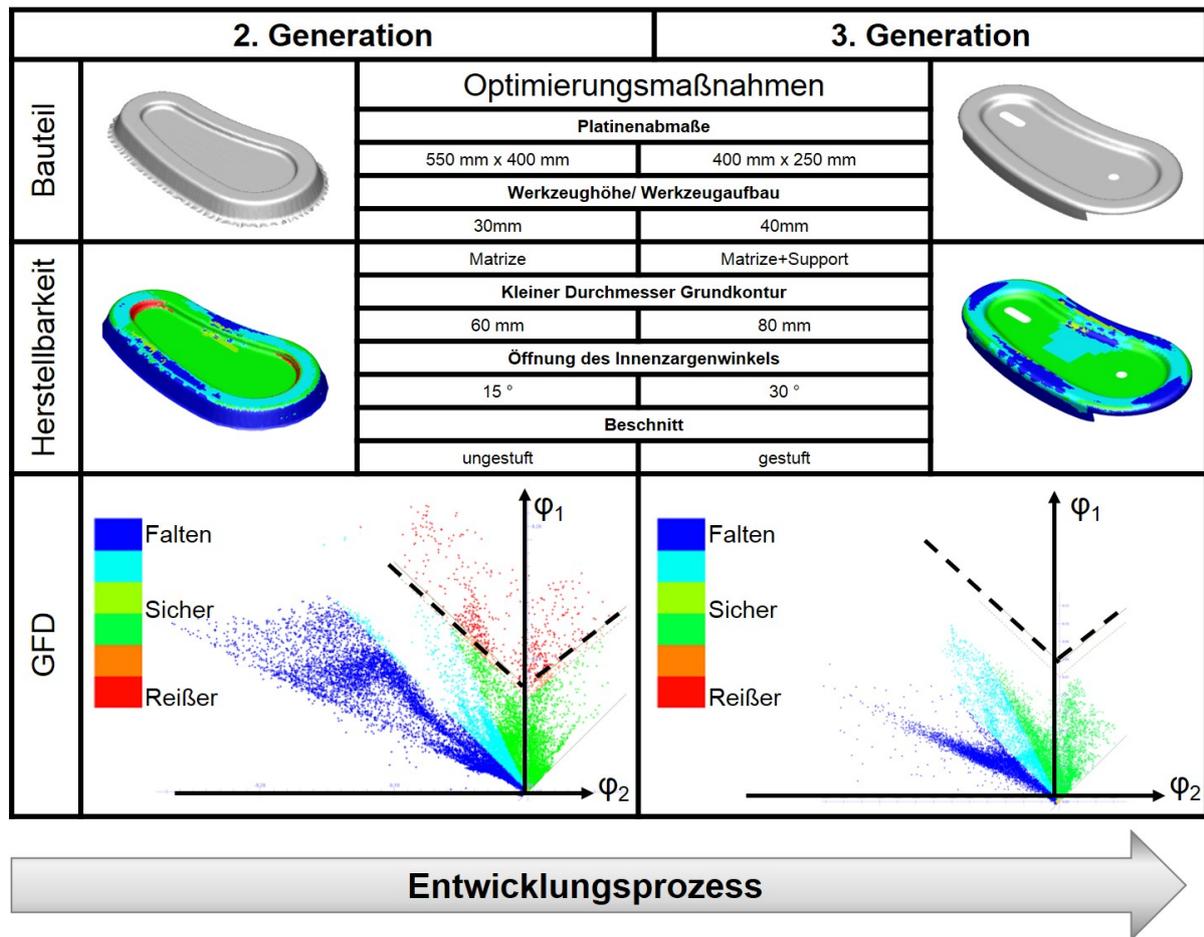


Abbildung 4.9: Demonstratorauslegung inkrementell

Der Aufbau dieser inkrementellen Simulation wird ausführlich in dem Kapitel „6.1 Aufbau der Referenzsimulation“ beschrieben. Nachdem die Fertigung des Demonstrators der zweiten Generation in der Simulation nachgebildet ist, kann festgestellt werden, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ReiBer im Durchmesser der Innenkontur auftreten werden. Außerdem ist eine sehr hohe Faltentendenz erkennbar. Um die ReiBer zu beseitigen und die Falten zu reduzieren, werden verschiedene Optimierungsmaßnahmen (Abbildung 4.9) angewendet.

Die Maße der rechteckigen Ausgangsplatine werden von 550 x 400 mm auf 400 x 250 mm verringert. Somit wird die ReiBerwahrscheinlichkeit deutlich reduziert und die Herstellbarkeit verbessert.

Im Gegensatz zum inversen Einschrittverfahren werden in der inkrementellen Simulation die Werkzeugwirkflächen benötigt. In der zweiten Generation sind Werkzeug- und Bauteilhöhe identisch (30 mm). Infolgedessen tritt eine starke Faltentendenz auf, da die Platine zum Prozessende nicht vollständig umgeformt wird. Die gesamte Werkzeughöhe wird daher um 10 mm vergrößert, sodass die Platine komplett durchgezogen werden kann. Diese Maßnahme führt zu einer deutlich reduzierten Faltentendenz.

Das Oberwerkzeug zur Herstellung des Demonstrators der zweiten Generation besteht lediglich aus der Matrize. Während der Umformung in der zweiten Ziehstufe ist ein Aufsprung der Blechinnenkontur vorhanden. Folglich ist der Umformprozess nicht stabil und die Herstellbarkeit weist Schwankungen auf. Als Optimierungsmaßnahme wird das Oberwerkzeug zweigeteilt. So entsteht neben der Matrize ein Support (matrizenseitiger Niederhalter). Zum Prozessbeginn der zweiten Ziehstufe wird das Blech fixiert, indem der Support eine definierte Haltekraft auf die Innenkontur des Demonstrators ausübt. Somit kann ein stabiler Umformprozess gewährleistet werden.

Um die Reißerwahrscheinlichkeit zu reduzieren, erfolgen weitere geometrische Maßnahmen. Hierzu wird der kleine Durchmesser der Innenkontur von 60 mm auf 80 mm vergrößert. Außerdem erfolgt eine Verdopplung des Innenzargenwinkels von 15° auf 30°.

Als letzte Maßnahme der inkrementellen Demonstratorauslegung wird eine gestufte Beschnittkontur eingeführt. Somit wird ein Großteil des Demonstratorbereiches entfernt, der eine sehr hohe Tendenz zur Faltenbildung aufweist. Die Optimierung der Beschnittkontur wird ebenfalls in dem Kapitel „6.1 Aufbau der Referenzsimulation“ beschrieben. Zudem werden Rund- und Langloch zur RPS-Aufnahme ergänzt.

Diese Optimierungsmaßnahmen führen zum Demonstrator der dritten Generation. Die Auswertung der Herstellbarkeit und des Grenzformänderungsdiagramms zeigen, dass ein sicherer Herstellprozess ohne Reißer vorhergesagt wird. Außerdem kann die Faltentendenz deutlich reduziert werden. Betrachtet man das Grenzformänderungsdiagramm des Demonstrators der dritten Generation, so wird deutlich, dass die rote Punktwolke, die Reißer anzeigt, vermieden werden konnte. Zudem konnte der Anteil der starken Faltentendenz (dunkelblaue Punktwolke) verringert werden. Die restliche Faltenbildung wird akzeptiert, da es sich um ein Struktur- und nicht um ein Außenhautbauteil handelt.

4.7 Offener Demonstrator

Die Motivation einen weiteren Demonstrator zu entwickeln, ergibt sich aus dem unterschiedlichen Rückfederungsverhalten von offenen und geschlossenen Strukturbauteilen. Nach der Umformung sind verschiedene Eigenspannungszustände in den Blechbauteilen, die die Rückfederung entscheidend beeinflussen. Die rückfederungsreduzierenden Maßnahmen können demnach für offene und geschlossene Bauteile unterschiedlich ausfallen. In Voruntersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass offene Bauteile weniger Eigenspannungen aufweisen und somit stärker auffedern [SAC11][SAC12].

Da der geschlossene Demonstrator nach den Optimierungsmaßnahmen eine sichere Herstellbarkeit ohne Reißer aufweist, kann dieser als Grundlage zur Entwicklung des

offenen Demonstrators verwendet werden. Da der offene Demonstrator vom geschlossenen Demonstrator abgeleitet wird, können beide Geometrien mit derselben Wirkfläche und somit mit demselben Versuchswerkzeug hergestellt werden.

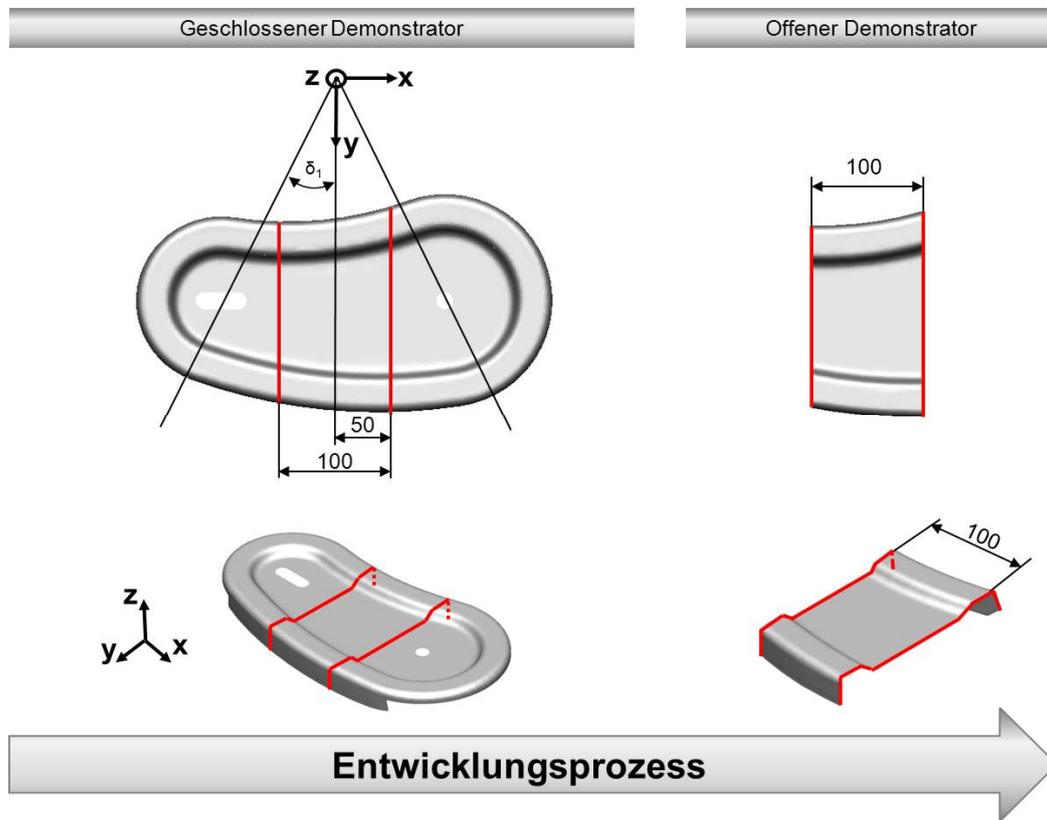


Abbildung 4.10: Entwicklung des offenen Demonstrators

Betrachtet man die Draufsicht des geschlossenen Demonstrators, erkennt man eine Schnittebene, die durch den Konstruktionskoordinatenursprung verläuft und die x-Normale aufweist. Durch die Integration zweier Schnittlinien (in *Abbildung 4.10* rot dargestellt) erhält man den offenen Demonstrator. Der Abstand der Beschnittlinien zur Hilfsschnittebene beträgt zu beiden Seiten jeweils 50 mm. Somit ergibt sich die Gesamtbreite von 100 mm für den offenen Demonstrator. Bei einer Überschreitung dieses Maßes würde beim geschlossenen Demonstrator die Abstufung des Zargenbeschnittes beginnen. Eine einheitliche Zargenhöhe des offenen Demonstrators wäre somit nicht gewährleistet.

4.8 Methodenentwicklung

Da die Geometrie des offenen und des geschlossenen Demonstrators vorhanden sind, kann die erfahrungsbasierte Methode abgeleitet werden. Zunächst soll die Methode des beispielhaften Karosseriebauteils analysiert werden.

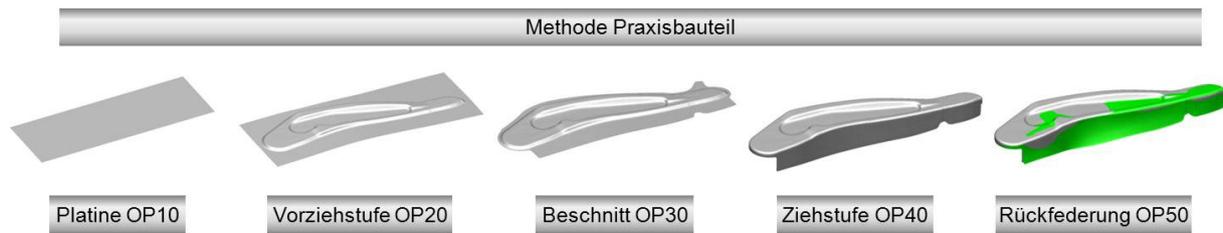


Abbildung 4.11: Methode Lehnenseitenholm

Die Rechteckplatine mit den Abmaßen 620 mm x 220 mm wird in der Operationsstufe 20 (OP20) erstmalig umgeformt. In der sogenannten Vorziehstufe werden die Innenkontur und ein Teil der Außenkontur gefertigt. Dabei erfolgt eine Anlehnung der vorgezogenen Geometrie an die geforderte Endgeometrie. Demnach sind die Radien in der Vorziehstufe identisch mit den Radien der zweiten Ziehstufe. Anschließend erfolgt der Beschnitt der Platine (OP30). Im nächsten umformenden Prozess wird durch die Ziehstufe die geforderte Geometrie des Karosseriebauteils hergestellt (OP40). Wird der Lehnenseitenholm aus dem Werkzeug entnommen, tritt die Rückfederung auf (OP50). Die Methodenentwicklung des geschlossenen Demonstrators erfolgt auf der Basis der Methode des Praxisbauteils.



Abbildung 4.12: Methode Demonstrator geschlossen

Auch in der Methode des geschlossenen Demonstrators ist eine Rechteckplatine und keine Formplatine vorgesehen. Die Blechabmaße betragen 400 mm x 250 mm und wurden per inversem Einschnittverfahren der Simulation ermittelt. Hierbei wird die Endgeometrie in das Programm eingelesen und durch Abwicklung des Bauteils in die Ebene können die Abmaße bestimmt werden. In der Vorziehstufe (OP20) wird ebenfalls die vollständige Innenkontur und ein Anteil der Außenkontur gefertigt. Auch hier entsprechen die Bauteilradien schon der Endkontur. Nach dem Beschnitt (OP30) wird in der Ziehstufe OP40 die geforderte Geometrie hergestellt. Die Rückfederung wird in OP50 berücksichtigt. An Hand dieser entwickelten erfahrungsbasierten Methode kann ebenfalls die Methode des offenen Demonstrators abgeleitet werden.

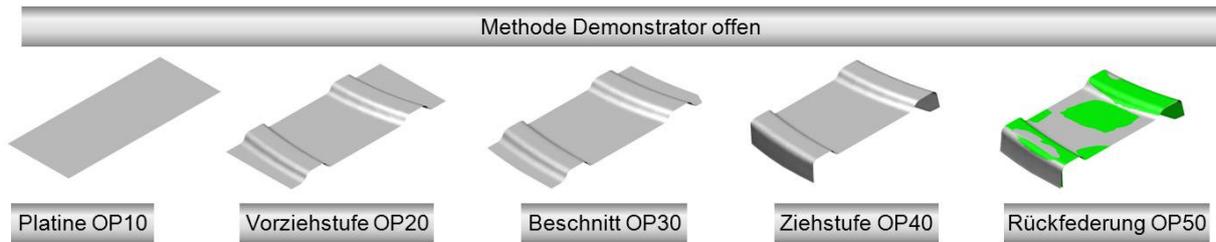


Abbildung 4.13: Methode Demonstrator offen

In der Methodenentwicklung des offenen Demonstrators sind alle Operationen ebenfalls berücksichtigt. Die Platinenabmaße betragen hingegen 400 mm x 100 mm. Die Ermittlung dieser Abmaße wurden mit dem inversen Einschrittverfahren erzielt. Nach der Vorziehstufe, dem Beschnitt und der zweiten Ziehstufe schließt sich die Rückfederung an.

4.9 Variationsmöglichkeiten

Aus der erarbeiteten Methode des geschlossenen und des offenen Demonstrators können die Variationsparameter in der *Abbildung 4.14* aufgezeigt werden. Neben Materialparametern werden geometrische und prozesstechnische Parameter unterschieden.

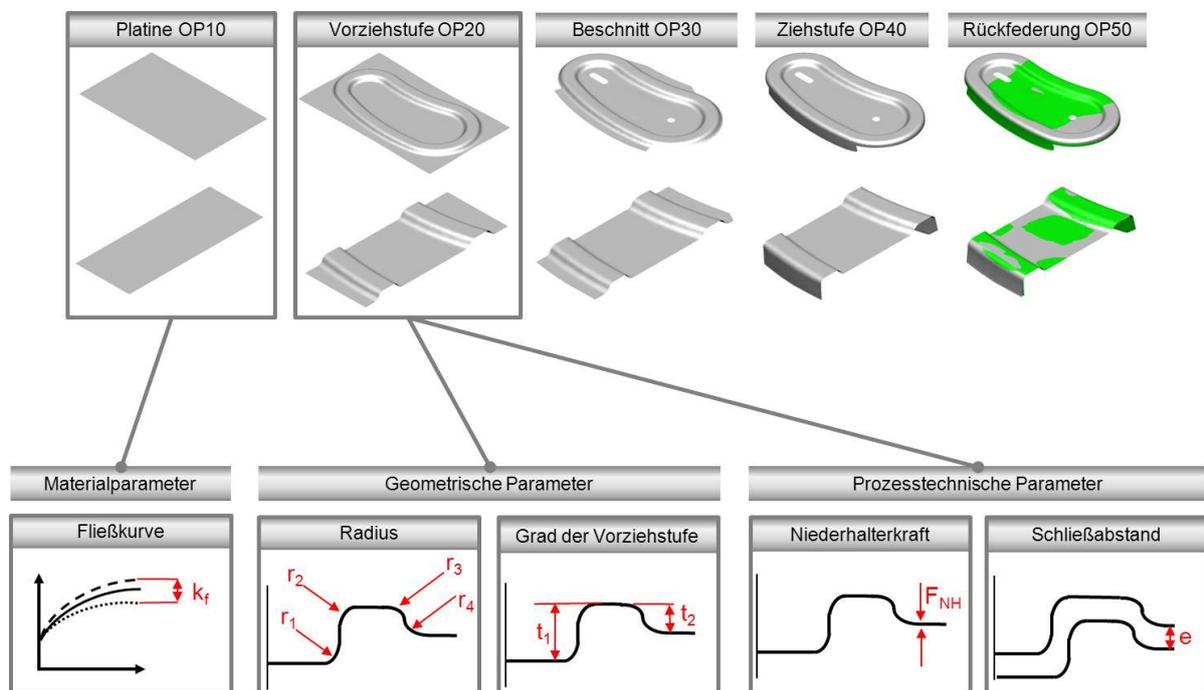


Abbildung 4.14: Variationsparameter (Hinweis: keine Skalierung in Abb.)

Da Materialeigenschaften einen großen Einfluss auf die Rückfederung von hochfesten Blechwerkstoffen haben, soll zunächst der Parameter der Fließkurvenstreuung untersucht werden. Im folgenden Kapitel wird das Werkstoffverhalten des hochfesten Dualphasenstahls HCT980X analysiert. Der Einfluss der ermittelten Streuung der

Fließkurven auf die Rückfederung soll sowohl beim offenen als auch beim geschlossenen Demonstrator untersucht werden.

Vor allem die Variationsmöglichkeiten der Vorziehstufe sind für diese Untersuchung von entscheidender Bedeutung. Aus geometrischer Sicht können vier Radien variiert werden. Hierbei handelt es sich um den Innenradius der Innenkontur (r_1), den Außenradius der Innenkontur (r_2), den Außenradius der Außenkontur (r_3) und den Innenradius der Außenkontur (r_4). Als Referenz wird angenommen, dass alle Radien 8 mm groß sind (*siehe 4.4 CAD-Konstruktion*). In dieser Untersuchung können somit kleinere und größere Radien in der Vorziehstufe umgesetzt werden.

Ein weiterer geometrischer Variationsparameter ist der Grad der Vorziehstufe. Es ist möglich, die Ziehtiefe der Innenkontur (t_1) und die Ziehtiefe der Außenkontur (t_2) zu variieren. Beispielsweise kann die Innenkontur in der Vorziehstufe nicht vollständig ausgeformt werden, sodass in der zweiten Ziehstufe eine zusätzliche Umformung erforderlich ist.

Aus prozesstechnischer Sicht kann die Niederhalterkraft in der Vorziehstufe variiert werden. Durch die Definition einer Referenzniederhalterkraft können in der Vorziehstufe geringere und größere Haltekräfte hinsichtlich der Rückfederung nach der zweiten Ziehstufe beurteilt werden.

Außerdem lässt sich der Schließabstand zwischen Matrize und Stempel zum Prozessende der ersten Ziehstufe modifizieren. Beim vollständigen Verfahren der Werkzeugkomponenten ist kein zusätzlicher Schließabstand zwischen Matrize und Stempel vorhanden. Der Abstand wird lediglich durch die Blechstärke festgelegt. Die Variationsmöglichkeit besteht darin, dass zum Prozessende der ersten Ziehstufe mit einem zusätzlichen Abstand die Umformung gestoppt wird.

Bevor jedoch die Variationsrechnungen durchgeführt werden, erfolgt die Charakterisierung des Werkstoffverhaltens, indem die Fließkurven und die Grenzformänderungskurven des hochfesten Dualphasenstahls ermittelt werden.

5 Charakterisierung des Werkstoffverhaltens

Um die Eigenschaften des hochfesten Dualphasenstahls HCT980X zu beschreiben, werden Zugversuche durchgeführt. Hierbei sollen Materialkennwerte wie beispielsweise der Elastizitätsmodul oder die Anisotropiekennwerte erfasst werden. Zudem sollen die Fließkurven dargestellt und analysiert werden. Um das reale Bauteilverhalten in der Simulation möglichst genau vorhersagen zu können, ist es wichtig, die Kennwerte in die Materialkarte zu übertragen. Dies ist Voraussetzung, um eine korrekte Spannungs- und Rückfederungsvorhersage vornehmen zu können.

Ferner erfolgt der Nakajima-Versuch, um die Grenzformänderungskurve zu erhalten. Mit Hilfe dieser Kurve lassen sich im Grenzformänderungsdiagramm die Versagensfälle Reißen und Einschnürungen beurteilen. Die reißenfreie Herstellbarkeit des Demonstrators ist erforderlich, um einen reproduzierbaren und robusten Prozess zu erhalten und somit das Rückfederungsverhalten auswerten zu können.

5.1 Ermittlung der Fließkurve

Um die Materialkennwerte und die Fließkurve des hochfesten Dualphasenstahls zu erhalten, werden verschiedene Zugversuche durchgeführt. Die Vorgehensweise ist in der *Abbildung 5.1* visualisiert.

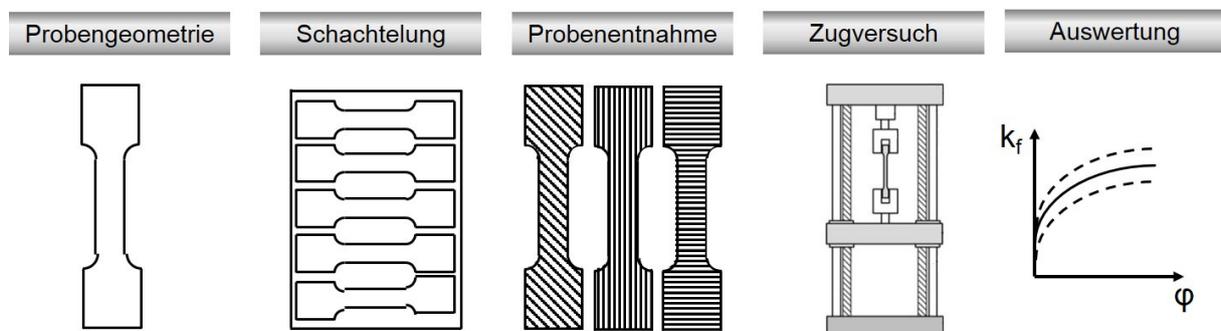


Abbildung 5.1: Vorgehensweise Zugversuch

Für den genormten Zugversuch metallischer Werkstoffe [DIN09a] können verschiedene Probengeometrien [DIN09c] verwendet werden. Nach der Auswahl der geeigneten Geometrie muss diese in das vorhandene Versuchsblech geschachtelt werden, um eine optimale Materialausnutzung zu gewährleisten. Anschließend werden die Flachzugproben unter verschiedenen Winkeln zur Walzrichtung aus dem Blech entnommen. Mit Hilfe einer Materialprüfmaschine werden die Messwerte während des Zugversuches aufgenommen. Durch die aufbereitete Darstellung der Messwerte ist eine Auswertung der Materialkennwerte und der Fließkurve möglich.

Die Auswahl der Zugprobenform mit den Abmaßen der geometrischen Parameter ist in *Abbildung 5.2* ersichtlich.

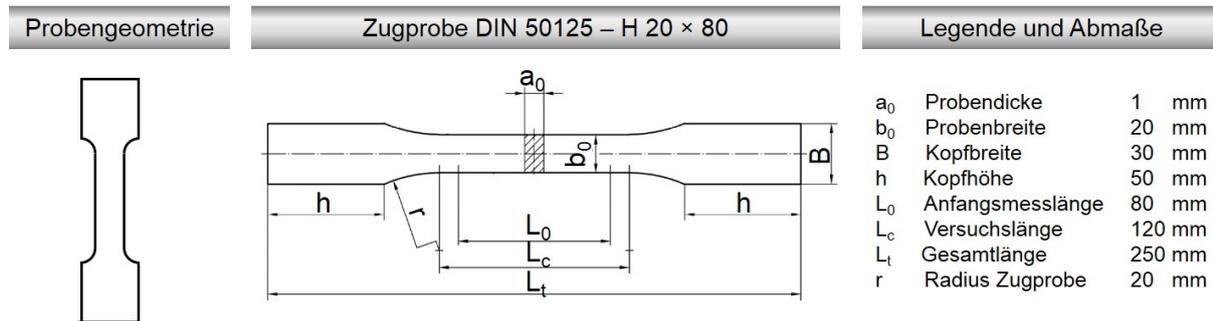


Abbildung 5.2: Zugprobe nach DIN 50125 - H 20 x 80 nach [DIN09c]

Für Flacherzeugnisse mit 1 mm Blechstärke ist die Zugprobenform H zu wählen. Die Abmessungen mit einer Probenbreite von 20 mm werden sehr häufig im Laborbetrieb verwendet. Die Wahl der weiteren geometrischen Parameter erfolgt nach den Empfehlungen in der DIN 50125 [DIN09c]. Im nächsten Arbeitsschritt wird die ausgewählte Probenform innerhalb der Versuchsblechabmaße geschachtelt.

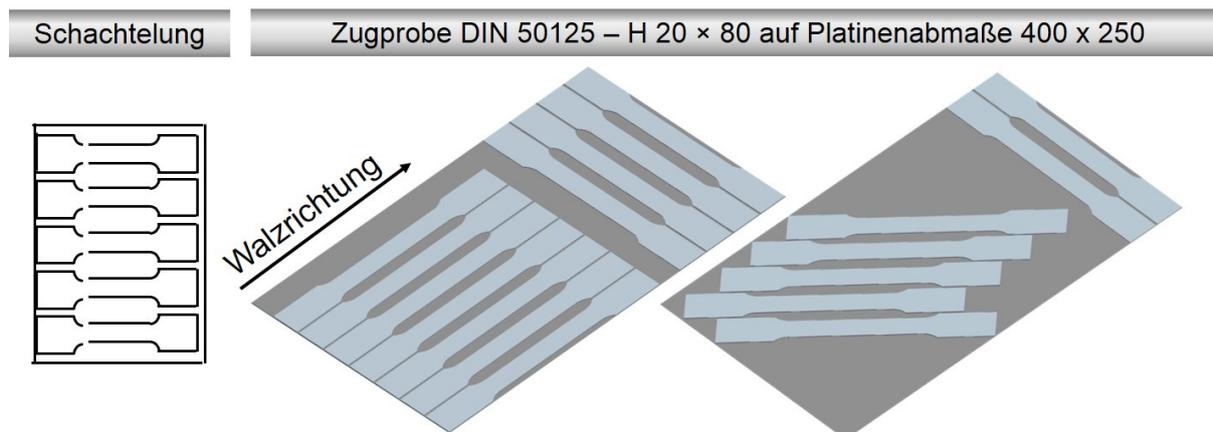


Abbildung 5.3: Schachtelung der Zugproben

Zur Bestimmung der Anisotropiekennwerte müssen die Zugproben längs, quer und diagonal zur Walzrichtung des Bleches angeordnet werden. Unter der Voraussetzung, dass zwei Bleche für die Durchführung der Zugversuche zur Verfügung stehen, ergibt sich die optimale Schachtelung der Zugproben in *Abbildung 5.3*. Die minimale Probenanzahl je Probenrichtung bestimmt den Versuchsumfang. Werden fünf diagonale Proben auf einem Blech angeordnet, ist es möglich, zwei zusätzliche Proben quer zur Walzrichtung zu nutzen. Demnach stehen für den Versuchsumfang je fünf Proben jeder Walzrichtung zur Verfügung. Die drei zusätzlichen Proben (zwei längs und eine quer) werden für Probemessungen genutzt.

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Zugproben aus dem Blech entnommen und vorbereitet. Dieser Zusammenhang wird in *Abbildung 5.4* ersichtlich.

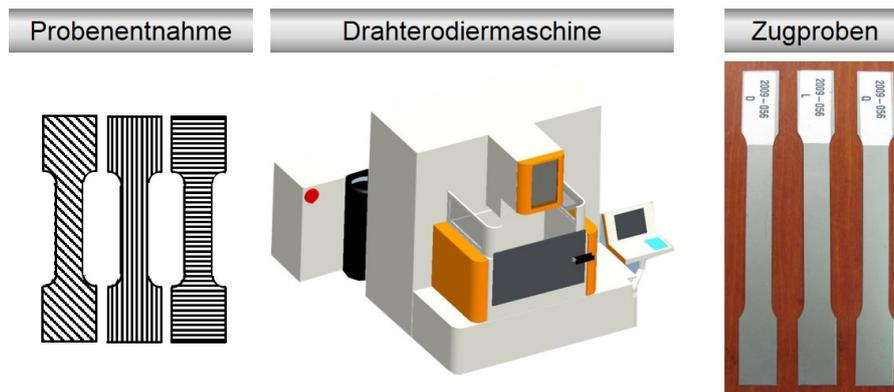


Abbildung 5.4: Probenentnahme Zugversuch

Zur Probenentnahme wird die Drahterodiermaschine des Typs *AGIE Charmilles CUT20* verwendet. Die Programmierung der Kontur ergibt sich aus der Zugproben-geometrie und der Schachtelung dieser auf dem Versuchsblech. Die erforderliche gemittelte Rauhtiefe R_z der Zugproben muss mindestens $6,3 \mu\text{m}$ betragen [DIN09c]. Diese Rauheitswerte werden mit dem Drahterodieren eingehalten [HER04]. Nach der Probenentnahme werden die Zugproben vorbereitet. Um die Walzrichtung zu kennzeichnen, werden an den Probenköpfen beschriftete Aufkleber angebracht.

Nach der Probenentnahme und -vorbereitung erfolgt die Durchführung des Zugversuchs. Die Visualisierung ist in *Abbildung 5.5* vorhanden.

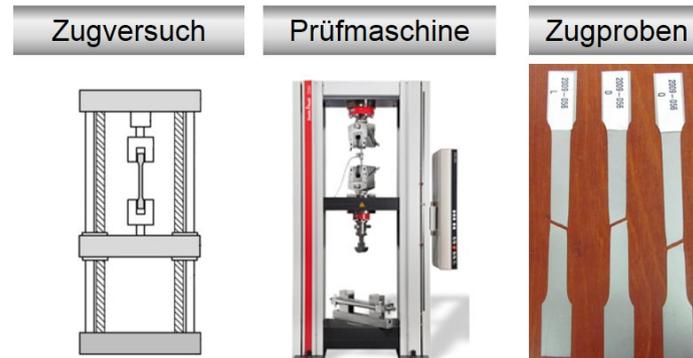


Abbildung 5.5: Durchführung des Zugversuchs

Zur Durchführung der Zugversuche wird die Materialprüfmaschine *Z250* der Firma *Zwick/Roell* verwendet. Nach dem Einspannen der Zugprobe werden Längen- und Breitendehnungsaufnehmer positioniert. Diese ermitteln während der Versuchsdurchführung kontinuierlich die Längen- und Breitenänderungen der Probe. Da außerdem die Kraft bekannt ist, kann das System die Spannungen und Dehnungen bis zum Bruch der Probe ermitteln und in einem Diagramm darstellen. Ferner werden die Materialkennwerte tabellarisch aufgenommen. Im Anhang befinden sich alle Einzelmesswerte der 15 Zugproben. Die aufgearbeitete Darstellung der arithmetischen Mittelwerte bezogen auf die jeweilige Walzrichtung ist in *Tabelle 5-1* ersichtlich.

Tabelle 5-1: Auswertung Materialkennwerte

Werkstoff	WR	E	R _{p0,2}	R _m	A ₈₀	A _g	n	k	r
		GPa	MPa	MPa	%	%	[-]	MPa	[-]
HCT980X	0°	217	860	1061	8,55	5,91	0,077	1412	0,71
	45°	216	833	1022	8,04	5,48	0,075	1356	0,88
	90°	215	873	1071	7,43	5,31	0,075	1421	0,76

Der Elastizitätsmodul sinkt nur gering mit zunehmender Orientierung zur Walzrichtung (von 0° bis 90°) und ist annähernd konstant. Das arithmetische Mittel aller 15 Zugproben beträgt 216 GPa. Dieser Wert wird in die Materialkarte der Simulation übertragen.

An Hand der Materialkennwerte lässt sich das anisotrope Werkstoffverhalten feststellen. Beispielsweise ergeben sich bei einer Walzrichtung (WR) von 90° die größten Werte der Dehngrenze (R_{p0,2}) und der Zugfestigkeit (R_m). Die Bruchdehnung (A₈₀) und die Gleichmaßdehnung (A_g) nehmen bei dieser Probenorientierung hingegen die geringsten Werte an. Die Abbildung des anisotropen Verhaltens erfolgt in der Simulation, indem die Anisotropiekennwerte der jeweiligen Walzrichtung (r₀=0,71; r₄₅=0,88; r₉₀=0,76) in die Materialkarte eingetragen werden. Somit kann bei Verwendung der Fließhypothese nach Hill die Anisotropie berücksichtigt werden. Da die Anisotropiekennwerte kleiner 1 sind, wird geschlossen, dass beim einachsigen Zugversuch die Längenänderung der Probe zu einem größeren Anteil aus der Probendicke als aus der Probenbreite erzielt wird. Ferner kann mit diesen Werten die ebene Anisotropie (Δr) bestimmt werden.

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (5.1)$$

$$\Delta r = \frac{0,71 + 0,76 - 2 * 0,88}{2} = -0,145 \quad (5.2)$$

Mit diesem Wert lässt sich eine Aussage über die Neigung zur Zipfelbildung eines tiefgezogenen Napfes machen. Bei einem negativen Wert treten die Zipfel 45° zur Walzrichtung auf. Da dieser Wert jedoch sehr klein ist, wird die Gefahr der Zipfelbildung als gering eingestuft.

Weitere Materialkennwerte sind Verfestigungsexponent (n) und Werkstoffbeiwert (k). Die Darstellung der Werte aller 15 Zugproben erfolgt in *Tabelle 5-2*. Mit Hilfe dieser Werkstoffkennwerte kann die Fließkurve als Funktion auch außerhalb des realen Messwertebereiches für große Umformgrade beschrieben werden. Dies ist notwendig, da vergleichsweise geringe Umformgrade ($\varphi < 0,1$) im einachsigen Zugversuch bis zum Bruch des hochfesten Materials erreicht werden. In der Umformsimulation werden jedoch größere Umformgrade benötigt ($\varphi < 1,0$).

Tabelle 5-2: Verfestigungsexponent und Werkstoffbeiwert

Probe	Kennung	WR	n	k
			[-]	[MPa]
1	L1	0°	0,077	1407,06
2	L2	0°	0,078	1422,02
3	L3	0°	0,076	1407,67
4	L4	0°	0,076	1401,88
5	L5	0°	0,078	1419,04
6	D1	45°	0,075	1359,97
7	D2	45°	0,078	1364,13
8	D3	45°	0,073	1358,23
9	D4	45°	0,075	1343,74
10	D5	45°	0,077	1351,49
11	Q1	90°	0,075	1413,50
12	Q2	90°	0,075	1418,41
13	Q3	90°	0,075	1443,48
14	Q4	90°	0,075	1407,88
15	Q5	90°	0,076	1423,63

Mit Hilfe des Verfestigungsexponenten und des Werkstoffbeiwertes lässt sich mit der Hollomon-Gleichung die Fließspannung über den Umformgrad beschreiben. Es gibt verschiedene Ansätze, um die Fließkurve zu beschreiben. In dieser Untersuchung wird die Hollomon-Gleichung ausgewählt, da in der verwendeten Blechumformsimulation *PAM-STAMP 2G v2012.0* hiermit das Material genauer beschrieben werden kann.

$$k_f = k * \varphi^n \quad (5.3)$$

An Hand der Probe L1 sollen beispielhaft die realen Messwerte aus dem Zugversuch mit der Fließkurvenbeschreibung nach Hollomon verglichen werden. Die vollständige tabellarische Darstellung der Fließspannung über dem Umformgrad aller Zugproben ist dem *Anhang 3* zu entnehmen.

In der *Abbildung 5.6* ist zu erkennen, dass die realen Messwerte der Zugprobe L1 im Bereich $0,01 \leq \varphi \leq 0,08$ liegen. Die Extrapolation ergibt hingegen die Fließkurve für den Bereich $0,01 \leq \varphi \leq 1,0$. Ferner kann aufgezeigt werden, dass die Messwerte und die Fließkurve nach Hollomon verhältnismäßig geringe Abweichungen zueinander aufweisen. Die maximale Abweichung zwischen Messwert und berechneter Kurve ist bei einem Umformgrad von 0,01 vorhanden. Diese beträgt absolut 30 MPa. Demnach liegt die maximale prozentuale Abweichung bei ca. 3%. Im extrapolierten Bereich ist kein Vergleich möglich, da hierfür keine realen Messwerte vorliegen.

Trotz dieser geringen Abweichungen zwischen den realen Messwerten und der extrapolierten Hollomon-Funktion ist ein Einfluss auf die Simulationsergebnisse vorhanden. Da jedoch der Einfluss der Fließkurvenstreuung als schwerwiegender eingestuft wird, erfolgt die Beurteilung in *6.3.1 Fließkurvenstreuung*.

φ	L1	
	Hollomon	Messwerte
φ [-]	k_f MPa	k_f MPa
0,01	985	955
0,02	1039	1035
0,03	1072	1074
0,04	1097	1098
0,05	1116	1115
0,06	1141	1127
0,07	1150	1138
0,08	1157	1144
0,09	1177	-
0,1	1177	-
0,2	1242	-
0,3	1282	-
0,4	1311	-
0,5	1333	-
0,6	1349	-
0,7	1369	-
0,8	1383	-
0,9	1396	-
1	1407	-

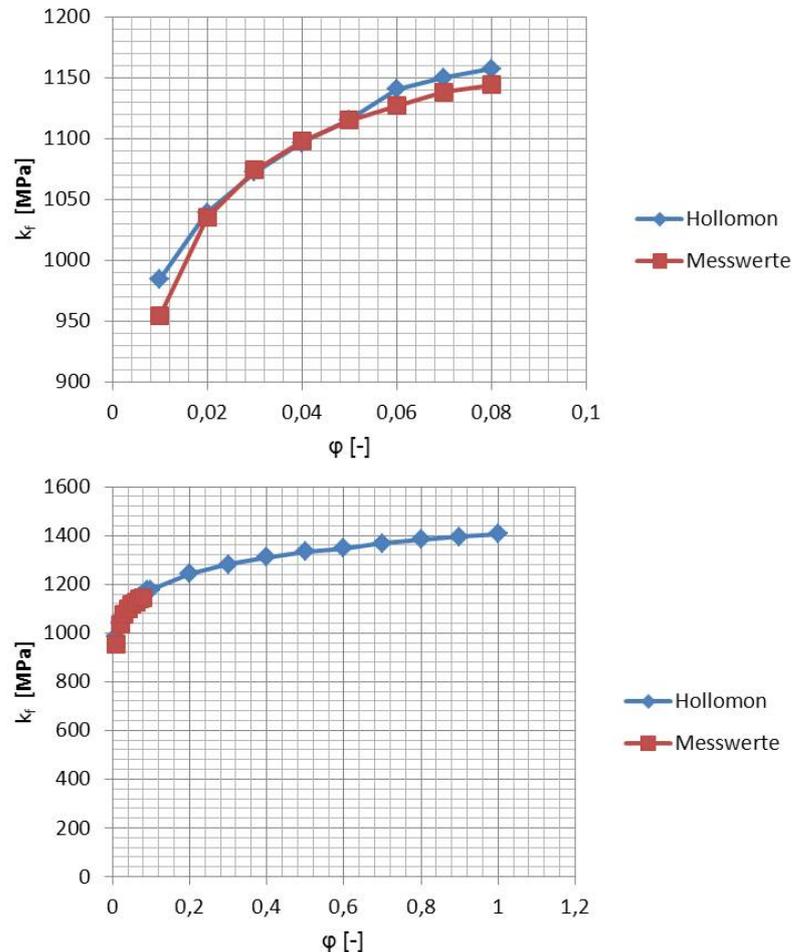


Abbildung 5.6: Vergleich Hollomon und Messwerte

Da in der Simulation lediglich eine Fließkurve in die Materialkarte geladen werden soll, wird das arithmetische Mittel der Fließspannungen aller Zugproben für den jeweiligen Umformgrad ermittelt (MID). Außerdem werden die minimale und die maximale Fließkurve dargestellt, um die Spannweite aufzuzeigen (MIN= D4; MAX= Q3). Für die Referenzsimulation und für die Variationssimulationen wird die Fließkurve der arithmetischen Mittel verwendet. Jedoch soll beispielhaft die minimale und die maximale Fließkurve verwendet werden, um den Einfluss der Fließkurvenstreuung auf das Rückfederungsergebnis in der Simulation zu quantifizieren. Die Darstellung dieser drei Kurven mit den jeweiligen Werten der Fließspannung über dem Umformgrad ist der *Abbildung 5.7* zu entnehmen.

	MIN	MAX	MID
	D4	Q3	
φ	k_f	k_f	k_f
[-]	MPa	MPa	MPa
0,01	953	1022	984
0,02	1003	1077	1037
0,03	1034	1110	1070
0,04	1057	1134	1093
0,05	1075	1153	1112
0,06	1089	1169	1128
0,07	1102	1183	1141
0,08	1113	1195	1153
0,09	1123	1205	1164
0,1	1132	1215	1172
0,2	1192	1280	1236
0,3	1228	1319	1274
0,4	1255	1348	1302
0,5	1276	1370	1325
0,6	1293	1389	1343
0,7	1308	1405	1359
0,8	1322	1420	1373
0,9	1333	1432	1385
1	1344	1443	1396

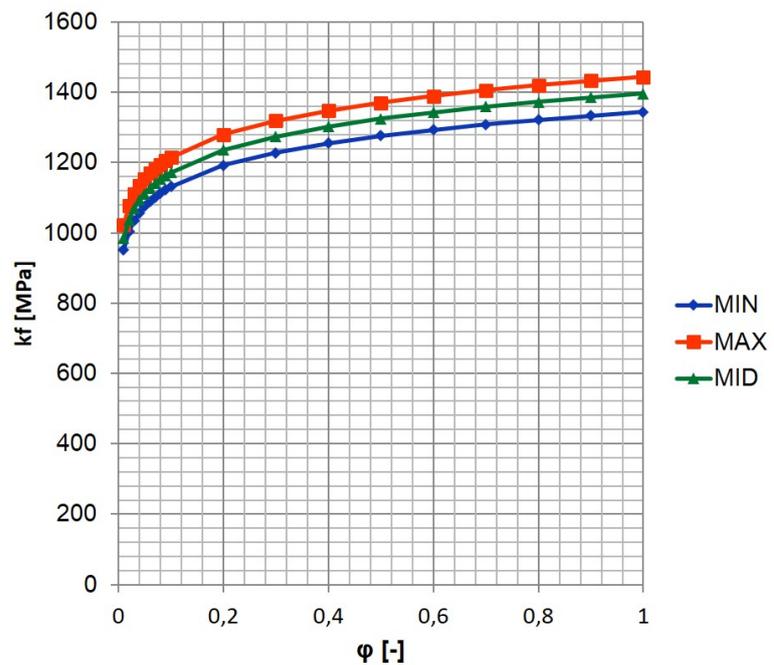


Abbildung 5.7: Fließkurven für Materialkarte

Die größten Abweichungen zwischen der minimalen und der maximalen Fließkurve beträgt absolut 99 MPa. Generell ist zu sagen, dass die Zugproben quer zur Walzrichtung die höchsten Fließspannungen aufweisen. Die Proben diagonal zur Walzrichtung zeigen hingegen die geringsten Fließspannungen auf. Dies ist in dem anisotropen Verhalten des Materials HCT980X begründet. Dieses Verhalten wird bei der Spannungsberechnung durch Eingabe der Anisotropiekennwerte ($r_0=0,71$; $r_{45}=0,88$; $r_{90}=0,76$) in der Simulation berücksichtigt. Daher kann die Fließkurve der arithmetischen Mittelwerte als erste Annäherung in der Materialkarte der Simulation verwendet werden.

5.2 Ermittlung der Grenzformänderungskurve

Ein weiterer wichtiger Versuch zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens ist der Nakajima-Versuch. Hiermit wird die Grenzformänderungskurve (GFK) ermittelt, um die Versagensfälle Reißen und Einschnürungen beurteilen zu können. Für die Materialkarte der Simulation wird diese GFK benötigt. *Abbildung 5.8* zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise des Versuchs auf.

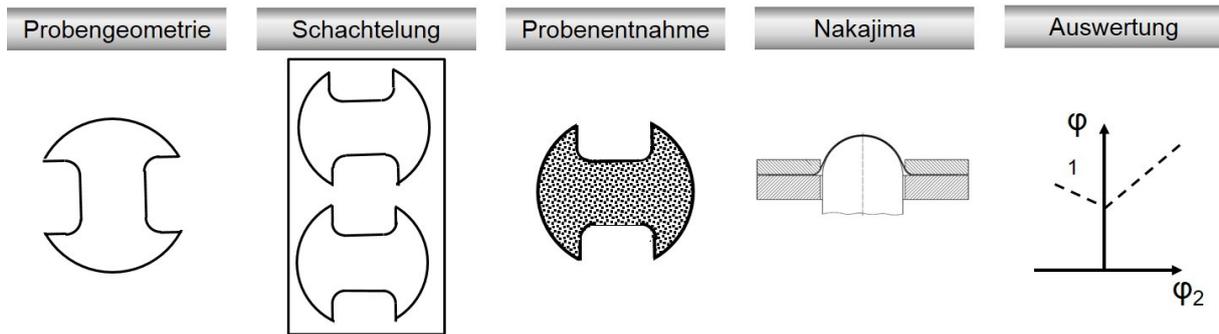


Abbildung 5.8: Vorgehensweise Nakajimaversuch

Die genormte Probengeometrie [DIN09d] wird in den vorhandenen Versuchsblechen (400 x 250 mm) geschachtelt, um eine optimale Materialausnutzung zu gewährleisten. Anschließend werden die Proben mit einem geeigneten trennenden Fertigungsverfahren (Drahterodieren) aus dem Blech entnommen. Nach der Probenvorbereitung werden diese im Nakajima-Versuch bis zum Reißen belastet. Anschließend erfolgt die Auswertung der Messwerte.

In der *Abbildung 5.9* ist die genormte Probengeometrie ersichtlich.

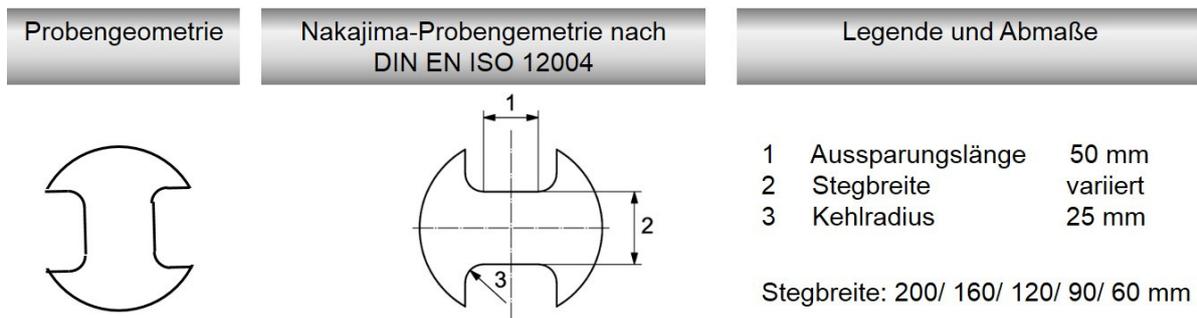


Abbildung 5.9: Nakajima-Probengeometrie nach DIN EN ISO 12004 [DIN09d]

Aus der Norm [DIN09d] geht hervor, dass der Grundkörper eine Ronde ist. Um die unterschiedlichen Formänderungszustände zu erfassen, wird die Stegbreite variiert. Hierzu sind für die vollständige Beschreibung der GFK mindestens fünf unterschiedliche Geometrien notwendig. Zur Beschreibung des Streckziehbereiches wird eine Vollronde verwendet. Demnach entspricht die Stegbreite dem Durchmesser der Ronde von 200 mm. Für die Abbildung des Tiefziehbereiches wird eine Stegbreite von 60 mm definiert. Die weiteren Stegbreiten betragen 160 mm, 120 mm und 90 mm. Die Aussparungslänge (50 mm) und der Kehlradius (25 mm) werden nach den Empfehlungen der Norm ausgewählt.

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Schachtelung der Probengeometrien auf das Versuchsblech. Die Visualisierung erfolgt in der *Abbildung 5.10*.

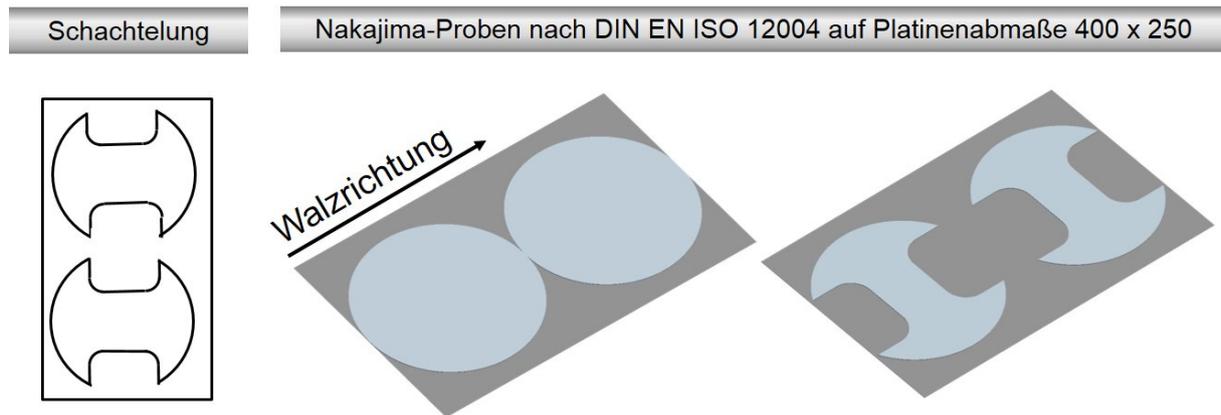


Abbildung 5.10: Schachtelung der Nakajima-Proben

Aus der Norm [DIN09d] geht hervor, dass der Steg der Probe quer zur Walzrichtung angeordnet wird. Da die Vollrunde 200 mm aufweist, können aus dem Versuchsblech mit den Abmaßen 400 x 250 mm zwei Proben geschachtelt werden. Bei der Schachtelung der kleinsten Probengeometrie mit einer Stegbreite von 60 mm gibt es bei drei Proben pro Blech Kollisionsbereiche, sodass auch hier lediglich zwei Proben pro Blech entnommen werden können. Da mindestens drei gültige Prüfungen pro Probengeometrie vorgeschrieben sind, werden fünfzehn Proben benötigt. Je kleiner die Stegbreite, desto größer ist die Gefahr, ungültige Prüfungen zu erhalten. Demnach werden für die Stegbreiten 60 mm zwei und für die Stegbreite 90 mm eine zusätzliche Probe angefertigt. Da je Blech zwei Proben entnommen werden können, werden neun Versuchsbleche benötigt.

Aus der *Abbildung 5.11* geht hervor, wie die Proben entnommen und vorbereitet werden.

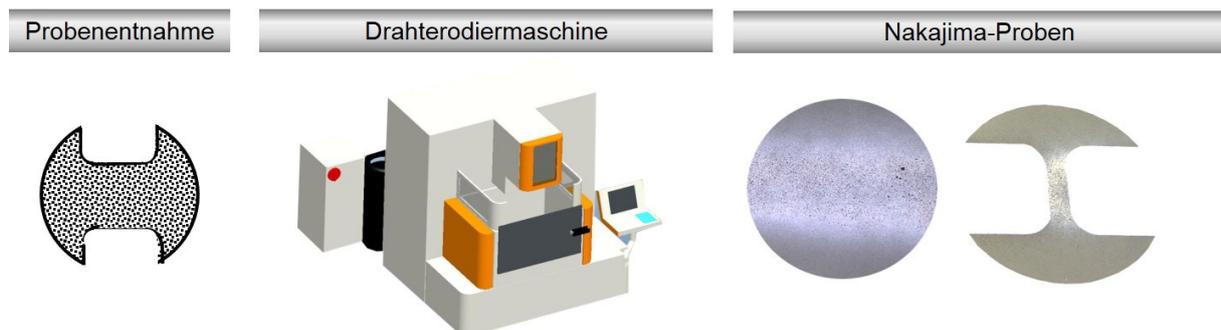


Abbildung 5.11: Probenentnahme Nakajima

Da die Norm [DIN09d] als trennendes Verfahren Funkenerosion zulässt, wird auch hier zur Probenentnahme die Drahterodiermaschine des Typs *AGIE Charmilles CUT20* verwendet. Die Proben werden nach dem Entfetten mit einer Grundierung lackiert. Nach dem Trocknungsprozess erfolgt das Auftragen des schwarzen Lackes, wobei ein kontrastreiches stochastisches Muster erzielt werden muss, damit die Messsoftware *ARAMIS* im Nakajima-Versuch eingesetzt werden kann.

Die Versuchsdurchführung wird an Hand der *Abbildung 5.12* visualisiert.



Abbildung 5.12: Nakajima-Versuch

Die Probengeometrie wird in die *Erichsen* Blechprüfmaschine eingelegt. Die Kraftübertragung erfolgt durch einen halbkugelförmigen Stempel. Dabei werden die Proben bis zum Reißen umgeformt. Während dieses Prozesses wird das Messsystem *ARAMIS* der Firma *GOM* verwendet. Ein Kamerasystem nimmt den Vorgang auf. In der Software kann anschließend der Zeitpunkt für den Beginn der Einschnürung ausgewertet werden.

Das Ergebnis des Nakajima-Versuches ist die Grenzformänderungskurve. Diese wird in der *Abbildung 5.13* aufgezeigt. Die Software ordnet 10 Messwerte zu und ermöglicht den Export der Werte.

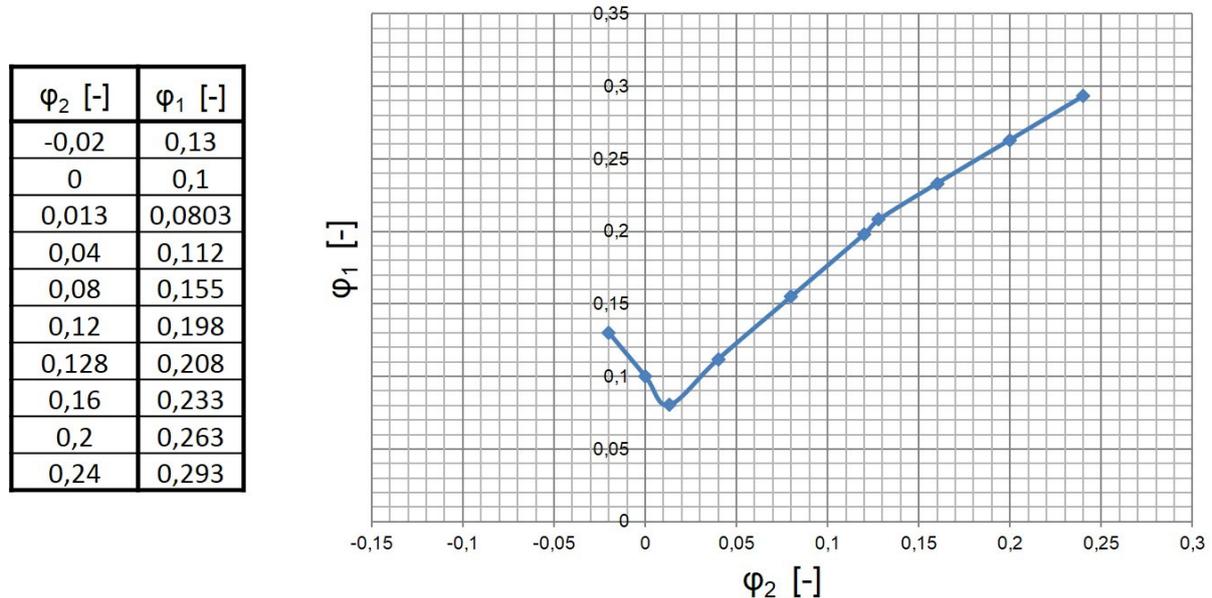


Abbildung 5.13: Grenzformänderungskurve für HCT980X

Die Kennwerte für die Haupt- und Nebenformänderungen der Grenzformänderungskurve werden in die Materialkarte der Simulation übertragen. Somit ist die Beurteilung des Demonstrators hinsichtlich der reißenfreien Herstellbarkeit möglich.

6 Simulationsbasierte Variationsrechnungen

Durch den Aufbau der Referenzsimulation ergeben sich die Rückfederungswerte für den geschlossenen und den offenen Demonstrator. Nachdem die Variationsmöglichkeiten der Vorziehstufe definiert sind, können die unterschiedlichen Varianten in der Simulation berechnet werden. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Rückfederungsergebnisse, um Maßnahmen zur Erhöhung der Maßhaltigkeit abzuleiten.

6.1 Aufbau der Referenzsimulation

Im inkrementellen Simulationsprogramm *PAM-STAMP 2G v2012.0* wird die Referenzsimulation aufgebaut. Damit ist es möglich, die Herstellung des Demonstrators zu simulieren. Hierzu werden die Eigenschaften der Platine in der OP10 definiert. Anschließend erfolgt die Vorziehstufe OP20. Nach dem Beschnitt OP30 wird die Ziehstufe OP40 aufgebaut. Abschließend muss die Rückfederung in der OP50 definiert werden.

6.1.1 Platine OP10

Um die Referenzsimulation des geschlossenen Demonstrators aufzubauen, werden zunächst die Eigenschaften der Platine definiert. Neben den geometrischen Grunddaten sind die Vernetzung und die Zuordnung der Materialeigenschaften für den Aufbau der Simulation entscheidend.

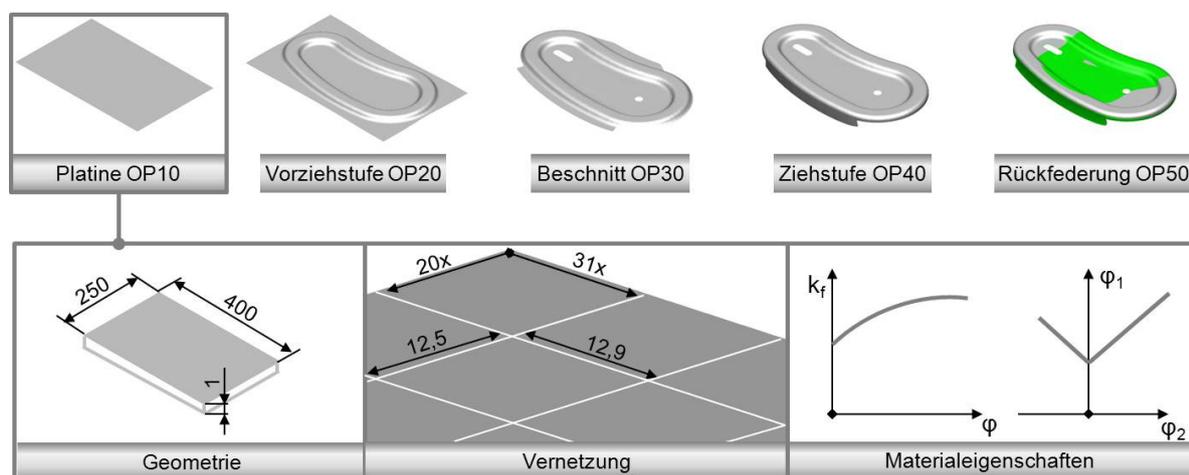


Abbildung 6.1: Simulationsaufbau Platine

Da das inverse Einschrittverfahren an Hand der Endgeometrie die Blechabmaße 400 mm x 250 mm bestimmt hat, werden diese Daten auch in die inkrementelle Simulation eingefügt. In der Konzeptionierung des Demonstrators wurde die Blechstärke von 1 mm festgelegt.

Mit Hilfe des Vernetzungsassistenten in der Umformsimulationssoftware *PAM-STAMP 2G v2012.0* kann die optimale Vernetzungsstrategie ermittelt werden. Durch Eingabe der Blechstärke, des minimalen Werkzeugradius und des Attributes *High Quality (Springback)* ergibt sich eine Ausgangselementenkantenlänge von ca. 13 mm. Unter Berücksichtigung der Platinenseitenverhältnisse werden Schalenelemente mit den Abmaßen 12,5 mm und 12,9 mm generiert. Da sich 20 Elemente auf der kurzen und 31 Elemente auf der langen Platinenseite befinden, werden in Summe 620 Elemente für die Darstellung des Bleches erzeugt.

Die adaptive Netzverfeinerung wird ausgewählt, da in den Bereichen der Umformung die Anzahl der Schalenelemente erhöht wird, um den Sehnenfehler durch eine genauere geometrische Abbildung zu reduzieren und somit eine exaktere Spannungsberechnung zu gewährleisten. Ferner wird bei dieser Methode Berechnungszeit eingespart, da Bereiche geringer Umformung grobvernetzt bleiben. Bei der adaptiven Netzverfeinerung werden ab einem definierten Winkelkriterium besonders in den Radialbereichen feinere Netze erzeugt. Die Neuvernetzung wird in dem betroffenen Bereich durchgeführt, wenn die Elementnormalen zueinander einen größeren Winkel als 10° aufweisen. Bei PAM-STAMP ist die Ausgangsvernetzung die erste Netzstufe. Wird die Kantenlänge im Zuge der Neuvernetzung halbiert, wird die nächste Netzstufe erreicht. Durch die Definition einer minimalen Kantenlänge von 1,625 mm (Empfehlung PAM-STAMP) kann erreicht werden, dass das Netz nicht zu fein wird und somit die Berechnungszeiten zu groß werden. Somit wird maximal die vierte Netzstufe nach dem Umformprozess erreicht. Ebene Bereiche bleiben hingegen im Ausgangszustand, sodass im Gegensatz zur gleichmäßigen Netzverfeinerung Berechnungszeit eingespart werden kann. Mit dieser Netzverfeinerungsstrategie kann gewährleistet werden, dass die Ermittlung der Spannungen und somit die anschließende Rückfederungsberechnung bei geringen Berechnungszeiten mit ausreichender Ergebnisqualität vorhanden sind.

Anschließend erfolgt die Zuordnung der Materialeigenschaften. Bei der Erstellung der Materialkarte für den hochfesten Dualphasenstahl HCT980X werden die gewonnenen Daten aus der Charakterisierung des Werkstoffverhaltens verwendet. Neben dem E-Modul ($E = 216.000\text{N/mm}^2$) konnten die Anisotropiekennwerte ($r_0 = 0,77$; $r_{45} = 0,88$; $r_{90} = 0,76$) aus der Charakterisierung des Werkstoffverhaltens ermittelt werden. Außerdem werden Fließkurve und Grenzformänderungskurve in die Materialkarte eingetragen, indem tabellarisch die Abszissen- und Ordinatenwerte aufgeführt werden bzw. die extrapolierte Gleichung eingefügt wird.

6.1.2 Vorziehstufe OP 20

Im nächsten Schritt zum Aufbau der Referenzsimulation erfolgt die Gestaltung der Vorziehstufe. Hierbei werden die Werkzeugaktivelemente erzeugt und die Prozessattribute definiert.

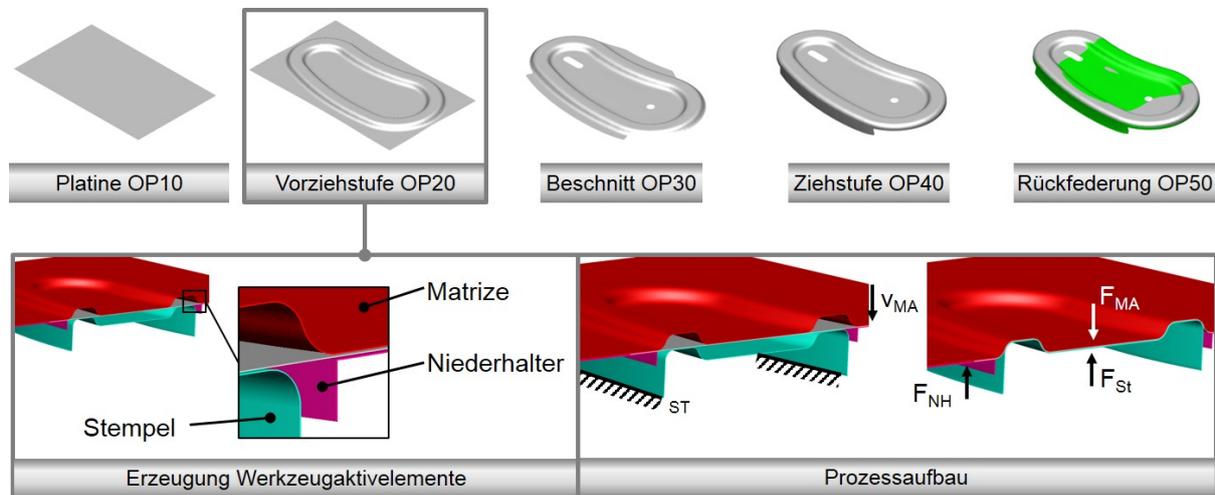


Abbildung 6.2: Simulationsaufbau Vorziehstufe

In dem CAD-Programm *Pro-ENGINEER* erfolgt die Konstruktion der Werkzeugwirkflächen. Dazu werden die vollständige Innenkontur und 10 mm der Außenkontur des konstruierten Demonstrators genutzt, um durch die anschließende Ankonstruktion die Wirkfläche zu erstellen. Die Speicherung der Fläche erfolgt als neutrales IGES-Datenformat. Bei dem Datenimport der IGES-Wirkfläche in das Simulationsprogramm *PAM-STAMP 2G v2012.0* wird durch die Wahl des Attributes *Springback* eine erhöhte Vernetzungsqualität im Radienbereich der Werkzeugwirkfläche erzielt. Es erfolgt eine Verdopplung der Radienelemente, sodass die Spannungen im Bauteil mit einer höheren Qualität vorausgesagt werden können [PAM11]. Da die Werkzeugkomponenten matrizenseitig konstruiert werden, sind Werkzeugwirkfläche und Matrize identisch. Durch die Angabe der Blechstärke (1 mm) und dem zusätzlichen Ziehspalt von 0,1 mm (*Empfehlung Industriepartner*) ergibt sich ein Offset von 1,1 mm zur automatischen Generierung der Stempelfläche. Ferner wird in der Umformsimulation der Niederhalter erzeugt, indem die zugehörigen Elemente der Niederhalterwirkfläche definiert werden.

Anschließend beginnt der Prozessaufbau. Hier erfolgt die Zuordnung der Attribute zu den einzelnen Objekten wie Matrize, Stempel und Niederhalter. Dabei wird zwischen einem Halte- und einem Umformprozess unterschieden.

Zunächst erfolgt die Anordnung der Werkzeugelemente durch die automatische Positionierung-Funktion. Dabei wird ein Objekt unter Angabe der Raumrichtung mit einer bestimmten Toleranz (0,001 mm) auf das andere Objekt positioniert. Beispielsweise wird die Platine in negativer z-Richtung auf dem Stempel angeordnet. Dieselbe Vor-

gehensweise erfolgt mit Matrize und Niederhalter. Nachdem die Positionierung abgeschlossen ist, erfolgt die Betrachtung der Bewegungsdefinition. Die Freiheitsgrade der Werkzelemente werden eingeschränkt. So werden Niederhalter und Stempel sowohl in allen drei rotatorischen als auch in den translatorischen Bewegungsmöglichkeiten fixiert. Lediglich die Matrize verfährt mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s in negativer z-Richtung. Als Reibkoeffizient kann in der Praxis ein konstanter Wert von $0,06 < \mu < 0,18$ angenommen werden [SCH02]. Für die Anwendung in der Simulation wird als Reibwert die Mitte des Intervalls definiert. Somit ergibt sich ein Reibkoeffizient von $\mu = 0,12$. Der Halteprozess ist abgeschlossen, wenn als Stopp-Kriterium der Pinch-Test vorhanden ist. Dies ist der Fall, wenn ein Knotenpunkt der Platine zeitgleich zwei Berührungspunkte zur Werkzeugwirkfläche hat (*in diesem Beispiel: 2 Berührungspunkte mit Matrize*). Es werden zwei Ergebnisdateien ausgegeben.

Anschließend wird der Umformprozess definiert. Während die Freiheitsgrade des Stempels eingeschränkt bleiben, erhält die Matrize eine Bewegungsfunktion. Hierbei steigt die Verfahrgeschwindigkeit zwischen 0,5 ms und 1,0 ms auf 5m/s an. Hiermit wird gewährleistet, dass die Objekte nicht sprungartig aufeinander treffen und die Berechnungen der Spannungen verfälscht werden [PAM11]. Der Niederhalter hat Bewegungsfreiheit in z-Richtung und übt eine Gegenkraft auf das Blech von 200 kN aus. Auch hier wird als Stopp-Kriterium der Pinch-Test gewählt. Jedoch wird diese Definition später bei der Betrachtung des Schließabstandes erneut analysiert.

Nach der Erzeugung der Werkzelemente und dem Prozessaufbau ist das Pre-processing abgeschlossen. Der Solver kann gestartet werden, sodass nach der Berechnung die Ergebnisse der ersten Ziehstufe betrachtet werden können.

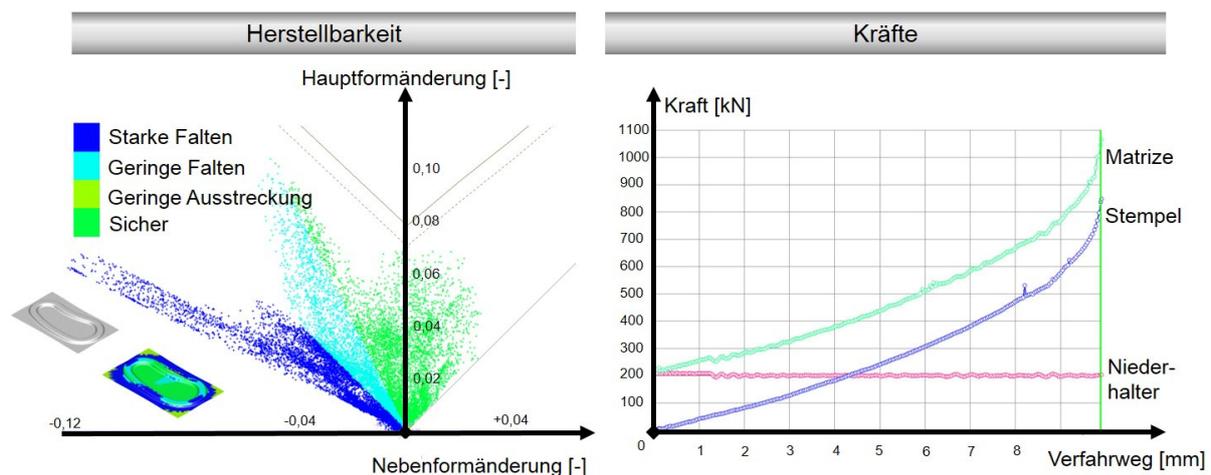


Abbildung 6.3: Postprocessing Vorziehstufe

Die Auswertung der Herstellbarkeit besagt, dass nach der Vorziehstufe keine Reißen im Material auftreten werden. Dies ist notwendig, um eine prozesssichere Referenzsimulation zu erhalten. Die Faltentendenz wird hingegen akzeptiert, da es sich um ein Strukturbauteil und nicht um ein sichtbares Außenhautbauteil handelt.

Durch die Auswertung der Kontaktkräfte kann festgestellt werden, ob die vorhandene Presskraft von 2000 kN der Versuchspresse ausreichend ist, um den Demonstrator zu fertigen. Das Postprocessing der Simulation bestätigt eine kontinuierliche Niederhalterkraft von 200 kN, die im Preprocessing eingegeben wurde. Die Stempelkraft steigt hingegen bei einem Verfahrensweg von 10 mm bis auf ca. 850 kN an. Die Kontaktkraft der Matrize ergibt sich aus der Summe von Niederhalter- und Stempelkraft und beträgt demnach 1050 kN. Da die Matrizenkraft der Gesamtkraft der Presse entspricht und nur ungefähr die Hälfte der zur Verfügung stehenden Kraft beträgt, ist die Versuchspresse geeignet.

6.1.3 Beschnitt OP30

Anschließend erfolgt die Definition des Beschnittprozesses. Hierzu werden die Beschnittkurve in das Programm geladen und die Beschnittattribute festgelegt.

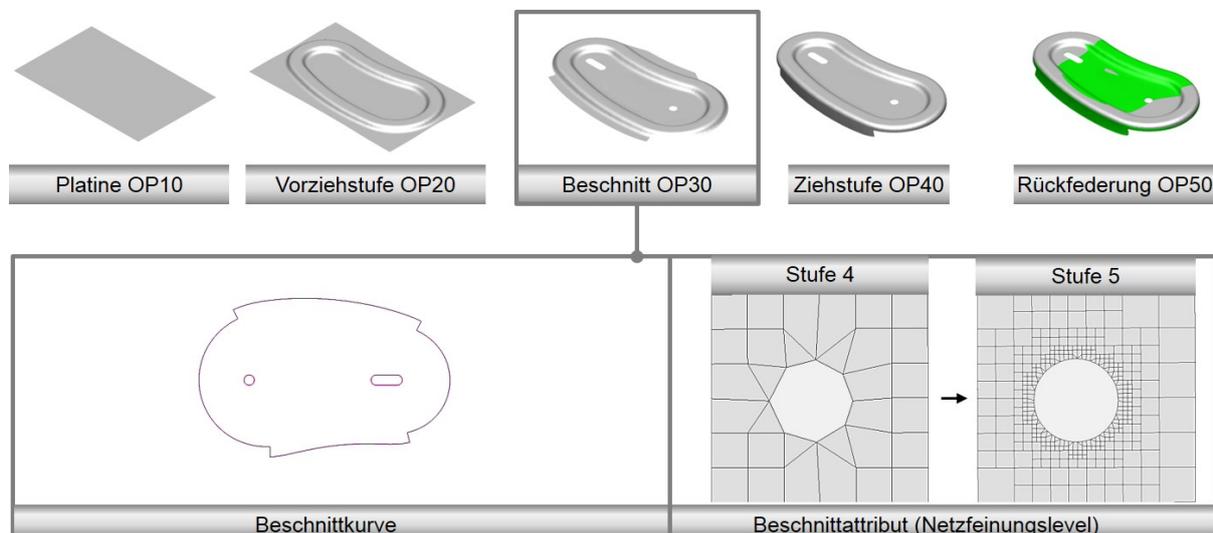


Abbildung 6.4: Simulationsaufbau Beschnitt

Der äußere Berandungsverbund der Beschnittkurve entspricht der entwickelten Grundkontur aus der CAD-Konstruktion. Um jedoch den Bereich der starken Falten-tendenz zu minimieren, wurde festgelegt, dass ein gestufter Beschnitt eingeführt wird. Durch die Abstufung kann auf den langen Seiten des Demonstrators nach der OP40 eine Außenkonturzarge abgebildet werden, wohingegen im Radienbereich des Demonstrators die Außenzarge entfällt. Die inneren Berandungskurven bilden das Lang- und das Rundloch zur RPS-Aufnahme aus. Die Kombination aller Berandungskurven ergibt die Beschnittkurve, die in die Simulation geladen werden kann.

Ferner ist die Definition der Beschnittattribute erforderlich. Die Beschnittrichtung wird parallel zur z-Achse gewählt. Ein weiteres Beschnittattribut besteht in der Wahl des Platinenbereiches, der nach der Beschnittoperation erhalten bleibt. Eine weitere wichtige Einstellung ist die Wahl der Netzverfeinerung nach dem Beschnitt. Wird die-

se zu gering gewählt, kann die Kontur durch die zu großen Elemente nur ungenügend dargestellt werden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wird das Netzverfeinerungslevel von Stufe 4 auf 5 erhöht (*Vergleich Abbildung 6.4*).

6.1.4 Ziehstufe OP40

Anschließend werden die Konfigurationen der zweiten Ziehstufe (OP40) definiert. Dazu wird zunächst die beschnittene erste Ziehstufe in das Programm geladen. In diesem Prozessschritt wird die Außenkontur abgestellt. Um auch hier eine reproduzierbare Referenzsimulation zu erhalten, wird eine zusätzliche Werkzeugkomponente eingeführt. Der Support ist ein matrizenseitiger Niederhalter und dient dazu, dass das Blech während der Umformung gehalten wird und nicht aufspringt. Ferner existieren wieder die Objekte Matrize, Stempel und Niederhalter. Diese sind in der *Abbildung 6.5* ersichtlich. Die Vorgehensweise zur Erzeugung der Werkzeugelemente ist identisch zu der in der Vorziehstufe.

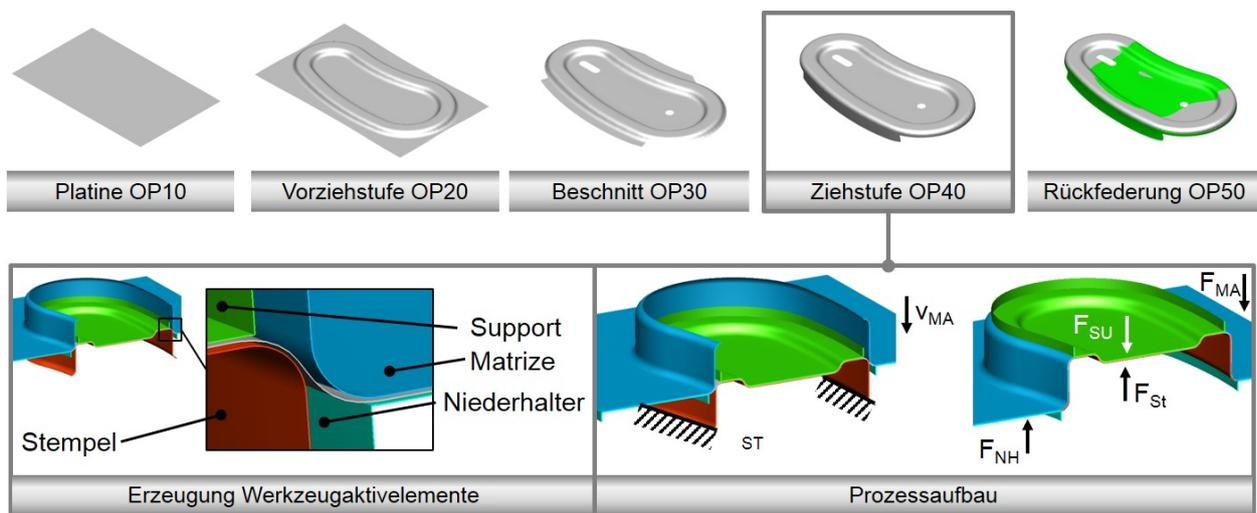


Abbildung 6.5: Simulationsaufbau Zweite Ziehstufe

Der Prozessaufbau besteht aus einem Halteprozess, einer Supportfahrt und einem Umformprozess. Im Halteprozess wird die automatische Positionierung der Werkzeugelemente durchgeführt. Anschließend werden die Freiheitsgrade der Objekte festgelegt. Bei dem Stempel sind wiederum alle rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade eingeschränkt. Die Matrize fährt Richtung Niederhalter und Platine und nachdem der Pinch-Test auftritt, ist der Halteprozess abgeschlossen. Anschließend wird die Supportfahrt eingeleitet. Hierbei verfährt der Support in Richtung Blech und fixiert dieses mit einer definierten Klemmkraft von 200 kN. Im nächsten Prozessschritt erfolgt der eigentliche Umformprozess. Die Außenkontur wird abgestellt. Als Stopp-Kriterium wird ein definierter Verfahrensweg verwendet. Demnach wird die Simulation beendet, wenn ein Matrizenweg von 40 mm abgeschlossen ist.

Nachdem die Referenzsimulation der zweiten Ziehstufe aufgebaut ist, wird der Solver gestartet. Auch nach dieser Berechnung muss zunächst die Herstellbarkeit des Demonstrators und die auftretenden Kräfte geprüft werden.

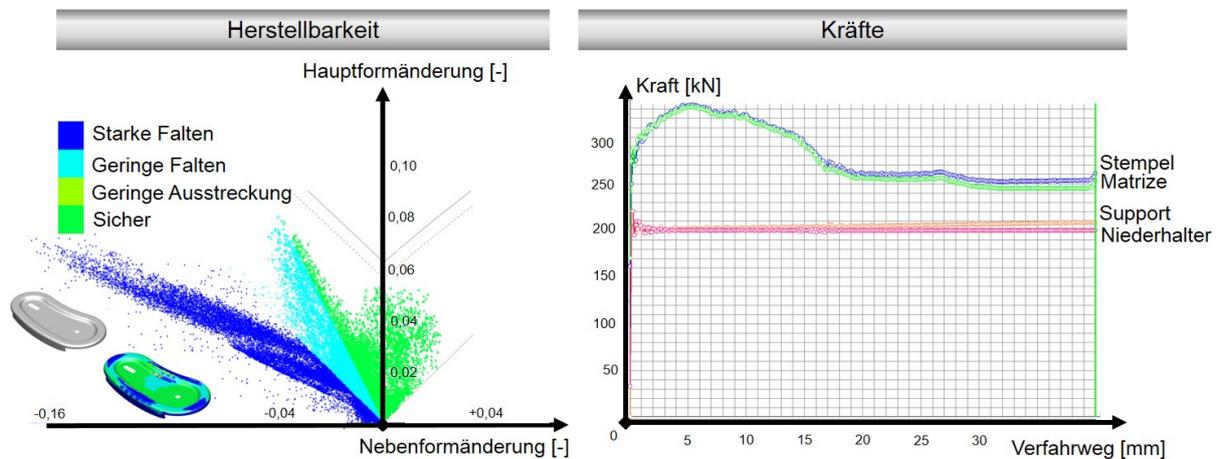


Abbildung 6.6: Postprocessing Ziehstufe (nach Beschnittoptimierung)

Die Auswertung der Herstellbarkeit zeigt auf, dass trotz der weiteren Tiefzieh- und Biegeoperationen in der zweiten Ziehstufe das Grenzformänderungsdiagramm lediglich geringe Änderungen aufweist. Die Anzahl der Formänderungspunkte ist angestiegen, da in der zweiten Ziehstufe weitere Netzverfeinerungen auftreten. Die Verteilung der Punktwolke ist sehr ähnlich mit der Punktwolke nach der ersten Ziehstufe. Die wichtigste Erkenntnis ist jedoch, dass keiner der Punkte die Grenzformänderungskurve überschreitet und somit die sichere Herstellbarkeit ohne Reißer gegeben ist.

Auch die Betrachtung der Kontaktkräfte in der zweiten Ziehstufe besagt, dass die zur Verfügung stehende Presskraft von 2000 kN nicht überschritten wird. Die maximale Kraft, die in dieser Umformstufe benötigt wird, ergibt sich aus der Summe von Matrizen- und Supportkraft bzw. aus der Summe von Stempel- und Niederhalterkraft. Da nach ca. 5,2 mm Verfahrweg die maximale Kontaktkraft der Matrize von 332,5 kN erreicht wird, ergibt sich inklusive der Supportkraft von 200 kN eine Gesamtpresskraft von 532,5 kN. Nach dem Anstieg der Matrizenkontaktkraft sinkt diese, da ein Großteil der Platine komplett durchgezogen ist. Nach ca. 17 mm Verfahrweg stagniert der Verlauf, da auch der restliche Zargenbereich den Kontakt zur Niederhalterfläche verliert und lediglich ein Biegeprozess vorhanden ist.

Bei der intensiven Analyse der Herstellbarkeit wurden jedoch Elemente mit hoher Reißerwahrscheinlichkeit in der Nähe der Beschnittkontur ausfindig gemacht (*Abbildung 6.7*). Aus diesem Grund muss zunächst eine Anpassung der äußeren Berandungskurve erfolgen, ehe die Rückfederung in OP 50 definiert wird. Die Auswertung ergibt, dass die erste gestufte Beschnittkurve nicht verwendet werden kann. In *Abbildung 6.7* ist erkennbar, dass vor allem in den Übergangsbereichen von der lan-

gen zur kurzen Zarge eine erhöhte Reißerwahrscheinlichkeit auftritt. Dies ist auf die erhöhte Kerbwirkung zurückzuführen.

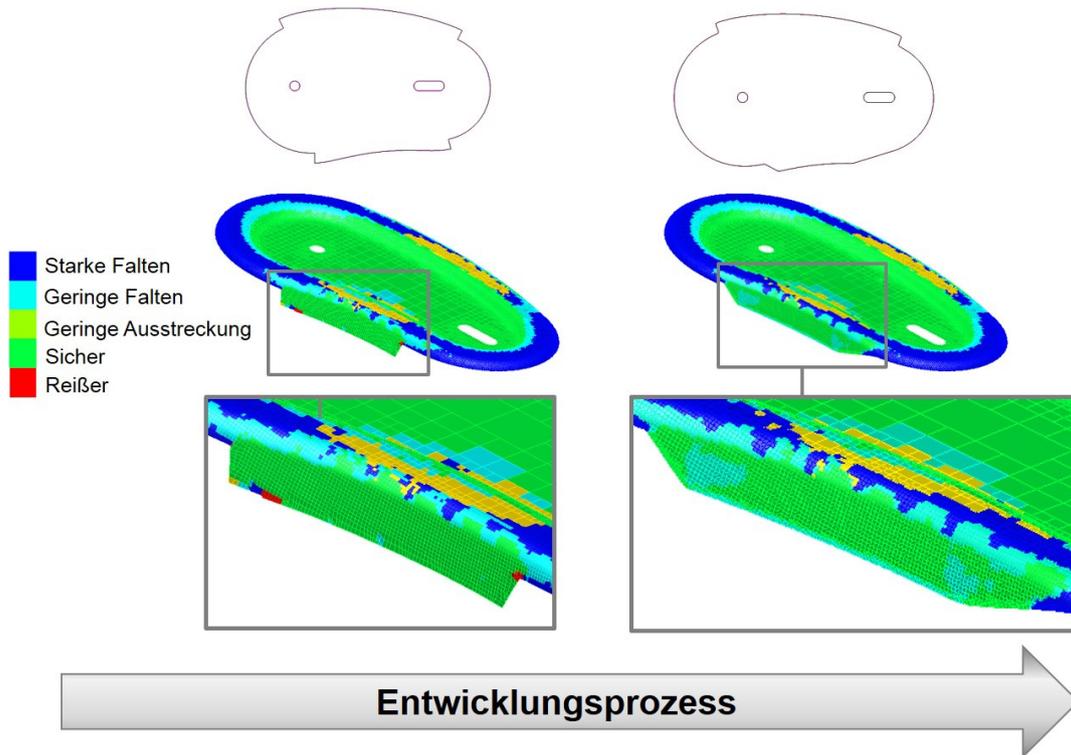


Abbildung 6.7: Beschnittentwicklung

Im Entwicklungsprozess der Beschnittkurve wurden aus diesem Grund die Übergänge weicher konstruiert. Betrachtet man nun das Herstellergesult mit der modifizierten Beschnittkontur, ist keine erhöhte Reißerwahrscheinlichkeit vorhanden.

6.1.5 Rückfederung OP50

Im letzten Bearbeitungsschritt wird die Rückfederung OP50 in der Referenzsimulation berechnet.

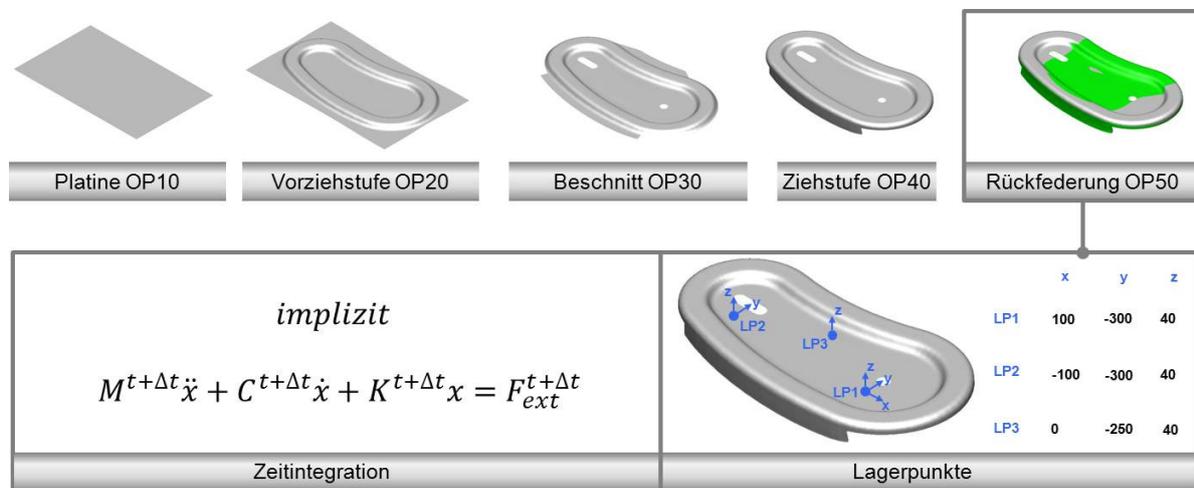


Abbildung 6.8: Simulationsaufbau Rückfederung

Als Integrationsmethode wird die implizite Berechnung für die Rückfederungssimulation gewählt, da in Kombination mit einer expliziten Umformsimulation ein guter Kompromiss aus Rechenaufwand und –genauigkeit erzielt wird [GÖS10][HÜT01][KRA05][NAG91]. Obwohl in der Rückfederungsberechnung keine weitere Netzverfeinerung stattfindet, muss in der Software *PAM-STAMP2G v.2012.0* die Netzverfeinerung aktiviert werden, da somit eine genauere Spannungsermittlung erfolgt [PAM11].

Des Weiteren wird die Auswahl und Anordnung der Lagerpunkte definiert. Dies ist erforderlich, um mit Hilfe einer statisch bestimmten 3-Punkt-Lagerung die Rückfederungsvorhersage durchzuführen. Um eine möglichst genaue Spannungsberechnung zu erhalten, müssen die Lagerpunkte auf einer Ebene liegen. Außerdem sollen diese zueinander einen großen Abstand aufweisen [PAM11]. Da in der industriellen Anwendung das Rundloch genutzt wird, um im RPS die Freiheitsgrade einzuschränken, wird in dessen Nähe der Lagerpunkt 1 definiert ($x=100$; $y=-300$; $z=40$). Es erfolgt die Einschränkung aller drei translatorischen Freiheitsgrade. Um weitere Bewegungsmöglichkeiten zu reduzieren, ergibt sich der Lagerpunkt 2 in der Nähe des Langloches ($x=-100$; $y=-300$; $z=40$). Dadurch werden die Freiheitsgrade in z - und y -Richtung eingeschränkt. Lagerpunkt 3 ($x=0$; $y=-250$; $z=40$) schränkt hingegen nur noch die vertikale Bewegungsrichtung zur z -Achse ein.

Der Aufbau der Referenzsimulation des offenen Demonstrators weicht kaum von der beschriebenen Vorgehensweise ab und wird daher nicht noch einmal erläutert. Lediglich die Ausgangsplatine weist andere Maße (400 mm x 100 mm) auf.

6.2 Rückfederungsergebnisse der Referenzsimulation

Zunächst erfolgt die Zuordnung der Bauteilbereiche, um anschließend die Messbereiche (MB) und die Messpunkte (MP) für die Messstrategie zu definieren. Die Lage der Bereiche können aus der *Abbildung 6.9* entnommen werden.

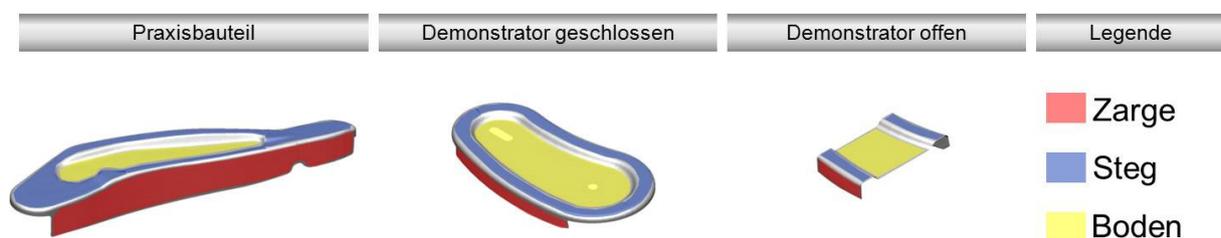


Abbildung 6.9: Zuordnung relevanter Geometriebereiche

Die Zarge (*rot eingefärbt*) ist der äußere Bauteilbereich. Es ist zu beachten, dass jeweils zwei Zargen am Bauteil vorhanden sind. Je nach vorhandener Krümmung wird in konkave und konvexe Zarge differenziert. Beispielsweise ist beim Praxisbauteil die konkave und bei den Demonstratoren die konvexe Bauteilzarge dargestellt. Der

Stegbereich (*blau eingefärbt*) bildet den Übergang zwischen Innen- und Außenkontur des Bauteils. Der Boden (*gelb eingefärbt*) befindet sich im Bereich der Innenkontur.

Um eine Messstrategie für die Demonstratoren zu entwickeln, werden die Funktionsbereiche (FB) des Praxisbauteils analysiert (*Abbildung 6.10*).

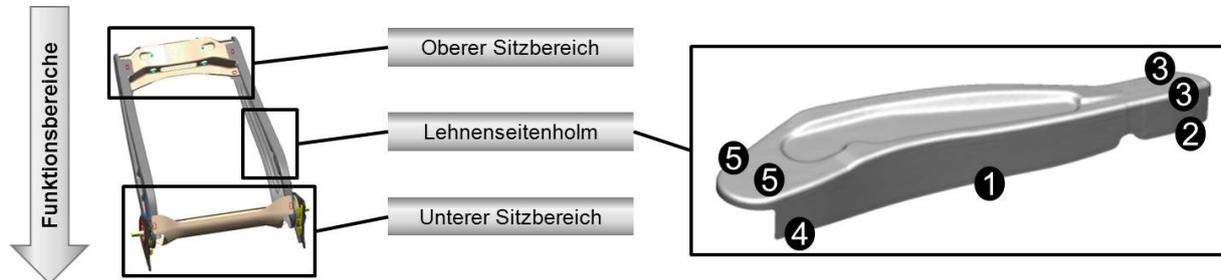


Abbildung 6.10: Funktionsbereiche des Praxisbauteils nach [HAR10]

Betrachtet man den Lehnenseitenholm als beispielhaftes Praxisbauteil, so sind an Hand der Baugruppe der Sitzstruktur funktionsrelevante Bereiche ersichtlich. Der Funktionsbereich 1 (FB1) befindet sich im Zentrum der konkaven Zarge. Dieser Bereich ist für die Erarbeitung der Messstrategie von besonderer Bedeutung. Die Try-Out-Versuche und die Simulation haben aufgezeigt, dass hier eine besonders große Maß- und Formabweichung zu erwarten ist. An den weiteren FB sind Laserschweißnähte vorhanden. Diese Bereiche sind für die Messstrategie von Bedeutung, da hier eine hohe Maßhaltigkeit erforderlich ist. Die FB 2 und FB 3 verbinden den Lehnenseitenholm mit dem oberen Sitzbereich. Der Unterschied besteht darin, ob die Zarge (FB2) oder der Steg (FB3) des Lehnenseitenholms mit dem oberen Sitzbereich gefügt wird. An den FB 4 und FB 5 sind die Laserschweißnähte zwischen dem unteren Sitzbereich und dem Lehnenseitenholm vorhanden. Auch hier wird an der Zarge (FB4) und am Steg (FB5) gefügt.

Durch diese Funktionsbereiche werden Schnittebenen (S) gelegt, sodass diese auf die Demonstratoren übertragen werden können. Die Definition der Schnittebenen des Praxisbauteils und die Anordnung der Messpunkte werden in *Abbildung 6.11* ersichtlich.

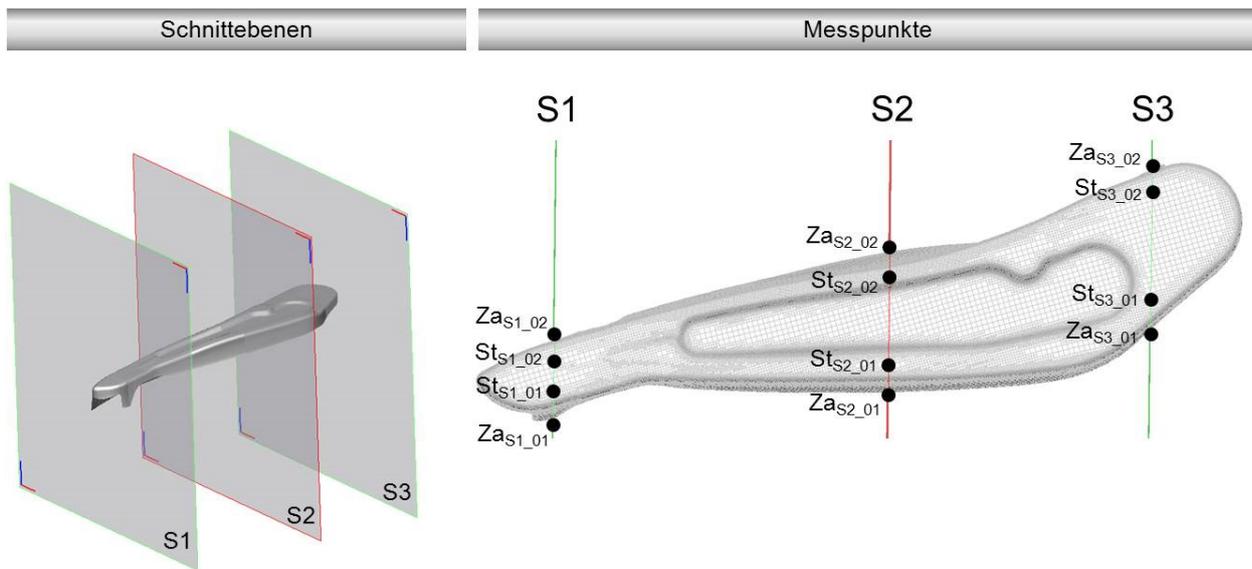


Abbildung 6.11: Messstrategie Praxisbauteil

Da für die Funktionsbereiche des Praxisbauteils die Areale der Zarge (Za) und die des Stegs (St) von Bedeutung sind, werden die Messpunkte auf den Schnittebenen definiert. Die Areale des Bodens werden in den Funktionsbereichen nicht erfasst und entfallen daher. Auf jeder Schnittebene werden jeweils zwei Messpunkte auf der Zarge und zwei auf dem Steg angeordnet. Die Benennung des MP enthält die Zugehörigkeit des Bereiches und der Schnittebene. Der zweite Index gibt an, ob der Messpunkt auf der konvexen (01) oder auf der konkaven (02) Seite vorhanden ist. So befindet sich beispielsweise der Messpunkt Za_{S3_02} auf der konkaven Zarge der dritten Schnittebene. Die Anordnung der Schnittebenen und der Messpunkte wird nun auf den geschlossenen Demonstrator übertragen (*Abbildung 6.12*). S1 und S2 liegen im Gegensatz zum Praxisbauteil näher zur Bauteilmitte, da bei einem größeren Abstand auf Grund des gestuften Beschnitts keine Messpunkte auf der Zarge erfassbar wären.

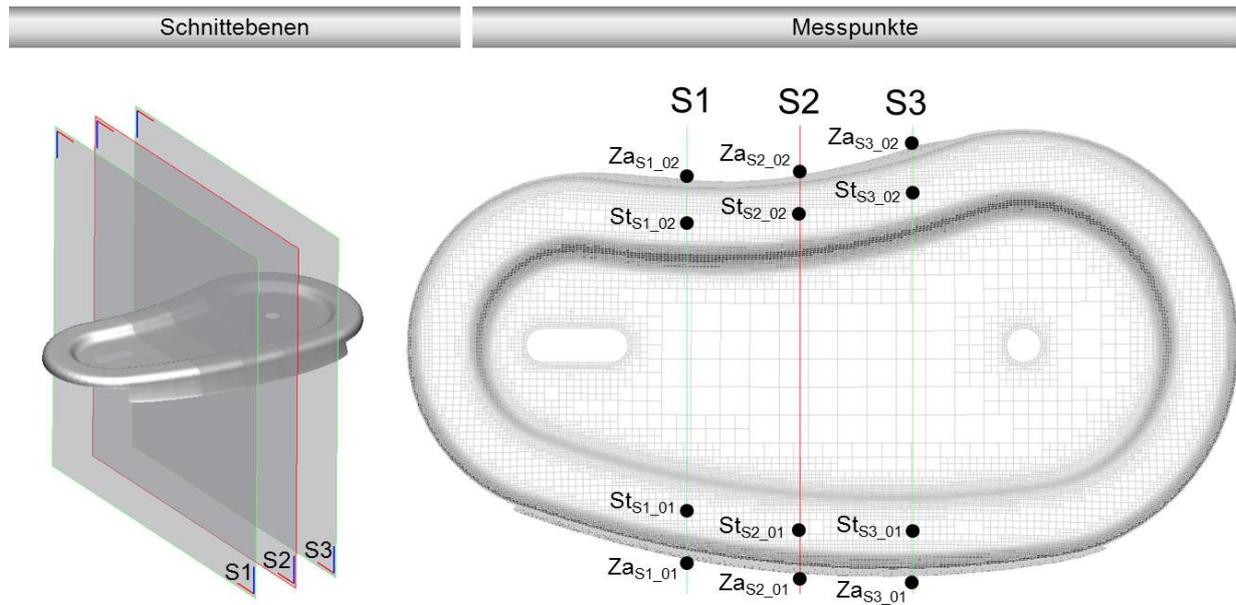


Abbildung 6.12: Messstrategie Demonstrator geschlossen

Für den offenen Demonstrator konnten die Schnittebenen und die MP des geschlossenen Demonstrators übertragen werden (*Abbildung 6.13*). Vorteilhaft ist die gute Vergleichbarkeit der Rückfederungswerte beider Demonstratoren.

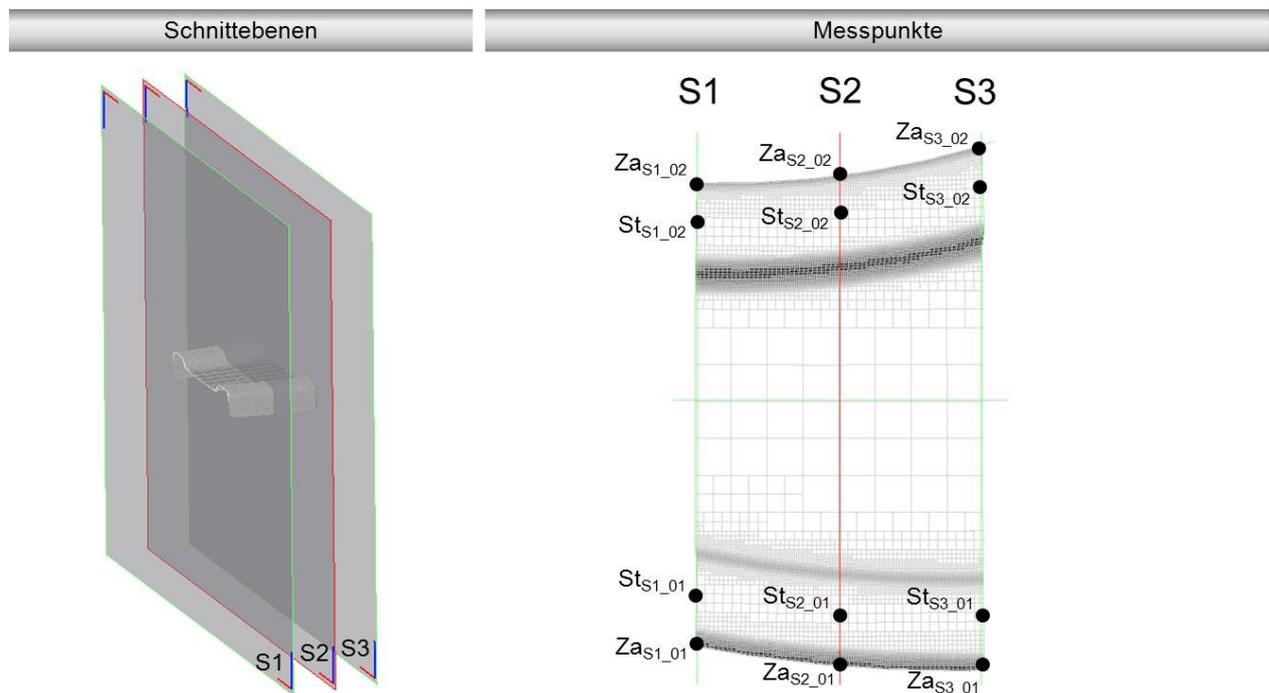


Abbildung 6.13: Messstrategie Demonstrator offen

Mit Hilfe der definierten Messpunkte ist es möglich, die Rückfederung am Steg und an der Zarge getrennt zu bewerten. Es stehen für das Praxisbauteil und für die Demonstratoren jeweils sechs Messpunkte für die einzelnen Bereiche zur Verfügung. Demzufolge ergeben sich 12 Messpunkte pro Bauteil.

Im nächsten Arbeitsschritt können die aufgebauten Referenzsimulationen durch den Solver berechnet werden, sodass man die Rückfederungsergebnisse erhält. Es erfolgt der Vergleich der Soll- Geometrie (grau) zur Ist- Geometrie (grün) in der *Abbildung 6.14*, um einen generellen Überblick über das Rückfederungsverhalten der Bauteile zu erhalten.

Zunächst werden die Rückfederungsrichtungen definiert. Eine positive Rückfederung liegt vor, wenn das Blech nach außen auffedert. Dieses Verhalten kann vor allem im Zargenbereich beobachtet werden (*Abbildung 6.14*). Federt das Blech entgegen der Erwartung nach innen, liegt eine negative Rückfederung vor. Dies ist in den Bereichen ersichtlich, wo die grauen Bauteilbereiche über den grünen Bauteilbereichen liegen (*Abbildung 6.14*).

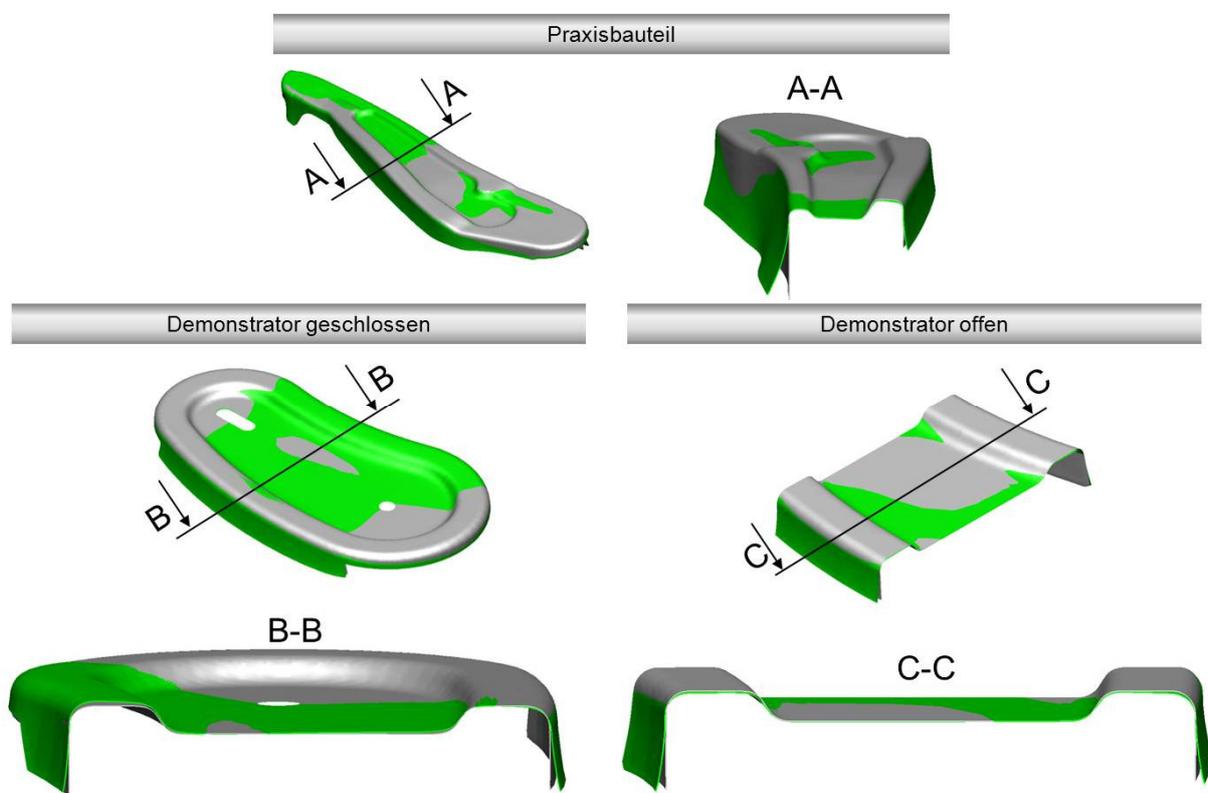


Abbildung 6.14: Rückfederungsverhalten nach Referenzsimulation

Das Rückfederungsverhalten des Praxisbauteils ist sehr komplex. Während die Zarge der konvexen Bauteilseite eine verhältnismäßig geringe Maßabweichung aufweist, zeigt die gegenüberliegende konkave Zarge einen sehr großen positiven Aufsprung nach außen. Dies kann vor allem in der Schnittdarstellung A-A optisch erfasst werden. Der Stegbereich weist größtenteils einen negativen Aufsprung nach innen auf. Im Bodenbereich liegen nahezu keine Maßabweichungen vor, da hier die Lagerpunkte der Rückfederungsberechnung definiert sind. Soll- und Ist-Geometrie stimmen in diesen Bereichen überein.

In der Schnittansicht der beiden Demonstratoren ist erkennbar, dass der Zargenbereich positiv auffedert. Unterschiedlich ist hingegen das Rückfederungsergebnis im Stegbereich. Beim offenen Demonstrator ist beidseitig eine negative Aufsprungneigung vorhanden. Beim geschlossenen Demonstrator hingegen kann im konkaven Stegbereich ein positiver Aufsprung festgestellt werden. Die vorhandenen Torsionseffekte beider Demonstratoren sind vermutlich auf die Biegung über konvexe und konkave Biegelinien zurückzuführen, da so Membranspannungen initiiert werden (*Vergleich Abschnitt 2.4.1 Ursachen und Mechanismen*).

Um die Rückfederungen der Referenzsimulation zu quantifizieren, werden die absoluten Maßabweichungen zwischen Soll- und Ist-Kontur an den Messpunkten ermittelt und tabellarisch dargestellt. Ferner erfolgt die Visualisierung in Diagrammen, wobei die einzelnen Bauteilbereiche getrennt voneinander beurteilt werden. In der *Abbildung 6.15* sind die absoluten Maßabweichungen des Praxisbauteils dargestellt.

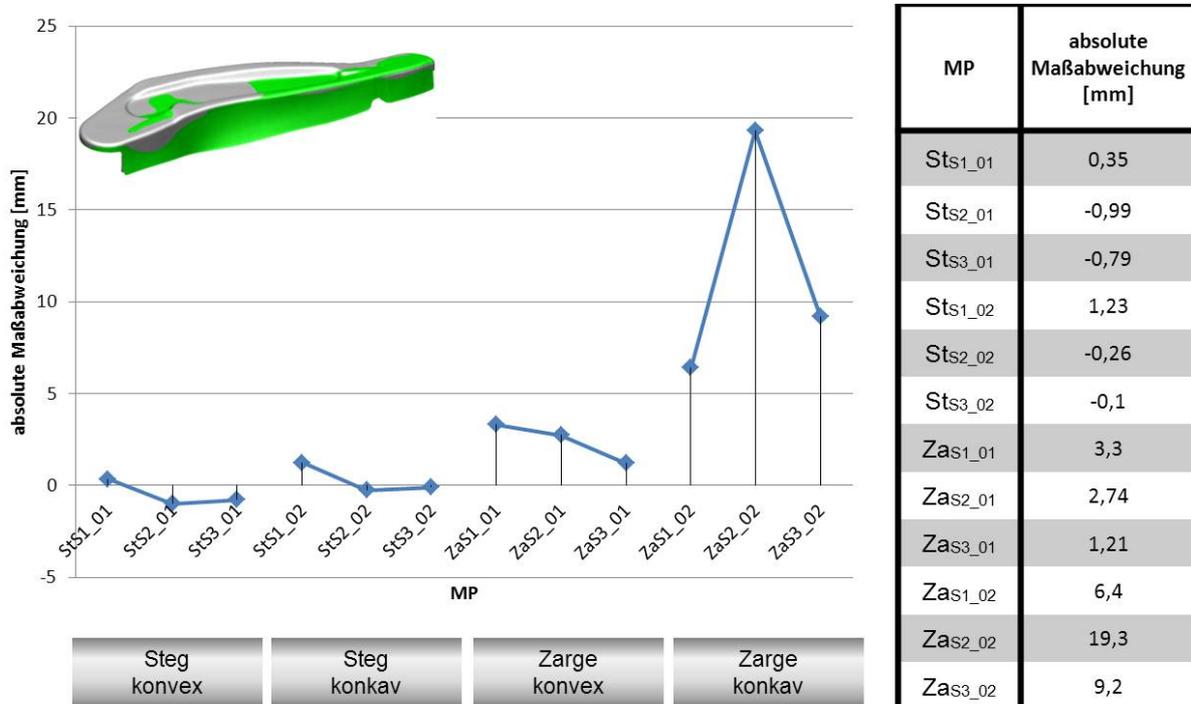


Abbildung 6.15: Absolute Maßabweichungen des Praxisbauteils

Betrachtet man die Rückfederungsergebnisse der Simulation, erkennt man, dass in den Stegbereichen verhältnismäßig geringe absolute Maßabweichungen auftreten (-0,99 mm bis 1,23 mm). Diese nehmen negative und positive Rückfederungswerte an. Das bedeutet, dass sogar innerhalb einzelner Bauteilbereiche ein Vorzeichenwechsel der Rückfederung stattfindet. Das komplexe Rückfederungsverhalten des Praxisbauteils wird dadurch deutlich. Die absoluten Maßabweichungen der Zarge zeigen hingegen, dass lediglich positive Rückfederungen zu erwarten sind. Generell sind die Rückfederungswerte der konkaven Zarge (6,4 mm bis 19,3 mm) größer als die der konvexen Zarge (1,21 mm bis 3,3 mm). Dies ist darin begründet, dass die

absolute Zargenlänge im konkaven Bereich größer ist als im konvexen Bereich. Vor allem im Mittelschnitt des konkaven Bereichs sind die Maßabweichungen sehr groß ($Za_{S2_02} = 19,3 \text{ mm}$). Da die Kontur des Praxisbauteils größtenteils geschlossen ist, erfolgt ein geringer Abbau von Eigenspannungen.

In der *Abbildung 6.16* werden die absoluten Maßabweichungen für den geschlossenen Demonstrator dargestellt. Auch hier erfolgen die tabellarische Darstellung der Rückfederungswerte und die Visualisierung im Diagramm. Die Zuteilung der Messpunkte zu den Bauteilbereichen erlaubt wiederum die getrennte Beurteilung des Rückfederungsverhaltens.

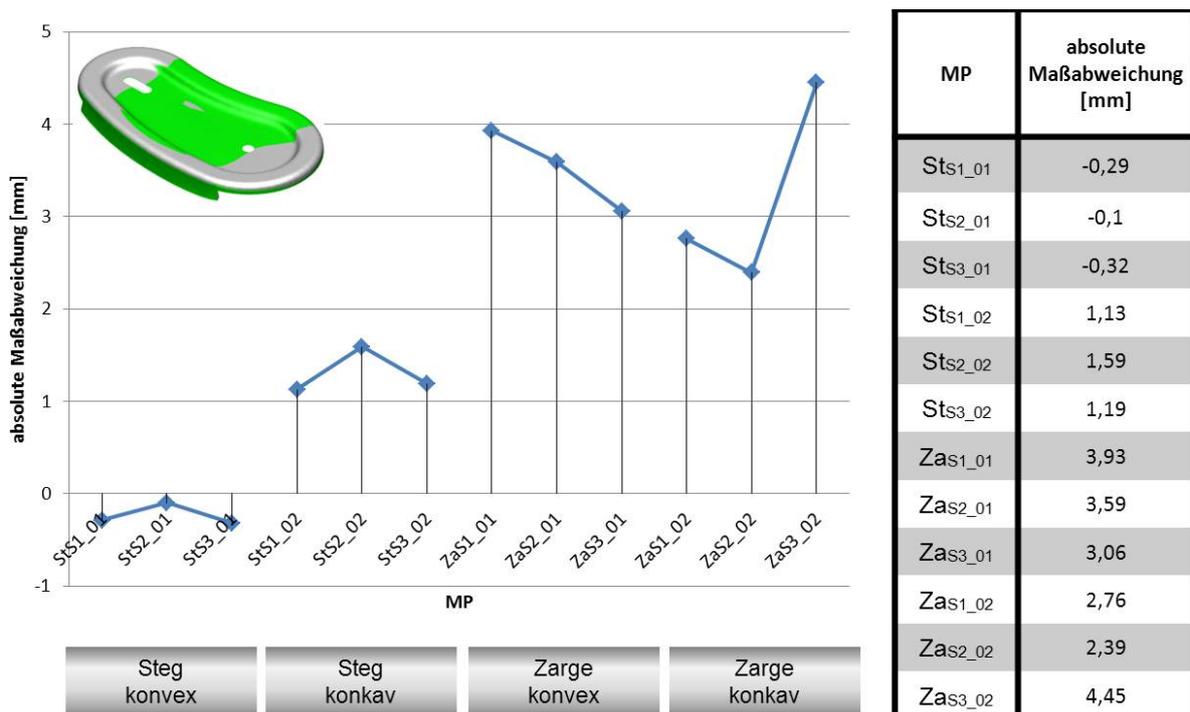


Abbildung 6.16: Absolute Maßabweichungen des geschlossenen Demonstrators

Es wird ersichtlich, dass der konvexe Stegbereich negative absolute Maßabweichungen aufweist. Diese sind jedoch sehr gering (-0,32 mm bis -0,1 mm). Der konkave Stegbereich hingegen zeigt verhältnismäßig große positive Rückfederungswerte (1,19 mm bis 1,59 mm). Somit findet kein Vorzeichenwechsel innerhalb eines Bauteilbereiches statt. Wiederum zeigt das Aufsprungverhalten der Zarge höhere absolute Werte als im Stegbereich. Die konvexe Zarge weist Maßabweichungen zwischen 3,06 mm und 3,93 mm auf. Eine größere Streubreite der Rückfederungswerte ist im konkaven Zargenbereich vorhanden. Hier werden durch die Simulation Rückfederungen zwischen 2,76 mm und 4,45 mm prognostiziert.

Die absoluten Maßabweichungen des offenen Demonstrators sind in *Abbildung 6.17* dargestellt.

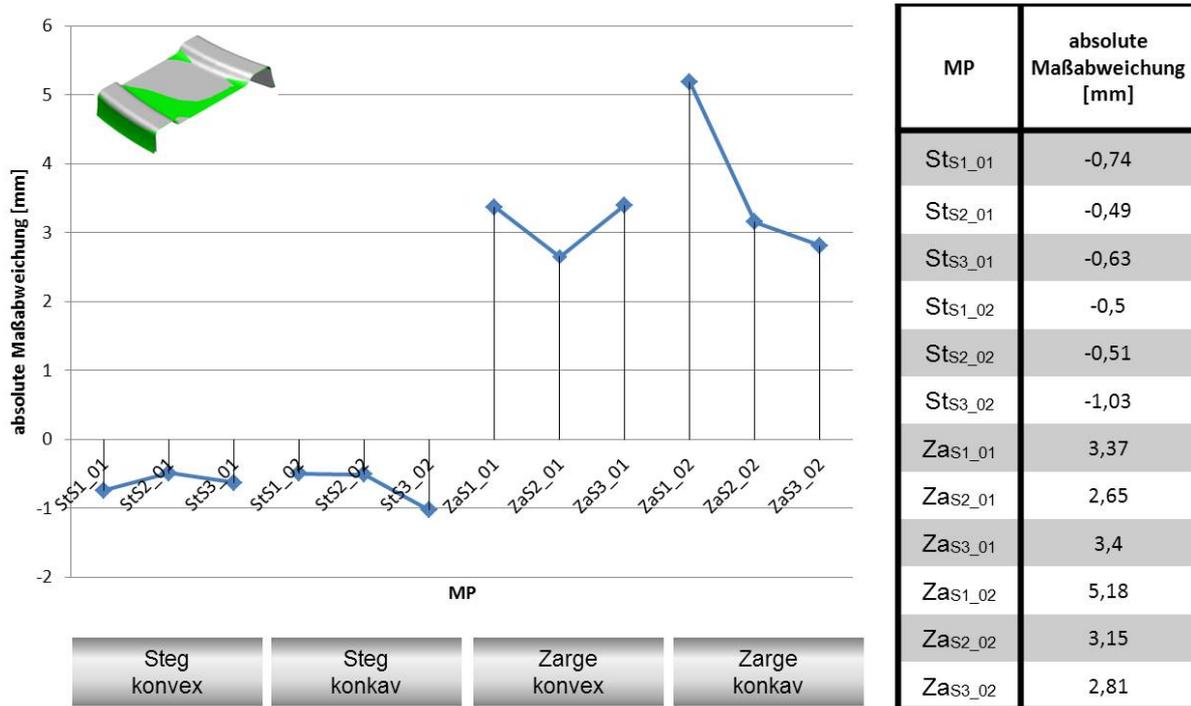


Abbildung 6.17: Absolute Maßabweichungen des offenen Demonstrators

Der konvexe Stegbereich weist negative Rückfederungswerte zwischen -0,74 mm und -0,49 mm auf. Während beim geschlossenen Demonstrator die einzelnen Stegbereiche unterschiedliche Rückfederungsvorzeichen aufwiesen, ist beim offenen Demonstrator das Rückfederungsverhalten des Stegbereichs nahezu identisch. Die negativen absoluten Maßabweichungen schwanken im konkaven Stegbereich zwischen -1,03 mm und -0,5 mm. Die Zarge weist lediglich positive absolute Rückfederungswerte auf. Der Maximalwert ist wiederum in der konkaven Zarge vorhanden ($Zas1_{02} = 5,18$ mm).

Auffällig ist, dass der konkave Zargenbereich bei allen untersuchten Bauteilen stets die größte Streubreite und die Maximalwerte der absoluten Maßabweichungen aufweist. Ferner kann generell gesagt werden, dass der Zargenbereich ein größeres Rückfederungsverhalten als der Stegbereich aufweist. Das Rückfederungsverhalten der Demonstratoren unterscheidet sich gering. Die Rückfederungsergebnisse der Referenzsimulation dienen als Grundlage. Dadurch ist es möglich, Parameter der Vorziehstufe zu variieren und anschließend die Rückfederungsergebnisse zu vergleichen. Hiermit sollen rückfederungsreduzierende Gestaltungsmaßnahmen der Vorziehstufe erarbeitet werden.

Da die Werkzeugkonstruktion und -herstellung zu diesem Zeitpunkt nicht abgeschlossen ist, konnte keine Kalibrierung der Simulation vor der Vorziehstufenvariation erfolgen. Die Validierung wird daher erst nach der Variationsrechnung durchgeführt (siehe 7.5.6 *Ergebnisvergleich Simulation und Realität*).

6.3 Fließkurvensteuerung und Modifikation der Vorziehstufe

Da in den einzelnen Operationen der Herstellungsmethode die notwendigen Parameter definiert sind, ergibt sich aus der Referenzsimulation ein Rückfederungsergebnis für den geschlossenen und für den offenen Demonstrator. Folgend werden ausgewählte geometrische und prozesstechnische Parameter der Vorziehstufe OP20 variiert, um einen Rückfederungsvergleich der Varianten gegenüber der Referenzsimulation vornehmen zu können. In *Abbildung 6.18* wird die Messstrategie zur Auswertung der Rückfederung visualisiert.

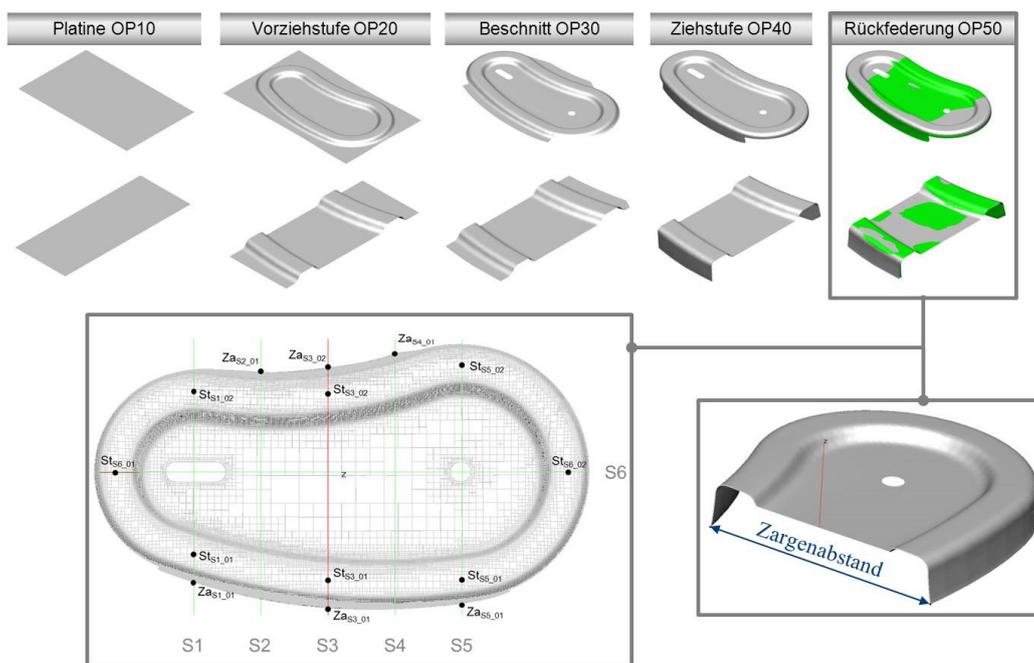


Abbildung 6.18: Messstrategie

Nach der Simulation der vollständigen Herstellungsmethode ergibt sich das Rückfederungsergebnis in der OP50. Hierbei wird der mittlere Zargenabstand als Maß der Rückfederung definiert (Soll-Maß ohne Rückfederung 171,52 mm). In die Bauteilmitte wird dazu eine Schnittebene gelegt, sodass der absolute Abstand der Zarge im Simulationsprogramm vermessen werden kann. Der Zargenabstand dient als Auswertungsgrundlage der Rückfederung, da in der Referenzsimulation in diesem Bereich besonders große Maßabweichungen prognostiziert werden. Somit ergibt sich ein großes Potential, um rückfederungsreduzierende Maßnahmen durch die Variation der Vorziehstufe ausfindig zu machen. Ferner ist es möglich, eine Detailauswertung in den definierten Messpunkten der jeweiligen Demonstratorbereiche vorzunehmen. Dies erlaubt eine getrennte Beurteilung der Maßnahmen auf den Steg- und den Zargenbereich.

Zunächst erfolgt als vorangestellter Arbeitsschritt die Beurteilung der festgestellten realen Fließkurvensteuerung auf das Rückfederungsergebnis der Referenzsimulation.

6.3.1 Fließkurvensteuerung

Da in dem Kapitel 5 *Charakterisierung des Werkstoffverhaltens* eine reale Streuung der Fließkurve festgestellt wurde, soll der Einfluss auf das Rückfederungsergebnis in der Simulation überprüft werden. Dies ist notwendig, da das Maß der Rückfederung von den berechneten Bauteilspannungen abhängig ist. Die Fließkurve ist wiederum ein Maß für die wahren Spannungen über dem Umformgrad. Somit ist das Rückfederungsergebnis von der gewählten Fließkurve abhängig. Für die Referenzsimulation wird die mittlere Fließkurve (MID) in die Materialkarte zur Platinendefinition importiert. Anschließend wird die Simulation nochmals durchgeführt, wobei die mittlere durch die minimale (MIN) und die maximale (MAX) Fließkurve in der Materialkarte ausgetauscht wird. Das Maß der Rückfederung wird danach durch den Zargenabstand quantifiziert.

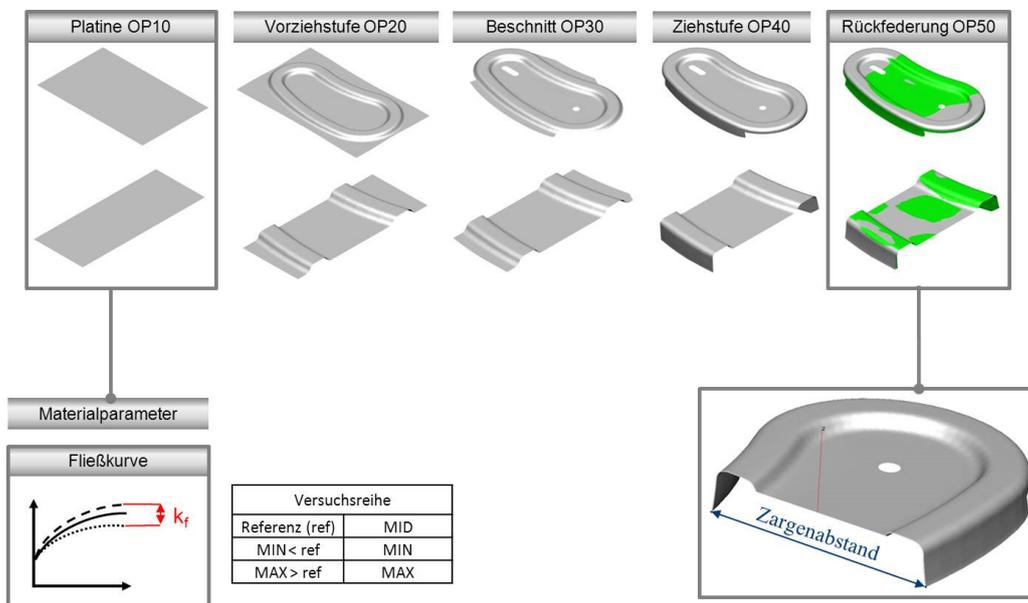


Abbildung 6.19: Versuchsplanung Fließkurvensteuerung

Nachdem alle drei Simulationsvarianten des geschlossenen Demonstrators durchgeführt sind, wird der Zargenabstand in der Bauteilmittte gemessen und tabellarisch dargestellt. Zudem erfolgt die Zuordnung der Zargenabstände zu den Varianten in einem Diagramm (Abbildung 6.20).

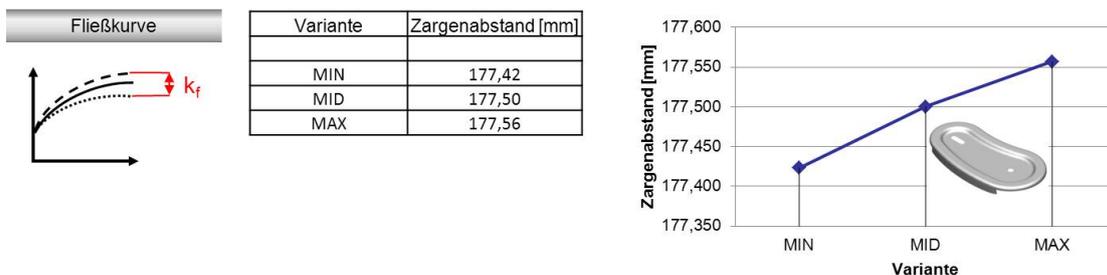


Abbildung 6.20: Einfluss der Fließkurvensteuerung Demonstrator geschlossen

Bei Verwendung der minimalen Fließkurve (MIN) ergeben sich geringere Zargenabstände und somit geringere Rückfederungseffekte. Dies ist darin begründet, dass bei gleichen Umformgraden geringere Spannungen im Bauteil berechnet werden. Dadurch ergeben sich auch geringere Rückfederungswerte. Wird hingegen eine größere Fließkurve verwendet (MAX), werden auch größere Rückfederungswerte durch die Simulation prognostiziert.

Um den Einfluss der Fließkurvenstreuung zu beurteilen, werden die absoluten Maßabweichungen miteinander verglichen. Bei Verwendung der minimalen Fließkurve (MIN) weicht das Rückfederungsergebnis lediglich um 0,08 mm zur Referenz ab. Wird die maximale Fließkurve (MAX) in die Materialkarte importiert, wird eine Abweichung um 0,06 mm zur Referenz festgestellt. Der Einfluss der Fließkurvenstreuung auf das Rückfederungsergebnis des geschlossenen Demonstrators wird demnach als gering eingestuft.

Folgend werden die Zargenabstände des offenen Demonstrators verglichen, nachdem die Variationen der Fließkurvenstreuung berechnet sind (*Abbildung 6.21*).

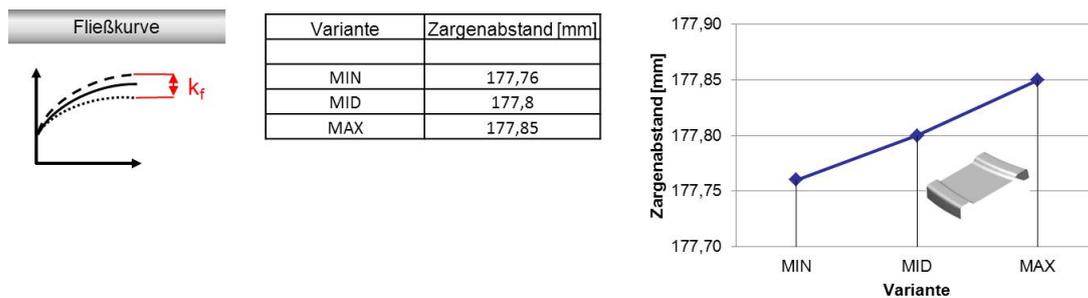


Abbildung 6.21: Einfluss Fließkurvenstreuung Demonstrator offen

Generell ist zu erkennen, dass im Vergleich zum geschlossenen Demonstrator größere Zargenabstände und somit Rückfederungswerte prognostiziert werden. Dies ist schlüssig, da eine offene Bauteilkontur mehr Eigenspannungen im Entlastungsprozess freigeben kann. Somit federt ein offenes Bauteil um ein größeres Maß auf.

Auch hier werden bei der Verwendung der minimalen Fließkurve sehr geringe Abweichungen des Zargenabstandes zur Referenz ermittelt. Diese betragen lediglich 0,04 mm. Wird die maximale Fließkurve in die Materialkarte importiert, ergeben sich Maßabweichungen von 0,05 mm zum Rückfederungsergebnis der Referenzsimulation.

Der Einfluss der Fließkurvenstreuung auf das Rückfederungsergebnis des offenen und des geschlossenen Demonstrators wird somit als sehr gering eingestuft. Demnach ist es folgend zulässig, die mittlere Fließkurve für die weiteren Variationsrechnungen zu verwenden.

6.3.2 Radius

Zunächst sollen die Radien als geometrische Parameter der Vorziehstufe variiert werden. Dazu wird die Geometrie des Demonstrators nach der zweiten Ziehstufe OP40 betrachtet, da nach diesem Herstellungsprozess die geforderte Konstruktionsgeometrie erzielt wird. Der Innenradius der Innenkontur (r_1), der Außenradius der Innenkontur (r_2) und der Außenradius der Außenkontur (r_3) sind laut Konstruktionsvorgaben auf 8 mm definiert. Nach dem Stand der Technik werden diese Radien schon in der Vorziehstufe geschaffen. Demnach sind r_1 , r_2 und r_3 in der Vorziehstufe OP20 der Referenzsimulation ebenfalls 8 mm groß. Zudem gibt es einen Innenradius der Außenkontur (r_4), der im Referenzprozess mit 8 mm definiert ist. Dieser Zusammenhang wird in *Abbildung 6.22* verdeutlicht.

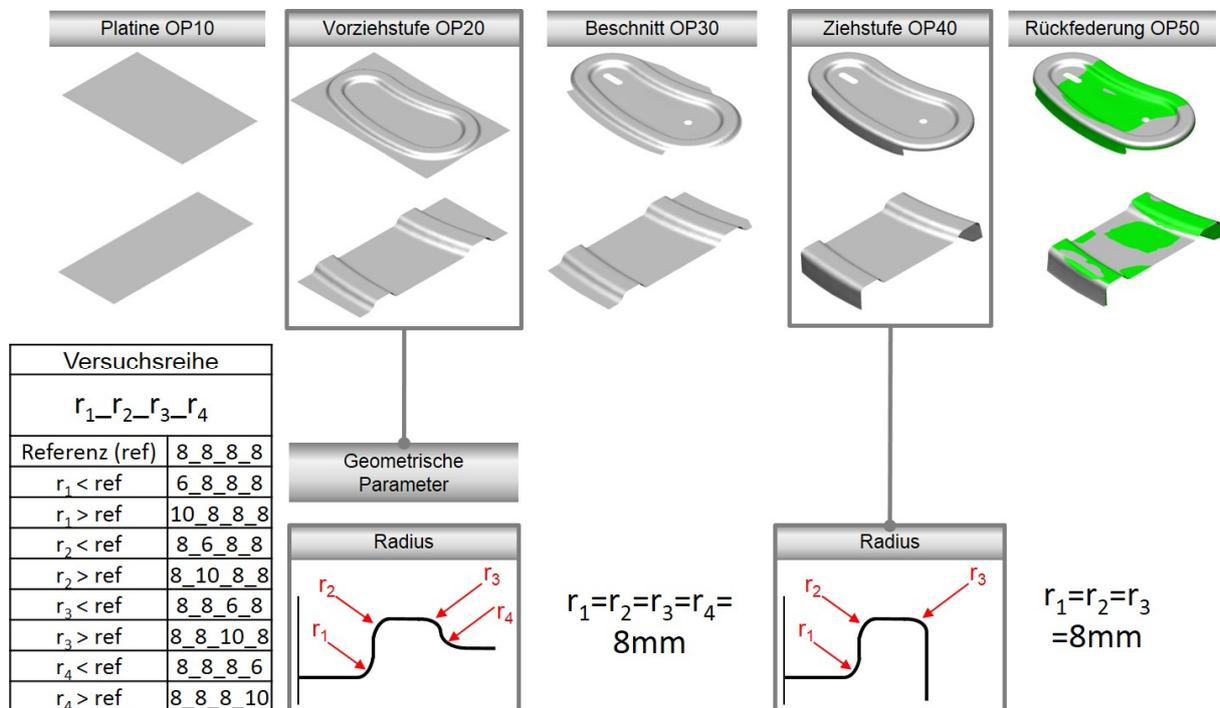


Abbildung 6.22: Versuchsplanung Radienvariation

Um die Radien der Vorziehstufe zu variieren, um somit einen abweichenden Weg zum Stand der Technik zu prüfen, wird zunächst die Sensitivität der Radienvariation auf den Zargenabstand analysiert. Dazu werden für die jeweiligen Radien der Vorziehstufe (r_1 , r_2 , r_3 , r_4) kleinere (6 mm) oder größere (10 mm) Radien zum Referenzprozess gewählt. Demnach bedeutet beispielsweise der Versuchsschlüssel 10_8_8_8, dass in der Vorziehstufe für den Innenradius der Innenkontur (r_1) mit 10 mm ein größerer Radius zum Referenzprozess vorgezogen wird. Da jedoch die zweite Ziehstufe OP40 stets dieselbe Werkzeugwirkfläche aufweist, wird auch bei den Variationsberechnungen die vorgegebene Konstruktionsgeometrie des De-

monstrators erfüllt. Trotz der Radienvariation in der Vorziehstufe weisen alle Radien des Demonstrators nach der Gesamtfertigung 8 mm auf.

Der mittlere Zargenabstand des geschlossenen Demonstrators nach der Berechnung des Herstellungsprozesses in der Simulation und somit das zu beurteilende Maß der Rückfederung für die Radienvariation ist in *Abbildung 6.23* dargestellt.

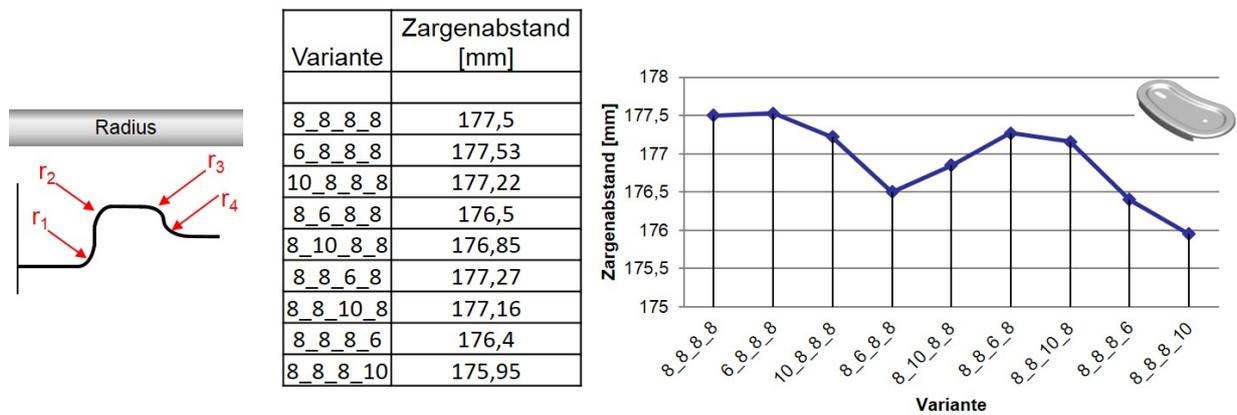


Abbildung 6.23: Radius Sensitivität Demonstrator geschlossen

Neben den tabellarisch aufgeführten Zargenabständen der einzelnen Vorziehstufenvarianten ist auch eine Visualisierung der Rückfederungswerte im Diagramm vorhanden. Die Referenzvariante (8_8_8_8), die dem Vorgehen beim derzeitigen Stand der Technik zur Auslegung der Vorziehstufe entspricht, weist einen Zargenabstand von 177,5 mm auf. Es ist bemerkenswert, dass nahezu jeder Zargenabstand nach der Radienvariation geringer ist und somit eine kleinere Rückfederung auftritt. Demzufolge wird der Radienvariation in der Vorziehstufe ein hohes Potential zur Rückfederungsreduzierung beigemessen. Besonders bei der Variation des Innenradius der Außenkontur (r_4) und damit dem Matrizenradius der Vorziehstufe werden die geringsten Zargenabstände (175,95 mm) nach der Gesamtumformung ermittelt. Die Detailauswertung der Rückfederung erfolgt in *Abbildung 6.24*.

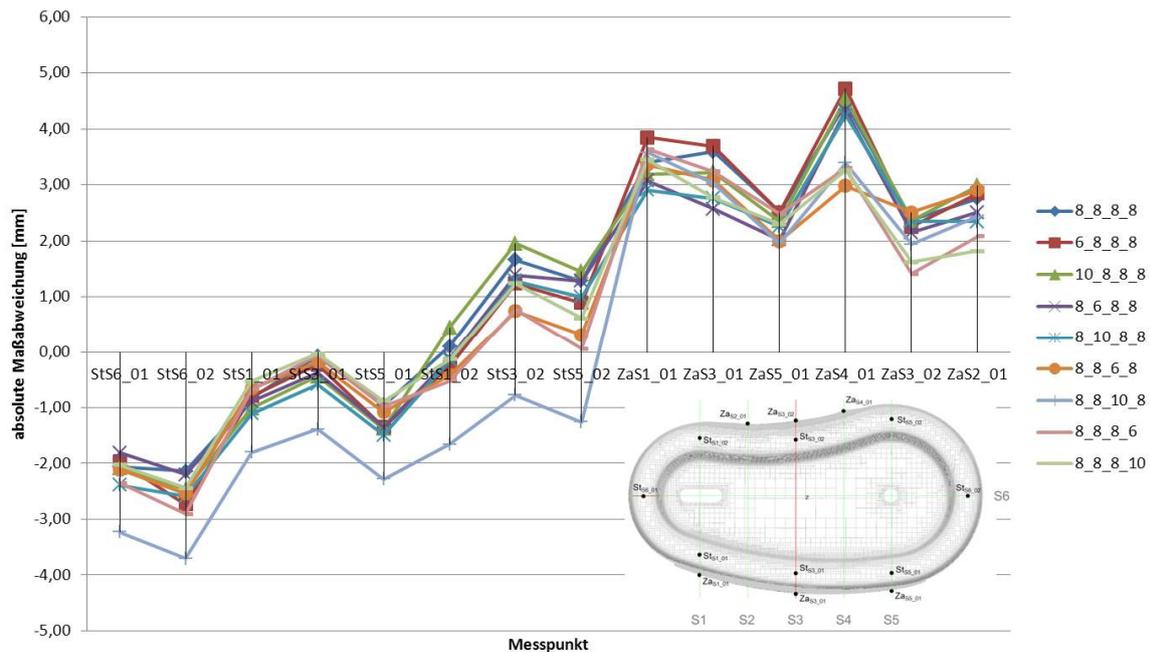


Abbildung 6.24: Detail Sensitivität Radius Demonstrator geschlossen

Somit ist es möglich, die Radienvariation der Vorziehstufe bezüglich der einzelnen Messpunkte und den dazugehörigen Demonstratorenbereichen separat zu beurteilen. Da in den einzelnen Messpunkten der Abstand der rückgefederter Geometrie zur Soll-Geometrie gemessen wird, ist es möglich, negative Rückfederungswerte zu erfassen. Dies kann beispielsweise im Stegbereich (St) beobachtet werden. Im Zargenbereich (Za) hingegen tritt positive Rückfederung auf. Auch das Maß der Rückfederung ist im Zargenbereich deutlich größer als im Stegbereich. Zudem kann durch die Streuung der absoluten Maßabweichungen eine Aussage getroffen werden, in welchen Messbereichen eine große rückfederungsreduzierende Wirkung erzielt werden kann. Da in dem Zargenbereich die Referenzvariante 8_8_8_8 durchschnittlich größere absolute Maßabweichungen als die Variationen aufweist und die Streuung der Messwerte hier groß ist, wird diesem Bereich auch ein besonderes Potential zur Rückfederungsreduzierung beigemessen. Auch hier wird deutlich, dass die Radienvarianten r_4 die geringsten absoluten Maßabweichungen aufweisen. Auf Grund des besonderen Potentials zur Rückfederungsreduzierung durch den Matrizenradius der Vorziehstufe (r_4) wird die Versuchsreihe ausgedehnt. Dazu wird der Radius r_4 zwischen 4 mm und 12 mm in 1 mm-Abständen durch zusätzliche Varianten in der Simulation abgebildet und berechnet. Die Rückfederungsergebnisse zur Variation des Matrizenradius in der Vorziehstufe sind in *Abbildung 6.25* dargestellt.

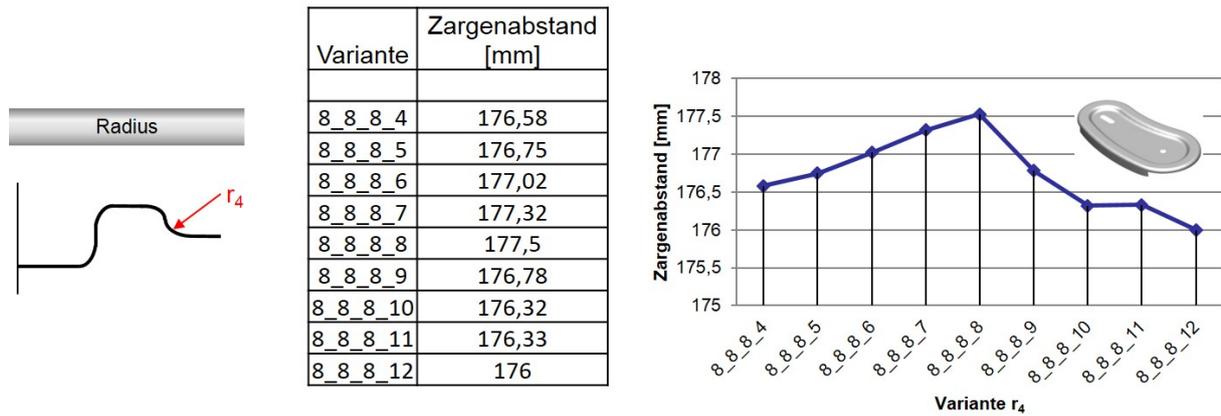


Abbildung 6.25: Radius r_4 Demonstrator geschlossen

Die Ergebnisse verdeutlichen das große Potential zur Rückfederungsreduzierung durch die Variation von r_4 . Jede Simulationsvariante mit einem anderen Vorziehradius zeigt geringere Rückfederungswerte nach der Gesamtumformung. Ferner kann eine Tendenz aufgezeigt werden. Je größer der Matrizenradius von dem Referenzradius abweicht, desto größer ist die rückfederungsreduzierende Wirkung. Dabei ist es irrelevant, ob dieser größer oder kleiner dem Referenzradius gewählt wird. Eine Einschränkung besteht hingegen, da bei sehr kleinen Radien eine Überprüfung der Herstellbarkeit erfolgen muss, um die erhöhte ReiBerwahrscheinlichkeit abzusichern.

Folgend werden die Ergebnisse der Radienvariation in der Vorziehstufe des offenen Demonstrators betrachtet (Abbildung 6.26).

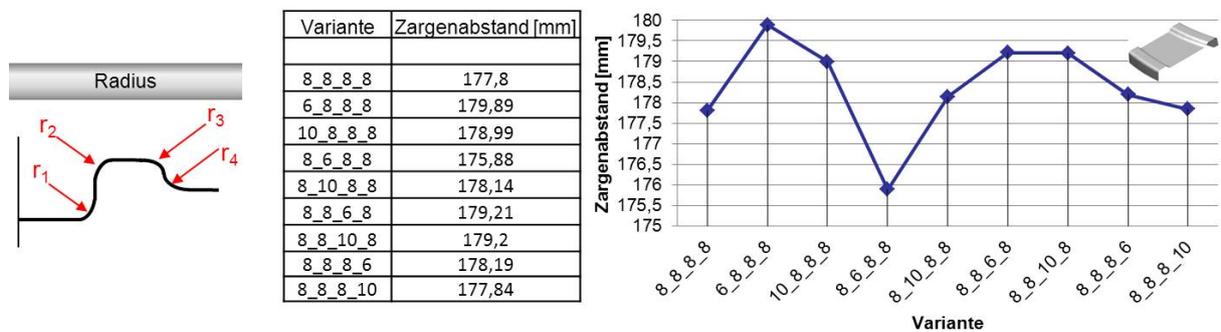


Abbildung 6.26: Radius Sensitivität Demonstrator offen

Der Diagrammverlauf der Zargenabstände bezogen auf die Radienvariation der Vorziehstufe ist auch beim offenen Demonstrator den Ergebnissen des geschlossenen Demonstrators ähnlich. Jedoch ist hier zu erkennen, dass nicht jede Radienvariation auch eine rückfederungsreduzierende Wirkung aufweist. Beispielsweise treten größere Zargenabstände auf, wenn der Innenradius der Innenkontur r_1 variiert wird (bis zu 179,89 mm). Die Variation des Außenradius der Innenkontur (r_2) zeigt hingegen die geringsten Maßabweichungen bezogen auf die Ergebnisse der Referenzsimulation.

Die Detailanalyse des offenen Demonstrators erfolgt in *Abbildung 6.27*. Dadurch kann der Einfluss der Radienvariation auf bestimmte Bauteilbereiche näher quantifiziert werden.

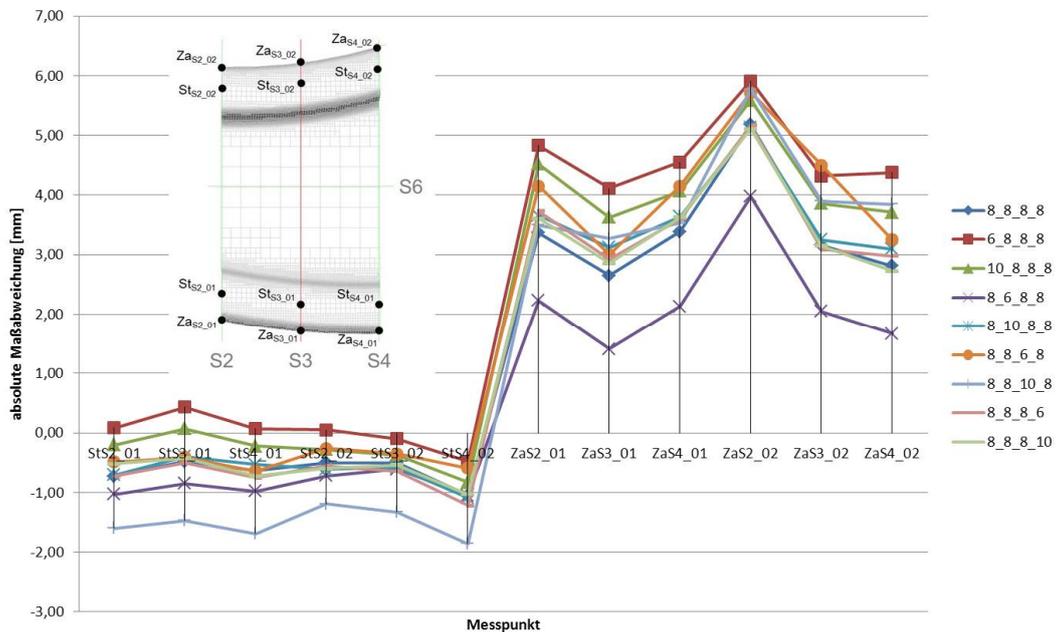


Abbildung 6.27: Detail Sensitivität Radius Demonstrator offen

Im Stegbereich (St) treten absolut betrachtet geringe negative Rückfederungen auf. Die Variation von r_1 wirkt sich beispielsweise rückfederungsreduzierend auf den Stegbereich aus. Im Zargenbereich (Za) wird durch die Variation von r_1 hingegen ein deutlich schlechteres Rückfederungsverhalten erreicht. Somit wird deutlich, dass eine separate Betrachtung der Bauteilbereiche bezüglich der rückfederungsreduzierenden Wirkung erfolgen muss. Im Zargenbereich treten vergleichsweise große absolute positive Maßabweichungen zur Soll-Kontur auf. Dabei wird eine deutliche rückfederungsreduzierende Wirkung für den Zargenbereich festgestellt, wenn ein kleinerer Außenradius für die Innenkontur (r_2) verwendet wird.

Auf Grund dieser Ergebnisse wird eine Ausweitung der Versuchsreihe des Außenradius der Innenkontur r_2 vorgenommen. Dabei werden die Radien zwischen 4 mm und 12 mm in 1 mm-Abständen variiert. Die Rückfederungsergebnisse des offenen Demonstrators werden in *Abbildung 6.28* visualisiert.

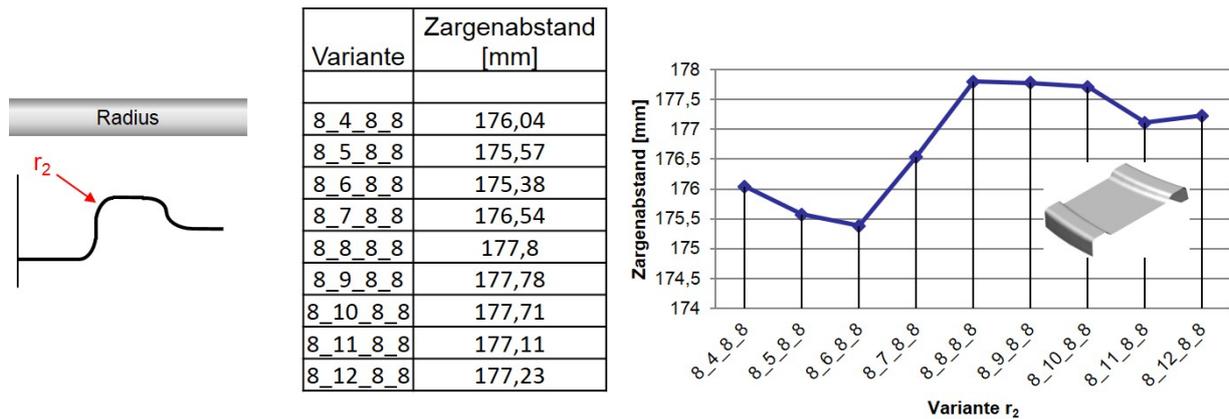


Abbildung 6.28: Radius r_2 Demonstrator offen

Es ist zu erkennen, dass mit einem kleinen Außenradius der Innenkontur r_2 in der Vorziehstufe eine Rückfederungsreduzierung erzielt werden kann. Dabei kann jedoch nicht die allgemeine Aussage getroffen werden, dass die Rückfederungsreduzierung mit abnehmendem Radius zunimmt. Es gibt ein Optimum bei $r_2=6$ mm.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Radienvariation der Vorziehstufe sich unterschiedlich auf die Bereiche (Zarge/ Steg) und die Demonstratorart (geschlossen/ offen) auswirkt.

Zur Rückfederungsreduzierung einer geschlossenen Bauteilkontur wird empfohlen, den Matrizenradius (r_4) der Vorziehstufe zu vergrößern oder zu verkleinern. Desto größer der Radienunterschied zur Referenz ist, umso höher ist auch die rückfederungsreduzierende Wirkung. Hierbei konnte eine Tendenz der Radienvariation festgestellt werden. Auch andere Radienvariationen (r_1, r_2, r_3) wirken rückfederungsreduzierend.

Bei einem offenen Bauteil sollte hingegen der Außenradius der Innenkontur (r_2) verkleinert werden. Jedoch ist hier keine eindeutige Tendenz vorhanden. Es wurde lediglich ein Rückfederungsoptimum bei $r_2=6$ mm festgestellt.

6.3.3 Grad der Vorziehstufe

Neben den Radien ist auch der Grad der Vorziehstufe ein weiterer geometrischer Parameter, der variiert werden kann. Nach der Ziehstufe OP40 entspricht der Demonstrator den Konstruktionsvorgaben. Dabei weist dieser eine Ziehtiefe der Innenkontur (t_1) von 10 mm auf. Die Außenkontur wird komplett abgestellt, sodass sich hier eine Ziehtiefe (t_2) von 30 mm ergibt. Nach dem Stand der Technik wird die Innenkontur komplett ausgeformt und ein Teil der Außenkontur angestellt (*Vergleich Methode Praxisbauteil siehe Abbildung 4.11*). Die Referenzsimulation weist eine Ziehtiefe der Innen- und der Außenkontur von 10 mm auf.

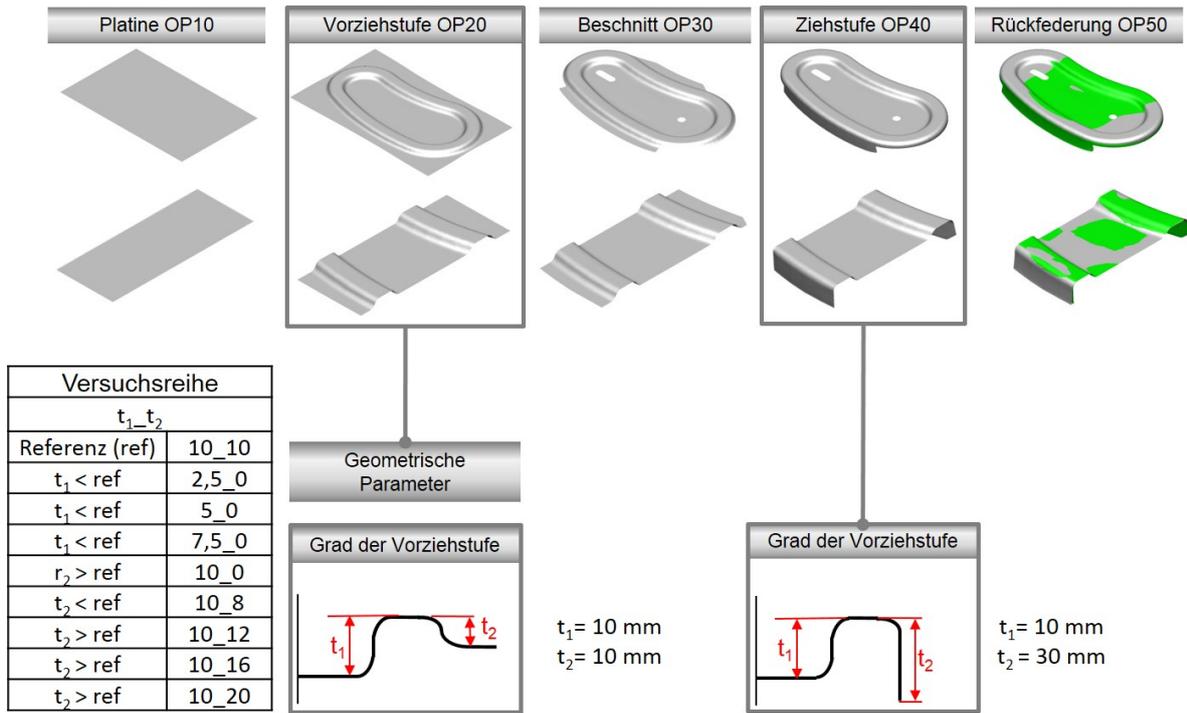


Abbildung 6.29: Versuchsplanung Grad der Vorziehstufe

Um den Grad der Vorziehstufe zu variieren, wird die Tiefe der Innenkontur (t_1) in 2,5 mm-Abständen modifiziert. Bei dieser Versuchsreihe wird keine Außenkontur ($t_2=0$ mm) angestellt, sodass der Vergleich vorgenommen werden kann, ob das Anstellen der Außenkontur in der Vorziehstufe einen rückfederungsreduzierenden Einfluss besitzt oder nicht. Die weitere Variation besteht darin, den Grad der Außenkontur zu variieren. Hierbei wird eine kleinere Tiefe der Außenkontur ($t_2=8$ mm) gegenüber der Referenzgeometrie ($t_2=10$ mm) aufgezeigt. Ferner werden größere Tiefen der Außenkontur ($t_2=12$ mm/ $t_2=16$ mm/ $t_2=20$ mm) der Referenz gegenübergestellt. Bei der Variation der Außenkontur t_2 wird die Innenkontur t_1 auf konstant 10 mm belassen.

Die Rückfederungsergebnisse bei der Variation Grad der Vorziehstufe sind der *Abbildung 6.30* zu entnehmen.

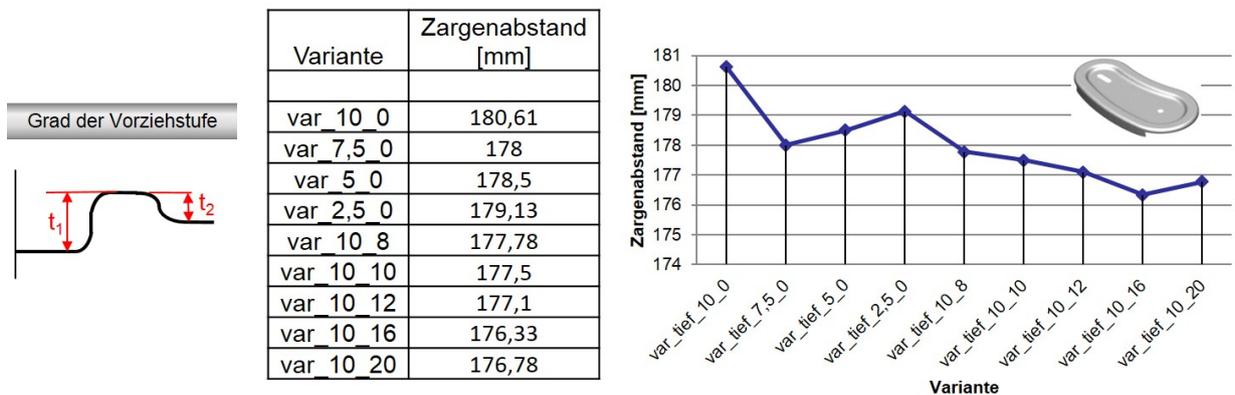


Abbildung 6.30: Grad der Vorziehstufe Demonstrator geschlossen

Die Referenz (var_10_10) mit einer Ziehtiefe der Innen- und der Außenkontur von 10 mm weist einen Zargenabstand von 177,5 mm auf. Wird hingegen nur die Innenkontur in der Vorziehstufe gezogen, werden deutlich höhere Zargenabstände nach der Gesamtumformung von 180,61 mm prognostiziert. Somit zeigt sich, dass das Anstellen der Außenkontur in der Vorziehstufe einen rückfederungsreduzierenden Einfluss aufweist. Ist es prozessbedingt vorgesehen, nur die Innenkontur vorzuziehen, dann sollte die Ziehtiefe der Vorziehstufe reduziert werden. Die zusätzliche Umformung zur Schaffung der vollständigen Innenkontur und damit die Erfüllung der Konstruktionsvorgaben werden dann in der Ziehstufe OP40 vorgenommen. Durch diesen zusätzlichen Plastifizierungsvorgang in OP40 wird eine Rückfederungsreduzierung erzielt. Ferner sollte bei der Vorziehstufengestaltung ein hoher Grad hinsichtlich der Außenkontur realisiert werden, um einen möglichst großen Einfluss der Rückfederungsreduzierung zu erzielen.

In der *Abbildung 6.31* sind die Rückfederungsergebnisse des offenen Demonstrators dargestellt.

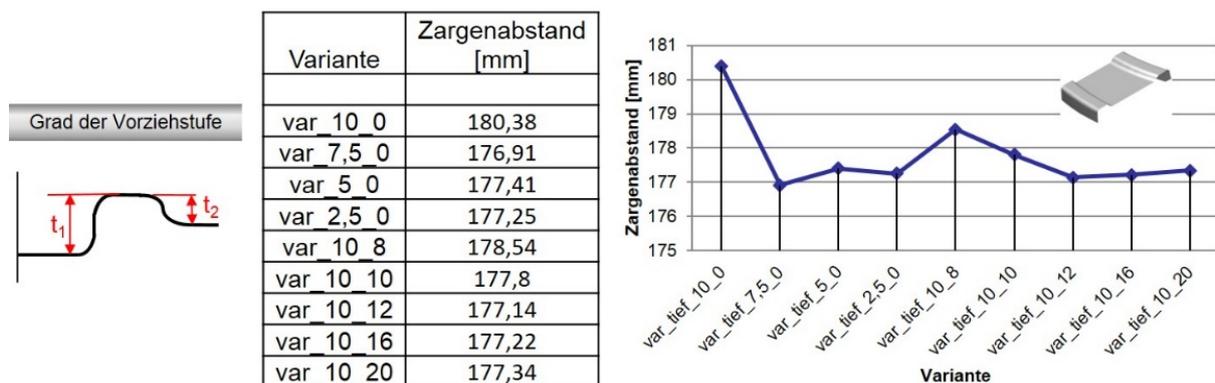


Abbildung 6.31: Grad der Vorziehstufe Demonstrator offen

Da der Diagrammverlauf des geschlossenen Demonstrators sehr ähnlich ist, leiten sich die gleichen Gestaltungshinweise für die Vorziehstufe des offenen Demonstrators ab. Jedoch ist hier ein stärkerer rückfederungsreduzierender Einfluss vorhanden, wenn die Innenkontur in der Vorziehstufe nicht komplett ausgeformt wird. Die zusätzliche Umformung muss auch hier in der zweiten Ziehstufe erfolgen, sodass die erneute Plastifizierung positiv auf die Rückfederung wirkt.

6.3.4 Niederhalterkraft

Neben den geometrischen Parametern ist es möglich, prozesstechnische Parameter der Vorziehstufe zu variieren. Da die Niederhalterkraft (F_{NH}) den Spannungszustand im Blech beeinflusst, werden in der Vorziehstufe verschiedene Niederhalterkräfte simuliert, um anschließend die Rückfederungsergebnisse nach der Gesamtumformung zu vergleichen. Dabei wird in der zweiten Ziehstufe OP40 stets eine konstante

Niederhalterkraft von 200 kN angenommen. Die Größe der Niederhalterkraft beeinflusst neben der Rückfederung die Reißerwahrscheinlichkeit und die Faltenbildung im Bauteil. Die Referenzniederhalterkraft in der Vorziehstufe OP20 wird ebenfalls mit $F_{NH}=200$ kN angenommen. Die Visualisierung der Versuchsreihe Variation Niederhalterkraft erfolgt in *Abbildung 6.32*.

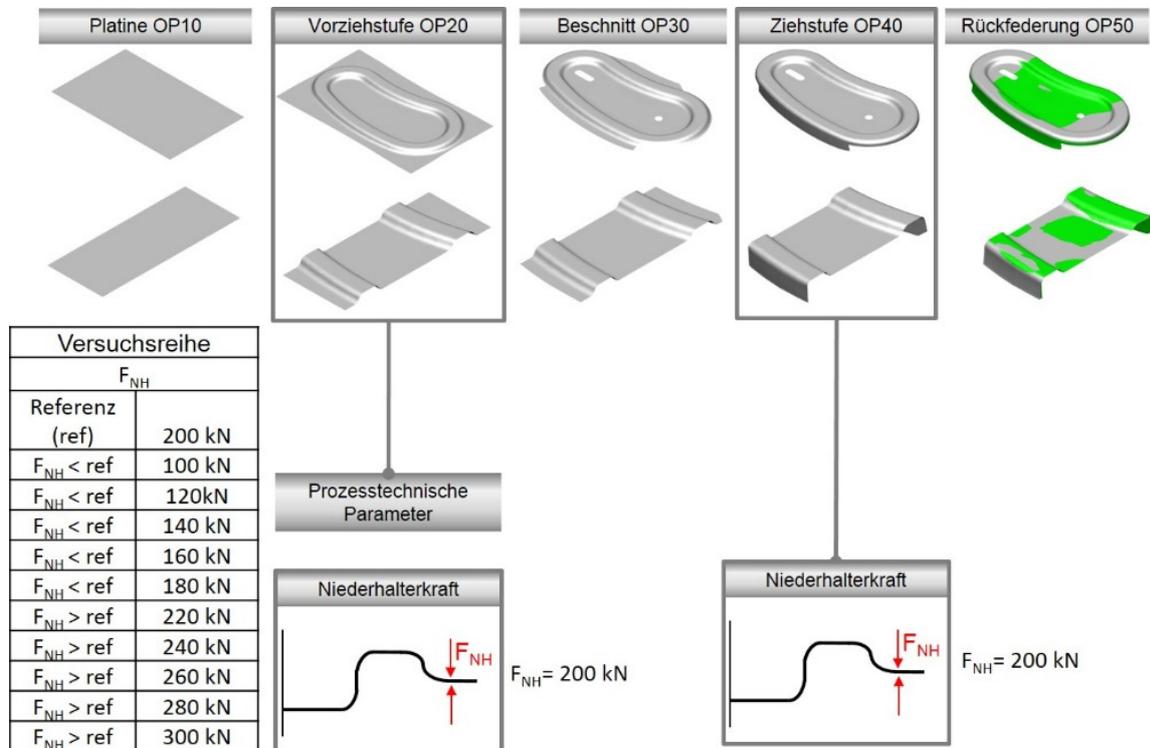


Abbildung 6.32: Versuchsreihe Niederhalterkraft

Um die Niederhalterkraft in der Vorziehstufe zu variieren, werden die Werte von 100 kN bis 300 kN in 20 kN-Abständen modifiziert. Demnach werden geringere und größere Niederhalterkräfte dem Referenzprozess gegenübergestellt.

Die Rückfederungsergebnisse der Niederhaltervariation werden in *Abbildung 6.33* visualisiert.

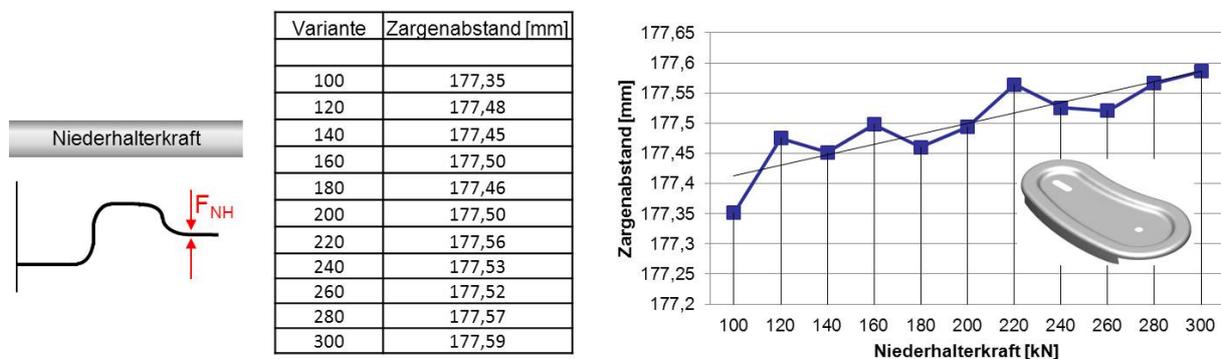


Abbildung 6.33: Niederhalterkraft Demonstrator geschlossen

Der Zargenabstand der Referenzsimulation beim geschlossenen Demonstrator beträgt 177,5 mm. Der geringste Zargenabstand (177,35 mm) wird erreicht, wenn in der Vorziehstufe die Niederhalterkraft von 100 kN definiert wird. Die größte Rückfederung nach der Gesamtumformung wird hingegen bei einer Niederhalterkraft von 300 kN in der Vorziehstufe prognostiziert. Trotz geringer Streuung der Zargenabstände lässt sich aus dem Diagramm eine eindeutige Tendenz ablesen. Diese besagt, dass mit sinkender Niederhalterkraft in der Vorziehstufe eine Rückfederungsreduzierung nach der Gesamtumformung erzielt werden kann. Dies ist bemerkenswert, da in der Theorie die Erhöhung der Niederhalterkraft in der Ziehstufe eine erhöhte Ausstreckung bewirkt. Dadurch ist der plastische Dehnungsanteil an der Gesamtdehnung größer und es werden geringere Maßabweichungen beobachtet. In der Vorziehstufe von geschlossenen Bauteilen sollte hingegen eine geringe Niederhalterkraft gewählt werden, um eine erhöhte Maßhaltigkeit zu erreichen.

In der *Abbildung 6.34* werden die unterschiedlichen Zargenabstände in Abhängigkeit der Niederhalterkraftvariation in der Vorziehstufe des offenen Demonstrators dargestellt.

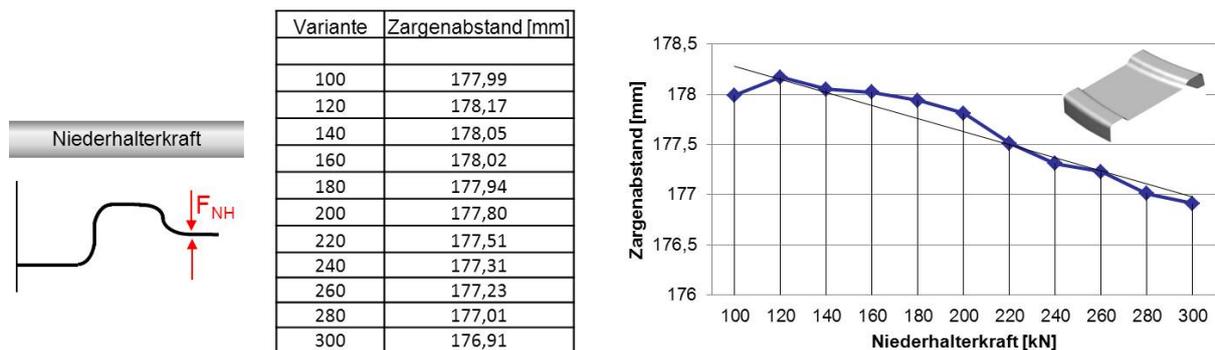


Abbildung 6.34: Niederhalterkraft Demonstrator offen

Die Referenzsimulation weist wiederum einen Zargenabstand von 177,8 mm beim offenen Demonstrator auf. Wird in der Vorziehstufe des offenen Demonstrators eine Niederhalterkraft von $F_{NH}=300$ kN gewählt, ergibt sich mit 176,91 mm der geringste Zargenabstand. Bei geringen Niederhalterkräften in der Vorziehstufe vergrößert sich der Zargenabstand hingegen, sodass auch hier eine Tendenz zu erkennen ist.

Bei der Herstellung von offenen Bauteilen ist im Gegensatz zur Herstellung von geschlossenen Konturen eine große Niederhalterkraft in der Vorziehstufe zu definieren. Hierbei sollte die Herstellbarkeit erneut geprüft werden, da erhöhte Niederhalterkräfte die Reißerwahrscheinlichkeit vergrößern. Ist die Niederhalterkraft zu gering, können Falten im Bauteil auftreten. Für eine Niederhalterkraft von 100 kN bzw. 300 kN ergaben sich jedoch keine signifikanten Änderungen im Grenzformänderungsdiagramm.

Das gegenläufige Rückfederungsverhalten bezüglich der Niederhalterkraftvariation des offenen und des geschlossenen Demonstrators soll in der Validierung aufgegriffen und geprüft werden (siehe Kapitel 7 Validierung der Simulationsergebnisse).

6.3.5 Schließabstand

Ein weiterer prozesstechnischer Parameter ist der Schließabstand. Verfährt das Oberwerkzeug den vollständigen Umformweg, befindet sich das Werkzeug im tiefsten Arbeitspunkt und somit im unteren Totpunkt (UT). Dies entspricht auch dem Stand der Technik. Daher wird für die Ziehstufe OP40 kein zusätzlicher Schließabstand (e) in der Referenzsimulation vorgesehen. Für die Vorziehstufe wird hingegen ein zusätzlicher Schließabstand von 0,15 mm als Referenz definiert, um kleinere und größere Schließabstände vergleichen zu können (Abbildung 6.35).

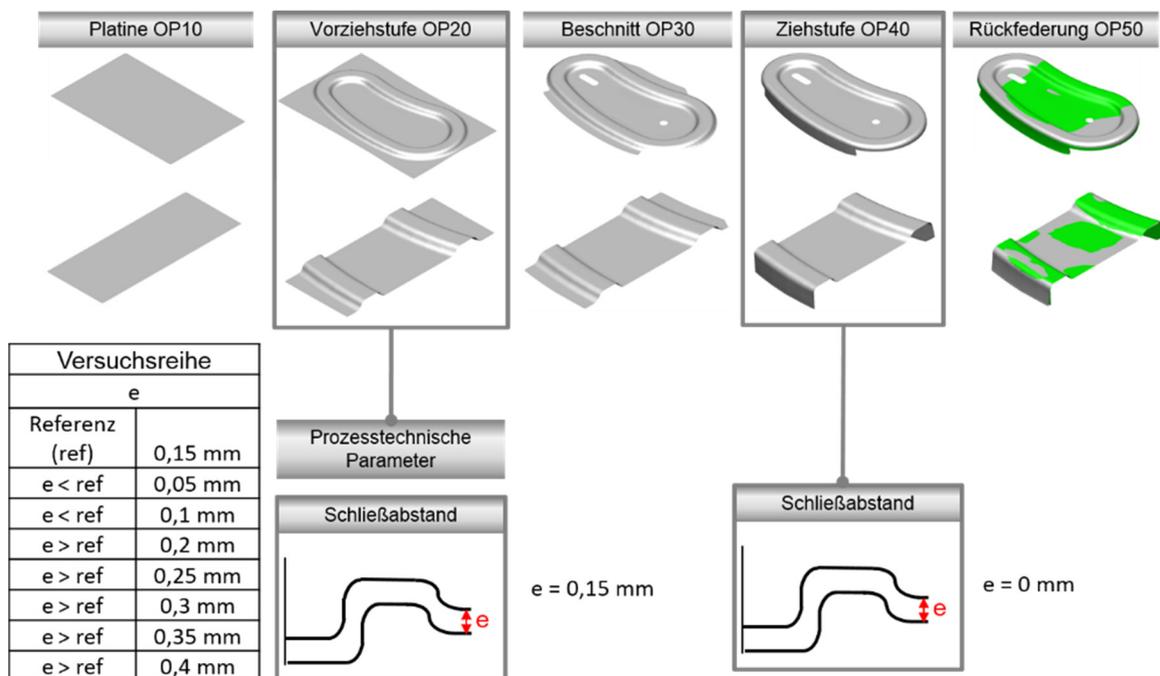


Abbildung 6.35: Versuchsreihe Schließabstand

Wird in der Vorziehstufe der Prozess vor dem eigentlichen unteren Totpunkt gestoppt, ist eine Variation des zusätzlichen Schließabstandes möglich. Beispielsweise bedeutet der größte Schließabstand $e=0,4$ mm der Versuchsreihe, dass zum Prozessende der Vorziehstufe der Abstand zwischen Stempel und Matrize 1,4 mm ist. Dieser Abstand ergibt sich aus der Blechstärke (1 mm) und dem zusätzlichen Schließabstand. Die weiteren Variationen werden in 0,05 mm-Abständen definiert. Die komplette Versuchsreihe des Schließabstandes ist der *Abbildung 6.35* zu entnehmen.

In der *Abbildung 6.36* sind die Rückfederungsergebnisse der Versuchsreihe Schließabstand dargestellt.

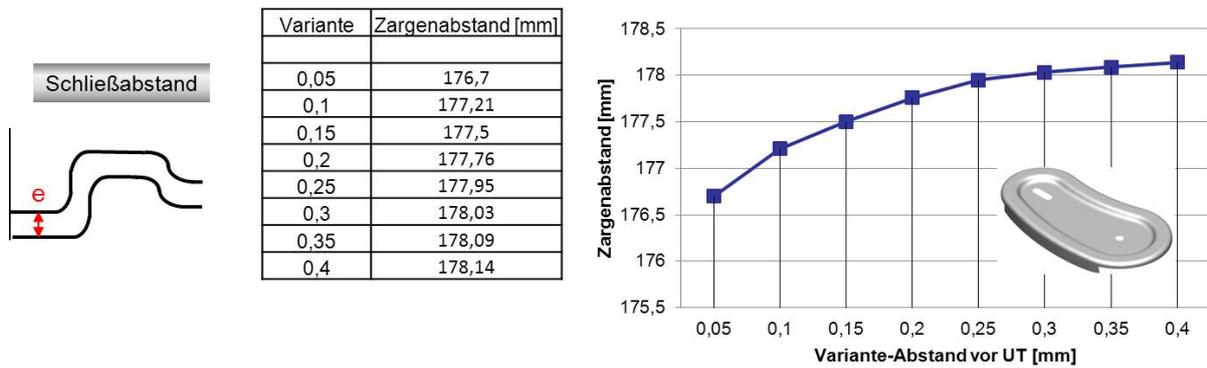


Abbildung 6.36: Schließabstand Demonstrator geschlossen

Der Zargenabstand nach der Rückfederungsberechnung der Referenzsimulation ($e=0,15$ mm) beträgt beim geschlossenen Demonstrator 177,5 mm. Beim geringsten Schließabstand der Versuchsreihe von $e=0,05$ mm tritt auch der geringste Zargenabstand von 176,7 mm auf. Mit steigendem Schließabstand steigt auch der Zargenabstand und somit die Rückfederungsneigung. Die Steigung des Kurvenverlaufes nimmt kontinuierlich ab. Trotz geringer Änderungen des Schließabstandes zwischen 0,05 mm und 0,4 mm treten signifikante Abweichungen der Zargenabstände auf, da der Wertebereich zwischen 176,7 mm und 178,14 mm schwankt.

In der *Abbildung 6.37* sind die Rückfederungsergebnisse des offenen Demonstrators dargestellt.

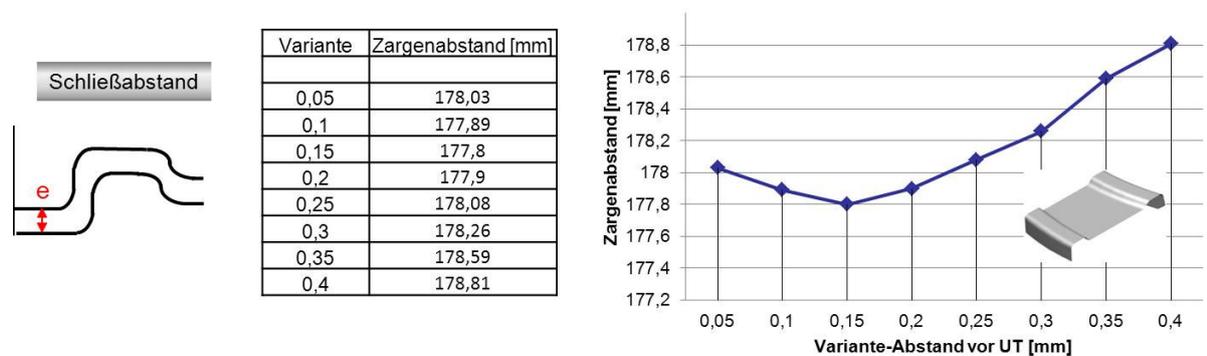


Abbildung 6.37: Schließabstand Demonstrator offen

Auch beim offenen Demonstrator zeigt sich ein ähnliches Rückfederungsverhalten bei schwankenden Schließabständen. Die Referenzsimulation mit einem Schließabstand von 0,15 mm zeigt wiederum den Zargenabstand von 177,8 mm. Bei einem Schließabstand von 0,4 mm tritt der größte Zargenabstand von 178,81 mm auf. Somit ist bei einem steigenden Schließabstand auch hier eine erhöhte Rückfederungsneigung zu erwarten. Abweichend ist hingegen, dass beim offenen Demonstrator der minimale Zargenabstand nicht bei $e=0,05$ mm sondern bei der Referenzvariante erreicht wird.

Generell kann als rückfederungsreduzierende Gestaltungsmaßnahme gesagt werden, dass der Schließabstand in der Vorziehstufe möglichst klein zu wählen ist. Dies entspricht dem Stand der Technik, da der Prozess auch in der Vorziehstufe bis zum unteren Totpunkt gefahren wird.

Da jedoch ein starker Einfluss des Schließabstandes auf die Zargenabstände und somit auf das Rückfederungsergebnis vorliegt, muss das Stopp-Kriterium in der Simulation betrachtet werden. Ursprünglich wurde der Pinch-Test als Stopp-Kriterium für die Referenzsimulation und für die Variantenberechnungen gewählt. Problematisch hierbei ist, dass der Prozess gestoppt wird, wenn ein Platinenknotenpunkt zeitgleich zwei Werkzeugknotenpunkte berührt. Somit ergeben sich stets schwankende Schließabstände zum Prozessende. Eine Veranschaulichung dieser Problematik erfolgt in der *Abbildung 6.38*.

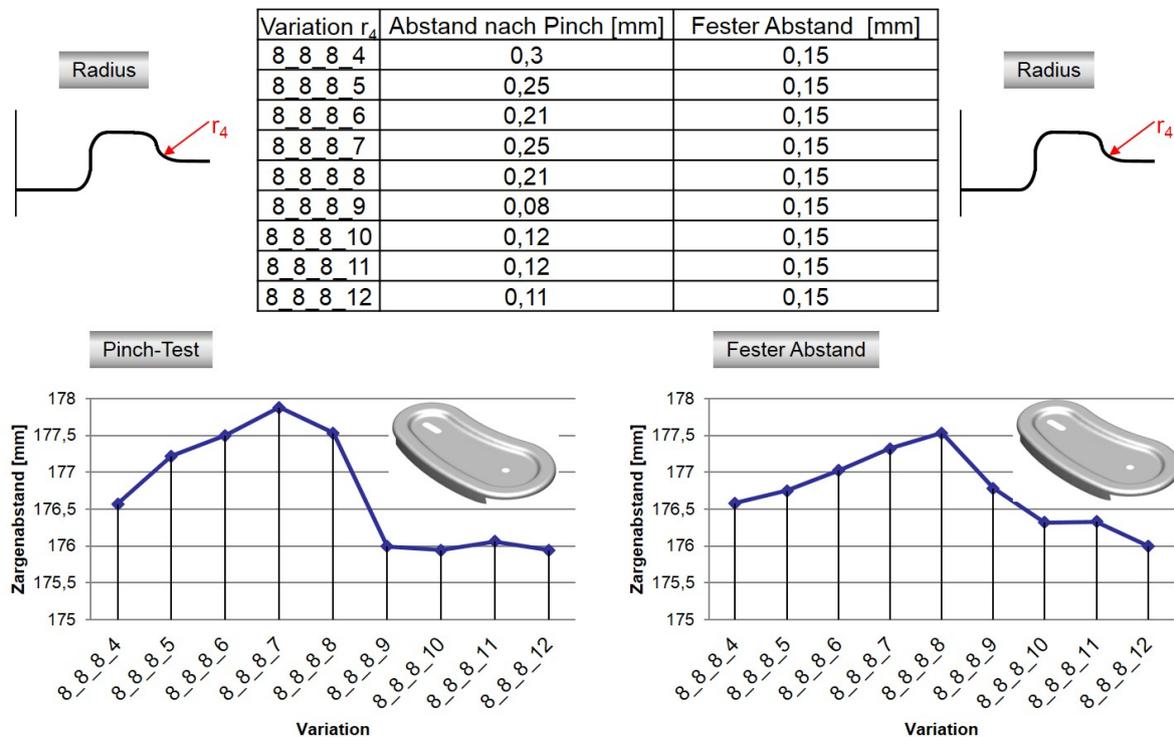


Abbildung 6.38: Stopp-Kriterium Variation r_4

Im linken Diagramm sind die Zargenabstände der Variationsberechnung r_4 dargestellt, wenn als Stopp-Kriterium der Pinch-test gewählt wird. Ferner können der Tabelle die unterschiedlichen zusätzlichen Schließabstände zum Prozessende entnommen werden. Vergleicht man das Diagramm mit den Ergebnissen des festen Schließabstandes zum Prozessende (*Abbildung 6.38 rechts*), ist ein ähnlicher Verlauf zu erkennen. Jedoch sind die Zargenabstände als definiertes Maß der Rückfederung unterschiedlich. Um einen reproduzierbaren Vergleich in der Simulation vornehmen zu können, werden für alle Variationsberechnungen feste Schließabstände in der Vorziehstufe OP20 vorgesehen. Dieser Schließabstand wird mit 0,15 mm defi-

niert. Vom Pinch-Test als mögliches Stopp-Kriterium im Rückfederungsvergleich wird abgeraten, da wechselnde Schließabstände keinen reproduzierbaren Vergleich erlauben.

6.4 Hauptspannungsdifferenz

Da die Höhe und Verteilung der Bauteilspannungen entscheidend für das Maß der Rückfederung sind (2.4.1 Ursachen und Mechanismen), erfolgt eine beispielhafte Analyse des geschlossenen Demonstrators hinsichtlich der Hauptspannungen im Bauteil. Dazu werden die Hauptspannungen der unteren und der oberen Membran miteinander verglichen. Zur Prozesseinordnung wurde die Ziehstufe OP40 verwendet und die betrachtete Spannungsdarstellung vor der Rückfederungsberechnung OP50 dargestellt. Die Visualisierung ist der *Abbildung 6.39* zu entnehmen.

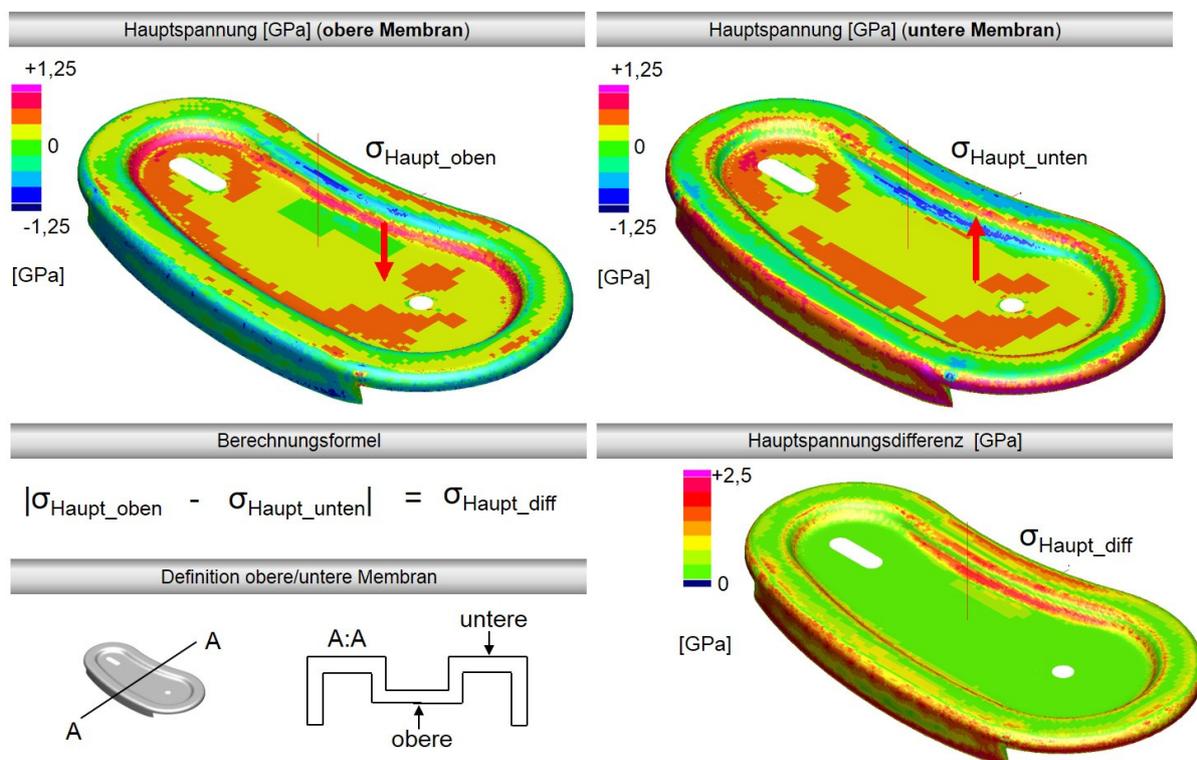


Abbildung 6.39: Berechnung der Hauptspannungsdifferenz

Bei Betrachtung der Hauptspannungen in der oberen Membran erkennt man, dass im Innenradius der Innenkontur (r_1) eine rote Bauteilfärbung vorliegt und somit große Zugspannungen auftreten. Im Außenradius der Innenkontur (r_2) ist hingegen eine blaue Bauteilfärbung ersichtlich, sodass hier negative Druckspannungen vorhanden sind. Ein Vergleich zu den Hauptspannungen der unteren Membran macht deutlich, dass vor allem in den aufgezeigten Radienbereichen gegensätzliche Spannungen vorhanden sind. So treten in der unteren Membran bei r_1 Druckspannungen und bei r_2 Zugspannungen auf. Die unterschiedlichen Spannungsgradienten ergeben sich, da in den Radienbereichen Biegeanteile vorhanden sind, die die Spannungsumkehr be-

wirken. Um diese gegensätzlichen Hauptspannungen zu quantifizieren, wurde folgende Berechnungsformel entwickelt.

$$\sigma_{Haupt_diff} = |\sigma_{Haupt_oben} - \sigma_{Haupt_unten}| \quad (6.1)$$

Die Hauptspannungsdifferenz (σ_{Haupt_diff}) ergibt sich dabei aus dem Betrag der Differenz von den Hauptspannungen der oberen (σ_{Haupt_oben}) und den Hauptspannungen der unteren Membran (σ_{Haupt_unten}).

Lässt man sich die Hauptspannungsdifferenzen anzeigen, so werden die Bauteilbereiche ersichtlich, die große gegensätzliche Spannungen in der oberen und in der unteren Membran aufweisen. Die grünen Bauteilbereiche weisen nur geringe Differenzen auf. Die Radienbereiche hingegen sind rot eingefärbt und weisen demnach Hauptspannungsdifferenzen bis zu 2,5 GPa auf.

Folgend wird ein Vergleich der Hauptspannungsdifferenzen (HSD) vor der Rückfederungsberechnung und nach der Rückfederungsberechnung vorgenommen. Dieser Zusammenhang wird in *Abbildung 6.40* dargestellt.

Nach der Ziehstufe OP40 und vor der Rückfederungsberechnung sind die Hauptspannungsdifferenzen in den Radienbereichen ersichtlich.

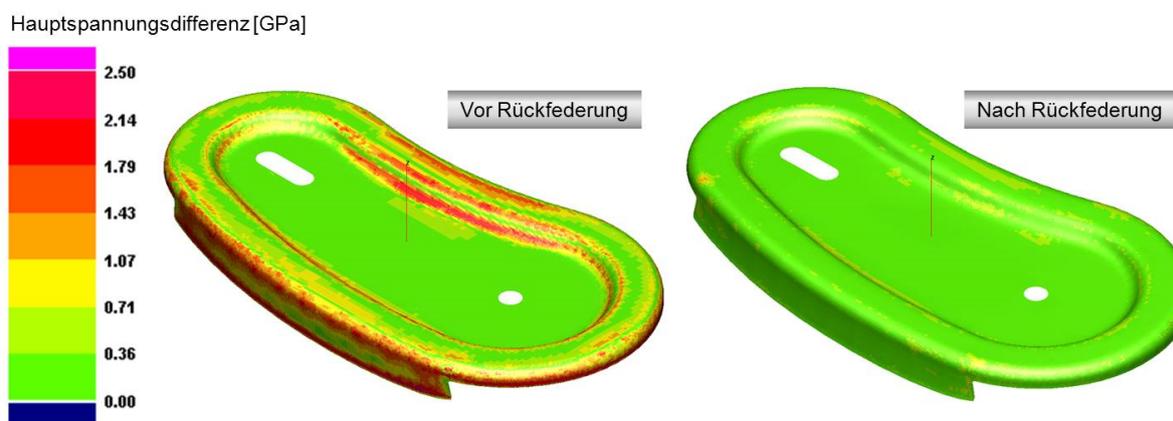


Abbildung 6.40: Vergleich der HSD vor und nach der Rückfederung

Führt man hingegen die Rückfederungsberechnung durch und lässt sich anschließend die Hauptspannungsdifferenzen anzeigen, verschwinden diese und das gesamte Bauteil weist nahezu keine Hauptspannungsdifferenzen auf. Es erfolgt der Abbau der Hauptspannungsdifferenzen im Entlastungsprozess. Somit könnten die Hauptspannungsdifferenzen ein Indiz für die bevorstehende Rückfederung sein, bevor die eigentliche Rückfederungsberechnung in der Simulation vorgenommen ist.

Folgend soll geklärt werden, ob die Höhe der Hauptspannungsdifferenz einen Einfluss auf die Höhe des Zargenabstandes und somit auf die Rückfederung hat. Dazu werden in der *Abbildung 6.41* die Ergebnisse der Radienvariation von r_4 erneut aufgegriffen und dargestellt.

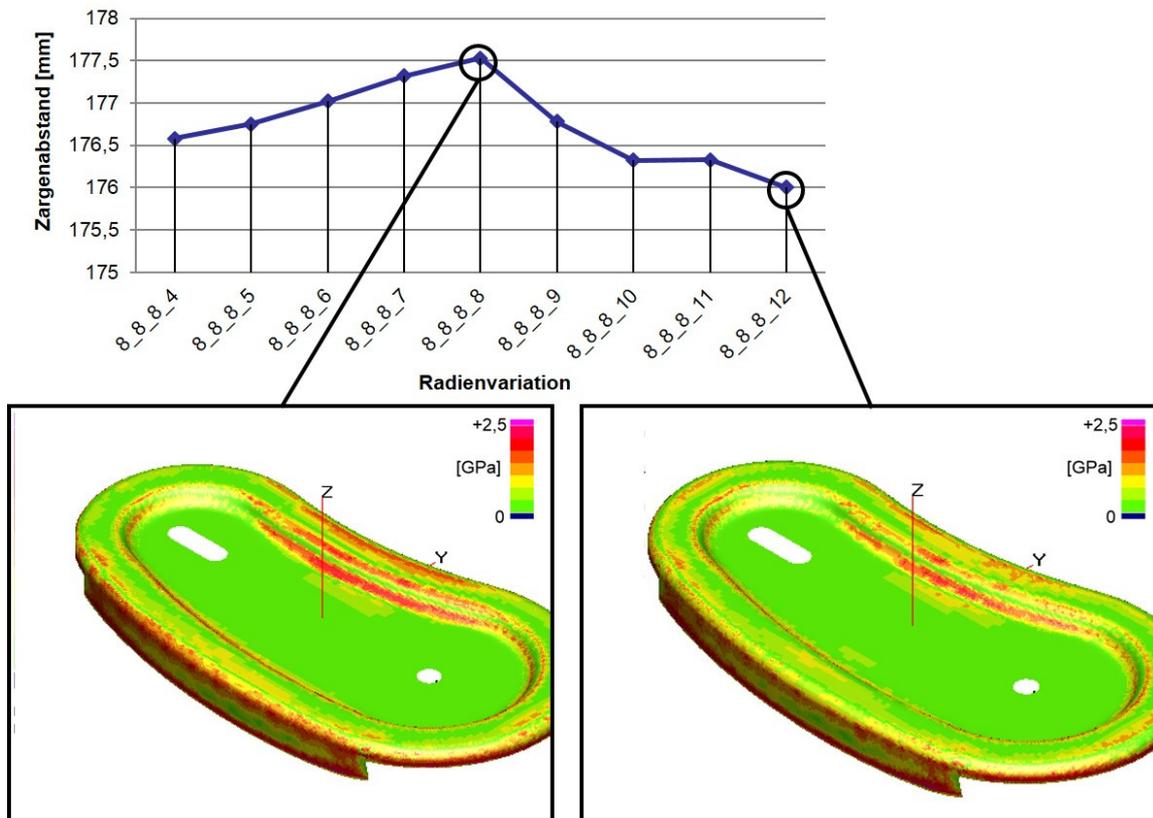


Abbildung 6.41: Hauptspannungsdifferenz bei Radienvariation

Die Referenzsimulation 8_8_8_8 weist mit einem Zargenabstand von 177,5 mm die größte Rückfederung auf. Bei der Variante 8_8_8_12 treten hingegen mit 176 mm die geringsten Rückfederungen auf. Vergleicht man die dazugehörigen Abbildungen der Hauptspannungsdifferenzen, erkennt man, dass bei geringeren Hauptspannungsdifferenzen (rot eingefärbt) auch geringere Zargenabstände zu erwarten sind. Ferner werden beispielhaft die Hauptspannungsdifferenzen der Versuchsreihe Schließabstand aufgezeigt. Dieser Sachverhalt wird in *Abbildung 6.42* dargestellt.

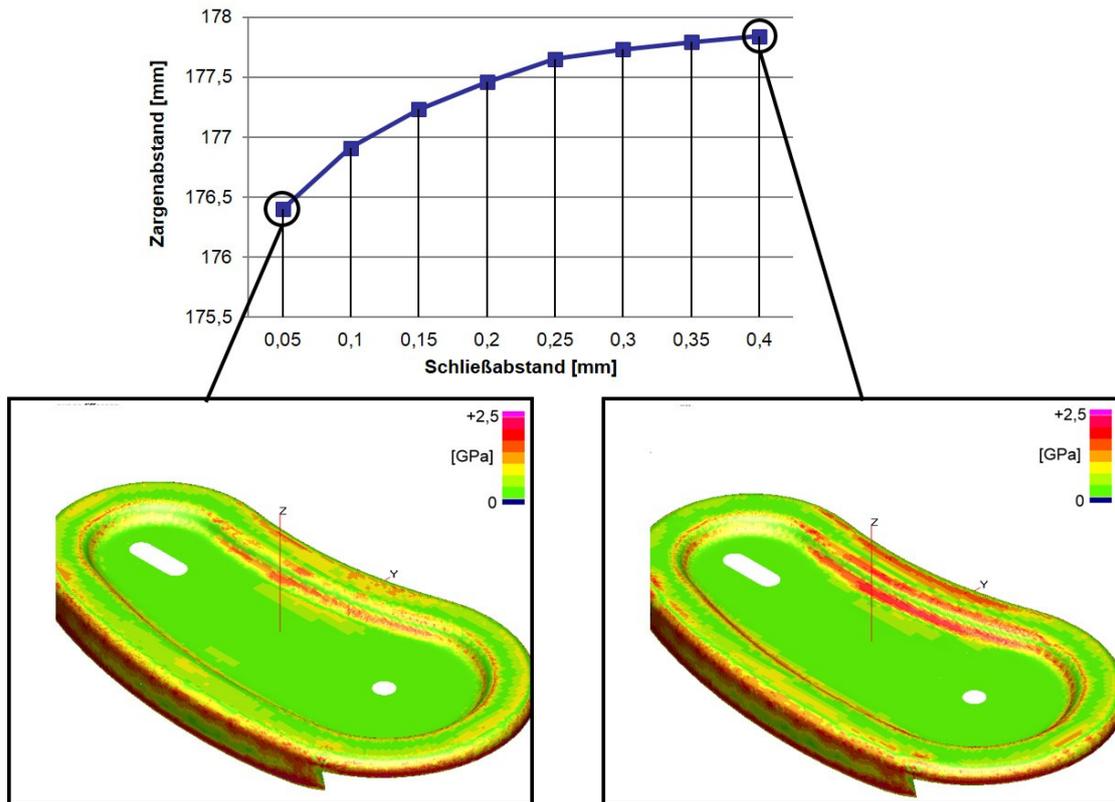


Abbildung 6.42: Hauptspannungsdifferenz bei Variation Schließabstand

Auch hier weist der geschlossene Demonstrator vor der Rückfederungsberechnung geringe Hauptspannungsdifferenzen auf, wenn sich nach der Rückfederungsberechnung kleinere Zargenabstände einstellen. Dies ist beispielhaft im Vergleich der Schließabstände 0,05 mm und 0,4 mm ersichtlich. Die Ausprägung der Hauptspannungsdifferenzen der Variante 0,05 mm ist um einiges geringer als in der Vergleichsvariante.

Dieser Sachverhalt zeigt auf, dass die Größe und Verteilung der Hauptspannungsdifferenz ein Indiz für die bevorstehende Rückfederung ist, bevor diese überhaupt in der Simulation berechnet ist. Eine Optimierung der geometrischen und prozesstechnischen Parameter hinsichtlich erhöhter Maßhaltigkeit mit Hilfe von Iterationen in der Umformsimulation ist ohne eigentliche Rückfederungsberechnung durchführbar. Somit wird durch diese innovative Methode eine schnellere und effizientere Rückfederungsreduzierung ermöglicht.

Im nächsten Arbeitsschritt müssen diese Erkenntnisse aus der Simulation validiert werden, sodass durch einen Realversuch die rückfederungsreduzierenden Maßnahmen bestätigt werden können.

7 Validierung der Simulationsergebnisse

Um die Ergebnisse aus der Simulation zu validieren, wird ein Werkzeug konstruiert. Die Werkzeugelemente werden in der *Zentralen Betriebswerkstatt in Wolfenbüttel* gefertigt. Zudem werden Normalien ausgewählt und bestellt. Anschließend erfolgt im Werkzeugbau die Montage zum Versuchswerkzeug.

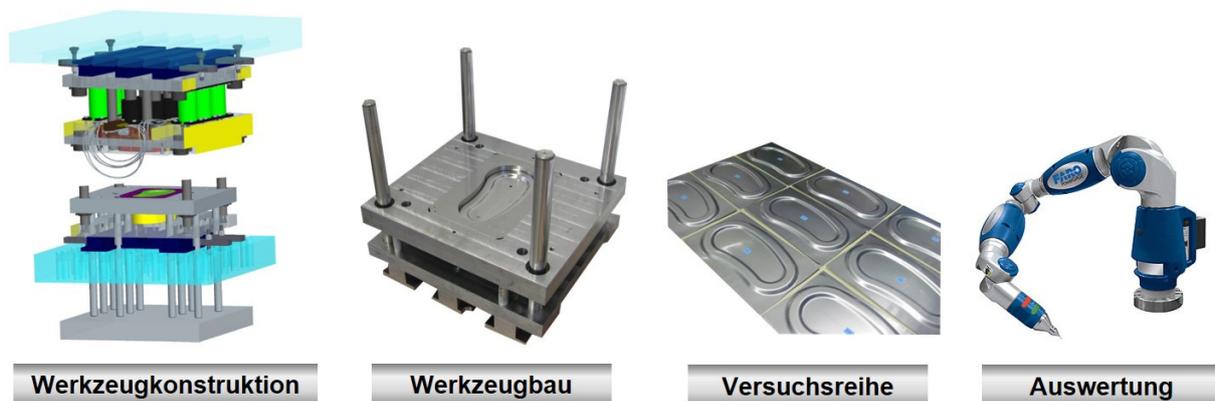


Abbildung 7.1: Vorgehensweise der Validierung

Nachdem das Versuchswerkzeug in die vorhandene Presse eingesetzt und positioniert ist, kann die Versuchsreihe gestartet werden. Die Bauteile werden in der Vorziehstufe tiefgezogen. Nach dem Beschnitt der Bauteile und der Umformung in der zweiten Ziehstufe können die realen Demonstratoren vermessen werden. Abschließend erfolgt eine vergleichende Auswertung gegenüber den Simulationsergebnissen.

7.1 Werkzeugkonstruktion

Zunächst wird das Grundkonzept für das Werkzeug erarbeitet. Dies dient zur Ausarbeitung des Detailkonzeptes. Auf dessen Grundlage wird anschließend die CAD-Konstruktion aufgebaut.

7.1.1 Konzeptionierung

Es erfolgt die Konzeptionierung des Versuchswerkzeuges. Dazu wird der Aufbau der hydraulischen Presse betrachtet (*Kapitel 4.2 Hydraulische Presse*). Da eine einfach wirkende Presse vorhanden ist, muss die Anordnung der Werkzeugelemente (Matrix, Stempel, Niederhalter) nach dem Grundkonzept aus *Abbildung 7.2* erfolgen. Die Niederhalterkraft wird durch ein Ziehkissen aufgebracht, welches sich unter dem Pressentisch befindet.

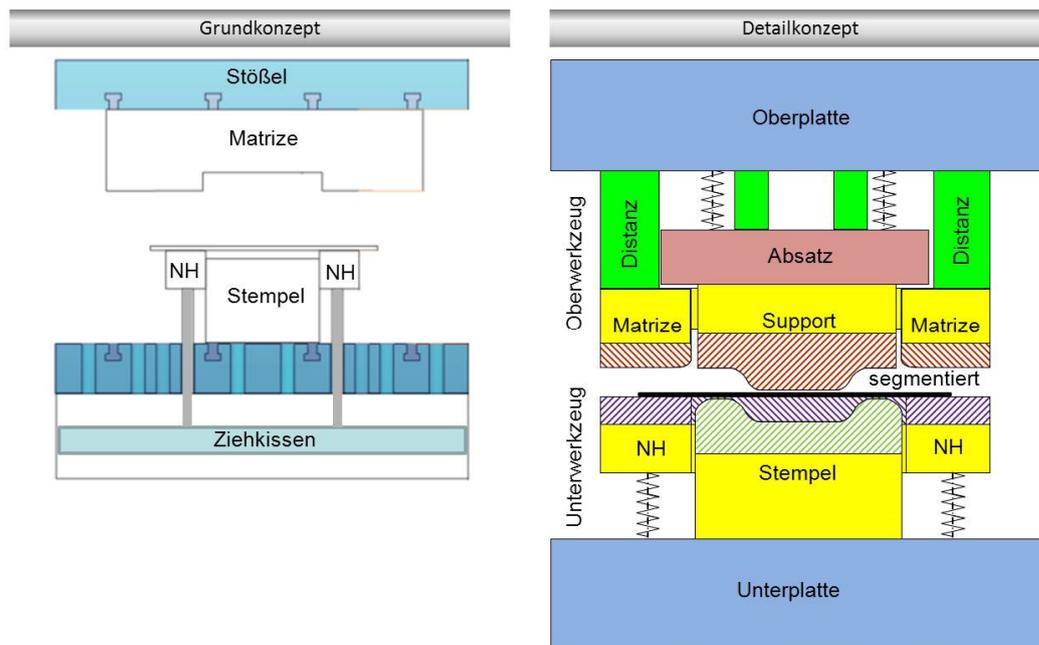


Abbildung 7.2: Ausarbeitung des Werkzeugkonzeptes

Anschließend erfolgt die Ausarbeitung des Detailkonzeptes. Hierbei wird die Wirkfläche zur Erzeugung des Demonstrators auf den Stempel und die Matrize übertragen. Da beim Umformvorgang von hochfesten Stahlblechen ein erhöhter abrasiver Verschleiß zu erwarten ist [DOE10], erfolgt die Segmentierung des Werkzeuges. Die gehärteten Werkzeugeinsätze (*in Abbildung 7.2 schraffiert*) verhindern einerseits die Zerstörung der Wirkflächen und bieten andererseits die Möglichkeit, diese Einsätze auszutauschen um auch am Versuchswerkzeug geometrische Variationen durchzuführen. Beispielsweise lassen sich somit die Ergebnisse der Radienvariation in der Vorziehstufe überprüfen. Die Einsätze werden aus dem Werkzeugstahl 1.2379⁵ hergestellt und durch eine anschließende Wärmebehandlung vergütet. Die weiteren Werkzeugkomponenten, die keine Berührung mit dem hochfesten Blech aufweisen, werden aus einem Baustahl (S355) gefertigt.

Das Unterwerkzeug besteht demnach aus einem segmentierten Stempel und einem segmentierten Niederhalter. Der Aufbau des Oberwerkzeuges ist hingegen komplexer. Dies ist darin begründet, dass in der zweiten Ziehstufe OP40 zudem ein matrizenseitiger Niederhalter (Support) prozessbedingt vorhanden sein muss. In der Vorziehstufe OP20 ist dieser mit festen Distanzen über den Absatz mit der Oberplatte verbunden. In der zweiten Ziehstufe werden die Distanzen durch Federerhaltungen ersetzt. Somit wird für die zweite Ziehstufe kein zweites Werkzeug benötigt. Es muss lediglich ein Umbau erfolgen, um dieses flexible Werkzeugkonzept umzusetzen. Auch hier werden der Support und die Matrize mit segmentierten Werkzeugeinsätzen ausgestattet. Auf Grundlage dieses Detailkonzeptes erfolgt die CAD-Konstruktion.

⁵ Kaltarbeitsstahl (X155CrVMo12-1)

7.1.2 CAD-Konstruktion

Die CAD-Konstruktion erfolgt in dem Programm *Pro-ENGINEER*. Das Ergebnis der Konstruktion ist in *Abbildung 7.3* ersichtlich.

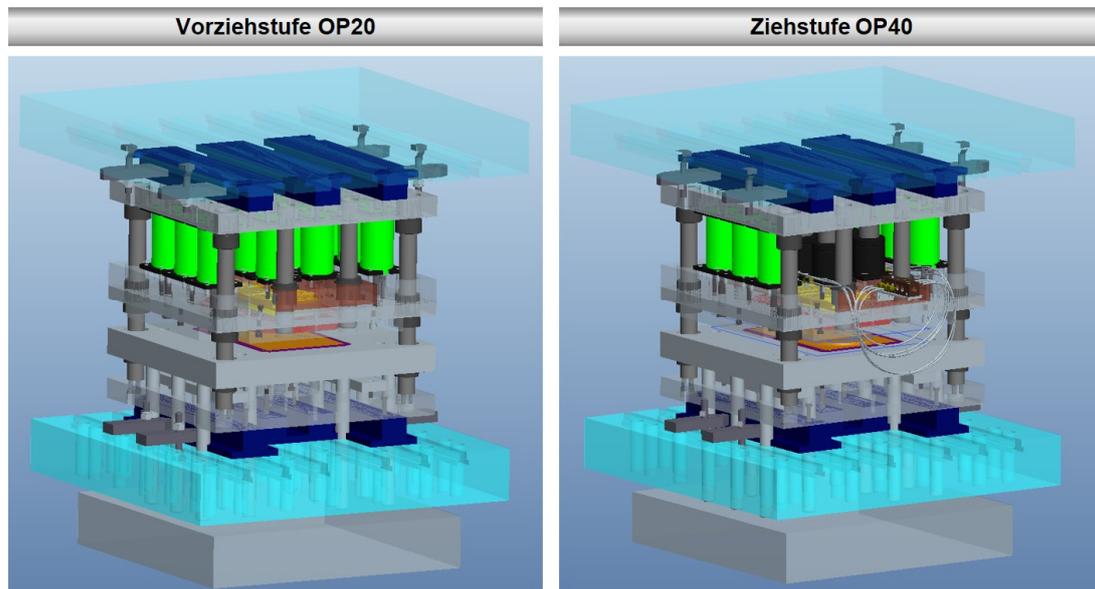


Abbildung 7.3: Werkzeugkonstruktion

Hierbei muss funktionsbedingt zwischen dem Werkzeug der Vorziehstufe OP20 und dem Werkzeug der Ziehstufe OP40 unterschieden werden. Die Visualisierung der verschiedenen Werkzeugstufen erfolgt in *Abbildung 7.4*.

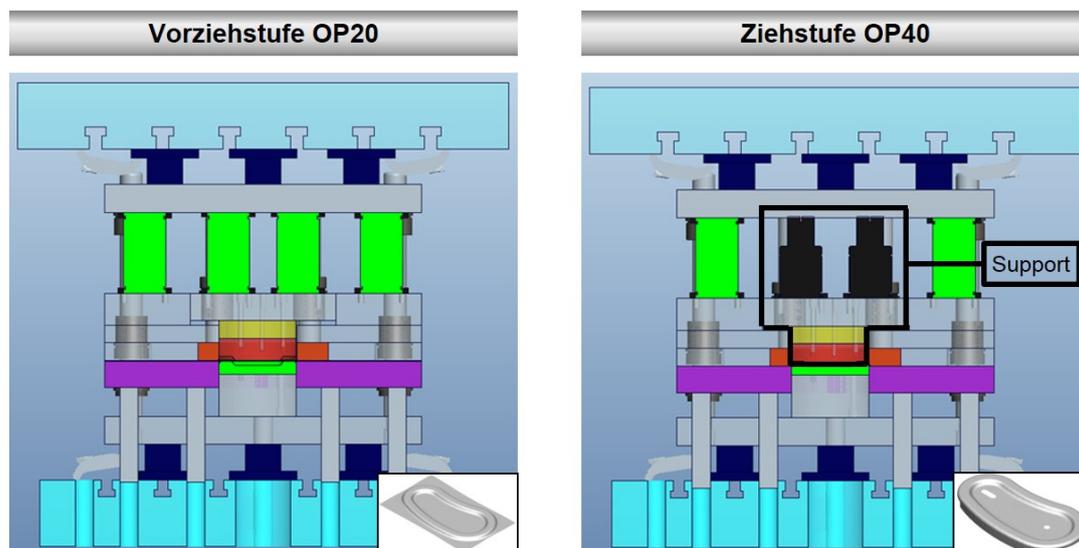


Abbildung 7.4: Funktionsbedingter Werkzeugumbau

Im Gegensatz zur Vorziehstufe OP20 wird in der Ziehstufe OP40 die Funktion eines matrizenseitigen Niederhalters benötigt (Support). Die Umsetzung wird erzielt, indem Gasdruckfedern anstelle der mittleren Distanzen eingebaut werden. Um die zweite Ziehstufe zu realisieren, muss kein zweites Werkzeug gebaut werden. Lediglich ein Umbau des Werkzeuges ist notwendig.

Die wesentlichen Bauteile sollen beispielhaft im Querschnitt des Werkzeugs aufgezeigt werden.

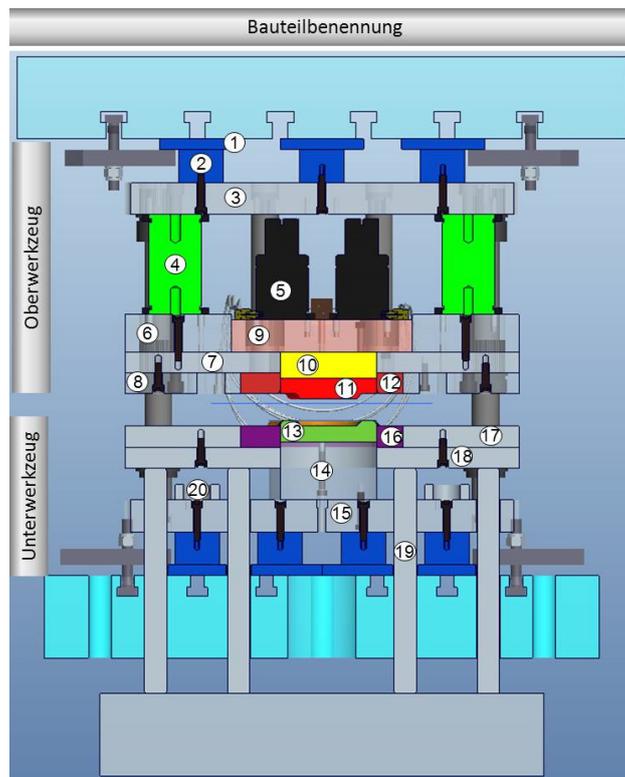


Abbildung 7.5: Zuordnung der Werkzeugkomponenten

Die Nummerierung der Werkzeugkomponenten aus der *Abbildung 7.5* werden in der *Abbildung 7.6* aufgegriffen, um die einzelnen Werkzeugelemente darzustellen und deren Funktion kurz zu erläutern (*Abbildung 7.5* und *Abbildung 7.6* sind vergrößert in Anhang 6: Werkzeugkomponenten vorhanden).

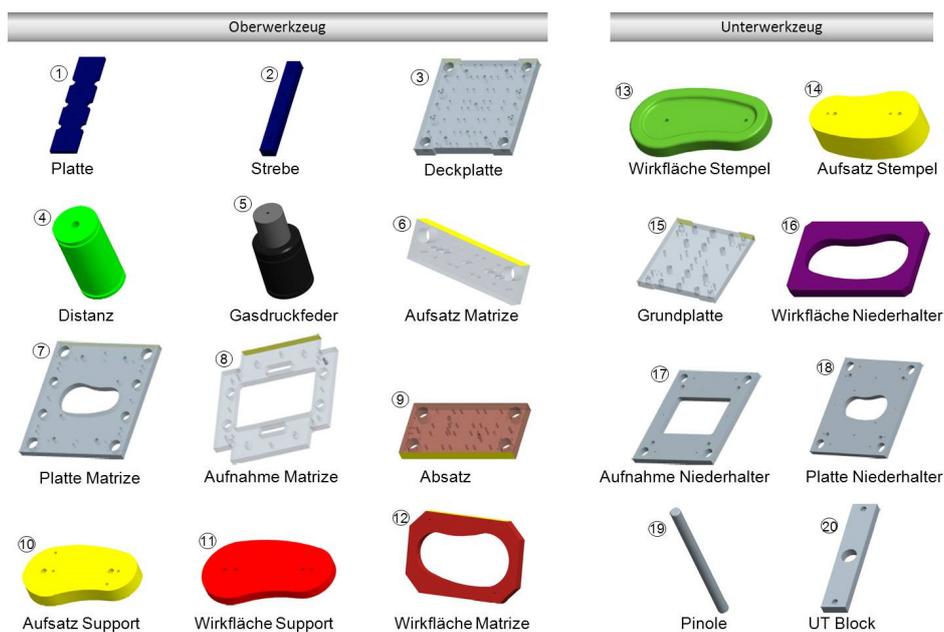


Abbildung 7.6: Übersicht Werkzeugkomponenten

Die Platten (1) und Streben (2) werden mit Hilfe von Schraubverbindungen gefügt. Diese dienen sowohl beim Ober- als auch beim Unterwerkzeug dazu, einen Übergang zur Grundplatte (15) und zur Deckplatte (3) zu schaffen, an denen das Werkzeug gespannt werden kann. Um Material und Kosten zu sparen, sind hier keine massive Platten konstruiert worden. Die Distanzen (4) dienen zur Kraftübertragung auf den Matrizenverbund (6; 7; 8; 12). Um ein flexibles Werkzeugkonzept gewährleisten zu können und den Austausch von Gasdruckfedern (5) und Distanzen (4) zu ermöglichen, erhalten beide Werkzeugkomponenten denselben Durchmesser in der Konstruktion. So können diese über identische Halter aufgenommen und gefügt werden. Der Support als matrizenseitiger Niederhalter besteht aus dem Absatz (9), dem Aufsatz Support (10) und der Wirkfläche Support (11). In der Vorziehstufe wird kein Support benötigt, sodass hier anstelle der Gasdruckfedern (5) feste Distanzen (4) verwendet werden. Somit kann eine Umformung der Innenkontur erfolgen. Deutlich ist die Segmentierung der gehärteten Wirkflächen zu erkennen. Dazu zählen im Oberwerkzeug Wirkfläche Support (11) und Wirkfläche Matrize (12).

Auch im Unterwerkzeug sind die gehärteten Werkzeugelemente aus dem Detailkonzept vorhanden (13; 16). Die Wirkfläche Stempel (13) sitzt dabei auf dem Aufsatz Stempel (14). Die Wirkfläche Niederhalter (16) ist hingegen mit der Aufnahme Niederhalter (17) und der Platte Niederhalter (18) gefügt. Die Kraftübertragung vom Ziehkissen auf den Niederhalterverbund wird durch die Pinolen (19) vorgenommen. Der UT Block (20) verhindert, dass der Niederhalterverbund unkontrolliert auf die Grundplatte (15) stößt.

7.2 Werkzeugbau

Nachdem die Werkzeugelemente gefertigt und die benötigten Normalien angeliefert sind, erfolgt der Zusammenbau (ZSB) des Werkzeuges. Abschließend wird das Werkzeug in die hydraulische Presse eingebaut und positioniert. Eine Übersicht dieser Arbeitsschritte ist in *Abbildung 7.7* vorhanden.

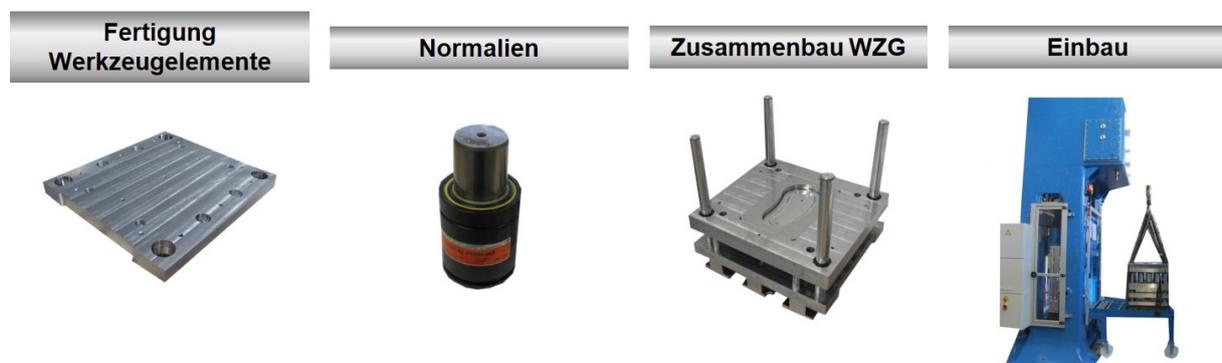


Abbildung 7.7: Übersicht Werkzeugbau

Folgend sollen die Einzelschritte detailliert betrachtet werden.

7.2.1 Fertigung der Werkzeugelemente

Um das Werkzeug zu bauen, müssen Fertigungszeichnungen für die *Interne Betriebswerkstatt in Wolfenbüttel* von den einzelnen CAD-Werkzeugelementen abgeleitet werden. Die Fertigung der Werkzeugelemente soll beispielhaft an dem Bauteil Distanz aufgezeigt werden.

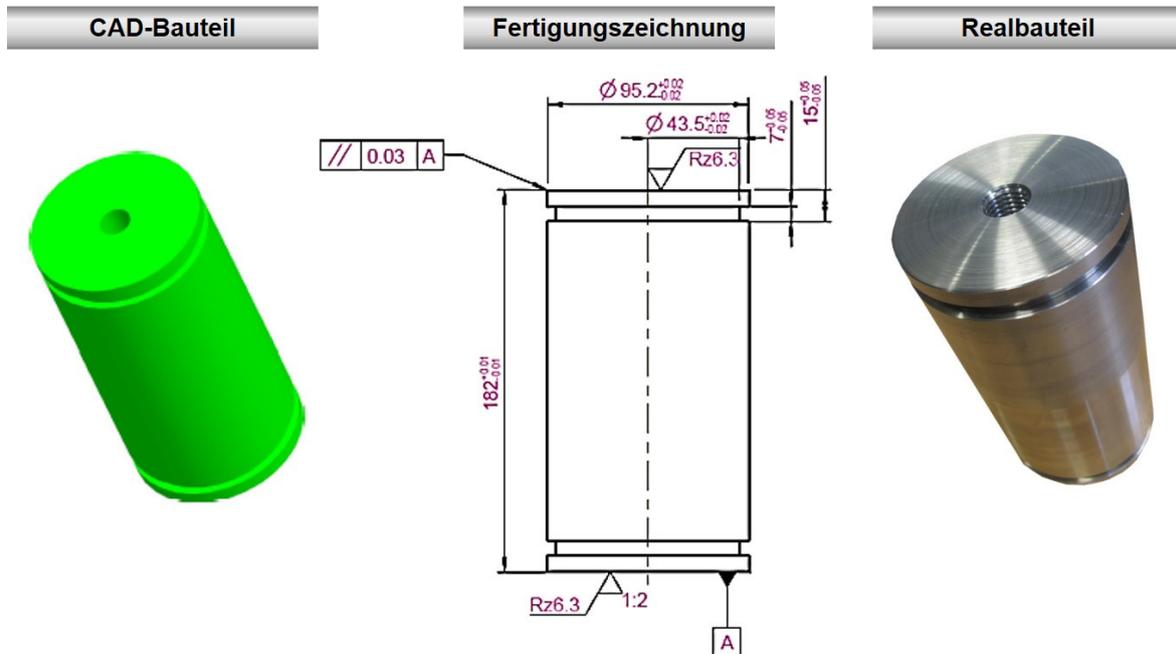


Abbildung 7.8: Ableitung der Fertigungszeichnungen

Aus der *Abbildung 7.8* ist erkennbar, dass aus dem CAD-Bauteil *Distanz* Fertigungszeichnungen in *Pro-ENGINEER* abgeleitet wurden, um diese der Werkstatt zu übergeben. Durch die Bearbeitung mittels Werkzeugmaschinen werden die Rohmaterialien zu den einzelnen Werkzeugelementen gefertigt. Dieser Zusammenhang wird in *Abbildung 7.9* visualisiert.



Abbildung 7.9: Fertigung der Werkzeugbauteile (Distanz)

Der Durchmesser der zu fertigenden Distanzen ergibt sich aus dem Durchmesser der Gasdruckfedern und beträgt demnach 95,2 mm. Das Rohmaterial weist einen Durchmesser von 100 mm auf, sodass Bearbeitungszugaben vorhanden sind. Als erster Arbeitsgang erfolgt das Absägen auf 185 mm. Auch hier sind Bearbeitungszugaben gewährleistet, da die Länge der Distanz 182 mm betragen soll (siehe Anhang 4).

Anschließend wird das Rohmaterial in die CNC-Drehmaschine eingespannt. Die CNC-Programmierung ergibt sich aus den Fertigungszeichnungen, die der Werkstatt übergeben werden. Nach dem Schrumpfvorgang mittels Plan- und Längsdrehen erfolgt der Schlichtvorgang, um die vorgegebenen Maße zu erreichen. Nach dem Umspannen der Distanz wird dieser Vorgang wiederholt. Zudem werden in die Distanz Bohrungen und Gewinde in der CNC-Maschine gefertigt. Nach dem Überprüfen der vorgegebenen Maße und Toleranzen ist dieser Fertigungsprozess abgeschlossen.

Da laut Fertigungszeichnung eine gemittelte Rauhtiefe von $R_z 6,3 \mu\text{m}$ erreicht werden soll, sind weitere Schleifvorgänge auf- Plan und Rundschleifmaschinen vorzunehmen. Die Fertigung der Distanzen gibt beispielhaft einen Überblick, wie aus der CAD-Konstruktion der Werkzeugelemente die realen Werkzeugkomponenten entstanden sind.

7.2.2 Normalien

Neben den gefertigten Werkzeugelementen sind auch Normalien für das Werkzeug auszuwählen und zu bestellen. *Abbildung 7.10* zeigt eine Übersicht der Komponenten, die für den Werkzeugbau notwendig sind.



Abbildung 7.10: Benennung der Normalien

Die Spannflansche (1) dienen zur Befestigung der Gasdruckfedern (2) und der Distanzen. Die Kontrollarmatur (3) visualisiert den Befüllungsdruck der Gasdruckfedern. Zum zentralen Befüllen der Federn wird eine Verteilerleiste (4) verwendet. An dieser werden mittels Messkupplungen (9) der Füllschlauch (5) und die einzelnen Messschläuche (8) angeschlossen. Durch die Schrauben (10) werden die Führungsbuchsen (6) und –säulen (7) an den einzelnen Werkzeugkomponenten gefügt.

7.2.3 Zusammenbau des Werkzeuges

Im anschließenden Arbeitsgang erfolgt der Zusammenbau des Werkzeuges. Eine Übersicht der durchzuführenden Arbeitsschritte ist in *Abbildung 7.11* aufgezeigt.



Abbildung 7.11: Zusammenbau Werkzeug

Die gefertigten Werkzeugelemente und Normalien werden zunächst zu Untergruppen gefügt. Die Untergruppe Stempel und die Untergruppe Niederhalter werden zum Unterwerkzeug montiert. Das Oberwerkzeug hingegen besteht aus dem Support und der Matrize. Der Umbau des Werkzeuges von der Vorziehstufe OP20 auf die Ziehstufe OP40 kann vorgenommen werden, ohne das Werkzeug aus der Presse nehmen zu müssen. Zunächst werden der Einbau und die Positionierung des Werkzeuges in der hydraulischen Presse aufgezeigt.

7.2.4 Einbau des Werkzeuges

Abbildung 7.12 zeigt die Vorgehensweise beim Einbau des Werkzeuges in die Presse und die anschließende Positionierung.

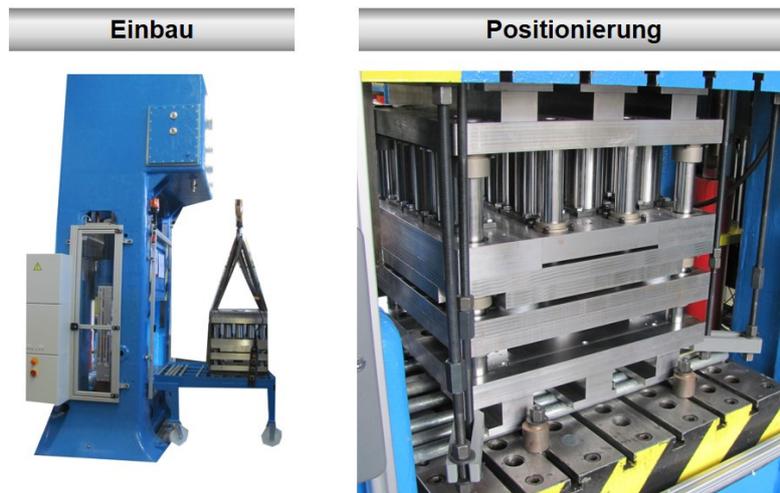


Abbildung 7.12: Einbau und Positionierung des Werkzeuges

Das Werkzeug wird mittels Hallenkran auf einen eigens konstruierten Werkzeugwechseltisch abgestellt. Dieser Tisch schließt mit dem Pressentisch bündig ab. So ist es möglich, das Werkzeug auf Stangen in die Presse zu schieben. Um das Werkzeug zu positionieren, wurden Anschläge auf dem unteren Pressentisch angebracht. Das gesamte Werkzeug wird anschließend mittels Spanner befestigt und vom Stößel angehoben, sodass die Stangen vom Werkzeugwechseltisch entfernt werden können. Der untere Pressentisch wird nun großzügig mit einem Schmiermittel benetzt, sodass das Werkzeug nachträglich exakt ausgerichtet werden kann. Dabei müssen die Pinolen, die auf dem Ziehkissen liegen und durch die Bohrungen des Pressentisches verlaufen, kontaktfrei durch die Bohrungen des Werkzeuges auf den Niederhalter treffen.

7.2.5 Umbau des Werkzeuges

Nachdem die Fertigung mit der Vorziehstufe OP20 abgeschlossen ist, werden die Bauteile zum Beschnitt OP30 gebracht. Während die Bauteile beim Beschnitt sind, kann parallel das Werkzeug zur Ziehstufe OP40 umgebaut werden. Dies ist notwendig, da in der Ziehstufe OP40 die Innenkontur nicht mehr wie in der OP20 umgeformt werden muss. Stattdessen muss dieser Bereich matrizenseitig gehalten werden. Demnach müssen die festen Distanzen ausgebaut und durch Gasdruckfedern ersetzt werden. Die Gegenüberstellung des Werkzeuges vor dem Umbau (Vorziehstufe OP20) und nach dem Umbau (Ziehstufe OP40) ist in *Abbildung 7.13* visualisiert.

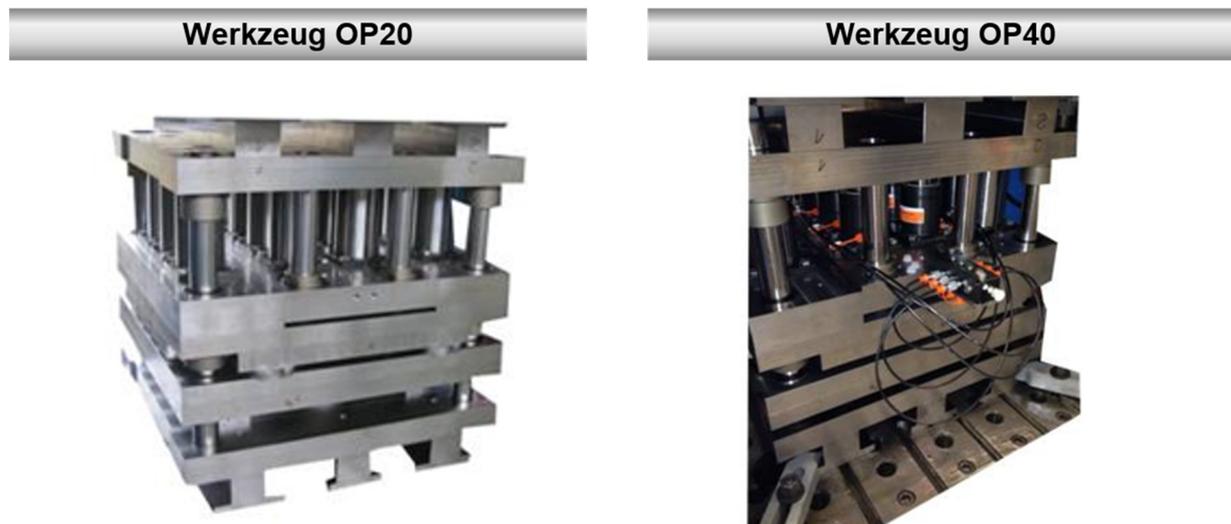


Abbildung 7.13: Umbau des Werkzeuges

Es wird ersichtlich, dass nach dem Umbau des Werkzeuges die Gasdruckfedern eingesetzt sind. Diese werden über eine pneumatische Steuereinheit mit dem notwendigen Druck versorgt. Bevor jedoch der Umbau des Werkzeuges erfolgt, wird ein Try-Out vorgenommen und die Versuchsreihe der Vorziehstufe nach einem Versuchsplan durchgeführt.

7.3 Try-Out

Durch den Try-Out soll sichergestellt werden, dass die Demonstratoren reierfrei hergestellt werden können. Das Ergebnis der tiefgezogenen Platine wird nach der Vorziehstufe OP20 analysiert. Nach einem erfolgreichen Try-Out kann die Versuchsreihe durchgeführt und ausgewertet werden.

7.3.1 Faltenreduzierung

Zunächst wird ein weicher Tiefziehstahl (DC01) mit dem Werkzeug der Vorziehstufe aus der OP20 umgeformt. Dabei werden die komplette Innenkontur und ein Anteil der Außenkontur hergestellt. Das Ergebnis ist im linken Bildausschnitt (*Abbildung 7.14*) ersichtlich. Anschließend erfolgt die Umformung des hochfesten Materials DP1000. Die Darstellung ist dem rechten Bildausschnitt zu entnehmen (*Abbildung 7.14*).

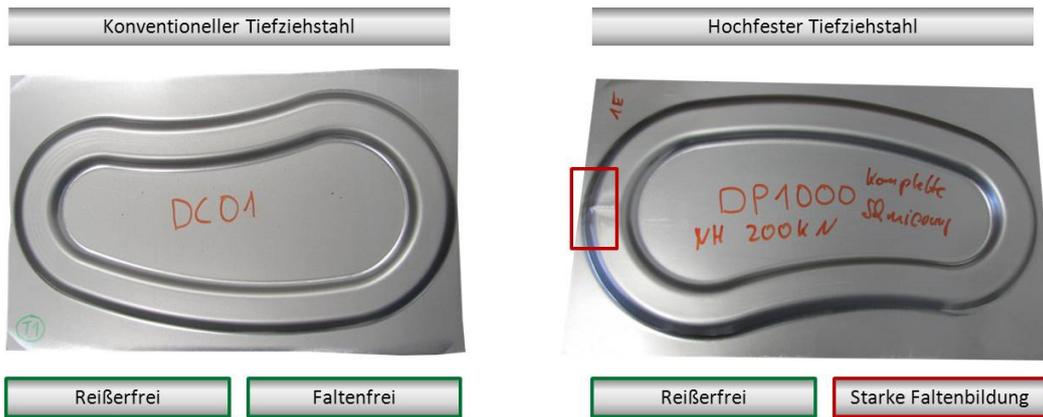


Abbildung 7.14: Try-Out-Vergleich mit konventionellem und hochfestem Stahl

Bei der Betrachtung des Umformergebnisses des konventionellen Stahls wird ersichtlich, dass eine reißer- und faltenfreie Herstellung gewährleistet werden kann. Bei der Umformung des hochfesten Tiefziehstahls werden nach der Analyse ebenfalls keine Reiße gefunden. Dieses Ergebnis stimmt mit der Umformsimulation überein. Im großen Radienbereich der Außenkontur kann eine starke Faltenbildung festgestellt werden. Dieses Verhalten wurde ebenfalls in der Herstellbarkeit der Umformsimulation prognostiziert. Um jedoch die Maßhaltigkeit der Bauteile bewerten zu können, müssen diese faltenfrei sein.

Aus diesem Grund wird eine Faltenreduzierung in einem iterativen Prozess vorgenommen. Die Vorgehensweise wird in *Abbildung 7.15* visualisiert.

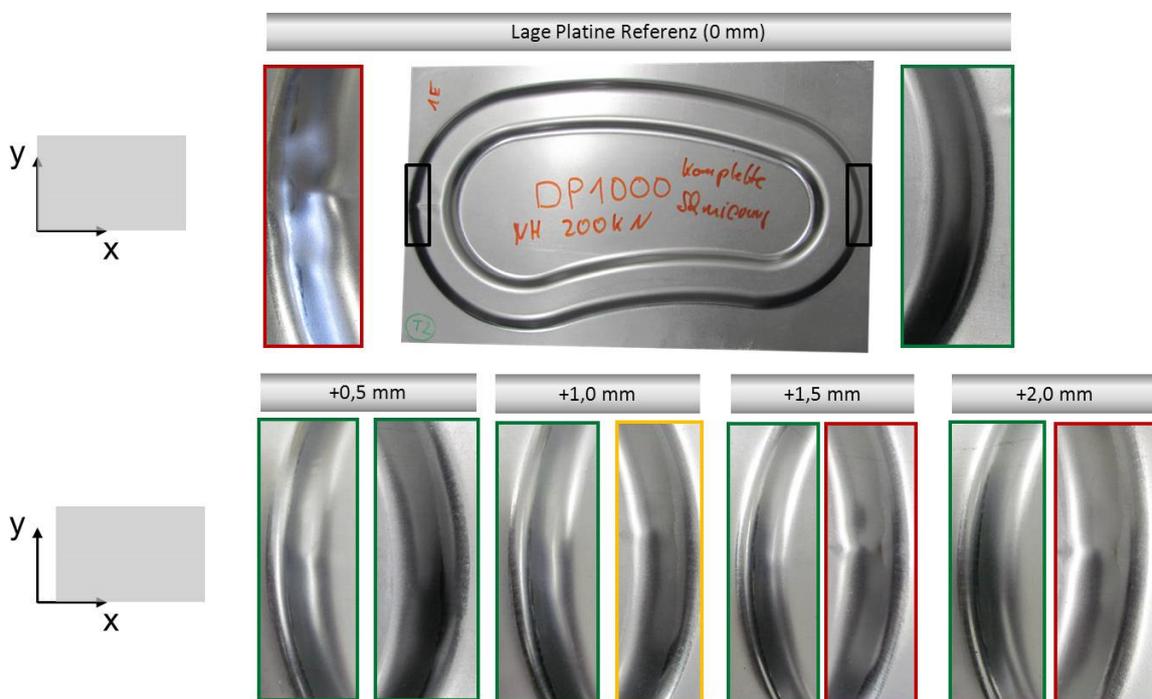


Abbildung 7.15: Faltenreduzierung durch Optimierung der Platinenlage

Hierbei erfolgt die Optimierung der Platinenlage. In der Ausgangsposition (Referenz 0 mm) kann im großen Radienbereich (links) die starke Faltenbildung festgestellt

werden, wohingegen der kleine Radienbereich (rechts) faltenfrei hergestellt werden kann. Verschiebt man die Einlegeposition der Platine 2 mm in x-Richtung, so erkennt man, dass der große Radienbereich nun faltenfrei produziert wird. Die Falten treten hingegen im kleinen Radienbereich auf. In diesem iterativen Prozess konnte mit einer Verschiebung von 1 mm in x-Richtung ein nahezu akzeptables Ergebnis geschaffen werden. Da jedoch die optimale Einlegeposition der Platine bei 0,5 mm in x-Richtung vorhanden ist, wird für die weiteren Versuche diese Position definiert.

7.3.2 Überprüfung Ziehtiefe Innenkontur

Nachdem durch das Try-Out eine reier- und faltenfreie Herstellung gewährleistet ist, werden die Bauteile nach der Vorziehstufe OP20 analysiert. Dabei wurde im Vergleich der Demonstratoren festgestellt, dass eine unterschiedliche Ziehtiefe der Innenkontur erreicht wird, wenn man einen konventionellen oder einen hochfesten Stahl verwendet. Dieser Sachverhalt wird in *Abbildung 7.16* dargestellt.

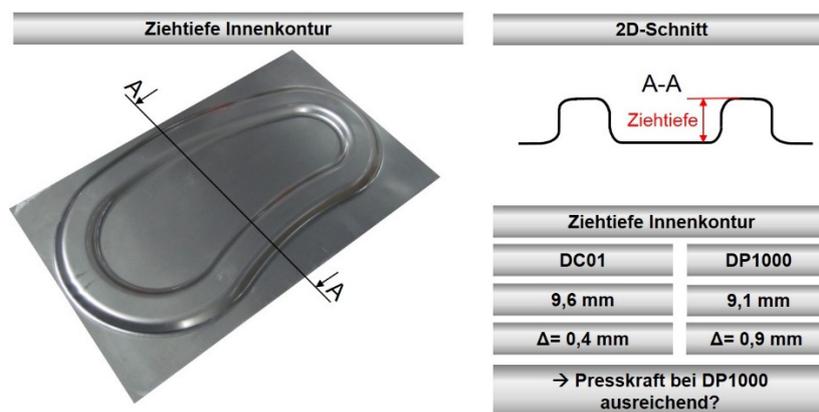


Abbildung 7.16: Ziehtiefe Innenkontur

Die Analyse zeigt, dass bei der Umformung mit DC01 eine Ziehtiefe von 9,6 mm erreicht wird. Dies entspricht einer Abweichung vom Soll-Maß von 0,4 mm. Nach der Umformung des hochfesten Materials wird hingegen eine Ziehtiefe der Innenkontur von 9,1 mm ermittelt. Daher ergibt sich eine Abweichung von 0,9 mm zur Mavorgabe. Auf Grund der Analyseergebnisse soll geprüft werden, ob als mögliche Ursache eine unzureichende Presskraft beim hochfesten Material vorhanden ist.

Um diese Fragestellung zu klären, wird die Umformung mit einem zusätzlichen Zinn-draht wiederholt. Die Darstellung der Vorgehensweise und des Resultates erfolgt in *Abbildung 7.17*.



Abbildung 7.17: Zinndrahtumformung

Zur Versuchsvorbereitung werden vier Lötzinndrähte mit einem Durchmesser von 1 mm und einer Länge von 10 mm zugeschnitten. Diese werden vor dem Umformvorgang oberhalb und unterhalb der Platine auf dem Werkzeug angeordnet. Beim Umformvorgang der Platine zum Bauteil nach der Vorziehstufe wird ebenfalls der Zinndraht umgeformt. Durch das Vermessen der Dicke des umgeformten Zinndrahtes kann man einen Rückschluss auf die Presskraft ziehen, da bei der Umformung von festen Materialien eine Volumenkonstanz vorhanden ist. Die komplette Presskraft ist vorhanden, wenn die untere und die obere Probe nach der Umformung die gleiche Dicke aufweisen, da dann die Gegenkraft der Presskraft entspricht. Die Auswertung der Dickenmessungen des Drahtes nach der Umformung zeigen, dass für beide Positionen gleiche Dicken gemessen werden, sodass eine ausreichende Presskraft vorhanden ist. Bei der Umformung des DC01 tritt eine größere Dicke des gestauchten Zinndrahtes auf, da das Material des Demonstrators eine Eindruckstelle zeigt und somit nachgibt.

Da mit diesem Versuch gezeigt wurde, dass die Presskraft der hydraulischen Umformmaschine ausreichend ist, muss der Grund für die Differenz der Innenkonturhöhe ein anderer sein. Da in der Simulation eine rückfederungsbedingte Formabweichung auf der Innenkonturfläche festgestellt wurde, wird dieser Sachverhalt als zweite mögliche Ursache geprüft.

Dazu wird das Bauteil nach der Umformung durch ein optisches System gescannt und den CAD-Daten vor der Rückfederung gegenübergestellt. Das Ergebnis ist in *Abbildung 7.18* ersichtlich.

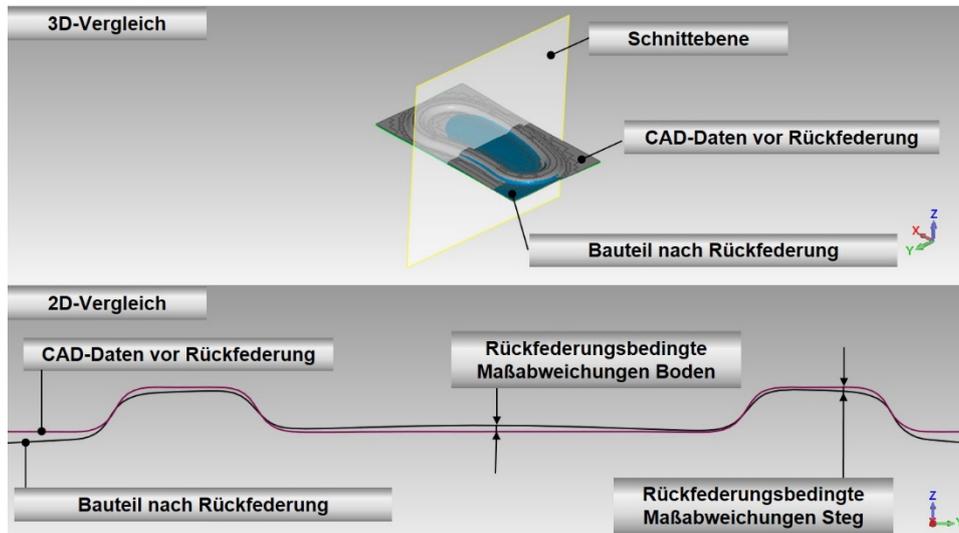


Abbildung 7.18: Rückfederungsbedingte Maßabweichungen

Hierbei wird aus dem Mittelschnitt des 2D-Vergleiches ersichtlich, dass im Bodenbereich der Innenkontur rückfederungsbedingte Maß- und Formabweichungen auftreten. Demnach kann geschlussfolgert werden, dass die festgestellte Differenz aus der Innenkonturhöhe nicht aufgrund mangelnder Presskraft verursacht wird, sondern rückfederungsbedingt vorhanden ist. Diese Rückfederung fällt beim hochfesten Material stärker als beim konventionellen Material aus. Nachdem der Try-Out abgeschlossen ist, und die Ursache der Differenzen der Innenkonturhöhe erklärt ist, kann die Versuchsreihe durchgeführt werden.

7.4 Versuchsreihe

In der Versuchsreihe erfolgt die Herstellung der realen Demonstratoren mit allen notwendigen Operationen. Hierbei werden ausgewählte Parameter in der Vorziehstufe variiert. Außerdem erfolgt die Beschreibung des Beschnitts OP30 und der Ziehstufe OP40. Abschließend wird ein Vergleich der Methode in der Realität und in der Simulation vorgenommen.

7.4.1 Vorziehstufe OP20

In der Vorziehstufe OP20 wird die Platine umgeformt, sodass die Innenkontur komplett gezogen und die Außenkontur angestellt wird. In *Abbildung 7.19* wird die Ausgangsplatine vor der Operation und das Umformergebnis nach der Vorziehstufe beispielhaft am geschlossenen Demonstrator dargestellt.



Abbildung 7.19: Geschlossener Demonstrator vor und nach der Vorziehstufe OP 20

Nachdem der Try-Out erfolgreich abgeschlossen ist und das Bauteil fehlerfrei hergestellt werden kann, erfolgt die Ausarbeitung des Versuchsplans für die Variation der Vorziehstufe. Die ersten drei Versuche (V1-V3) dienen der Demonstration. Mit Hilfe dieser Bauteile sollen die einzelnen Operationen dargestellt werden. Somit wird das Versuchsteil V1 nach der Vorziehstufe (OP20) nicht weiter bearbeitet. Demnach steht für weitere Anschauungs- und Untersuchungszwecke das Vorziehstufenbauteil weiterhin zur Verfügung. V2 wird nach dem Beschnitt (OP30) nicht weiter bearbeitet, sodass auch hier ein Bauteil nach in diesem Zustand für weitere Demonstrations- und Analyse Zwecke zur Verfügung steht. Der Demonstrator aus V3 komplementiert die Darstellung der Methode, indem das Bauteil nach der zweiten Ziehstufe (OP40) nicht zum Vermessen genutzt wird und ausschließlich für Demonstrationszwecke erhalten bleibt. In *Tabelle 7-1* sind V1-V3 unter der Kategorie *Demo* dargestellt.

Tabelle 7-1: Versuchsreihe Demonstrator geschlossen

	Versuch	Demonstrator	NH-Kraft [kN]	UT [mm]	Gutteil
Demo	V1	geschl.	200	0	
	V2	geschl.	200	0	
	V3	geschl.	200	0	
Referenz	V4	geschl.	200	0	
	V5	geschl.	200	0	
	V6	geschl.	200	0	
	V7	geschl.	200	0	
	V8	geschl.	200	0	
Variation Niederhalterkraft	V9	geschl.	100	0	
	V10	geschl.	100	0	
	V11	geschl.	100	0	
	V12	geschl.	300	0	
	V13	geschl.	300	0	
	V14	geschl.	300	0	
	V15	geschl.	400	0	
	V16	geschl.	400	0	

Variation Schließabstand	V17	geschl.	400	0	
	V18	geschl.	400	0,5	
	V19	geschl.	400	0,5	
	V20	geschl.	400	0,5	
	V21	geschl.	400	1,0	
	V22	geschl.	400	1,0	
	V23	geschl.	400	1,0	
	V24	geschl.	400	1,5	
	V25	geschl.	400	1,5	
	V26	geschl.	400	1,5	

Weiterhin ist ersichtlich, dass mit der Niederhalterkraft und dem unteren Totpunkt (UT) zwei prozesstechnische Parameter variiert werden. Dieser pragmatische Ansatz wird gewählt, da bei der Variation geometrischer Parameter wie Radien oder Grad der Vorziehstufe nach jedem Versuch das Werkzeug umgebaut werden müsste. Ferner wird aus der Spaltenbezeichnung ersichtlich, ob der Demonstrator als Gutteil bewertet wird. Dies ist notwendig, da die Auswertung der Rückfederung lediglich bei reißenfreien Bauteilen vorgenommen werden kann.

Unter der Kategorie Referenz (V4-V8) werden fünf Bauteile mit denselben Parametern (NH-Kraft = 200kN / UT=0) vorgezogen. Hierbei soll neben der Versuchsstreuung der Vergleich zur Simulation vorgenommen werden, indem die Zargenabstände gegenübergestellt werden.

In der folgenden Kategorie wird die Niederhalterkraft variiert. Da die Referenz mit 200 kN definiert ist, werden mit 100 kN kleinere und mit 300 kN bis 400 kN größere Niederhalterkräfte in der Vorziehstufe realisiert. In der Simulation wurde der Bereich zwischen 100 kN und 300 kN untersucht. Die Variation der Niederhalterkraft ist von Interesse, da aus der Simulation ein Gestaltungshinweis zur Reduzierung der Rückfederung abgeleitet werden konnte. Im realen Versuchsplan wird der betrachtete Bereich erweitert (400 kN), um diesen Gestaltungshinweis in einem größeren Anwendungsbereich zu bestätigen. Jede Niederhalterkraft wird dreifach geprüft, sodass auch hier die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse analysiert werden kann.

Ein weiterer prozesstechnischer Parameter, der in dieser Untersuchung validiert werden soll, ist der Schließabstand. Auch hier wurde ebenfalls aus der Simulation ein Gestaltungshinweis erarbeitet. In der FEM-Berechnung wurde der Schließabstand zwischen 0 mm und 0,4 mm variiert. Im realen Versuch wird im Gegensatz zur Simulation (UT=0,15 mm) die Referenz bei UT=0 mm definiert. Die praktische Umsetzbarkeit der realen Schrittweite ist im Vergleich zur Simulation begrenzt. Im realen Versuchsplan wird zudem ein größerer Variationsbereich (0 mm bis 2 mm) definiert, da somit die Umsetzbarkeit durch die Versuchspresse (Vergleich 4.2 *Hydraulische Presse*) erreicht wird. Die 0,5 mm als Variationsschritt anstatt 0,1 mm werden als

praktikabel angesehen, sodass die Ergebnisse der realen Versuche verwertbar werden. Diese Versuche werden pro Parameteränderung ebenfalls in dreifacher Ausführung vorgenommen.

Der Versuchsplan des offenen Demonstrator ist analog des geschlossenen aufgebaut und kann dem *Anhang 5: Versuchsplan offener Demonstrator* entnommen werden.

Die Platinen werden nach dem Versuchsplan in der OP20 umgeformt, sodass die offenen und geschlossenen Demonstratoren die Innenkontur erhalten. Ferner wird die Außenkontur angestellt.

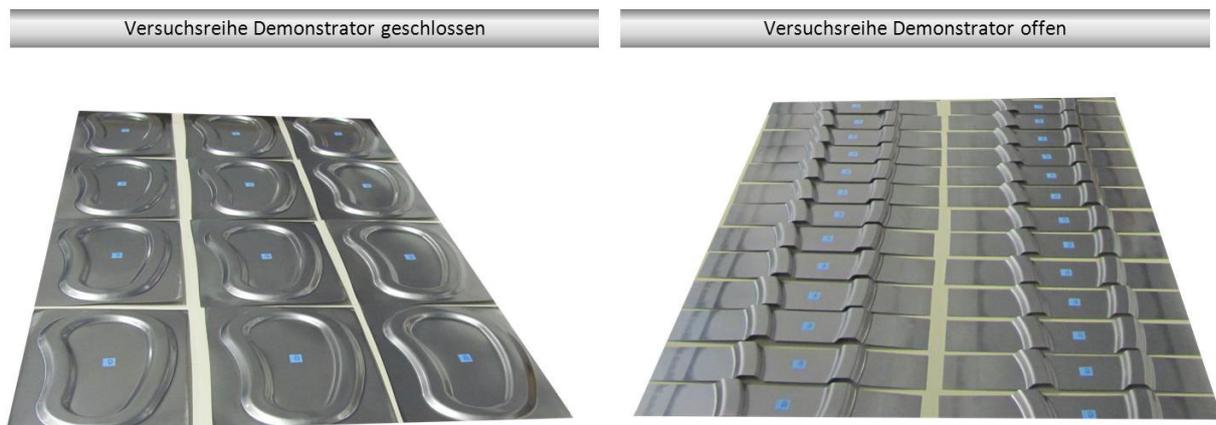


Abbildung 7.20: Versuchsreihe Demonstrator geschlossen und offen

Das Ergebnis der umgeformten Versuchsreihe ist in der Abbildung 7.20 dargestellt. Anschließend wird der Beschnitt der Bauteile vorgenommen.

7.4.2 Beschnitt OP30

In der Beschnittoperation OP30 werden ein Rund- und ein Langloch in die Innenkontur des geschlossenen Demonstrators eingebracht. Diese werden analog der Verwendung in der Industrie als RPS-Aufnahmen verwendet. Dies ist für das Vermessen der Bauteile notwendig, um die Position eindeutig zu referenzieren.

Zur Durchführung dieser Beschnittoperation wird die *Firma ATBS* beauftragt, die auf Laserschneidtechnik spezialisiert ist. Um die Bauteileposition während des Beschnittvorgangs zu gewährleisten, wird in eine Stahlplatte die Außenkontur des Demonstrators gelasert (*Abbildung 7.21 rot dargestellt*). In diese Aufnahmekontur können die Demonstratoren wiederholgenau eingelegt werden (*Abbildung 7.21 grün dargestellt*), sodass die Bauteile denselben Beschnitt erhalten. Die Positionierung erfolgt über die Außenkontur des offenen Demonstrators (*Abbildung 7.21 blau dargestellt*).

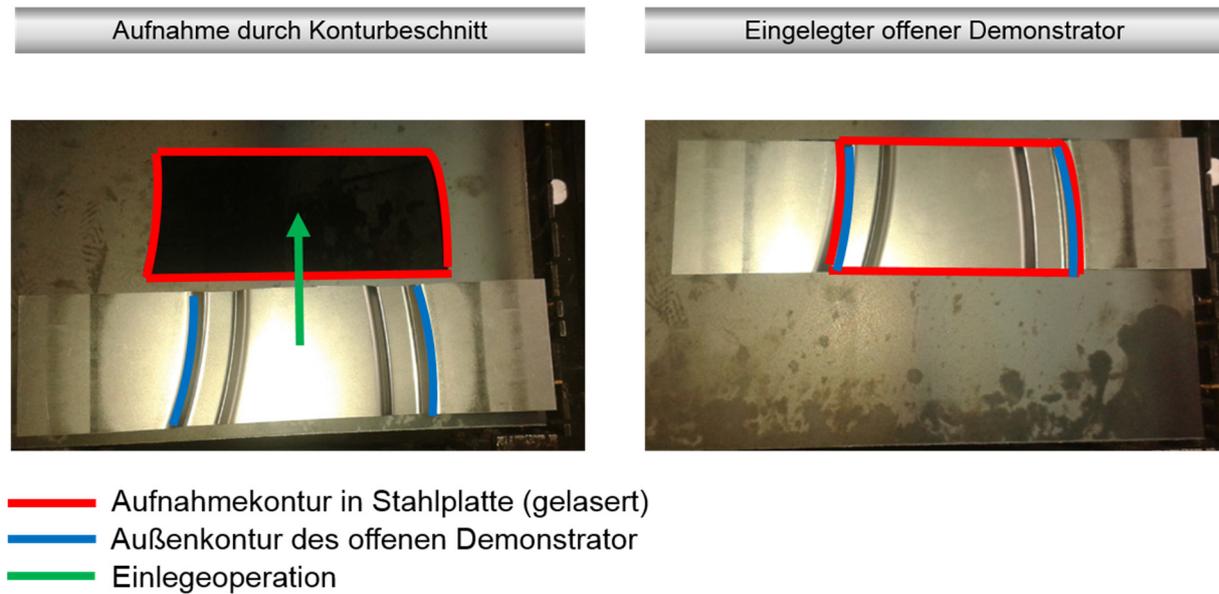


Abbildung 7.21: Aufnahme durch Beschnittkontur

Für den geschlossenen Demonstrator wird ebenfalls die Außenkontur in die Stahlplatte gelasert, sodass das Bauteil wiederholgenau eingelegt werden kann. Das Ergebnis des Beschnitts am geschlossenen Demonstrator ist in *Abbildung 7.22* ersichtlich.

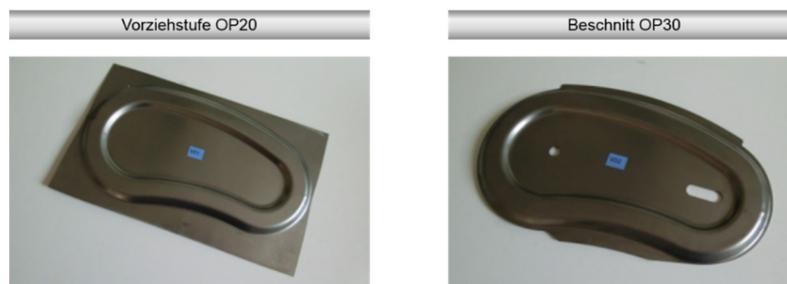


Abbildung 7.22: Geschlossener Demonstrator vor und nach Beschnitt OP30

Hier sind deutlich das Rund- und das Langloch zu erkennen. Außerdem wird die Kontur in den Radienbereichen komplett beschnitten, sodass lediglich ein mittlerer Zargenbereich übrig bleibt.

7.4.3 Ziehstufe OP40

In der letzten realen Operation (Ziehstufe OP40) wird die Zarge angestellt. Hierzu ist ein Umbau des Werkzeuges notwendig. Dieser Sachverhalt wird in *7.2.5 Umbau des Werkzeuges* erläutert. In der *Abbildung 7.23* ist das Umformergebnis nach der zweiten Ziehstufe dargestellt.



Abbildung 7.23: Geschlossener Demonstrator vor und nach Ziehstufe OP40

In der OP40 ist es ebenfalls notwendig, dass die Bauteile reierfrei hergestellt werden, damit das Vermessen der Demonstratoren durchgeführt und die Messergebnisse verwendet werden können. Nachdem die Durchführung der Versuchsreihe abgeschlossen ist, kann festgestellt werden, dass alle Bauteile ohne Umformfehler hergestellt werden können.

7.4.4 Methodenvergleich Simulation und Realität

Der Vergleich zwischen den Methoden in der Simulation und in der Realität ist in *Abbildung 7.24* dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass in der Simulation eine zusätzliche OP definiert ist.

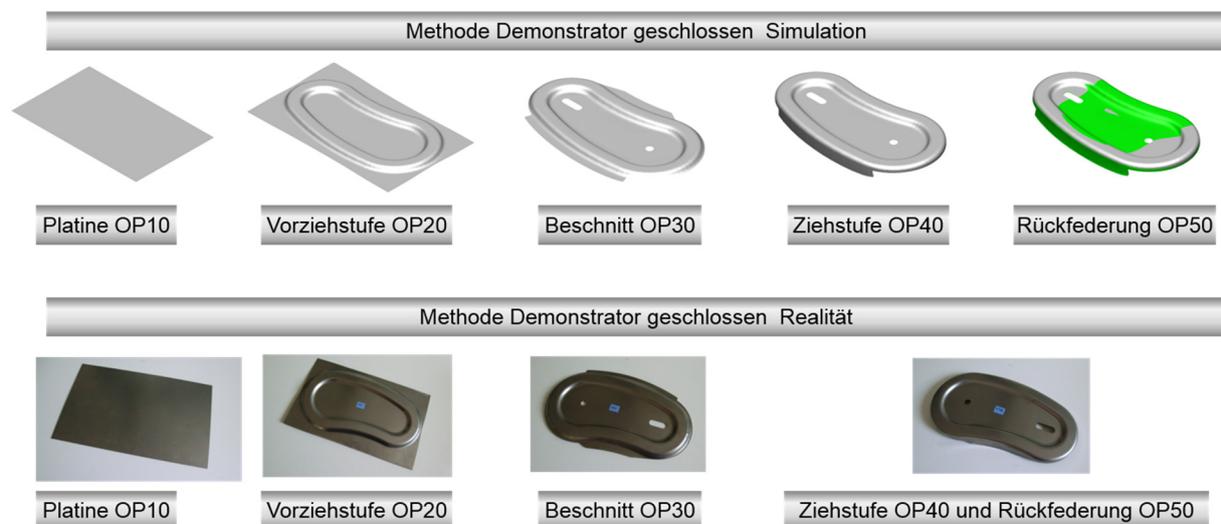


Abbildung 7.24: Vergleich der Methode aus Simulation und Realität

In der FEM-Berechnung für die Rückfederung wird eine eigene OP definiert. In der Realität hingegen findet die Entlastung des Demonstrators direkt nach der Bauteilentnahme statt, sodass die Zieh- und Rckfederungsoperationen nicht getrennt voneinander betrachtet werden können.

Da die Beschnitt- und Ziehoperationen erfolgreich durchgeführt sind und die Bauteile keine Umformfehler aufweisen, kann die Vermessung des Zargenabstandes erfolgen, sodass die Simulationsergebnisse validiert werden können.

7.5 Auswertung reale Versuche

Nachdem die Demonstratoren durch die einzelnen Operationen hergestellt sind, kann das Vermessen der Bauteile vorgenommen werden. Hierzu wird der mittlere Zargenabstand ermittelt, um die Simulation verifizieren zu können. Außerdem soll hiermit der Einfluss der prozesstechnischen Parameter Niederhalterkraft und Schließabstand beispielhaft aufgezeigt werden.

Folgend werden die notwendigen Versuchsvorbereitungen aufgezeigt, um das Bauteil in einer Vorrichtung aufzunehmen. Ferner muss die Plausibilisierung der Wiederholbarkeit der Versuche im Koordinatenmessgerät (KMG) erfolgen. Abschließend werden die Zargenabstände als Messergebnis dargestellt. Um die Ergebnisse zu interpretieren, erfolgt ein Vergleich der Simulationsdaten mit den realen Messergebnissen.

7.5.1 Versuchsvorbereitung

Zur Bestimmung der Zargenabstände wird das Koordinatenmessgerät *Zeiss Contura G2* ausgewählt (*Abbildung 7.25*).



Abbildung 7.25: KMG (Zeiss Contura G2)

Hierbei handelt es sich um ein Koordinatenmessgerät mit Portalbauweise. Durch diesen stabilen Aufbau kann eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden. Ferner wird eine nahezu reibungsfreie Führung durch die Luftlagerung der Maschine gewährleistet.

Zunächst wird die Maschine mit einem Kugeltaster für den Kalibriervorgang ausgestattet. Um die Genauigkeit des KMG zu prüfen, fährt die Maschine ein standardisiertes Einmessprogramm mit taktilen Messungen des Tastsystems an einer hochgenauen Kugelmesskugel ab. Hierbei wird eine Standardabweichung von $0,1 \mu\text{m}$ ermittelt, sodass die erforderliche Genauigkeit bestätigt wird. Anschließend erfolgt der Wechsel vom Kugeltaster auf einen Zylindertaster (sichtbar in *Abbildung 7.26*), da somit das optimale Antasten in horizontaler Richtung des Bleches gewährleistet wird.

Um die Bauteile wiederholgenau vermessen zu können, ist der Aufbau einer Aufnahmevorrichtung (*Abbildung 7.26*) notwendig.

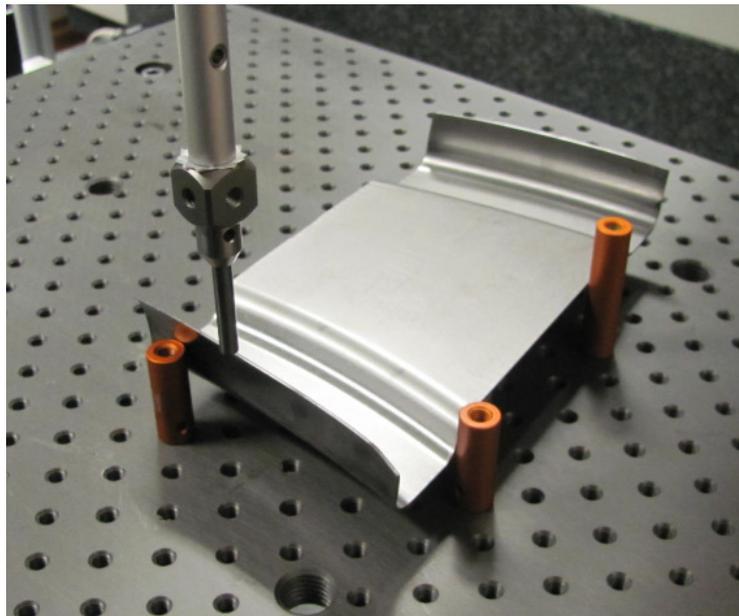


Abbildung 7.26: Aufnahmevorrichtung Demonstrator offen

Um diese Aufnahmevorrichtung zu realisieren, wurde ein flexibles Spannsystem genutzt. Die Grundeinheit bildet eine Lochplatte mit Gewindebohrungen, die mit dem Granittisch verschraubt werden kann und somit fixiert ist. Auf dieser Platte können dann Stiftzylinder verschraubt werden, sodass ein wiederholgenaues Einlegen der Demonstratoren gewährleistet werden kann. Die Überprüfung erfolgt in *Kapitel 7.5.2*. Drei Elemente werden unter dem Bauteil angeordnet, um die reproduzierbare Höhenlage zu wahren. Drei weitere Zylinderelemente werden am Bauteilrand positioniert, um eine eindeutige horizontale Lage zu schaffen.



Abbildung 7.27: Aufnahmevorrichtung Demonstrator geschlossen

Beim geschlossenen Demonstrator wurden die Positionen der Stiftzylinder angepasst und ein weiteres Spannelement verwendet, um die wiederholgenaue Positionierung gewährleisten zu können. Nachdem das Rund- und das Langloch eingemessen wurden, konnte das Vermessen der Bauteile durchgeführt werden. Zunächst soll jedoch die Wiederholbarkeit der Vermessung geprüft werden.

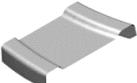
7.5.2 Plausibilisierung Wiederholbarkeit

Durch das Nutzen der Aufnahmevorrichtung soll ein wiederholgenaues Messen möglich sein. Die Überprüfung erfolgt, indem ein offenes und ein geschlossenes Bauteil jeweils zweimal vermessen werden. Hierbei wird der Demonstrator nicht aus der Vorrichtung genommen. Sollten hier nur minimale Messunterschiede auftreten, werden das KMG und die Vorrichtung als geeignet bewertet.

In einer zweiten Plausibilisierung wird der Einfluss der Wiederholgenauigkeit geprüft. Da dieser erwartungsgemäß größer ausfällt, werden fünf Vergleichsmessungen vorgenommen. Hierbei werden die Demonstratoren zwischen den Messungen aus der Vorrichtung genommen und wieder eingelegt.

In der *Tabelle 7-2* ist die Wiederholgenauigkeit ohne Bauteilentnahme am offenen und geschlossenen Demonstrator dargestellt.

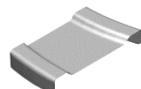
Tabelle 7-2: Wiederholgenauigkeit ohne Bauteilentnahme

Kontur	Zargenabstand 1 [mm]	Zargenabstand 2 [mm]	Differenz [mm]	Differenz [µm]
	183,0227	183,0232	0,0005	0,5
	185,3757	185,3662	0,0095	9,5

Der Vergleich der Zargenabstände zeigt auf, dass das KMG als Messmaschine und die Verwendung der Aufnahmevorrichtung geeignet sind. Beim geschlossenen Demonstrator ist lediglich eine Differenz von 0,5 μm vorhanden. Beim offenen Demonstrator ist eine größere Differenz der gemessenen Zargenabstände von 9,5 μm aufgetreten. Diese Werte bestätigen die notwendige Genauigkeit, sodass das KMG für die Vergleichsmessungen als geeignet bewertet wird.

Als nächster Schritt werden fünf Vergleichsmessungen des mittleren Zargenabstandes durchgeführt, wobei das Bauteil zwischen den Messungen aus der Vorrichtung entnommen und wieder eingelegt wird. Die Messergebnisse sind in *Tabelle 7-3* dargestellt.

Tabelle 7-3: Wiederholgenauigkeit mit Bauteilentnahme

Kontur		
Zargenabstand 1 [mm]	183,0239	185,4104
Zargenabstand 2 [mm]	183,0261	185,3539
Zargenabstand 3 [mm]	183,0265	185,3695
Zargenabstand 4 [mm]	183,0239	185,4506
Zargenabstand 5 [mm]	183,0274	185,3992
Minimum [mm]	183,0239	185,3539
Maximum [mm]	183,0274	185,4506
Mittelwert [mm]	183,02556	185,39672
Differenz [mm]	0,0035	0,0967
Differenz [μm]	3,5	96,7
Standardabweichung [mm]	0,001586821	0,03765245

Werden zwischen den Messversuchen die Bauteile aus der Vorrichtung entnommen und eingelegt, sind die gemessenen Differenzen zwischen den Einzelergebnissen erwartungsgemäß größer. Bei dem geschlossenen Demonstrator wird eine sehr geringe Messdifferenz von 3,5 μm beobachtet. Die Differenz bei dem offenen Bauteil erscheint mit 96,7 μm relativ hoch. Betrachtet man hingegen die Standardabweichung von 37,65 μm , kann von einer akzeptablen Messgenauigkeit ausgegangen werden. Das bedeutet, dass die Messwerte im Durchschnitt ca. 38 μm vom Mittelwert abweichen werden.

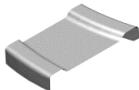
Abschließend kann geschlussfolgert werden, dass durch das zusätzliche Spannelement die Wiederholgenauigkeit beim Messen des geschlossenen Demonstrators optimiert ist. Die Messergebnisse der geschlossenen Kontur werden demnach mit einer höheren Vertrauenswürdigkeit als die der offenen Kontur bewertet.

7.5.3 Ergebnisse Referenzversuche

Neben dem Einfluss der Wiederholgenauigkeit durch KMG und Aufnahmevorrichtung sind die erzielbaren Fertigungstoleranzen von Bedeutung. Um diese zu quantifizieren, wurden je fünf Bauteile des offenen und des geschlossenen Demonstrators mit gleichen Fertigungsparametern gezogen. Die Zargenabstände als Auswertungsergebnis der Referenzversuche sind in *Tabelle 7-4* visualisiert.

Es ist zu beachten, dass das Soll-Maß des mittleren Zargenabstandes ohne Rückfederungseffekte bei 171,52 mm liegt. Die Rückfederungssimulation berechnet hingegen ein Ist-Maß nach der Entlastung des Bauteils von 177,5 mm.

Tabelle 7-4: Zargenabstände der Referenzversuche

Versuch	Demonstrator	Zargenabstand [mm]	Differenz [mm]	Mittelwert [mm]	Standardabweichung [mm]
V4		183,0217	0,2182	183,0489	0,085439686
V5		183,1131			
V6		182,9239			
V7		183,1421			
V8		183,0437			
V30		186,3076	0,6345	186,5049	0,25759539
V31		186,3758			
V32		186,3703			
V33		186,5287			
V34		186,9421			

Bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse wird ersichtlich, dass in den realen Versuchen größere Zargenabstände vorhanden sind, als diese in der Simulation vorausgesagt werden. Da alle Versuche mit identischen Versuchsparametern gezogen werden, kann zudem ein Rückschluss auf die Fertigungstoleranzen des Zargenabstandes getroffen werden. Betrachtet man den geschlossenen Demonstrator, so weichen die mittleren Zargenabstände der fünf Vergleichsbauteile lediglich um ca. 0,22 mm ab. Beim offenen Bauteil sind die Differenzen der Zargenabstände mit 0,63 mm größer.

7.5.4 Ergebnisse Niederhaltervariation

Um den realen Einfluss der Niederhalterkraft in der Vorziehstufe auf das Rückfederungsergebnis nach der zweiten Ziehstufe zu ermitteln, wurden die Haltekräfte zwischen 100 kN und 400 kN variiert. Die Herstellung einer Geometrie zur jeweiligen Niederhalterkraft wird in dreifacher Ausführung vorgenommen, um die Streuung der gemessenen Zargenabstände zu analysieren. Da die Ausprägung der Rückfederung von vielen Faktoren beeinflusst wird (siehe: *2.4.2 Rückfederungsreduzierung*) sind

unterschiedliche Zargenabstände zu erwarten. Die Messergebnisse sind tabellarisch in *Abbildung 7.28* dargestellt und in einem Diagramm aufbereitet.

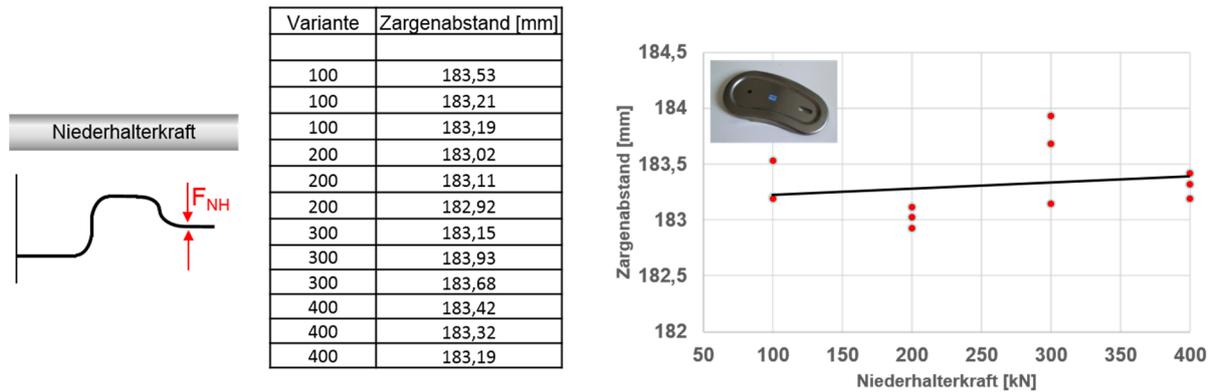


Abbildung 7.28: Reale Zargenabstände des geschlossenen Demonstrators (Variation NH-Kraft)

Aus dem Diagramm ist die Streuung der Zargenabstände deutlich ersichtlich. Besonders bei einer Niederhalterkraft von 300 kN schwanken die Messergebnisse um 0,78 mm. Bei der Niederhalterkraft von 200 kN und 400 kN werden hingegen sehr stabile Messergebnisse ermittelt. Durch die Integration einer linearen Trendlinie kann eine Beurteilung des Einflusses der Niederhalterkraft in der Vorziehstufe auf das Rückfederungsergebnis erfolgen. Hierbei wird ersichtlich, dass mit steigender Haltekraft in der Vorziehstufe die Rückfederung nach der gesamten Umformung ansteigt.

Betrachtet man die Ergebnisse des offenen Demonstrators hinsichtlich der realen Zargenabstände, so kann man konträre Gestaltungshinweise ableiten (*Abbildung 7.29*).

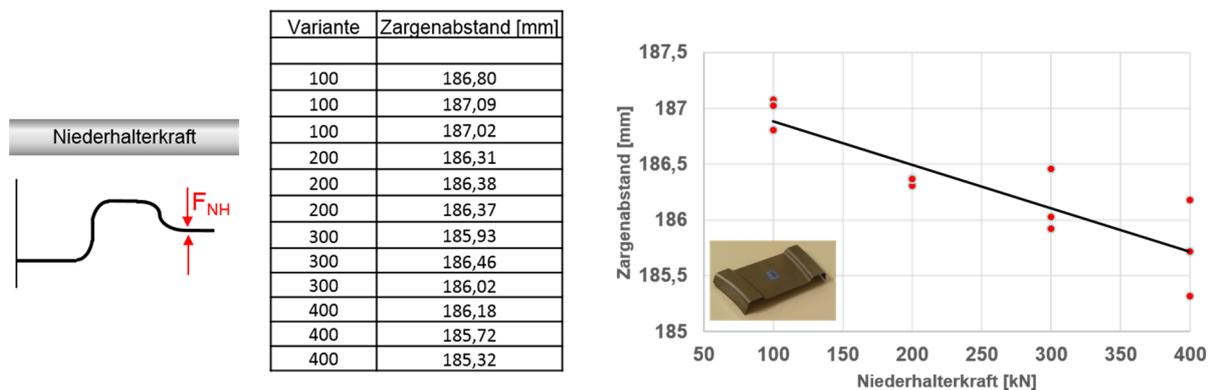


Abbildung 7.29: Reale Zargenabstände des offenen Demonstrators (Variation NH-Kraft)

Zunächst erkennt man, dass die gesamte Versuchsreihe höhere Zargenabstände beim offenen als beim geschlossenen Demonstrator aufweist. Die Messergebnisse zeigen einen abnehmenden Zargenabstand mit zunehmender Erhöhung der Niederhalterkraft in der Vorziehstufe. Diese Vermutung wird durch die Integration der linearen Trendlinie bestätigt. Somit ergeben sich für die Gestaltung der prozesstechnischen Parameter der Niederhalterkraft entgegengesetzte Richtlinien. Der rückfede-

rungsreduzierende Einfluss wird beim offenen Demonstrator größer bewertet, da zum einen eine erhöhte Maßhaltigkeit erzielt werden kann und die Messergebnisse eine klarere Tendenz aufzeigen.

7.5.5 Ergebnisse Variation Schließabstand

Neben der Niederhalterkraft wird der Schließabstand als zweiter prozesstechnischer Parameter validiert. Die tabellarische und graphische Darstellung der Messergebnisse erfolgt in *Abbildung 7.30*.

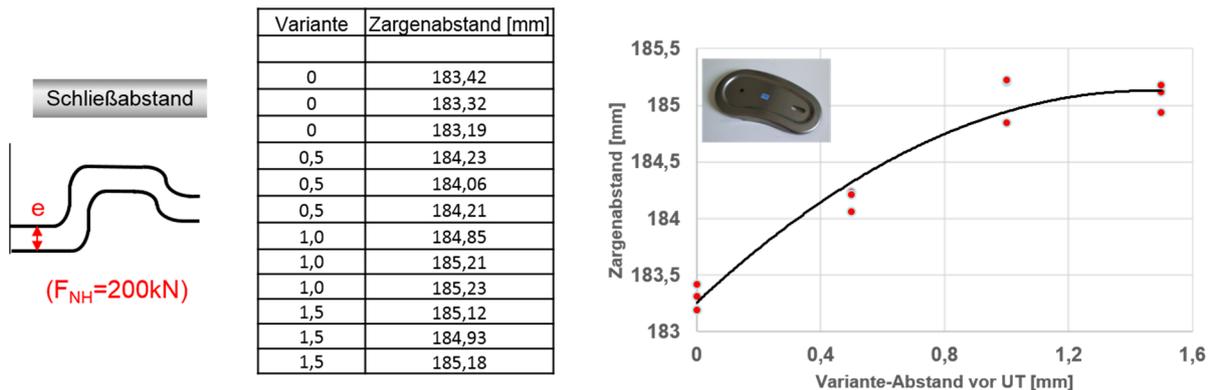


Abbildung 7.30: Reale Zargenabstände des geschlossenen Demonstrators (Schließabstand)

Die Darstellung der Zargenabstände für den geschlossenen Demonstrator zeigt, dass mit zunehmendem Abstand vor Erreichung UT in der Vorziehstufe der Zargenabstand ansteigt und somit die Rückfederung größer wird. Ferner wird als Trendlinie ein Polynom zweiten Grades in die Darstellung eingebunden, da so die Abweichungen zur Trendlinie geringer sind als bei einer linearen Interpolation.

Beim offenen Demonstrator hingegen ergibt sich wiederum ein konträres Gestaltungsergebnis der Vorziehstufe, um eine rückfederungsreduzierende Wirkung zu erzielen. Die Ergebnisse werden in *Abbildung 7.31* dargestellt.

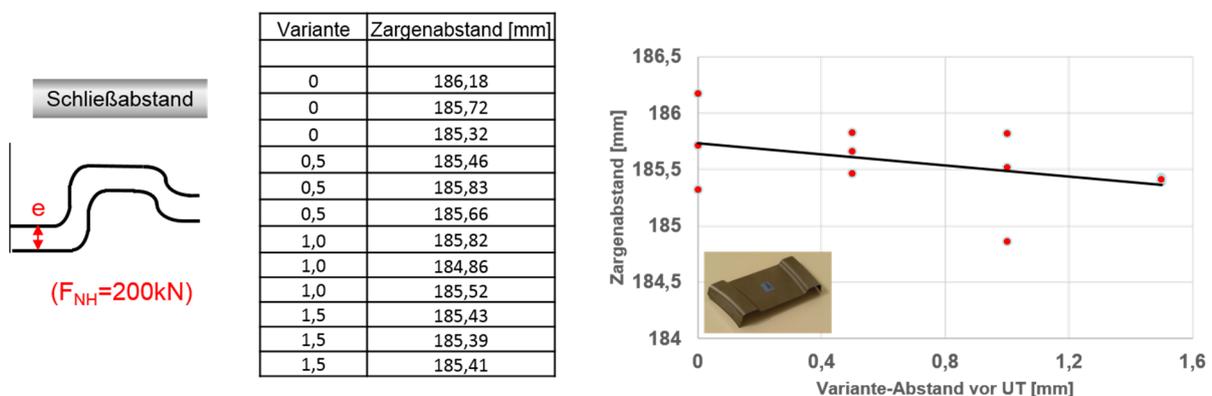


Abbildung 7.31: Reale Zargenabstände des offenen Demonstrators (Schließabstand)

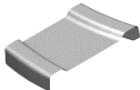
Hierbei erkennt man, dass eine erhöhte Maßhaltigkeit erzielt werden kann, indem ein möglichst großer Abstand vor dem UT in der Vorziehstufe angewendet wird. Somit wäre ein Abbruch des Ziehprozesses vor dem eigentlichen Ende der Vorziehstufe empfehlenswert.

Da nun die Messergebnisse aus der Simulation und der Realität vorhanden sind, kann ein Vergleich der Daten vorgenommen werden.

7.5.6 Ergebnisvergleich Simulation und Realität

Zunächst ist der Vergleich der Zargenabstände aus der Simulation und der real gemessenen Werte von Bedeutung. Eine Gegenüberstellung der Messergebnisse wird in *Tabelle 7-5* vorgenommen.

Tabelle 7-5: Vergleich der Zargenabstände aus Simulation und Realität

Parameter	Zargenabstand [mm]				Differenz
	Simulation		Realität		
$F_{NH}=200 \text{ kN}$ UT=0 mm		177,5		182,1	4,6
$F_{NH}=200 \text{ kN}$ UT=0 mm		177,8		185,5	7,7

In der Referenzsimulation des geschlossenen Demonstrators wird ein Zargenabstand von 177,5 mm gemessen. Dieser Abstand bezieht sich auf die Mittelfaser des Bleches. Da bei den realen Messwerten jedoch der Abstand der äußeren Blechseite ermittelt wird, muss von dem durchschnittlichen Zargenabstand (183,1 mm) 1 mm Blechstärke abgezogen werden, um einen vergleichbaren Wert zu erhalten. Demnach entsprechen 182,1 mm dem Zargenabstand auf der Mittelfaser des Bleches. Der reale Zargenabstand des geschlossenen Demonstrators ist 4,6 mm größer als der Abstand, der in der Simulation ermittelt wurde.

Beim offenen Demonstrator kann ein ähnliches Vergleichsverhalten beobachtet werden. Auch hier sind die realen Zargenabstände mit 185,5 mm größer als die der Simulation. Die Vermutung, dass bei der offenen Kontur ein höherer Zargenabstand auftritt, kann bestätigt werden. Dieser scheint in der Realität größer auszufallen, als es die Simulation vorhergesagt hat.

Neben den quantitativen Unterschieden der Zargenabstände in Simulation und Realität, sollen vor allem die qualitativen Gestaltungsrichtlinien validiert werden. Dazu werden die Ergebnisse der Simulation mit den realen Messergebnissen beispielhaft für die Variation der Prozessparameter geprüft.

In *Abbildung 7.32* ist der Zargenabstand als Maß der Rückfederung für den geschlossenen Demonstrator dargestellt. Hierbei werden die Ergebnisse der Simulation (links) mit den realen Ergebnissen der Umformung (rechts) verglichen.

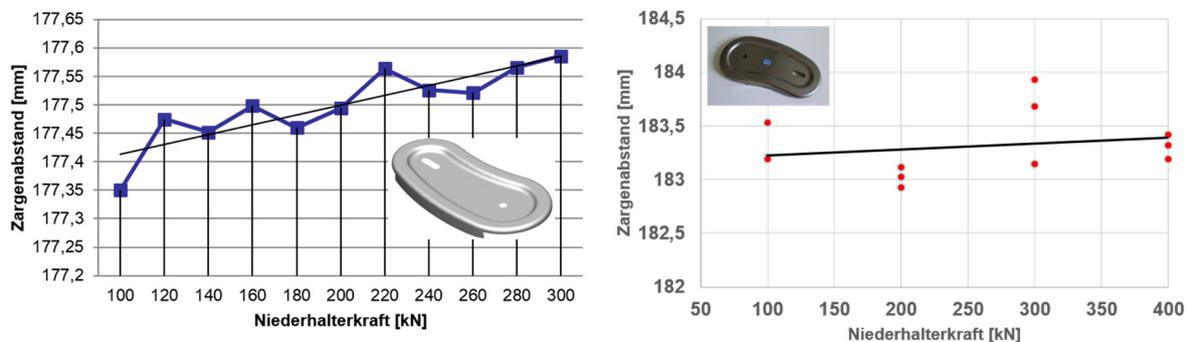


Abbildung 7.32: Vergleich Zargenabstände des geschl. Demonstrators (NH-Kraft)

Beim Vergleich der Diagramme kann festgestellt werden, dass quantitative Unterschiede der Zargenabstände vorherrschen. Auch die Streubreite der realen Messwerte muss berücksichtigt werden. Jedoch lässt sich erkennen, dass die linearen Trendlinien beider Diagramme einen vergleichbaren Verlauf aufzeigen. Aus den Ergebnissen der Simulation wurde abgeleitet, dass in der Vorziehstufe eine geringere Niederhalterkraft bei einer geschlossenen Bauteilkontur eine rückfederungsreduzierende Wirkung nach sich zieht. Dieser Gestaltungshinweis kann mit den Zargenabständen der realen Messungen bestätigt werden. Ein reales Bauteil weist im Durchschnitt eine größere Maßhaltigkeit auf, wenn geringere Niederhalterkräfte in der Vorziehstufe verwendet werden. Trotz der quantitativen Unterschiede ist es bemerkenswert, dass der rückfederungsreduzierende Einfluss sowohl in Simulation als auch in der Realität in einer vergleichbaren Größenordnung liegt (ca. 0,2 mm). Somit ist hier ein vergleichsweise geringer Einfluss zur Erhöhung der Maßhaltigkeit zu erwarten. Dennoch kann dieser auf Grund der eindeutigen Tendenz angewendet werden.

Im Gegensatz dazu werden die Diagrammverläufe des offenen Demonstrators unter dem Einflussparameter der Niederhalterkraft vergleichend in *Abbildung 7.33* dargestellt.

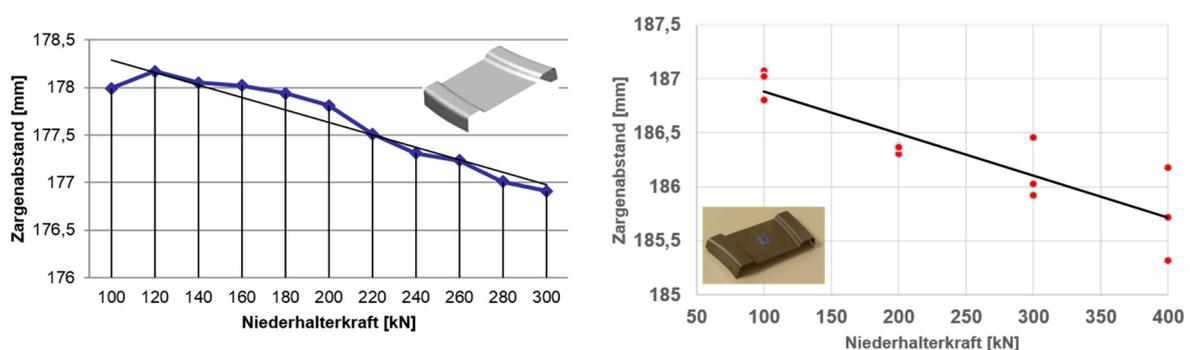


Abbildung 7.33: Vergleich Zargenabstände des offenen Demonstrators (NH-Kraft)

Beim Vergleich der offenen Kontur ist in der Simulation ein gegenläufiger Gestaltungshinweis definiert worden. Hierbei wurde die Empfehlung ausgesprochen, in der Vorziehstufe eine möglichst große Niederhalterkraft zu verwenden, um einen rückfederungsreduzierenden Einfluss feststellen zu können. Auch die realen Messergebnisse des offenen Demonstrators bestätigen diesen Gestaltungshinweis. Auch hier ist es wiederum bemerkenswert, dass trotz der quantitativen Unterschiede der Messergebnisse eine vergleichbare Größenordnung der Rückfederungsreduzierung auftritt (ca. 1mm). Beim offenen Bauteil kann demnach mit diesem Gestaltungshinweis eine beachtliche Erhöhung der Maßhaltigkeit erzielt werden.

Ferner wird ein Vergleich vorgenommen, der die Zargenabstände aus Simulation und realen Messergebnissen gegenüberstellt. Hierbei variiert als zweiter prozesstechnischer Parameter der Schließabstand zum Ende der Vorziehstufe. Der visuelle Vergleich der Ergebnisdiagramme erfolgt in *Abbildung 7.34*.

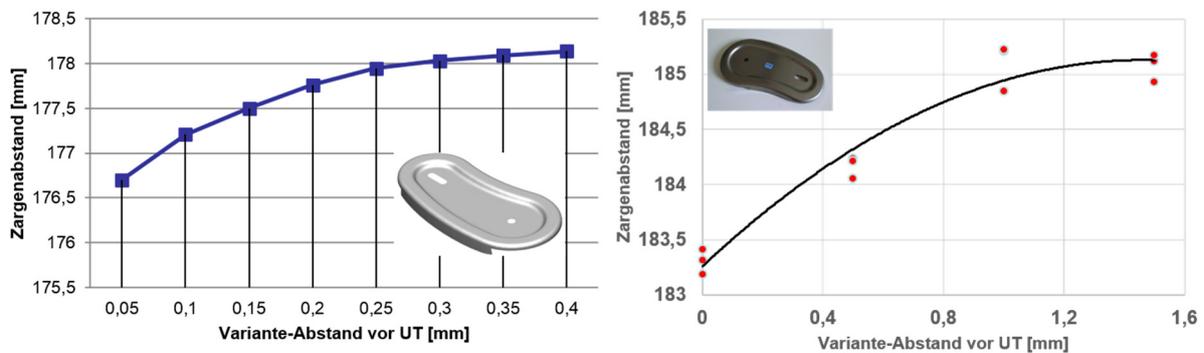


Abbildung 7.34: Vergleich Zargenabstände des geschl. Demonstrators (Schließabstand)

Da die Variation des geringen Schließabstandes aus der Simulation in der Realität nur bedingt umsetzbar ist, wurden für die realen Versuche größere Schließabstände zum Prozessende der Vorziehstufe gewählt, um einen Einfluss herausstellen zu können. Daher können die Ergebnisse nur bedingt verglichen werden. Aus den Ergebnissen der Simulation konnte für eine geschlossene Kontur der Gestaltungshinweis definiert werden, dass der Schließabstand möglichst klein zu wählen ist und somit ein vollständiges Verfahren der Werkzeugelemente empfohlen wird. Ein vorzeitiges Prozessende der Vorziehstufe führt bei einer geschlossenen Kontur nicht zu einer Erhöhung der Maßhaltigkeit. Diese Gestaltungsrichtlinie wird durch die Ergebnisse der realen Messwerte bestätigt.

In *Abbildung 7.35* erfolgt der Vergleich zwischen Simulation und Realität der offenen Kontur unter Berücksichtigung der Variation *Schließabstand*.

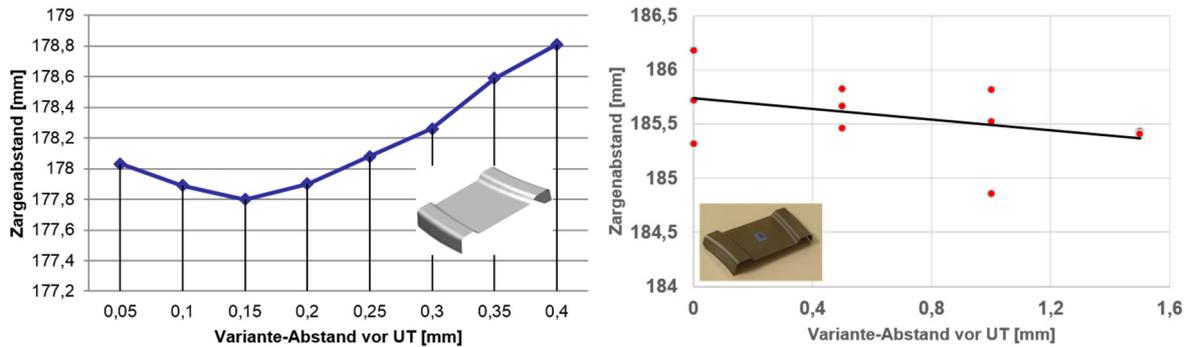


Abbildung 7.35: Vergleich Zargenabstände des offenen Demonstrators (Schließabstand)

Aus den Ergebnissen der Simulation lässt sich der Gestaltungshinweis ableiten, dass ebenfalls geringe Schließabstände in der Vorziehstufe einer offenen Kontur zur Erhöhung der Maßhaltigkeit nach der Gesamtumformung führen. Da hier die realen Zargenabstände ein gegenläufiges Verhalten aufzeigen, kann dieser Gestaltungshinweis nicht bestätigt werden. Eine mögliche Erklärung der gegenläufigen Ergebnisse ist auf die unterschiedlichen Betrachtungsbereiche der Abszisse (*Variante UT*) zurückzuführen. In der Simulation sind sehr kleine Betrachtungsbereiche (0-0,4 mm) umsetzbar. In den realen Versuchen hingegen mussten die Varianten mindestens eine Schrittweite von 0,5 mm aufweisen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Ferner deuten die relativ großen Streubreiten im realen Versuch darauf hin, dass sich die Variation des Schließabstandes sensibel auf die Rückfederung auswirkt. Demnach sollte in der Vorziehstufe bezüglich *Schließabstand* nicht vom derzeitigen Stand der Technik abgewichen werden (UT=0 mm).

7.5.7 Zusammenfassung der reale Versuche

Um die Versuche zu realisieren, musste ein flexibles Werkzeug konzipiert und konstruiert werden. Hierbei bestand die Herausforderung darin, zwei Ziehstufen durch den Umbau eines Werkzeuges zu verwirklichen. Nach dem Werkzeugbau musste in einem ersten Try-Out die Herstellqualität bewertet und optimiert werden. Anschließend erfolgte die Realisierung der Versuchsreihe, wobei die prozesstechnischen Parameter *Niederhalterkraft* und der *Schließabstand* in der Vorziehstufe variiert wurden. Nach dem Laserbeschnitt und dem Umbau des Werkzeuges konnte die zweite Ziehstufe durchgeführt werden.

Beim Vermessen der Bauteile wurde die Wiederholgenauigkeit plausibilisiert, indem Messvorgänge ohne und mit Bauteilentnahme durchgeführt und ausgewertet wurden. Die Ergebnisse der realen Messversuche zeigen auf, dass quantitative Unterschiede der Zargenabstände auftreten. Jedoch lassen sich die prozesstechnischen Gestaltungsrichtlinien aus der Simulation zum größten Teil durch die realen Ergebnisse bestätigen.

8 Methodische Gestaltungshinweise

Aus den ermittelten Zargenabständen der Simulation können rückfederungsreduzierende Gestaltungshinweise der Vorziehstufe definiert werden. Durch die Validierung der realen Messwerte ist eine Bestätigung der methodischen Empfehlungen möglich.

Zunächst erfolgt die Bewertung der geometrischen Parameter Radius und Grad der Vorziehstufe. Anschließend werden die rückfederungsreduzierenden Gestaltungshinweise der prozesstechnischen Parameter Niederhalterkraft und Schließabstand aufgezeigt. Durch die Validierung der realen Messergebnisse kann die Aussagekraft der prozesstechnischen Gestaltungshinweise erhöht werden.

Bei einer geschlossenen Bauteilkontur bietet die Variation des Radius ein großes Potential der Rückfederungsreduzierung. In einer Sensitivitätsstudie konnte gezeigt werden, dass die Variation aller Radien-Parameter in der Vorziehstufe eine erhöhte Maßhaltigkeit nach der Fertigziehstufe aufzeigt. Besonders die Verkleinerung oder Vergrößerung des Matrizenradius führt zu einer bemerkenswerten Rückfederungsreduzierung. Bei der offenen Kontur hingegen sollte der Außenradius der Innenkontur r_2 (Vergleich *Abbildung 6.22*) kleiner gewählt werden, um die Maßhaltigkeit zu steigern.

Variiert man den Grad der Vorziehstufe, so verhält sich sowohl die geschlossene als auch die offene Kontur sehr ähnlich. Um eine Rückfederungsreduzierung zu erhalten, sollte ein möglichst großer Anteil der Außenkontur schon in der Vorziehstufe umgeformt werden. Außerdem lässt sich die Maßhaltigkeit steigern, indem die Innenkontur nicht vollständig ausgezogen wird. Durch die zusätzliche Plastifizierung der Innenkontur in der zweiten Ziehstufe kann demnach die Rückfederung reduziert werden.

Der Vorteil der geometrischen Gestaltungshinweise besteht darin, dass im Vergleich zu den prozesstechnischen Parametern eine vergleichsweise größere Rückfederungsreduzierung erreicht werden kann. Nachteilig hingegen ist, dass eine modifizierte Gestaltung der Werkzeugziehstufen notwendig ist. Die prozesstechnischen Parameter können trotz ihrer vergleichsweise geringeren rückfederungsreduzierenden Wirkung sehr leicht umgesetzt werden. Somit ist hier kein zusätzlicher Aufwand erforderlich.

Bei einer geschlossenen Kontur sollten in der Vorziehstufe möglichst kleine Niederhalterkräfte (im untersuchten Beispiel: 100 kN) gewählt werden, um eine rückfederungsreduzierende Wirkung zu erhalten. Bei einem offenen Bauteil sollte hingegen in der Vorziehstufe eine möglichst große Niederhalterkraft (im untersuchten Beispiel: 400 kN) gewählt werden. Mit Hilfe der realen Messergebnisse konnten diese Gestal-

tungsempfehlungen bestätigt werden. Konkrete Niederhalterkräfte sind abhängig von der Bauteilform, -gestalt und -größe. Die quantitativen Gestaltungshinweise sollten im Rahmen der Herstellungsbeurteilung angewendet werden. So dürfen die Niederhalterkräfte beispielsweise nicht zu klein gewählt werden, da das Faltenrisiko steigt. Bei zu großen Niederhalterkräften können Reißer auftreten.

Betrachtet man die Variation der Schließabstände, so sollte dieser in der Vorziehstufe möglichst klein gewählt werden. Demnach führt ein vorzeitiges Prozessende in der Vorziehstufe nicht zu einer erhöhten Maßhaltigkeit. Bei der geschlossenen Kontur konnte dieser Gestaltungshinweis bestätigt werden. Bei der offenen Kontur zeigen die realen Ergebnisse jedoch ein gegenläufiges Verhalten, sodass hier der Gestaltungshinweis der Simulation nicht durch die realen Messergebnisse bestätigt wird.

Eine Übersicht zur rückfederungsreduzierenden Gestaltung der Vorziehstufe ist in *Abbildung 8.1* dargestellt.

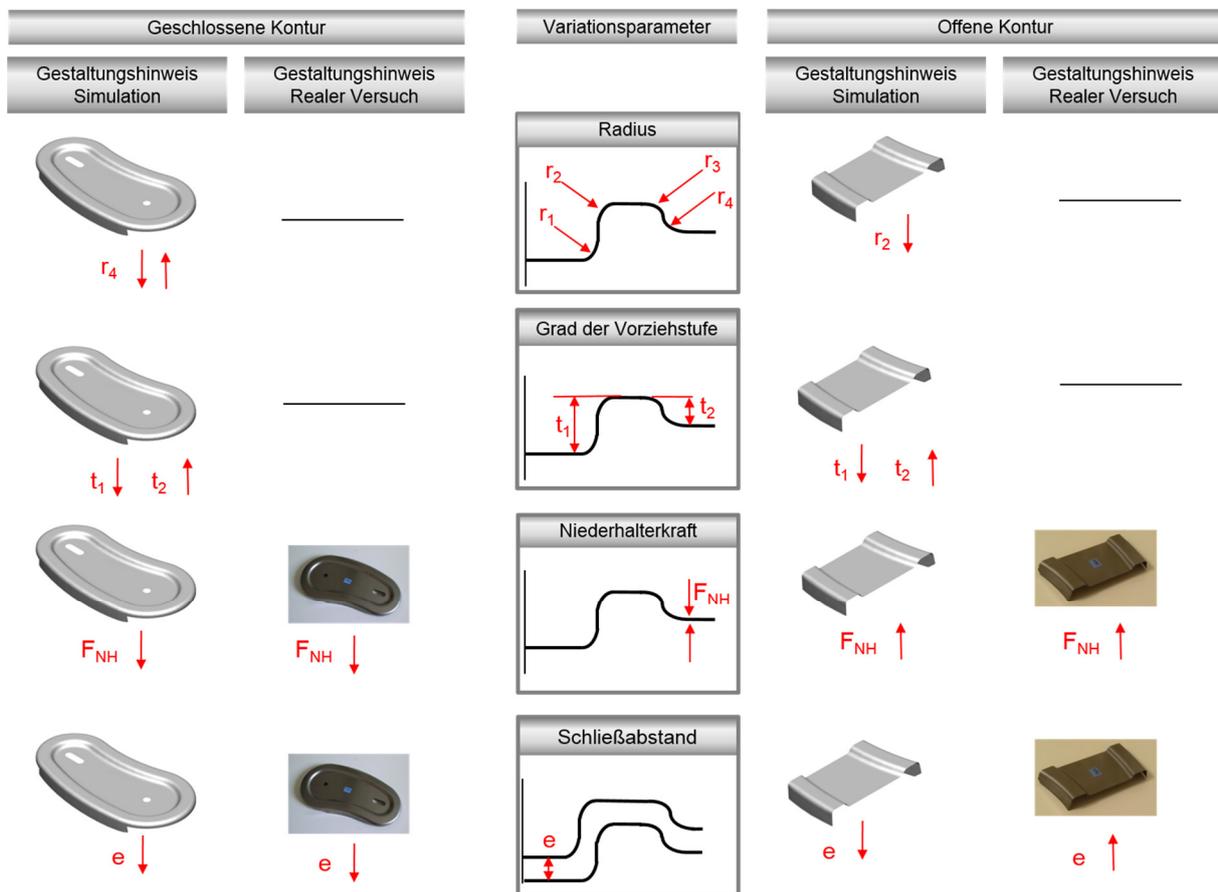


Abbildung 8.1: Rückfederungsreduzierende Gestaltungshinweise der Vorziehstufe

Hierbei wird nochmals deutlich, dass die realen Messergebnisse die Gestaltungshinweise der Simulation größtenteils bestätigen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Bisherige rückfederungsreduzierende Maßnahmen beschränken sich besonders auf die Gestaltung der letzten Formgebungsstufe. Als ein innovativer Ansatz zur Erhöhung der Maßhaltigkeit wird in dieser Untersuchung die Variation der Vorziehstufe vorgenommen.

Dazu wird auf Basis eines Praxisbauteils ein beispielhafter Demonstrator mit einer geschlossenen und einer offenen Kontur entwickelt. Diese enthalten wesentliche Gestaltungsmerkmale, um eine praxisorientierte Untersuchung zu gewährleisten. Hierbei wird die Komplexität des Bauteils zur optimierten Analyse beschränkt. Nachdem die Konstruktion der Demonstratoren abgeschlossen ist, wird in einem iterativen Prozess die Bauteilgestalt mit Hilfe der inversen und inkrementellen Simulation angepasst, bis eine reißen- und faltenfreie Herstellbarkeit sichergestellt ist. Abschließend wird eine erfahrungsbasierte Methode ausgelegt (Vorziehstufe/Beschnitt/Ziehstufe).

Um die Qualität der Werkstoffparameter in der Simulation sicherzustellen, werden Untersuchungen zum Werkstoffverhalten des hochfesten Dualphasenstahls vorab durchgeführt. Hierbei wird die Grenzformänderungskurve ermittelt, um die Herstellbarkeit richtig beurteilen zu können. Ferner erfolgt die Ermittlung der Fließkurve, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Spannungen im Bauteil und somit auf die Berechnung der Rückfederung hat.

Nachdem die gesamte Herstellungsmethode in der Simulation durch die Referenz abgebildet ist, erfolgt die Variation der Parameter in der Vorziehstufe. Somit werden unterschiedliche Rückfederungsergebnisse ermittelt und zu Gestaltungshinweisen zusammengefasst. Die Auswahl der geometrischen Variationsparameter beschränkt sich auf unterschiedliche Radien und den Grad der Vorziehstufe. Als prozesstechnische Parameter erfolgte die Variation von Niederhalterkraft und Schließabstand in der Vorziehstufe. Nachdem die Simulationen durchgeführt wurden, konnten die Zargenabstände als Maß der Rückfederung ausgewertet werden.

Als Ergebnis können simulationsbasierte Gestaltungshinweise ermittelt werden. Demnach bietet die Radienvariation in der Vorziehstufe das größte Potential der Rückfederungsreduzierung. Bei einer geschlossenen Kontur kann der Matrizenradius (r_4) größer oder kleiner gewählt werden, um eine erhöhte Maßhaltigkeit nach der Gesamtumformung zu erhalten. Bei einer offenen Kontur sollte hingegen der Außenradius der Innenkontur (r_2) in der Vorziehstufengeometrie möglichst klein gewählt werden. Ferner konnte durch die Simulation ermittelt werden, dass bei beiden Konturtypen eine verringerte Ziehtiefe der Innenkontur und ein möglichst großes Anstellen der Außenkontur die Rückfederung nach der Gesamtumformung reduzieren kann. Erstaunlich ist, dass sich bei der Betrachtung der Niederhalterkraft als prozesstech-

nischem Variationsparameter die Konturtypen gegensätzlich verhalten. Bei einer Verkleinerung der Niederhalterkraft in der Vorziehstufe des geschlossenen Bauteils erhöht sich die Maßhaltigkeit nach der Gesamtumformung. Bei der offenen Kontur hingegen führt eine Vergrößerung der Niederhalterkraft in der Vorziehstufe zur Rückfederungsreduzierung. Beim Schließabstand wird bei beiden Konturtypen geraten, diesen möglichst gering zu wählen und demnach kein vorzeitiges Prozessende in der Vorziehstufe zu generieren.

Um die Erkenntnisse der Simulation zu validieren, wurde ein Werkzeug konzipiert, welches durch einen Umbau zwei Ziehstufen (Vorzieh- und Fertigziehstufe) realisieren kann. Nach der CAD-Gestaltung wurden die Werkzeugelemente hergestellt und zu einem Werkzeug verbaut. Bevor die Versuchsreihe durchgeführt wurde, musste ein Try-Out absolviert werden, um eine reißen- und faltenfreie Produktion der Bauteile zu gewährleisten. Durch die Herstellung der Versuchsteile konnte für die Variation der prozesstechnischen Parameter die Gestaltungshinweise der Simulation größtenteils bestätigt werden. So konnte die konturabhängige Wahl der Niederhalterkraft in der Vorziehstufe validiert werden, da sowohl das Verhalten der offenen als auch der geschlossenen Kontur in Simulation und Realität ähnlich war. Außerdem wurde für die geschlossene Kontur bestätigt, dass ein möglichst kleiner Schließabstand in der Vorziehstufe die Maßhaltigkeit nach der Gesamtumformung erhöht. Lediglich der Gestaltungshinweis für die offene Kontur bezüglich des Schließabstandes liefert in Simulation und Realität ein konträres Ergebnis.

Ein wichtiges Forschungsergebnis dieser Untersuchung ist, dass durch die Ermittlung der Hauptspannungsdifferenz in der Simulation eine Optimierung der Rückfederung durchgeführt werden kann, ohne eine Rückfederungsberechnung zu benötigen. Diese Methode birgt enormes Potential zur schnelleren und effizienteren Bauteiloptimierung hinsichtlich erhöhter Maßhaltigkeit. Als Ausblick sollten weitere Forschungsaktivitäten hinsichtlich der Hauptspannungsdifferenz durchgeführt werden, um die vorgestellte Methode für eine industrielle Anwendung nutzbar zu machen (z.B. durch Implementierung in Software).

In folgenden Forschungstätigkeiten sollten die geometrischen Gestaltungshinweise der Simulation in der Realität validiert werden. Der erhöhte Aufwand weiterer Untersuchungen ließe sich reduzieren, indem das konstruierte Werkzeug weiterverwendet wird. Dies ist möglich, da bei der Konstruktion eine modulare Gestaltung angewendet wurde. Demnach können beispielsweise Werkzeugwirkflächen mit unterschiedlichen Radien in das vorhandene Werkzeug eingesetzt werden. Auch die Untersuchung des unterschiedlichen Grades der Vorziehstufe könnte somit durchgeführt werden.

Die gezeigten Gestaltungshinweise lassen sich in der simulationsbasierten Auslegung von Vorziehstufen für industrielle Blechformteile nutzen. Somit kann ein prakti-

scher Beitrag zur Erhöhung der Maßhaltigkeit hochfester Strukturbauteile erfolgen. Als Konsequenz ist die Rückfederung von hochfesten Blechformteilen besser beherrschbar, sodass geringere Blechdicken im Karosseriebau prozesssicher eingesetzt werden können. Folglich kann mit Hilfe dieser Forschungsarbeit ein Beitrag für den Leichtbau und den Klimaschutz geleistet werden.

Literaturnachweis

- [ADA03] ADAMS, BERNHARD; KRUSE, STEFAN;
MAMOUTOV, ALEXANDRE
Einsatz ultrahochfester Mehrphasen-Stähle für tiefgezogene PKW-Strukturteile, Prozessentwicklung und Springback-Analyse, www.utfscience.de, 2003, S. 4
- [BEC04] BECK, STEFFEN
Optimierung der Zargenspannung beim Ziehen unregelmäßiger Blechformteile, Universität Stuttgart, Dissertation, 2004
- [BES99] BESDO, DIETER
Zur Problematik der Vorhersage von Rückfederungen bei Blechumformsimulationen, Umformtechnik 2000 plus, Meisenbach, Bamberg, 1999, S. 81-90,
- [BET93] BETH, MATTHIAS
Untersuchung zum Rückfederungsverhalten von Feinblechen bei Tief- und Streckziehvorgängen, Technische Hochschule, Darmstadt, Dissertation, 1993
- [BOI97] BOINSKI, FRANK
Auslegung von Ziehteilen und Preßwerkzeugen mit elementaren Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Rückfederung, Universität Hannover, Dissertation, 1997
- [BRA11] BRAESS, HANS-HERMANN; SEIFERT, ULRICH
Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg+Teubner Verlag 6.Auflage, Wiesbaden, 2011; S. 392, S.404, S. 421
ISBN: 978-3-8348-1011-3
- [BUS07] BUSCHE, CORD HENDRIK
Bestimmung und Beschreibung des Elastizitätsmoduls von Blechwerkstoffen nach dem Umformen, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Dissertation, 2007
- [CAO93] CAO, JIAN; BOYCE, MARY CUNNINGHAM
Drawbead Penetration as a Control Element of Material Flow, Sheet Metal and Stamping Symposium, Detroit, 1993
- [CAR05] CARLSSON, BJÖRN; LARSON, JOACHIM; NILSSON, TONY
Dual phase steel for auto body: design, forming and welding aspects, SSAB Tunplatt AB, Borlänge, Sweden, 2005
- [CAR11] CARLEER, BART
Robuste Rückfederungskompensation- ein vielschichtiges Thema, 20. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 2011

- [CHU86] CHU, CHIN-CHAN
Elastic-plastic springback of sheet metals subjected to complex plane strain bending histories, International Journal of Solids and Structures, Volume 22, Issue 10, Dearborn (USA), 1986; S. 1071-1081,
- [DAN02] DANZBERG, JÖRG
Einsatz hierarchischer parametrisierter Konstruktionsmethodik zur Planung und Optimierung von Karosserieblechteilen, ETH Zürich, Dissertation, 2002
- [DEN06] DENKER, DETLEF; BOBBERT, STEFAN
Anwendung der Rückfederungssimulation in der Methodenplanung von Umformwerkzeugen, Tagungsband Bestform in Blech-Automobilbau in Unternehmensnetzwerken, Meerane 09./10.05.2006
- [DIE94] DIETRICH, HERMANN
Mechanische Werkstoffprüfung, 2. Auflage, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
ISBN: 3-8169-1035-1
- [DIN03a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 8580: *Fertigungsverfahren-Begriffe, Einteilungen*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2003
- [DIN03b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 8582: *Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2003
- [DIN03c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 8584-1: *Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2003
- [DIN03d] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 8585-1: *Fertigungsverfahren Zugumformen - Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2003
- [DIN03e] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 8586: *Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2003
- [DIN03f] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 8588: *Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2003

- [DIN06a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN 10130: *Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [DIN06b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN 10131: *Kaltgewalzte Flacherzeugnisse ohne Überzug und mit elektrolytischem Zink- oder Zink-Nickel-Überzug aus weichen Stählen sowie aus Stählen mit höherer Streckgrenze zum Kaltumformen - Grenzabmaße und Formtoleranzen*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe 09.2006
- [DIN06c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN 10268: *Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [DIN09a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN ISO 6892-1: *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*, Beuth Verlag, Ausgabe 12.2009
- [DIN09b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN ISO 12004-2: *Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve - Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor*, Beuth Verlag, Ausgabe 02.2009
- [DIN09c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN 50125: *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*, Beuth Verlag, Ausgabe 07.2009
- [DIN09d] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN ISO 12004-2: *Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve – Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor*, Beuth Verlag, Ausgabe 02.2009
- [DIN10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN)
DIN EN 10338: *Warmgewalzte und kaltgewalzte unbeschichtete Erzeugnisse aus Mehrphasenstählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2010
- [DOE10] DOEGE, ECKART; BEHRENS, BERND-ARNO
Handbuch Umformtechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2. bearbeitete Auflage, 2010, S.325
ISBN: 3-540-23441-1

- [ENG06] ENGEL, BERND
Grundlagen des Werkzeugbaus, DGM Fortbildungsseminar, Universität Siegen, 2006, S.4-5
<http://www.mb.uni-siegen.de>
- [FLE09] FLEISCHER, MICHAEL
Absicherung der virtuellen Prozesskette für Folgeoperationen in der Umformtechnik, Technische Universität München, Dissertation, 2009
ISBN: 978-3-8322-8398-8
- [FRI12] FRITZ, ALFRED HERBERT; SCHULZE, GÜNTER (HRSG.)
Fertigungstechnik, 10. neu bearb. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
ISBN: 978-3-642-29785-4
- [GER98] GERBER, THOMAS; HORN, KLAUS DIETER
Mehrphasenstähle reduzieren Teilegewicht im Fahrzeugbau, Maschinenmarkt 104, 1998, Seite 38-41
- [GER12] GERLACH, JÖRG; KEßLER, LUTZ
Methoden und Grenzen zur Abschätzung von Parameterschwankungen für Stahlwerkstoffe in Umformsimulationen, 15. Workshop-Simulation in der Umformtechnik, Stuttgart, 2012
- [GOE07] GOEDE, MARTIN
Karosserieleichtbau als Baustein einer CO₂-Reduzierungsstrategie, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2007
ISBN: 978-3-940374-00-4
- [GÖS10] GÖSLING, MARCO
Metamodell unterstützte Simulation und Kompensation von Rückfederungen in der Blechumformung, Dissertation, Universität Dortmund, 2010
- [HAR01] HARDTMANN, ANDRE
Grundlagen der Umformtechnik, Fertigungstechnik 1, Zweiter Teil, TU Dresden, 2001
- [HAR10] HARMENING, WOLFGANG
Investigation about optimal process layout of backrest sidemember made of Tailored Welded Blank (TWB), Simulation Workshop, Stadthagen, 2010
- [HÄR12] HÄRTEL, SEBASTIAN
Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Verfahrensentwicklung des Unrundrüdrens, TU Chemnitz, Dissertation, 2012

- [HEI98] HEINEN, FRANK; TAWIL, MOHAMED
Untersuchung der Rückfederung tiefgezogener Bleche,
Institut für Maschinenwesen, Mitteilung Nr. 23, TU Clausthal,
1998, S.71
- [HEL04] HELLER, THOMAS; IMLAU, KLAUS-PETER; ETZOLD, ULRICH;
HOFMANN, OLIVER
Neue Stähle für moderne Fahrzeugkarosserien,
38. Metallographie-Tagung, Ruhr Universität Bochum, 2004
S. 3
- [HER04] HERING, EKBERT; SCHRÖDER, BERND
Springer Ingenieurtabellen, Springer Verlag Berlin Heidelberg,
2004
ISBN: 3-540-64159-9
- [HIT12] HITZ, RAPHAEL:
*Metamodellbasierte Methodenplanung von Umform- und Fein-
schneidprozessen*, ETH Zürich, Dissertation, 2012
- [HÜT01] HÜTTE, HOLGER
*Untersuchung zum Rückfederungsverhalten hochfester Stahl-
blechwerkstoffe beim Tiefziehen*, Universität Hannover, Disserta-
tion, 2001
- [KAL12] KALWEIT, ANDREAS; PAUL, CHRISTOF; PETERS, SASCHA;
WALLBAUM, REINER
Handbuch für technisches Produktdesign, Material und Ferti-
gung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure, 2.
Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
S. 546
- [KAR12] KARDES SEVER, NIMET
Springback Prediction in Bending of AHSS-DP 780, In: Procee-
dings of NAMRI/SME, Ohio State University
Columbus, Vol. 40, 2012, S.1-10
- [KLO06] KLOCKE, FRITZ., KÖNIG, WILFRIED.
Fertigungsverfahren Umformen,
Fertigungsverfahren 4, 5. Auflage, Springer-Verlag,
Berlin Heidelberg, 2006
- [KRA05] KRASOVSKYY, ANDRIY
*Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumfor-
mung durch weiterentwickelte Werkstoffmodelle*, Universität
Karlsruhe, Dissertation, 2005
- [KRA09] KRAHN, HEINRICH; EH, DIETER; LAUTERBACH, THOMAS
1000 Konstruktionsbeispiele Werkzeugbau, Hanser Verlag Mün-
chen, 2009

- [LAN84] LANGE, KURT
Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 1: Grundlagen, Zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin 1984
- [LAN90] LANGE, KURT
Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung, Zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin 1990
- [LEE98] LEE, SEOK-WOON; YANG, DONG-YOL
An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, 1998, S.6-7
- [LIE03] LIEDL, URS
Anfangsverformungs- und Alterungsverhalten von Dual-Phasen Stahl, Technische Universität München, Dissertation, 2003, S.9
- [LIE12] LIEWALD, MATHIAS; BOLAY, CHRISTIAN; HENRY, ROBINSON
Beim Umformen von Sickenblechen die Rückfederung verringern, blechnet online
<http://www.blechnet.com/themen/umformen/articles/371137/>
16.07.2012
- [LIU82] LIU, YU-LI C.
Effect of die variables on the springback behaviour of HS steel U-channels, Sheet Metal Industries, Vol. 59, H.9, 1982, S 724-730,
- [LÖF12] LÖFFLER-MANG, MARTIN
Optische Sensorik, Lasertechnik, Experimente, Light Barriers, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 94,
- [MOE14] MOELLER, ELVIRA
Handbuch Konstruktionswerkstoffe, Carl Hanser Verlag München, 2. Überarbeitete Auflage, 2014, S.178
- [MUN08] MUNDE, ANNEDORE
Qualität sichern beim Tiefziehen, blechnet online
<http://www.blechnet.com/themen/umformen/articles/107248/>
30.01.2008
- [NAG91] NAGTEGAAL, JOHANNES CATHARINUS;
Comparison of implicit and explicit finite element methods for analysis of sheet forming problems, FE-Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes in Automotive Industry, VDI Berichte 894, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991, S.19

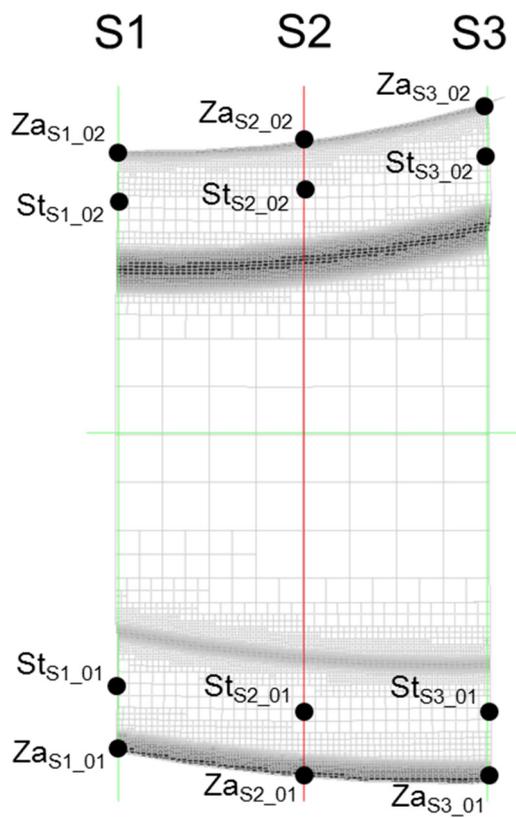
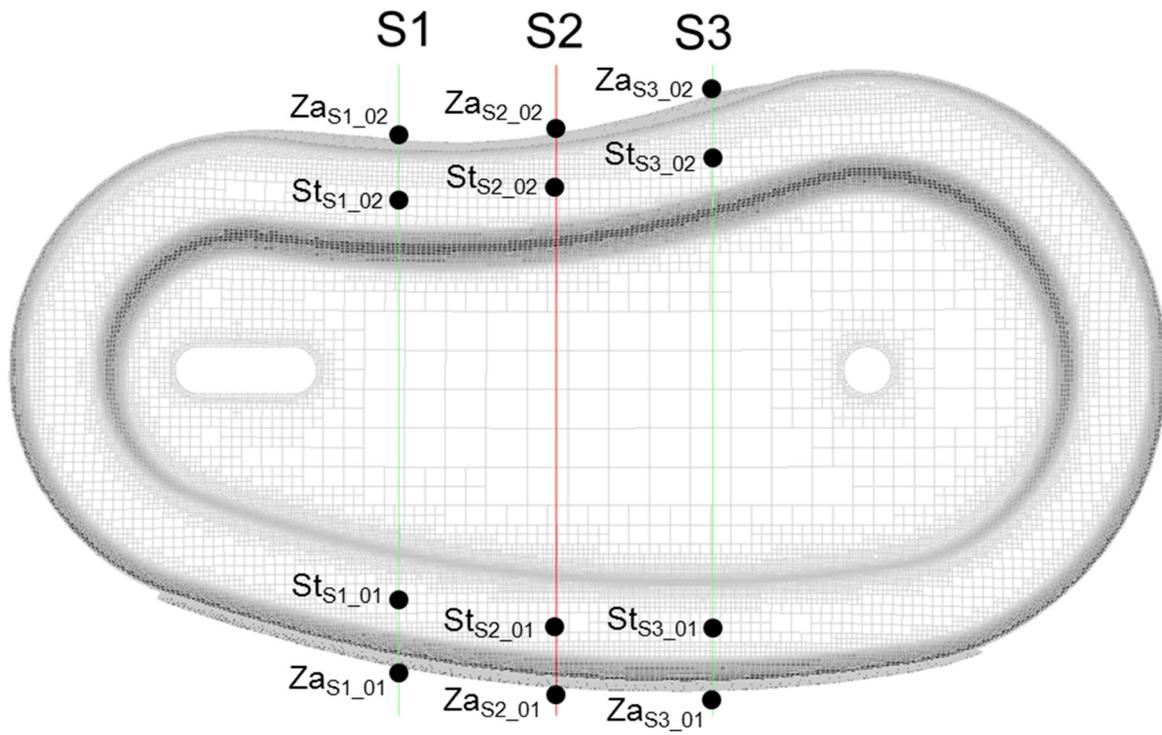
- [NAR10] NARANJE, VISHAL; KUMAR, SHAIENDRA
AI Applications to Metal Stamping Die Design-A Review In: World Academy of Science, Engineering and Technology 44 (2010), S. 1526-1532,
<http://www.waset.org/journals/waset/v44/v44-262.pdf>,
2010
- [NEU04] NEUGEBAUER, REIMUND; HEIDL, WOLFGANG; PAUSCH, EBERHARD; MICHAEL, DETLEF
Systematische Untersuchungen zur Verbesserung der Rückfederungsberechnung bei der Methodenüberprüfung mittels numerischer Simulation, EFB-Forschungsbericht Nr. 227, 2004
- [NEU08] NEUGEBAUER, REIMUND; LIEBER, THOMAS
Experimentelle Untersuchung von werkzeug-geometrischen Maßnahmen zur Kompensation der Rückfederung, Fosta, Forschungsvorhaben P662, 2008
ISBN 3-937567-62-3
- [OLL10] OLLE, PHILIPP
Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Presshärten, Dissertation, Universität Hannover, 2010
- [PAM11] PAM-STAMP
Sheet Metal Forming, Grundlagen Schulung Version 2009.0.2., Eschborn, 2011
- [RAM05] RAMBKE, MARTIN; WEBER, MATTHIAS
Neue Ansätze in der Umformsimulation, 18. Umformtechnisches Kolloquium Hannover (UKH), Umformtechnik – Zukunftstechnologie mit Tradition, Hannover, 2005
ISBN: 3-00-015681-X
- [RAM11] RAMBKE, MARTIN; SACHER, PATRICK
Contribution to reducing spring-back of high-strength sheet metal parts, Konferenz: Umformen im Karosseriebau 2011, Tagungsband, Bad Nauheim, 2011
- [RAM11a] RAMBKE, MARTIN
Blechbearbeitung im Fahrzeugbau, Vorlesungsskript, Ostfalia HaW, Wolfenbüttel 2011
- [RAM13] RAMBKE, MARTIN; SACHER, PATRICK
Rückfederungsreduzierung hochfester Karosseriestrukturebauteile, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Springer Vieweg, ISSN 0001-2785 10810, 2013
- [ROH01] ROHLEDER, MARTIN
Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen, Universität Hannover, Dissertation, 2002

- [ROL97] ROLL, KARL
Simulationssysteme im Vergleich – Handlungsschwerpunkte für die Zukunft, 4. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz, 1997, S.315-334,
- [ROL00] ROLL, KARL; ROHLER, MARTIN
Simulation der Rückfederung in der Blechumformung, Zweites Industriekolloquium des SFB 362 „Fertigen in Feinblech“, Clausthal-Zellerfeld, 2000, S. 21-38,
- [ROL04] ROLL, KARL
Simulationsgestützte Kompensation der Rückfederung, LS-Dyna Anwenderforum, Tagungsband, Bamberg, 2004
- [ROL07] ROLL, KARL
Simulation der Blechumformung-neue Anforderungen und Tendenzen, Tagungsband des 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, Simulation von Umformprozessen unter Einbeziehung der Maschinen- und Werkzeugeinflüsse, 2007
- [RUD08] RUDOLPH, STEFAN
Umformsimulation als Baustein zum virtuellen Rohbau, 15. Sächsische Fachtagung Umformtechnik Dresden, 2008, S. 41-49
- [SAC11] SACHER, PATRICK; RAMBKE, MARTIN
Experience with OPTISTUF, Simulation Workshop Faurecia, Stadthagen, 2011
- [SAC12] SACHER, PATRICK; RAMBKE, MARTIN
Beitrag zur Rückfederungsreduzierung hochfester Strukturblechteile, ASIM Konferenz STS/GMMS, Simulation technischer Systeme, Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation, Wolfenbüttel, 2012
- [SAC13] SACHER, PATRICK; RAMBKE, MARTIN
Optimization of metal stamping die design, International Conference on Advances in Mechanical Engineering, COEP, Pune (Indien), 2013
- [SCH93] SCHMOEKEL, DIETER; BETH, MATTHIAS
Springback reduction in draw-bending process of sheet metals, Technische Universität Darmstadt, 1993
- [SCH99] SCHULTE, STEFFEN
Umformsimulation als fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses bei Audi, Umformtechnik an der Schwelle zum nächsten Jahrtausend, 1999, S. 263-277,

- [SCH02] SCHMIDT-JÜRGENSEN, RUNE
Untersuchung zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen beim Tiefziehen, Dissertation, Universität Hannover, 2002
- [SIM89] SIMON, HARMUT
Rechnergestützte Ziehtheilauslegung mit elementaren Berechnungsmethoden, Dissertation, Universität Hannover, 1989
- [STR08] STRANO, MATTEO
Localized warming of sheet metal parts for the reduction of springback, University of Cassino, Interlaken, Numisheet, 2008
- [TSC08] TSCHÄTSCH, HEINZ; DIETRICH, JOCHEN
Praxis der Umformtechnik, Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge, 9.Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2008
- [THY99] THYSSEN KRUPP STAHL AG
Höherfester Stahl für den Automobil-Leichtbau, Best.-Nr. 2045, 1999
- [VDI13] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI)
VDI 3418
Durchführung von Benchmarks der FE-Simulation in der Blechumformung - Planung, Durchführung, Auswertung, Interpretation und Dokumentation von Praxisversuchen, Düsseldorf, 2013
- [VIP12] VIPROF
Durchgängige Virtualisierung der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen (VIPROF), BMBF-Verbundprojekt, Gemeinsamer FuE-Abschlussbericht,
www.projekt-viprof.de,
2012
- [VOL93] VOLLERSTEN, FRANK
Blechbearbeitung in der Automobilindustrie, Bericht von der SEA, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, USA, 1993
- [VW96] VOLKSWAGEN AG
Reference Point System - RPS -Drawings, Konzernnorm, VW 01055, Klass.-Nr./Class. No. 02 24 5, 1996
- [WAG97] WAGONER, ROBERT HALL
Springback after Drawing and Bending of Metal Sheets, Proceedings of IPMM`97 (Australasia-Pacific Forum of Intelligent Processing & Manufacturing of Materials), 1997, S. 1-10

- [WEB11] WEBER, FRANK
Anforderungen zukünftiger Karosseriestrukturen an die Presswerke der Mercedes-Benz Cars, 20. Umformtechnisches Kolloquium, Hannover, 2011
- [WEI09] WEIGERT, PHILIPP
Berücksichtigung formänderungsbedingter Effekte (Rückfederung) im Entwicklungsprozess der Methodenplanung von tiefgezogenen Karosseriebauteilen, Dissertation, Universität Chemnitz, 2009
- [WER02] WERLE, THOMAS; DAHLKE, PETER
Höherfeste Stähle-Eine Herausforderung für den Großwerkzeugbau, Internationale Konferenz: Neue Entwicklung in der Blechumformung, Fellbach, 2002
- [WIL12] WILLRETT, HAIDER
Schlankheitskur für Karossen,
<http://www.industrieanzeiger.de/>, 14.05.2012

Anhang 1: Messpunkte Demonstrator



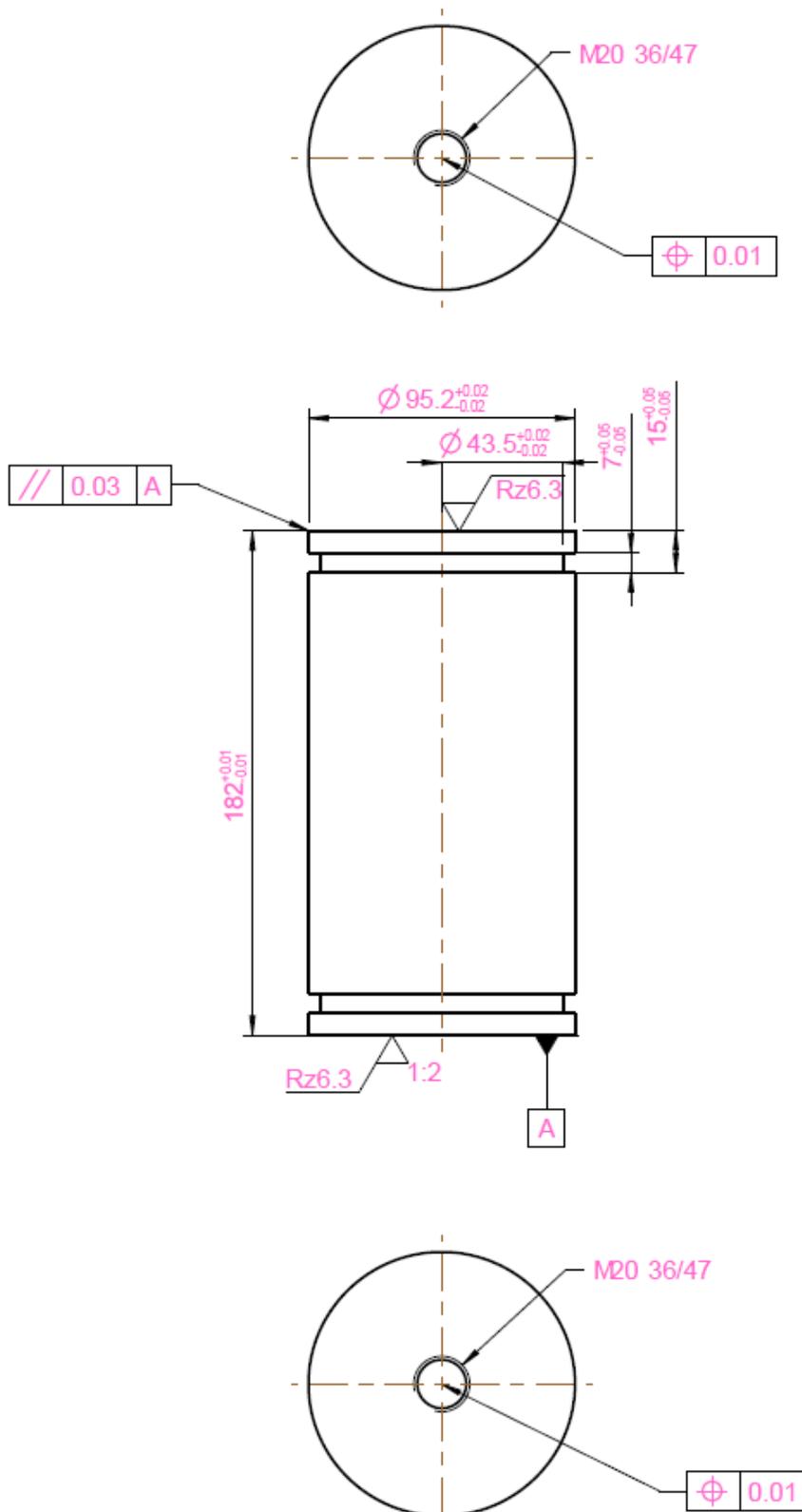
Anhang 2: Materialkennwerte Zugversuch

Nummer	Walzrichtung	Kennung	E	R _{p0.2}	R _m	A ₈₀	A _g	n	k	r
			GPa	MPa	MPa	%	%	[-]	MPa	[-]
Probe 1	0°	L1	212	853	1058	10,07	6,20	0,077	1407	0,69
Probe 2	0°	L2	244	858	1066	8,43	6,19	0,078	1422	0,83
Probe 3	0°	L3	204	862	1060	8,22	5,62	0,076	1408	0,72
Probe 4	0°	L4	204	860	1059	10,12	6,44	0,076	1402	0,72
Probe 5	0°	L5	218	868	1061	5,90	5,07	0,078	1419	0,62
Probe 6	90°	Q1	212	866	1061	6,94	4,52	0,075	1413	0,74
Probe 7	90°	Q2	210	872	1067	6,46	4,89	0,075	1418	0,77
Probe 8	90°	Q3	218	892	1091	6,83	5,61	0,075	1443	0,81
Probe 9	90°	Q4	218	864	1065	9,07	6,02	0,075	1408	0,79
Probe 10	90°	Q5	216	870	1072	7,84	5,49	0,076	1424	0,68
Probe 11	45°	D1	209	836	1029	9,29	5,76	0,075	1360	0,87
Probe 12	45°	D2	215	831	1015	4,84	4,19	0,078	1364	0,87
Probe 13	45°	D3	222	842	1034	9,61	6,02	0,073	1358	0,83
Probe 14	45°	D4	217	831	1018	9,74	5,98	0,075	1344	0,90
Probe 15	45°	D5	214	824	1016	6,71	5,45	0,077	1351	0,92
Minimalwert			204	824	1015	4,84	4,19	0,073	1344	0,62
Maximalwert			244	892	1091	10,12	6,44	0,078	1443	0,92
Arithmetisches Mittel			216	855	1052	8,00	5,56	0,08	1396	0,78

Anhang 3: Fließspannung über Umformgrad

φ	L1	L2	L3	L4	L5	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	D1	D2	D3	D4	D5
[-]	k _f														
	MPa														
0,01	985	991	992	988	992	1000	1003	1022	996	1004	964	955	970	953	950
0,02	1039	1046	1045	1042	1047	1053	1056	1077	1049	1058	1015	1007	1020	1003	1002
0,03	1072	1080	1078	1074	1081	1086	1089	1110	1082	1091	1046	1039	1051	1034	1033
0,04	1097	1105	1102	1098	1105	1110	1113	1134	1105	1115	1069	1063	1074	1057	1056
0,05	1116	1124	1121	1117	1124	1129	1132	1153	1124	1134	1087	1081	1091	1075	1074
0,06	1141	1141	1137	1132	1140	1144	1148	1169	1139	1150	1102	1097	1106	1089	1090
0,07	1150	1154	1150	1146	1154	1157	1161	1183	1153	1163	1115	1110	1118	1102	1102
0,08	1157	1167	1162	1157	1166	1169	1173	1195	1164	1175	1126	1122	1129	1113	1114
0,09	1177	1177	1172	1168	1177	1180	1183	1205	1175	1186	1136	1132	1139	1123	1124
0,1	1177	1187	1182	1177	1187	1189	1193	1215	1184	1195	1145	1141	1148	1132	1133
0,2	1242	1253	1246	1241	1252	1252	1257	1280	1247	1260	1206	1204	1208	1192	1195
0,3	1282	1294	1285	1279	1292	1291	1295	1319	1286	1299	1243	1243	1244	1228	1232
0,4	1311	1323	1313	1308	1322	1319	1324	1348	1314	1328	1270	1271	1270	1255	1260
0,5	1333	1347	1335	1330	1345	1342	1346	1370	1336	1351	1291	1293	1291	1276	1282
0,6	1349	1366	1354	1349	1364	1360	1365	1389	1355	1369	1309	1311	1308	1293	1300
0,7	1369	1383	1370	1364	1380	1376	1381	1405	1371	1386	1324	1327	1323	1308	1315
0,8	1383	1397	1384	1378	1395	1390	1395	1420	1384	1400	1337	1341	1336	1322	1329
0,9	1396	1410	1396	1391	1407	1402	1407	1432	1397	1412	1349	1353	1348	1333	1341
1	1407	1422	1408	1402	1419	1413	1418	1443	1408	1424	1360	1364	1358	1344	1351

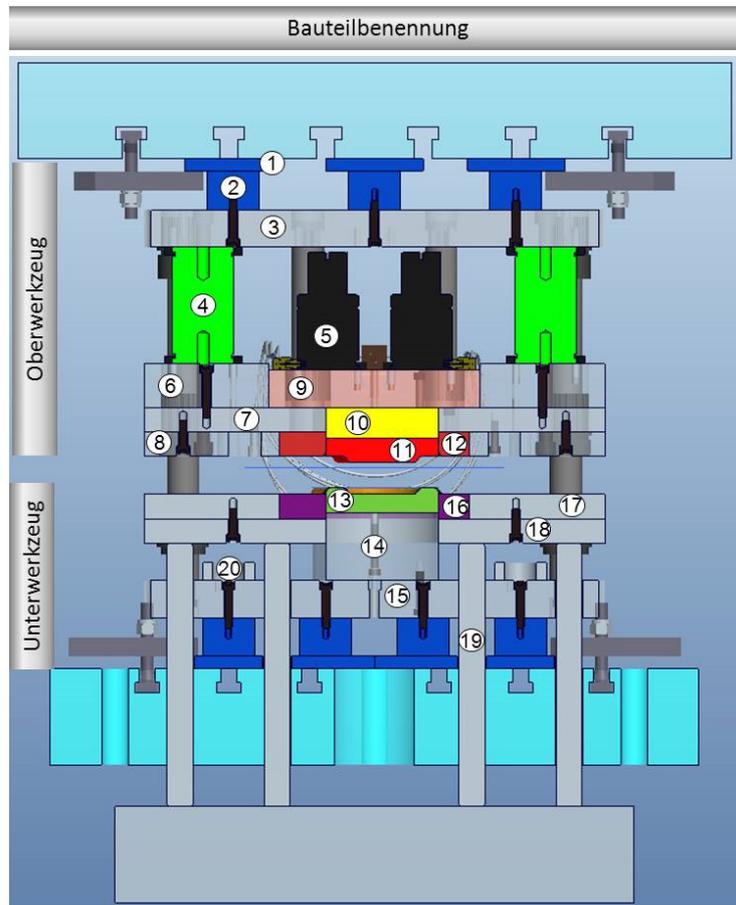
Anhang 4: Fertigungszeichnung Distanz



Anhang 5: Versuchsplan offener Demonstrator

	Versuch	Demonstrator	NH-Kraft [kN]	UT [mm]	Gutteil
Demo	V27	offen	200	0	
	V28	offen	200	0	
	V29	offen	200	0	
Referenz	V30	offen	200	0	
	V31	offen	200	0	
	V32	offen	200	0	
	V33	offen	200	0	
	V34	offen	200	0	
Variation Niederhalterkraft	V35	offen	100	0	
	V36	offen	100	0	
	V37	offen	100	0	
	V38	offen	300	0	
	V39	offen	300	0	
	V40	offen	300	0	
	V41	offen	400	0	
	V42	offen	400	0	
Variation Schließabstand	V43	offen	400	0	
	V44	offen	400	0,5	
	V45	offen	400	0,5	
	V46	offen	400	0,5	
	V47	offen	400	1,0	
	V48	offen	400	1,0	
	V49	offen	400	1,0	
	V50	offen	400	1,5	
	V51	offen	400	1,5	
	V52	offen	400	1,5	

Anhang 6: Werkzeugkomponenten



Oberwerkzeug



Unterwerkzeug



