

# BEITRÄGE ZUR UMFORMTECHNIK



Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart

Martin Barthau

## 93 Entwicklung einer Regelungsmethodik für den Tiefziehprozess während des Umformhubs



Universität Stuttgart



# Entwicklung einer Regelungsmethodik für den Tiefziehprozess während des Umform- hubs

Development of a Control Strategy for deep drawing processes during the forming  
stroke

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

von

Martin Paul Barthau  
aus Schwäbisch Hall

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA

Mitberichter: Prof. Dr. sc. techn. Pavel Hora

Tag der mündlichen Prüfung: 14.05.2021

Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart

2021

Dipl.-Ing. Martin Barthau  
Institut für Umformtechnik  
Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Institut für Umformtechnik  
Universität Stuttgart

**D93**

**ISBN 978-3-946818-18-2**

**Institut für Umformtechnik**

Universität Stuttgart  
Holzgartenstraße 17  
70174 Stuttgart  
[www.ifu.uni-stuttgart.de](http://www.ifu.uni-stuttgart.de)

Printed in Germany

## Geleitwort des Herausgebers

Die langjährige Buchreihe „Beiträge zur Umformtechnik“ enthält Forschungsberichte und abgeschlossene Dissertationen, die am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart aus einer mehrjährigen wissenschaftlichen Arbeit zu einem Forschungsthema aus der Umformtechnik entstanden sind. Auch sind in dieser Buchreihe Abschlussberichte von Forschungsarbeiten zu aktuellen Fragestellungen der Umformtechnik enthalten.

**Umformen ist die gezielte Änderung der Form, der Oberfläche und der Eigenschaften eines metallischen Körpers unter Beibehaltung von Masse und Stoffzusammenhalt.**

Diese Definition für das Umformen von metallischen Körpern in Anlehnung an DIN 8580 beschreibt nicht nur die gezielte Änderung der Form, sondern auch die der Oberfläche und der Eigenschaften des Produktes durch den Umformvorgang. Die Technik des Umformens befasst sich daher nicht nur mit Arbeiten zur Erlangung eines vertieften Prozessverständnisses und der Auslegung von Betriebsmitteln, sondern auch mit Methoden für eine zuverlässige Vorausbestimmbarkeit der finalen Produkteigenschaften. Dabei kommt der mathematischen Beschreibung des Umformvorganges und der Modellierung grundlegender physikalischer Phänomene wie z.B. der verfahrensspezifischen Tribologie und dem Werkstoffverhalten eine besondere Bedeutung bzgl. der Güte von numerischen Simulationsrechnungen mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) zu.

Oftmals geht dabei die intuitive, auf aktuellen Grundlagenkenntnissen basierende Forschung in der Umformtechnik mit einer experimentellen bzw. empirisch basierten Herangehensweise an neue Fragestellungen einher. Die dabei erzielten Forschungsergebnisse dienen dem allgemeinen Wissenserwerb und dem Grundlagenverständnis von werkstofflichen und verfahrensspezifischen Phänomenen und Zusammenhängen. Solche Arbeiten sind somit nicht nur für Wissenschaftler, sondern auch für die in der Praxis stehenden Ingenieure von grundsätzlicher Bedeutung.

Kurze Entwicklungszeiten für neue Produkte der Umformtechnik einerseits und veränderte Wertschöpfungsketten, die Dynamik von Märkten, neue Technologien sowie veränderte Randbedingungen andererseits erfordern in den Unternehmen heute eine Intensivierung von spezifischer Forschung. Auch gewinnt das schnelle Lernen im Umfeld von Produktionstechnologien in den sich volatil verändernden, oftmals globalen Wertschöpfungsketten immer mehr an Bedeutung. Moderne Forschungsstellen stehen daher im engen Dialog mit solchen Unternehmen und sind in beide Prozesse eingebunden: zum einen in die Grundlagenforschung mit Blick auf Werkstoffe, Verfahren und Maschinen der Umformtechnik und zum anderen in vorwettbewerbliche bzw. anwendungsorientierte integrierte Lösungen über neue Prozessketten hinweg.

Motivation für die Herausgabe dieser Berichte ist die Publikation solcher grundlagenorientierten und auch praxisorientierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die an meinem Institut entstehen. Ein weiteres Ziel der Buchreihe ist das Bereitstellen eines aktuellen Wissens- und Kenntnisstandes für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten auf internationalem Niveau.

*Mathias Liewald*

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart.

Dem Direktor des Instituts für Umformtechnik, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Pavel Hora, Direktor des Instituts für Virtuelle Produktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Röser und Prof. Dr. Michael Resch möchte ich für die große Zusprache, während meines Studiums danken, eine Promotion anzustreben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Wagner danke ich für seine Unterstützung während meiner Tätigkeit am IFU.

Herrn Dipl.-Ing. Christian Held danke ich für die interessanten und hilfreichen fachlichen Diskussionen, sowie für seine Unterstützung bei zahlreichen Problemstellungen. Bei Herrn Dr.-Ing. Apostolos Papaianou möchte ich mich für das Korrekturlesen, die Hinweise beim Lektorat der Arbeit und für die fachlichen Hinweise bedanken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Christian Blaich möchte ich mich für die wichtigen und guten fachlichen Hinweise zu Beginn der Arbeit bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Umformtechnik, für die sehr gute und von Freundschaft geprägte Zusammenarbeit. Sie haben durch ihre Unterstützung, die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und durch motivierende Gespräche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere möchte ich mich hier bei den Herren Dr.-Ing. Kim Riedmüller, Dr.-Ing. Klaus Drotleff, Dr.-Ing. Markus Singer, Dr.-Ing. Christian Obermaier, Dipl.-Ing. Sergei Senn, Dipl.-Ing. Stefan Walzer und Frau Theresa Barth, M.A., M.Sc. für die wertvollen Hinweise sowie für deren moralische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit danken.

Dem technischen Personal des IFU danke ich für die zahlreichen Hinweise bei der Entwicklung von Versuchseinrichtungen sowie für deren Anfertigung. Herrn Werner Siegel danke ich für die uneingeschränkte Unterstützung bei der Durchführung von experimentellen Arbeiten. Bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Braun, Herrn Michael Reichersdörfer und Herrn Andreas Christ möchte ich mich für die Unterstützung bei der Anfertigung der Versuchseinrichtungen bedanken.

Ich danke auch allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dipl.-Ing. Dominik Riedl.

Ich möchte meinen Freunden für die moralische Unterstützung und dem interdisziplinären Austausch während der Erstellung dieser Arbeit danken, besonders den Herren Dr. rer. nat. Bastian Niebel, Dr.-Ing. Andreas Neipp, Dr.-Ing. Mario Klünder, Dipl.-Ing. Arpas Fazakas, Dipl.-Wirtschaftsjurist Christian Stephan und Dipl.-Designer Christian Scheuermann.

---

Abschließend danke ich meiner Familie für ihr Verständnis und die moralische Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere bin ich meinen Eltern Paul und Elisabeth Barthau, meinen Schwestern Frau Dipl.-Wirtschaftsingenieurin Susanne Barthau und Frau Dipl.-Betriebswirtin Bettina Löw sowie meinem Schwager Herrn Dipl.-Ing. Friedrich Löw für die Unterstützung während meines Studiums und meiner Promotion dankbar. Besonders meinen Eltern möchte ich für die Vermittlung des Wertes von Bildung und meiner Großmutter Helene Stapf für die Weitergabe der Zuneigung zu den Naturwissenschaften danken.

Schwäbisch Hall im Juni 2021

Martin Barthau

## Inhaltsverzeichnis

Geleitwort des Herausgebers.....	I
Danksagung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Formelzeichen und Abkürzungen .....	VI
Kurzfassung.....	XII
Abstract .....	XIII
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Forschung.....	4
2.1 Herstellung von Blechformteilen mit dem Verfahren des Tiefziehens .....	4
2.2 Sensorik zur Überwachung des Tiefziehprozesses und Werkzeugmodifikationen zur Beeinflussung des Platinenkanteneinzugs .....	13
2.3 Finite Elemente Simulation des Tiefziehvorgangs .....	23
2.4 Simulation mit stochastisch verteilten Parametern.....	32
2.5 Kybernetische Grundlagen .....	37
2.6 Mathematische Optimierungsverfahren.....	44
3 Voruntersuchungen .....	51
3.1 Aktuelle Ansätze zur Prozessregelung beim Tiefziehen .....	51
3.2 Der Platinenkanteneinzug als Regelgröße .....	55
3.3 Grundlagen der modellbasierten Regelung .....	57
4 Motivation und Zielsetzung der Arbeit .....	60
4.1 Motivation.....	60
4.2 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit.....	61
5 Neuartige Methodik zur Regelung des Tiefziehprozesses .....	64
5.1 Verwendete Versuchsgeometrie .....	64
5.2 Verwendetes Versuchswerkzeug .....	65
5.3 Verwendete Sensorik .....	66
5.4 Verwendete Aktorik.....	70
6 Architektur und Inbetriebnahme der Hard- und Software .....	73
6.1 Architektur der verwendeten Steuerungshardware und ihre Signalflüsse.....	73
6.2 Architektur der verwendeten Software .....	76
6.3 Inbetriebnahme der mechatronischen Komponenten .....	80
6.4 Inbetriebnahme der Regler und Einstellung der Reglerparameter .....	84

---

7	Modellbildung .....	89
7.1	Herleitung des Regelungsansatzes .....	89
7.2	Zargenspannung als Führungsgröße im Tiefziehprozess .....	92
7.3	Bestimmung der Zargenspannung in der FE-Simulation .....	99
7.4	Die Optimierung und ihre Optimalitätsbedingungen .....	100
7.5	Simulationsansatz zur Berechnung der Sensitivitäten und der Solltrajektorien ....	103
7.6	Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Übertragungssystems .....	106
7.7	Berechnung der Solltrajektorien für den Tiefziehprozess .....	111
8	Anwendung des neuartigen Regelungsansatz im Realprozess.....	115
8.1	Versuchsplanung zur Untersuchung der Unterdrückung von Prozessstörungen durch Einsatz des neuen Regelungsansatzes .....	116
8.2	Untersuchung der Auswirkung von Platinenfehlagen auf den geregelten Prozess	118
8.3	Verhalten der Regelung auf Signalebene bei Platinenfehlagen.....	122
8.4	Verhalten der Regelung bei fehlerhaftem Bauteilbeschnitt.....	127
8.5	Verhalten der Regelung bei Veränderung der Beölung auf der Platinenoberfläche	130
8.6	Steigerung der Prozessrobustheit beim Tiefziehen.....	134
8.7	Fehlteilerkennung mithilfe der Zargenspannung.....	137
8.8	Verwendung der Regelung zur Steigerung der Bauteilqualität .....	143
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	147
9.1	Zusammenfassung .....	147
9.2	Ausblick.....	148
10	Anhang .....	152
10.1	Solltrajektorien für den Stahlwerkstoff HC340.....	152
10.2	Metamodell für den Aluminiumwerkstoff AA6016 .....	155
10.3	Materialkarte für den Stahlwerkstoff HC340 .....	157
10.4	Materialkarte für den Aluminiumwerkstoff AA6016.....	158
10.5	Gesamtversuchsplan .....	159
11	Literaturverzeichnis.....	170
12	Curriculum Vitae.....	182

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Lateinische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	[mm <sup>2</sup> ]	aktuelle Fläche
a, l	[mm]	aktuelle Länge
A <sub>0</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	Ausgangsfläche
a <sub>0</sub> , l <sub>0</sub>	[mm]	Ausgangslänge
A <sub>80</sub>	[%]	Bruchdehnung
A <sub>g</sub>	[%]	Gleichmaßdehnung
C	[MPa]	werkstoffabhängige Konstante
C	[-]	Dämpfungskonstante Bewegungsgleichung
D	[-]	Verzerrungsgeschwindigkeitstensor
d	[mm]	Durchmesser Kreisraster Formänderungsanalyse
d <sub>0</sub>	[mm]	Stempeldurchmesser
dF, dP	[N]	Änderung der Kraft
d <sub>m</sub>	[mm]	Mittlerer Napfdurchmesser
d <sub>st</sub>	[mm]	Stempeldurchmesser
D <sup>el</sup>	[-]	Elastischer Anteil Verzerrungsgeschwindigkeitstensor
D <sup>pl</sup>	[-]	Plastischer Anteil Verzerrungsgeschwindigkeitstensor
D <sub>0</sub>	[mm]	Ausgangsdurchmesser der Platine
D <sub>M</sub>	[mm]	Matrizendurchmesser
d(t)	[-]	Störgröße im Regelkreis
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
E	[-]	Green-Lagrange Verzerrungstensor
e	[-]	Eulersche Zahl
e(t)	[-]	Regelabweichung im Regelkreis
e <sub>i</sub>	[-]	Abweichung Regressionsanalyse
F	[-]	Deformationsgradient
F, P	[N]	Kraft
f(x)	[-]	Mathematische Gleichung
F <sub>1</sub> , P <sub>1</sub>	[N]	Kraft in Richtung 1
F <sub>2</sub> , P <sub>2</sub>	[N]	Kraft in Richtung 2
F <sub>BH</sub>	[N]	Blechhalterkraft
F <sub>ges</sub>	[N]	Gesamte Umformkraft

$F_{id}$	[N]	Ideelle Umformkraft
$F_N$	[N]	Normalkraft
$F_R$	[N]	Rückhaltekraft
$F_{rb}$	[N]	Rückbiegekraft
$F_N$	[N]	Normalkraft
$F_{RBH}$	[N]	Reibungskraft zwischen Blechhalter/Platine und Matrixe/Platine
$F_{St}$	[N]	Stempelkraft
$G$	[MPa]	Schubmodul
$G_R$	[-]	Regelstrecke einer Regelung
$G_S$	[-]	Steuerstrecke einer Steuerung
$g$	[m/sec <sup>2</sup> ]	Gravitationsbeschleunigung
$g(x)$	[-]	Ungleichungsbeschränkung
$h$	[mm]	aktuelle Höhe
$h_0$	[mm]	Ausgangshöhe
$h_1$	[mm]	Höhe nach der Umformung
$I$	[-]	Einheitstensor
$h(x)$	[-]	Gleichungsbeschränkung
$k, K$	[-]	Konstante
$K_P$	[-]	Reglerverstärkung
$k_f$	[MPa]	Fließspannung
$k_{f0}$	[MPa]	Spannung bei Fließbeginn bzw. Fließgrenze
$l_1$	[mm]	Länge nach der Umformung
$m$	[kg]	Masse
$m$	[-]	Dimension eines Systems
$n$	[-]	Verfestigungsexponent bzw. Grad einer Gleichung
$p$	[MPa]	Druck bzw. Flächenpressung
$p$	[-]	Grad der L-Norm
$P_i$	[-]	Beliebiger Punkt im Raum
$q$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Flächenlast
$Q_{Plast}$	[-]	Plastisches Potential eines Werkstoffs
$Q(x)$	[-]	Zu optimierendes System
$r$	[-]	senkrechte Anisotropie
$r_{0^\circ}$	[-]	senkrechte Anisotropie unter 0° zur Walzrichtung
$r_{45^\circ}$	[-]	senkrechte Anisotropie unter 45° zur Walzrichtung
$r_{90^\circ}$	[-]	senkrechte Anisotropie unter 90° zur Walzrichtung

R, r	[mm]	Radius
R <sup>2</sup>	[-]	Bestimmtheitsmaß
R <sub>m</sub>	[MPa]	Zugfestigkeit
r <sub>m</sub>	[-]	mittlere senkrechte Anisotropie
R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	Streckgrenze
R <sub>z</sub>	[µm]	Rautiefe
r <sub>ZK</sub>	[mm]	Ziehkantenradius
s	[mm]	Weg bzw. aktuelle Blechdicke
s <sub>0</sub>	[mm]	Ausgangsblechdicke
s <sub>1</sub>	[mm]	Blechdicke nach der Umformung
t	[sec]	Zeit
W	[J]	Arbeit
w	[mm]	Streifenbreite
Δa	[mm]	Längendifferenz
ΔF <sub>a</sub>	[N]	Kraftdifferenz (Formrolle arretiert bzw. feststehend)
ΔF <sub>d</sub>	[N]	Kraftdifferenz (Formrolle drehbar)
Δh	[mm]	Höhendifferenz
Δl	[mm]	Längendifferenz
Δr	[-]	ebene Anisotropie
Δt	[sec]	Zeitdifferent

### Griechische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
dθ	[°]	Winkeländerung
α, γ, θ	[°]	Winkel
β <sub>i</sub>	[-]	Grad der flachen Systemlösung
γ	[-]	Schiebung
ε	[%]	Dehnung bzw. Dehnungstensor
$\dot{\epsilon}$	[sec <sup>-1</sup> ]	Dehnrage
ε <sub>1</sub> , e <sub>1</sub>	[%]	1. Hauptdehnung
ε <sub>2</sub> , e <sub>2</sub>	[%]	2. Hauptdehnung
ε <sub>B</sub>	[%]	Bruchdehnung
ε <sub>gl</sub>	[%]	Gleichmaßdehnung
ε <sub>l</sub>	[%]	Dehnung in Längenrichtung
η	[Nsec/m <sup>2</sup> ]	dynamische Viskosität

$\theta$	[°C]	Temperatur
$\theta_A$	[°C]	Auslagerungstemperatur
$\lambda$	[-]	„oil-canning“ Faktor
$\mu$	[-]	Reibungszahl
$\mu_{ZK}$	[-]	Reibungszahl an der Ziehkante
$\nu$	[-]	Querkontraktionszahl
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\rho_H$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Hagelkorns (Eis)
$\rho_K$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Kugelwerkstoffs
$\rho_L$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$\sigma$	[MPa]	Spannung bzw. Standardabweichung
$\sigma_0$	[MPa]	Eingangszugspannung
$\sigma_1$	[MPa]	1. Hauptspannung
$\sigma_2$	[MPa]	2. Hauptspannung
$\sigma_3$	[MPa]	3. Hauptspannung
$\sigma_{AB}$	[MPa]	Spannungsanteil der Anbiegung
$\sigma_m$	[MPa]	mittlere Normalspannung
$\sigma_{max}$	[MPa]	maximale Hauptspannung
$\sigma_{min}$	[MPa]	minimale Hauptspannung
$\sigma_N$	[MPa]	Normalspannung
$\sigma_{RB}$	[MPa]	Spannungsanteil der Rückbiegung
$\sigma_{SR}$	[MPa]	Spannungsanteil der Seilreibung
$\sigma_v$	[MPa]	Vergleichsspannung
$\sigma_Z$	[MPa]	Zugspannung
$\tau$	[MPa]	Schubspannung
$\tau_R$	[MPa]	Reibungsschubspannung
$\varphi$	[-]	Umformgrad bzw. Formänderung
$\dot{\varphi}$	[sec <sup>-1</sup> ]	Formänderungsgeschwindigkeit
$\varphi_1$	[-]	Hauptformänderung
$\varphi_2$	[-]	Nebenformänderung
$\varphi_b$	[-]	Umformgrad in Breitenrichtung
$\varphi_h$	[-]	Umformgrad in Höhenrichtung
$\varphi_l$	[-]	Umformgrad in Längenrichtung
$\varphi_{max}$	[-]	maximale Formänderung
$\varphi_s$	[-]	Umformgrad in Blechdickenrichtung
$\varphi_v$	[-]	Vergleichsformänderung

**Abkürzungen**

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
RSM	Advanced Response Surface Method
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BHF	Blankholder Force
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CoI	Coefficient of Importance
CoD	Coefficient of Determination
CoP	Coefficient of Prognosis
CSV	Comma Separated Values
D-Regler	Differentialglied eines Reglers
DGL	Differentialgleichungssysteme
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
FÄA	Formänderungsanalyse
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FE-Modell	Finite-Elemente-Modell
FE-Simulation	Finite-Elemente-Simulation
FE-Solver	Finite-Elemente-Solver
FLC	Forming Limit Curve (Formänderungskurve)
FLD	Forming Limit Diagram (Grenzformänderungsdiagramm)
ISO	Internationale Organisation für Normung (Internationale Norm)
I-Regler	Integralglied eines Regler
KVG	Kotflügel ähnliche Versuchsgeometrie
LED	Light Emitting Diode
LHC	Latin Hypercube Sampling
IFU	Institut für Umformtechnik (Stuttgart)
MIMO	Multi Input Multi Output
P-Regler	Proportionalregler
PI-Regler	Proportional Integral Regler

---

PID-Regler	Proportional Integral Differential Regler
PKW	Personenkraftwagen
Pin	Pinole
RSM	Response Surface Method
RWD	Restwanddicke
SISO	Single Input Single Output
SQT	Square Sums Total bzw. Quadratsumme der Abweichungen
SQE	Square Sums Explainable bzw. Quadratsumme der erklärbaren Abweichungen
SQR	Square Sums Residual bzw. Quadratsumme der Residuenstreuung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WR	Walzrichtung
WZG	Werkzeug

## Kurzfassung

Die Fertigung von Karosseriebauteilen steht aus Gründen des Leichtbaus heute vor großen Herausforderungen. Das Gewicht der stets umfangreicheren Komfortausstattung der Fahrzeuge sowie die Akkus zukünftiger, elektrisch angetriebener Fahrzeuge müssen durch den Karosserieleichtbau ausgeglichen werden. Gewichtseinsparungen in modernen Karosseriekonzepten sollen durch den Einsatz von Aluminiumlegierungen sowie hochfesten Blechgütern deren Formänderungsvermögen jedoch eingeschränkt ist, erreicht werden. Auf Grund rascher Modellwechsel im Automobilbau nimmt der Verwendungszeitraum der Umformwerkzeuge kontinuierlich ab. Des Weiteren wird das Design der Bauteile durch markante Karosseriekanten und Designlinien umformtechnisch stets anspruchsvoller. Diese Herausforderungen werden durch den ständig steigenden Kostendruck in der Automobilindustrie aufgrund zunehmender Globalisierung noch weiter verschärft. Um diesem Kostendruck zu begegnen, werden heute in der Automobilindustrie eingesetzte Produktionstechnologien deutlich verbessert und in ihrer Effizienz gesteigert. Dazu gehört auch die Entwicklung neuer Methoden für das Tiefziehen der Karosseriebauteile, um den Ausschuss im Presswerk zu reduzieren und Anlaufprozesse zu beschleunigen.

In dieser Arbeit wurde eine neuartige Methode zur Regelung des Tiefziehprozesses während des Hubs entwickelt und bezüglich ihrer Einsatzfähigkeit untersucht. Sie ermöglicht es den Platinkanteneinzug beim Tiefziehen während des Hubs zu verändern und auf die aktuelle Prozesssituation anzupassen. Damit kann auf Prozessstörungen wie beispielsweise eine fehlerhafte Schmierung der Platine oder Abweichungen der Werkstoffparameter etc. reagiert und diese ausgeglichen werden. Hierdurch kann eine signifikante Reduzierung der Ausschussraten beim Tiefziehen erreicht werden. Dies wird gerade im Hinblick auf die vermehrte Verwendung von hochfesten Stahl- und Aluminiumlegierungen bedeutsamer, da diese Blechwerkstoffe gegenüber konventionellen Tiefziehgütern teurer sind. Der hier verwendete Regelungsansatz beruht auf dem Konzept einer vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung auf Basis eines Meta-Modells. Dieses Meta-Modell wird aus Simulationen mit stochastisch verteilten Parametern gewonnen. Die Zustandsgröße des in dieser Arbeit entworfenen Regelungsansatzes bildet die sog. Zargenspannung. Sie wird dazu verwendet, den Zustand des aktuellen Umformvorgangs während des Hubs abzuschätzen, um anschließend den Platinkanteneinzug anzupassen. Dieser Regelungsansatz ermöglicht es, zusätzlich zur Steigerung der Prozessrobustheit, eine eigenschafts-gesteuerte Regelung des Tiefziehprozesses zu realisieren. Die Solltrajektorien können beispielsweise in Abhängigkeit von der gewünschten plastischen Dehnungsverteilung im Bauteil in Grenzen variiert werden. Die entworfene Regelung wird mithilfe einer SPS-Steuerung mittels eines Versuchswerkzeugs erprobt. Diese Umsetzung erlaubt einen späteren Einsatz des Konzepts in der Presswerksumgebung.

In Anbetracht der stark gestiegenen Anforderungen an den Karosseriebau kann das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren einen Beitrag zur Reduktion des Ausschusses im Presswerk, sowohl im Normalbetrieb, beim Anfahren, bei Chargenwechsel, als auch beim Wiederanfahren nach Prozessstörungen und Pausen, leisten. Durch diese Eigenschaften trägt der entworfene Regelungsansatz zur Lösung der genannten Herausforderungen bei.

## Abstract

For reasons of lightweight construction, the production of car body components nowadays faces major challenges. The weight of the ever more extensive comfort equipment of vehicles and the accumulators of future electrically powered vehicles must be compensated by lightweight car body construction. Weight savings has to be achieved by the use of aluminum alloys and high-strength sheet metal grades. However the formability of such new sheet metal alloys is limited. At the same time, the tool life is continuously decreasing due to more quickly model changes and higher process loads in case of fabrication of AHSS. Furthermore, the design of the body components is becoming more and more complex due to customer demands and modern design features. These challenges are further exaggerated by the constantly increasing cost pressure. In addition, globalization of automotive production, increases cost pressure even more. In order to counteract this, new methods of deep drawing technologies must be developed.

In this work, a new method for automatic controlling of the deep drawing process during the stroke was developed. With this method it is possible to adapt the material flow in the flange area during deep drawing stroke according to the process situation. This allows to react or to compensate process disturbances such as faulty lubrication, deviations in the material parameters, etc. Thus, a significant reduction of the scrap rates during deep drawing is possible. This is particularly important due to the increased use of high-strength steels and aluminum alloys. The adaptive control approach used in current work was designed as a feedforward trajectory follow-up control, which are derived from simulations of multiple deep drawing processes with stochastically distributed parameters. The state variable of the control approach designed in this paper is the so-called part-wall stress. It is used to estimate the present status of forming process during the stroke and to adapt the material flow to the actual needs. Beside an increased process robustness, it allows property-adaptive-controlled closed loop control of the deep drawing process. Depending on the desired plastic strain distribution in the component, the target trajectories can be varied slightly. The designed control loop is implemented within an experimental tool by a Programmable Logical Controller system. This implementation allows a more wide application in different press shop environments and tool applications.

In view of the highly increased demands on car body construction and design, the introduced process delivers a substantial contribution to scrap reduction in car body panel production. In addition, property-controlled forming can increase the capability of components without the need for additional resources. Through these capabilities the designed control approach contributes to encounter these challenges.



## 1 Einleitung

Die Anforderungen an die Fahrzeugkarosserie sind in den letzten Jahren stark gestiegen, wofür verschiedene Entwicklungen maßgeblich sind: Durch die Anstrengungen im Bereich Elektromobilität zur CO<sub>2</sub>-Einsparung im Straßenverkehr, und dem daraus resultierenden Einbau von Batterien mit hohem Gewicht in Fahrzeuge, hat die Bedeutung des Karosserieleichtbaus stark zugenommen. Des Weiteren muss das hohe Gewicht der stets aufwendigeren Komfortausstattungen moderner PKW ausgeglichen werden. Gleichzeitig sind, bedingt durch strengere staatliche Vorschriften, die Anforderungen in Bezug auf Crash-Tests gestiegen. Um den gestiegenen Leichtbau- und Craschanforderungen begegnen zu können, hat der Anteil von Aluminiumlegierungen im Bereich der Außenhaut von modernen Kraftfahrzeugen, sowie der von hochfesten Stahllegierungen im Bereich der Fahrgastzelle zugenommen und wird künftig weiter zunehmen. Diese Werkstoffe sind jedoch in der umformtechnischen Handhabung bedeutend schwieriger zu verarbeiten als konventionelle Tiefziehstähle.

Gleichzeitig zu den bereits beschriebenen Entwicklungen wird das Design der Fahrzeuge stets anspruchsvoller. Durch Gestaltungsmerkmale der Karosserie, wie beispielsweise die sog. „Tornadolinie“ an der Fahrzeugseite sowie die sog. „Zischerlinie“ auf der Motorhaube oder die allgemeine Markanz der Karosserie, werden besonders hohe Ansprüche an den Tiefziehprozess, dessen Methodenplanung sowie an die Umformsimulation gestellt. Auf Grund der geometrischen Anforderungen an moderne Karosserieteile hinsichtlich der zu erzielenden Prozessrobustheit stoßen selbst modernste Methoden der Umformsimulation an ihre Grenzen. Bedingt durch den zunehmenden Einsatz von Aluminiumblechwerkstoffen und von hochfesten Stahllegierungen in Verbindung mit komplizierten Bauteilgeometrien wird das Prozessfenster des Tiefziehens stets enger und die Gefahr des Auftretens von Reißern bzw. Falten stets größer. Diese Schwierigkeiten verstärken sich durch die Bestrebungen zur Gewichtseinsparung mittels Blechdickenreduzierung, da die Faltengefahr im Tiefziehprozess hierdurch erheblich steigt.

Gerade deshalb und aufgrund der stark gestiegenen Anforderungen an den Tiefziehprozess, nimmt der Kostendruck im Werkzeugbau zu. Zudem müssen die Autohersteller neben den Kosten der Fahrzeugentwicklung, auch die Entwicklung der Elektromobilität finanzieren. Solche Zusatzkosten müssen durch Einsparungen in anderen Bereichen, wie beispielsweise im Werkzeugbau oder im Presswerk, ausgeglichen werden. Eine stets stärker verzweigte Modellpalette führt jedoch zu einer steigenden Anzahl an Werkzeugen, die gefertigt werden müssen. Bedingt durch diese Entwicklungen sehen sich die Presswerke mit einer Mehrfachbelastung konfrontiert, die einerseits eine hohe Auslastung der Presswerke bei gleichzeitiger Kostenreduktion erfordert und andererseits die Beherrschbarkeit komplizierter Umformprozesse gewährleisten muss. Darüber hinaus ist die Automobilindustrie im Allgemeinen dazu aufgefordert, ihre Prozesse ökologischer und energieeffizienter zu gestalten. Hierzu bietet sich beim Tiefziehen die Reduzierung des eingesetzten Werkstoffs, welcher als Hauptverursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei metallischen Produkten gilt, an.

Diese komplexen Notwendigkeiten sowie politischen Entwicklungen, welche auf die Umformtechnik einwirken, sind mit konventionellen Methoden kaum lösbar. Deshalb werden zur

Steigerung der Prozessrobustheit bei den Automobilisten und ihren Zulieferern und der damit einhergehenden Reduzierung von Kosten und Werkstoffressourcen, insbesondere bei der Herstellung anspruchsvoller Bauteile aus modernen Blechwerkstoffen, stets größere Anstrengungen im Bereich der Werkzeugtechnik unternommen, diese zu optimieren. Den Anforderungen an den Karosserie- und Werkzeugbau kann nur mit hochentwickelten Methoden begegnet werden, wie bspw. Methoden aus der Industrie 4.0. Hierbei werden vermehrt Methoden zur messtechnischen Qualitätserfassung der Tiefziehbauteile sowie Methoden der Regelungs- und Steuerungstechnik zur Beeinflussung des Platinkanteneinzugs beim Tiefziehen entwickelt. Gerade durch den Einsatz eines Regelkreises zur Vorgabe des Platinkanteneinzugs während des Tiefziehhubs erscheint es möglich, optimal auf die Chargenschwankungen sowie anderen Prozessschwankungen zu reagieren. Dadurch ließe sich der Ausschuss beim Tiefziehen von Bauteilen aus Aluminium- oder hochfesten Stahllegierungen sichtbar reduzieren.

In Anbetracht des dargelegten Bedarfs sowie der beschriebenen Möglichkeiten, diesen Bedarfen zu begegnen, bildet die Entwicklung eines Regelungssystems zur Beeinflussung des Platinkanteneinzugs beim Tiefziehen während des Hubs die zentrale Aufgabenstellung dieser Arbeit. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine vorgesteuerte Trajektorienfolgeregelung entwickelt, welche die Zargenspannung in der Bauteilwand als relevante Zustandsgröße nutzt. Hierbei wird durch die Verwendung eines Metamodells auf Basis der Zargenspannung der momentane Prozesszustand genau geschätzt, um einen korrigierenden und regelnden Eingriff während des Hubs hinsichtlich der erforderlichen Dynamik und Reglercharakteristik zu ermöglichen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Robustheit des Tiefziehprozesses gegenüber Chargenschwankungen sowie Prozessstörungen, wie etwa inhomogene Schmierstoffverteilung, Stick-Slip-Effekt, Durchbiegung, Temperatur oder eine schlechte Flächenpressungsverteilung, zu steigern.

Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit zunächst geeignete Methoden der Regelungstechnik bestimmt, welche eine Regelung des Tiefziehprozesses während des Hubs prinzipiell ermöglichen. Anschließend wurde eine Methodik zur Erstellung eines geometrie- und werkstoffspezifischen Modells des Tiefziehprozesses in Form von Solltrajektorien entworfen. Dieses ist Voraussetzung, um während des Hubes schnell und exakt auf Abweichungen im Prozess reagieren zu können. Dazu wurden die Sensitivitäten des Tiefziehprozesses des untersuchten Versuchsbauteils bestimmt und des Weiteren ein Optimierungsproblem bzgl. der Bauteilqualität und der Prozessgrößen gelöst, dessen Ergebnis das Modell darstellt. Dieses Modell wird danach zusätzlich durch Kalibrierhübe zu Beginn der Experimente verbessert. Dieser entwickelte Ansatz der Modellmethodik ist prinzipiell für jedes Bauteil beim Tiefziehen anwendbar. Jedoch muss für jede spezifische Geometrie ein spezifisches Metamodell entworfen werden. In einem letzten Schritt wurde der entwickelte Regelungsansatz an dem verwendeten Versuchsbauteil, einer Kotflügelähnlichen Versuchsgeometrie (KVG), implementiert und jeweils mit einem zuvor festgelegten Stahl- und Aluminiumwerkstoff erprobt. Untersucht wurden die Funktionsfähigkeit der Regelung im Allgemeinen, sowie die Fähigkeiten bzgl. der Steigerung der Prozessrobustheit. Weitergehend wurden im Rahmen der Regelungserprobung Möglichkeiten der Fehlteilerkennung während des Umformvorgangs entwickelt. Der entwickelte Ansatz soll einerseits eine Reduktion des Ausschusses beim Tiefziehen herbeiführen

---

und andererseits einen entscheidenden Schritt in Richtung der Digitalisierung des Tiefziehens mit modernen datengetriebenen Methoden vorantreiben.

## 2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung, der für das Verständnis dieser Arbeit notwendig ist, diskutiert und erläutert. Das grundlegende Wissen über die Verfahren und Werkzeuge der Umformtechnik sowie das Werkstoffverhalten von Stählen und Aluminiumwerkstoffen wird hierbei vorausgesetzt und ist in einschlägiger Literatur nachzulesen [Doe07, Lan75, Sie15]. Der Fokus der Arbeit liegt auf Werkzeugtechnik zur Herstellung unregelmäßig geformter Blechteile mittels Tiefziehen. Hierbei wird im Besonderen auf Sensoren eingegangen, welche zur Messung von verschiedenen Prozessgrößen, die während des Tiefziehens auftreten, geeignet sind. Es werden verschiedene Rückhaltesysteme für das Tiefziehwerkzeug zur lokal einstellbaren Rückhaltung der Platine während des Prozesses vorgestellt. Diese werden im Hinblick auf die Regelung des Tiefziehprozesses während des Hubs genauer und ausführlicher betrachtet. Ein solcher Regelkreis, begründet in der Komplexität der Problemstellung, besteht aus einer Modellierung des Systems Tiefziehprozess, der Messeinrichtung zur Referenzwertbestimmung sowie der Aktorik zur Beeinflussung des Prozesses. Mit einem solchen Regelkreis kann die Prozessrobustheit des Tiefziehens erhöht, sowie die Bauteilqualität gezielt beeinflusst werden. Es werden mathematisch statistische Verfahren zur Beurteilung von solchen Umformprozessen vorgestellt sowie notwendige Grundlagen der Optimierung und Regelungstechnik zusammengefasst, die für das Verständnis dieser Arbeit von Belang sind.

### 2.1 Herstellung von Blechformteilen mit dem Verfahren des Tiefziehens

Zunächst wird auf das Verfahren des Tiefziehens zur Herstellung von Blechformteilen eingegangen. Dabei werden die verschiedenen Teilaspekte des Verfahrens und seine bestehenden physikalischen Prozessgrenzen betrachtet.

#### 2.1.1 Das Verfahren des Tiefziehens

Tiefziehen ist ein Verfahren der Blechumformung mit indirekter Krafteinleitung, da die Umformkraft nicht direkt in die Umformzone eingeleitet wird. Das Tiefzieheteil selbst wird in verschiedene Zonen unterteilt. Diese Zonen sind der Flansch, die Zarge und der Werkstückboden. Der Ziehflansch des Bauteils ist jener Bereich, in dem die Umformung stattfindet: die sog. Umformzone. Die Zarge überträgt die Kraft, sie wird deshalb als Kraftübertragungszone bezeichnet. Am Werkstückboden wird die Kraft eingeleitet, er bildet die Krafteinleitungszone. Dabei wird eine Platine durch die Überlagerung von Zug- und Druckspannungen bis zum Erreichen des plastischen Zustandes belastet und dadurch umgeformt [Lan02]. Durch die Zugdruckumformung in der Umformzone wird mithilfe des Ziehstempels und der Ziehmatrize aus einer Platine oder einem vorgeformten Hohlkörper ein Hohlkörper mit kleinerem Radius bzw. verkleinertem Umriss erzeugt, Blechdickenänderungen sind hierbei unbeabsichtigt [Re90]. Die klassische Prozessanordnung beim Tiefziehen besteht aus Stempel, Matrize, Blechhalter und Platine. Die dabei benötigten Kräfte für diesen Umformprozess sind die Stempelkraft und die Blechhalterkraft. Während und nach dem Fertigungsprozess wird die umzuformende Pla-

tine als Tiefziehteil oder als Werkstück bezeichnet [Sie55]. Der Flansch bildet hierbei jenen Bereich des Tiefziehteils, welcher sich während des Umformprozesses zwischen dem Blechhalter und der Matrize befindet und mit der Blechhalterkraft  $F_{BH}$  beaufschlagt wird. Häufig hat die Bauteilzarge erst relativ spät im Prozess Kontakt mit der Matrizenform. Dabei bildet der Bauteilboden den Bereich des Werkstücks, welcher mit dem Stempel während des gesamten Ziehvorgangs Kontakt hat und zugleich die Kraft für die Umformung in das Bauteil eingebracht wird. Das Tiefziehen gehört zu den Verfahren, bei denen die Kraft mittelbar in den Prozess eingeleitet wird. Dies bedeutet, die Kraft wird nicht direkt in die Umformzone eingeleitet, sondern in einem anderen Bereich und somit in den Bereich der Umformzone übertragen.

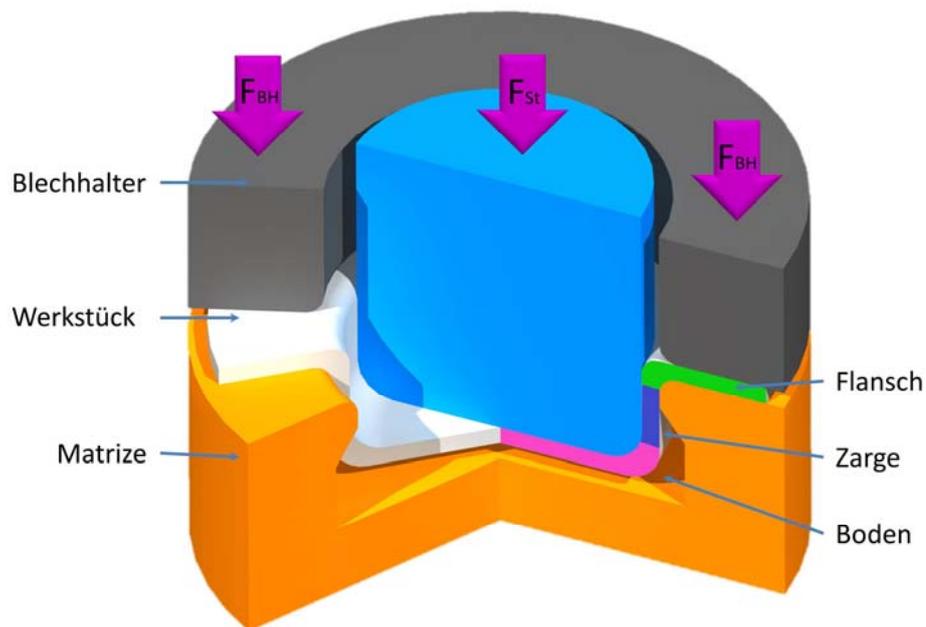


Abbildung 1: Tiefziehwerkzeug mit Stempel, Blechhalter, Matrize und umzuformender Platine benannt nach [Lan02].

Zu Beginn des Tiefziehprozesses wird die Platine durch den Blechhalter fixiert, anschließend beginnt der Stempel die Platine umzuformen. Diese Prozessphase ist vor allem durch das Streckziehen dominiert. Der eigentliche Tiefziehvorgang beginnt, sobald eine Relativgeschwindigkeit zwischen Platinenrand und Blechhalter eintritt und sich der Umriss des Ziehflansches verkleinert [Doe07].

### 2.1.2 Spannungsverteilung im Bauteil

Die beim Tiefziehen auftretenden Spannungen im Bauteil variieren je nach Bauteilzone. Sie lassen sich besser verstehen, wenn das Volumenelement eines umgeformten oder eines teilgezogenen Napfes betrachtet wird. Im Flanschbereich überlagern sich nach [Doe07] drei verschiedene Spannungen, dort herrschen radiale Zug-, tangential Druck- sowie normale Druckspannungen. Diese Spannungsverteilung führt zu einer Streckung des Werkstoffs in radialer Richtung sowie zu einer Stauchung in tangentialer Richtung. Die tangentialen

Druckspannungen erreichen am Flanschrand ihr Maximum, während die radialen Zugspannungen nach außen hin abnehmen und sich am Flanschrand gegen Null entwickeln. Ohne Blechhalter würde diese Druckspannung zu einem Ausknicken des Werkstoffs im Flanschbereich führen, bzw. zur Faltenbildung [Sie15] der ersten Art führen. Entgegengewirkt wird dieser Faltenbildung bzw. diesem Ausknicken durch die Kraftbeaufschlagung des Bauteils mittels des Blechhalters [Rei90].

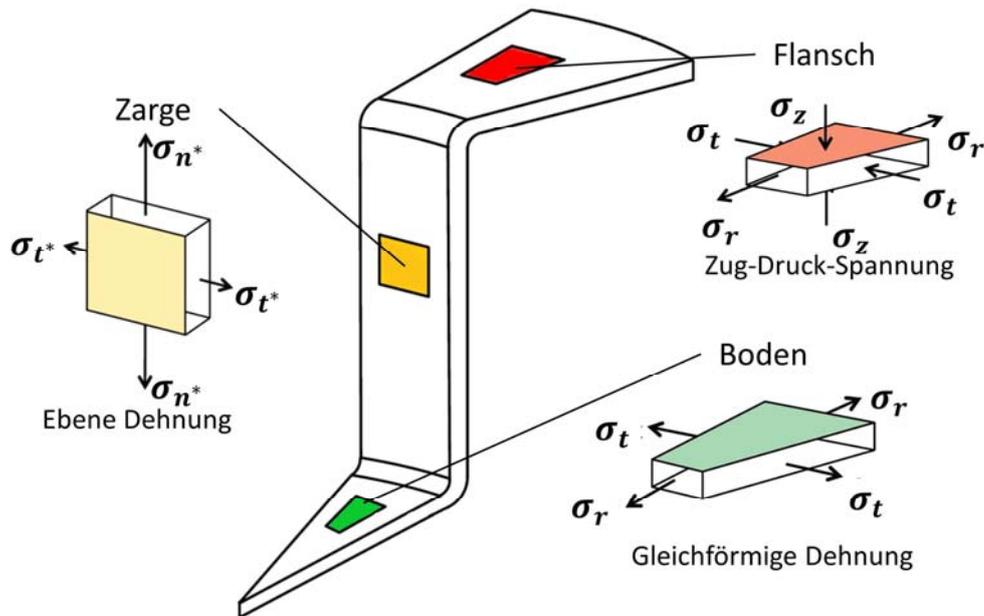


Abbildung 2: Die verschiedenen Spannungen bei der Umformung eines Blechvolumenelements eines Napfes nach [Sie15].

Im Zargenbereich liegt eine Zugspannung in Blechrichtung sowie eine weitere Zugspannung in tangentialer Richtung an, dabei ist die Zugspannung in normaler Richtung auf die Funktion der Zarge als Kraftübertragungsglied zwischen der Umformzone und dem Bauteilboden zurückzuführen [Doe07]. Der Bereich der Stempelrundung verbindet die Zarge mit dem Bauteilboden. Die Kräfte und Spannungen während des Tiefziehens sind in Abbildung 2 illustriert.

### 2.1.3 Prozessgrenzen und Versagensarten beim Tiefziehen

Für eine schlüssige Robustheitsprognose für das Tiefziehen ist eine genaue Definition der Versagensarten des Umformvorgangs notwendig. Für die Umformverfahren sind folgende Versagensarten beim Tiefziehen klassifiziert [Lan02]: Reißen, Falten erster Art, Falten zweiter Art, Dünnzug und dimensionale Abweichungen durch Rückfederung. Des Weiteren führen bei Außenhautteilen Oberflächenfehler zu Nacharbeit oder Ausschuss, dazu sind Einfallstellen und Beulen, Anhieb- sowie Nachlaufkanten, Riefenbildung und mangelnde Bauteilausstreckung zu nennen [Emr13]. Bei unregelmäßig geformten Bauteilen stellt das gemeinsame Auftreten von Falten und Reißen den häufigsten Grund für Versagen bzw. Ausschuss dar [Str82]. Eine Kennzahl für die technische Herstellbarkeit von rotationssymmetrischen Bauteilen stellt das sog. Grenzziehverhältnis dar. Beim Tiefziehen wird es durch den Quotienten aus

dem Außendurchmesser  $D_0$  der Ronde und dem Stempeldurchmesser  $D_{St}$  des Umformstempels definiert, wobei das Bauteil ohne Versagen herstellbar sein muss [Lan02]. Eine Übersicht über einige Versagensarten ist in Abbildung 3 dargestellt.

$$\beta_0 = \frac{D_0}{D_{St}} \quad (1)$$

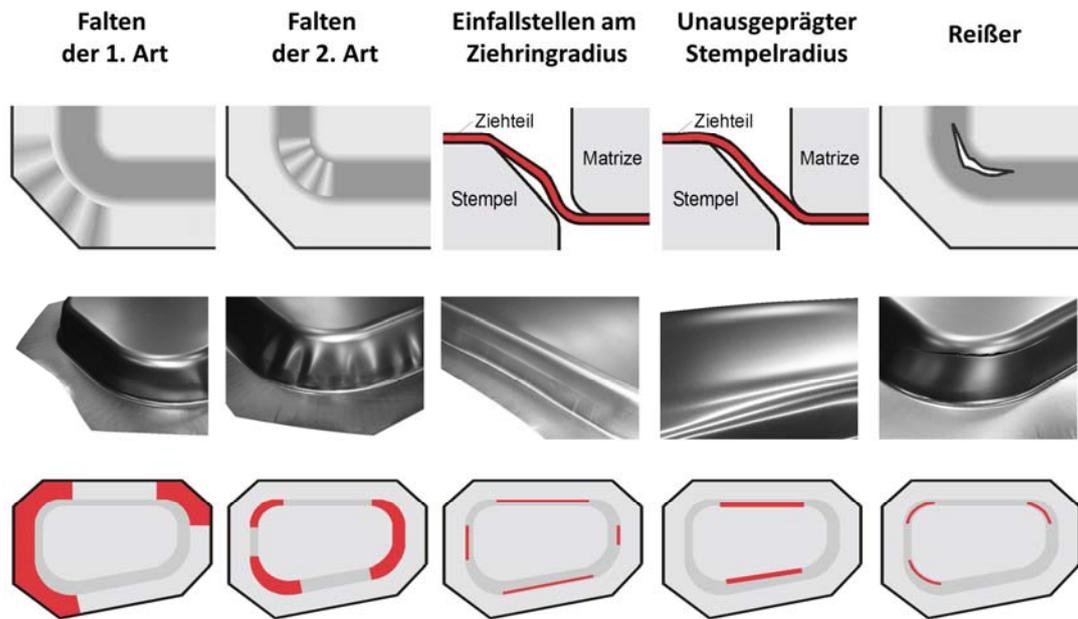


Abbildung 3: Die verschiedenen Versagensarten beim Tiefziehen nach [Lan02].

### Reißer und Einschnürung

Reißer und Einschnürungen gehören zu den Hauptursachen für Bauteilversagen beim Tiefziehen. Erreicht wird diese Grenze des Tiefziehens, sobald die Umformkraft  $F_{ges}$  nicht mehr über die Zarge bis in die Umformzone schadensfrei übertragen werden kann [Rei90]. Die Rissinitialisierung findet hierbei im Bereich der geringsten Blechdicken bzw. im Bereich der größten Blechdurchdünnungen statt. Überwiegend befindet sich der Bereich der größten Blechdurchdünnung, somit der Rissinitialisierung, im Übergang zwischen Stempelkantenrundung und Zarge [Lan02], wobei in neuer Fachliteratur die Stempelkantenrundung auf der Zargenseite als Ort der Rissinitialisierung genannt wird [Bir13]. In der Umformzone, d.h. im Bereich des Ziehkantenradius, kann in aller Regel aufgrund des günstigen Formänderungszustands in Bezug auf die erreichbare Grenzformänderung kein Reißer auftreten. Die größte Ausdünnung tritt an der Anhebungsstelle des kleineren der beiden Werkzeugradien auf, d.h. ist der Matrizeneinlaufradius kleiner als der Stempelkantenradius, so tritt ein Reißer im Anhebbereich der Matrize auf [Doe10].

### Falten erster Art

Bei Faltenbildung im Ziehteil wird zwischen Falten erster und zweiter Art unterschieden. Hierbei treten Falten erster Art im Flansch im Bereich des Ziehteilflansches auf, Falten zwei-

ter Art dagegen stets in der Bauteilzarge bzw. im Bereich der freien Umformung. Ursächlich für die Entstehung von Falten erster Art sind zu hohe tangentiale Druckspannungen im der Rückhaltung der Platine [Doe07]. Demzufolge muss, um Falten erster Art entgegen zu wirken, die Blechhalterkraft erhöht oder die Form/Größe der Platine verändert werden, dies jedoch reduziert die maximal erreichbare Ziehtiefe [Spu94]. Hingegen ist die Faltenneigung eines Bauteils hauptsächlich abhängig von der Festigkeit des Werkstoffs, der Blechdicke sowie dessen E-Modul. Je höher die Festigkeit, die Blechdicke und das E-Modul des Werkstoffs sind, desto geringer ist die Faltenneigung während des Umformvorgangs.

### Falten zweiter Art

Falten, welche in der Bauteilzarge auftreten, werden Falten zweiter Art genannt. Diese entstehen aufgrund tangentialer Druckspannungen als Folge der Konizität der Bauteilzarge [Doe07]. Sie treten hauptsächlich bei nicht rotationssymmetrischen Bauteilen auf, beispielsweise bei komplexen Außenhautteilen in der Automobilindustrie, die häufig konische Zargenbereiche aufweisen [Bir13]. Einflussfaktoren auf die Faltenbildung zweiter Art sind die Konizität der Zarge, die Blechdicke sowie der lokale Spannungszustand. Der momentane Spannungszustand im Ziehteil wird durch die Blechhalterkraft und die lokalen Kontaktverhältnisse der Zarge am Stempel bzw. an der Matrize maßgeblich beeinflusst. Falten zweiter Art können daher nur durch eine gezielte Veränderung der Blechhalterkraft, jedoch mit einem Verlust an erreichbarer Ziehtiefe verhindert werden. Je größer der frei überspannte Bereich der Zarge ist, desto größer ist das Risiko für Falten zweiter Art. Falten zweiter Art sind schwierig zu unterdrücken, da der frei überspannte Bereich während der gesamten Umformung keinen Werkzeugkontakt hat [Bir13]. Der Bildungsmechanismus von Falten zweiter Art ist in Abbildung 4 dargestellt.

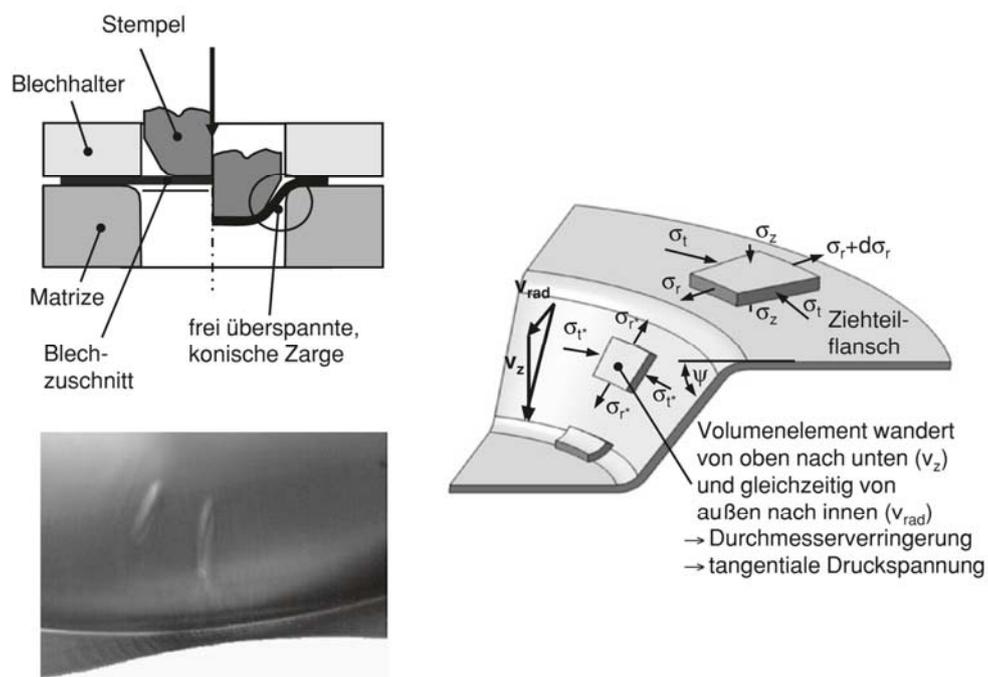


Abbildung 4: Bildungsmechanismus von Falten zweiter Art in der Ziehteilzarge [Bir13].

### Oberflächenfehler des Ziehteils

Bei den Oberflächenfehlern unterscheidet man zwischen mehreren Versagensarten. Hierzu zählen die sog. Anrieb- und Nachlaufkanten, sowie Beulen und Einfallstellen. Anrieb- und Nachlaufkanten treten meistens durch bzw. an zu kleinen Werkzeugradien auf. Anriebkanten sind Folge einer lokal zu hohen mechanischen Biegebelastung durch das Werkzeug bzw. stark plastifizierten Biegekanten auf der Bauteilfläche, welche sichtbare Abdrücke hinterlassen. Nachlaufkanten werden durch die Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Blech und dem daraus resultierenden Oberflächenveränderungen in Laufrichtung verursacht. Beulen und Einfallstellen hingegen sind größere flächenmäßige Vertiefungen, sie ergeben sich aus ungünstigen Dehnungsverteilungen bzw. einer zu geringen Dehnung des Blechs [Lan02].

Alle Versagensarten, ausgenommen Anrieb- und Nachlaufkanten, sind auf Werkstoff- und Schmierstoffeigenschaften sowie Umformparameter zurückzuführen. Bis auf das Vermeiden von Reißern können sie mit einer Anpassung der Blechhalterkraft beeinflusst werden. Diese kann jedoch nicht beliebig erhöht werden, denn eine zu hohe Blechhalterkraft reduziert, wie bereits erwähnt, die Ziehtiefe und verursacht Reißer. Deshalb begrenzen die oben genannten Versagensarten das Prozessfenster des Tiefziehens (vgl. Abbildung 5).

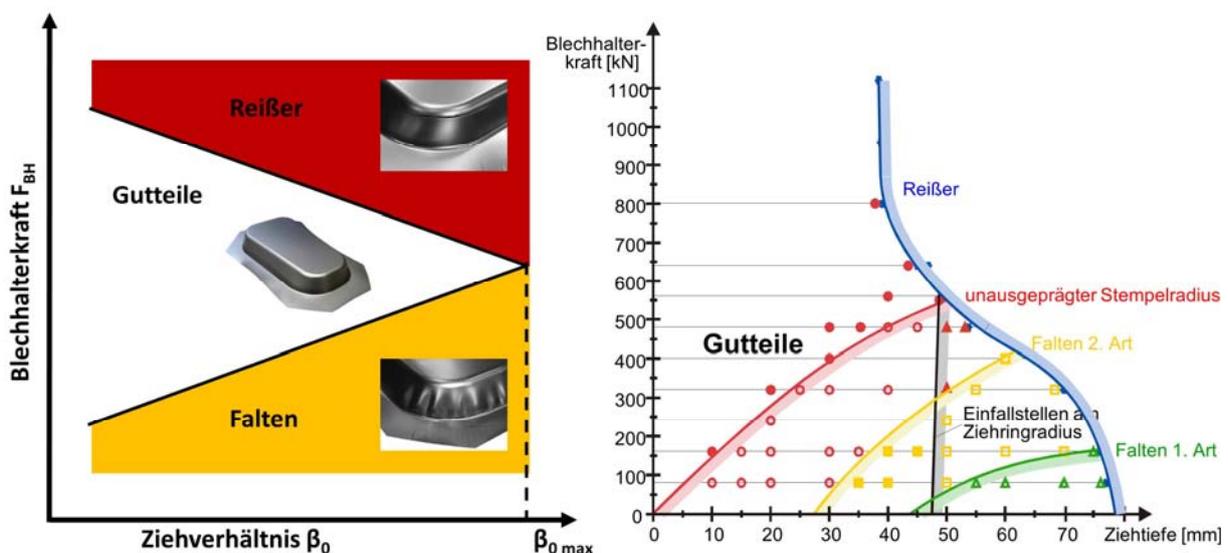


Abbildung 5: Einfluss der Blechhalterkraft auf das Ziehverhältnis nach [Rei90] (rechts) sowie ein Arbeitsdiagramm für eine Kotflügelähnliche Versuchsgeometrie nach [Häu02] (links).

#### 2.1.4 Die Tribologie beim Tiefziehen

Die Tribologie mit den verschiedenen Arten von Reibung, Verschleiß und Schmierung hat eine erhebliche Auswirkung auf das Ergebnis des Tiefziehprozess [Spu94]. Sie bildet eine vom jeweiligen tribologischen System der Blech- und Werkzeugoberfläche abhängige, komplexe Randbedingung [Lan02]. Das tribologische System besteht aus dem Grund- (Werkzeug bzw. Blechhalter) und Gegenkörper (Werkstück bzw. Blechplatte), welche sich relativ zueinander bewegen, sowie dem Zwischenmedium (Schmierstoff) im Spalt zwischen Grund- und

Gegenkörper [Gft07]. Bei der Blechumformung spielen die Reibung und deren Einflüsse, begründet in dem Verhältnis zwischen Volumen und der großen Oberfläche der Blechplatte, eine bedeutende Rolle. Dieser Einfluss nimmt mit der Abnahme der Blechdicke zu. Einerseits ist die Reibung eine verfahrensbegrenzende Größe, andererseits verursacht die Reibung die Temperaturentwicklung beim Tiefziehen sowie den Werkzeugverschleiß [Doe07] und beeinflusst den Kraftaufwand. Im Gegensatz dazu benötigt gerade der Tiefziehprozess eine definierte Rückhaltungswirkung zwischen Blechhalter und Ziehmatrize, um den Prozess erst zu ermöglichen [Sie15 Doe07, Lan02]. Darum bildet die Reibung zwischen Werkzeugoberfläche und Platine in Kombination mit der Blechhalterkraft die Basis für die Rückhaltung beim Tiefziehen. Nach Stribeck [Str92] teilt sich die Reibung zwischen technischen Oberflächen in vier ineinander übergehende Zustände auf: Festkörper-, Grenz-, Misch- und Flüssigkeitsreibung (vgl. Abbildung 6). Einflussgrößen auf die Reibung können dem Umformverfahren, der Schmierung, den Eigenschaften der Reibungspartner sowie äußeren Einflüssen, wie beispielsweise der Temperatur und der Luftfeuchte, zugeordnet werden [Spu94]. Die Mischreibung hat in der Umformtechnik einen großen Einfluss, dies ist ein Kontaktzustand, der sich durch Bereiche der Festkörperreibung sowie der hydrodynamischen Reibung definiert.

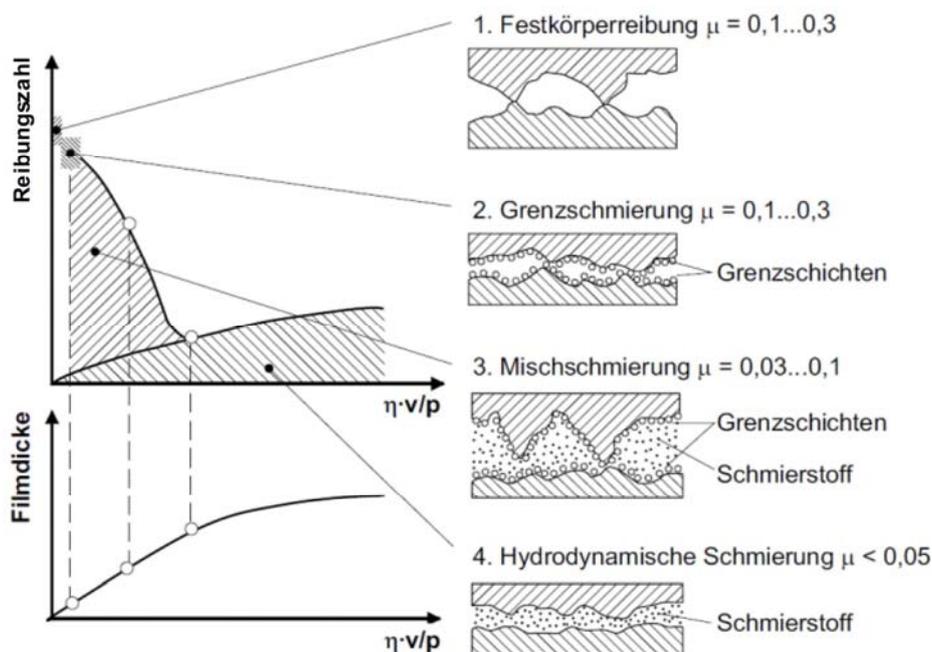


Abbildung 6: Stribeck-Diagramm der Reibung technischer Oberflächen [Klo06].

Die Kenntnis über den Kraft- bzw. Arbeitsbedarf und den daraus resultierenden Spannungen und den Formänderungen im Ziehteil ist von essentieller Bedeutung für die Auslegung des Umformprozesses. Begründet durch den bereits erwähnten Einfluss auf diese Größen, ist zur Beschreibung der Reibung ein mathematisches Modell notwendig. Hierbei hat sich in der Blechumformung das Modell nach Charles Augustin de Coulomb als praktikabel erwiesen.

Das Coulombsche Reibungsmodell beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen der Reibkraft  $F_R$ , welche der Bewegungsrichtung entgegenwirkt, und der Normalkraft  $F_N$  mithilfe der Reibungszahl  $\mu$ . Das Coulombsche Reibungsmodell ergibt sich in der Gleichung zu:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (2)$$

Die wirkenden Spannungen lassen sich analog mithilfe der Reibungsschubspannung  $\tau_R$  und der Normalspannung  $\sigma_N$  beschreiben:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (3)$$

Die Reibungszahl wird als örtlicher und zeitlicher Mittelwert, sowie für den gesamten Umformvorgang als konstant angenommen [Dan84]. Dies ist jedoch eine Annahme, welche die Realität der Reibungsverhältnisse nur unzureichend beschreibt. Die Reibungszahl ist abhängig von dem Betrag der Normalkraft, der Temperatur, der Ziehgeschwindigkeit, der Oberflächentopologie sowie weiterer Faktoren [Lan02, Spu94, Bir13]. Die Reibungszahl verändert sich deshalb zeitlich und örtlich während des Ziehprozesses und wird in diesem Fall von Menge und Art des Schmierstoffs stark beeinflusst [Mül08]. Reibmodelle für die Blechumformung sind bis heute Gegenstand aktueller Forschung, hierbei wird versucht, diese zu erweitern und die Einflussfaktoren (bspw. Temperatur, Druck) zufriedenstellend bzw. besser zu berücksichtigen. Diese erweiterten Reibmodelle werden bisher jedoch häufig nur für spezielle Anwendungsfälle validiert und sind daher nicht allgemeingültig. Bei Veränderung eines reibungsrelevanten Prozessparameters z.B. des Schmierstoffs oder der Oberflächentopologie, ist eine erneute Validierung des Modells notwendig [Mül08].

### 2.1.5 Das Rückhaltesystem beim Tiefziehen

Das Rückhaltesystem beim Tiefziehen wird hauptsächlich durch vier verschiedene Maßnahmen oder deren Kombinationen beeinflusst. Als Einflussmöglichkeiten sind die Platinengeometrie, die Beölung, die Blechhalterkraft und Ziehsicken zwischen Blechhalter und Ziehmatrize zu nennen. In Abbildung 7 sind die hier erwähnten Möglichkeiten dargestellt.



Abbildung 7: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Rückhaltesystems beim Tiefziehen [Sie15].

### Platinengeometrie

Zur Vorgabe des Platinenkanteneinzugs mithilfe der Platinenform bestehen zwei Möglichkeiten, nämlich die Anpassung der Platinaussengeometrie sowie der Platineninnengeometrie (Entlastungslöcher). Bei der Optimierung der Platinengeometrie stehen vornehmlich die Vermeidung von Zieh- und Oberflächenfehlern (Reißerbildung), eine verbesserte Materialausnutzung, sowie eine Reduzierung jener Platinenbereiche, die für das Bauteil selbst nicht mehr benötigt werden, und somit eine vereinfachte Abfallentsorgung während des Umformvorgangs im Vordergrund [Lan02]. Dies hat eine Behinderung des Platinenkanteneinzugs zur Folge. Im Verlauf des Prozesses nimmt die Rückhaltekraft, durch die Reduzierung des Bauteilflansches, ab. Dies verringert die zu verrichtende plastische Formänderungsarbeit und geht deshalb mit einer Verringerung der Umformkräfte einher. Dadurch können vorzeitige Reißen oder Falten in vielen Fällen verhindert werden [Doe07].

Mit einer Veränderung der Platineninnengeometrie unter Zuhilfenahme von Entlastungslöchern wird das Werkstück von unerwünschten Formänderungszuständen bzw. zu hohen Randspannungen entlastet, welche zu einem Versagen auf Grund von Reißern führen können. Diese führen bei richtiger Verwendung zu einem im Sinne der fehlerfreien und maßhaltigen Ausformung günstigen Spannungs- und Formänderungszustand. Des Weiteren ergeben sich durch eine optimierte Platineninnengeometrie Vorteile für die Beschneidemethode, da hierdurch die Abführung des Beschnitts einfacher gestaltet werden kann. Außerdem wird die Platine in Großserie aus rationellen Gründen immer möglichst klein gewählt und dafür das Risiko der Faltenbildung zweiter Art, wegen geringer Rückhaltung, erhöht [Sie15].

### Beölung

Durch die partielle Beölung der Platine können lokal unterschiedliche Reibungsverhältnisse erzeugt werden, wodurch der Platinenkanteneinzug wirkungsvoll beeinflusst werden kann. Eine gezielte lokale Beeinflussung, wie beispielsweise durch Ziehsicken, ist allerdings kaum möglich [Bir13, Lan02]. Neben der Schmierstoffmenge beeinflusst auch der verwendete Schmierstoff die Reibung. Konventionelle Beölungsvor- bzw. einrichtungen in der Produktion beölen die Platine mit einer Walze oder einem Zerstäuber auf der gesamten Fläche gleichmäßig. Die Beölung der Platine kann bei modernen Pressenstraßen sektoriell erfolgen [Sie15]. Dabei werden je nach Bedarf Platinenober- und unterseite, sowie einzelne Platinensegmente unterschiedlich stark beölt. In der Produktion werden heute Ziehöle, Trockenschmierstoffe und Wachse eingesetzt.

### Ziehsicken

Über Ziehsicken kann das Blech am Einfließen in die Werkzeugkavität aufgrund von zusätzlichen Reibungs- und Biegekräften gehindert werden. Die Ziehsicke wird dann verwendet, wenn die Vorgabe des Platinenkanteneinzugs über die Blechhalterkraft zu inakzeptabel geringen Blechhalterkräften führt, eine geringe Bauteilkomplexität vorliegt, ein Ziehen ohne gezielte Flächenpressung ermöglicht oder der Flanscheinzug vollständig verhindert werden soll

[Bir13]. Je kleiner der Radius bzw. je größer die Höhe der Ziehsicke gewählt wird, desto stärker erhöht sich die Rückhaltekraft. Mit einer im Querschnitt eckig geformten Sicke, einer sogenannten Abklemmsicke (vgl. Abbildung 7), wird der Platinenkanteneinzug vollständig unterbunden. Sicken werden vor allem in geraden Bereichen des Blechhalters eingebracht, da hier eine besonders hohe Rückhaltung erwünscht ist [Sie15]. Mithilfe einer Sicke verringern sich die benötigte Blechhalterfläche sowie die benötigte Blechhalterkraft. Zur Verringerung des Verschleißes an den Sickenkanten, werden anstatt einer stark ausgeprägten Sicke oftmals zwei hintereinanderliegende niedrigere Sicken eingesetzt [Lan07].

### Blechhalterkraft

Die Blechhalterkraft bei einem Tiefziehprozess erfüllt zwei wesentliche Funktionen. Zum einen das Unterbinden von Falten erster Art, insbesondere in konkaven Bereichen des Ziehteilumrisses, sowie die Unterdrückung von Falten zweiter Art in der Zarge, vor allem in ihren konischen Bereichen. Zum anderen besteht die Hauptaufgabe darin, den Platinenkanteneinzug zu steuern [Spu94]. Durch Erhöhung der Blechhalterkraft wird der Platinenkanteneinzug erschwert, eine Verringerung bewirkt das Gegenteil. Die Blechhalterkraft kann nicht beliebig erhöht werden, da sonst Reißen auftreten. Eine zu starke Verringerung der Blechhalterkraft führt zur Faltenbildung [Sie15]. Diese Wirkungsweise der Blechhalterkraft ist im Arbeitsdiagramm in Abbildung 5 dargestellt. Die Blechhalterkraft stellt im Zusammenhang mit der Prozesssteuerung und dem sich dadurch ergebenden Prozessergebnis, die wesentliche Einstellgröße dar.

## **2.2 Sensorik zur Überwachung des Tiefziehprozesses und Werkzeugmodifikationen zur Beeinflussung des Platinenkanteneinzugs**

Entwicklungsziele zahlreicher vorangegangener Arbeiten bildeten die Verbesserung der messtechnischen Erfassbarkeit [Bla12, Neu06, Neu11a/b, Fis16] sowie der Steuerung des lokalen [Neu11d, Mor11] Platineneinlaufs in Tiefziehwerkzeugen. Hierbei lag der Schwerpunkt unter anderem auf der Entwicklung neuer Sensor- und Werkzeugtechnologien, der Entwicklung von Software für die Steuerung von Prozessgrößen [End12, Faa09] zwischen den Hüben, sowie auf dem Aufbau von elektrischen Steuerungen, welche ein örtlich gezieltes Einlaufen des Ziehflansches während des Umformvorganges ermöglichen. Prozessschwankungen, hervorgerufen durch veränderte tribologische Eingangsparameter, die Einstellung der Ziehpresse, Chargenschwankungen des Blechwerkstoffs oder Erwärmungseffekte von Umformmaschine und Umformwerkzeug während des Prozesses konnten damit minimiert werden.

### **2.2.1 Relevante Prozessgrößen beim Tiefziehen**

Für eine Regelung des Tiefziehprozesses zwischen zwei Hüben und auch während des Hubes ist es erforderlich, relevante und zudem Bauteilqualität signifikante Prozessgrößen während des Umformvorganges zu messen. Mit dem heutigen Stand der Technik, können folgende Prozessgrößen während des Tiefziehhubs zuverlässig bestimmt werden [Bla12]. Diese können je

nach Eignung für eine Regelung oder eine Qualitätssicherung des Tiefziehprozesses verwendet werden:

- Platinenkanteneinzug
- Dehnungsmessung am Pressengestell
- Stempelkraft
- Ziehkissenkraft
- Reibungskraft zwischen Platine/Blechhalter und Platine/Stempel
- Messung der Umformkraft in der Ziehsicke
- Zargenspannung
- Falten erster Art
- Nachlaufkanten

Die genannten Prozessgrößen können mit verschiedenen Sensoren bestimmt werden, die wichtigsten werden im anschließenden Kapitel beschrieben. Aufgrund der Komplexität des Prozesses sind die meisten Messwerte bzw. deren Zeitverläufe als Einzelgröße nicht dazu geeignet, direkt und unumschränkt Aussagen über den Prozesszustand zu treffen [Bla12].

### 2.2.2 Sensorik zur Erfassung relevanter Prozessgrößen

Die Messung des Platinenkanteneinzugs in Form des Platinenkanteneinzugs, war bereits mehrfach Gegenstand von Untersuchungen des Umformprozesses und wird als sehr vielversprechend angesehen, da er eine aussagekräftige Größe für den Facharbeiter darstellt [Gri00]. Die Messprinzipien für diese Prozessgröße lassen sich in zwei Gruppen einteilen; in die taktilen und die berührungslosen Messprinzipien. Der Platinenkanteneinzug ist das Einlaufen der Platine im Bereich der Rückhaltung während des Tiefziehprozesses in Folge des Platinenkanteneinzugs, dieser folgt einem charakteristischen Verlauf und reagiert sensibel auf verschiedenste Einflüsse. Hauptsächliche Einflussgröße ist die Reibkraft, welche sich aus der Flächenpressung und der Reibungszahl ergibt. Bei Bauteilen mit überwiegendem Tiefziehanteil liefert der Platinenkanteneinzug sehr gute Ergebnisse, bei überwiegendem Streckziehanteil ist die Aussagekraft geringer, da sich die Platinenkante kaum bewegt [Zie98]. Von [Str94] wurde ein Einlaufsensor mit Tastzunge entwickelt, dabei wird die Bewegung der Tastzunge durch einen pneumatischen Zylinder realisiert. Die eigentliche Messung des Kanteinlaufs findet mittels eines induktiven Wegaufnehmer statt, welcher die Bewegung der Tastzunge misst. Ein spezifischer Nachteil dieses Messprinzips ist das mögliche Einklemmen der Tastzunge. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Messung des Platinenkanteneinzugs mithilfe eines Rollkugelsensors zu erfassen [Gri00]. Dabei wird die Bewegung des Blechs durch Reibschluss mit dem Sensor gemessen, das Prinzip entspricht dem einer Computermaus.

Die Nachteile dieser Sensoranordnung liegen einerseits darin, dass der Blechhalter geschwächt werden muss, um Kontakt zwischen Platine und Sensor herzustellen, andererseits kann der Sensor leicht verschmutzen. Zudem muss stets Rollreibung vorherrschen, dies kann aber gerade bei starker Beölung des Blechs nicht stets gewährleistet werden. Zur Vermeidung dieser Probleme wurden in jüngerer Zeit berührungslose Messsysteme entwickelt [Bla12].

Bei den berührungslosen Messsystemen zur Messung des Platinenkanteneinzugs existieren verschiedene Messprinzipien. [Brä04] verwendet Lasertriangulation zur Messung des Kanteneinlaufs, dabei trifft ein Laserstrahl durch den Ziehspalt auf den Rand der Platine. Durch die Wegänderung wird der Reflexionswinkel verändert, daraus kann der Einlaufweg der Platine bestimmt werden. Als Nachteil dieses Messprinzips erweist sich im praktischen Betrieb die mögliche Verschmutzung des Sensors sowie eine falsche Reflexion am Schnittgrat.

Ein bei [Kra16] und [Hei17] verwendetes Messprinzip für die Erfassung des Platinenkanteneinzugs stellt die Messung entlang des Umrisses des gesamten Bauteils dar. Somit kann die Messempfindlichkeit gegenüber der punktuellen Messung des Platinenkanteneinzugs verbessert werden, diese Methode der Messung ist in Abbildung 8 dargestellt. Hierbei ist links das umgeformte Bauteil in der Messvorrichtung und rechts ein vermessener Ausschnitt des Bauteils mit dem gemessenen (grün) und prognostizierten (rot) Ziehteilumriss, zu sehen. Dabei erfolgt die Vermessung des Bauteilumrisses mithilfe eines optischen Messsystems ATOS der Firma GOM.

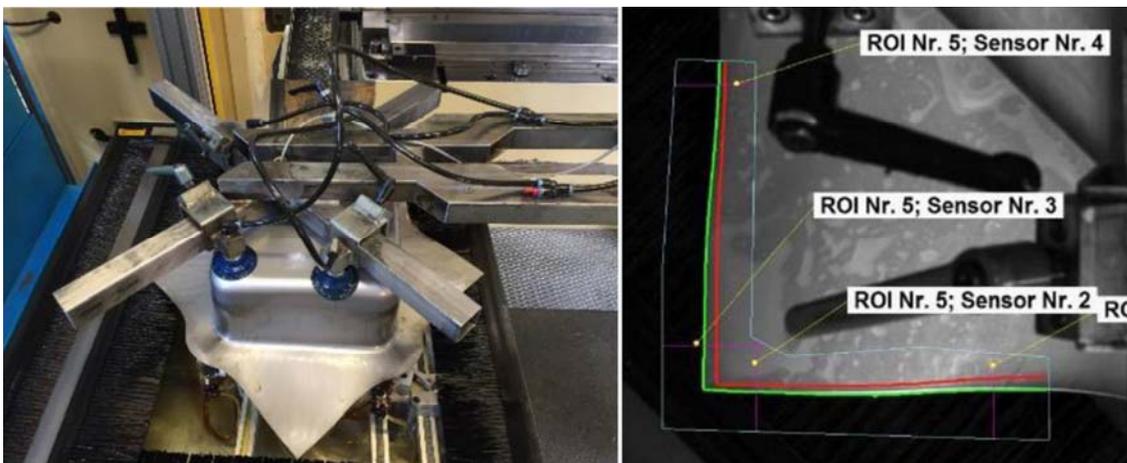


Abbildung 8: Ausschnitt einer Messung des Platinenkanteneinzugs entlang des gesamten Bauteilumriss [Hei17].

Rittmeier hingegen setzt zur Einlaufmessung einen Charge-Coupled-Device-Sensor (CCD-Sensor) ein. Dessen Messposition befindet sich zwischen Laufsicke und der Matrizenkantenrundung, dabei wird durch eine Bohrung senkrecht zur Laufrichtung die Flanschoberfläche mit einem Laser beleuchtet. Die reflektierten Strahlen werden dabei als hell/dunkel-Muster durch einen CCD-Sensor erfasst. Dieses Interferenzmuster bewegt sich synchron zum Einlauf der Platinenkante, wobei der Einlaufweg mithilfe einer Integration sehr einfach und schnell berechnet werden kann [Rit07].

Nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert der Complementary metal-oxide-semiconductor – Sensor (CMOS-Sensor) von [Doe02, Yun05]. Hierbei erfasst der Sensor die Änderung der Blechoberflächenstruktur und berechnet daraus die Flanschbewegung, dies basiert auf dem Prinzip einer optischen Computermaus. Durch eine Bohrung kann die Flanschoberfläche optisch als hell/dunkel-Struktur erfasst werden, ein Bildverarbeitungsprogramm berechnet daraus die Bewegungsgeschwindigkeit sowie den zurückgelegten Weg. Der CMOS-Sensor sowie

der CCD- Sensor besitzen dieselben Nachteile, ihre Anordnung verursacht eine Schwächung des Blechhalters und die Sensoren können leicht verschmutzen [Bla12].

Ein weiterer sog. Dünnschichtsensor ( $t=9\ \mu\text{m}$ ) zur Messung des Platinkanteneinzugs wurde von [Bie10] entwickelt. Dieser besteht aus einer piezoresistiven, hydrogenisierten Kohlenstoffschicht, einer Chromschicht sowie einer Deckschicht aus Silicium dotiertem, hydrogenisiertem Kohlenstoff. Er wird mittels eines Einsatzes in die Blechhalterfläche integriert und misst den Einlauf auf Basis des piezoelektrischen Prinzips.

Als weiteres Messprinzip zur Erfassung des Kanteneinlaufs wird noch die Messung mittels Induktivität genannt werden. Hierbei wird in die Blechhalteroberfläche eine Spule eingebaut. Deren Induktivität ändert sich je nach Grad der Überdeckung durch das Blech, dadurch verändert sich das induzierte Magnetfeld in der Umgebung der Spule, welches sehr genau messbar ist. [For00] verwendet diese Spule und konnte damit einen Einlaufweg von 100 mm abdecken, außerdem wurde der Sensor in ein Gießharzsystem eingebettet, um den Sensor vor Verschmutzung zu schützen. Der Nachteil dieser beiden Sensoren besteht durch den notwendigen Kontakt mit der Blechoberfläche, dies kann zu einer Beschädigung der Bauteiloberfläche führen. Eine Auswahl der beschriebenen Sensoren ist in Abbildung 9 dargestellt.

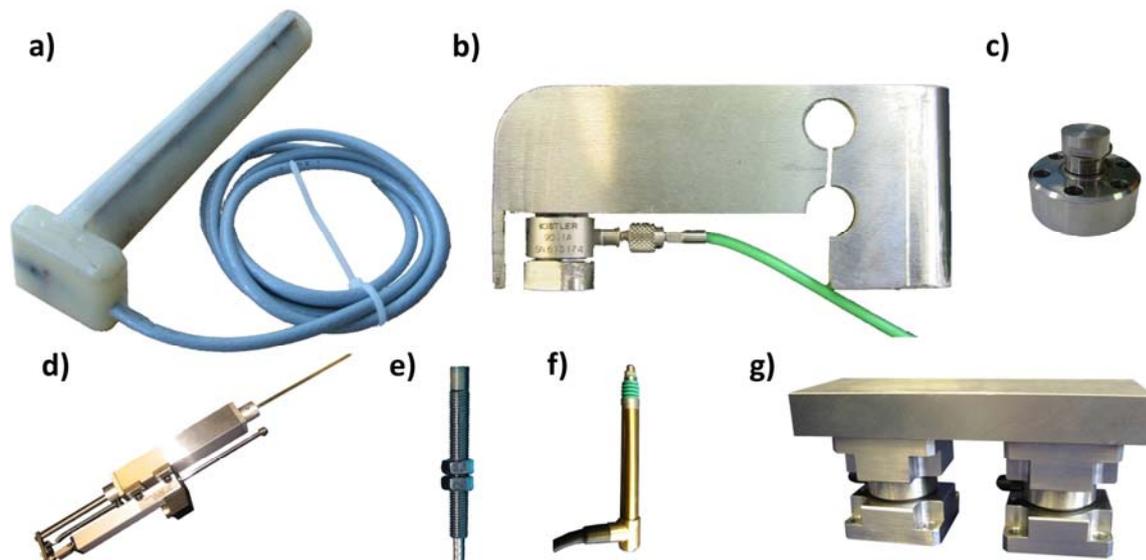


Abbildung 9: Übersicht über verschiedene Sensoren zur Prozessdatenerfassung des (a) Platinkanteneinzugs [For00], (b) der Zargenspannung [Bec04], (c) der Stempelkraft [Hen06b], (d) des Einzugs [Brä02], (e) von Falten [Hen06b], (f) von Falten [Kla94, Zie99], (g) der Reibung [Hen06b].

Eine von zahlreichen Messgrößen zur Absicherung gegen Versagen beim Tiefziehen, stellt die Faltenhöhe erster Art dar. Sie wird durch die Differenz zwischen der Blechdicke und dem Abstand zwischen Blechhalter und Matrize berechnet [Yun07]. Zu Beginn der Umformung entspricht der Abstand exakt der Blechdicke. Mit fortschreitender Umformung entspricht die Differenz zwischen dem Blechhalterspalt und der Blechdicke der Faltenhöhe. Die Messung der Faltenhöhe ist jedoch nur bedingt möglich, da sie durch Blechaufdickung sowie durch die Durchbiegung des Werkzeugs während des Umformvorgangs verfälscht wird [Bla12]. Zur

Messung werden zwei taktile Wegaufnehmer einander gegenüberliegend im Werkzeugflansch positioniert [Yun08].

Um die Entstehung von Falten erster Art messtechnisch bestimmen zu können, wurde von Klamser [Kla94] ein weiterer Sensor entwickelt. Dieser führt mit induktiven Wegaufnehmern sowie einer Tastspitze Messungen der Faltenhöhe im Flansch bei tiefgezogenen Näpfen durch. Hierzu werden induktive Wegaufnehmer gegenüberliegend in Matrize und Blechhalter eingebaut und messen jeweils den Abstand zwischen Platine und Werkzeug beidseitig. Durch Addition der Messwerte kann die Faltenhöhe unabhängig von der Flanschaufdickung und von der Lage der Falte auf dem Flansch bestimmt werden.

Ein Sensor zur Erfassung der in der Zarge des Blechformteils wirkenden Zugspannungen, der sog. Zargenspannung, wurde von Beck [Bec04] entwickelt. Er besteht im Prinzip aus einem Hebel, der auf einer Seite ein elastisches Gelenk aufweist und mittels einer Nut in die Werkzeugwirkfläche eingebracht wird und sich auf einem Piezo-Kraftsensor abstützt. Wird die gemessene Kraft im Sensorabschnitt (Breite 10-20 mm) auf die Blechdicke sowie die Breite des Sensors bezogen, so ergibt sich der Wert der Zargenspannung in Ziehrichtung. Diese Messtechnik sowie die Sensoren wurden zwischenzeitlich weiter optimiert und können heute in allen beliebig gestalteten Ziehwerkzeugen eingesetzt werden [Bla08, Bla10, Lie09]. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über die Sensorik zur Erfassung der Prozessgrößen beim Tiefziehen dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die Sensorik zur Erfassung der Prozessgröße beim Tiefziehen.

Prozessgröße	Sensorik
Platinkanteneinzug	Einlaufsensor mit Tastzunge [Str94, Brä02], Rollkugelsensor [Gri00], Einlaufmessung mithilfe der Induktivität [For00], optischer Stoffflusssensor [Doe02, Yun05, Rit07], laseroptischer Sensor [Brä02, Mun04, Dan09, Neu11a, Neu11b], piezorestriktiver Dünnschichtsensor [Bie10, Neu11c], optische Einlaufmessung entlang des Gesamtumrisses [Kra17, Hei17]
Reibung	Reibungskraftsensor [Zie99, Hen06b]
Zargenspannung	Dehnungsmessung der Zargenoberfläche mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) [Sim89], In-Die-Sensor [Ker97], elektromagnetischer Drehfeldsensor [Alt08], Zargenspannungssensor [Bec04], Zargenspannungssensor als Messdübel [Bla12]
Stempelkraft	DMS [Fen89], Quarzmessunterlegscheibe [Zie99, Hen06b]
Höhe Falten 1. Art	Berührende Messung mittels Wegaufnehmer [Kla94, Zie99], Colpitt-Oszillator mit Wirbelstromsensor [Hen06b]
Höhe Falten 2. Art	Photozelle [Fen89]

Von Ziegler [Zie99] wurde ein Werkzeug zur Herstellung von rotationssymmetrischen Näpfen aufgebaut, welches die Messung der Reibungskraft zwischen Blechhalter und Matrize ermöglicht. Die Ist-Reibungskraft wird über ein in den Blechhalter integriertes Messsegment

erfasst, zusätzlich wird zu jedem Zeitpunkt des Ziehprozesses die Faltenhöhe über einen Falzensensor gemessen. Die besondere Eignung der Zargenspannung als lokale Größe zur Prozessüberwachung konnte mehrfach aufgezeigt werden [Bec04, Sie06].

Bei Heingärtner [Hei11] werden mithilfe von Wirbelstrommessungen die Werkstoffkennwerte des Werkstoffs zerstörungsfrei bestimmt. Dabei wird mit einem Drehstromfeld ein magnetisches Feld induziert, welches gemessen werden kann. Es gibt zwar keinen explizit formulierbaren Zusammenhang zwischen den konventionell ermittelten Werkstoffkennwerten, wie etwa Streckgrenze, Zugfestigkeit etc. und den messbaren Magnetfeldern an, jedoch kann mit multidimensionalen Regressionsalgorithmen bzw. mit dem Konzept des maschinellen Lernens durchaus ein Zusammenhang zwischen den messbaren Signalen und den Werkstoffkennwerten hergestellt werden.

### 2.2.3 Werkzeugmodifikation zur Steuerung des lokalen Platinenkanteneinzugs

Da die manuelle und handwerkliche Einarbeitung starrer Blechhalter auf Tryout- und Produktionspressen stets zeitintensiv ist, wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten unterschiedliche Rückhaltesysteme entwickelt, die nur noch einen reduzierten Einarbeitungsaufwand erfordern und die Reproduzierbarkeit der Prozessführung des Tiefziehens sowie dessen Prozessstabilität erhöhen [Ele01, Häu00, Tho93]. Bei herkömmlichen Blechhalterkonstruktionen von Karosserieziehwerkzeugen wird die Blechhalterkraft direkt in einen möglichst starren, verwindungs- und biegesteifen Rahmen als Gusskörper eingeleitet. Dadurch ergibt sich eine Flächenpressungsverteilung entlang des Bauteilflansches, die durch Tuschieren erzeugt wird und dann während des Prozesses, abgesehen von elastischen Biegedeformationen oder Torsionsverformungen und Verschleiß, möglichst konstant bleibt. Die Option zur gezielten, lokalen Beeinflussung des Platinenkanteneinzugs entlang des Ziehurrisses während eines Pressenhubes ist mit solchen Konzepten jedoch nicht gegeben.

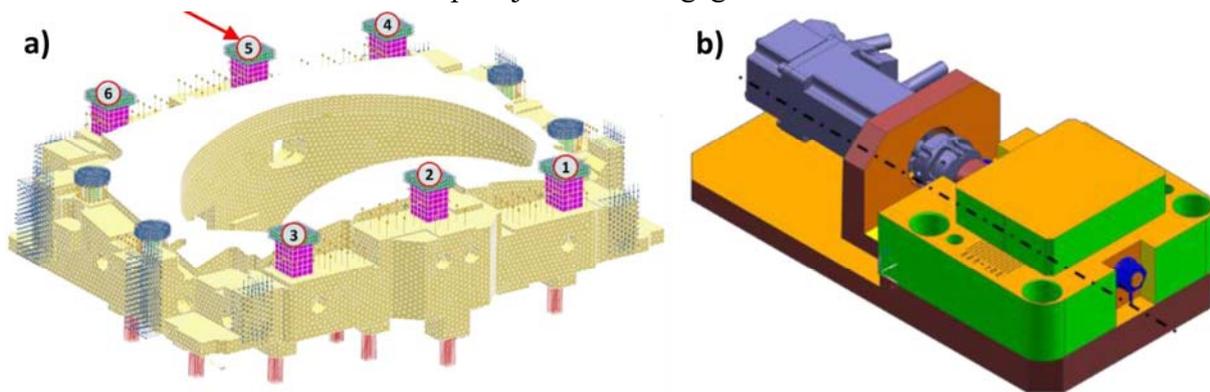


Abbildung 10: (a) Verteilung von variablen Distanzen beim Tiefziehwerkzeug nach [Kra17], sowie (b) eine höhenverstellbare Blechhalterdistanz [Faa09, Mor11, Kra17, Hei17].

Komplexe Bauteilgeometrien und der Einsatz von höher- sowie höchstfesten Stahlwerkstoffen erfordern jedoch nach [Len10] zukünftig entlang des Ziehurrisses optimierte, partiell unterschiedlich hohe Rückhaltekräfte bzw. -kraftverläufe. Moderne Konzepte für Fahrzeugkarosse-

rien machen dies notwendig, um die erforderliche Ziehtiefe des Bauteils und seine Geometrie trotz schwankender Eingangsparameter prozesssicher erreichen bzw. die Ausschussrate so niedrig wie möglich halten zu können. Dazu müssen Rückhaltekräfte entlang des Ziehumrisses und über der Ziehtiefe, d.h. im Verlauf der Prozesszeit, spezifisch einstellbar sein. Wirkmittel, um dies umzusetzen, sind in Abbildung 10 zu sehen.

Mit dieser Zielsetzung folgten in den letzten Dekaden weitere wissenschaftliche Arbeiten, um am Ziehumriss lokal unterschiedliche Einlaufwege der Platine zu erzeugen, wobei eine starre Blechhalterkonzeption möglichst beibehalten werden sollte.

Beim gummielastischen Blechhalter hingegen werden in der Kontaktfläche zur Platine Elastomerplatten eingesetzt [Wit80, Som86, Sto95]. Mit diesem System kann trotz Flanschverdickung eine annähernd gleichmäßige Flächenpressung erreicht werden. Eine gezielte bzw. lokale Steuerung des Platinkanteneinzuges entlang der Ziehtiefe im Sinne einer vorgebbaren Einlaufstrecke der Platinkante in Abhängigkeit von Schwankungen der Prozessparameter, ist jedoch ebenso wie beim hydroelastischen Blechhalter nach Stock [Sto95, Sto97] nicht möglich. Die gezielte bzw. lokale Beeinflussung des Platinkanteneinzugs durch eine entsprechende konstruktive Auslegung der Verrippung eines starr ausgeführten Blechhalters bildet das Grundkonzept des passiv elastischen Blechhalters nach Doege [Doe98a, Bar16a]. Die Steuerbarkeit des Platinkanteneinzugs während des Ziehvorgangs wird jedoch erst durch eine Vielpunktzieheinrichtung und durch kugelförmige Gelenkeinheiten auf den Ziehpinoles ermöglicht. Im Falle dieser Anordnung spricht man von einem aktiv elastischen Blechhalter [Ele01]. Bräunlich [Brä02] verwendete einen Blechhalter aus Stahlplatten mit unterschiedlichen Dicken, welche auf einer Mehrpunktzieheinrichtung ruhen. Rittmeier [Rit07] entwickelte ein Blechhaltersystem für eine Radhausgeometrie, welches die gezielte, lokale Beeinflussung des Platinkanteneinzugs ermöglicht. Der Blechhalter besteht aus einem herkömmlich verrippten Grundkörper, in dem ein definiert elastischer Ringeinsatz mit speziell gefrästen Druckplatten schwimmend auf 16 Gasdruckfedern gelagert wird. Die Blechhaltergrundkraft wird vom Ziehkissen der Presse aufgebracht, die Druckplatten lassen eine am Ziehumriss spezifische Kraftwirkung zu. Dazu sind in Abbildung 11 verschiedene Blechhalterkonzepte, welche mehrfach bei verschiedenen Arbeiten verwendet wurden, dargestellt. Eine gezielte bzw. lokale Steuerung des Platinkanteneinzuges über der Ziehtiefe im Sinne einer vorgebbaren Einlaufstrecke der Platinkante in Abhängigkeit von Schwankungen der Prozessparameter ist jedoch bei allen diesen Systemen nicht möglich.

Eine weitere Gruppe stellen die segmentierten Blechhaltersysteme dar, wobei zwischen diesen Segmenten keine direkten Verbindungen oder Gelenkpunkte bestehen. Die lokale Einleitung der Blechhalterkraft erfolgt jeweils über einen zugeordneten, werkzeuginternen Aktor. Zur Anwendung kommen sowohl Kreisring- als auch Rechtecksegmente, welche eine gezielte Steuerung des Platinkanteneinzugs über der Ziehtiefe ermöglichen [Gri00, Sto88, Yag04]. Da zwischen den Segmenten keine feste Verbindung besteht, zeichnen sich an den Übergangsstellen zwischen benachbarten Segmenten stets Trennkanten ab, die im Bauteilflansch bzw. in der Bauteilfläche zu Laufriefen im Bauteil führen.

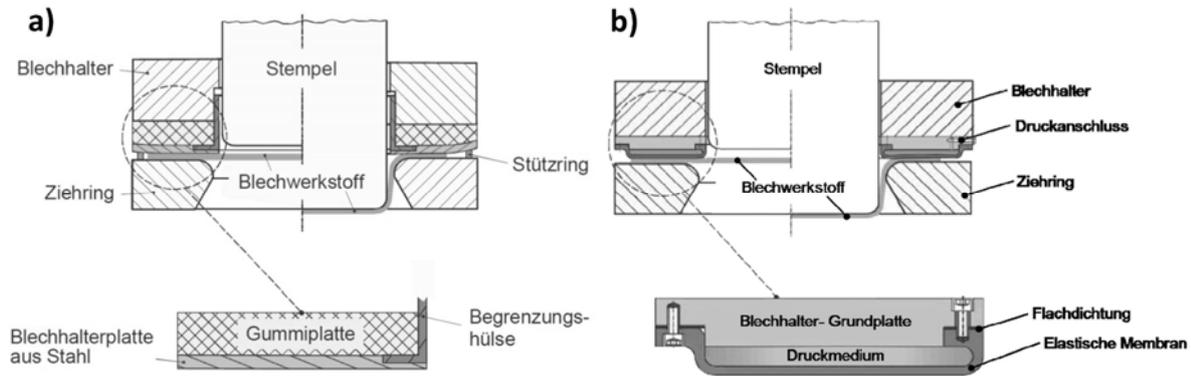


Abbildung 11: (a) Gummielastischer Blechhalter mit Elastomerplatten zwischen Blechhalter und Platine [Som86, Sto95, Wit80], (b) sowie Hydraulischer Blechhalter wobei die Blechhalterkraft durch ein Druckmedium aufgebracht wird [End06, Sto95].

Von Thoms und Schatz [Tho08] wurde die Beeinflussung des Platinenkanteneinzugs durch den Einsatz von piezomechanischen Aktoren untersucht. Dazu wurden Druckplatten (Einsätze) in die Matrizen eines Versuchs- und eines Praxiswerkzeugs integriert. Auf diese Druckplatten kann durch die Piezoaktoren in einzelnen Flanschabschnitten eine lokal veränderliche Druckkraft überlagert werden. Der biegeweiche Blechhalter entsteht dabei durch eine Verkettung biegesteifer Abschnitte mittels definierter Gelenkpunkte (Aussparungen in der Werkzeugverrippung) [Tho93], sodass keine Laufriefen entstehen können.

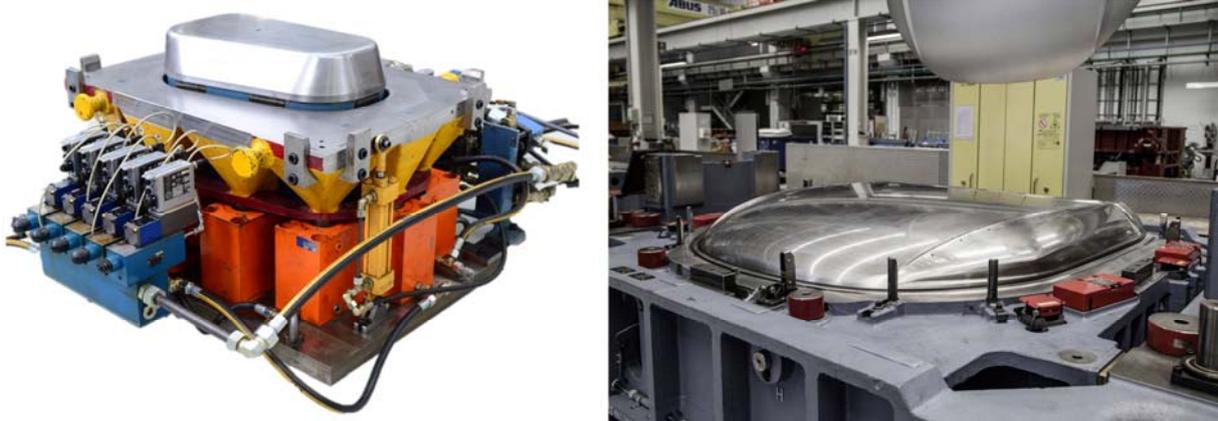


Abbildung 12: Werkzeug mit Segmentelastischem Blechhalter [Häu04] (links), Werkzeug der Fa. Audi mit höhenverstellbaren Distanzen [Faa09, Mork12].

Eine weitere Möglichkeit, die Blechhalterkraft mit einem Aktor zu beeinflussen besteht, durch den Einsatz von sog. „Ziehhilfen“ oder auch Distanzen genannt. Diese werden nach [Faa09, Mor11] bei der Fa. Audi dazu verwendet, die Blechhalterkraft zu verringern. Sie sind entlang des Blechhalterumrisses angebracht und nehmen einen Teil der Kräfte auf, die aktuell zwischen Blechhalter und Matrize herrschen. Sie sind mithilfe eines Servomotors in einer Schrittweite von 0,02 mm höhenverstellbar. Nachteil dieser Aktorik ist, dass sie den gesamten Pressenstößel leicht gegenüber dem Blechhalter verkippt. Somit ist deren Einfluss nur dann gut lokalisierbar, wenn der Blechhalter entsprechend biegeweich ausgeführt ist. In Abbildung

12 sind der Segmentelastischen Blechhalter [Häu04] sowie das verwendete Werkzeug von [Faa09, Mor11] dargestellt.

Zur Aktivierung des Blechhalters während des Ziehvorgangs können neben hydraulischen Aktoren auch entsprechend leistungsfähige Piezoaktoren eingesetzt werden, die direkt unter der Blechhalterplatte Piezoaktoren eingebaut sind. Diese Aktoren dehnen sich nach dem Anlegen einer elektrischen Gleichspannung aus und bringen somit eine Kraft auf, sie wurden in der Arbeit [Brä06, Neu11d] verwendet. Der Vorteil dieser Art von Aktorik ist die sehr gute Steuerbarkeit der aktuatorischen Verstellung des Blechhalters, da diese sich proportional zu der angelegten Spannung verhält. Der Nachteil dieser Art von Aktoren liegt in der Druckempfindlichkeit der Piezokristalle, diese können, vor allem durch auftretende Scherkräfte im Einsatz, schnell zerstört werden.

Ein Versuchswerkzeug mit segmentelastischem relativ, biegeweichen Blechhalter, welcher über eine Zehnpunkt-Zieheinrichtung angesteuert wird, wurde von Häussermann entwickelt [Häu02]. Die Verrippung des segmentelastischen Blechhalters wurde durch 10 Pyramidenstümpfe ersetzt. Sie sind durch eine gemeinsame Grund- und Deckplatte miteinander verbunden. Die Deckplattenabschnitte zwischen den einzelnen Stümpfen fungieren als elastische Gelenkpunkte und ermöglichen eine weitgehende Entkopplung der Flächenpressungen in den einzelnen Flanschabschnitten in den Segmenten. In experimentellen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass durch den segmentelastischen Blechhalter der Arbeitsbereich – gegenüber konventioneller Einpunktziehtechnik und starrem Blechhalter – deutlich erweitert werden konnte.

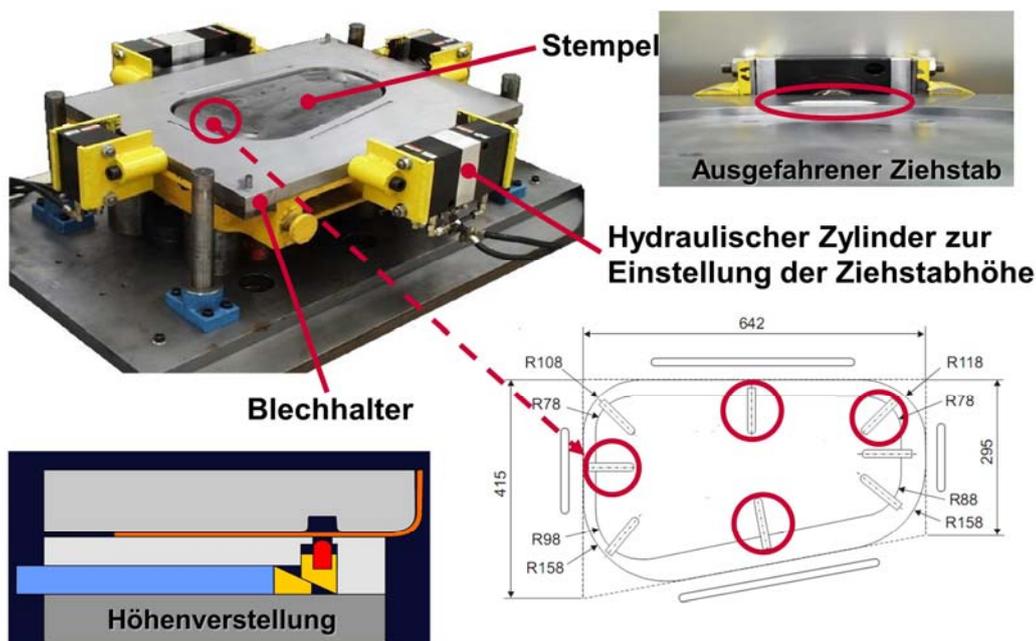


Abbildung 13: Werkzeug mit höhenverstellbaren Ziehsickenstäben [Bec04].

Die erreichbare Ziehtiefe konnte innerhalb der Experimente für den verwendeten Blechwerkstoff von 48 mm bei einheitlich konstanten Blechhalterkräften durch lokal unterschiedliche Blechhalterkräfte auf 68 mm erhöht werden [Bec04]. Die Möglichkeiten den Platinenkanten-

einzug mittels höhenverstellbarer Lauf- und Klemmsicken in einzelnen Flanschabschnitten während eines Pressenhubes zu steuern und dadurch die Bauteilqualität in der Bauteilzarge zu verbessern, wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens von Beck untersucht [Bec04], das verwendete Werkzeug ist in Abbildung 13 dargestellt. In Tabelle 2 ist eine Übersicht über verschiedene variable Rückhaltesysteme mit den dazugehörigen Literaturquellen aufgelistet.

Tabelle 2: Übersicht über verschiedene Variable Rückhaltesysteme/Literaturquellen.

Rückhaltesystem	Beschreibung	Quelle
Gummielastischer Blechhalter	Elastomerplatte zwischen Blechhalter und Platine	[Wit80, Som86, Sto97]
Passiv elastischer Blechhalter	Elastische Verrippung des Blechhalters	[Doe98b, Ele01, Bar16a]
Aktiv elastischer Blechhalter	Einbau von Kurzhubzylindern unter der Blechhalteroberfläche	[Ele01, Brä02, Neu07]
Blechhalter mit Gasfedern	Blechhalterkraft kann örtlich mit Gasfedern erhöht werden	[Rit07]
Hydroelastischer Blechhalter	Blechhalterkraft wird durch Druckmedium in Membran erhöht	[Sto97]
Segmentierter Blechhalter	Blechhalter in Segmente eingeteilt ohne Verbindung	[Mat94, Gri00, Yag04, Tho08]
Biegeweicher Blechhalter	Blechhaltersegmente über Gelenke verbunden	[Tho93]
Segmentelastischer Blechhalter	Verrippung pyramidenförmig, sind über Deckplatte verbunden	[Häu02, Hen06, Bla12, Bar17]
Höhenverstellbare Laufsicken	Laufsicken sind höhenverstellbar	[Sie07, Bec04]
Variable Ziehhilfen	Ziehhilfe ist höhenverstellbar	[Hei08, Faa09, Mor11, Kra17]

In ein Versuchswerkzeug zur Herstellung eines unregelmäßigen Blechformteils wurden zusätzlich zu den höhenverstellbaren Laufsickenstäben vier Zargenspannungssensoren zur Prozessanalyse integriert [Bec04]. Die Höhenverstellung der Laufsickenstäbe erfolgt mittels Kurzhub-Hydraulikzylindern und einem entsprechend ausgeführtem Keilschiebermechanismus [Bec04]. Als Ergebnis der Untersuchungen kann zusammengefasst werden, dass sich hinsichtlich der Robustheit und der Bauteilqualität nur dann ein optimaler Fertigungsprozessverlauf ergibt, wenn die Zargenspannung zu Beginn des Ziehprozesses niedrig gehalten und

erst am Ende auf einen möglichst hohen Wert gesteigert wird, um die Bildung von Falten zweiter Art zu vermeiden [Bec01].

### 2.3 Finite Elemente Simulation des Tiefziehvorgangs

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen und partiellen Differentialgleichungen [Ban00]. Es basiert auf den Grundideen des sogenannten Ritzschen Verfahrens der Variationsrechnung (Prinzip der virtuellen Arbeit) [Mat10]. Auf Grund von Kosten- und Zeitersparnis bei zahlreichen Prozess- und Verformungsuntersuchungen, findet die FE-Simulation in der Umformtechnik seit Ende der 1980 Jahre verbreitete Anwendung. Bei einer simulativen Machbarkeitsuntersuchung wird das zu untersuchende Bauteil mittels einer Software virtuell abgebildet und der geplante Umformprozess mittels numerischer Verfahren berechnet. Somit kann in einer frühen Phase der Werkzeugentwicklung die Machbarkeit einer Werkzeugmethode beurteilt und gegebenenfalls angepasst werden. Auf Grund der hohen Kosten für Werkzeuge und Anlagen sowie dem hohen Zeitbedarf für die Fertigung des gesamten Werkzeugsatzes, spielen Simulationen heute bei der Verringerung von Produktentstehungskosten sowie in der Entwicklung für Umformtechnische Prozesse eine große Rolle [Doe07].

Mittels der FEM können verschiedenste physikalische Probleme gelöst werden, da sie eine Methode zur Lösung von Differentialgleichungen darstellt. Eine zentrale Rolle bei der FEM spielt die sog. Diskretisierung des zu berechnenden Bauteils in viele endliche Teilgebiete, die Finiten Elemente. Daraus leitet sich der Name dieser Methode ab, sie beschreibt das physikalische Verhalten des Elements auf äußere Einflüsse und Randbedingungen. Hierbei werden komplexe Körper in eine endliche Anzahl einfacher zwei- oder dreidimensionaler Elemente heruntergebrochen, welche über Knoten mit ihren direkten Nachbarn verbunden sind. Mithilfe einer Elementsteifigkeitsmatrix kann eine Gesamtsteifigkeitsmatrix unter Verwendung der Randbedingungen (die z. B. aus den Kontaktbedingungen abgeleitet werden können) auf eine invertierbare symmetrisch-positiv-definite Matrix reduziert und dann gelöst werden. Diese Matrix zeigt dann beispielsweise das Verhalten eines Bauteils im Umformprozess [Hor18].

Die Lösung von realen Problemen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode erfordert grundsätzlich drei Phasen::

- Pre-Processing: Datenaufbereitung bzw. Modellbildung
- Gleichungslösung: Berechnung der Gleichungssysteme mittels eines FE-Solvers
- Post-Processing: Auswertung bzw. Darstellung der Ergebnisse

Im Pre-Prozessor wird das virtuell existierende 3-D CAD Modell des zu simulierenden Bauteils, unter Auswahl der Elementgröße sowie der Elementart, vernetzt. Ein Algorithmus erzeugt dieses Netz aus Finiten Elementen, welches die Werkzeug- und Bauteilgeometrie exakt abbildet. Die Finiten Elemente werden für die exakte Abbildung des Umformprozesses mit den passenden Einflussparametern parametrisiert, um damit alle Einflussfaktoren auf den Prozess zu berücksichtigen. Diese Einflussparameter sind beispielsweise die Werkstoffkennwer-

te, das zu verwendende Stoffmodell, die einwirkenden Kräfte, die Temperatur sowie die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, um lediglich die wichtigsten zu nennen [Doe07].

Bei der Modellbildung im Pre-Prozessor bzw. der Diskretisierung des komplexen Körpers in Finite Elemente müssen die Elemente mit ihren Eigenschaften sowie dem Elementtyp definiert werden. In der Umformtechnik werden neben dem Volumenelement verschiedene Schalenelemente verwendet, das Kirchoff Schalenelement sowie das Mindling Schalenelement auch Dickenschalenelement genannt.

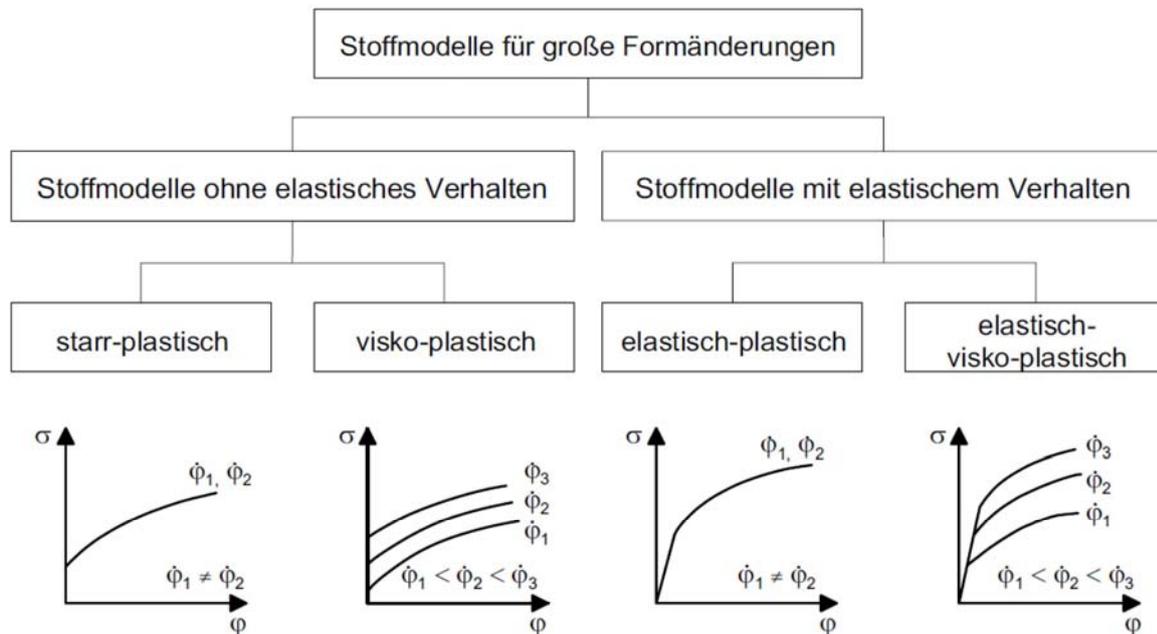


Abbildung 14: Einteilung der Stoffmodelle für große Formänderungen [Lan02].

Die in der Simulation von Blechumformprozessen verwendeten Stoffmodelle für große Formänderungen unterteilen sich in zwei Hauptgruppen: Modelle ohne elastisches Verhalten, sowie Modelle mit elastischem Verhalten, welche die elastischen Werkstoffeigenschaften berücksichtigen (vgl. Abbildung 14). In der Blechumformung sind die elastisch-plastischen Stoffmodelle von Bedeutung, da diese das elastische Verhalten des Werkstoffs berücksichtigen und somit die Rückfederung des Bauteils abbilden [Lan02].

Die Berechnung des Simulationsmodells erfolgt mittels eines FE-Solvers. Grundlage dieser Berechnung ist ein Gleichungssystem, welches aus den einzelnen Finiten Elementen und den Randbedingungen bei der Vernetzung aufgestellt wird. Hierbei werden zwei grundsätzliche Lösungsverfahren unterschieden, das implizite sowie das explizite Lösungsverfahren.

Das oft verwendete implizite Verfahren ist iterativ. Hierbei wird anhand von Konvergenzkriterien der Gleichgewichtszustand in jedem Inkrement ermittelt. Je nach der Nichtlinearität des Systems kann die pro Inkrement erforderliche Anzahl Iterationen stark unterschiedlich sein – im schlimmsten Fall wird evtl. die Konvergenz auch nicht erreicht. Die Konvergenz wird in der Regel anhand der Residuen – total oder relativ – kontrolliert. Diese werden im sogenannten «recovery» Schritt anhand des neu berechneten Verschiebungsfeldes berechnet. Residuen sind in der Numerik die Abweichung der berechneten Näherungslösung eines numerischen

Verfahrens vom Erwartungswert einer Funktion. Sollten diese Residuen außerhalb des Konvergenzkriteriums liegen, wird die Berechnung mit einem korrigierten Gleichungssystem wiederholt. Die impliziten Methoden werden in der sogenannten «aufdatiert Lagrangeschen» Form verwendet. Dabei stellt jedes Inkrement den Referenzzustand für das nachfolgende Inkrement  $t+\Delta t$ . Das Verfahren endet, sobald die festgelegte Abbruchbedingung oder das Ende der Berechnung erreicht ist [Lan02]. Das heute meist verbreitete implizite FEM-Programm im Bereich der Blechumformung ist das Programm AutoForm.

Beim expliziten Verfahren wird das aufgestellte Gleichungssystem mithilfe einer eulerschen Vorwärtsintegration berechnet. Hierbei ist im Gegensatz zum impliziten Verfahren keine Steifigkeitsmatrix, welche beim impliziten Verfahren in jedem Schritt invertiert werden muss. Des Weiteren findet im Gegensatz zum impliziten Verfahren keine Konvergenzkontrolle nach jedem Zeitschritt statt. Deshalb muss aber mit viel kürzeren Zeitschritten gerechnet werden. Bei den expliziten Programmen wird im Bereich der Blechumformung sehr häufig das FEM-Programm LS-Dyna eingesetzt. Dieses wurde auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzt

Nach der Berechnung durch den Solver werden die erhaltenen Ergebnisse im Postprozessor ausgewertet. Hierbei werden die berechneten Ergebnisse mit der Realität abgeglichen, dadurch wird die Aussagekraft der Simulation validiert und es können bei mangelnder Übereinstimmung Anpassungen vorgenommen werden [Lan02].

### 2.3.1 Modellierung des Werkstoffverhaltens

Zur vereinfachten Berechnung von Umformprozessen wird die Plastizitätstheorie herangezogen. Mittels stark vereinfachter Annahmen kann eine annäherungsweise quantitative bzw. zumindest qualitative Behandlung von Umformprozessen durchgeführt werden. Die Elasto-Plastizitätstheorie besteht nach [Doe07] im Wesentlichen aus der:

#### Fließbedingung

Die Fließbedingung beschreibt den Übergang vom elastischen zum plastischen Spannungszustand. Beim einachsigen Spannungszustand ist dies erreicht, sobald die Spannung  $\sigma$  die Fließspannung  $k_f$  erreicht. Im mehrachsigen Spannungszustand stellt sich die Definition dieses Übergangs schwieriger dar. Eine Beziehung zwischen den Hauptspannungen ist notwendig, welche die implizite Funktion:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_f) \leq 0 \quad (4)$$

mit den Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  erfüllt. Diese werden mit einfachen Zug-, Druck- und Scherversuchen ermittelt. Diese Gleichung kann als mathematische Beschreibung einer Fläche im dreidimensionalen Raum der Hauptspannungen interpretiert werden und wird üblicherweise als Fließfläche bezeichnet [Ban00]. Eine mögliche Beschreibung der Fließbedingung ist die Vergleichsspannungshypothese nach v. Mises [Mis28]:

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right)} \leq k_f \quad (5)$$

Für die in der Umformtechnik verwendeten geringen Blechdicken gilt für die dritte Hauptspannung  $\sigma_3 \approx 0$ . Daraus ergibt sich eine vereinfachte Form der Vergleichsspannung  $\sigma_v$  mit:

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2\right)} \leq k_f \quad (6)$$

Moderne Blechwerkstoffe weisen bei der Umformung auf Grund des Walzprozesses ein anisotropes Verhalten auf, die Vergleichsspannungshypothese nach v. Mises gilt jedoch lediglich für isotropes Material. Deshalb wird bei anisotropen Stahlwerkstoffen auf die Fließbedingung nach Hill zurückgegriffen, dazu werden erweiterte Zugversuche in  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung durchgeführt und die Fließbedingung mit diesen Größen ergänzt [Hil48]. Die Vergleichsspannung ergibt sich dann zu:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+90)}{1+r_0}\sigma_2^2} \leq k_f \quad (7)$$

Für Aluminium und hochfeste Stähle wird die Fließbedingung nach [Hil48] verwendet, wobei diese Fließbedingung eine Anpassung des Fließborts an den Fließbeginn im äquibiaxialen Spannungszustand ermöglicht. Die neuesten Beschreibungen der Fließbedingung verwenden analytische Funktionen und beschreiben diese in Abhängigkeit von experimentell ermittelten Stützpunkten. Hierbei sind beispielhaft die verschiedenen Beschreibungen der Fließbedingung nach Barlat [Bar89] zu nennen. Die Fließbedingung ergibt sich entsprechend [Bar03] zu:

$$a|k_1 - k_2|^M + a|2k_1 + k_2|^M + c|2k_2|^M = 2k_f^M \quad (8)$$

mit den Koeffizienten  $k_1$  und  $k_2$  definiert als

$$k_1 = \frac{\sigma_1 - h\sigma_2}{2} \quad \text{und} \quad k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - h\sigma_2}{2}\right)^2 + p^2\tau_{12}^2} \quad (9)$$

wobei  $\tau_{12}$  die Schubfließspannung ist. Die Konstanten  $a$ ,  $c$ ,  $h$  und  $p$  werkstoffspezifische Parameter sind:

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (10)$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \cdot \frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (11)$$

$$p = \frac{\sigma_e}{2} \left( \left| \frac{2}{2a + 2^M c} \right| \right)^{\frac{1}{M}} \quad (12)$$

Hierbei liegen die Vorteile in Fließkriterium nach [Bar89] in der geringen Anzahl an erforderlichen mechanischen Parameter sowie eine relativ gute Vorhersage des Fließortes von Aluminiumlegierungen mit Anisotropie-Werten kleiner als 1 ( $r < 1$ ). Wobei die Nachteile beim Kriterium [Bar89] sind, dass die in der Fließfunktion verwendeten Parameter einer direkten physikalischen Signifikanz entbehren und der Parameter  $p$  nur numerisch mittels Lösung einer nicht linearen Gleichung ermittelt werden kann. Des Weiteren liefert das Modell keine guten Vorhersagen bezüglich der zweiachsigen Fließspannung. Trotz dieser Einschränkungen wird das Barlat-89-Fließkriterium nach wie vor häufig für die FEM-Simulation von Blechumformvorgängen verwendet [Sie15].

Kurz soll auch noch das Fließkriterium [Ban05] erwähnt werden, welches relativ neu ist sich jedoch wachsender Beliebtheit in FEM Anwendung erfreut. Der Fließort wird hierbei mit der Gleichung

$$a(\Lambda + \Gamma)^{2k} + a(\Lambda - \Gamma)^{2k} + b(\Lambda - \Psi)^{2k} = k_f^{2k} \quad (13)$$

Beschrieben. Wobei  $k$ ,  $a$  und  $b$  materialspezifische Parameter sind und  $\Gamma, \Lambda$  sowie  $\Psi$  Funktionen sind, die von den Einträgen des ebenen Spannungstensors abhängen.

$$\begin{aligned} \Gamma &= L\sigma_{11} + M\sigma_{22} \\ \Lambda &= \sqrt{(N\sigma_{11} - P\sigma_{22})^2 + \sigma_{12}\sigma_{21}} \\ \Psi &= \sqrt{(Q\sigma_{11} - R\sigma_{22})^2 + \sigma_{12}\sigma_{21}} \end{aligned} \quad (14)$$

Die Vorzüge des BBC2005-Kriteriums sind die einfachen Formulierungen der Fließfunktionen sowie die gute Vorhersagen zum einen bezüglich der Fließfläche und zum anderen bezüglich der ebenen Verteilung der einachsigen Fließspannung und des einachsigen plastischen Anisotropiekoeffizients. Des Weiteren die gute Übereinstimmung der vorhergesagten Fließfläche mit den Ergebnissen der Strukturmodelle sowie dass die benötigte Rechenzeit für Simulationen von komplexen Blechumformprozessen nicht wesentlich verlängert wird [Sie15]. In dieser Arbeit findet sich auch eine detailliertere Beschreibung des Fließkriteriums.

### Fließregel

Die Fließregel bestimmt die Größe sowie die Richtung der bleibenden Formänderung und dient der Ermittlung plastischer Formänderungsgeschwindigkeiten. Während die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung im elastischen Bereich eindeutig ist, stellt sich dies im plastischen Bereich deutlich komplexer dar, da die Spannung nicht unabhängig vom Dehnhpfad ist [Ma02]. Sie lautet in Ihrer allgemeinen Formulierung [Rus09]:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (15)$$

Hierbei entspricht  $F$  dem plastischen Potential aus der Fließbedingung,  $\lambda$  ist eine skalare Größe. Die Fließregel setzt voraus, dass die plastische Leistungsdichte  $\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$  bei gegebenem  $\dot{\epsilon}_{ij}$  unter fester Fließbedingung maximal sein soll [Doe07].

### Verfestigungsregel

Während der plastischen Formgebung verändern sich die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs, beispielsweise auf Grund von Kaltverfestigung. Dies muss in der Fließbedingung berücksichtigt werden. Diese Anpassung beschreibt das Verfestigungsgesetz, sie hat eine Veränderung der Form der Fließortskurve zufolge, wobei diese Veränderung von der Art der Verfestigung abhängig ist [Ges10]. In Abbildung 15 sind die verschiedenen Verfestigungsregeln dargestellt.

Bei isotroper Verfestigung vergrößert sich die Fließfläche, ohne ihre Position oder Orientierung im Spannungsraum zu verändern. Bei der kinematischen Verfestigung bleibt die Fließfläche konstant, die Position verschiebt sich jedoch in Lastichtung. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass die plastische Verformung nach vorheriger Zugbeanspruchung bei anschließender Druckbeanspruchung auf Grund des sog. Bauschinger Effekts früher einsetzt. Bei anisotroper Verfestigung wird die Fließfläche im Spannungsraum asymmetrisch aufgeweitet. Die beschriebenen Mechanismen der Verfestigung bilden ideale Werkstoffeigenschaften ab. In vielen Fällen zeigen Werkstoffe eine Mischform dieser der Verfestigungsarten [Ges10].

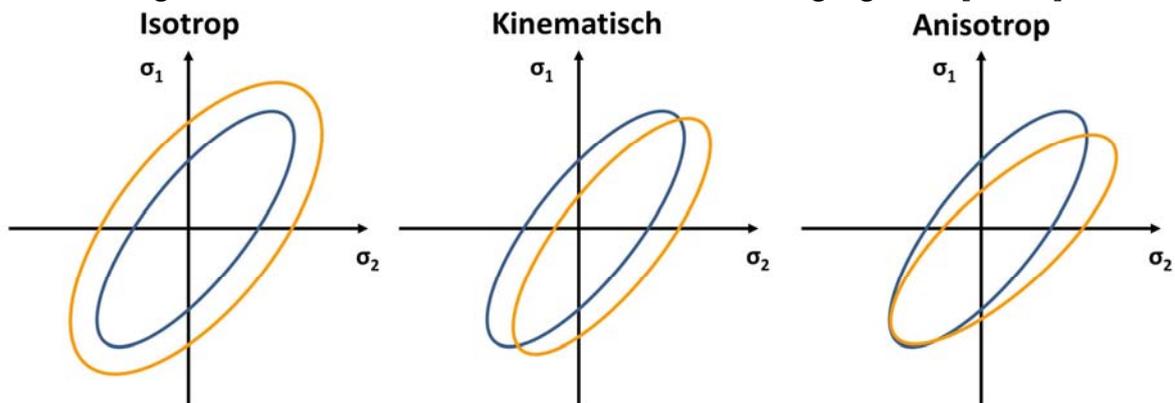


Abbildung 15: Isotrope, kinematische und anisotrope Verfestigungsregel. Blauer Kurvenverlauf vor und orangefarbener Kurvenverlauf nach der Verformung [Ges10].

### 2.3.2 Mathematische Beschreibung der Fließkurve

Da die Fließspannung als diejenige Spannung definiert ist, welche im homogen einachsigen Spannungszustand zum Fließen führt, eignet sich der Zugversuch lediglich für diesen Formänderungsbereich zur Fließkurvenaufnahme. Dies ist nur bis zur Gleichmaßformänderung der Fall, danach beginnt die Probe einzuschnüren und der Spannungszustand wird dreiaxsig. Die Gleichmaßformänderung liegt bei Tiefziehstählen im Bereich  $\varphi_g=0,20\dots0,25$ , bei Aluminiumlegierungen in der Regel darunter [Ban00, Bar03].

Die Formänderungen können in der Blechumformung in Abhängigkeit des Spannungszustandes auch deutlich größer werden, die Fließkurve muss deshalb das Verfestigungsverhalten auch jenseits der Gleichmaßformänderung beschreiben, gerade für die analytische Berechnung und die Finite Elemente Simulation von Umformprozessen. Es wird deshalb auf mathematische Beschreibungen der Fließkurve in Bereichen hoher Formänderung zurückgegriffen.

Mithilfe der nachfolgend beschriebenen Ansätze wird die Fließkurve aus dem einachsigen Zugversuch näherungsweise mathematisch beschrieben.

Die mathematischen Modelle von Hollomon [Hol49], Ludwik [Lud09] und Swift [Swi52] sind sich im Ansatz sehr ähnlich. Die Fließkurve wird mithilfe einer exponentiellen Funktion der logarithmischen Formänderung  $\varphi$  und dem Verfestigungsexponenten  $n$  beschrieben. Der Verfestigungsexponent beschreibt das Verfestigungsverhalten des Werkstoffs. Dieser Ansatz zeigt für niedriglegierte Stähle in Bereichen kurz nach der Gleichmaßdehnung gute Übereinstimmung mit der Realität. Bei hohen Formänderungen nimmt diese jedoch ab, es werden in der Simulation deshalb überwiegend andere Ansätze verwendet. Die verschiedenen Approximationen und Extrapolationen der Fließkurven sind in Abbildung 16 dargestellt.

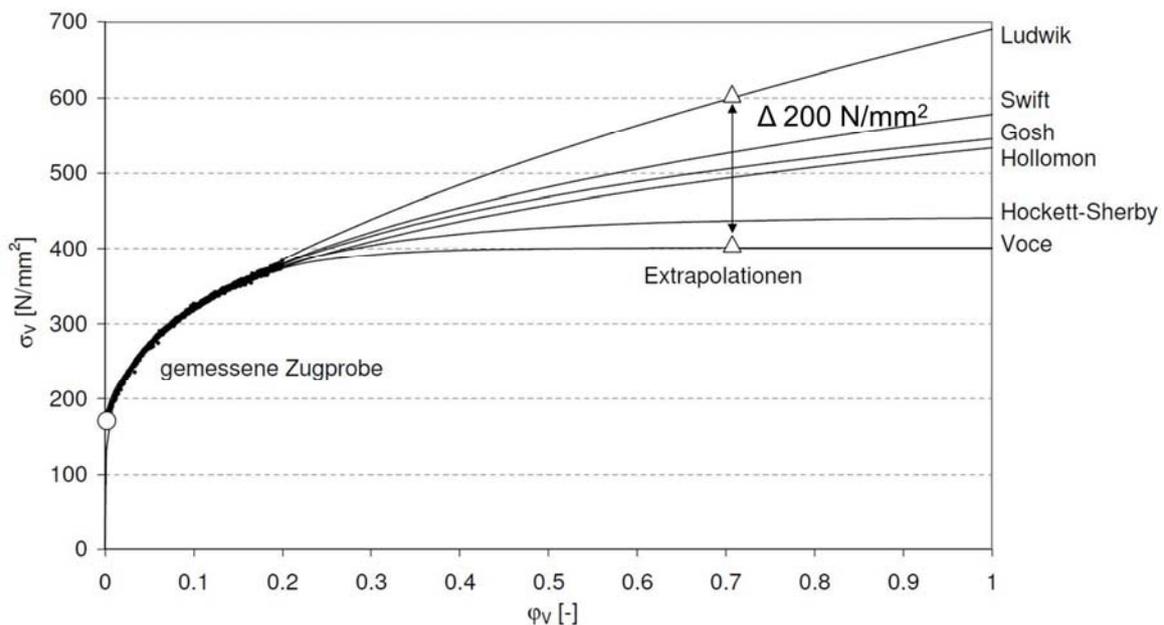


Abbildung 16: Darstellung verschiedener Approximationen und Extrapolationen von Fließkurven nach verschiedenen Modellansätzen [Gro08].

Das Modell nach Ludwik stellt sich wie folgt dar:

$$k_f(\varphi) = a \cdot \varphi^n \quad (16)$$

$$a = R_m \left( \frac{e}{n} \right)^n$$

Problematisch bei Ludwik-Hollomon erweist sich der konstante Verfestigungsexponent, welcher zu einer konstanten Steigung bei  $\varphi=0$  führt, was nicht der Realität entspricht. Bei Swift wird die Gleichung von Ludwik-Hollomon deshalb um den Summanden  $\varphi_0$  erweitert. Dies erlaubt eine Horizontalverschiebung der Kurve. Damit ergibt sich nach [Swi52] folgender Zusammenhang:

$$k_f(\varphi) = a(\varphi_0 + \varphi)^n \quad (17)$$

Der Ansatz nach Hockett-Sherby [Hoc75] ist speziell für Fließkurvenverläufe bei für große Formänderungen entwickelt worden und wird beschrieben durch:

$$K_f(\varphi) = k_{f,s} - (k_{f,s} - k_{f,0})e^{-m\varphi^P} \quad (18)$$

Wobei  $k_{f,0} \approx R_e$  und  $k_{f,s}$  die Sättigungsfließspannung darstellt. Die freien Parameter  $m$  und  $P$  sind werkstoffspezifische Konstanten.

In der heutigen FE Simulation für Tiefziehprozesse wird häufig ein kombinierter Ansatz von Swift und Hocket-Sherby verwendet. Hierbei wird ein gewichteter Durchschnitt der Werte von Swift und Hocket-Sherby berechnet [Ban00]. Die entsprechende Funktion ergibt sich zu:

$$K_{f,komb} = \alpha \cdot k_{f,Swift} + (1 - \alpha) \cdot k_{f,Hockett-Sherby} \quad (19)$$

### 2.3.3 Versagenskriterium in der Umformsimulation

In der Umformtechnik wird heute nahezu ausschließlich das Grenzformänderungsdiagramm als Versagenskriterium herangezogen. Dieses geht auf die Arbeiten von Keeler [Kee65] und Goodwin [Goo68] zurück. Es repräsentiert den Ort der Formänderungskombinationen auf der Oberfläche des Werkstücks messbaren Formänderung  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  im Bereich des einachsigen bis zum biaxialen Streckziehen. In das Grenzformänderungsdiagramm wird die sogenannte Grenzformänderungskurve eingetragen, welche die Grenze zwischen Gutteilen und Ausschussteilen darstellt, lineare Dehnpfade vorausgesetzt. In Abbildung 17 ist eine beispielhafte Darstellung des Grenzformänderungsdiagramms mit den jeweils vorliegenden Formänderungszuständen, zu sehen.

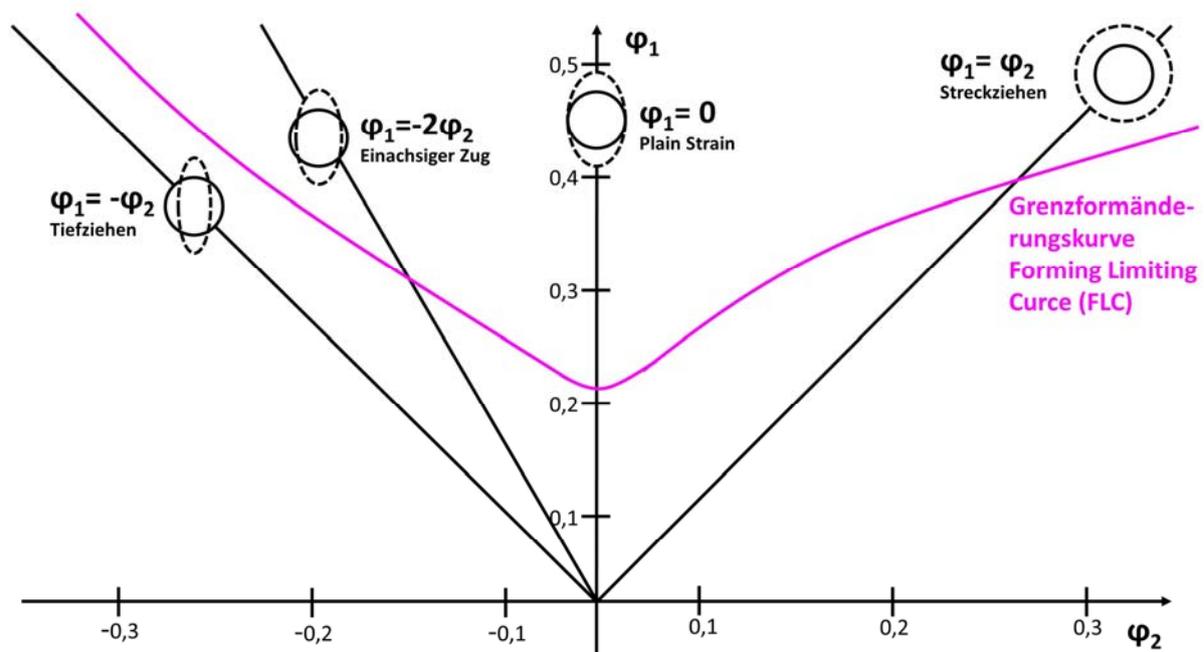


Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung eines Grenzformänderungsdiagramms und der in den jeweiligen Zonen vorliegenden Formänderungszustände.

Die früheste Art des Bauteilversagens, welcher mit der Grenzformänderungskurve berücksichtigt wird, ist die Einschnürung. Es kann statt der Einschnürung auch der Zeitpunkt der Rissinitiierung herangezogen werden, jedoch ist die Einschnürung bei Karosserieteilen ein nicht zulässiger Zustand und daher maßgebend [Ban00]. Sobald die simulativ ermittelte Formänderungsverteilung oberhalb der Grenzformänderungskurve liegt, ist von einem Versagen des Bauteils auszugehen [Lie10]. Dabei wird nach Banabic [Ban00] bei der Bestimmung dieses Diagramms bzw. der Kurve zwischen experimentellen, semi-empirischen und theoretischen Methoden unterschieden. Die experimentelle Ermittlung erfolgt mithilfe von Marciniak- sowie Nakajima Versuchen. Bei der experimentellen Ermittlung nach Marciniak werden die Blechproben mithilfe eines hohlen Stempels und eines Ziehrings biaxial gedehnt. Der Stempel ist hohl ausgeführt, um Reibung zwischen dem Stempelboden und der Probe zu vermeiden, dadurch wirkt keine Normalspannung auf die Probe. Die verschiedenen Dehnungszustände werden mit unterschiedlichen Geometrien der Stempelquerschnittsfläche oder einer Änderung der Taillierung der Proben erreicht [Ban10].

Beim Nakajima-Versuchsaufbau nach [DIN09a] wird ein Stempel in Halbkugelform verwendet, wobei der Probenrand fest eingespannt ist, um einen geradlinigen homogenen und nicht unterbrochenen Formänderungspfad zu gewährleisten. Die Probe ist in ihrer Mitte mit einer definierten Schmierstoffschicht versehen, die derart beschaffen ist, dass ein Riss möglichst in der Probenmitte auftritt. Die verschiedenen Dehnungszustände werden durch unterschiedliche Taillierung der Proben erzeugt. Die Messung der Formänderung wird mittels eines optischen Messsystems und einem auf die Probe aufgetragenen stochastischen Muster vorgenommen. Der Nakajima-Versuch ermöglicht im Gegensatz zum Versuchsaufbau nach Marciniak die Erfassung der Messwerte für einen größeren Dehnungsbereich. Jedoch wirkt sich die Überlagerung von Biegeeffekten aus der Stempelkrümmung nachteilig auf die Messung aus [Ger10]. Die resultierenden Grenzformänderungskurven, welche mit dem Versuchsaufbau nach Marciniak- oder Nakajima ermittelt wurden, weisen marginale Unterschiede auf [Ban10]. Im Grenzformänderungsdiagramm bildet die größte Formänderung  $\varphi_1$  eines betrachteten Stützpunkts die Ordinate und die kleinere Formänderung  $\varphi_2$  die Abszisse. Das Grenzformänderungsdiagramm berücksichtigt dabei beim Tiefziehen auftretende Dehnungszustände, von uniaxialer Zugbeanspruchung über die Plane-Strain-Belastung, bis hin zur reinen Streckziehbeanspruchung, wie in Abbildung 17 dargestellt. Die größere und kleinere Formänderung  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  werden hierbei im ebenen Dehnungsraum gemessen, aus der Volumenkonstanz nach der Formel  $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$  lässt sich die Formänderung in Dickenrichtung  $\varphi_3$  berechnen. Die sich bei der Blechumformung ergebenden logarithmischen Formänderungen ergeben sich nachfolgender Formel zu:

$$\varphi_i = \ln\left(\frac{l_{1,i}}{l_{0,i}}\right) \quad (20)$$

wobei  $l_{0,i}$  die Ausgangslänge des Abschnitts ist und  $l_{1,i}$  die Länge desselben Abschnitts nach der Umformung. Es ist zu beachten, dass per Definition  $\varphi_1$  die betragsmäßig größere und  $\varphi_2$  die zahlenmäßig kleinere Formänderung in der Blechebene darstellt [Lan02].

## 2.4 Simulation mit stochastisch verteilten Parametern

Für das Verständnis von Simulationsprozessen mit stochastisch verteilten Parametern wird hier zunächst der Begriff der Stochastik gegenüber dem Determinismus abgegrenzt werden. Den Gegensatz eines stochastischen Prozesses (lat. *ars conjectandi*, zu Deutsch: Kunst des Vermutens), bildet ein deterministischer (lat. *determinare*, zu Deutsch: abgrenzen, bestimmen) Prozess [Res10].

Werden sehr kleine Änderungen der Systemantwort außer Acht gelassen, sind die Analysemöglichkeiten der FE-Simulation in der Blechumformung rein deterministischer Natur. Das bedeutet, dass bei gleichen Startwerten hierbei annähernd gleiche Ergebnisse erwartet werden. Die einzige Unsicherheit besteht im numerischen Rauschen der Simulation. Es ist somit lediglich möglich, Einzelzustände des Prozesses zu betrachten. Bei den stochastischen Simulationen werden jedoch die Anfangsbedingungen mit einer Wahrscheinlichkeit versehen. Dadurch folgen die so bestimmten Ergebnisse einer Wahrscheinlichkeitsverteilung [Kel99]. Die Auswertung von solchen Simulationsreihen im Hinblick auf die Prozesssensitivität, basiert demnach auf einer Reihe deterministischer Simulationsläufe mit stochastisch variierenden Eingangsgrößen.

### 2.4.1 Samplingverfahren der statistischen Versuchsplanung

Um eine Simulation mit stochastisch verteilten Eingangsgrößen durchführen zu können, ist es notwendig, die besagten Eingangsgrößen zu generieren. Dabei besteht die Schwierigkeit, dies in der Art zu vollziehen, dass einerseits die Eingangsgrößen stochastisch verteilt sind und andererseits die maximal mögliche Erkenntnis gewonnen werden kann. Die verschiedenen stochastischen Eingangsgrößen bilden eine Zahlenmenge, die einzelnen Faktoren. Dieser müsste so bestimmt werden, dass mit möglichst wenigen Simulationsläufen ein aussagekräftiges Ergebnis generiert wird. Die gängigste Methode, dies zu erreichen, sind die sogenannten Samplingverfahren. Diese Samplingverfahren kommen aus dem Themengebiet der statistischen Versuchsplanung, die Design-of-Experiments (DOE) genannt wird. Das Ziel einer DOE ist es, Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ergebnisgrößen von komplexen, mehrdimensionalen Wechselwirkungen herzustellen [Sie10]. Die verschiedenen Eingangsgrößen werden als Parameter bezeichnet. Durch das Aufstellen eines Versuchsplans werden die Zusammenhänge mit einer gewissen Anzahl an Versuchen, in diesem Fall Simulationen, bestimmt. Bei einer optimalen Gestaltung eines Versuchsplans kann mit einer minimalen Anzahl an Simulationen ein maximaler Informationsgewinn erreicht werden [Sie10]. Damit sollen vor allem Zeit und Kosten gespart werden. Jedoch birgt eine zu geringe Anzahl an Simulationen die Gefahr, dass Zusammenhänge nicht erkannt werden bzw. Informationen verloren gehen. Die Wahl der Anzahl der Versuche ist von zentraler Bedeutung [Kle09]. Die für den Versuchsplan gewählten Parameter werden als Faktoren bezeichnet. Die Werte, die von den einzelnen Faktoren eingenommen werden, nennt man Faktorstufen [Kle09]. Sind die Abstände zwischen den Faktorstufen groß, ergeben sich daraus oftmals große Veränderungen im Ergebnis. Sind die Abstände zwischen den einzelnen Faktorstufen zu gering, besteht die Ge-

fahr, dass die Änderungen des Ergebnisses derart klein sind, dass sie im numerischen Rauschen untergehen und daher nicht erfasst werden können. Deshalb wird empfohlen, eher große Stufenabstände zu wählen [Sie10].

Die einfachste Methode der statistischen Versuchsplanung ist der vollfaktorielle Versuchsplan, auch Parameterstudie genannt. Dabei wird lediglich ein Parameter pro Durchlauf verändert [Sie10]. Dies ergibt bei vier zu untersuchenden Objekten (z.B. Werkstückgeometrien) in zwei Stufen (z.B. mit bzw. ohne Schmierung)  $2^4 = 16$  Versuchsläufe. Daher ist diese Methode bei einer hohen Anzahl an Faktoren oder Stufen ungeeignet, da die Anzahl der Versuche relativ groß wird. Ein Verfahren den vollfaktoriellen Versuchsplan in seinem Umfang zu reduzieren, besteht darin, den Versuchsplan um einige Faktorstufen zu reduzieren. Dieser reduzierte Versuchsplan wird dann als teilfaktorieller Versuchsplan bezeichnet. Dazu wird die Methode der orthogonalen Felder verwendet, diese gewährleistet eine möglichst gute Verteilung der restlichen Faktoren. Dabei werden gezielt solche Faktorkombinationen ausgelassen, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie wenig bis gar keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Dadurch wird ein  $2k$ -Versuchsplan zu einem  $2k-p$ -Versuchsplan reduziert.

Aufwändigere Verfahren, wie das Monte-Carlo-Verfahren (MC) oder das Latin-Hypercube-Sampling (LHC), der statistischen Versuchsplanung hingegen, erlauben es, mehrere Parameter bei gleichzeitig relativ geringer Anzahl an Versuchsläufen zu variieren, ohne dabei einen Informationsverlust zu erleiden. Diese zwei Samplingverfahren, sind in der heutigen Computergestützten DOE sehr wichtig und ermöglichen bei einer geringen Anzahl an Versuchsläufen einen hohen Informationsgewinn. Sie haben sich bei den computergestützten Samplingverfahren durchgesetzt, sie sind in vielen Anwendungen als Standard enthalten. Das stochastische Simulationsprogramm OptiSlang [Dyn17] sowie das Umformsimulationsprogramm Autoform mit der stochastischen Ergänzung Autoform Sigma [Aut17], nutzen diese Samplingverfahren.

### Monte-Carlo-Verfahren

Beim Monte-Carlo-Verfahren wird ein  $n$ -dimensionaler Parameterraum erzeugt, wobei  $n$  die Anzahl der Faktoren darstellt und jede Dimension das Intervall des zu streuenden Parameters ist. Aus diesem Raum werden dann bei jedem Simulationsdurchlauf  $n$  Werte, die stochastisch zu streuenden Simulationsparameter, zufällig herausgenommen und damit jeweils eine Simulation durchgeführt [Tel53]. Die Grenzen des Parameterraums sind die Intervallgrenzen der jeweiligen Faktoren, die gestreut werden sollen. Des Weiteren können Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die jeweiligen Parameter in Ihrem Intervall angegeben werden, um das Ergebnis zu verfeinern. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass Wertekombinationen mehrmals verwendet werden und sich dadurch die Anzahl der notwendigen Versuche unnötigerweise erhöht [Dyn17].

### Latin-Hypercube-Sampling

Das Latin-Hypercube-Sampling (LHC) ist die zweite Methode, welche sich neben dem Monte-Carlo-Verfahren bei den computergestützten Samplingverfahren gerade für stochastische

Simulationen durchgesetzt hat. Es wurde erstmalig in [McK79] vorgestellt. Diese Methode benötigt bei einer ähnlichen Genauigkeit wie das MC-Verfahren, eine um Faktor 12 geringere Anzahl an Experimenten bzw. Simulationen [Wil06]. Das LHC-Verfahren ist eine modifizierte Variante des MC-Verfahrens. Dabei werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Variablen in Bereiche mit gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt.

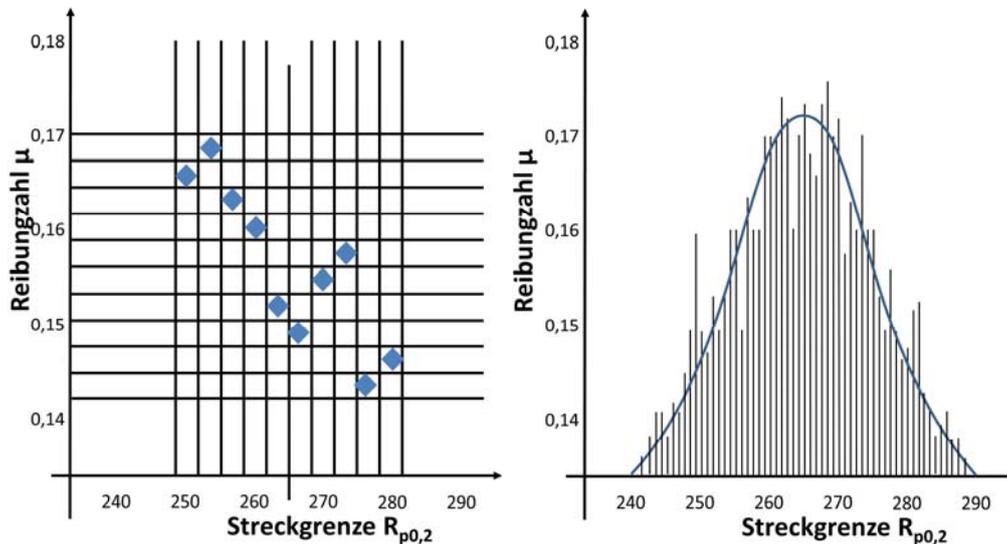


Abbildung 18: Latin-Hypercube-Sampling einer permutierten Matrix aus Reibungszahl und Streckgrenze eines Blechwerkstoffs (links), sowie die daraus resultierende Verteilung der Streckgrenze, verglichen mit der Normalverteilung (rechts).

Danach wird in diesen Bereichen jeweils eine gleiche Anzahl an zufälligen Samplingpunkten gewählt. Diese Samplingpunkte der einzelnen Variablen werden über eine Permutation miteinander verbunden. Die Anzahl der Bereiche entspricht der Anzahl an benötigten Berechnungen. Danach werden die einzelnen Versuchspunkte so gewählt, dass jeder Bereich nur einmal belegt wird [Wys98]. Der Hauptvorteil des LHC-Verfahrens liegt darin, dass derselbe Erkenntnisgewinn bei gleichzeitig erheblich geringerer Anzahl an Simulationsläufen ermöglicht wird. In Abbildung 18 ist das LHC Verfahren grafisch dargestellt.

### 2.4.2 Sensitivitätsanalyse komplexer Systeme

Eine Sensitivitätsanalyse ist eine Analyse von komplexen Systemen und deren Wirkbeziehungen von einzelnen Variablen, die dieses System maßgeblich beeinflussen. Mit einer Sensitivitätsanalyse können mehrere Ziele verfolgt werden. Nach [Sal00] sind dies folgende Ziele:

- Identifizierung der wichtigsten Einflussgrößen: Es sollen die Einflussgrößen identifiziert werden, die den relativ größten Einfluss auf das System und dessen Ergebnis haben. Diese Erkenntnisse sind vor allem für eine Prozessoptimierung wichtig [Sal08].
- Modellanpassung: Es werden jene Parameter identifiziert, die wenig bis keinen Einfluss auf das Ergebnis aufweisen. Diese können für weitere Untersuchungen vernachlässigt werden [Sal08].

- Simulationsvalidierung: Es werden jene Parameter identifiziert, die für einen Simulations-Realitätsabgleich wichtig sind. Es können dadurch Informationen für eine etwaige Modellanpassung gewonnen werden [Sal08].

Exakte Sensitivitäten stellen Richtungsableitungen oder partielle Ableitungen an jeder Stelle des Ergebnisraums des zu untersuchenden Systems dar. Diese können jedoch nur in einem analytisch beschreibbaren Modell errechnet werden, was in der Fertigungstechnik lediglich in seltenen Fällen möglich ist. Deshalb ist es notwendig sich anderer Methoden zu bedienen. Grundsätzlich werden drei Methoden der Sensitivitätsanalyse unterschieden: die Screening Methode, die Methode der lokalen und die Methode der globalen Sensitivitäten [Sal08]. Beispielhaft ist ein beliebiger Zusammenhang zwischen Systemeigenschaft und Systemverhalten in Abbildung 19 nachgezeichnet.

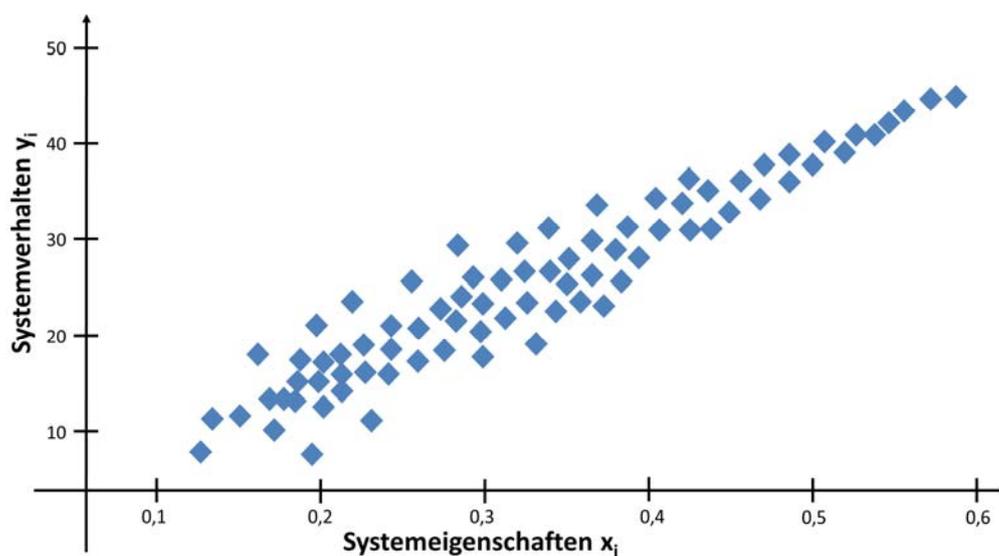


Abbildung 19: Sensitivität zwischen Systemverhalten und Systemeigenschaft.

Die Screening-Methode wird vor allem bei komplexen Systemen mit sehr vielen Eingangsparametern angewandt. Es soll mit diesem Verfahren zunächst eine qualitative Aussage darüber getroffen werden, welche Eingangsparameter wichtig oder unwichtig sind. Daher kann mit dieser Methode vor allem eine Einordnung der Parameter in eine Rangfolge vorgenommen werden. Sie eignet sich deshalb nur für erste Sensitivitätsuntersuchungen, um den Raum der Eingangsparameter zu beschränken. Die Screening-Methode eignet sich nicht für weitergehende Untersuchungen bei denen Wechselwirkungen und lokale Effekte bestimmt werden sollen [Sal08].

Die zweite Methode ist die sog. Methode der lokalen Sensitivitäten. Hierbei sollen die lokalen Sensitivitäten in einem eingeschränkten Bereich eines Eingangsparameters mittels partieller Ableitung bestimmt werden. Dafür werden die anderen Eingangsparameter auf ihrem Nominal- oder ihrem Medianwert festgesetzt. Damit die Einflüsse verschiedener Parameter dimensionslos vorliegen, müssen deren Sensitivitätskoeffizienten normiert werden. Diese Methode ist jedoch nur dann anwendbar, wenn von linearen Zusammenhängen ausgegangen werden kann [Sal00].

Sollen die Einflüsse aller Parameter gleichzeitig bestimmt werden, so wie dies bei nichtlinearen Modellen der Fall ist, muss die Methode der globalen Sensitivitäten angewandt werden. Um diese durchzuführen stehen verschiedene Analysemethoden zur Verfügung. Die Betrachtung der Streudiagramme, auch Scatter-Plots (vgl. Abbildung 19) genannt, stellt dabei die erste und einfachste Möglichkeit. Dabei werden Eingangs- und Ergebnisgrößen in einem Diagramm gegenübergestellt. Erste Abschätzungen zu nicht linearen Zusammenhängen genauso wie das Erkennen von eindeutigen linearen Zusammenhängen sowie das Erkennen von Ausreißern, sind dadurch leicht möglich. Ein gutes Maß für die Stärke von linearen Zusammenhängen bildet der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient. Dieser wird im Folgenden näher erläutert.

### 2.4.3 Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient

Der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient ist ein dimensionsloses Maß zur Quantifizierung von linearen Zusammenhängen zwischen zwei Größen. Der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient kann Werte in dem Intervall  $-1 \leq r \leq +1$  annehmen, wobei  $-1$  einen vollständig negativen linearen Zusammenhang, bzw.  $+1$  einen vollständig positiven linearen Zusammenhang beschreibt. Der Wert von  $r=0$  bedeutet, dass kein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen besteht [Fah07]. Jedoch ist es stets noch möglich, dass in diesem Fall ein nichtlinearer Zusammenhang vorliegt. Der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient ist wie folgt definiert:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (21)$$

Voraussetzung für die effektive Berechnung dieses Koeffizienten ist jedoch, dass die Merkmale intervallskaliert und außerdem annähernd normalverteilt sind. Sollte ein nicht-linearer Effekt vorliegen, der jedoch monoton ist, kann dieser mit dem Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten erkannt werden [Fah07].

### 2.4.4 Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß stellt eine Kennzahl der Statistik für den erklärbaren Anteil eines Eingangsparameters an der Streuung des Gesamtsystems dar [Fah07]. Die gesamte Streuung  $Y$  eines Systems lässt sich mit:

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_1)^2 \quad (22)$$

darstellen, wobei SQT für Sum Squares Total steht. Diese gesamte Streuung  $Y$  teilt sich auf in SQE (Sum of Squares Explained) für die erklärbare Streuung, die auch Streuung der Regressionswerte genannt wird, und SQR (Sum Square Residuals), die Residuenstreuung genannt wird. Sie lassen sich wie folgt darstellen:

$$SQE = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_1 - \bar{y})^2 \quad SQR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_1)^2 \quad (23)$$

Dabei bildet  $\bar{y}$  den Mittelwert der  $y$ -Werte und  $\hat{y}$  den Regressionswert aus dem Regressionsmodell. Er setzt sich zusammen aus:

$$\hat{Y}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_{i1} + \dots + \hat{b}_p X_{ip} \quad (24)$$

Als Maß für die Anpassungsgüte einer Regression wird das sogenannte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  aus dem Quotienten der Gesamtstreuung  $SQT$  und der erklärbaren Streuung  $SQE$  berechnet:

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (25)$$

Bei einer einfachen Regression wiederum entspricht das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  dem Quadrat des Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizienten  $r^2$  [Fah07]. Der Begriff Regression wird in der Statistik durch den Wert  $Y$  beschrieben, der von einem Wert  $X$  abhängt, jedoch nur ungenau beobachtet werden kann. Der Wert  $Y$  setzt sich zusammen aus:

$$y_i(x_i) = a(x_i) + E_i \quad (26)$$

Hierbei stellt  $a(x_i)$  den Anteil der deterministischen Abhängigkeit und  $E_i$  den Anteil der zufällig auftretenden Abweichung dar.

#### 2.4.5 Coefficient of Prognosis

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Güte stochastischer Modelle liefert das Kreuzvalidierungsverfahren zur Errechnung des sogenannten „Coefficient of Determination“ (CoD) [Wol15] bzw. auch „Coefficient of Prognosis“ (CoP) [Dyn17]. Der CoP zeigt an, welche Systemantworten des betrachteten Modells durch das betroffene Modell erklärbar sind. Mathematische Grundlage dieses Verfahrens ist die stochastische Kreuzvalidierung. Hierbei werden die Summen der Vorhersagefehler berechnet. Dabei wird der Ergebnisraum der Vorhersage in viele gleichgroße Unterräume  $T_k$  unterteilt. Diese Unterräume, mit Ausnahme eines Unterraumes  $T_i$ , werden dazu verwendet, um ein Prognosemodell zu berechnen. Mit diesem Prognosemodell wird nun der Wert des Unterraumes  $T_i$  geschätzt. Die Differenz  $d$  zwischen dem geschätzten  $T_k$  aus dem Prognosemodell und dem realen  $T_k$  wird bestimmt. Dieser Schritt wird für alle  $T_k$  wiederholt und aus den einzelnen Differenzen  $d_i$  wird die Quadratsumme aller Schätzfehler  $SS_{Pred}^E$  berechnet. Die erhaltene Summe  $SS_{Pred}^E$  wird durch die Summe aller Fehlerquadrate  $SS_T$  geteilt. Der CoP ergibt sich damit zu:

$$CoP = 1 - \frac{SS_{Pred}^E}{SS_T} \quad (27)$$

Der CoP ist normiert auf den Einheitsvektor, wobei der Wert eins eine absolute Modellübereinstimmung und der Wert Null überhaupt keine Übereinstimmung bedeutet.

## 2.5 Kybernetische Grundlagen

Die Regelungstechnik löst in technischen Systemen die Aufgabe, veränderliche Größen konstant zu halten und eventuell auftretende Störungen durch aktuatorische Eingriffe in das System zu kompensieren. In Verbindung mit der Steuerungstechnik ist es möglich, diese ver-

änderlichen Größen auf einen bestimmten Vorgabewert einzuregeln. Die Regelungstechnik basiert auf der Beschreibung und der Analyse der Systemdynamik der jeweiligen Prozesse [Lun14].

Die Kybernetik wurde in den 1940er Jahren durch Norbert Wiener und John von Neumann begründet und basiert auf den Erkenntnissen der mathematischen Systemtheorie und der Regelungstechnik. Sie steht in der Technik in enger Beziehung zum Themenfeld der Mechatronik. Durch die technische Entwicklung der letzten Jahrzehnte hat sie stets mehr an Bedeutung gewonnen bzw. wird weiter an Bedeutung gewinnen. Gerade die rasante Entwicklung der Computer-Hardware seit Anfang der neunziger Jahre erlaubt den Einsatz von Simulation und Regelung in komplexen Prozessen und den Einsatz in stets mehr technischen Anwendungen und Produkten [Unb08].

Der grundsätzliche Gegenstand der Kybernetik sind Systeme, welche mit ihrer Umwelt interagieren. Anhand eines oder mehrerer Referenzwerte wird ein System in einem gewissen Parameterbereich gehalten, um gewisse Funktionalitäten zu erreichen, zu erhalten oder zu optimieren. Hierbei können als einfache Beispiele ein Thermostat oder der Fliehkraftregler einer Dampfmaschine genannt werden [Lun14].

Durch den Fortschritt bei der Computerhard- und Software kommen bei Anwendungen der technischen Kybernetik vermehrt moderne Methoden des Maschinellen Lernens sowie der Optimierung und Simulation zum Einsatz - der Übergang in diese Themenfelder ist inzwischen fließend. Diese Methoden werden vermehrt eingesetzt, um komplexe Kennfelder für Regler zu erstellen oder um bei komplexen Systemen mit vielen Ausgangsgrößen die geeigneten Referenzwerte für den Regler zu berechnen [Arn12].

### 2.5.1 Unterscheidung zwischen Regelungstechnik und Steuerungstechnik

Die Aufgabe der Steuerungs- und Regelungstechnik ist es, einen Prozess derart zu beeinflussen, dass er einem vorgegebenen Ablauf folgt. Dabei wird zwischen der Steuerung und der Regelung eines Prozesses unterschieden. Bei der Steuerung eines Prozesses wird der Prozess direkt durch ein Signal beeinflusst [Lun14]. Dabei wird  $w(t)$  als Führungsgröße,  $u(t)$  als Stellgröße,  $y(t)$  als Regelgröße,  $G_s$  als Steuereinrichtung und  $G$  als Steuerstrecke gesehen. Wichtig ist bei einer Steuerung, dass die dynamischen Eigenschaften des Systems möglichst genau bekannt bzw. berechnet sind und dass keine Störungen des Systems vorliegen, da der Zustand des Prozesses bei einer Steuerung nicht berücksichtigt wird und auf Abweichungen daher nicht reagiert werden kann.

Im Gegensatz dazu kann der aktuelle Zustand des Systems bei einer Regelung mitberücksichtigt werden. Eine Regelung enthält  $w(t)$  als Führungsgröße,  $u(t)$  als Stellgröße,  $y(t)$  als Regelgröße,  $e(t)$  als Regelabweichung, den Regler  $K$  und die Regelstrecke  $G$ . Die beiden Prinzipien sind grafisch in Abbildung 20 einander gegenübergestellt.

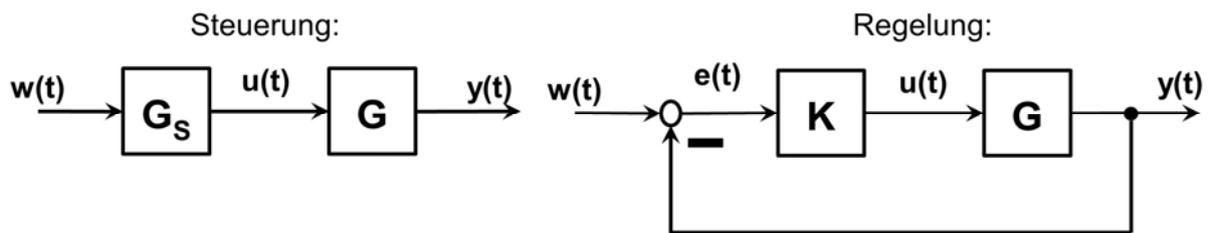


Abbildung 20: Schematische Darstellung einer Steuerung (links) und einer Regelung (rechts) [Lun14].

Bei einer Regelung wird der aktuelle Zustand gemessen und mit dem Referenzzustand verglichen. Dadurch entsteht die sogenannte Regelabweichung  $e(t)$ , die in den Regler  $K$  zurückgeführt wird. Bei einer Regelung sind die beiden oben beschriebenen Voraussetzungen für eine funktionierende Steuerung nicht notwendig. Der Nachteil einer Regelung besteht darin, dass diese langsamer als eine Steuerung reagiert.

### 2.5.2 Grundlagen der Regelungstechnik

Die Regelungstechnik befasst sich mit der Aufgabe, einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser in einer vorgegebenen Weise abläuft. Im Gegensatz zu stationären Modellvorstellungen basiert die Regelung auf der Beschreibung und der Analyse der Systemdynamik. Die Regelungstechnik befindet sich im Spannungsfeld zwischen mathematischer Exaktheit und Allgemeingültigkeit, sowie ingenieurgemäßer Darstellung und Interpretation [Lun14]. Die Mathematik wird als Mittel verwendet, in der Regelungsaufgaben und Lösungsmethoden kompakt und so allgemein formuliert werden können, dass sie für unterschiedliche praktische Probleme anwendbar sind. Soll eine Regelung für ein Problem entwickelt werden, muss eine von außen beeinflussbare Größe so ausgewählt werden, dass ein vorgegebenes Ziel erreicht werden kann. Da diese Auswahl in Abhängigkeit davon getroffen wird, inwieweit das Ziel bereits erreicht ist, entsteht ein Regelkreis. Dieser besteht aus dem gegebenen Prozess und einem neu zu schaffenden Funktionsglied, dem sogenannten Regler, besteht [Lun14]. Ein allgemeines Beispiel eines Regelkreises ist in Abbildung 21 dargestellt.

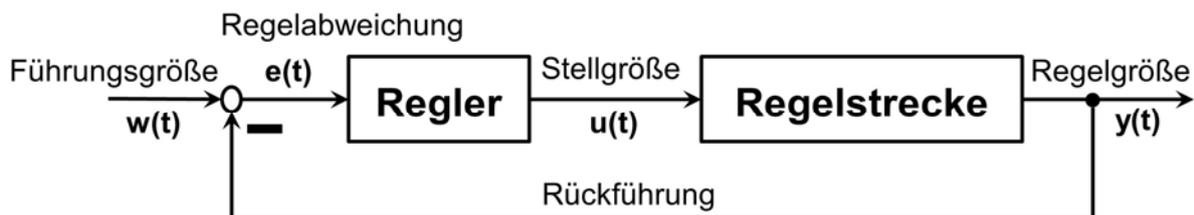


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines einfachen Single-Input-Single-Output Regelkreises [Lun14].

Als zentraler Aspekt in der Regelungstechnik steht neben dem Regler das dynamische System, auch Regelstrecke genannt. Als dynamisches System wird eine Funktionseinheit bezeichnet, deren wichtigste Kenngrößen sich zeitlich ändern und deshalb als Funktionen der Zeit dargestellt werden. Dabei wird zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen unter-

schieden. Eingangsgrößen wirken auf das System ein und verursachen zeitliche Veränderungen innerhalb des Systems.

Im Gegensatz dazu beschreiben die Ausgangsgrößen das Verhalten des Systems als Reaktion auf die Eingangsgrößen. In Abhängigkeit von der betrachteten Problemstellung können sehr unterschiedliche technische Geräte und Anlagen, Lebewesen oder soziale Einheiten als dynamisches System angesehen werden. Die Veränderungen, die in einem dynamischen System vorkommen, werden als dynamischer Prozess bezeichnet [Lun14]. Dieser dynamische Prozess bildet nichts anderes als die mathematische Beschreibung des Verhaltens des zu regelnden Systems. Das gewünschte Verhalten wird durch einen Regler dem System aufgezwungen. Die grundsätzlichen Vorgänge in der Regelungstechnik können in drei Schritte unterteilt werden:

- **Messen:** Die Regelgröße wird entweder direkt gemessen oder – bei nicht messbaren Regelgrößen wie z. B. Qualitätskennwerten – aus anderen Messgrößen berechnet.
- **Vergleichen:** Der Wert der Regelgröße wird mit dem Wert der Führungsgröße verglichen. Die Differenz zwischen beiden Größen ist die Regelabweichung  $e(t) = w(t) - y(t)$ .
- **Stellen:** Aus der Regelabweichung wird unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke die Stellgröße bestimmt.

### 2.5.3 Grundlegende Übertragungsglieder

Ein Übertragungsglied, auch Übertragungsfunktion genannt, beschreibt die Abhängigkeit des Ausgangssignals eines linearen, zeitinvarianten Systems von dessen Eingangssignal. Es kann im Frequenzbereich wie im Zeitbereich dargestellt werden. Aufgrund des qualitativen Verlaufs der Übertragungsfunktion können einfache Übertragungsglieder in Proportional-, Differenzier-, Integrier- und Totzeitglieder unterteilt werden. Im Folgenden werden die gängigsten dieser Glieder kurz beschrieben und nach [Lun14] definiert.

#### Proportionalglied

Als Proportionalglied, respektive P-Glied (Regler), wird ein Übertragungsglied bezeichnet, welches ein proportionales Übertragungsverhalten aufweist. Diese weisen für konstante Eingangsgrößen im stationären Zustand eine dem Wert der Eingangsgröße proportionale Ausgangsgröße auf. Die Übertragungsfunktion im Zeitbereich des P-Glieds lautet:

$$y(t) = K \cdot u(t) \quad (28)$$

Das P-Glied bildet die grundlegendste Form der Übertragungsglieder, die als Regler benutzt wird.

#### Integrierglied

Als Integrierglied respektive I-Glied (Regler), wird ein Übertragungsglied bezeichnet, welches ein integratives Übertragungsverhalten aufweist. Sein Ausgang geht nach gewisser Zeit

in eine Rampenfunktion über. Der Ausgang von I-Gliedern wird im Wesentlichen durch Integration der Eingangsgröße gebildet. Es strebt nur dann einen konstanten Wert an, wenn ihre Eingangsgröße gleich null ist. Die zugehörige Übertragungsfunktion im Zeitbereich sowie ihre Ableitung (welche einem P-Glied entspricht) lauten:

$$y(t) = K \int_0^t u(\tau) d\tau \rightarrow \dot{y}(t) = K \cdot u(t) \quad (29)$$

Das I-Glied wird hauptsächlich für das Ausregeln der bleibenden Regelabweichung verwendet. Er hebt die bleibende Regelabweichung vollständig auf und steigert die Robustheit des geregelten Systems.

### Differentialglied

Als Differentialglied respektive D-Glied (Regler), werden Übertragungsglieder bezeichnet, deren Ausgang im Wesentlichen durch Veränderungen der Eingangsgröße bestimmt wird. Bei konstanten Eingangsgrößen strebt ihre Ausgangsgröße den Wert null an. Für das stationäre Verhalten wird das verzögerungsfreie D-Glied durch,

$$y(t) = T_D \frac{du}{dt} \quad (30)$$

beschrieben. Dieses verletzt jedoch die Kausalitätsbedingung der Systemtheorie und kann physikalisch korrekt daher nur als Dirac-Impuls dargestellt werden. Ein echtes D-Glied funktioniert deshalb nie ohne eine zeitliche Verzögerung. Dies ist in der modernen Anwendung von regelungstechnischen Methoden nicht von Bedeutung.

### PT<sub>n</sub>-Glied

Das PT<sub>n</sub>-Glied ist ein proportional wirkendes Verzögerungsglied der dynamischen Systemordnung n. Ein PT<sub>1</sub>-Glied beispielsweise stellt ein proportional wirkendes Verzögerungsglied erster Ordnung dar. Seine Übertragungsfunktion wird mit der Differentialgleichung

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{T} x(t) + \frac{1}{T} u(t) \quad (31)$$

dargestellt, wobei T die Zeitkonstante der Funktion ist. Mit Erhöhung der dynamischen Systemordnung n, wird die Anzahl der Glieder einzeln erhöht. Das Ausgangssignal wird dadurch stets stärker verzögert. Je mehr solcher Glieder in Reihe geschaltet sind, desto mehr wird das Erreichen des statischen Endwertes verzögert [Lun14]. In der Realität werden die PT<sub>n</sub>-Glieder als Filter verwendet und werden als Tiefpassfilter bezeichnet. Mit ihnen werden Schwingungen aus einem Signal herausgefiltert, wobei der Tiefpassfilter tiefe Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz ungeschwächt passieren lässt und hohe Frequenzen herausfiltert. In der Mechanik würde ein Feder-Dämpfer-System dem Verhalten des Tiefpassfilters am ehesten entsprechen.

### 2.5.4 Geregelte flache Vorsteuerung

In Absatz 2.5.1 wurden die Unterschiede zwischen einer Regelung und einer Steuerung sowie deren Vor- und Nachteile beleuchtet. Eine Möglichkeit, die Vorteile einer Steuerung mit denen einer Regelung und somit mit der Schnelligkeit unter der Berücksichtigung des Prozesszustands und der Robustheit gegen Störungen zu vereinen, ist die Vorsteuerung eines geregelten Systems. Dabei setzt sich die Stellgröße aus einem Vorsteuerungsanteil  $u_v(t)$  und einem Regelungsanteil  $u_R(t)$  zusammen. Dieses System ist in Abbildung 22 dargestellt. Mit der Vorsteuerung kann schnell auf Änderungen der Führungsgröße reagiert werden. Mit der Regelung werden mögliche Störungen oder Ungenauigkeiten in der Systemmodellierung ausgeglichen.

Im Folgenden wird der für diese Arbeit relevante Fall einer flachen Vorsteuerung näher betrachtet. Es wird ein nichtlineares dynamisches System der Form

$$\dot{x} = f(x, u), x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, \text{Rang} \left( \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right) = m \quad (32)$$

betrachtet. Der Ausgang ist gegeben durch:

$$y = h(x, u), y \in \mathbb{R}^m \quad (33)$$

Die Eigenschaft der Flachheit eines Systems bietet eine Möglichkeit, um dieses dynamische System vor zu steuern. Ein nichtlineares System der Form (31) heißt differentiell flach, wenn es einen fiktiven Ausgang  $z = (z_1, \dots, z_m)$  mit  $m = \dim u$  gibt, der die folgenden Bedingungen erfüllt [Zei09]:

- Die Größen  $z_i$ ,  $i = 1(1)m$ , lassen sich als Funktionen der Systemvariablen  $x_i$ ,  $i=1(1)n$ , und  $u_i$ ,  $i = 1(1)m$ , sowie einer endlichen Anzahl von Zeitableitungen  $u^{(k)}$ ,  $k=1(1) \alpha_i$ , ausdrücken. Für das nichtlineare System bedeutet dies, dass sich der fiktive Ausgang  $z$  in der Form,

$$z = \Phi(x, u_1, \dots, u_1^{\alpha_1}, \dots, u_m, \dots, u_m^{\alpha_m}) = \Phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^\alpha) \quad (34)$$

darstellen lässt.

- Die Systemvariablen  $x_i$ ,  $i=1(2)n$  bzw.  $u_i$ ,  $i = 1(1)m$ , lassen sich als Funktion der Ausgangsgrößen  $z_i$ ,  $i = 1(1)m$  und einer endlichen Anzahl von deren Zeitableitungen  $z_i^{(k)}$ ,  $k=1(1) \beta_{i+1}$ , darstellen. Damit ergibt sich:

$$x = \psi_x(z_1, \dots, z_1^{\beta_1}, \dots, z_m, \dots, z_m^{\beta_m}) = \psi_x(z, \dot{z}, \dots, z^\beta) \quad (35)$$

$$u = \psi_u(z_1, \dots, z_1^{\beta_{1+1}}, \dots, z_m, \dots, z_m^{\beta_{m+1}}) = \psi_u(z, \dot{z}, \dots, z^{\beta+1}) \quad (36)$$

- Die Komponenten von  $z$  sind differentiell unabhängig, d.h. sie erfüllen keine Differentialgleichung der Form

$$\varphi(z, \dot{z}, \dots, z^\gamma) = 0 \quad (37)$$

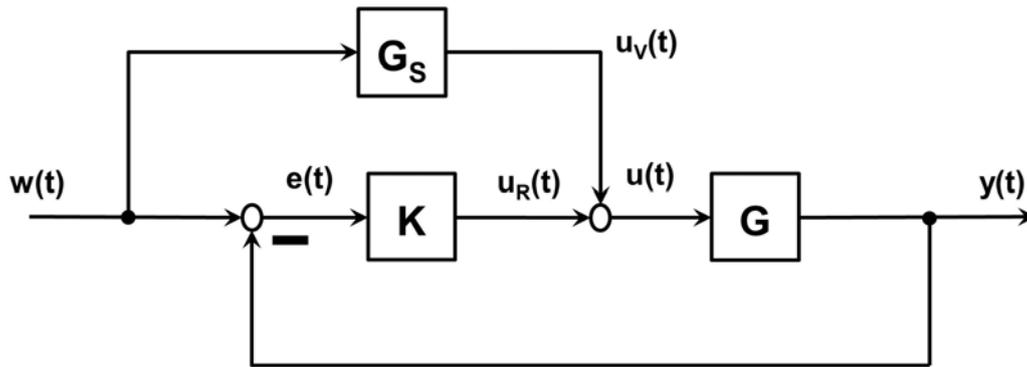


Abbildung 22: Struktur einer Regelung mit Vorsteuerung [Zei09].

Sind diese Bedingungen zumindest lokal erfüllt, so heißt der fiktive Ausgang „flacher Ausgang“ und das System wird als „flach“ bezeichnet. Die Definition der Flachheit gibt keine Auskunft über die Dimension von  $\beta_i$ . Die Bedingung

$$\sum_{i=1}^m \beta_i \geq n \quad (38)$$

muss jedoch stets gelten [Zei09]. Die Summe von  $\beta_i$  sagt aus, wie viele Gleichungen für die Parametrierung zur Verfügung stehen. Damit dieses Gleichungssystem aber eindeutig lösbar ist, müssen mindestens  $n$  Gleichungen zur Verfügung stehen. Weiterhin dürfen per Definition die Ableitungen der Eingangsgrößen vom flachen Ausgang und damit seiner Ableitungen abhängig sein. Es wird allerdings keine Parametrierung dieser Eingangsableitungen gefordert. Dafür müssen die entstehenden Funktionen für die Eingangsgrößen entsprechend oft stetig differenzierbar sein. Es ist möglich, bei einem flachen dynamischen System in Abhängigkeit des flachen Ausgangs  $z$  und dessen Zeitableitungen die Eingänge  $u$  des Systems, die Zustände  $x$  und die Ausgänge  $y$  zu parametrisieren. Wenn damit eine Trajektorie für den flachen Ausgang vorgegeben wird, kann mit der Parametrisierung die Referenz für die Zustände, Ausgänge und Eingänge, die diese Trajektorie im dynamischen System erzeugen, berechnet werden. Dafür muss keine Differentialgleichung gelöst werden.

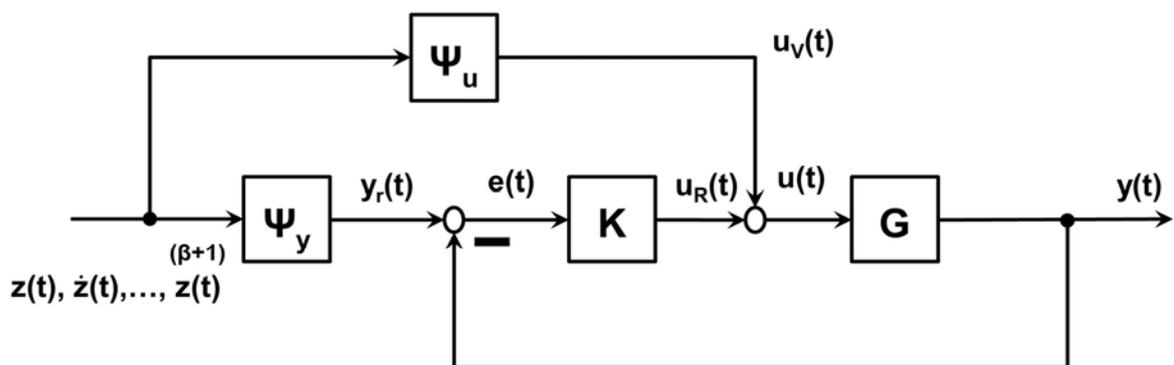


Abbildung 23: Struktur einer flachen geregelten Vorsteuerung [Zei09].

Die Trajektorie muss lediglich so oft differenzierbar sein, wie der Grad der höchsten, in der Parametrierung vorkommenden Ableitung, beträgt. Damit lässt sich die in Abbildung 23 dar-

gestellte Vorsteuerstruktur realisieren. Die Trajektorie kann sowohl in flachen Koordinaten  $z$  als auch in realen Koordinaten  $y$  geplant werden.

## 2.6 Mathematische Optimierungsverfahren

Die Optimierung stellt ein Gebiet der Mathematik dar, wobei „optimal“ bedeutet, dass eine Zielfunktion minimiert oder maximiert wird. Die Optimierung bzw. die Optimierungsmethoden bilden dafür die notwendigen Werkzeuge. Ein Beispiel der Optimierung ist die Bestimmung einer Extremstelle einer analytischen Funktion  $f(x)$  aus der Kurvendiskussion. Um die Extremstelle einer Funktion zu berechnen, wird die Nullstelle der ersten Ableitung berechnet. Als Beispiel ist dies in Abbildung 24 dargestellt [Arn10].

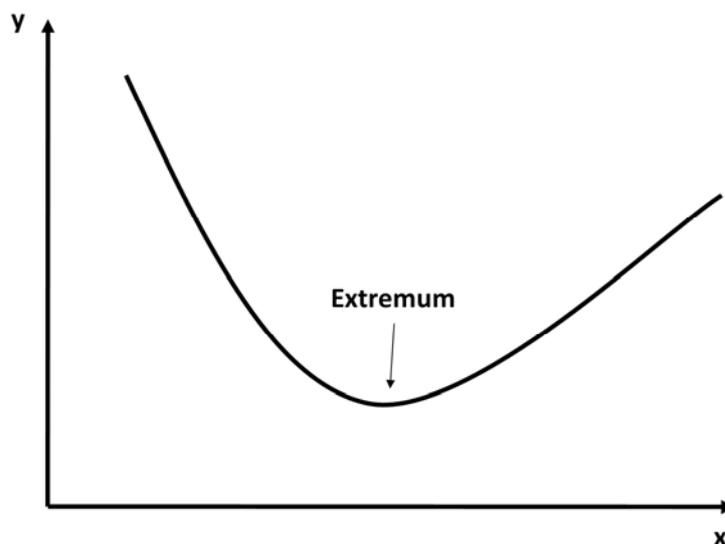


Abbildung 24: Darstellung eines globalen Minimums in einer analytischen Funktion.

Die Methoden der Optimierung sind auf zahlreiche Fragen in der Technik und der angewandten Mathematik, sowie auf deren Probleme anwendbar, solange sich diese Probleme in einen Formalismus, bevorzugt in eine mathematische Funktion, fassen lassen.

Beispiele für Optimierungsprobleme sind die Prozessplanung von Herstellprozessen, eine rationelle Materialwirtschaft in der Produktion, die Regelung bzw. Steuerung von Systemen, wie beispielsweise bei der Trajektorienplanung, sowie bei Regelungen auf Basis von Neuronalen Netzen oder physikalische Probleme, wie beispielsweise die Berechnung von physikalischen Modellen [Arn10].

### 2.6.1 Grundlagen der mathematischen Optimierung

Ein Optimierungsproblem wird nach [Arn10] wie folgt formuliert:

$$Q(x) \rightarrow \min! \quad \text{mit} \quad h(x) = 0, g(x) \leq 0 \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (39)$$

wobei  $Q(x)$  das Objekt ist, das optimiert werden soll und wird als Zielfunktion oder als Gütekriterium bezeichnet. Des Weiteren stellt  $h(x)$  die sogenannte Gleichungsbeschränkung dar und  $g(x) \leq 0$  die sogenannte Ungleichungsbeschränkung dar. Hierbei bildet  $x$  die Optimierungsvariable. Die optimale Lösung ergibt sich durch:

$$x^* = \arg \min\{Q(x) | h(x) = 0, g(x) \leq 0\} \quad (40)$$

Sobald ein Optimierungsproblem eine Gleichungsbeschränkung und bzw. oder eine Ungleichungsbeschränkung enthält, wird dieses als beschränktes Optimierungsproblem bezeichnet. Beispiele für Beschränkungen sind z.B. das Fassungsvermögen eines Behälters oder die maximale Wärmeleistung einer Heizung bei einem verfahrenstechnischen Optimierungsproblem, oder der maximal mögliche Ausschlag eines Aktors bei einem Optimalsteuerungsproblem [Arn10].

Optimierungsprobleme ohne Gleichungsbeschränkungen werden als unbeschränkte Optimierungsprobleme bezeichnet. Bei ihnen stellen sich Minimierung und Maximierung als gleichwertig dar, ein Minimierungsproblem kann in ein Maximierungsproblem umgewandelt werden und umgekehrt. Dazu wird lediglich eine Multiplikation mit -1 vorgenommen. Bei beschränkten Problemen (vgl. Abbildung 25) ist dies nicht möglich, sie sind in ihrer Optimierungsrichtung eindeutig. Bei den meisten Optimierungsproblemen gibt es nicht ausschließlich eine exakte Lösung, sondern eine Lösungsmenge, die sogenannte zulässige Menge  $Z$ . Diese wird beschrieben durch:

$$Z = \{x | h(x) = 0, g(x) \leq 0\} \quad (41)$$

Die zulässige Menge  $Z$  stellt jene Menge der zulässigen Lösungen von  $Q(x)$  dar, die den Gleichungsrestriktionen  $h_i(x)$  und den Ungleichungsrestriktionen  $g_i(x)$  genügen. Sollte diese Menge  $Z$  die einzige Lösung darstellen, so wird sie als globales Maximum oder globales Minimum bezeichnet. Meistens gibt es in einer Zielfunktion  $Q(x)$  mehrere Extrema. Als einfaches, klassisches Beispiel kann hier eine ganzrationale Funktion vierter Ordnung genannt werden, diese Funktion besitzt drei Extrema. Erfüllt ein Punkt die Bedingungen für einen Extrempunkt, bildet jedoch nicht den kleinsten oder größten Punkt der gesamten Zielfunktion, so wird er als lokales Extremum bezeichnet. Eine Funktion, welche nur einen Extrempunkt besitzt, wird als konvex bezeichnet [IST09]. Neben kontinuierlichen Problemen der Form  $x \in \mathbb{R}^n$  ist es auch möglich, diskrete Probleme der Form  $x \in \mathbb{Z}^n$  zu lösen. Daraus ergibt sich zudem die Möglichkeit, vektorielle Probleme zu lösen. Dabei wird die Optimierungsvariable  $x$  einfach durch einen Vektor  $\bar{x}$  ersetzt. Das skalare Optimierungsproblem wird „einkritikales“ Problem genannt, das vektorielle Optimierungsproblem wird „mehrkritikales“ Problem genannt [Kel99].

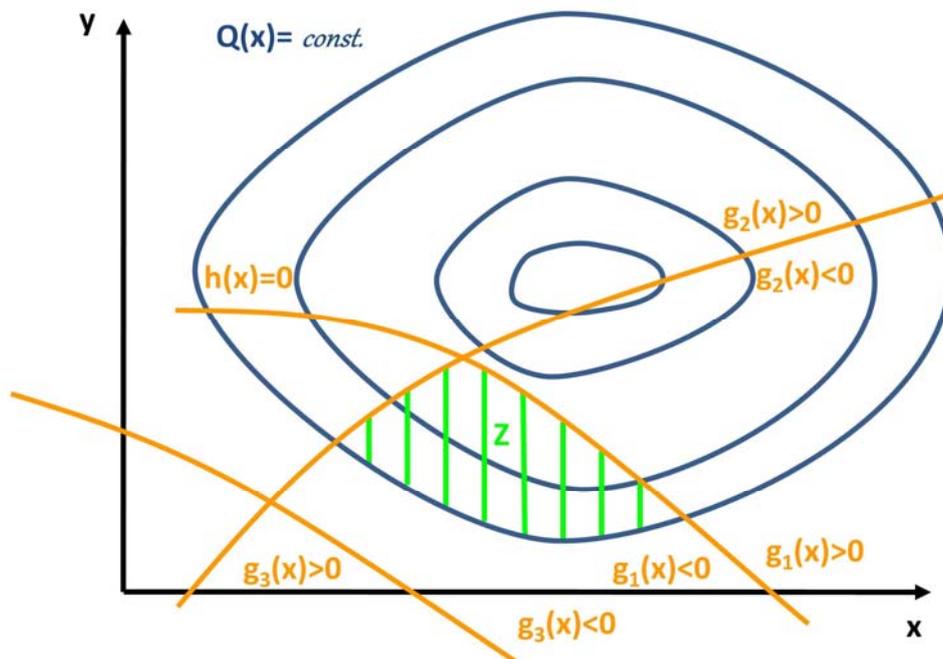


Abbildung 25: Allgemeines Optimierungsproblem mit einer Zielfunktion  $Q(x)$ , den Gleichungs- ( $h_i$ ) und Ungleichungsrestriktionen ( $g_i$ ) und der zulässigen Menge  $Z$  [Arn10].

## 2.6.2 Mathematische Optimalitätsbedingungen

Die Bedingungen für einen Extrempunkt werden Optimalitätsbedingungen genannt [Arn10]. Dafür gibt es zwei notwendige und eine hinreichende Optimalitätsbedingung. Die notwendige Optimalitätsbedingung erster Ordnung lautet:

$$\Delta Q(x) = 0 \quad (42)$$

Die notwendige Optimalitätsbedingung zweiter Ordnung besagt, dass  $\Delta^2 Q(x)$  stetig in der Umgebung des lokalen Minimums ist. Sobald  $\Delta^2 Q(x)$  dann positiv semidefinit ist und die Bedingung

$$\Delta^2 Q(x) \geq 0 \quad (43)$$

gilt, dann ist diese Extremstelle mindestens ein schwacher Extrempunkt. Als hinreichende Optimalitätsbedingung gilt, wenn  $\Delta^2 Q(x)$  positiv definit ist:

$$\Delta^2 Q(x) > 0 \quad (44)$$

Für diesen Fall ist die Extremstelle ein starker Extrempunkt. Für alle diese Regeln gilt, dass die Zielfunktion  $Q(x)$  in der Umgebung der Extremstellen stetig und stetig differenzierbar sein muss. Schwache und starke Extrempunkte unterscheiden sich dadurch, dass bei einem schwachen Extrempunkt weitere, direkt benachbarte Extrempunkte gleichen Betrages existie-

ren können. Im Gegensatz dazu, ist ein starker Extrempunkt alleinstehend und ohne direkte Nachbarn gleichen Betrags [Arn10].

### 2.6.3 Nichtlineare Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen

Die Lösung nichtlinearer Optimierungsprobleme ist sehr komplex und es ergeben sich je nach Art des Problems unterschiedliche Problemstellungen. Deshalb wurden für solche Optimierungsprobleme eine Vielzahl von Verfahren, der sog. nichtlinearen Optimierung entwickelt, wobei sich viele dieser Verfahren nur mittels bestimmter Klassen von Optimierungsmethoden erfolgreich umsetzen lassen. Des Weiteren besitzen sie je nach Problemstellung eine höhere oder geringere Eignung zur Lösung bestimmter Optimierungsprobleme, ein universelles Verfahren existiert nicht [Arn10].

Weiterhin existieren die ableitungsbehafteten Verfahren, deren bekannteste Vertreter das Quasi-Newton-Verfahren und die Methode der Vertrauensbereiche sind, sie werden in [Arn16] näher beschrieben. Des Weiteren gibt es die sog. direkten Verfahren, bei diesen Verfahren wird in Abgrenzung zu den indirekten Verfahren keine Ableitung der Funktion benötigt, die Lösung wird direkt in der Zielfunktion gesucht. Der Vorteil dieser direkten Verfahren besteht darin, dass hochdimensionale und diskrete Probleme schnell bearbeitet werden können. Zwei weitere, stark verbreitete Verfahren der nichtlinearen Optimierung sind das für die Ausgleichsrechnung in der Physik genutzte Verfahren und die bei der Regressionsanalyse in der Statistik verwendete Methode der kleinsten Fehlerquadrate [Arn10].

#### Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate gehört zu den verbreitetsten Verfahren zum Einpassen von Daten in Funktionen in der Physik, der Statistik oder in jüngerer Zeit vor allem beim Data Mining und Maschinellen Lernen. Bei der Methode der kleinsten Fehlerquadrate werden die Abweichungen zwischen Punkten der zu optimierenden Funktion und der optimalen Zielfunktion quadriert und aufaddiert. Die zu optimierende Funktion mit der geringsten Abweichung stellt die optimale Lösung dar [Arn10]. Die Gleichung setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m [e_i^2 + u_i^2] \right\} \quad (45)$$

Hierbei stellen  $e_i$  und  $u$  die Abweichung der Koordinaten jedes einzelnen Punktes dar. Diese werden alle aufaddiert, die Lösungsmöglichkeit mit der geringsten Abweichung wird dann als optimale Lösung betrachtet. Dieses wird heute vornehmlich bei der Approximation von Kurven an Messpunkten eingesetzt, man spricht vom sog. Best-Fit-Problem. Eine Abwandlung dieser Methode ist die Anwendung einer  $L_p$ -Norm. Die allgemeine  $L_p$ -Norm setzt sich wie folgt zusammen:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n |e_i|^p + |u_i|^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (46)$$

Hierbei repräsentiert  $p$  den Grad der Funktion und  $x$  die Abweichung der Approximation vom realen Wert. Der Vorteil der  $L_p$ -Norm liegt darin, dass einzelne Punkte mit großer Abweichung, sog. Ausreißer, stärker gewichtet werden. Bei einer weiteren Abwandlung der  $L_\infty$ -Norm, wird stets nur der Wert mit der größten Abweichung betrachtet. Damit ist es möglich, eine gewisse Gewichtung innerhalb der zu optimierenden Menge zu erzielen. Diese Abwandlung wird oft bei Problemen angewandt, bei denen der Betrag der Abweichung eine große Rolle spielt. Beispielhaft kann hier die Bewertung der Robustheit von Regelungen genannt werden, wobei eine kleine Abweichung vom Soll-Wert als nicht derart gravierend angesehen wird, wie dies bei einer starken Abweichung der Fall wäre. Für die Reglerfunktion sind lediglich die stärksten Abweichungen von Interesse. Bei starker Sicherheitsrelevanz eines Regelgesetzes wird oft die  $L_\infty$ -Norm untersucht, da hierbei das Interesse darin liegt, zu prüfen, ob die stärkste Abweichung eine gewisse Grenze überschreitet [Arn10]. In Abbildung 26 ist dies beispielhaft an einem Best-Fit-Problem dargestellt, wobei  $e_i$  die Abweichung bezüglich der  $y_{M,i}$  Koordinate und  $\delta_i$  die Abweichung bezüglich der  $u_{M,i}$  Koordinate ( $x$ -Koordinate) ist und  $y(u,x)$  die eingepasste Funktion.

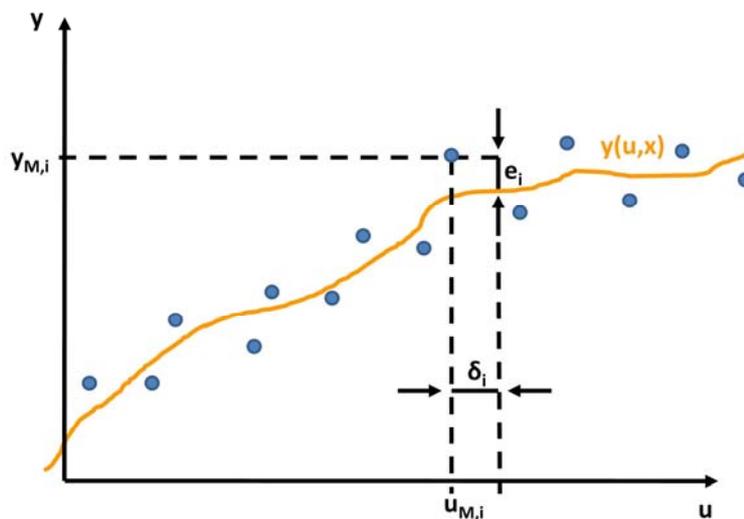


Abbildung 26: Methode der kleinsten Fehlerquadrate am Beispiel eines Best-Fit-Problems [Arn10].

### Advanced Response Surface Method

Die Advanced Response Surface Method (ARSM) oder auch nur Response Surface Method (RSM) genannt, ist eine Methode, die in [Box51] erstmals ausführlich beschrieben wurde. RSM ist eine mathematisch statistische Methode zur Mehrziel-Optimierung, bei der gleichzeitig  $n$  diskrete sowie kontinuierliche Eingabeparameter betrachtet werden können, um die Systemantwort  $y$  zu optimieren. Diese wird beschrieben durch:

$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (47)$$

Des Weiteren muss, je nach Umfang des Optimierungsproblems, eine Reihe von Nebenbedingungen erfüllt sein. Der genaue Aufbau der Funktion  $f$  ist meistens nicht bekannt bzw. für die Durchführung der RSM ist dieses Kenntnis nicht zwingend notwendig [Sto06]. Es ist bei die-

sem Verfahren ausreichend die Systemantwort für die einzelnen Faktorwerte zu bestimmen. Zur Ermittlung der Systemantwort können mehrere Möglichkeiten genutzt werden. Es können Berechnungen auf Basis bekannter Zusammenhänge, wie beispielsweise physikalische Zusammenhänge oder Messungen von realen Werten im zu optimierenden System, verwendet werden. Die Systemantworten können ebenfalls mit der FEM-Simulation, oder anderen numerischen Methoden zur Untersuchung realer Systeme, berechnet werden. All diese Möglichkeiten können bei den neusten RSM-Methoden frei kombiniert werden. Hierbei unterliegen die Systemantworten gewissen Fehlerquellen bzw. haben Abweichungen zum mathematisch exakten Ergebnis. Eine genaue Rekonstruktion der Systemantworten ist schwierig und teuer, deshalb wird die Funktion  $f$  nicht genau berechnet, sondern mittels der Funktion  $g$  approximiert. Diese wird dann beschrieben durch:

$$y = g(x_1, \dots, x_n) \quad (48)$$

Bei einer Optimierung nach der RSM-Methode sollten die Eingangswerte  $x_n$  weitestgehend in ihrem Wertebereich beschränkt werden, sowie ausschließlich relevanten Eingangswerte  $x_n$  betrachtet werden. Trotz der Tatsache, dass aus theoretischer Sicht unendlich viele  $x_n$  betrachtet werden können, vermindern diese Beschränkungen in konkreten Fällen den Rechenaufwand dennoch erheblich [Box51].

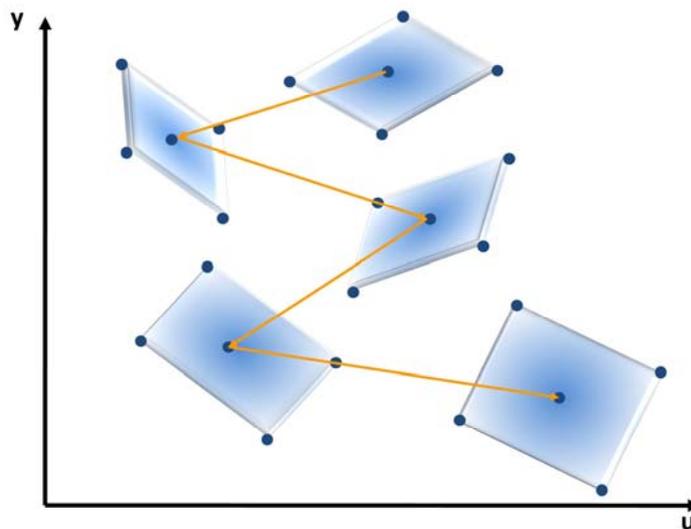


Abbildung 27: Ablauf der RSM-Methode mit aufeinander folgenden Iterationen bzw. Antwortflächen nach [Box51].

Des Weiteren kann durch eine zu große Anzahl an Eingangswerten  $x_n$  ein schnelles Konvergieren des Algorithmus selbst, verhindert werden. Die Optimierung mithilfe der RSM läuft in aufeinander aufbauenden Iterationen ab, bei denen stets nur ein Teil des gültigen Wertebereichs betrachtet wird. In der Mitte des betrachteten Bereichs liegt der Center Point, um den der betrachtete Bereich gruppiert wird [Sto06]. Dabei wandelt sich der betrachtete Bereich zu einem Unterraum und der Center Point zu dessen Nullpunkt. Alle anderen Werte in diesem Unterraum werden nach dem Einheitsvektor codiert, dies führt zu einer starken Leistungssteigerung der Berechnung. In diesen Unterraum wird nun eine Response Surface eingepasst und

anschließend deren Optimum berechnet. Das Einpassen der Response Surface in die Systemantworten wird gewöhnlich mit einem Regressionsmodell erster oder zweiter Ordnung vorgenommen (vgl. Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Anhand von Konvergenzkriterien entscheidet der Algorithmus nach jedem Rechenschritt, ob eine neue Response Surface in einem anderen Wertebereich aufgespannt werden soll, ob der Suchbereich verkleinert werden soll, ob ein Modell zweiter Ordnung aufgestellt werden soll oder ob ein Optimum erreicht ist [Sto06].

Diese Schritte werden solange wiederholt, bis eine Response Surface ermittelt wurde, welche die Konvergenzkriterien erfüllt und das gesuchte Optimum enthält. Sobald ein Optimum vermutet werden kann, wird zur schnelleren Approximation die Suche mit einem Modell zweiter Ordnung fortgesetzt (vgl. Kapitel 2.6.1).

### 3 Voruntersuchungen

In diesem Kapitel werden die neusten Arbeiten der zurückliegenden Jahre zur Regelung des Tiefziehvorgangs betrachtet, um einen Forschungsbedarf im Kontext zu konkretisieren. Des Weiteren wird die Messgröße des sog. Platinenkanteneinzugs näher betrachtet und bzgl. ihrer Eignung als Regelgröße bewertet. Zusätzlich werden theoretische Vorbetrachtungen zur klassischen modellbasierten Regelung vorgenommen.

#### 3.1 Aktuelle Ansätze zur Prozessregelung beim Tiefziehen

Zunächst wird in diesem Kapitel eine Auswahl relevanter Arbeiten zur Prozessregelung des Tiefziehens betrachtet und analysiert. Bei einer Regelung des Tiefziehprozesses wird das Ziel verfolgt, die Prozessstabilität zu erhöhen. Hierzu werden eine oder mehrere Regelgrößen verwendet, um eine Reglerentscheidung abzuleiten. Die entscheidenden Prozessgrößen des Tiefziehprozesses bilden hierbei die erste und die zweite Hauptformänderung im Ziehteil. Diese können nur mit einer sehr aufwendigen Formänderungsanalyse bestimmt werden, welche jedoch nicht während des Prozesses durchgeführt werden kann. Daher wird in den bisherigen Arbeiten bzgl. einer Regelung des Tiefziehprozesses angestrebt, diese Prozessgrößen mittels anderer Messgrößen zu erfassen.

Im Rahmen seiner Untersuchungen erhöht Bräunlich [Brä02] die Prozessstabilität bei der Herstellung eines rechteckigen Behälters aus DC04 durch die Verwendung eines geschlossenen Regelkreises, welcher die Pinolendrücke des Blechhalters als Stellgrößen verwendet. Hierbei wird der Prozesszustand mithilfe des Platinenkanteneinlaufs bestimmt, welcher mithilfe einer Lasertriangulationsmessung erfasst und mit experimentell bestimmten Platinenkanteneinläufen abgeglichen wird. Zur Erprobung des geschlossenen Regelkreises werden tribologische Parameter, die Blechdicke, die Werkstoffkennwerte und die Orientierung der Platine variiert. Um trotz Prozessstörungen ein positives Prozessergebnis zu erreichen, ist die Anpassung der Pinolendrücke meist ausreichend. Jedoch konnte hierbei eine gegenseitige Beeinflussung der Pinolendrücke festgestellt werden, sodass signifikante Veränderungen des tribologischen Systems mit dieser Methode daher nicht ausgeglichen werden können. Des Weiteren wurde diese Methode lediglich für die Herstellung von Doppelspülen aus Edelstahl angewendet. Hierdurch ergibt sich ein Handlungsbedarf bzgl. der Übertragung dieser Methode auf unregelmäßig geformte Blechbauteile, wie sie im Karosseriebau überwiegen.

Yun und Doege [Doe02, Yun05] erfassen in ihrem Ansatz mithilfe von acht optischen CMOS-Sensoren, die nahe der Matrizenkantenrundung bei einem rechteckigen Blechformteil mit senkrechter Zarge eingebaut sind, den Stofffluss im Flansch eines Bauteils. Hieraus wird mithilfe eines Fuzzy-Reglers ein optimaler Soll-Blechhalterkraftverlauf über die Ziehtiefe erzeugt, wobei bei der Regelung des Prozesses im Betrieb lediglich einer von acht Sensoren zur Bestimmung des Stoffflusses verwendet wird. Hierdurch wird das Problem der Priorisierung, welche der insgesamt acht Messgrößen für die Regelung der Blechhalterkraft entscheidend ist, umgangen. Gleichzeitig führt dies jedoch zu einer Ungenauigkeit bei der Zustandsbestimmung.

Hengelhaupt [Hen06a, Hen06b] verwendete ein Werkzeug mit einem Segmentelastischen Blechhalter, um den Tiefziehprozess zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hübten zu regeln. Für diese Regelung wurde in dieses Versuchswerkzeug ein Faltensensor zur Messung der Faltenhöhe von Falten erster Art verwendet. Außerdem wurde ein Platinenkanteneinzugsensor nach Forstmann [For00] für die Ermittlung des Platinenkanteneinzugs verwendet, sowie ein Reibungskraftsensor zur Messung der Reibung zwischen Platine und Blechhalter. Zudem wurde mittels vier Stempelkraftsensoren die wirkende Stempelkraft gemessen. Dadurch können die Reibungskraft, die Faltenhöhe sowie der Platinenkanteneinlauf als Regelgröße verwendet werden. Hierbei bildet die Stellgröße des Prozesses die Blechhalterkraft, welche zwischen zwei Hübten entsprechend der Regelgröße angepasst wird. Dadurch konnte gezeigt werden, dass der Tiefziehprozess durch eine variable Steuerung der Blechhalterkraft von den Schwankungen der Prozesseingangsparameter entkoppelt werden kann. Infolgedessen kann durch den Einsatz eines solchen segmentelastischen Blechhalters in Verbindung mit der beschriebenen Prozessregelung das zeitintensive Einarbeiten von Werkzeugen deutlich verkürzt werden.

Auf Basis des Platinenkanteneinlaufs regelt Rittmeyer [Rit07] den Tiefziehprozess von Hub zu Hub mithilfe eines definiert elastischen Blechhalters. Dabei wird mithilfe von optischen Sensoren in vier Flanschbereichen der jeweilige Platinenkanteneinlauf gemessen. Der Blechhalter wird hierbei mit 16 Gasfedern abgestützt, welche in Vierergruppen jeweils einem optischen Sensor zugeordnet sind. Liegt der Ist-Wert des Platinenkanteneinlaufs bei einem Hub über dem experimentell bestimmten Gutteil-Intervall, erfolgt vor dem nächsten Hub eine Druckanpassung bei den Gasdruckfedern. Diese Druckanpassung erfolgt automatisiert über entsprechend vordefinierte Schemata.

Grossenbacher [Gro08] verfolgte den Ansatz der Quantifizierung der Einflüsse einzelner Prozessgrößen auf den Umformprozess. Aus diesen Erkenntnissen sollte zunächst ein Prozessfenster für eine robuste Führung von Stößelbewegung und Ziehkissenkraft entwickelt werden. Diese Strategie beruht auf der Bauteil- und prozessspezifischen Verkleinerung des Prozessfensters, sodass beim Auftreten von Ausschussteilen, je nach Versagensart und Ort des Auftretens, mittels einer Anpassung der Blechhalterkraft der Umformvorgang wieder stabilisiert wird.

In der Arbeit [Bla12] wird der Ansatz von [Gro08] erheblich verfeinert, da konkrete Handlungsanweisungen für die Prozessführung zur Herstellung eines Bauteils formuliert werden. Des Weiteren wird der Verlauf der Blechhalterkraft des segmentelastischen Blechhalters über den Hub optimiert. Dazu wurde der Tiefziehprozess der hierfür verwendeten Kotflügelähnlichen Versuchsgeometrie (KVG) sehr genau mithilfe von Zargenspannungssensoren analysiert und diese Analyse parallel mittels einer stochastischen Simulation abgeglichen. Daraus konnte ein sehr gutes Prozessverständnis erreicht werden, um im Falle eines Fehlteils die Blechhalterkraft des Segmentelastischen Blechhalters in den relevanten Segmenten für den darauffolgenden Hub anzupassen. Hierbei hat sich die Zargenspannung als äußerst geeignete Regelgröße für den Tiefziehprozess erwiesen.

Die KVG wird auch bei [Bec01, Bec04] verwendet, hierbei sind in den geraden Abschnitten des Rückhaltesystems höhenverstellbare Laufsicken integriert. Durch einen Keilschiebeme-

chanismus, welcher durch einen Hydraulikzylinder angetrieben wird, sind die Laufsicken in ihrer Höhe verstellbar. Hierbei kann die Rückhaltewirkung am Prozessende stark erhöht werden, um beispielsweise die Rückfederung des Bauteils durch eine hohe Abstreckung zu minimieren.

Eine Kombination aus der KVG mit verstellbarer Laufsickenhöhe als Stellgröße und den Zargenspannungssensoren als Regelgröße wurde durch Siegert [Sie07] als Regelkreis erprobt. Dazu wurden von fehlerfreien Bauteilen der Zargenspannungsverlauf sowie die dazugehörigen Ziehstabhöhenverläufe in Bezug auf den Pressenhub aufgezeichnet. Diese Ziehstabhöhenverläufe wurden während des Hubes von der Regelung nachgefahren und konnten, je nach Prozessergebnis, zwischen den Hüben angepasst werden. Die Anpassung der Methode hin zu einer direkten Regelung der Stellgröße „Ziehstabhöhe“ unter Verwendung der Regelgröße „Zargenspannung“, könnte hierbei ein möglicher Weg für eine Regelung des Tiefziehens während des Hubs sein. Dabei würde der Zwischenschritt einer Anpassung der Sollkurve der Ziehstabhöhen zwischen den Hüben entfallen.

In der Arbeit von Mork [Mor11] wurden die Werkstoffkennwerte der umzuformenden Blechplatinen mithilfe einer Wirbelstrommessung bestimmt, um mithilfe dieser Daten eine Prozessregelung zwischen den Umformhüben zu realisieren, dessen Prozessschema ist in Abbildung 28 dargestellt. Dazu wurde mit Wirbelstromsensoren eine spezifische Magnetsignatur für einen Werkstoff erstellt und mithilfe von Werkstoffprüfungen jeweils Werkstoffkennwerten zugeordnet. Des Weiteren wurde ein Frontklappenwerkzeug, das sogenannte „Intelligente Werkzeug“ der Audi AG, mit höhenverstellbaren Distanzen ausgestattet, welche grundsätzlich zwei Zustände aufweisen. Beim Zustand „im Eingriff“ ist die Distanz ausgefahren und leitet einen Teil der Blechhalterkraft ab. Im Zustand „nicht im Eingriff“ ist die Distanz eingefahren und nimmt keinerlei Einfluss auf den Prozess. Hiernach werden im Prozess vor jedem Pressenhub die Werkstoffkennwerte gemessen und in Abhängigkeit der gemessenen Werkstoffkennwerte die verstellbaren Distanzen des Werkzeugs in den Zustand „im Eingriff“ oder „nicht im Eingriff“ versetzt.

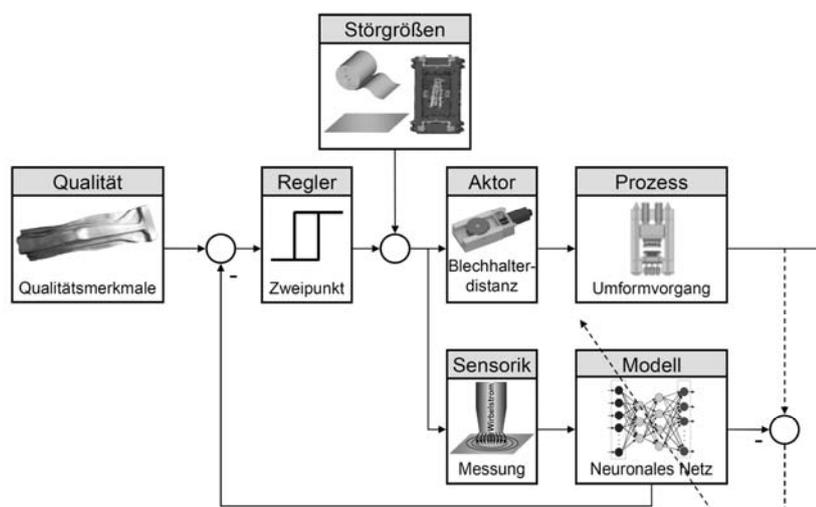


Abbildung 28: Modellbasierter Regelkreis auf Basis eines Neuronalen Netzes, welcher von Mork verwendet wurde [Mor11].

Von Faaß [Faa09] wurde ein Ansatz entwickelt und im Presswerk erprobt, bei dem Daten von kontinuierlichen Messungen der Werkstoffkennwerte, der Blechdicke, der Platinenbeölung, der Werkzeugtemperatur sowie den Werkzeugeinstellungen und der dabei erzielten Bauteilqualität verwendet werden, um ein Neuronales Netz anzulernen. Dieses Neuronale Netz soll anhand der kontinuierlichen Messungen nach dem Training die Bauteilqualität prognostizieren. Zusätzlich wurde der gesamte Prozess mithilfe von virtuellen Sensitivitätsanalysen untersucht, um mögliche Gegenmaßnahmen bei prognostizierten Ausschussteilen zu bestimmen. Als Stellgröße des geregelten Prozesses wurde dieselbe verstellbare Blechhalterdistanz verwendet wie bei der Arbeit von Mork [Mor11].

Bei Heingärtner [Hei11] wird dieselbe Messmethodik zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte verwendet, wie dies beim Ansatz von [Faa09] der Fall ist. Auf Basis einer virtuellen Sensitivitätsanalyse wird für verschiedene Werkstoffkennwerte jene Blechhalterkraft bestimmt, welche zu einem Gutteil führt. Im Prozess wird auf Basis der ermittelten Werkstoffkennwerte und mithilfe einer entsprechenden Steuerung die jeweils notwendige Blechhalterkraft zur Herstellung eines Gutteils am Werkzeug eingestellt.

Endelt [End12] verwendet den Platinenkanteneinzug, welcher punktuell mithilfe von Lasertriangulationssensoren, als Regelgröße im Prozess gemessen wird. Hierbei wird der Platinenkanteneinzug mithilfe von hydraulischen Taschen geregelt, welche im Blechhalter integriert sind und durch Anpassung des hydraulischen Drucks entsprechende Rückhaltekräfte erzeugen. Der hier verwendete Algorithmus kann als erster und bisher einziger überhaupt bei Bedarf während des Hubs regelnd eingreifen. Der Nachteil dieses Systems besteht darin, dass es aufgrund des punktuell gemessenen Platinenkanteneinzugs eine nur bedingt aussagekräftige bzw. sensitive Regelgröße verwendet. Außerdem wurde das System bisher lediglich für vollsymmetrische quadratische Näpfe im akademischen Bereich verwendet.

Walzl [Wal14] setzt in seiner vorgestellten Arbeit eine aktive Rissinitialisierung im Fensterflansch einer Vordertüre ein, dies dient einer aktiven Steuerung des Materialeinzugs mittels eines Entlastungsschlitzes. Der Entlastungsschlitz wird bei einer zuvor festgelegten Hubhöhe mithilfe eines Schneidwerkzeugs in die Ankonstruktion des Bauteils eingebracht. Damit kann in den Prozess eingegriffen und ein Versagen des Bauteils verhindert werden.

Bei Neugebauer [Neu06, Neu11d] wird als Regelgröße der Platinenkanteneinzug verwendet, der mithilfe von Lasertriangulationssensoren ermittelt wird. Hierzu wird der im Prozess ermittelte, aktuelle Platinenkanteneinzug mit dem von zuvor vermessenen Gutteilen verglichen. Als Stellgröße wird hierbei die Blechhalterkraft verwendet, welche zwischen den Hübem mithilfe von Piezoaktoren verändert wird.

Kraft [Kra17] sowie Heingärtner [Hei17] verfolgen einen ähnlichen Ansatz zur adaptiven Prozesssteuerung des Platinenkanteneinzugs mit Ziehhilfen bzw. höhenverstellbaren Distanzen zwischen Matrize und Blechhalter (vgl. Abbildung 29). Dabei dient die Erfassung des Platinenkanteneinzugs mithilfe optischer Messtechnik entlang des gesamten Bauteilumfangs als Steuergröße für die Steuerung des Tiefziehprozesses. Im Gegensatz zur punktuellen Messung des Platinenkanteneinlaufs, wird bei diesem Ansatz die gesamte Kontur des Ziehteils nach dem Umformen vermessen. Bei diesem Ansatz ist die Metamodelbildung zur Berech-

nung der Führungsgröße nach [Har16] und [Hei17] von besonderem Interesse. Hierbei werden der Prozess mithilfe einer stochastischen Simulation abgebildet und die Ergebnisse in einem Kennfeld hinterlegt. Hiermit kann auf Basis des Platinenkanteneinzugs des vorherigen Hubs das Prozessergebnis des nachfolgenden Hubs geschätzt werden. Dies ermöglicht einen korrigierenden Eingriff in den Prozess.

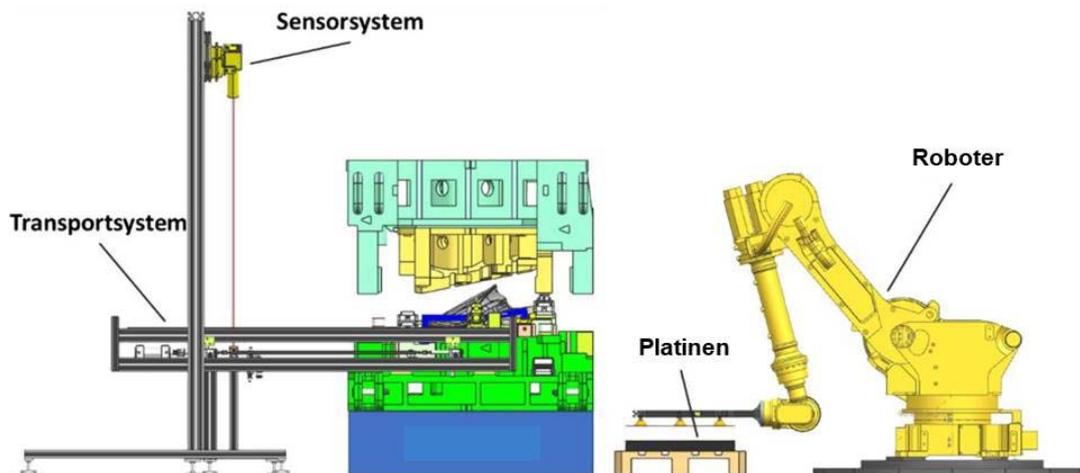


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Ansatzes nach [Kra17] zur adaptiven Prozesssteuerung des Tiefziehens zwischen den Hüben.

### 3.2 Der Platinenkanteneinzug als Regelgröße

Eine geeignete Regelgröße ist entscheidend für eine hochwertige Regelung. Hierbei muss diese nicht nur dazu geeignet sein, eine sichere Prozessführung zu gewährleisten, sondern sollte auch zur Erkennung von Fehlteilen und qualitativen Bauteilmängeln dienen. Dabei bilden beim Tiefziehen das Auftreten von Falten und Reißen die hauptsächlichen Fehler [Lan02]. Deshalb wurde im Rahmen einer Voruntersuchung die in der Umformtechnik, und speziell beim Tiefziehen sehr verbreitete Messgröße des Platinenkanteneinzugs auf ihre Fähigkeit hin untersucht, Fehlteile sicher und zuverlässig erkennen zu können. Hierbei wird einerseits untersucht ob sich der Platinenkanteneinzug als Regelgröße für den Tiefziehprozess eignet und andererseits, ob Qualitätsmängel bei einem Tiefziehteil erkannt werden können. Dabei wird untersucht inwieweit an der Signalhöhe oder am Signalverlauf des Platinenkanteneinzugs entstehende Qualitätsmängel bei einem Tiefziehteil erkannt werden können.

Hierbei wurde zur Versuchsdurchführung ein Werkzeug zur Herstellung einer KVG verwendet. Dazu wurde dieses an zwei Seiten des Umformwerkzeugs mit jeweils einem Laserentfernungsmesser der Firma Sick ausgestattet. Diese ermöglichen die Messung des Platinenkanteneinzugs bei geschlossenem Werkzeug mit einer Genauigkeit von bis zu 0,01 mm. Auf das verwendete Werkzeug sowie dessen Erweiterung mit Messmitteln wird in einem späteren Kapitel näher eingegangen.

Zur Untersuchung des Platinenkanteneinzugs wurden Versuche mit identischer Ziehtiefe, identischem Platinenbeschnitt, jedoch sich verändernden Schmierzuständen auf der Platinen Ober- und Unterseite durchgeführt. Dadurch konnten bei absolut identischer Bauteilgeo-

metrie und Prozessführung, Reißen, Falten sowie Gutteile hergestellt werden. Somit konnten die Bedingungen eines Serienprozesses nachgestellt werden, wobei die sich verändernde Schmierung zur Auslösung von Fehlteilen genutzt wurde. Für alle Versuche wurde der Stahlwerkstoff HC340 verwendet. In Abbildung 30 ist der Platinenkanteneinzug an einer ausgewählten Position des Bauteilflansches über mehrere Versuche und über die Qualität hinsichtlich Gut- oder Fehlteil dargestellt. Dabei wird der Platinenkanteneinzug der Fehlteile mit dem Platinenkanteneinzug von Gutteilen an derselben Stelle verglichen. Für eine eindeutige Ortsbeschreibung der auftretenden Bauteilfehler wurde die Versuchsgeometrie in zehn Zonen unterteilt.

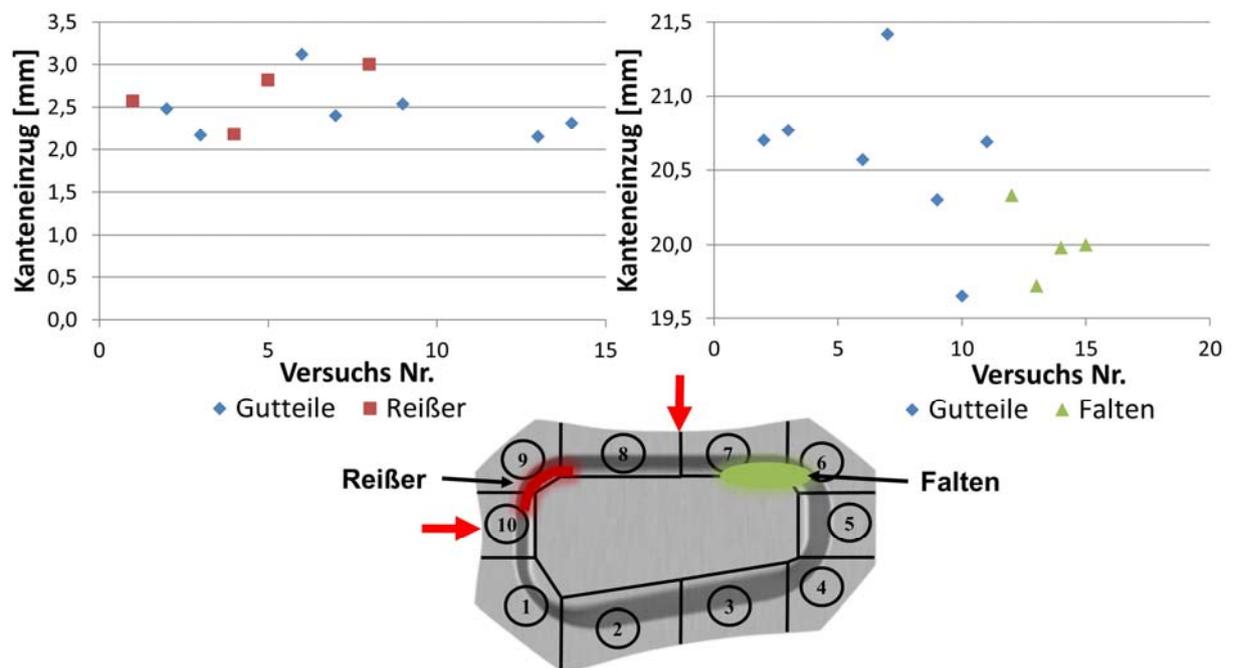


Abbildung 30: Messung des Platinenkanteneinzugs bei Gut- und bei Fehlteilen, bei einem Werkstoff HC340 mit einer Beölung 0-1 g/m<sup>2</sup>.

Die zur Messung des Platinenkanteneinzugs verwendeten Laserentfernungsmessgeräte sind bei dem Versuchswerkzeug derart angebracht, dass sie den Platinenkanteneinzug in Bauteilzone zehn und an der Grenze zwischen Bauteilzone sieben und acht erfassen können. Bei den Versuchen wurde die Schmierung derart verändert, dass Reißen ausschließlich im Grenzbereich zwischen Bauteilzone neun und zehn, sowie Falten ausschließlich an der Grenze zwischen Bauteilzone sieben und acht auftraten. Somit konnte durch die räumliche Nähe zwischen Messstelle und Ort des Bauteilfehls jeweils der maximal mögliche Erkenntnisgewinn durch die Messung des Platinenkanteneinzugs sichergestellt werden. Trotzdem ist erkennbar, dass der Platinenkanteneinzug keine genaue Zustandsgröße bzgl. des Auftretens von Bauteilfehlern darstellt. Er lässt keine exakte Aussage über das Auftreten von Bauteilfehlern zu, dies ist jedoch für eine Regelgröße zur Regelung während des Hubs absolut notwendig. Der Platinenkanteneinzug unterliegt im Prozess erfahrungsgemäß Schwankungen zwischen  $\pm 15-30\%$  bei „gleichem“ Prozessergebnis. Derartige Schwankungen sind für eine Regelung während des Hubs zu groß, um einen stabilen Prozess gewährleisten zu können.

Auf Grund der Streubreite des Einzugs kann keine hinreichend genaue Aussage über die Bauteilqualität und den Zustand des Umformprozesses getroffen werden. Dadurch erweist sich der Platinenkanteneinzug nur als bedingt geeignet für eine Regelung des Tiefziehens während des Hubs. Daher wird in der vorliegenden Arbeit die Zargenspannung als Regelgröße für eine Regelung des Tiefziehens während des Hubs verwendet. Diese wurde bereits in vorherigen Arbeiten von [Bec03, Bla12, Ker97, Sie07] als Messgröße beim Tiefziehen verwendet. Hierbei konnte eine gute Abbildung des Prozessgeschehens durch die Zargenspannung erzielt werden. Die Zargenspannung selbst sowie deren messtechnische Erfassung werden zu einem späteren Zeitpunkt näher erläutert.

### 3.3 Grundlagen der modellbasierten Regelung

Ein verbreiteter Ansatz, um eine hochwertige Regelung aufzubauen, ist der einer modellbasierten Regelung [Lun14]. Hierbei existieren zwei grundsätzliche Möglichkeiten, zum einen der Ansatz eines mathematischen Zustandsraummodells und zum anderen der Ansatz eines heuristischen Modells. Aufgrund der sehr guten Regelungsqualität wäre der Ansatz eines mathematischen Modells anzustreben. Dabei wird eine gute Regelungsqualität mithilfe eines Zustandsraummodells erreicht, da dieses den Einsatz von Beobachtern, bspw. den Luenberger-Beobachter, erlaubt. Hierfür gelten jedoch einige Voraussetzungen, welche das zu regelnde System erfüllen muss. Im Folgenden wird zunächst das Zustandsraummodell allgemein beschrieben, ehe die notwendigen Voraussetzungen für dessen Anwendung geprüft werden. Sollte ein Zustandsraummodell nicht verwendbar sein, wird die Möglichkeit der Verwendung einer heuristischen Modellbildung mittels Metamodelle eruiert.

#### 3.3.1 Die Zustandsraumdarstellung

Die Zustandsraumdarstellung ist eine Form der Systembeschreibung eines dynamischen Übertragungssystems. Sie wird hauptsächlich als Methode der Analyse und Synthese von dynamischen Systemen im Zeitbereich verwendet, auch und gerade bei Mehrgrößensystemen [Lun14]. Hierbei werden sämtliche Beziehungen der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen in Form von Matrizen und Vektoren dargestellt [Unb08]. Dabei wird das dynamische System durch zwei Zustandsdifferentialgleichungen beschrieben, die Zustands- und die Ausgangsgleichung. Entwickelt wurde diese Systembeschreibung von Rudolf Kalman und fand seine erste große Anwendung beim Apollo Programm [Unb08]. Ein Zustandsraum stellt sich allgemein wie folgt dar:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t), & x(0) &= x_0 \\ y(t) &= c^T x(t) + du(t). \end{aligned} \tag{49}$$

Eine Zustandsraumdarstellung mit ihren Übertragungsfaktoren ist in Abbildung 31 dargestellt.

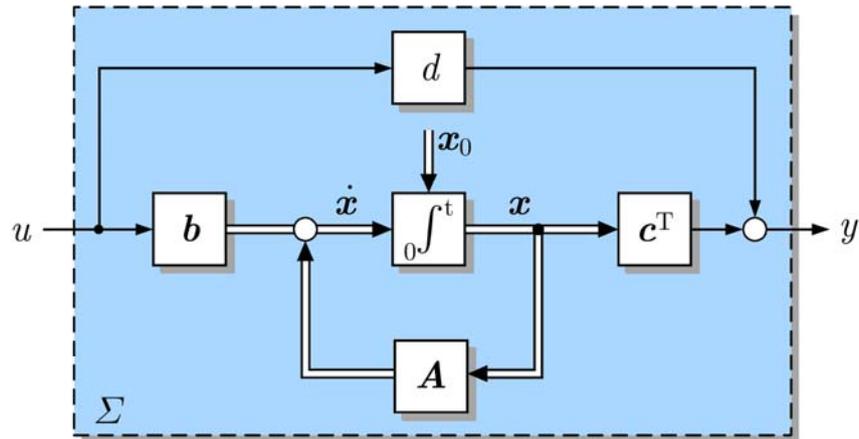


Abbildung 31: Grafische Darstellung des Zustandsraummodells mit den Übertragungsfaktoren  $A$ ,  $b$ ,  $c^T$  und  $d$ , sowie den Signalen bzw. Zustandsgrößen  $u(t)$ ,  $x(t)$  und  $y(t)$  [Lun14].

Bei der Zustandsraumdarstellung wird die systembeschreibende Differentialgleichung  $n$ -ter Ordnung in  $n$ -Differenzialgleichungen erster Ordnung zerlegt. Hierbei beschreiben die Regelgrößen den physikalischen Energiegehalt der enthaltenen Elemente, wie bspw. die Spannung eines Kondensators oder die Auslenkung einer Feder in einem Feder-Massesystem. Die Anzahl der Regelgrößen  $x_n(t)$  des Zustandsvektors  $\vec{x}(t)$  entspricht der Dimension des Zustandsraums. Dabei sind im Zustandsvektor zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  alle Informationen des dynamischen Übertragungssystems enthalten. Die maßgebliche Voraussetzung, dass eine modellbasierte Regelung auf Basis einer Zustandsraumdarstellung realisiert werden kann, ist jene dass ein lineares System vorliegt. Dies gilt es nun im nächsten Schritt anhand der die Blechumformung beschreibenden Differentialgleichung zu überprüfen.

### 3.3.2 Das inkrementell Stoffgesetz der Blechumformung

Bei der Blechumformung werden die beschreibenden inkrementellen Stoffgesetze aus der Plastizitätstheorie hergeleitet. Im Folgenden soll deren Herleitung in Ausschnitten behandelt werden. Diese bezieht sich auf die Arbeiten [Par03] und [Lan02] und kann dort im Detail nachgelesen werden. Die Plastizitätstheorie bezieht sich auf eine endliche und freie Bewegung im Raum, wobei diese grundlegenden Betrachtungen um die Spezialfälle der Plastizitätstheorie erweitert werden, nämlich die speziellen Stoffgesetze zur Formänderung. Diese unterteilen sich in vier Stoffgesetze, das starr-plastische, das visko-plastische, das elastisch-plastische sowie das elastisch-visko-plastische Stoffgesetz (vgl. Abbildung 14). Im Fall der Blechumformung verwenden wir zur weiteren Herleitung das elastisch-plastische Stoffgesetz, verallgemeinert nach Prandtl-Reuß. Mit diesem können Rückfederungen berücksichtigt werden, jedoch keine Einflüsse der Umformgeschwindigkeit. Das elasto-plastische Stoffgesetz sieht zu:

$$d\varepsilon_{ij}^{tot} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (50)$$

Wobei  $d\varepsilon_{ij}^e$  und  $d\varepsilon_{ij}^p$  den elastischen respektive plastischen Anteil darstellen und mit dem elastischen sowie plastischen Anteil im realen Umformprozess gleichgesetzt werden können. Die

Betrachtung nach dem Gesetz von Prandtl-Reuß ist nur dann erlaubt, solange der elastische Anteil an der Umformung erheblich geringer ist als der plastische Anteil [Lan02]. Nach mehreren Umformungen sowie Erweiterungen der Funktion kann die elasto-plastische Verformung zu den nach [Hor20] Gleichungen zusammengefasst werden:

$$C_{ijkl}^{ep} = C_{ijkl} - \frac{C_{ijkl} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} C_{pqkl}}{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijkl} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} + H' \left( \frac{2}{3} \sigma_v \right)^2} \quad (51)$$

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{ij}^{tot} \quad (52)$$

Dabei ist  $C_{ijkl}^{ep}$  als elasto-plastischer Werkstoffmodul definiert und  $F$  stellt wiederum die Fließortfunktion dar. Des Weiteren beschreibt  $H'$  die Steigung der Fließkurve sowie werden über  $F$  und  $H$  das anisotrope Fließverhalten und die Verfestigung des Werkstoffes spezifiziert. Welche Möglichkeiten es dazu gibt, wird bei [Hor20] ausführlich beschrieben. Diese elasto-plastische Matrix wird normalerweise an jedem Integrationspunkt des Elements berechnet. Diese werden dann verwendet, um die Linearisierung der Struktursteifigkeitsmatrix zu erzeugen, um die Konvergenziterationen für das aktuelle Inkrement durchzuführen. Da es kein Differentialgleichungsmodell für die Blechumformung existiert, besteht keine Möglichkeit eine Zustandsraumdarstellung für die Blechumformung zu erzeugen [Lun14]. Deshalb ist es nicht möglich bspw. einen Luenberger-Beobachter oder andere Verfahren der Zustandsrekonstruktion anzuwenden.

Die einzige Möglichkeit diese Gleichung zu lösen, wird durch die Finite Elemente Methode gegeben, welche seit Jahrzehnten in der Umformtechnischen Entwicklung bekannt und in kommerziellen Programmen (AutoForm, LS-Dyna, PamStamp, Ansys, usw.) implementiert ist. Deshalb kann keine klassische Modellbasierte Regelung verwirklicht werden.

Dennoch gäbe es die Möglichkeit einer quasi modelbasierten Regelung mithilfe eines Metamodells. Hierbei wird der Prozess mithilfe der Finiten Elemente Methode simuliert und mit deren Ergebnis eine Solltrajektorie der Regelgröße geplant. Des Weiteren kann und sollte diese Solltrajektorie auf Basis einer stochastischen Simulation geplant werden, um ein möglichst optimales Prozessergebnis bei verschiedenen Prozessverläufen zu erreichen. Diese geplante Trajektorie dient in Form eines Metamodell während des realen Umformprozess als Führungsgröße des zu regelnden Prozesses.

## 4 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

### 4.1 Motivation

Auf Grund der hohen Umweltauflagen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen bei Neufahrzeugen und dem damit einhergehenden, erhöhten Bedarf an Elektrofahrzeugen sowie der Marktgetriebenen steigenden Produktdiversifikation, ist die Automobilindustrie mit einem erhöhten Kostendruck konfrontiert. Damit die hohen Umweltauflagen eingehalten werden können, sind die Hersteller gezwungen, vermehrt alternative bzw. hochfeste Werkstoffe in ihren Fahrzeugkarosserien zu verwenden sowie neue Produktionsprozesse zu entwickeln. Fahzeugaussenhautbauteile werden vermehrt aus Aluminiumlegierungen hergestellt. Dadurch wird der Kostendruck durch die Produktdiversifikation in Folge der Verwendung dieser neuen Werkstoffgüten weiter verschärft. Dies begründet sich in den höheren Fertigungskosten der hierfür notwendigen Umformwerkzeuge, welche auf Grund der Werkstoffeigenschaften erheblich komplexer konzipiert sind. Eine erhöhte Ausschussrate bei der Umformung dieser Werkstoffgüten steuert ein Übriges zu der Kostenproblematik bei.

Aufgrund der Problematik der hohen Ausschussrate im Betrieb solcher Produktionsprozesse sollte hier mithilfe digitaler Methoden angesetzt werden. Zwar kommen in der Blechumformung in den letzten Jahren vermehrt digitale Methoden in Form von Prozessregelungen und adaptiven Prozesssteuerungen zum Einsatz, ein Blick auf den aktuellen Stand der Technik zeigt jedoch, dass sich diese Ansätze fast ausschließlich auf den regelnden Eingriff zwischen den Hübten beschränken. Dies kann bei komplexen Bauteilen und punktueller Messung des meist als Regelgröße verwendeten Platinenkanteneinzugs einerseits auf die Messungenauigkeiten dessen zurückgeführt werden, andererseits kann eine aussagekräftige Messung des Platinenkanteneinzugs entlang des gesamten Bauteilumfangs nur bei geöffnetem Werkzeug erfolgen. Beides macht eine Regelung zwischen den Hübten zum naheliegendsten Ansatz.

Die in Kapitel 2.2.2 vorgestellte Zargenspannung bietet hierbei das Potential einer genauen Regelgröße, welche eine genaue Zustandsrekonstruktion während des Tiefziehhubs erlaubt. Bereits in den Arbeiten von [Bec04, Bla12, Sie07] wurden die Eignung sowie die Genauigkeit der Zargenspannung als Regelgröße festgestellt. Eine Verwendung der Zargenspannung als Regelgröße würde eine Regelung während des Tiefziehhubs ermöglichen. Hierbei weist eine Regelung während des Tiefziehhubs den Vorteil auf, dass das Auftreten von Fehlteilen möglicherweise ganz verhindert werden kann, da während des Tiefziehhubs direkt eingegriffen werden kann. Des Weiteren weist der Zargenspannungssensor, da er in der Werkzeugstruktur verbaut wird, eine größere Flexibilität bzgl. des Messortes auf. Er kann direkt angrenzend an den kritischen Bauteilstellen im Werkzeug integriert werden. Durch die räumliche Nähe des Sensors zur Umformzone ist ein weniger störungsbehafteter Messwert sowie lokal eine zielgerichtete Zustandsbestimmung zu erwarten. Der Einbau in der Werkzeugstruktur bietet den Vorteil, nämlich den Schutz der Sensorik vor schädlichen Umgebungseinflüssen im Produktionseinsatz.

Die Vorbetrachtung in Kapitel 3 zeigt den Bedarf einer modellbasierten Regelung während des Hubs auf. Hierbei stellt ein Metamodell des Prozesses auf Basis der Zargenspannung das Mittel der Wahl dar, welches ein großes Potential hinsichtlich der Steigerung der Prozessrobustheit des Tiefziehvorgangs in der Produktion erwarten lässt.

## 4.2 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit liegt darin, einen Regelungsansatz für das Tiefziehen zu entwickeln, welcher einen regelnden Eingriff während des Hubs ermöglicht. Als Ansatz hierfür soll eine vorgesteuerte Trajektorienfolgeregelung dienen. Dazu soll zunächst eine Methode zur Bildung eines geometrie- und werkstoffspezifischen Modells des Tiefziehprozesses für ein Versuchsbauteil der kotflügelähnlichen Versuchsgeometrie (KVG) [His93a] entwickelt werden. Hierbei wird die Zargenspannung, die zur Schätzung des Umformzustands während des Hubes herangezogen wird, als Mess- und Regelgröße des Tiefziehprozesses verwendet. Dieses Metamodell nutzt die ermittelten Zargenspannungen in zuvor festgelegten Bauteilsektoren als Solltrajektorie. Hierzu werden im Stempel des Versuchswerkzeugs zunächst versuchsweise zehn Zargenspannungssensoren für die Messung der Zargenspannung eingebaut. Diese sollen den genauen Zustand der Umformung abschätzen und damit eine quasi modellbasierte Regelung des Tiefziehprozesses ermöglichen.

Der bisherige Mangel an Modellen zur Regelung des Tiefziehens während des Umformhubs ist hauptsächlich auf die mangelnde Verfügbarkeit eines schnell berechenbaren und gleichzeitig genauen Modells zurückzuführen. Dies ist jedoch Grundvoraussetzung, um während des Pressenhubs den Platinenkanteneinzug des Ziehvorgangs hinreichend genau regeln zu können. Mithilfe einer vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung soll eine effiziente Regelung ermöglicht werden. Bei dem gewählten Ansatz der vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung bilden die Solltrajektorien ein Metamodell des zu regelnden Umformprozesses, welches im Vorfeld offline bestimmt werden kann. Dieses kann dann während des Prozesses ausreichend schnell und in mit einer hohen Genauigkeit ausgewertet werden, um die Führungsgröße für den Regelkreis zur Verfügung zu stellen.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Bestimmung eines Modells für die Regelung basiert auf dem Response Surface Method (RSM) Optimierungsalgorithmus, welcher mithilfe einer Simulation mit stochastisch verteilten Eingangsparametern einen optimalen Prozessverlauf berechnet [Box51]. Die zu optimierenden Größen sind hierbei frei bestimmbar und vom Zweck der Optimierung abhängig. Das mithilfe der Simulation errechnete Optimum bzgl. des erwartenden Umformergebnisses, welches u.a. die Vorsteuerwerte sowie die Trajektorien der Zargenspannung, die als Führungsgrößen im Regelkreis verwendet werden beinhaltet, stellt den Kern des Metamodells dar. Infolgedessen kann eine zeitaufwändige und daher impraktikable Einzelberechnung jedes einzelnen Umformprozesses mittels FE-Simulationen umgangen werden.

Mithilfe der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik soll eine höhere Robustheit des Tiefziehprozesses gegenüber werkstofflichen Chargenschwankungen sowie prozessbedingten und tribologischen Störungen (bspw. einer veränderten Schmierung) erreicht werden. Somit kann

die Bauteilqualität gezielt auf das zuvor spezifizierte Qualitätsniveau unter Produktionsaspekten gebracht werden. Außerdem soll ein Erkenntnisgewinn bei der Entstehung von Qualitätsmängeln am Bauteil erzielt werden. Das im Folgenden vorgestellte Regelungssystem kann auch als reines Monitoringsystem ohne regelnden Eingriff in den Tiefziehprozess verwendet werden, bspw. bei sehr einfachen Strukturteilen, bei denen sich eine aufwendige Aktorik nicht wirtschaftlich darstellen lässt. Hierbei kann das Regelungssystem zur automatischen Erkennung von Fehlteilen verwendet werden. Dies kann zur Kosten Reduktion in der Produktion beitragen, da durch diese Automatisierung die Qualitätssicherungskosten sinken. Im Rahmen der aktuellen Bemühungen rund um die Digitalisierung von Produktionsprozessen, können die im Rahmen der Regelung oder automatisierten Qualitätssicherung gewonnenen Daten in Zukunft auch im Bereich des Data Mining und des maschinellen Lernens genutzt werden. Zur Erreichung dessen soll im Rahmen dieser Arbeit ein Regelungsansatz auf Basis einer Trajektorienfolgeregelung entwickelt werden mit der Zargenspannung als Regelgröße. Dieser Regelungsansatz soll eine genaue Regelung des Tiefziehens während des Hubes ermöglichen, um ein gleichbleibend hochwertiges Prozessergebnis zu erhalten. Dazu werden im Rahmen dieser Arbeit drei Teilziele verfolgt.

#### Arbeitsschritt 1:

Zunächst muss das postulierte Reglerdesign für das vorliegende Regelungsproblem bestimmt bzw. überprüft werden. Hierbei liegt das Augenmerk auf der bauteilspezifischen Metamodellierung des Ziehvorgangs. Für eine Regelung, deren Dynamik hinreichend schnell und genau genug für eine Regelung während des Hubs ist, muss das Metamodell exakt bestimmt werden. Das Metamodell muss hierbei eine ausreichend schnelle und exakte Zustandsschätzung ermöglichen, damit der Regler in Anbetracht der kurzen Prozesszeiten auf auftretende Störungen eine geeignete Regelungsantwort geben kann. Weiterhin muss das Metamodell eine Möglichkeit bieten, die Bauteilqualität in adäquater Weise quantifizieren zu können. Die Eignung der verwendeten Regelgröße sowie die Abschätzung des Messkonzepts der Zargenspannung wurden zuvor in der Arbeit [Bla12] nachgewiesen.

#### Arbeitsschritt 2:

Im nächsten Schritt soll ein Versuchswerkzeug gefertigt bzw. umgebaut werden, um den entwickelten Regelungsansatz zu erproben. Dieses Versuchswerkzeug wird zunächst mit der notwendigen Aktorik und Sensorik ausgestattet bzw. um diese erweitert. Gerade bei der Auswahl der Aktorik muss auf eine ausreichend hohe Dynamik der Komponenten geachtet werden, um den kurzen Prozesszeiten in geeigneter Weise entgegenzutreten. Für das Versuchswerkzeug muss in diesem Arbeitspaket die Leistungs- und die Steuerungselektronik aufgebaut werden. Anschließend muss der Regelungsansatz mithilfe einer geeigneten Software programmiert werden, hierbei ist aus Gründen der Betriebssicherheit ein möglichst hoher Automatisierungsgrad in der Steuerungssoftware anzustreben. Aufgrund der geringen Prozesszeit beim Tiefziehen von etwa einer Sekunde, muss auf eine besonders hohe Schnelligkeit des Programms geachtet werden. Bei der anschließenden Inbetriebnahme werden alle Reglerpab-

stimmt. Außerdem müssen einzelne Programmteile auf die Sensoren und Aktoren abgestimmt werden, nur so ist eine schnelle und betriebssichere Regelung sichergestellt.

### Arbeitsschritt 3:

Im finalen Schritt wird die Leistungsfähigkeit der Regelung überprüft. Zunächst wird die Leistungsfähigkeit des Regelungsansatzes selbst geprüft, dazu werden die Signale und ihre Verläufe während des Prozesses analysiert. Es gilt des Weiteren zu prüfen, inwieweit der Regelkreis auf Störungen des Prozesses reagiert und ob die Antwort des Regelkreises ausreichend ist, um Prozessstörungen und daraus resultierende Fehlteile zu verhindern. Dies wird für verschiedene Prozessstörungen untersucht, denn dies ermöglicht eine umfassende Beurteilung der Regelungsgüte. Zusätzlich wird dabei überprüft, inwieweit der gewählte Regelungsansatz den vorliegenden Prozessstörungen entgegenwirken kann, um diese letztlich zu vermeiden. Schließlich wird die Regelung aus umformtechnischer Sicht bewertet. Hierbei liegt das Augenmerk explizit auf der Steigerung der Robustheit des Umformprozesses gegenüber Störungen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit soll die Stärke der Störung quantifizierbar sein. Es wird dann die Robustheit des konventionellen Prozesses mit der Robustheit des geregelten Prozesses verglichen.

## 5 Neuartige Methodik zur Regelung des Tiefziehprozesses

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Schritte der Entwicklung und des Aufbaus der neuartigen Methodik zur Regelung des Tiefziehprozesses eingegangen. Zunächst wird auf die hierfür notwendigen Werkzeuge und Anlagen eingegangen. Danach auf die mechatronischen Systeme sowie die Software und zuletzt auf die Modellbildung sowie den Reglerentwurf zur Entwicklung und zum Aufbau einer flach vorgesteuerten Trajektorien Folge-regelung, welche auf einem Metamodell basiert. Zur Entwicklung der in Kapitel 4 postulierten Regelung des Tiefziehvorgangs während des Hubs wird zunächst eine geeignete Versuchsgeometrie für ein Ziehteil vorgestellt, deren Produktionsprozess Gegenstand der Reglerentwicklung ist. Diese akademische Geometrie stellt höchste Ansprüche an die Bauteilkomplexität. Des Weiteren muss das verwendete Tiefziehwerkzeug die Möglichkeit bieten die Blechhalterkraft lokal beeinflussen zu können, um einen regelnden Eingriff in den Tiefziehprozess während des Hubs zu ermöglichen. Zusätzlich müssen die für die Regelung notwendigen Sensorkomponenten im Werkzeug integriert werden.

### 5.1 Verwendete Versuchsgeometrie

Die zur Entwicklung einer Regelung des Tiefziehens während des Umformhubs verwendete Bauteilgeometrie basiert auf der sogenannten kotflügelähnlichen Versuchsgeometrie (KVG). Diese Versuchsgeometrie wurde im Rahmen der Arbeit von [Häu02] entworfen und ist an die Geometrie nach Hishida [His93a, His93b] angelehnt (vgl. Abbildung 32).

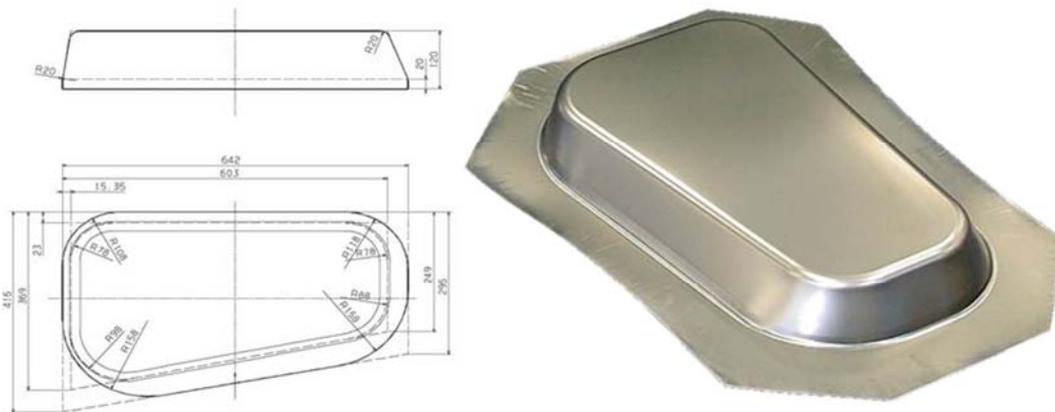


Abbildung 32: Verwendete Versuchsgeometrie zur Entwicklung einer modelbasierten Regelung des Tiefziehprozesses (links) [Häu02], sowie ein mit dieser Geometrie gefertigtes Versuchsbauteil (rechts).

Hierbei orientiert sich das Design der KVG am Vorderkotflügel eines PKW ohne Radlauf. Der Vorderkotflügel als Orientierungspunkt wurde aufgrund seiner grundlegenden Komplexität ausgewählt. Durch seine trapezförmige Grundgeometrie sowie die völlige Asymmetrie benötigt der Vorderkotflügel sehr komplexe Fertigungsmethoden. Außerdem gilt er gemeinhin als mit das schwierigste zu fertigende Bauteil unter den unregelmäßig geformten Tiefziehteilen [Häu02, Sie07].

Infolgedessen besitzt die KVG als akademische Ableitung des Vorderkotflügels einen trapezförmigen Umriss. Die vier Bauteilecken sind auf Höhe des Ziehteilbodens sowie auf Höhe des Flansches mit jeweils verschiedenen Radien verrundet, dies steigert die umformtechnische Komplexität des Bauteils nochmals. Hierbei sind die Zargen der geraden Abschnitte des Bauteils unterschiedlich lang und entlang des Bauteilumrisses unter verschiedenen Winkeln geneigt. Zusätzlich verändert sich der Ziehspalt entlang des Bauteilumrisses während des Umformvorgangs. Dabei begünstigen diese geometrischen Merkmale das Entstehen von Falten zweiter Art sowie die Entstehung von Reißern. Mit konventionellen Rückhaltevorrichtungen ist es deshalb schwierig, Bauteile in hoher Qualität bei voller Ziehtiefe herzustellen [Häu07].

## 5.2 Verwendetes Versuchswerkzeug

Für die Reglerentwicklung wird ein Versuchswerkzeug mit integriertem Vielpunktziehkissen und segmentelastischem Blechhalter verwendet. Es ist daher besonders für Untersuchungen geeignet, bei denen der Platinenkanteneinzug lokal beeinflusst werden muss. Dieses Werkzeug wurde von Häussermann im Rahmen der Arbeit [Häu02] aufgebaut und erprobt. Von diesem Werkzeug werden die mechanischen Komponenten für die Erprobung der Regelung in verschiedenen Versuchsreihen verwendet. Im Stempelkopf dieses Werkzeugs sind des Weiteren zehn Zargenspannungssensoren integriert, welche im Rahmen der Arbeit [Bla12] eingebracht wurden. Das in den Versuchen verwendete Werkzeug ist in Abbildung 33 im vollaufgebauten Zustand jedoch ohne Matrize dargestellt.



Abbildung 33: Verwendetes Werkzeug mit der KVG-Geometrie ohne Matrize, welches mechanisch von [Häu02] entwickelt wurde und für diese Arbeit bzgl. der Elektronik umgebaut wurde.

Die im Rahmen der Arbeit Häussermann [Häu07] ermittelte Platinenform wird auch im Rahmen der experimentellen Versuche dieser Arbeit verwendet. Das Werkzeug wurde mit zehn neuen Servoventilen der Firma Bosch Rexroth ausgestattet. Zur Durchführung der Versuche wurde die am IFU installierte SMG-Versuchspresse verwendet. Hierbei handelt es sich um

eine dreifach wirkende Doppelständer Hydraulikpresse des Herstellers SMG, d.h. neben einem Ziehkissen besitzt die Presse einen Innen- und einen Außenstößel, welche getrennt voneinander verfahren werden können. Diese Funktion ist bei den hier durchzuführenden Versuchen jedoch nicht von Relevanz. Die Versuchspresse kann eine maximale Stößelkraft von 6.000 kN aufbringen. Neben der Presse befindet sich ein Hydraulikaggregat, um externe Verbraucher mit Druck zu versorgen. Dieses Hydraulikaggregat wird bei den Versuchen benutzt, um die Hydraulikzylinder, welche die Blechhalterkraft aufbringen, mit hydraulischem Druck zu versorgen.

### 5.3 Verwendete Sensorik

Zur Zustandserfassung des Prozesses sind verschiedene Sensoren notwendig. Zunächst wird mit insgesamt zehn im Werkzeugstempel verbauten Zargenspannungssensoren die Zargenspannung in zehn verschiedenen Bauteilzonen gemessen. Diese gemessene Zargenspannung dient als Regelgröße für die Regelung des Tiefziehprozesses. Des Weiteren ist jedem der zehn Bauteilzonen ein Hydraulikzylinder installiert und diesem jeweils ein Drucksensor zugeordnet, um den Druck in jedem Zylinder zu messen und an das jeweilige Servoventil für die interne Druckregelung zurückzuführen. Ergänzend zu den Zargenspannungssensoren wurden Laserentfernungsmesser an allen vier Seiten des Werkzeugs angebracht. Diese dienen der Analyse des Umformprozesses. In Abbildung 34 sind die Sensoren in ihrer Einbausituation dargestellt.

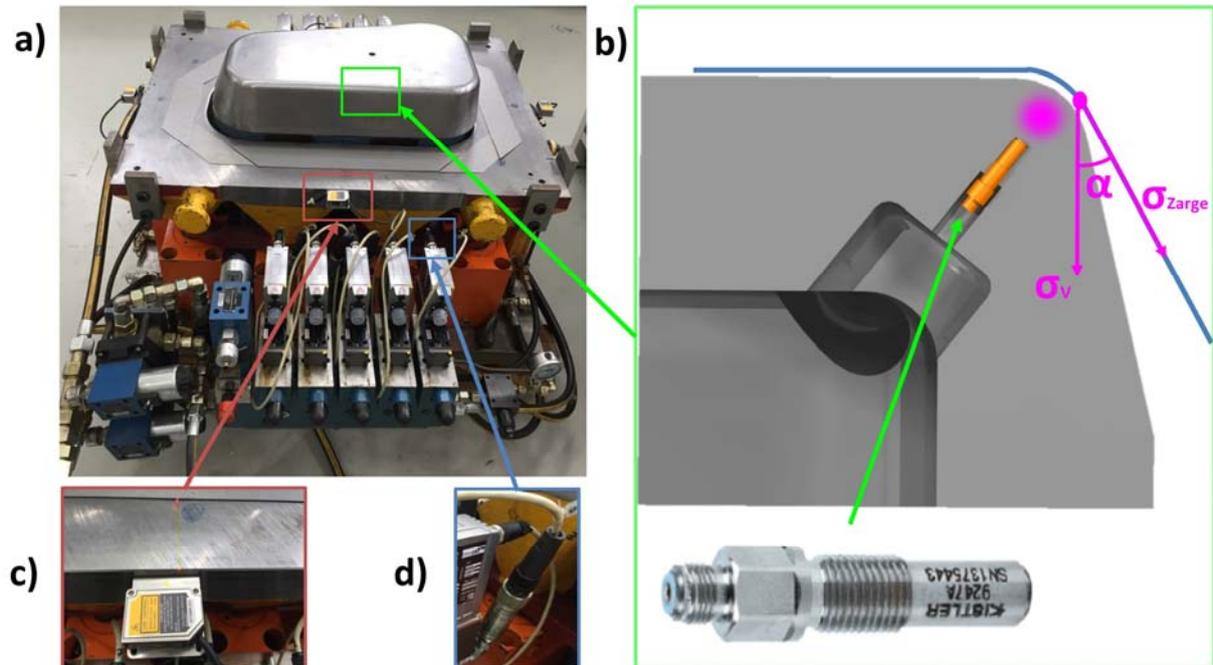


Abbildung 34: Die im Versuchswerkzeug integrierte Messtechnik (a), der Zargenspannungssensor Kistler 9274a (b), die Sick OD Mini-Sensoren zur Erfassung des Einlaufweges (c) sowie der Druckmesssensor Hydac HDA 4746 (d).

### 5.3.1 Der Zargenspannungssensor

Die Zargenspannung entlang der Ziehteilzarge wird mit derselben Methode wie sie von Blaich [Bla12] entwickelt wurde mithilfe der bereits erwähnten Zargenspannungssensoren gemessen. Gegenüber älteren konstruktiven Lösungen zur Messung der Zargenspannung [Sie07, Ker97] hat diese Sensortechnik den Vorteil der relativ flexiblen Platzierung in der Struktur des Umformwerkzeuges. Somit kann sie in der Nähe der Umformzone eingebracht werden, wodurch die Qualität der Messung gesteigert werden kann. Dazu erfasst der Sensor die elastische, strukturelle Deformation von Werkzeugkomponenten, wie zum Beispiel von Teilbereichen des Ziehstempels. Zahlreiche Anwendungen dieser Sensortechnik in Werkzeugen belegen, dass diese Prozessgröße weniger Störungen unterworfen ist als beispielsweise der Platinenkanteneinzug [Sie07, Ker97].

Der Sensor ist mit Piezo-Kristallen ausgestattet und befindet sich in einem Abstand von 10-15 mm unterhalb der Werkzeugwirkfläche (vgl. Abbildung 34 b). Dabei beträgt die durch den Sensor gemessene strukturelle Deformation, z.B. des Ziehstempels, wenige 1/100 Millimeter. Auf Grund dieser Deformation gibt der Sensor ein proportionales Signal zur lokal wirkenden Zargenspannung aus, die nach der Kraftumlenkung (vgl. Abbildung 34 b) am Matrizeeinlafradius durch die Rückhaltekraft des Blechhalters erzeugt wird [Kis16]. In den durchgeführten Untersuchungen wurde der Piezosensor Kistler 9247A verwendet, um die entlang des Ziehumrisses örtlich und zeitlich veränderliche Zargenspannung während des Ziehprozesses zu erfassen. Mehrere Versuchsreihen haben gezeigt, dass mit diesem Messprinzip Messgrößen generiert werden, die direkt mit der erzeugten [Bla12] plastischen Dehnungsverteilung im Bauteil korrelieren. Unter anderem können somit Versagensfälle wie etwa die Faltenbildung zweiter Art und das Auftreten von Reißern während des Prozessablaufes eindeutig identifiziert werden [Sie08].

Der Sensor Kistler 9247A erfasst Deformationen in Richtung seiner Hauptachse, er ist ein sogenannter longitudinaler Sensor. Die Deformation des ihn umgebenden Materials wird über die Stirnseite an ein Piezoquartz übertragen. Der Messbereich beträgt -1400 bis 1400  $\mu\epsilon$  (mechanische Einheiten) mit einer Auflösung von 8,6 pC/ $\mu\epsilon$  (Picocoulomb pro mechanische Einheit) bzw. 6 pC/N und überträgt Ladung an den Verstärker 5073A der Firma Kistler [Kis16]. In Kapitel 7.2 wird genau auf die Zargenspannung, ihre Messung und Herleitung eingegangen.

### 5.3.2 Verwendete Messverstärker

Da die Piezosensoren Kistler 9247a Ladungen aus den Quarzen als Messsignal ausgeben, welche in einem Steuerungs-PC als Signal nicht weiterverarbeitet werden können, muss eine Komponente, zur Wandlung von Ladungen zu elektrischen Spannungen, zwischen der Steuerung und den Piezosensoren eingefügt werden. Gängige Steuerungs-PCs wie bspw. eine SPS-Steuerung, können nur digitale Messsignale sowie Messsignale in Form von Stromspannung oder von Stromstärke verarbeiten. Des Weiteren sind Ladungen sehr stöempfindlich gegenüber elektromagnetischen Feldern, welche in der modernen Welt durch den verbreiteten Einsatz von elektrischem Strom omnipräsent sind. Deshalb können Ladungen nur unter Schwie-

rigkeiten über größere Strecken (weiter als einen Meter) sicher übertragen werden. Hierfür muss ein speziell abgeschirmtes Kabel verwendet werden. Daher ist es notwendig, die Ladungen in ein Spannungssignal zu wandeln und dies möglichst nahe am Messort [Kis16].

Um die Ladungen bzw. Coulomb der Zargenspannungssensoren in ein niederohmiges Spannungssignal umzuwandeln, welches von konventionellen Steuerungscomputern verarbeitet werden kann, wird der Verstärker Kistler 5073A verwendet. Hiermit kann ein Spannungssignal einfach und über weite Strecken störungsfrei und sicher übertragen werden. Der Arbeitsbereich des Verstärkers liegt zwischen  $\pm 100-1.000.000$  pC/ $\mu\epsilon$ , wobei die Messauflösung je nach Messbereich frei angepasst werden kann. Die durch den Verstärker am Sensor angeregte Messfrequenz beträgt bis zu 20 kHz, d.h. es können bis zu 20.000 Einzelmessungen pro Sekunde vorgenommen werden [Kis13].

### 5.3.3 Messung des Platinenkanteneinzugs

Zur ergänzenden wissenschaftlichen Analyse wurde der Einzug der Platinenkante mittels eines Entfernungsmessers der Fa. Sick, ein sog. OD Mini Lasertriangulationssensor, eingesetzt. Zwar unterliegt der Platinenkanteneinlauf gewissen Ungenauigkeiten bzgl. der Zustandsbeschreibung des Tiefziehprozesses (vgl. 3.2), jedoch soll die Möglichkeit bestehen ihn für die Versuchsanalyse heranziehen zu können. Zudem ist im Rahmen der Versuche ein genauer Abgleich in Bezug auf die Genauigkeit der Zustandsbeschreibung des Tiefziehprozesses zwischen dem Platinenkanteneinlauf und der Zargenspannung vorgesehen. Außerdem soll die Aussagekraft des Platinenkanteneinzugs die Prozessanalyse abrunden. Der Sensor ist in der Übersicht in Abbildung 34 c sowie im Detail in Abbildung 35 zu sehen.



Abbildung 35: Verwendeter Sensor zur Messung des Platinenkanteneinzugs Sick OD Mini. (Quelle: Sick)

Der OD Mini Sensor funktioniert auf dem Prinzip der Lasertriangulation und ist speziell für Anwendungen von Weg- und Abstandsmessungen unter Produktionsbedingungen konzipiert. Dieser Entfernungsmesser erfasst ab einem Sensorabstand von 50 mm eine Messstrecke von bis zu 150 mm. Diese Messstrecke wird mit einer Genauigkeit von 0,01 mm und einer Frequenz von 2 kHz erfasst, dies stellt eine ausreichend große Genauigkeit für die Messung des Platinenkanteneinzugs dar. Das Signal wird über einen analogen Ausgang mit 0-10 V an den

für die Steuerung verwendeten Industrie PC gesendet. Der Laserpunkt des Sensors hat einen Durchmesser von  $D < 0,6$  mm, deshalb kann der Sensor ab einer Platinendicke von  $s_0 = 0,6$  mm verwendet werden. Ein Vorteil dieses Sensors liegt darin, dass er nicht kalibriert, sondern lediglich auf dem Messnullpunkt, d.h. dem gewünschten Nullpunkt der Messung, eingestellt werden muss. Als Messnullpunkt wurde in den Versuchen die Position der vor dem Umformvorgang ausgewählt.

### 5.3.4 Messung des hydraulischen Drucks

Zur Sicherstellung der jeweils gewünschten Blechhalterkraft ist jedem Servoventil ein Drucksensor zugeordnet, welcher den Druck in dem jeweiligen Hydraulikzylinder des segmentelastischen Blechhalters überwacht. Diese Messung gewährleistet es, den gewünschten bzw. benötigten Hydraulikdruck im jeweiligen Zylinder einzuregeln. Da es sich bei den Hydraulikzylindern um einfach wirkende Zylinder handelt, ist nur ein Sensor pro Zylinder notwendig (vgl. Abbildung 34 d).

Hierbei erfolgt die Druckmessung mittels eines DMS-Druckmesssensor HDA 4746 der Firma Hydac Electronic GmbH, dessen Druckbereich von 0 bis 400 bar reicht. Dabei ist das Ausgabesignal des Sensors ein Spannungssignal. Des Weiteren misst der Sensor den Absolutdruck als Spannungssignal. Deshalb muss kein Verstärker zwischengeschaltet werden, das Messsignal kann direkt in der Steuerung verarbeitet werden. Das Messsystem im Sensor selbst ist als DMS-Vollbrückenschaltung ausgeführt. Dazu ist ein Dehnungsmessstreifen (DMS) zwischen dem Druckmedium und der Umgebung eingebaut. Durch den aufgebauten Druck im hydraulischen System wird der DMS mit einer Kraft beaufschlagt und gibt eine definierte Spannung aus, die zum vorherrschenden Druck proportional ist. Dieses Spannungssignal wird im Servoventil für die interne Druckregelung verwendet sowie über das Servoventil an die SPS-Steuerung gesendet und auch dort weiterverarbeitet. Der Sensor wird nicht kalibriert, stattdessen kann das Signal direkt in die Druckeinheit 'bar' umgerechnet werden.

### 5.3.5 Messung des Stößelwegs

Für den vorliegenden Regelkreis wurde als Diskretisierungsvariable nicht etwa die Zeit festgelegt, sondern aus Praktikabilitätsgründen die Ziehtiefe des Bauteils. Zur Messung der Ziehtiefe wird in den folgenden Untersuchungen ein Wegaufnehmer LWH 700 der Firma Novotechnik verwendet. Bei diesem Wegaufnehmer handelt es sich um einen potentiometrischen Wegaufnehmer. Dabei wird der sogenannte Schleifer auf einer Widerstandsbahn im Körper des Wegaufnehmers verschoben. Diese Widerstandsbahn ist kein elektrischer Widerstand, sondern ein Spannungsteiler. Je nach Position des Schleifers auf der Widerstandsbahn wird eine Spannung gemessen, die sich beim Verschieben des Schleifers proportional mit der Position des Pressenstößels verändert. Anhand der jeweils gemessenen Spannung kann sofort die Position des Schleifers auf der Widerstandsbahn bestimmt werden. Der Vorteil dieses Messprinzips liegt darin, dass es nicht eingemessen bzw. kalibriert werden muss. Sobald eine Stromversorgung vorhanden ist und eine Spannung gemessen werden kann, ist die aktuelle

Position des Pressenstößels bekannt. Jedoch muss abschließend die Umrechnung des Signals in Millimeter in der aufnehmenden Steuerung erfolgen.

## 5.4 Verwendete Aktorik

Als Aktorik zur Beeinflussung des Prozesses, auch Stellgröße des Regelkreises genannt, wird die lokale Rückhaltewirkung des Blechhalters verwendet. Im vorliegenden Fall ist dies ein segment-elastischer Blechhalter. Hierbei eignet sich dieser durch seine Struktur im besonderen Maße zur lokalen Beeinflussung der Rückhaltung des Kanteinzugs beim Tiefziehen. Dadurch kann die lokale Bauteilqualität gezielt beeinflusst werden.

### 5.4.1 Verwendete Hydraulikzylinder

Der segmentelastische Blechhalter ruht auf zehn Hydraulikzylindern, welche die Blechhalterkraft von 230 kN pro Zylinder bei 320 bar Nenndruck aufbringen und einen Hub von 150 mm ermöglichen, wovon in der aktuellen Einbausituation 120 mm nutzbar sind. Jeder Zylinder ist einem korrespondierenden Blechhaltersegment zugeordnet, wobei der Druck im Zylinder mithilfe eines Servoventils geregelt wird. Bei den Zylindern handelt es sich um einfachwirkende Zylinder, sie können nur in einer Richtung mit Druck beaufschlagt werden und haben deshalb nur eine Wirkrichtung. Im vorliegenden Werkzeug werden Sie als Verdrängerzylinder verwendet, wie dies bei einem klassischen Ziehkissen der Fall ist. Dabei fährt der Pressenstempel auf den Blechhalter auf und verdrängt diesen nach unten. Die festgelegte Kraft wird hierbei mithilfe des Servoventils gesteuert, welches den vorgegebenen Druck einhält.

### 5.4.2 Die verwendeten Servoventile

Zur Druckansteuerung der Hydraulikzylinder werden neuartige Servoventile 4WR-PDH-6 der Firma Rexroth mit flexibel anpassbaren Kennlinien verwendet. Damit ist es möglich, mithilfe eines externen Regelkreises einen digitalen Kraft- oder Druckwert der Steuereinheit des Ventils vorzugeben, welcher durch die Ventile eigenständig berechnet wird und anhand der Druckverhältnisse im Zylinder die dafür benötigte Ventilöffnung mithilfe der Blendengleichung zu steuern. Die hierbei verwendeten Servoventile verfügen über verschiedene Betriebsmodi. Unter anderem wird eine direkte Druckregelung ermöglicht, bei der die Einhaltung des Soll-Druckwerts über eine externe Regelung gewährleistet wird. Weiterhin ist eine indirekte Druckregelung möglich, bei der die Einhaltung des vorgegebenen Drucksollwerts durch die interne Regelung des Ventils gewährleistet wird. Bei den Versuchen wurde die Betriebsart der „indirekten Druckregelung“ verwendet, es liegt dadurch eine kaskadierte Regelung vor. Dabei gibt der Regelkreis der Zargenspannung dem Druckregelkreis des jeweiligen Blockzylinders die für die gewünschte Zargenspannung notwendige Kraft vor, welche der Druckregelkreis dann autonom einregelt. Infolgedessen ist eine erhebliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu erwarten, da die internen Reglerparameter der Servoventile optimal auf die Anforderungen der Kraftregelung eingestellt werden können. Eben-

so können die Reglerparameter der Tiefziehregelung optimal auf das dortige Regelproblem bzgl. der Zargenspannung eingestellt werden.

Die Servoventile 4WR-PDH-6 der Firma Bosch Rexroth haben einen Nennvolumenstrom von 40 l/min bei einer anliegenden Druckdifferenz von 35 bar. Dies bedeutet, dass bei maximaler Öffnung des Ventils und einer Druckdifferenz von 35 bar zwischen der Druckversorgung und der Zylinderkammer, etwa 40 l/min Öl durch das Ventil fließen. Des Weiteren beträgt die Zeit für eine vollständige Sprungantwort der Ventile, sprich der Öffnungsvorgang ihrer Blendenöffnung von 0 auf 100 %, etwa 8 ms. Dadurch besitzen die Ventile eine sehr hohe Stellgrößensensitivität, wodurch eine leistungsfähige Regelung ermöglicht wird. In der vorliegenden Steuerungsarchitektur sind die Ventile direkt mit dem Steuerungscomputer über einen Ether-Cat-Feldbus verbunden. Hierbei handelt es sich um eine digitale Verbindung, wodurch eine nahezu drifffreie und temperaturunabhängige Regelung möglich ist. Zusätzlich kann das Ventil durch die EtherCat-Verbindung sehr schnell und einfach mittels des Steuerungscomputers konfiguriert werden. Das Servoventil regelt den Abfluss in die einzelnen Blockzylinder über einen Steuerkolben, der mit einem elektrischen Linearmotor bewegt werden kann. In Abbildung 36 ist eines der verwendeten Servoventile dargestellt.



Abbildung 36: Ein Servoventil 4WR-PDH-6 der Firma Bosch Rexroth wie es in dieser Arbeit verwendet wurde (Quelle: Bosch).

### 5.4.3 Der segmentelastische Blechhalter

Der segmentelastische Blechhalter des hier verwendeten Ziehwerkzeugs ist derart gestaltet, dass er in seiner Grundeinstellung eine homogene Flächenpressungsverteilung gewährleistet. Er ist einteilig als Gusskörper aus GS-45 ausgeführt. Er besteht aus insgesamt zehn kopfüber angeordneten Pyramidenstümpfen, denen jeweils ein Blockzylinder zugeordnet ist, welcher mit einem Servoventil angesteuert wird. Die Flächenpressung wird mit den Blockzylindern und den Servoventilen eingestellt. Durch eine platinenseitige Abdeckplatte sind die Pyramidenstümpfe zu einer geschlossenen Wirkfläche verbunden (vgl. Abbildung 37).

Detaillierte Informationen zum mechanischen Aufbau des Werkzeugs sind in [Häu02] zu finden. Er zeigt seiner Arbeit auf, dass sich die einzelnen Segmente zwar gegenseitig beeinflussen, jedoch erfolgt dies nur in einer geringen Ausprägung auf die jeweiligen Nachbarsegmente. Des Weiteren wird durch die Formgebung der Pyramidenstümpfe eine sehr homogene Flächenpressungsverteilung auf der Blechhalteroberseite erreicht. Das Funktionsprinzip der in Abbildung 37 dargestellten Wirkkette des Segmentelastischen Blechhalters baut sich wie folgt

auf. Wird der Druck in einem Hydraulikzylinder erhöht, erhöht sich die Wirkkraft von diesem auf den direkt geometrisch über ihm an-geordneten Pyramidenstumpf, dies wiederum erhöht die Flächenpressung in der dazu korrespondierenden Segments der Blechhalterfläche. Hierbei sind die zu einem Hydraulikzylinder bzw. Pyramidenstumpf korrespondierenden Blechhalterflächen jene Flächen des Blechhalters, welche über dem oberen Ende eines jeden Pyramidenstumpfs positioniert sind. Die Flächenpressung erhöht die Rückhaltekraft im korrespondieren Blechhaltersegment, wodurch der Platinenkanteneinzug in diesem Bereich verringert und die Platine stärker zurückgehalten wird. Wird die Kraft in einem Hydraulikzylinder verringert, verhält sich das Funktionsprinzip reziprok. Sobald in einem Hydraulikzylinder der Druck verringert wird, reduziert sich auch seine Wirkkraft auf den über ihm liegende Pyramidenstumpf. Hierbei reduziert dies die Flächenpressung im dazu korrespondieren Blechhaltersegment. Die Rückhaltekraft nimmt ab und der Platinenkanteneinzug wird begünstigt. In Abbildung 37 sind der segmentelastische Blechhalter in seiner Einbausituation am Werkzeug dargestellt.

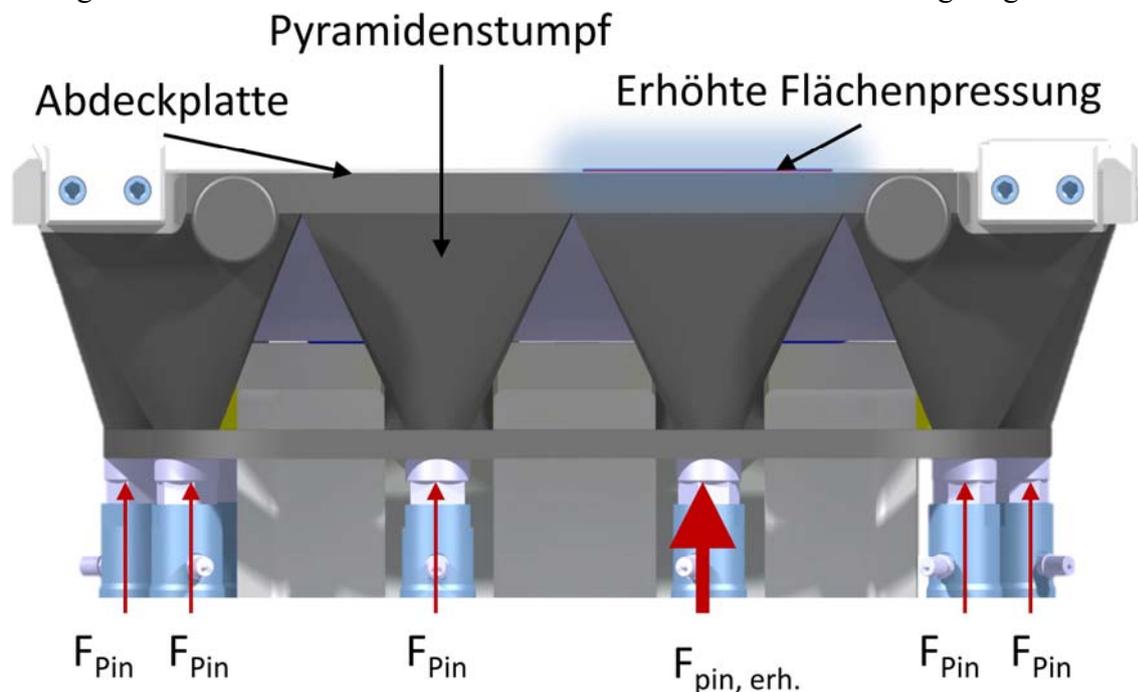


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Wirkprinzips des verwendeten Segmentelastischen Blechhalters.

## 6 Architektur und Inbetriebnahme der Hard- und Software

Für die Umsetzung der Regelung sind eine Steuerungshardware sowie auch die zugehörige Software notwendig. Hierbei müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt werden, wie bspw. eine geringe Latenzzeit und eine hohe Betriebssicherheit. In diesem Kapitel wird auf die notwendige Architektur, auf die Inbetriebnahme des Regelungssystems sowie die Einstellung der Reglerkomponenten eingegangen. Im Kapitel der Inbetriebnahme der Komponenten wird auf ihre Funktion eingegangen und wie diese sichergestellt werden kann. Im Abschnitt Reglerinbetriebnahme wird im speziellen auf die Einstellung der Reglerwerte eingegangen.

### 6.1 Architektur der verwendeten Steuerungshardware und ihre Signalflüsse

Für ein tieferes Verständnis des Aufbaus der Regelung sind genaue Beschreibungen der verwendeten Steuerungsarchitektur sowie der realisierten Signalflüsse notwendig. Als Steuerungsarchitektur wird in der vorliegenden Arbeit eine Beckhoff TwinCat 2 Speicher Programmierbare Steuerung (SPS) mit einem Windows XP Betriebssystem eingesetzt. Auf nahezu allen Gebieten der Industrie hat die SPS die sogenannte verbindungsverdrahtete Steuerung, welche mittels festverdrahteten Relais eine Maschine oder einen Prozess steuert, abgelöst [Lep18]. Eine hohe Flexibilität in der Programmierung sowie preiswerte und in hoher Anzahl verfügbare Baugruppen sind ebenso kennzeichnend für das Konzept einer SPS, wie etwa die Standardisierung der Steuerungsaufgabe selbst, wodurch die SPS heutzutage zum Standard in der Steuerungstechnik zählt. Durch die Fähigkeit der SPS auch analoge Signale über DA/AD-Wandler zu verarbeiten, hat sie sich auch in der Regelungstechnik durchgesetzt. Sie ist nahezu für jede Regelungsaufgabe geeignet, da es viele standardisierte Lösungen gibt. Deshalb entspricht bei einer SPS die Bezeichnung „Steuerung“ nicht mehr der strengen Definition von Steuerung und Regelung in der Hinsicht von open und closed loop control [Lep18].

#### 6.1.1 Architektur der verwendeten Steuerungshardware

Die eingangs erwähnte Beckhoff TwinCat 2 SPS Steuerung ist auf einem Beckhoff Industrie PC (IPC) C6025 implementiert. Dabei wird die zu steuernde oder zu regelnde Maschine auf digitaler Basis programmiert [Lie16]. Hierbei besteht eine SPS in einfachen Fällen aus Eingängen, Ausgängen, einem Betriebssystem, einer Schnittstelle und dem SPS-Programm selbst, wobei die Schnittstelle das Laden von Daten oder des Anwenderprogramms ermöglicht. Die Eingänge der SPS sind mit der Sensorik der Maschine verbunden, wobei diese die SPS mit den notwendigen Informationen über die gesteuerte Maschine über den zu regelnden Prozess versorgen.

Bei dem hier verwendeten technischen System sind das die bereits erwähnten Messdübel 9274a der Firma Kistler, die zur Messung der Zargenspannung, welche die Regelgröße des Prozesses darstellt, verwendet werden. Wie bereits erwähnt, ist hierfür der Verstärker 5073a der Firma Kistler zur Wandlung der Messsignale von Ladungseinheiten hin zu elektrischer Spannung zwischengeschaltet. Weitere Eingänge der SPS sind die Weggeber zur Messung der Ziehtiefe und die Laserentfernungsmesser zur Messung des Platinkanteneinzugs. Die Aus-

gänge sind mit der Aktorik verbunden, die von der SPS gesteuert werden. Bei dieser Versuchsanlage sind dies die Servoventile, welche den Druck in den hydraulischen Zylindern des Werkzeugs regeln. Die Hydraulikzylinder bringen die Blechhalterkraft auf, welche die Stellgröße im Prozess darstellt.

### 6.1.2 Die Signalflüsse in der Steuerungshardware

Die schon erwähnten Eingänge und Ausgänge der SPS-Steuerung werden bei TwinCat mithilfe des EtherCat Bussystems realisiert. Dieses Bussystem ermöglicht kurze Zykluszeiten und somit kurze Reaktionszeiten auf Ereignisse. Der digitale Signalaustausch (Input/Output) zwischen den Aktoren bzw. Sensoren auf der einen und dem IPC auf der anderen Seite, ist auf sogenannte Inkremente normiert. Dabei werden keine absoluten Werte gesendet, sondern Inkrementanzahlen; hierbei wird der Wertebereich eines Sensors oder Aktors in 32768 Inkremente unterteilt, was einem 16-Bit-Signal abzüglich eines Bits für das Vorzeichen entspricht. Dies ist in der Grundarchitektur der SPS so implementiert und muss daher so verwendet werden. Die Gründe hierfür sind die benötigte große Hardwarenähe der gesamten Signalübertragung zur Geschwindigkeitssteigerung des Systems sowie die historische Entwicklung des Systems SPS. In Abbildung 38 ist die in dieser Arbeit verwendete Hardware-Architektur mit den Signalflüssen dargestellt.

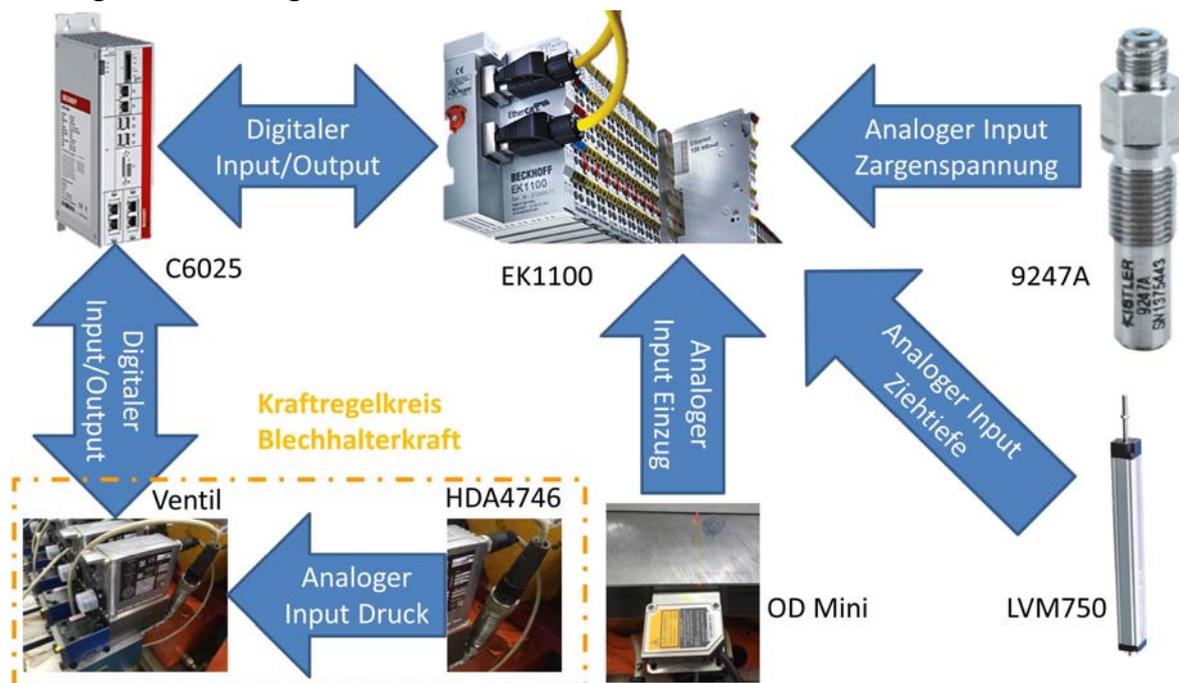


Abbildung 38: Schematische Darstellung der verwendeten Steuerungsarchitektur und deren Signalwege. In der Mitte oben Beckhoff EK1100 zur Konvertierung der analogen in digitale Signale, und oben links der IPC Beckhoff C6025.

Da eine grundlegende Kenntnis der geplanten Struktur des Regelkreises für ein besseres Verständnis der Signalverläufe in der Steuerungshardware unabdingbar ist, wird die grundlegende Struktur des in einem früheren Kapitel allgemein postulierten Regelkreises mit Vorsteuerung

(vgl. Kapitel 3.2) hier kurz vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Reglerentwurfs sowie der Modellbildung folgt in Kapitel 7.

Der Beckhoff IPC, auf dem die Tiefziehregelung implementiert ist, ist direkt mit den Servoventilen, welche mittels des hydraulischen Drucks in den Hydraulikzylindern die Blechhalterkraft in den einzelnen Segmenten zur Verfügung stellen und regeln, über ein EtherCat Bus Kabel verbunden. Hierbei findet die Signalübertragung komplett digital statt. Dabei wird dem Druckregelkreis im Servoventil nur der jeweils gewünschte Soll-Kraftwert von der übergeordneten Tiefziehregelung vorgegeben. Die Regelung des Tiefziehens regelt den Tiefziehprozess auf Basis der Zargenspannung, welche von den Zargenspannungssensoren gemessen und an den IPC übertragen wird. Die entsprechende Blechhalterkraft in den Segmenten wird daraus abgeleitet. Der Regelkreis der Servoventile regelt aus der vorgegebenen Blechhalterkraft die dafür notwendigen Druckwerte in den Hydraulikzylindern ein. Die Servoventile sind direkt mit dem jeweiligen Drucksensor an den Hydraulikzylindern verbunden, um den Kraftregelkreis zu schließen. Des Weiteren senden die Servoventile über den EtherCat Bus an den IPC ihre jeweiligen Zustände bzgl. Kraft und Druck zurück, um eine Prozessüberwachung durch den IPC zu gewährleisten. Bei dieser Art von verschachtelten Regelkreisen handelt es sich um eine sogenannte Kaskadenregelung. Der Druckregelkreis in den Servoventilen und der Regelkreis des Tiefziehens arbeiten hierbei autonom, bedingen sich jedoch gegenseitig. Der Kaskadenregelkreis ist bei einer solchen Verkettung ein Standardverfahren in der Regelungstechnik [Lun14]. Der beschriebene Kaskadenregelkreis ist in Abbildung 39 dargestellt.

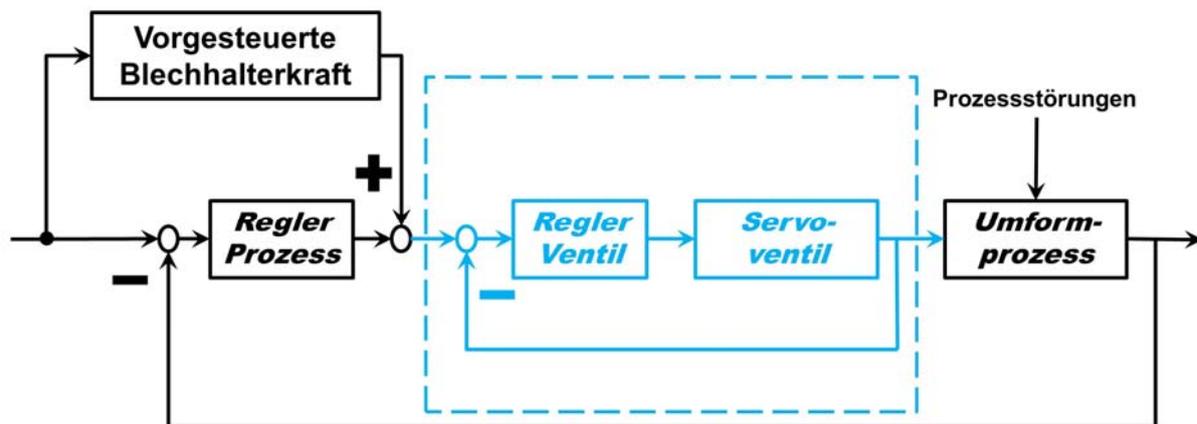


Abbildung 39: Schematische Darstellung der verwendeten Regelkaskade zur Umsetzung des entworfenen Tiefziehregelkreises.

Der Druck- bzw. Kraftregelkreis für die Blockzylinder unterhalb des Blechhalters sind hierbei in Blau, der eigentliche Tiefziehregelkreis in Schwarz dargestellt. Die Sensoren der Tiefziehregelung bestehend aus zehn Zargenspannungssensoren und einem Weggeber LWH 700 zur Bestimmung der Ziehtiefe, sowie die vier Sick OD Mini Sensoren zur Platinenkanteneinzugsmessung für die Prozessanalyse, geben jeweils ein analoges Signal aus. Für die Zargenspannungssensoren ist ein Verstärker zwischengeschaltet, um das Ladungssignal in eine elektrische Spannung zwischen 0-10 V zu konvertieren. Die Sick OD Mini-Sensoren sowie der LWH 700 geben direkt ein Spannungssignal zwischen 0-10 V aus. Da der IPC nur digitale Signale auf Basis von Inkrementen verarbeiten kann und keine absoluten Spannungssignale,

müssen die analogen Spannungssignale der Sensoren in digitale Signale auf Basis von SPS-Inkrementen konvertiert werden. Dazu wird der digital/analog Konverter EK1100 von Beckhoff verwendet. Er konvertiert die analogen Signale in digitale und ist über einen EtherCat Bus mit dem IPC verbunden. Hierzu werden in den Konverter für jeden Sensor, wenn notwendig, auch für den Aktor sogenannte SPS-Kassetten gesteckt. Diese werden direkt mit den Sensorenkabeln verbunden und bilden die Schnittstelle zwischen Sensor/Aktor und SPS. Von den SPS-Kassetten existieren mehr als hundert verschiedene, für jegliches analoge Signal mit verschiedenen Signalbereichen.

## **6.2 Architektur der verwendeten Software**

Die Softwarearchitektur besteht aus den Komponenten Betriebssystem, SPS-Software und Anwenderprogramm. Das Betriebssystem stellt die allgemeine Funktionsfähigkeit des Beckhoff IPCs sicher, es handelt sich hierbei um ein sogenanntes Embedded Windows XP. Dies ist eine verschlankte Version des normalen Windows XP. Die letzten beiden der genannten Komponenten werden im Folgenden näher beschrieben.

### **6.2.1 Die SPS-Software**

Die hier verwendete SPS-Software ist die Beckhoff TwinCat 2, dies ist eine ereignisgesteuerte SPS, welche objektorientiert programmierbar ist. Dabei listet das Betriebssystem alle Statuswechsel von Sensoren auf, die sogenannten Ereignisse [Bec18]. Diese werden in der SPS nacheinander ausgeführt und die entsprechenden Anweisungen an die Aktorik erzeugt. Diese Anweisungen werden, sobald alle Ereignisse abgearbeitet sind, über die Ausgänge zu den Aktoren gesendet. Kann ein Ereignis nicht abgearbeitet werden, wird das Programm unterbrochen und ein Fehler wird ausgegeben. Dadurch werden stets alle Sensoren und Anweisungen berücksichtigt, wodurch eine hohe Betriebssicherheit von diesen SPS-Programmen ermöglicht wird [Bec18]. Weitere Vorteile bietet dieses Konzept im Vergleich zu den zyklusorientierten Systemen in der Regel durch die zusätzliche Objektorientierung, welche für die gleichzeitige Visualisierung genutzt werden kann und eine schlanke sowie wartungsfreundliche Programmierung ermöglicht.

Die Programmerstellung von Anwenderprogrammen wird mit dem Beckhoff TwinCat Software Editor vorgenommen. Es sind verschiedene Möglichkeiten der Programmierung verfügbar, um das Programm zu erstellen. Bei dieser Arbeit wurde die sogenannte Structured Text (ST) Programmierung gewählt. Diese ist eine SPS Hochsprache, welche eine Objektorientierung ermöglicht. Diese Wahl wurde aufgrund der Komplexität der verschiedenen hier zu programmierenden Programmteile vorgenommen. Mit einer Programmierung in ST ist es möglich, komplexe Programmteile übersichtlich und weniger fehleranfällig zu programmieren. Beim Anwenderprogramm handelt es sich um jenes Programm, welches letztlich die Maschine steuern soll. Dazu stellt das SPS-System einerseits grundlegend sicher, dass dem Anwenderprogramm alle Daten der Eingänge zur Verfügung stehen und andererseits die Anweisungen über die Ausgänge an das zu steuernde bzw. regelnde System gesendet werden. Das

SPS-Programm stellt die Funktion des Anwenderprogramms sicher und fungiert quasi wie ein eigenständiges Betriebssystem für die Steuerung selbst.

### 6.2.2 Das Anwenderprogramm

Das Anwenderprogramm ist das zentrale Programm, in dem die Regelung selbst programmiert bzw. implementiert ist. Es wurde in mehrere Methoden und Objekten (bei TwinCat auch Funktionsbausteine genannt) unterteilt. Hierbei wurde die Einteilung aus Gründen der Funktionalität, der Übersichtlichkeit sowie der Betriebssicherheit in Methoden vorgenommen. Hierbei besitzen die Objekte (Funktionsbausteine) die Eigenschaft, dass sie als Bausteine im Programm mehrmals verwendet werden können. Sie müssen dafür nicht mehrmals programmiert werden, das mehrmalige Verwenden wird Instanzieren genannt. Dabei werden eine einzelne Verwendung bzw. die Anwendung des Funktionsbausteins als Instanz bezeichnet. Objekte werden in der vorliegenden Arbeit als Regler und Filter realisiert, da sie mehrmals verwendet werden müssen. Somit ist einerseits eine Zeitersparnis möglich und das Programm gewinnt andererseits an Übersichtlichkeit. Des Weiteren kann durch die Definition von Reglern und Filtern als Objekte die jeweilige Funktion sichergestellt werden. Dadurch kann Übertragungsfehlern leicht vorgebeugt werden, da bei Objekten klare Übertragungsschnittstellen definiert werden. Außerdem muss die Funktionsfähigkeit nur für einen Regler bzw. Filter geprüft werden, da alle Instanzen komplett identisch sind.

Das Anwenderprogramm wurde mit einer Abtast-Zeitschrittweite von 0,5 ms erstellt, was einer Regel-Grenzfrequenz von etwa 1.000 Hz entspricht. Aufgrund der Dynamik des gesamten Umformvorgangs erscheint diese Auslegung als ausreichend. Die 10 analogen Spannungseingänge für die Zargenspannungssensoren und die 4 analogen Eingänge der Einlaufsensoren wurden nach der AD-Wandlerstufe mit einem Input-Filter in Form eines FIR-Tiefpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 96 Hz vorverarbeitet, um hochfrequentes Signalrauschen zu reduzieren. Der Eingang des Stößelhubgebers wurde mit 19 Hz tiefpassgefiltert. Über ein Verstärkungsglied und eine Offsetanpassung erfolgt anschließend die Kalibrierung auf physikalische Einheiten. Jeweils ein PI-Regler pro Zargenspannungskanal erzeugt die einzusteuernenden Segmentdruck-Sollwerte, welche über einen Begrenzungsblock und eine Override-Möglichkeit am Bedienpanel (Skalierung im Bereich von 0 bis 150 %) an die Ausgangsstufe weitergereicht werden. Generell sind zwei grundlegende Betriebsmodi des Anwenderprogramms möglich.

Für den Betriebsmodus 1 "stößelhubabhängige Steuerung der einzelnen Segmentdrücke" werden die Ausgabewerte für die einzelnen Segmentdrücke direkt in Abhängigkeit von der Stößelposition aus der jeweiligen Soll-Wert-Tabelle ausgelesen. Diese Werte wurden aus der optimierten FEM-Simulation des Umformprozesses abgeleitet.

Im Betriebsmodus 2 „vorgesteuerte Trajektorienfolgeregelung“ werden die einzelnen Zylinder des Blechhaltersegmente mit vorgesteuerten Hydraulikdrücken beaufschlagt, welche jedoch für jeden Zylinder unterschiedlich hoch gewählt werden können. Ab einer vorgegebenen Schlüsselposition wird auf einen geregelten Betrieb mithilfe der Zargenspannung zugeschaltet. Abschließend werden die Ist-Werte einem Komparator zugeführt, welcher die

momentane Regelabweichung bestimmt. Der Komparator ist jene Komponente des Regelkreises, welche den Soll-Wert der Regelgröße mit deren Ist-Wert vergleicht und durch eine Subtraktion die Regelabweichung berechnet. Dazu werden die jeweiligen Soll-Werte in Abhängigkeit des aktuellen Stößelhubs aus einer Lookup-Table ausgelesen, deren Inhalt den idealen Soll-Verlauf der Zargenspannung an der betrachteten Messposition repräsentiert. Diese Betriebsart ist vor allem für die gezielte Beeinflussung von Dehnungszuständen in der Bauteilzarge rund um den Ziehurriss geeignet. Nachfolgend werden die einzelnen Programmteile benannt und in ihrer Funktion beschrieben.

Das Programm „Main“ stellt das Hauptprogramm der Regelungssoftware dar. In „Main“ sind die Programmaufrufe der einzelnen Unterprogramme niedergeschrieben und es steuert den Aufruf der einzelnen Unterprogramme. Hierzu werden in „Main“ keine Methoden und Objekte des Programms beschrieben, es wird lediglich die Organisation der Methoden und der Objekte sichergestellt.

In dem Objekt PT1-Filter ist der Tiefpassfilter implementiert. Dieser wird bei Bedarf in den einzelnen Methoden instanziiert. Hierbei wird dieser verwendet, um die gemessenen Zargenspannungen sowie den gemessenen Stößelweg zur Ziehtiefenberechnung zu filtern. Dabei ist dieses Objekt von großer Wichtigkeit für die Regelung, denn ein PT1-Filter erhöht die Phasenreserve des Regelkreises um bis zu  $90^\circ$  [Lun14]. In Abbildung 40 ist die Grundstruktur der programmierten Regelungssoftware dargestellt.

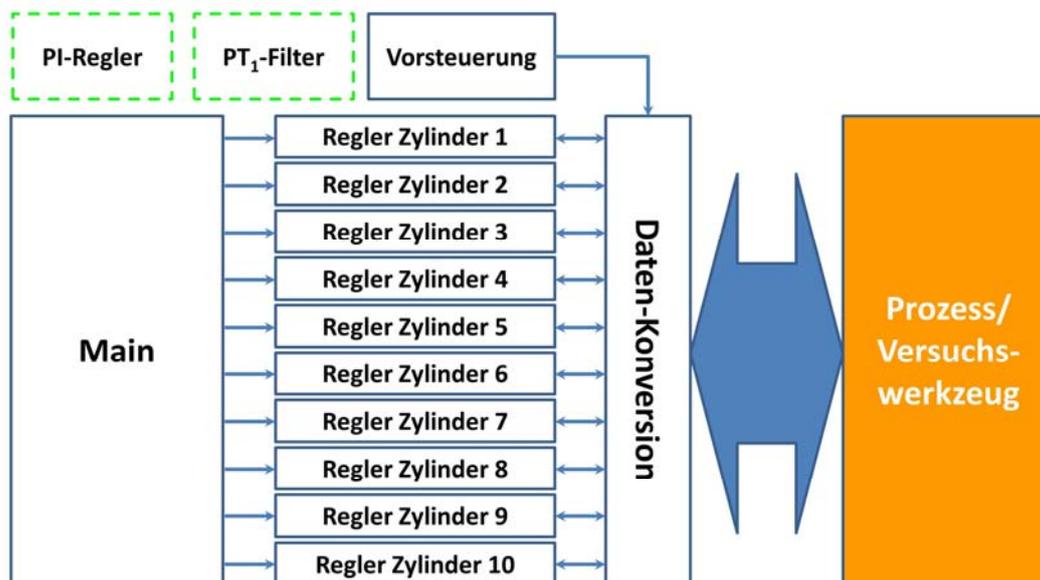


Abbildung 40: Schematische Darstellung der Grundstruktur der programmierten Regelungssoftware.

Hierbei sind in Grün die beiden Objekte für den PI-Regler und den PT1-Filter und orangefarben der reale Prozess dargestellt. Das Objekt PI-Regler implementiert den PI-Regler für die Trajektorienfolgeregelung. Dabei gewährleistet der Regler, dass die Zargenspannung der jeweiligen Solltrajektorie eingehalten wird. Dieser Baustein besteht aus einem Proportional-Integral-Glied. Hierbei ist ein Differenzierer aufgrund der fehlenden Dynamik der Regelstrecke nicht notwendig. Dieses Objekt wird bei der jeweiligen Verwendung instanziiert.

In der Methode „Konversion“ werden die Eingangs- und Ausgangsvariablen verarbeitet und SPS-Inkrementale sowie physikalische Werte ineinander umgerechnet. Dabei ist diese Umrechnung notwendig, da die von der SPS-Steuerung erhaltenen Werte, sogenannte inkrementelle Werte sind. Sie zeigen nicht den eigentlichen gemessenen Wert an, sondern nur die Relation zum bestimmbareren Wertebereich. Durch die Umrechnung werden die realen physikalischen Werte berechnet, dies wäre zwar für die Regelung an sich nicht notwendig, jedoch für die Darstellung sowie für eine spätere Prozessanalyse unabdingbar. Die Ausgangs- und Eingangsvariablen sind die Variablen, welche die realen Zustandswerte der Sensoren und Aktoren im Programm darstellen.

Die Programmiermethode bzgl. der Einzelzylinder enthält den SISO-Regelablauf für den jeweiligen Hydraulikzylinder, diese ist zehnmal vorhanden. Die Reglereinstellwerte für den jeweiligen Einzelzylinder werden über ein Graphical User Interface (GUI) eingegeben. Jede dieser zehn Methoden stellt eine Lookup-Tabelle dar, in der die Stützpunkte der Soll-Trajektorie der zum Hydraulikzylinder korrespondierenden Bauteilzone hinterlegt sind.

### 6.2.3 Programmablauf bei der Trajektorien Folgeregelung

Die im Prozess erhobenen und in das SPS-System eingespeisten Messwerte, nämlich die Ziehtiefe und die Ist-Zargenspannung, werden vor Verwendung in der Regelung mit einem PT1-Filter gefiltert. In der Regelung wird die eingespeiste Ziehtiefe des Prozesses verwendet, um die Stützpunkte der Solltrajektorie bzgl. der Zargenspannung aus der Lookup-Tabelle auszulesen. Danach wird mit diesen Stützpunkten der aktuelle Soll-Wert der Zargenspannung im Kurvengenerator berechnet, welcher nachfolgend in seiner Funktion noch näher erklärt wird. Hierbei generiert der Kurvengenerator die Solltrajektorien für die Trajektorienfolgeregelung. Dies ist notwendig, da es in einer SPS nicht möglich ist, eine Solltrajektorie als vollständige Kurve einzulesen. Diese wurde deshalb in Vier-Millimeter-Schritten entlang der Ziehtiefe des Prozesses je ein Stützpunkt auf der Solltrajektorie bestimmt und in einer Lookup-Tabelle hinterlegt. Während der Laufzeit werden aus den gespeicherten Stützpunkten mit dem Kurvengenerator die Soll-Werte der Trajektorie interpoliert. Danach werden im Komparator diese Sollzargenspannungen mit den gemessenen Ist-Zargenspannungen verglichen und die Regelabweichungen berechnet. Anschließend wird diese Regelabweichung an den PI-Regler übertragen, der unter Berücksichtigung der Regelabweichung sowie der Reglerverstärkungen einen neuen Wert der Stellgröße berechnet. Schließlich wird diese neu berechnete Stellgröße mit der aus der in der Vorsteuerung hinterlegten Stellgröße addiert und als Gesamtstellgröße an das jeweilige Servoventil des Versuchswerkzeugs durch das SPS-System gesendet.

Zur Interpolation der Solltrajektorienkurve wurde für den Kurvengenerator die Funktion einer Taylorentwicklung erster Ordnung verwendet. Die Taylorreihe erster Ordnung ergibt sich zu:

$$T_1 f(x; a) := \sum_{n=0}^1 \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x - a)^n = f(a) + f'(a)(x - a) \quad (53)$$

Wobei  $a$  der Ort der Interpolation ist,  $x$  der nächste benachbarte Stützpunkt der Interpolation und  $n$  der Grad der Interpolation. Diese Berechnung wird in jedem Takt der SPS-Steuerung

einmal ausgeführt. Es ist somit eine fein granulare Solltrajektorie gewährleistet. In Abbildung 41 ist das Flow-Chart des entsprechenden Regelprogramms der Hydraulikzylinder dargestellt.

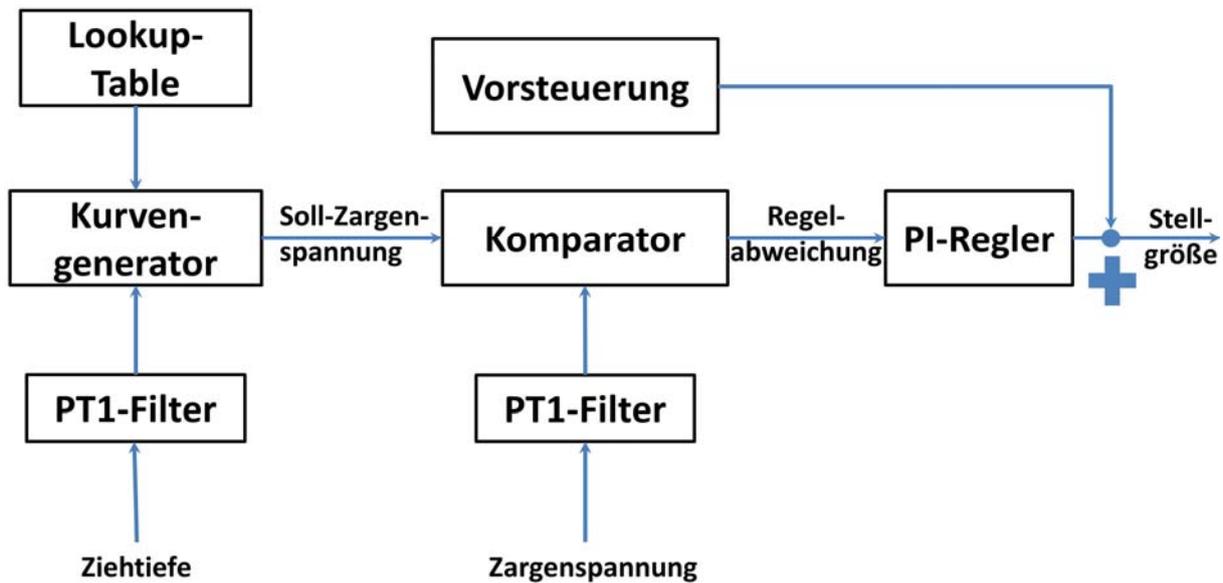


Abbildung 41: Flow-Chart des Regelprogramms für einen einzelnen Hydraulikzylinder.

### 6.3 Inbetriebnahme der mechatronischen Komponenten

Vor der Verwendung des Ziehwerkzeugs zur Durchführung der geplanten Versuche musste dessen schrittweise Inbetriebnahme durchgeführt werden. Da ein bestehendes Werkzeug verwendet wird, dessen mechanische Bauteile nicht verändert wurden, kann die mechanische Inbetriebnahme stark abgekürzt werden. Hierbei beschränkt sich die Inbetriebnahme auf mehrere Probehübe mit minimaler Presskraft in der Versuchspresse. Anders verhält es sich bei den mechatronischen Komponenten, hier muss eine vollumfängliche Inbetriebnahme sowie bei Bedarf auch eine Kalibrierung der Komponenten erfolgen.

#### 6.3.1 Inbetriebnahme der Servoventile

Die Inbetriebnahme der Servoventile geht mit der hydraulischen Inbetriebnahme einher. Da es sich bei den Hydraulikkomponenten lediglich um einen Umbau handelt und zentrale Bauteile, wie etwa der Hydraulikblock übernommen wurden, beschränkt sich die allgemeine hydraulische Inbetriebnahme auf ein mehrmaliges Spülen des Systems mit einer anschließenden Druckprüfung. Dagegen muss bei den Servoventilen und der dazugehörigen Sensorik eine umfangreiche Inbetriebnahme und Kalibrierung vorgenommen werden. Hierbei wird zur Konfiguration der Betriebsparameter der Servoventile eine spezielle Software von Bosch Rexroth, namentlich IndraWorks®, verwendet. Bei der Inbetriebnahme wurde eine Besonderheit des Systems genutzt, um diese zu verkürzen. Da alle Blockzylinder des segmentelastischen Blechhalters sowie die zugehörigen Steuerblöcke baugleich sind, ist in einem ersten Schritt die Konfiguration eines einzelnen Ventils ausreichend. Aufgrund der Übereinstimmung der Komponenten, kann diese Konfiguration anschließend auf die anderen neun Ventile übertragen werden.

Im Betrieb setzen die verwendeten Servoventile die Blechhalterkraftvorgabe vom Tiefziehrelkreis in einem kaskadierten Subregelkreis autonom um (vgl. 6.1.2). Dazu werden die Parameter der Blockzylinder sowie die hydraulischen Massenströme in den Ventilen als Konfiguration hinterlegt. Mithilfe dieser Daten wird die für eine bestimmte Soll-Kraft benötigte Blendenöffnung des Ventils mithilfe der sogenannten Blendengleichung berechnet, welche sich wie folgt darstellt:

$$Q_{Blende} = 0,6 \cdot \alpha_K \cdot \frac{d_B^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (54)$$

Hierbei beschreibt  $\alpha_K$  die Durchflusszahl, welche Werte von 0,6-0,8 einnehmen kann [Bos13] und  $\rho$  die Dichte des Hydrauliköls, welches durchschnittlich mit  $0,88 \text{ kg/dm}^3$  [Bos13] angenommen wird. Der Blendendurchmesser wird mit  $d_B$  in [mm], die Druckdifferenz mit  $\Delta p$  in [bar] sowie der Blendendurchfluss mit  $Q_{Blende}$  in [l/min] berücksichtigt. Aus der benötigten Blechhalterkraft für jedes Segment kann somit auf Basis des Zylinderdurchmessers der Hydraulikzylinder, der jeweils benötigte Hydraulikdruck und damit einhergehend der benötigte hydraulische Durchfluss  $Q_{Blende}$  bestimmt werden. Mithilfe der Blendengleichung wird daraus der benötigte Verfahrensweg des Servoventils berechnet.

Als Teil der Ventilkalibrierung muss die Signalübertragung zwischen dem SPS-System und den Servoventilen parametrisiert werden, wobei diese Kommunikation auf Basis von SPS-Inkrementen stattfinden muss (vgl. 6.1.1). Daher muss eine Übertragungsfunktion zwischen den physikalischen Werten in den SPS-Inkrementen aufgestellt werden. Um den SPS-Inkrementwert in den physikalischen Wert der Kraftvorgabe in [kN] umzurechnen, wird die maximal mögliche Kraft der Blockzylinder durch die maximale Anzahl an Inkrementen geteilt und mit der aktuellen Anzahl der Inkremente multipliziert. Die verwendeten Blockzylinder haben eine Maximalkraft von 230 kN bei 320 bar Nenndruck. Damit ergibt sich die Übertragungsfunktion zwischen physikalischen Werten und SPS-Inkrementen zu:

$$f(x) = \frac{230}{32767} \cdot x \quad (55)$$

Hierbei repräsentiert  $x$  die Anzahl der Inkremente und  $f(x)$  stellt den Wert der physikalischen Kraft dar. Neben der Parametrierung der Servoventile zur Berechnung der notwendigen Ventilöffnung, sowie der Einstellung einer Übertragungsfunktion für die Servoventil/SPS Kommunikation, müssen Einstellungen an der den Ventilen zugeordneten Sensorik vorgenommen werden. Zur Schließung des Druckregelkreises sind die Druckgeber, welche den hydraulischen Druck in jedem Hydraulikzylinder messen, direkt mit den dem Hydraulikzylinder zugeordneten Servoventil verbunden. Auch die Messwerte der Druckgeber müssen von den SPS-Inkrementen mithilfe einer Übertragungsfunktion in physikalische Werte umgerechnet werden. Um die SPS-Inkremente in die vom Druckgeber angezeigten realen Messwert umzurechnen, werden die aktuelle Anzahl der SPS-Inkremente durch ihre maximal mögliche Anzahl geteilt und mit dem maximal möglichen physikalischen Messwert des Druckgebers multipliziert. Die verwendeten Druckgeber der Blockzylinder arbeiten in einem Messintervall von 0 bis 400 bar, sodass sich die Übertragungsgleichung somit zu:

$$f(x) = \frac{400}{32767} \cdot x \quad (56)$$

ergibt. Hierbei stellt  $f(x)$  die physikalischen Druckwerte in [bar] dar und  $x$  die Anzahl der SPS-Inkrementen, welche übertragen werden.

### 6.3.2 Inbetriebnahme der Zargenspannungssensoren

Da die Zargenspannungssensoren als Piezosensoren einen Verstärker zur Konvertierung des Ladungssignals in ein Spannungssignal benötigen, muss die komplette Messstrecke in Betrieb genommen werden. Hierbei müssen die Kalibrierung der Sensoren sowie die Kalibrierung des Verstärkers des Sensorsignals bestimmt werden. Bei den Verstärkern, welche den Zargenspannungssensoren zugeordnet sind, handelt es sich um Sensoren der Firma Kistler 5073A. Zur Kalibrierung muss bei diesen Sensoren der Messbereich sowie der Verstärkungsfaktor hinterlegt werden. Entsprechend den Angaben des Handbuchs wurde für die Sensoren der Messbereich von -1400 bis 1400  $\mu\epsilon$  hinterlegt [Kis18a]. Zur Kontrolle des Verstärkerwertes werden die Sensoren auf 3,3 kN Nennvorspannkraft vorgespannt, dieser Wert muss 20.000 pC entsprechen. Dieses Vorgehen bei der Kalibrierung sowie die Werte selbst sind in den Handbüchern der Zargenspannungssensoren [Kis18a] und des Verstärkers [Kis18b] vorgegeben und entsprechend umgesetzt worden.

Von den verschiedenen im Werkzeug verwendeten Sensoren, müssen allein die Zargenspannungssensoren mithilfe einer Messung kalibriert werden. Hierbei wird das gemessene Signal, welches der Sensor bei einer Messung ausgibt, mit der anliegenden realen Spannung korreliert. Bei den anderen im Werkzeug verwendeten Sensoren konnte auf jeweils im Handbuch hinterlegte Werte der Werkskalibrierung zurückgegriffen werden. Der Unterschied ergibt sich hierbei aus der Tatsache, dass die Zargenspannungssensoren nicht direkt die Zargenspannung selbst messen, sondern die elastische Deformation des Pressenstempels, wodurch mit dem Hookeschen Gesetz die verursachende Kraft genau berechnet werden kann. Diese Kraft kann auf Grund des mechanischen Grundsatzes Actio gleich Reactio auf die bei der Umformung mit dem Stempel in direkter Wechselwirkung stehende Platine übertragen und damit die wirkende Spannung in der Platine bestimmt werden.

Die verwendete Messeinrichtung, bestehend aus Sensoren und Verstärkern, wurden bereits von Blaich [Bla12] in demselben Versuchswerkzeug verwendet. Dadurch konnte dessen Kalibrierung mit den Parametern übernommen werden. Dieser Kalibrierprozess wird daher auf Basis der Arbeit von [Bla12] an dieser Stelle nur kurz beschrieben. Diese Kalibrierung muss für jeden Sensor in seiner Einbausituation durchgeführt werden, da sich die Einbauorte in Form, Material und Überdeckung zwar sehr ähnlich, jedoch nicht gänzlich gleich sind [Bla12]. Die Kalibrierungsfaktoren sind in Tabelle 3 eingetragen. Daraus konnte für jeden Sensor im Versuchswerkzeug ein nur von der Blechdicke abhängiger Kalibrierfaktor bestimmt werden. Nach [Bla12] reicht die Kenntnis der Blechdicke eines anderen Blechwerkstoffes aus, um die Signale der Messdübel auf die Zargenspannung zu kalibrieren. Es wurden deshalb bei allen Versuchen die normierten Kalibrierungsfaktoren nach [Bla12] verwendet welche in Tabelle 3 zusammengefasst sind. Auf die genaue Herleitung der Kalibrierfaktoren sowie die

Messdynamik des Zargenspannungssensor wird in Kapitel 7.2 eingegangen. Nun muss in einem weiteren Schritt mit dem Kalibrierfaktor die Übertragungsgleichung der Zargenspannung für die SPS-Inkrementen bestimmt werden. Dies geschieht analog zur Vorgehensweise bei den Aktoren und Sensoren. Die Übertragungsgleichung für die Zargenspannungssensoren ergibt sich somit zu:

$$f(x) = \text{Inkrement}_{\text{kal.norm}} \cdot x \quad (57)$$

Hierbei stellt  $f(x)$  die physikalische Spannung in [MPa] dar und  $x$  die aktuelle Anzahl der SPS-Inkrementen. Die Variable  $\text{Inkrement}_{\text{kal.norm}}$  beschreibt die Umrechnungskonstante für die SPS-Inkrementen und wird für jeden Sensor in einem eigenen Wert bestimmt, welcher abhängig vom Wert  $F_{\text{kal.norm},i}$  aus Tabelle 3 ist. Die einzelnen Werte für jeden Sensor sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Umrechnungskonstante für Inkrementen in MPa für die einzelnen Messdübel sowie die Kalibrierfaktoren bzgl. Blechdicke und Geometrischen Faktoren.

Messdübel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{\text{kal.norm},i}$	103,9	124,9	116,9	116,8	139,3	116,4	121,9	113,1	108,4	102,6
Inkrement	0,0317	0,0381	0,0356	0,0425	0,0355	0,0372	0,0345	0,0330	0,0331	0,0313

### 6.3.3 Inbetriebnahme der Wegmessung

Zum Abschluss der Inbetriebnahme des Versuchswerkzeugs wird die Wegmessung der Ziehtiefe mithilfe des Weggebers LWH 750 der Firma Novotechnik in Betrieb genommen. Da der Weggeber direkt ein valides Messsignal ausgibt, muss lediglich das Verhältnis der Messstrecke in [mm] hin zu SPS-Inkrementen bestimmt und in einer Übertragungsgleichung hinterlegt werden. Zur Bestimmung der Übertragungsgleichung des Signals des Weggebers wurde die Strecke des Weggebers vermessen und die Anzahl der für jeden Messpunkt zugehörigen SPS-Inkrementen bestimmt. Zur Bestimmung der Übertragungsgleichung des Weggebers ist eine Messung notwendig. Dabei wird gleichzeitig auch die Linearität des Sensors überprüft. Aus der Messung wurde Ausgleichsgerade bestimmt, deren Steigung entspricht der benötigten Steigung für die Übertragungsgleichung von Inkrementen in mm. Daraus ergibt sich die Gleichung zur Konvertierung der Inkrementen zu:

$$f(x) = 0,0233 \cdot x - 750 \quad (58)$$

Wobei  $f(x)$  die physikalische Strecke in [mm] darstellt und  $x$  die aktuelle Anzahl der SPS-Inkrementen, welche übertragen werden. Da der Sensor kopfüber eingesetzt wird und daher negative Messergebnisse liefern würde, wird in der Übertragungsfunktion durch Subtraktion des Messbereichs des Sensors von 750 mm dem entgegengewirkt. Dadurch wird ein Vorzeichenwechsel beim Messergebnis herbeigeführt und eine nachvollziehbare Darstellung ermöglicht.

## 6.4 Inbetriebnahme der Regler und Einstellung der Reglerparameter

Da die Implementierung der Regelung des Tiefziehprozesses in einer Regelkaskade vorliegt (vgl. 6.1.2), bei der der Regler der Trajektorienfolgeregelung dem Kraftregler für die einzelnen Hydraulikzylinder einen Soll-Wert vorgibt, werden zunächst die Kraftregler und danach die Trajektorienfolgeregler eingestellt. Da die Regelstrecken bei allen zehn SISO-Regelkreisen identisch sind, ist es ausreichend die Regler eines Regelkreises einzustellen und diese Werte für die anderen Regelkreise zu übernehmen [Bar17a]. Die Einstellung der Reglerparameter wird mit der heuristischen Methode nach Ziegler und Nichols vollzogen [Lun14].

### 6.4.1 Inbetriebnahme und Einstellung der Kraftregler

Zunächst wird der Kraftregler für die Hydraulikzylinder eingestellt, dieser ist auf den Servoventilen des Herstellers vorimplementiert. Die Regelgröße in diesem Regelkreis ist die Kraft bzw. der in den Hydraulikzylindern vorherrschende Hydraulikdruck. Für die Kraftregelung wird vom Hersteller der Ventile ein PI-Regler empfohlen. Infolgedessen müssen ein Proportionalglied und ein Integralglied eingestellt werden. Hierzu werden sog. Leerhübe mit dem Versuchswerkzeug gefahren, welche ohne eingelegte Platine erfolgen. Ziel der Reglereinstellung ist es, ein möglichst schnelles Erreichen und Halten der Regelgröße zu gewährleisten – dies wird mit dem P-Glied des Reglers angestrebt – sowie eine möglichst geringe bleibende Regelabweichung, wozu das I-Glied verwendet wird. Des Weiteren sollte die Regelgröße möglichst nicht überschwingen, deshalb darf das P-Glied nicht zu groß gewählt werden [Lun14]. In Abbildung 42 ist die Entwicklung des Einschwingweges der Kraft des Hydraulikzylinders 1 im Verhältnis zur Reglerverstärkung des P-Glieds zu sehen.

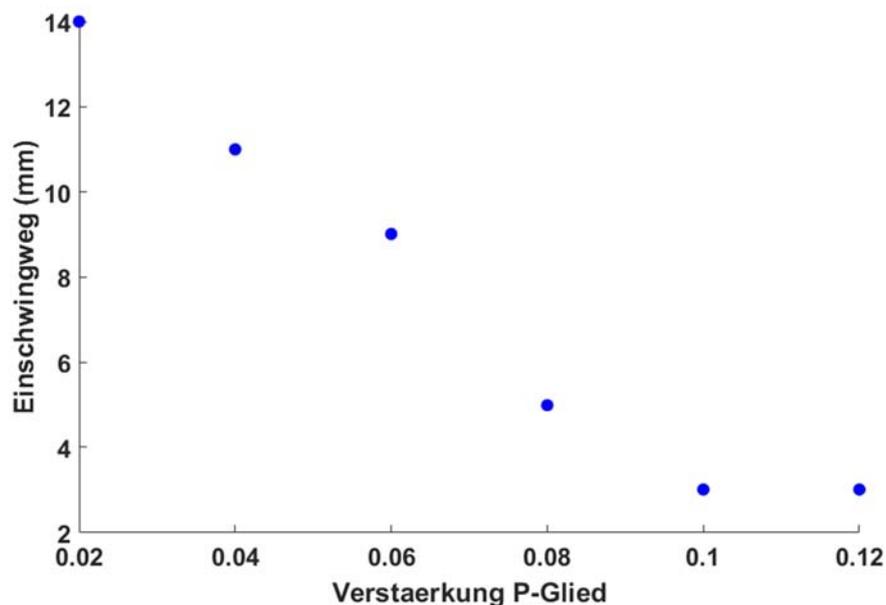


Abbildung 42: Einfluss der Verstärkung des P-Glieds auf den Einschwingweg der Kraft des Hydraulikzylinders 1.

Für das Einfahren der Regler wird zunächst eine Kraft von 42 kN an jedem der zehn Hydraulikzylinder gewählt, dieser Wert ist die Antwort nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest [Ada79]. Des Weiteren wird zu Beginn des Einfahrens des Reglers eine geringe Verstärkung am P-Glied des ersten Hydraulikzylinders von  $K_P=0,02$  eingestellt. Beim ersten Versuch wird mit der angegebenen Einstellung die Vorgabekraft erst nach 14 mm Hubstrecke erreicht und der Sollwert wird ungenügend gehalten. Dies ist ein klares Indiz für einen zu geringen Verstärkungswert am P-Glied. Danach wird bei jedem weiteren Leerhub die Verstärkung sukzessive in 0,01 Schritten erhöht, bis die Vorgabekraft schnell und mit möglichst geringem Überschwingen der Regelgröße erreicht wird. Für den Hydraulikzylinder 1 wurde dies bei einer Verstärkung des P-Glieds mit  $K_P=0,1$  erreicht. Bei weiterer Erhöhung der Verstärkung nimmt die Einschwingstrecke nicht mehr weiter ab, das Überschwingen der Regelgröße über den Soll-Wert sowie das Schwingen der Regelgröße nehmen jedoch massiv zu. Eine weitere Erhöhung der Verstärkung des P-Glieds würde dies verstärken und zu einem instabilen Regelkreis führen. Nachdem ein schnelles Erreichen sowie Einhalten des Sollwerts der Regelgröße erreicht wurde, ist anschließend lediglich eine bleibende Regelabweichung bei den Signalen zu erkennen, welche mit dem Integrator des PI-Reglers beseitigt werden muss.

Das I-Glied verringert die bleibende Regelabweichung und erhöht die Robustheit eines geregelten Systems [Lun14]. Die bleibende Regelabweichung ist der Regelfehler einer Sprungantwort nach dem Einschwingen der Regelgröße. Damit sie vergleichbar ist, wird sie über ihrem Zeitintervall normiert. Bei der Einstellung des Verstärkungsfaktors wird zunächst mit einem Wert von  $K_I=0,1$  begonnen, welcher mit jedem Versuch verringert wird, bis die bleibende Regelabweichung verschwunden ist. In Abbildung 43 ist das Regelverhalten des Kraftreglers nach Einstellung des P-Glieds und I-Glieds des PI-Reglers zu sehen.

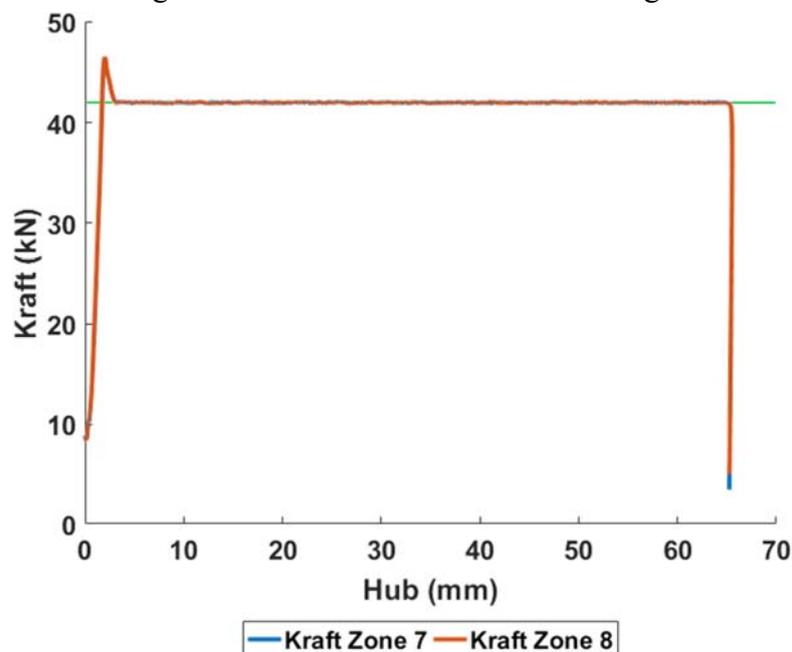


Abbildung 43: Kraftverlauf der bei einer vorgegebenen Kraft von 42 kN in Zone 7 und 8.

Zur Erhöhung der Verstärkung des I-Glieds wird, da es sich um die Länge des Integrationsintervalls handelt, der Wert immer weiter verringert. Da bei einem kürzeren Integrationsinter-

vall einzelne Abweichungen einen größeren Einfluss auf die Reaktion des Reglers zeigen, darf das Integrationsintervall nicht zu klein gewählt werden. Sonst besteht die Gefahr eines sogenannten Wind-up, wobei verursacht durch das I-Glied, sich das gesamte System aufschwingen kann. Dies würde sich negativ auf die Regelqualität auswirken. Zur Einstellung des richtigen Verstärkungsfaktors des I-Glieds wurden mehrere Versuche unternommen, bis die passende Verstärkung  $K_I = 0,01$  des Integrators gefunden wurde.

Nach anfänglichem, kurzem Überschwingen bzw. einer Kraftspitze der Ist-Kraft schwingt diese innerhalb von etwa 3 mm des Werkzeughubs auf die gewünschte Soll-Kraft ein. Hierbei beträgt die Soll-Kraft bei diesem Versuch für alle Hydraulikzylinder 42 kN. Beispielfhaft sind Abbildung 43 zwei Signalverläufe der Zylinder 7 und 8 ausgewählt worden, wobei die Signalverläufe der beiden Zylinder sich selbst beim Anfahren der Soll-Kraft vollständig überdecken. Des Weiteren ist nach einem kurzen Einschwingen die Übereinstimmung mit der vorgegebenen Soll-Kraft der beiden Hydraulikzylinder gegeben. Dies bestätigt die Annahme, dass die Regelstrecken der einzelnen Hydraulikzylinder als identisch vorausgesetzt werden dürfen. Durch den Einsatz des Integrators ist die bleibende Regelabweichung zwischen Soll-Kraft und Ist-Kraft vollständig verschwunden. Das kurze Einschwingen zu Beginn der Regelung ist akzeptabel, da es einerseits nur mit sehr aufwendigen Methoden verhindert werden kann. Andererseits kann es auf Grund der vorliegenden Werkzeugkinematik vernachlässigt werden, da zu Beginn des Umformhubes 12 mm Leerhub im Werkzeug überwunden werden müssen, ehe die Platine auf den Stempel auftrifft. Dieses Anrampen der Regelung ist in Abbildung 45 vergrößert dargestellt. Infolgedessen hat sich die Kraft auf den Sollwert eingeregelt, ehe die Platine auf den Stempel trifft und somit die Umformung beginnt.

#### 6.4.2 Inbetriebnahme und Einstellung der Trajektorienfolgeregelung

Nach der Einstellung der Reglerparameter des Kraftreglers der Servoventile, welcher den inneren Regelkreis der Reglerkaskade (vgl. 6.1.2) darstellt, werden anschließend die Regelparameter des Trajektorienfolgereglers eingestellt. Hierbei wird dieselbe Annahme getroffen wie bereits bei der Regelstrecke des inneren Regelkreises, nämlich dass die Dynamiken der zehn einzelnen SISO-Regelkreise für jede Bauteilzone aus regelungstechnischer Sicht identisch sind. Dadurch können alle Regelparameter für jeden der zehn SISO-Regelkreise übereinstimmend sein und werden von einem Regelkreis auf die anderen übertragen. Dadurch vereinfacht sich die Einstellung der Reglerparameter erheblich. Das Besondere an den Regelkreisen zur Regelung der Zargenspannung liegt im vorliegenden physikalischen System.

Die verschiedenen Blechhaltersegmente beeinflussen sich gegenseitig in relativ geringem Maße, wie von [Häu02] nachgewiesen wurde. Des Weiteren sind die einzelnen Bauteilzonen durch den konstruktiven „Gurt“ des Blechhalters alle miteinander stofflich verbunden (vgl. Abbildung 37), was zu einer gegenseitigen Beeinflussung der verschiedenen Bauteilzonen in der Platine führt. Bedingt durch die starke doppelte dynamische Verkopplung, beim Blechhalter sowie der Platine, des zu regelnden Systems sind daher keine derart guten Ergebnisse zu erwarten, wie dies bspw. bei der Regelung der Soll-/Ist-Kraft der Fall ist.

Die Einstellung der Regelparameter wurde mithilfe von wenigen Umformungshüben von mehreren Probebauteilen vorgenommen. Zunächst wurde das P-Glied eingestellt, so dass der Regler der Solltrajektorie möglichst dynamisch und exakt folgt. Sobald bei der Regelabweichung trotz einer weiteren Erhöhung der Verstärkung des P-Glieds keine Verbesserung mehr festgestellt werden kann bzw. die Regelgröße eine hochfrequente Oberschwingung entwickelt, ist das mögliche Maximum der P-Glied Verstärkung erreicht bzw. überschritten. So dann wird die P-Glied-Verstärkung bis zum Verschwinden der hochfrequenten Oberschwingung auf dem Signal der Regelgröße verringert. Nach dem P-Glied wird zur Verringerung der bleibenden Regelabweichung die Integrator-Verstärkung eingestellt. Die Verstärkung wird so lange erhöht, bis keine merkliche Abnahme der bleibenden Regelabweichung am Signal mehr feststellbar ist. Die Verstärkung des Integrators darf nicht zu groß gewählt werden, ansonsten wird die Sensitivität des Reglers zu gering und die Regelung wird träge und verliert an Leistungsfähigkeit. In Abbildung 44 ist der Signalverlauf der Trajektorienfolgeregelung in Bauteilzone 2 und 7 nach Einstellung der Reglerparameter zu sehen.

Die dargestellten Signalverläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen der Sollzargenspannung und der Ist-Zargenspannung, auch und gerade im Kontext der starken physikalischen Verkopplung durch die gießtechnische Gestaltung des zu regelnden mechanischen Systems. Die Abweichung im Signal, welche bei Prozessbeginn in der Ist-Zargenspannung ohne Last sichtbar ist, wird durch den vorgespannten Einbau der Zargenspannungssensoren im Stempelkopf hervorgerufen. Hierbei ergeben sich zwei Möglichkeiten des Umgangs mit dieser sensorbedingten Abweichung. Einerseits besteht die Möglichkeit der Bestimmung dieser Abweichung für jeden einzelnen Sensor und einer anschließenden Subtraktion dieser Abweichung von der Ist-Zargenspannung als bleibendem Offset. Andererseits besteht die Möglichkeit einer Anpassung der Sollzargenspannung zum Ausgleich dieser Abweichung. Aus Transparenzgründen wurde in dieser die Addition des Offsets zur Sollzargenspannung festgelegt.

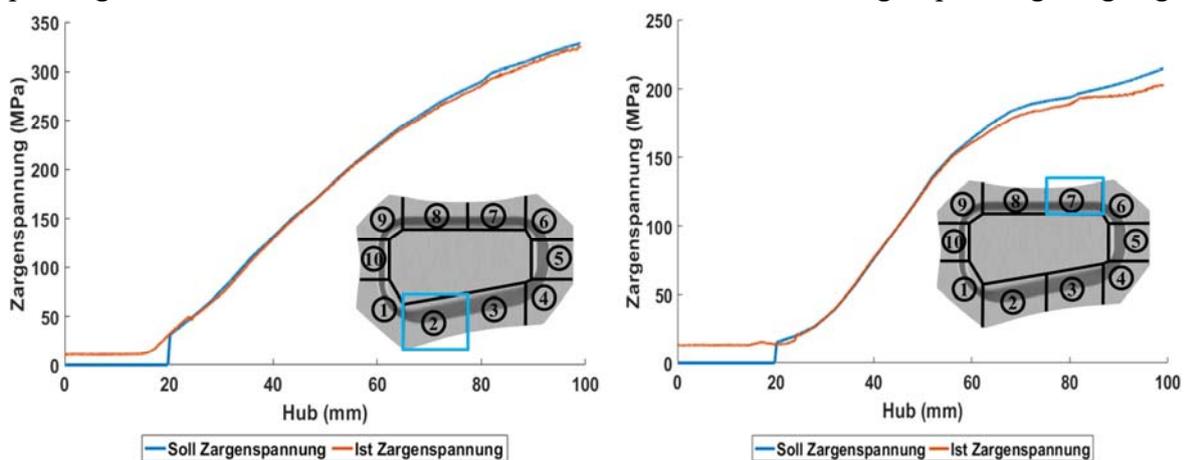


Abbildung 44: Regelergebnisse des Trajektorienfolgereglers für Bauteilzone 2 (links) und Bauteilzone 7 (rechts).

Des Weiteren ist zu den Zargenspannungsschaubildern in Abbildung 44 zu bemerken, dass die Messung und Aufzeichnung der Messsignale mit dem Aufsetzen der Matrize auf die Platine beginnen. Dadurch ergeben sich bis zum Zeitpunkt des ersten Werkzeugkontakts mit der

Platine zunächst 12 mm Leerhub ohne jegliche Umformung und somit ohne Veränderungen an der Ist-Zargenspannung. Zu Beginn der Umformung sind die wirkenden Zargenspannungen noch äußerst gering, steigen jedoch danach stark an. Um hier einen reproduzierbaren Kraftaufbau und störungsfreien Prozessbeginn zu gewährleisten, wird das Anfahrprinzip des sog. Anrampens der Stellgröße in Kombination mit der schlagfreien Ablösung eingesetzt. Hierbei wird zu Beginn des Umformprozesses ungerichtet auf die Sollzargenspannung angefahren, die Regelventile der Hydraulikzylinder halten hierbei gesteuert einen vorgegebenen Druck. Dies führt zu einem Ansteigen der Zargenspannung, nach dem Kontakt zwischen dem Stempel und der Platine besteht. Sobald die Zargenspannung einen gewünschten Schwellwert erreicht, wird der Regelkreis geschlossen und die Regelung der Umformung beginnt.

Die schlagfreie Ablösung zwischen Steuerung und Regelung wird hierbei verwendet, um einen sanften Übergang ohne Druckstoß zwischen gesteuertem Wert der Stellgröße und geregelter Wert der Stellgröße zu verhindern. Dazu wird beim Erreichen der gewünschten Zargenspannung der gesteuerte Anteil am Stellgrößensignal kontinuierlich verringert, während in gleichem Maße der geregelte Anteil an der Stellgröße kontinuierlich erhöht wird. Dadurch entsteht ein sanfter, schlagfreier Übergang. Dies ist von Bedeutung, um die hydraulischen Bauteile sowie die herzustellenden Tiefziehteile vor Schäden zu schützen. In Abbildung 45 ist das Anfahren des Umformprozesses am Signalverlauf der Soll- zur Ist-Zargenspannung in Bauteilzone 7 eines beispielhaften Umformprozesses zu sehen. Nach dem Anfahren der Regelung zu Beginn des Umformprozesses wird mit der Trajektorienfolgeregelung im verbleibenden Umformprozess fortgefahren.

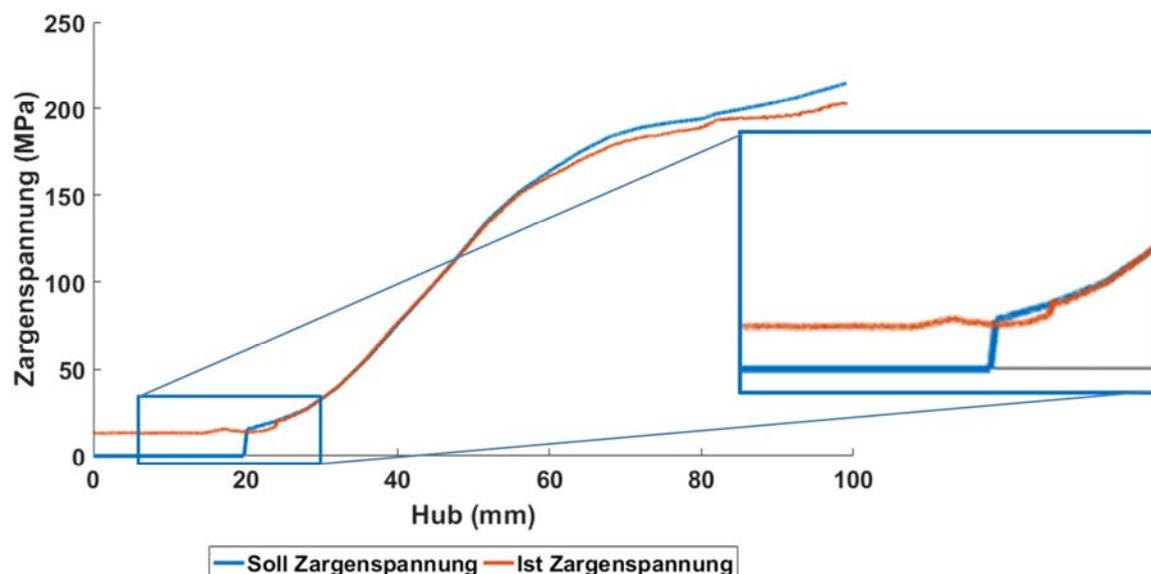


Abbildung 45: Das Anfahren der Soll-Wert-Rampe zu Beginn der Regelung am Beispiel der Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 7.



Bei einer Kaskadenregelung wie im vorliegenden System regelt der innere Regelkreis die Blechhalterkraft in den einzelnen Segmenten auf Basis der Führungsgröße, welche vom äußeren Regelkreis als Vorgabewert ausgegeben wird. Diese Führungsgröße ist die Ausgangsgröße des PI-Reglers des äußeren Regelkreises, welcher gegen die Abweichung der Zargenspannung regelt. Die Regelgröße des inneren Regelkreises ist die Blechhalterkraft in den einzelnen Segmenten, welche direkt den Tiefziehprozess und dadurch die Zargenspannung beeinflussen. Im inneren Regelkreis greift die Vorsteuerung ein, sie steuert die Kraft in den Blechhaltersegmenten vor. In beiden Regelkreisen wird als Regler ein PI-Regler verwendet, dieser ist in Abhängigkeit von der Zeit wie folgt aufgebaut:

$$u(t) = K_P \left[ e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (59)$$

Dieser Regler beinhaltet einen P-Regler, der mit einem I-Regler parallel geschaltet ist. Hierbei ermöglicht der P-Regler das Folgen der jeweiligen Führungsgröße  $w(t)$  und der I-Regler sorgt für eine hohe Regelgenauigkeit bzw. Folgegenauigkeit gegenüber der jeweiligen Führungsgröße.

### 7.1.1 Die Vorsteuerung

Zur Verbesserung der Regelqualität wird eine Vorsteuerung implementiert. In dieser Vorsteuerung sind die Blechhalterkräfte für die einzelnen Blechhaltersegmente des Segmentelastischen Blechhalters hinterlegt, welche für die Anpassung an die jeweilige Prozesssituation notwendig sind. Diese Blechhalterkräfte sind der jeweiligen Ziehtiefe  $z(t)$  im Umformprozess zugeordnet. Hiermit wird die jeweils benötigte, vorgesteuerte Blechhalterkraft  $u_V(t)$  als Teilstellgröße bestimmt und direkt auf die vom inneren Regelkreis anhand der vom äußeren Regelkreis vorgegebenen Zargenspannung berechnete Blechhalterkraft zur Gesamtstellgröße bzw. zur Gesamtblechhalterkraft eines Blechhaltersegments  $u_G(t)$  aufaddiert. In Abbildung 47 ist die Vorsteuerung in der Gesamtarchitektur der Regelung hervorgehoben.

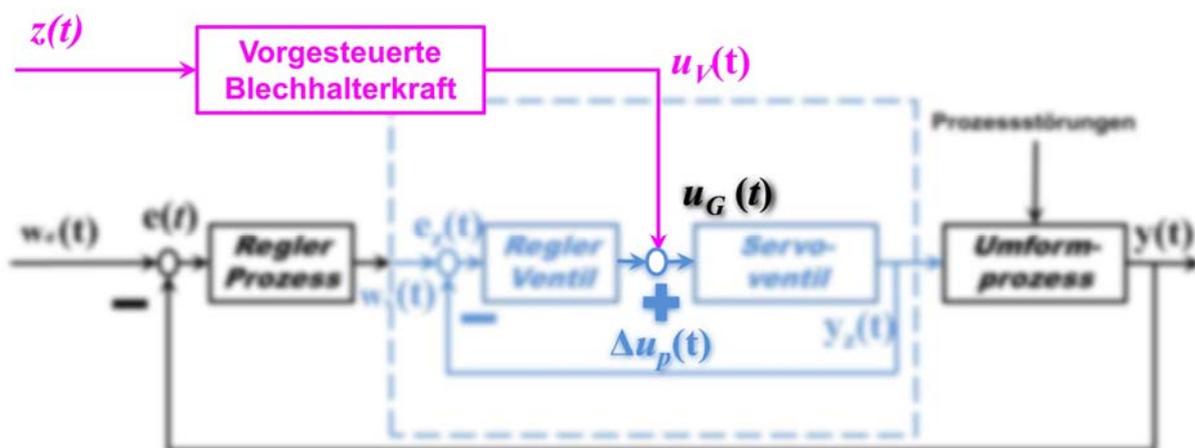


Abbildung 47: Die Vorsteuerung des Regelkreises und die ihr zugeordneten Komponenten.

Der Regelungsansatz mit der Vorsteuerung wird aus diversen Gründen gewählt. Vorsteuerungen haben den Vorteil, dass diese sich schneller auf einen Soll-Wert einregeln als eine Rege-

lung ohne Vorsteuerung [Lun14]. Des Weiteren kann mit einer Vorsteuerung der Bedarf einer Stellgröße gedeckt werden ohne die Regelung zu beanspruchen, solange dieser Bedarf im Voraus bekannt ist. Die Vorsteuerung verbessert das Führungsverhalten des Regelkreises, ohne die Regelungsstabilität zu beeinträchtigen, da der Regler im optimalen Fall nur die Sollgrößen-Abweichung ausgleichen muss, welche durch Störungen oder Modellabweichungen verursacht werden. Außerdem können mit einer Vorsteuerung schnelle Sollgrößen-Änderungen ohne Stabilitätseinbußen der Regelung vorgenommen werden. Diese Eigenschaft ist beim Tiefziehen bspw. dann nützlich, wenn die Platine bei Prozessende noch möglichst stark ausgereckt werden muss, um Rückfederungseffekte zu reduzieren.

### 7.1.2 Der Regelkreis der Blechhalterkraft

Der innere Regelkreis des vorgesteuerten kaskadierten Regelkreises berechnet die benötigte Blechhalterkraft für jedes einzelne Blechhaltersegment des Segmentelastischen Blechhalters. Hierzu erhält er die Führungsgröße  $w_z(t)$  vom Regler des äußeren Regelkreises, welcher die Abweichung der Zargenspannung berücksichtigt und je nach Abweichung der Soll- von der Ist-Zargenspannung einen entsprechenden Kraftbedarf für jedes Blechhaltersegment ausgibt. Anhand dieses Kraftbedarfs, welcher vom Regler des äußeren Regelkreises vorgegeben wird, berechnet der Regler des inneren Regelkreises die notwendige Kraftänderung  $\Delta u_p(t)$  als Teilstellgröße. Diese wird mit der Teilstellgröße der Vorsteuerung  $u_v(t)$  zur Gesamtstellgröße  $u_G(t)$  addiert, welche dann an das Servoventil weitergegeben wird. Als Regelgröße des inneren Regelkreises wird die Blechhalterkraft der einzelnen Blechhaltersegmente festgelegt (vgl. Abbildung 48).

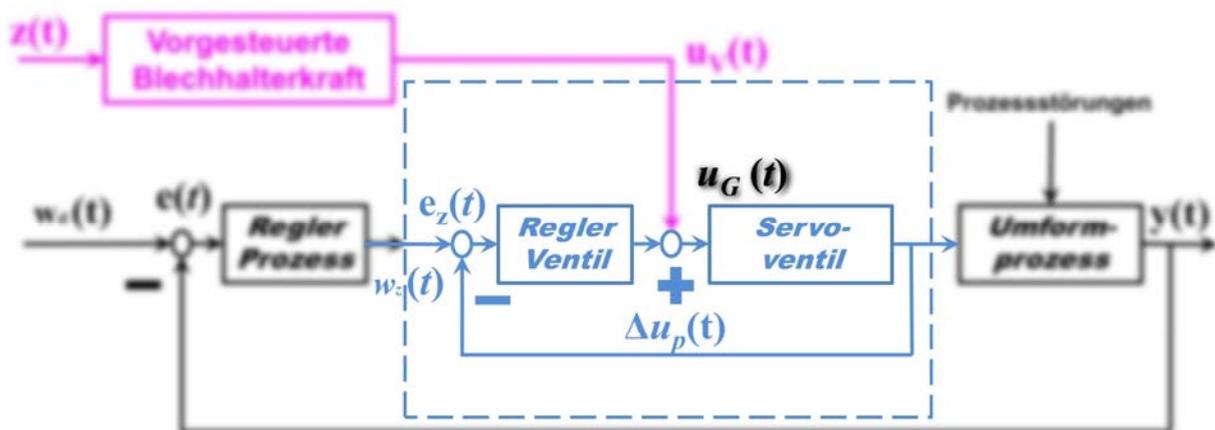


Abbildung 48: Der innere Regelkreis und die ihm zugeordneten Komponenten.

Durch diese Gesamtregelarchitektur wird dem inneren Regelkreis ausschließlich die Regelung der Kraft in den einzelnen Segmenten zugewiesen. Hierdurch erhöht sich die Regelgenauigkeit gegenüber einem Regelkreis mit direktem Durchgriff [Lun14]. Dagegen muss in Kauf genommen werden, dass die Komplexität der ineinander verschachtelten Regelkreise erheblich höher ist. Des Weiteren muss der innere Regelkreis eine höhere Regelfrequenz besitzen als der äußere Regelkreis, da ansonsten mit Stabilitätsproblemen bei der kaskadierten Regelarchitektur zu rechnen ist [Lun14].

### 7.1.3 Der Regelkreis der Zargenspannung

Der äußere Regelkreis der kaskadierten vorgesteuerten Regelung berechnet aus der Abweichung zwischen der Ist-Zargenspannung und der Sollzargenspannung die notwendige Änderung der Blechhalterkraft in den einzelnen Segmenten. Diese Änderung wird an den inneren Regelkreis als dessen Führungsgröße  $w_z(t)$  weitergegeben. Die Zargenspannung bildet die Regelgröße des äußeren Regelkreises und wird aus dem Prozess mithilfe der Zargenspannungssensoren für die einzelnen Bauteilbereiche rückgeführt. Hierbei wird die Führungsgröße  $w_D(t)$  des äußeren Regelkreises aus den Solltrajektorien der Zargenspannung in Abhängigkeit von der Ziehtiefe des Prozesses ausgelesen. Diese Solltrajektorien bilden das Metamodell der modelbasierten Regelung, welches in einem späteren Kapitel genauer beschrieben wird. Der äußere Regelkreis ist in Abbildung 49 hervorgehoben.

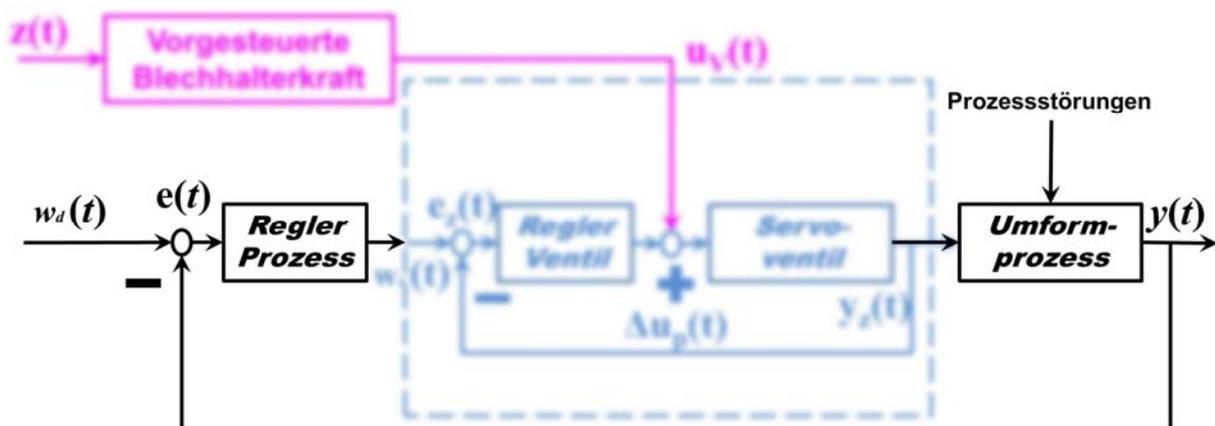


Abbildung 49: Der äußere Regelkreis und die ihm zugeordneten Komponenten.

Der äußere Regelkreis lenkt ausschließlich die Zargenspannung. Auf Grund der Vorsteuerung der Blechhalterkräfte sollte im optimalen Fall die Ist-Zargenspannung schon sehr gut mit der Sollzargenspannung übereinstimmen. Die noch vorherrschenden Regelabweichungen, welche durch Werkstoffschwankungen sowie Prozessstörungen verursacht werden, werden mithilfe des äußeren Regelkreises vollends ausgeglichen.

Durch den Regelungsansatz der vorgesteuerten kaskadierten Trajektorienfolgeregung kann eine hohe Regelgüte verbunden mit einer hohen Regelsensitivität sowie einem hinreichend effektiven Prozesseingriff erreicht werden. Gerade diese Eigenschaften sind im Hinblick auf die Komplexität und die Verkopplung des Regelungsproblems wichtige Eigenschaften. In einem späteren Schritt muss unter Berücksichtigung der Verkopplung des Regelungsproblems, die Reglerstruktur als Multiple Input Multiple Output (MIMO) oder multiples Single Input Single Output (SISO) System festgelegt werden.

## 7.2 Zargenspannung als Führungsgröße im Tiefziehprozess

Der in dieser Arbeit verwendete Sensor zur Bestimmung der Regelgröße der Zargenspannung ist der Zargenspannungssensor. Dieser wurde in der Arbeit [Ker97] von Weinmann erstmalig beschrieben, wobei eine Weiterentwicklung durch [Bec04] sowie durch [Bla12] stattfand. In

den Ansätzen von [Bec04, Bla12] wird die Zargenspannung indirekt ermittelt, d.h. die Zargenspannung kann nicht direkt im Prozess gemessen werden, sondern wird mithilfe der Messung der Stempeldeformation unter Ausnutzung des mechanischen Wirkprinzips Actio ist gleich reactio bestimmt. Hierbei wird der Effekt genutzt, dass beim Tiefziehen die gesamte Kraft von der Krafteinleitungszone im Ziehteilboden über die Zarge in die Umformzone, welche im Bereich des Matrizeeinlafradius liegt, übertragen wird. Diese Kraft verursacht durch die erwähnte mechanische Beziehung Kraft (actio) gleich Gegenkraft (reactio) eine Deformation des Werkzeugs. Diese Deformation wird mithilfe der zuvor erwähnten Kistler Messdübeln, welche als Deformationssensoren eingesetzt werden, gemessen und aus dieser Messung die Zargenspannung berechnet.

### 7.2.1 Die Funktionsweise des Zargenspannungssensors

In der Arbeit [Bla12] wurde nachgewiesen, dass die Deformation des Stempels während des Umformhubs in einem direkten Zusammenhang mit der Zargenspannung steht bzw. proportional zu dieser ist. Des Weiteren besteht ein direkter, linearer Zusammenhang zwischen der lokalen Dehnung im Werkzeugradius und den Spannungen im frei überspannten Bereich der Bauteilzarge. Somit kann von der gemessenen Deformation im Werkzeug auf die Dehnung im Blech geschlossen werden. In Abbildung 50 sind der Zargenspannungssensor sowie seine Integration in den Werkzeugstempel dargestellt.

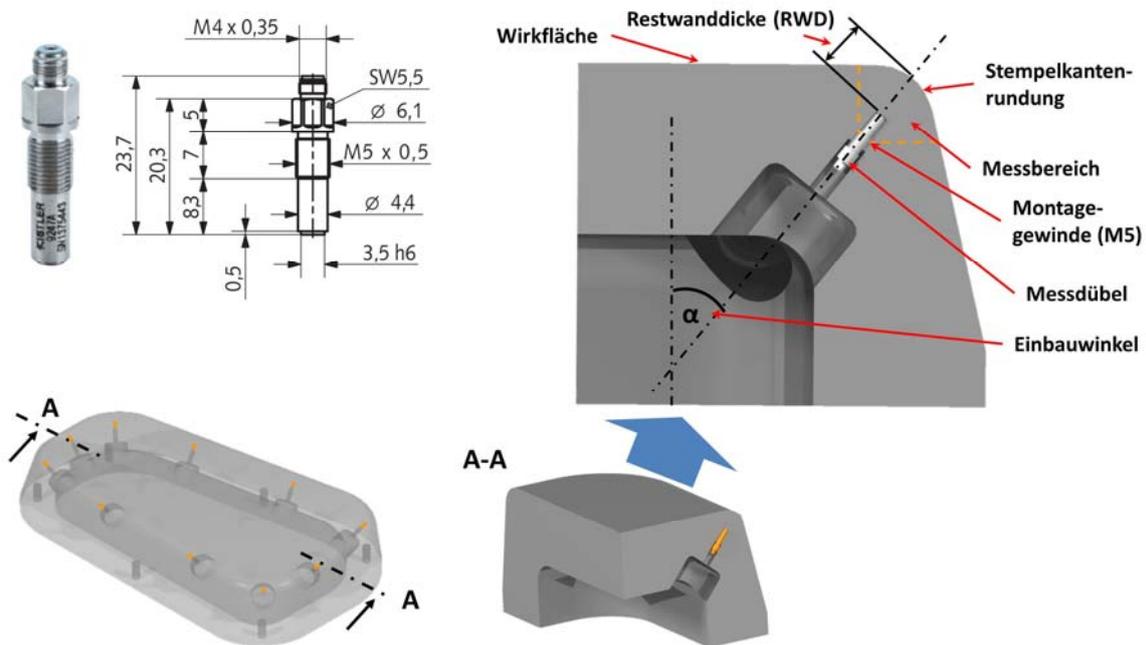


Abbildung 50: Verwendeter Kistler Sensor 9247A [Kis18a] (links oben), dessen Einbausituation (rechts), sowie die Integration der insgesamt zehn Sensoren in Werkzeugstempel der KVG (links unten).

Dadurch ergeben sich sehr viele Möglichkeiten der Prozessüberwachung, der Zustandsschätzung des Dehnungszustands der umzuformenden Platine und daraus Möglichkeiten für die Regelung des Tiefziehprozesses. Der Vorteil des verwendeten Sensors und seiner Einbausitu-

ation liegt darin, dass er von der Stempelrückseite in den Tiefziehstempel eingebaut wird. Dadurch wird die Stempelwirkfläche nicht beschädigt, wodurch die Gefahr von optischen Fehlern am Bauteil auf ein Minimum reduziert wird. Zusätzlich gewährleistet eine gewisse Restwanddicke der Materialüberdeckung im Stempel, dass eine möglicherweise notwendige Nacharbeit an einem Werkzeug durchgeführt werden kann. Des Weiteren wurde im Rahmen der Arbeit [Bla12] der Einbauwinkel in der Winkelhalbierenden eines Radius als optimale Sensorposition erkannt, da sich hiermit die besten Messergebnisse erreichen lassen und die Spannungsverläufe im Realprozess mit denen in der Simulation übereinstimmen. Durch die Einbausituation des Sensors ergibt sich ein weiterer wichtiger Effekt, nämlich die Dämpfung des Rohsignals durch den Werkzeugstahl zwischen Sensor und Wirkfläche des Umformwerkzeugs. Dadurch wird das Signal geglättet und extreme Signalspitzen auf natürlich physikalischem Wege gefiltert. In Abbildung 51 ist eine Detailansicht der Einbausituation sowie das Messprinzip des Sensors grafisch dargestellt.

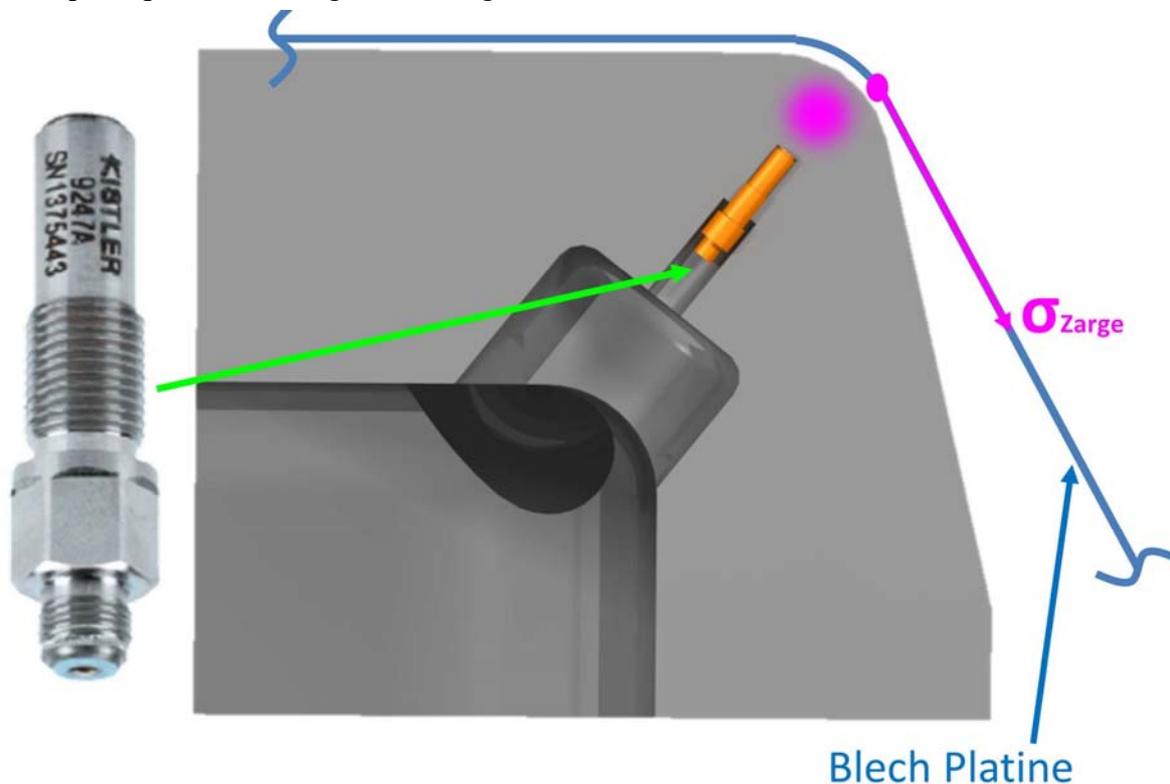


Abbildung 51: Detailansicht der Einbausituation sowie grafische Beschreibung des Messprinzips des Zargenspannungssensors. [Sensorbild Quelle: Kis18]

### 7.2.2 Die Messeigenschaften des Zargenspannungssensors

Die Eigenschaften des Sensors in Hinblick auf die Messsensitivität sowie die Messdynamik muss für eine valide Regelung bekannt sein. Zunächst wurde überprüft, welche Prozessgrößen Einfluss auf die Signale des Messdübels haben bzw. bei der Veränderung welcher Prozessgrößen Größenveränderungen im Zargenspannungssignal festgestellt werden konnten. Dazu

wurden die verschiedene Einflüsse auf die Messung grundsätzlich qualitativ untersucht, diese Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Durch diese Untersuchungen wurde erwiesen, dass Veränderungen an den Prozessgrößen einen mehr oder weniger starken Einfluss auf das Zargenspannungssignal haben. Somit sind diese Veränderungen im Prozess messbar und damit für eine Regelung verwendbar. Gerade bei einer Regelung ist eine hohe Messempfindlichkeit wünschenswert, da somit der Zustand des Prozesses exakt bestimmt werden kann [Lun14].

Tabelle 4: Einfluss verschiedener Prozessgrößen auf das Sensorsignal [Bla12].

Parameter		$\beta$	$F_{BH}$	Werkstoff	Schmierstoff	Walzrichtung	Geschwindigkeit	Geometrie
Einfluss auf Messsignal	schwach				x	x	x	
	mittel		x					
	stark	x		x				x

Des Weiteren muss die Eindeutigkeit des Signals in Bezug auf die gemessenen Werte sowie Sensitivität in Bezug auf den Aus- und Wiedereinbau des Sensors im Vordergrund. In Abbildung 52 sind verschiedene Zargenspannungsverläufe dargestellt, welche nach mehreren De- und Remontagen des Sensors sowie für verschiedene Werkstoffe erfasst wurden. Daran wird ersichtlich, dass der Sensor trotz mehrmaligem Aus- und Wiedereinbau dieselben Messwerte liefert, und dies trotz der zu erwartenden Abweichungen aufgrund einbaubedingter, unterschiedlicher Vorspannung des Sensors.

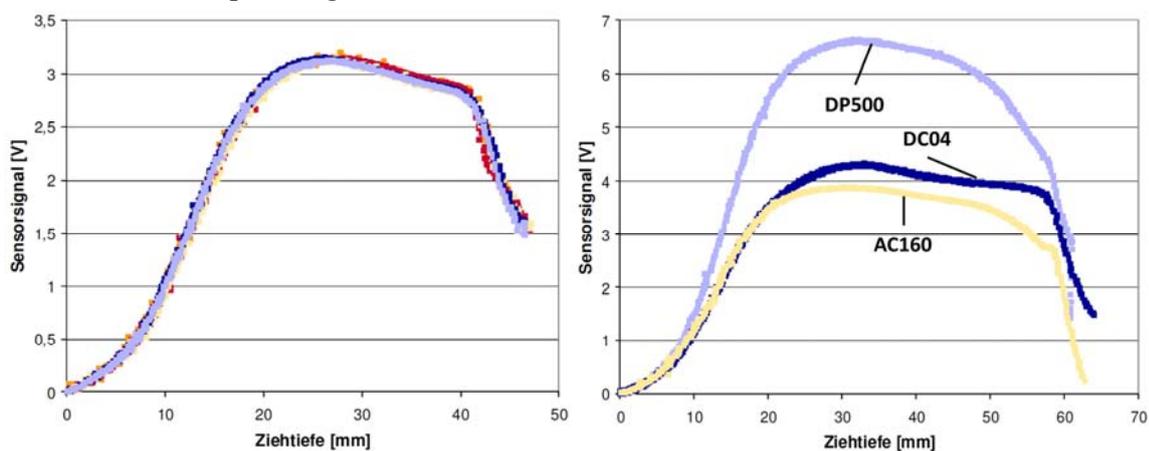


Abbildung 52: Messergebnisse zahlreicher Bauteile nach mehrmaligem Werkzeugeinbau und -ausbau (links) sowie Messungen verschiedener Werkstoffe [Bla12].

Des Weiteren ist erkennbar, dass verschiedene Werkstoffe zu unterschiedlichen Messsignalen führen. So nimmt mit dem Ansteigen der Werkstofffestigkeit auch die Zargenspannung dazu proportional zu. Das Signalverhalten der Zargenspannung stimmt demnach mit dem theoretischen Verhalten überein.

tisch-physikalischen Ansatz überein. Dabei wurde die Aussagekraft der Messung in der Arbeit [Bla12] genau untersucht und anhand der Messsignalverläufen detailliert nachgewiesen. Zusätzlich wurde bei [Bla12] untersucht wie groß der geometrische Messbereich des als Zargenspannungssensors verwendeten Messdübels ist. Da der Zargenspannungssensor im Pressenstempel integriert ist, kann die Lokalisation der Messung nicht ohne weiteres bestimmt werden. Jedoch ist ein genaues Verständnis dieser wichtig für ein genaues Verständnis der Messdynamik. Dies wurde im Rahmen der Arbeit von [Bla12] untersucht. Dazu wurden Blechstreifen oberhalb der Mittelachse des Sensors platziert und bis zum Riss tiefgezogen. Dieser Versuch wurde mit identischen Blechstreifen aus demselben Werkstoff mehrmals wiederholt, wobei die Blechstreifen seitlich in beide Richtungen von der Sensormittelachse stufenweise verschoben wurden. Dabei wurden die Signalstärken in ein Schaubild eingezeichnet, welches in Abbildung 53 zu sehen ist.

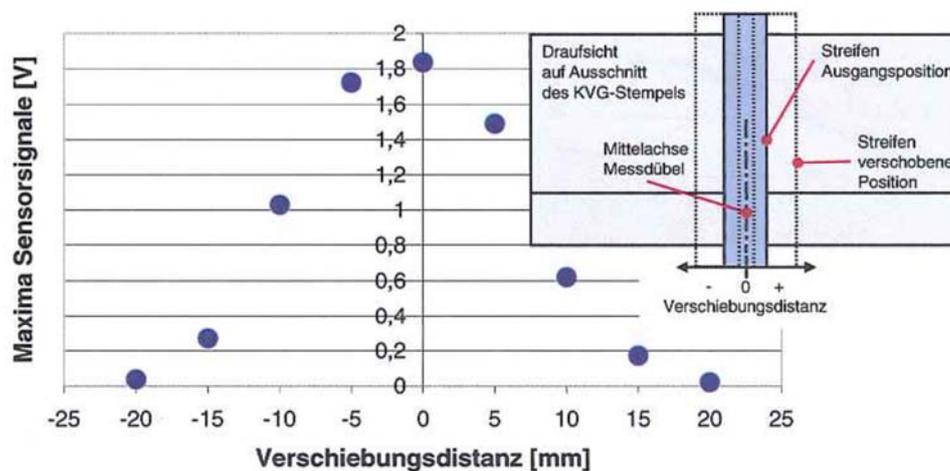


Abbildung 53: Signalmaxima beim Tiefziehen von Blechstreifen aus ZStE180BH bis zum Reißen für unterschiedliche Verschiebungsdistanzen. [Bla12]

Aus dem Messergebnis kann abgelesen werden, dass die Messung des Zargenspannungssensors relativ stark lokal begrenzt ist. Es können nur Messereignisse gemessen werden die in etwa 10 mm um die Sensormittelachse auftreten. Alle in einer größeren Distanz zur Sensor Mittelachse auftretenden Messereignisse können nicht mehr eindeutig im Messsignal zugeordnet werden oder gar nicht mehr im Messsignal festgestellt werden.

Des Weiteren wurden zusätzlich Versuche zu den unterschiedlichen Kraftniveaus mit verschiedenen Blechwerkstoffen untersucht. Dies wurde von [Bla12] einerseits für ein besseres Verständnis der Signaldynamik und andererseits für eine Kalibration der Sensoren auf ein Spannungsbezogenes Signal durchgeführt. Zur Untersuchung der Signaldynamik Sensoren wird zuerst die Zugfestigkeit des verwendeten Werkstoffs mithilfe des Zugversuchs bestimmt. Danach werden Blechstreifen mit einer Breite von 20 mm aus demselben Werkstoff zugeschnitten und über dem jeweils zu kalibrierenden Sensor im Werkzeug platziert. Diese Streifen werden nun bis zum Auftreten eines Risses umgeformt. Dies wird mehrmals wiederholt und der Mittelwert des Sensorsignals in Volt gebildet. Da das Messsignal laut Hersteller ein lineares Verhalten aufweist [Kis18a], können nun zwei Punkte in der Messkurve genau zuge-

ordnet werden. Das Sensorsignal im unbelasteten Zustand, sowie das Sensorsignal im Moment des Risses, da die Zugfestigkeit des Werkstoffs durch die Zugversuche genau bekannt ist. Hierbei repräsentiert die Steigung dieser Geraden die Messsensitivität des verwendeten Sensors. Diese Kalibrierung muss für jeden Sensor in seiner Einbausituation durchgeführt werden, da sich die Einbauorte in Form, Material und Überdeckung zwar sehr ähnlich, jedoch nicht gänzlich gleich sind. Des Weiteren können mithilfe einer solchen Kalibration auch lokale Unterschiede zwischen den geometrischen Randbedingungen in Eck sowie geraden Bereichen des Bauteils berücksichtigt werden.

Es wurden dafür mehrmals identische 20 mm breite Streifen verschiedener Werkstoffe, zur Minimierung von Messungenauigkeiten und statistischer Absicherung der Messwerte, über den einzelnen Sensoren platziert und bis zum Riss tiefgezogen. Des Weiteren wurden bei diesen Untersuchungen auch die verschiedenen Blechdicken verwendet, um deren Einfluss dabei auch zu bestimmen. Hierzu wurde die sogenannte „korrigierte Zugfestigkeit“ verwendet, wobei die Spannung mit der Anfangsblechdicke  $s_0$  multipliziert wurde. Daraus ergab sich in der Näherung die im Blech induzierte Kraft, ohne Berücksichtigung möglicher Ausdünnungen im Blech. Daraus konnte ein stark linearer Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und den Signalmaxima der Zargenspannungssensoren festgestellt werden. Wie in an den linear verlaufenden Zusammenhang zwischen Signalmaxima und korrigierter Zugfestigkeit bei einem hohen Bestimmtheitsmaß der Ausgleichsgeraden gesehen werden kann.

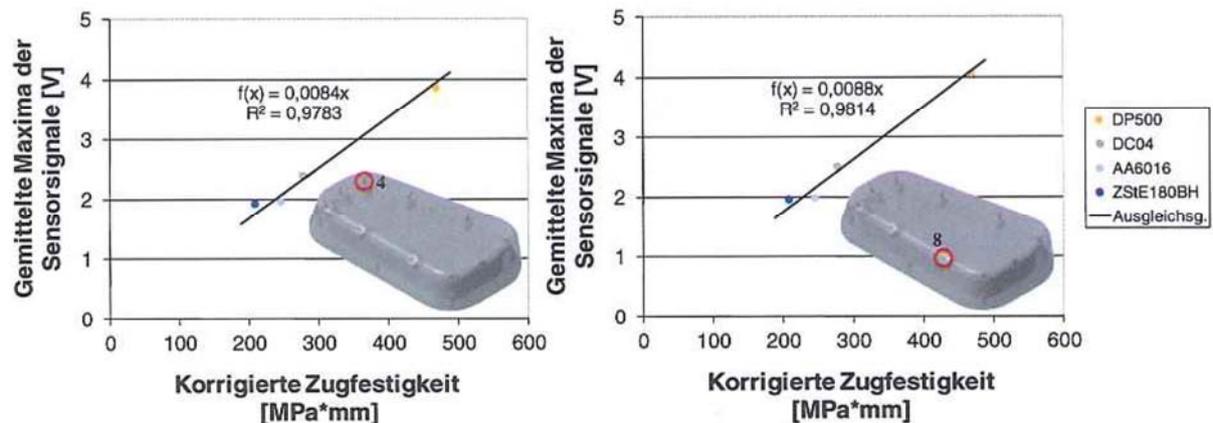


Abbildung 54: Visualisierung der linearen Zusammenhänge zwischen den gemittelten Signalmaxima der Messdübel 4 und acht und den korrigierten Zugfestigkeiten [Bla12].

Im Rahmen der Arbeit von [Bla12] wird eine Kalibrierung für fünf verschiedene Werkstoffe und Blechdicken mit allen zehn Sensoren im Versuchswerkzeug durchgeführt. Die Sensorsignale wiesen alle qualitativ dieselben Verläufe auf, waren betragsmäßig jedoch entsprechend ihrer Zugfestigkeit oder Blechdicke verschieden. Des Weiteren bildeten die Reißersignale der verschiedenen Werkstoffe in einem Spannungs-Ziehtiefe-Diagramm eine Ursprungsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von über 94 % auf, was bedeutet, dass die Messsensitivität unabhängig vom Werkstoff ist. Daraus konnte für jeden Sensor im Versuchswerkzeug ein nur von der Blechdicke abhängiger Kalibrierfaktor bestimmt werden. Nach [Bla12] reicht die Kenntnis der Blechdicke eines anderen Blechwerkstoffs aus, um die Signale der Messdübel

auf die Zargenspannung zu kalibrieren. Es wurden deshalb bei allen Versuchen die normierten Kalibrierungsfaktoren nach [Bla12] verwendet welche in Tabelle 5 zusammengefasst sind.

Tabelle 5: Kalibrierungsfaktoren in MPa/(V\*mm) für jeden Messdübel, ermittelt über die Quotienten aus korrigierter Zugfestigkeit und mittlerem Maximum des Signalverlaufs [Bla12].

	Messdübel Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DP500	103,2	124,9	115,7	120,8	148,7	120,4	126,6	115,1	105,3	102,3
DC04	105,9	126,2	116,1	115,2	131,6	126,8	120,2	109,7	108,8	100,5
AA6016	109,6	-	126,0	124,1	-	118,7	128,7	122,2	119,8	112,7
ZStE180BH	97,0	123,6	109,8	107,0	137,5	99,8	112,2	105,4	99,8	94,8
$F_{kal.norm;i}$	<b>103,9</b>	<b>124,9</b>	<b>116,9</b>	<b>116,8</b>	<b>139,3</b>	<b>116,4</b>	<b>121,9</b>	<b>113,1</b>	<b>108,4</b>	<b>102,6</b>
Kehrwert Steigung	104,2	125,0	116,3	119,0	142,9	119,0	123,5	113,6	107,5	102,0

Infolge der Betrachtung der Ergebnisse von [Bec04] und [Bla12] kann auf eine sehr gute Eignung der Zargenspannung als Regelgröße für einen geschlossenen Regelkreis zur Regelung des Tiefziehprozesses während des Hubs geschlossen werden. Des Weiteren wurde ein Zusammenhang zwischen der Dehnung im Bauteil und den Zargenspannungsverläufen festgestellt, wodurch sich für solch einen geschlossenen Regelkreis mit der Zargenspannung als Zustandsgröße ein großer Anwendungsbereich für das Tiefziehen ergibt.

Aus den Daten vorheriger Arbeiten [Bla12, Lie10], sowie der mathematisch physikalischen Anschauung nach [Par03], lässt sich eine weitere wichtige Aussage zu dem Zargenspannungssignal treffen. Der physikalische Kraftvektor hat im dreidimensionalen Raum drei einzelne Komponenten, welche sich aus der Superposition der Kräfte in jeder Raumrichtung zusammensetzen [Par03]. Hierbei wird mithilfe des Messdübels lediglich eine Komponente gemessen, nämlich diejenige, welche entlang der Längsachse wirkt. Bezüglich der Kraft welche auf den Messdübel wirkt, kann diese Messung als injektive Abbildung (vgl. [Bro14]) betrachtet werden. Durch das wiederholte Aus- und Wiedereinbauen der Messdübel und die festgestellte Übereinstimmung der Messsignale (vgl. Abbildung 52), ist der Beweis für die Injektivität der Abbildung von der Verformung auf den Messdübel erbracht. Es wird zwar stets nur eine Komponente des Kraftvektors gemessen, jedoch stets dieselbe. Somit liegt eine Vergleichbarkeit zwischen den Messungen vor, solange keine Änderungen an der Geometrie vorgenommen oder die Einbausituation des Sensors verändert wird. Die hier als Zargenspannung bezeichnete Spannung ist nur eine Komponente derer, welche jedoch invariant korreliert und somit für die Regelung sehr gut verwendet werden kann. Dadurch ist die Approximation variant in Bezug auf die Geometrie und somit nicht auf verschiedene Werkzeuggeometrien übertragbar, sowie spezifisch bzgl. jeder einzelnen Sensorposition.

### 7.3 Bestimmung der Zargenspannung in der FE-Simulation

Für eine virtuelle Modellbildung auf Basis der Zargenspannung muss diese in der Simulation erfasst und aus der Simulation ausgelesen werden. Dazu wird die Methode von [Bec04] und [Bla12] verwendet. Hierbei wird zuerst der Durchstoßpunkt des jeweiligen, im Stempel integrierten Sensors in der FEM Simulation bestimmt. Dazu wird bis zum Kontakt mit der Werkzeugwirkfläche die Längsachse des Sensors virtuell verlängert. Um diesen virtuellen Durchstoßpunkt wird ein 20 mm breiter Streifen über die Bauteilzarge vom Matrizen- bis zum Stempelradius virtuell ausgeschnitten. Die Breite von 20 mm wird daher gewählt, da durch Versuche von [Bla12] nachgewiesen wurde, dass dies der validen Messweite des im Werkzeug eingebauten Zargenspannungssensors entspricht. Durch die Verwendung der virtuellen Durchstoßpunkte im Werkzeugstempel wird eine Vergleichbarkeit der virtuellen Messwerte gewährleistet. Des Weiteren ist es notwendig bei der Verwendung der Zargenspannung als Messbasis der Solltrajektorien zur Absicherung des virtuellen Modells, die Solltrajektorie zu Beginn der Experimente mithilfe von Referenzhüben an den Prozess anzupassen.

Da es keine Möglichkeit gibt, die Zargenspannung direkt als Wert aus der Simulation auszu-lesen, muss stattdessen die Z-Spannung herangezogen werden. Hierbei ist bei LS-Dyna die Zargenspannung eine Komponente der Z-Spannung. Hierzu wird in dem vorher virtuell bestimmten Streifen die durchschnittliche Z-Spannung bestimmt und anschließend mit der Output Funktion in ein ASCII-File abgespeichert. Dieser Ablauf wird in jedem Zeitinkrement der Simulation für alle 10 Sensoren einmal durchgeführt. Somit können die Zargenspannungen mit einer hohen Granularität bei der Schrittweite bestimmt werden. In Abbildung 55 sind der Zusammenhang zwischen der Z-Spannung und der Zargenspannung, sowie der virtuelle Messprozess schematisch dargestellt.

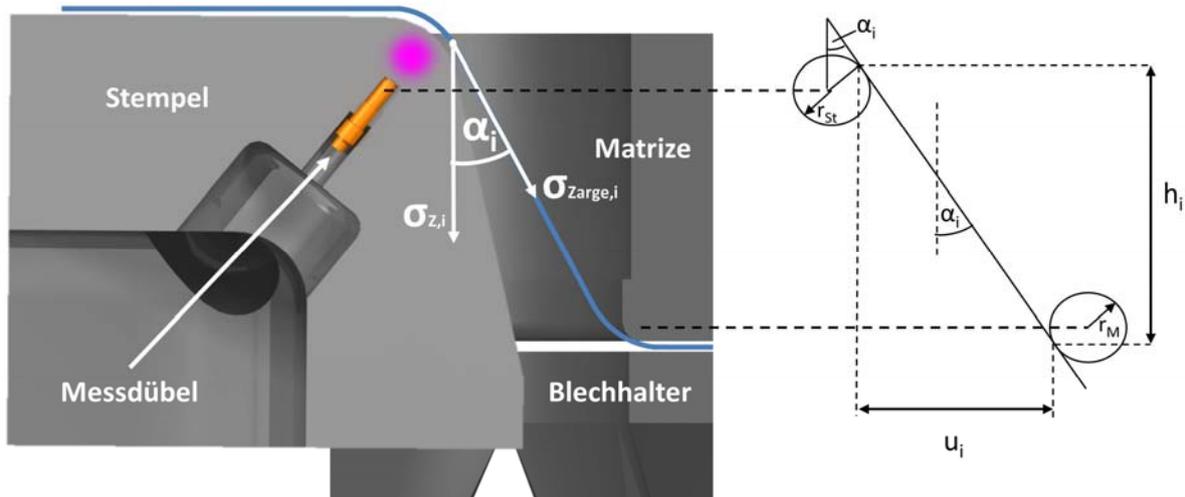


Abbildung 55: Zusammenhang der Z-Spannung und der Zargenspannung sowie der trigonometrischen Zusammenhänge im Ziehspalt nach [Bla12].

Die somit ermittelte Z-Spannung muss danach in die Zargenspannung umgerechnet werden, da die Zargenspannung nur eine Komponente der Z-Spannung ist. Für diese Umrechnung werden die geometrischen Zusammenhänge im Zargenbereich zwischen Stempelradius und Matrizeinlaufradius ausgenutzt, wie in Abbildung 55 dargestellt. In jedem Zeitinkrement

muss der Winkel  $\alpha_i$  für jeden Sensor bestimmt werden, da er sich über die Zeit verändert und durch die unterschiedlichen Neigungen der Zarge sich bei jedem Sensor unterscheidet. Der Winkel  $\alpha_i$  definiert sich dabei durch den Tangens aus der aktuellen Ziehtiefe  $h_i$  und dem aktuellen Ziehspalt je nach Bauteilbereich  $u_{i,k}$ , wobei die aktuelle Ziehtiefe  $h_i$  die Ankathete und dem Abstand zwischen dem Durchstoßpunkt der Sensorachse und der tangentialen Anlage der Zarge am Matrizeeinlauffradius in Z-Richtung  $u_{i,k}$  die Gegenkathete darstellen.

$$\tan(\alpha_i) = \frac{u_{i,k}(\alpha_i)}{k_i(\alpha_i)} \quad (60)$$

Die Zargenspannung als Komponente der Z-Spannung lässt sich nun mit dem jeweiligen Winkel  $\alpha_i$  bestimmen. Da die Z-Spannung trigonometrisch der Hypotenuse entspricht, errechnet sich die Zargenspannung als der Cosinus-Komponente der Z-Spannung in Abhängigkeit von  $\alpha_i$ .

$$\sigma_{Zarge,i} = \frac{\sigma_{Z,i}}{\cos \alpha_i(h_i)} \quad (61)$$

Die topologischen Längenverhältnisse in der näheren Umgebung des jeweiligen Sensors werden mithilfe des Kalibrierfaktors  $F_{kal.norm;i}$  aus Tabelle 5 Rechnung getragen.

#### 7.4 Die Optimierung und ihre Optimalitätsbedingungen

Zur Bestimmung der Solltrajektorien als Metamodell des Tiefziehprozesses ist eine Optimierung erforderlich. Dies dient der Bestimmung der optimalen Trajektorien der Zargenspannung entlang der Ziehtiefe, welche das Metamodell des Prozesses bilden. Der verwendete Optimierungsalgorithmus ist ein RSM-Ansatz (vgl. 2.6.3), welcher in dem Programm OptiSlang (vgl. 7.5) implementiert ist. Zur Durchführung der Optimierung müssen die zu optimierenden Größen bestimmt werden und sie müssen die Bauteilqualität widerspiegeln. Der Literatur folgend [Lan02, Doe08], wurden als geeignete Größen die Ausdünnung der Platine sowie die Faltenbildung erkannt, da Reißen und Falten die zwei Hauptversagensarten beim Tiefziehen darstellen [Lan02]. Wie im Stand der Technik dargestellt, sind diese beiden Hauptversagensarten des Tiefziehens bzgl. der Prozessführung widersprechend. Dies lässt auf ein sehr fraktales Ergebnis der Optimierung ohne globales Optimum schließen. Um optimale Parameter für den Tiefziehprozess zu erhalten, wird ein Kostenfunktional  $J$  mithilfe des schon genannten RSM-Verfahrens minimiert. Das Kostenfunktional bildet ein Funktional über alle Optimalitätsbedingungen, wobei es sich hierbei um eine Variante der Hamilton-Funktion handelt [Arn16]. Dabei handelt es sich um bei der Optimalitätsbedingungen  $g_{1-10}(\tau)$  um die Minimierung der Ausdünnung mit den Nebenbedingungen  $h_{1-10}(\tau)$  als Mindestmaß der Ausdünnung von 3 % sowie die Nebenbedingung  $k(\tau)$  als Faltenkriterium einmalig betrachtet für das gesamte Bauteil im frei überspannten Zargenbereich ohne Werkzeugkontakt. Die Optimalitätsbedingung  $g_{1-10}(\tau)$  sowie die Nebenbedingungen  $h_{1-10}(\tau)$  beschränken das Lösungsintervall nach links und rechts. Wobei die Nebenbedingungen  $h_{1-10}(\tau)$  ein Mindestmaß an Abstreckung im Bauteil garantieren, welche notwendig ist um Einfallstellen sowie Falten (neben dem verwendeten Faltenkriterium) zu verhindern. Das Kostenfunktional  $J$  stellt sich dadurch wie folgt dar:

$$J = \int_t^T f((g_{1-10}(\tau)), h_{1-10}(\tau), k(\tau)) d\tau \quad (62)$$

Dieses Kostenfunktional wird bei der Optimierung mithilfe des RSM Verfahrens minimiert. Zum Erhalt besserer Ergebnisse bei der Optimierung, wurde das Bauteil in der Simulation in zehn Bauteilzonen unterteilt. Für jede Zone wird angestrebt, das jeweilige Optimum zu erreichen. Die Zoneneinteilung im Bauteil sowie die nummerierten Segmente des segmentelastischen Blechhalters sind in Abbildung 56 dargestellt.

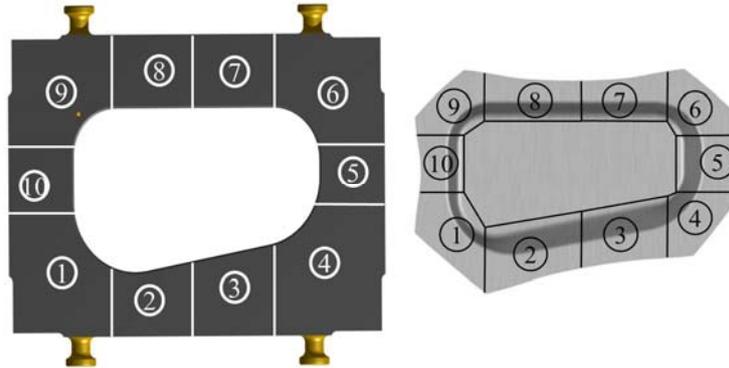
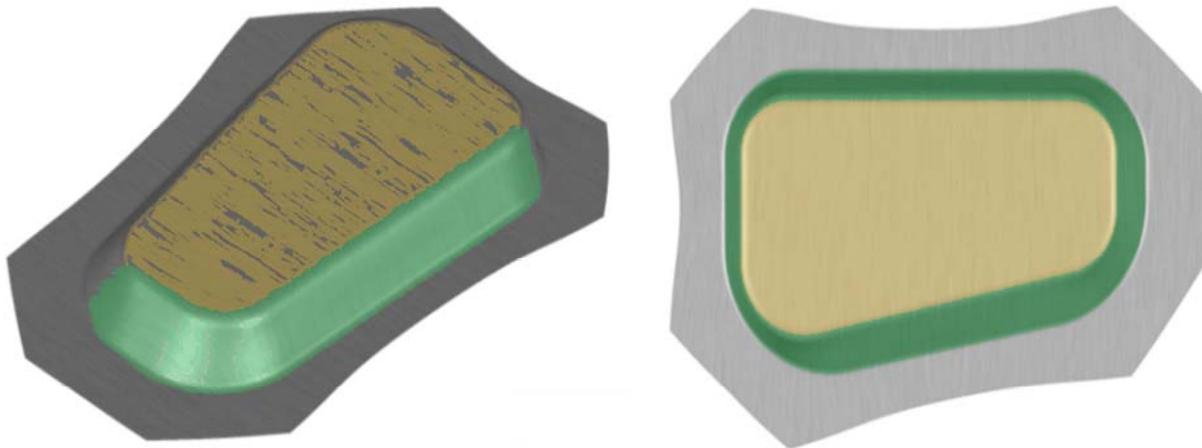


Abbildung 56: Zoneneinteilung des Segmentelastischen Blechhalters (links) und des Bauteils (rechts) in der FEM-Simulation.

Die einzelnen bei der Optimierung betrachteten Bereiche und ihre Qualitätskriterien sind in der Abbildung 57 dargestellt. Wobei die Optimalitätsbedingungen  $g_{1-10}(\tau)$  und Nebenbedingungen  $h_{1-10}(\tau)$  in die Zoneneinteilung des Bauteils wie in Abbildung 56 (links) unterteilt wurden. Das Faltenkriterium  $k(\tau)$  bezieht sich auf die Zarge im Gesamten.



$$g_{1-10}(\tau) = \min; h_{1-10}(\tau) > 3\%; k(\tau) = \min \quad g_{1-10}(\tau) = \min; h_{1-10}(\tau) > 3\%$$

Abbildung 57: Die bei der Optimierung verwendeten Optimalitätskriterien und ihre Grenzwerte sowie die betrachteten Bauteilbereiche.

### 7.4.1 Die Ausdünnung der Platine

Für die Minimierung der Reißergefahr stehen prinzipiell mehrere Größen zur Verfügung, insbesondere das Reißerkriterium in verschiedenen Ausführungen, sowie die Ausdünnung der Platine. Beim Reißerkriterium, auch Max-Failure-Kriterium genannt, wird der Quotient aus der maximal zulässigen ersten Hauptformänderung und der aktuellen Hauptformänderung berechnet, um ein Bauteilversagen vorherzusagen. Dabei wird dann der jeweilige Abstand zur Formänderungskurve bestimmt. Die zweite Möglichkeit der Prozessoptimierung bzgl. Bauteilversagen durch Reißen ist eine Optimierung der Ausdünnung. In dieser Arbeit wurde diese Möglichkeit gewählt, da eine automatisierte Auswertung mithilfe eines Skripts für die Ausdünnung sehr viel leichter durchführbar ist. Des Weiteren sind die Ergebnisse für verschiedene Werkstoffe bei Verwendung der Ausdünnung leichter vergleichbar und kann als Ersatz für die Grenzformänderungskurve herangezogen werden. Bei der Ausdünnung wird die Dickenabnahme des Bauteils betrachtet. Bei 3 % Ausdünnung hat sich die Dicke einer bspw. 1 mm dicken Platine um 0,03 mm auf 0,97 mm verringert.

Bei der gewählten ersten Optimalitätsbedingung wird nicht die absolute Minimierung der Ausdünnung angestrebt, da eine gewisse Ausdünnung der Platine während der Umformung durchaus erwünscht ist. Diese geht nämlich mit einer Kaltverfestigung im umgeformten Bauteil einher, wodurch die Festigkeit des Bauteils gesteigert wird [Lan02]. Nach [Lan02, Doe08] soll die Ausdünnung des Bauteils 3 % nicht unterschreiten, da aus Gründen der Steifigkeit gerade bei großflächigen Bauteilen ein Mindestmaß der Kaltverfestigung notwendig ist. Es wird für eine Optimalitätsbedingung quantitativ eine Minimierung der Ausdünnung in allen 10 Bauteilzonen sowie keine Unterschreitung von 3 % Ausdünnung angestrebt. Die Ausdünnung wurde jeweils im letzten Zeitschritt der Simulation, also nach dem Ende des Umformvorgangs ausgewertet. Wobei die zur Auswertung herangezogenen Bauteilbereiche bewusst so gewählt wurden, dass dort nur positive Ausdünnungen vorliegen.

### 7.4.2 Das IFU-Faltenkriterium

Als zweite Optimalitätsbedingung soll ein Kriterium zur Minimierung der Faltengefahr verwendet werden. Hierbei gibt es verschiedene Faltenkriterien in der numerischen Simulation von Umformprozessen. Viele haben eine geringe Aussagekraft, vor allem in Bereichen geringer Dehnungen. Jedoch ist bei der Vorhersage von Falten zweiter Art genau in diesen Bereichen geringer Dehnung eine hohe Aussagekraft besonders wichtig. Dieser bekannte Mangel an geeigneten Faltenkriterien ist deshalb Gegenstand der aktuellen Forschung. In Hinblick darauf wurde ein neues Faltenkriterium verwendet, welches die mangelhafte Aussagekraft bei geringen Dehnungen umgeht, da es auf den vorliegenden Spannungen im Bauteil basiert. Dieses Faltenkriterium wurde in der Optimierung für eine Bildung des Metamodells auf die frei überspannten Zargenbereiche angewendet. Es wurde dabei der Grenzwert aus vorherigen Projektuntersuchungen verwendet, welcher mehrfach validiert wurde. Die Auswertung des IFU-Faltenkriteriums wurde jeweils im letzten Zeitschritt der Simulation vorgenommen. Dieses Vorgehen hat sich in vorhergehenden Untersuchungen als praktikabel und hinreichend zuverlässig erwiesen.

## 7.5 Simulationsansatz zur Berechnung der Sensitivitäten und der Solltrajektorien

Um eine Approximation des Umformprozesses zu erreichen – bestehend aus den Solltrajektorien – stehen drei mögliche Methoden zur Verfügung. Zunächst besteht die Möglichkeit den Umformprozess auf Basis eines oder mehrerer Referenzhübe, zu approximieren. Als weitere Möglichkeit besteht die Berechnung aller notwendigen Werte und Kurven mithilfe einer Simulation. Als letzte Möglichkeit besteht eine Kombination aus den beiden vorher genannten Ansätzen. Dabei werden die Werte und Kurven mithilfe einer Simulation berechnet und mithilfe von Referenzhüben nachgestellt. Die dritte der genannten Möglichkeiten zur Bestimmung einer Approximation des Umformprozesses, wurden bei [Bar16c] vorgestellt und werden in dieser Arbeit angewendet. Neben der Bestimmung der Solltrajektorien muss eine Parameteridentifikation durchgeführt werden, welche der Bestimmung der Sensitivitäten eines möglichen Regelprozesses dient. Für beide dieser Anwendungen wird derselbe Simulationsablauf verwendet, welcher im Folgenden beschrieben wird.

### 7.5.1 Die Finite Elemente Simulation des Prozesses

Für den Regelkreis, welcher aus einer vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung besteht, müssen einerseits die Solltrajektorien für die Zargenspannungen, sowie andererseits die Parameter bzw. Trajektorien für die Vorsteuerung berechnet werden. Dazu wurde in dieser Arbeit eine Kombination aus mehreren Programmen verwendet. Für die virtuelle Berechnung des Tiefziehprozesses mithilfe der FE-Simulation, wird das Programm LS-Dyna mit LS-PrePost als Pre- und Postprozessor verwendet. Dabei wurde die Berechnung der FE-Simulation mithilfe der LS-Dyna-Version R7.1.2 sowie das Pre- und Postprocessing mithilfe der LS-PrePost Version 4.3x64 durchgeführt.

Hierbei wurden die in der Simulation diskretisierten Werkzeugteile aus Stempel, Matrize sowie den zehn Blechhaltersegmenten als Starrelemente definiert. Als starr formulierte Finite-Elemente-Netze verändern selbst unter Last ihre Form nicht. Bezüglich der realen Flächenpressungsverteilung auf dem Segmentelastischen Blechhalter, welche in der Arbeit von [Häu03] untersucht wurde, ist dies eine zulässige Vereinfachung. Durch diese Vereinfachung wird die Rechenzeit für jede einzelne der Simulationen halbiert [Bla12], was angesichts des Umfangs von Simulationen mit stochastisch verteilten Parametern notwendig ist. Des Weiteren wurden die Werkzeugelemente mit Schalenelementen nach Belytschko-Tsay vernetzt, sowie das Materialmodell für Starrkörper \*MAT\_020 zugewiesen. Die Formplatte wurde ebenfalls mit Schalenelementen nach Belytschko-Tsay vernetzt. Es wurden fünf Integrationspunkte über die Blechdicke gewählt und als Materialmodell das Modell \*MAT\_36 verwendet, sodass ein anisotropes Werkstoffverhalten berücksichtigt werden kann. Das plastische Werkstoffverhalten der verwendeten Werkstoffe wurde mit einer Fließkurve nach Barlat [Bar03] modelliert und die Werkstoffkennwerte mithilfe einer Materialkarte implementiert (vgl. Anhang 10. u. 10.4). Zusätzlich wurde die Formplatte in elf virtuelle Parts unterteilt, um die Ergebnisauswertung in der Simulation wesentlich zu verfeinern. Die Platte wurde mit Netzelementen mit einer Kantenlänge von 8 mm vernetzt, welche mithilfe der adaptiven Netzverfeinerung in Kantenbereichen bei Bedarf vom FEM-Solver auf 2 mm verkleinert werden

kann. Zusätzlich wurden die verwendeten Kontaktbedingungen zwischen dem Werkzeug und der Platine mit den speziell für die Blechumformung entwickelten und von [Dyn16] empfohlenen Kontakttypen aufgestellt. Für den Kontakt zwischen Matrize und Stempel mit der Platine wurde der Kontakttyp FORMING\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE verwendet. Beim Kontakt der Blechhaltersegmente mit der Platine wurde der Kontakt FORMING\_SURFACE\_TO\_SURFACE verwendet. Die Umformgeschwindigkeit in der Tiefzieh-Simulation wurde mit 1.000 mm/s gewählt und als konstant angenommen.

### 7.5.2 Ansatz zur Simulation des Tiefziehprozesses mit stochastisch verteilten Parametern zur Berechnung der Solltrajektorien

Für die Durchführung der stochastischen Simulation zur Berechnung der Solltrajektorien und der Parameter der Vorsteuerung wird eine Kombination aus mehreren Programmen verwendet. Zunächst erfolgt mithilfe von LS-Dyna die jeweilige Einzelteilsimulation und zur weiteren Verarbeitung der Rohdaten aus diesen einzelnen Simulationen, wird zur Auswertung Microsoft Excel verwendet. Das Programm OptiSlang wird zur Bestimmung der stochastisch verteilten Anfangsparameter eingesetzt sowie zur stochastischen Auswertung der vorprozessierten Daten aus Excel. Abschließend werden die Solltrajektorien mit dem Programm Matlab berechnet. Der grundsätzliche Ablauf der Berechnung ist grafisch in Abbildung 58 dargestellt.

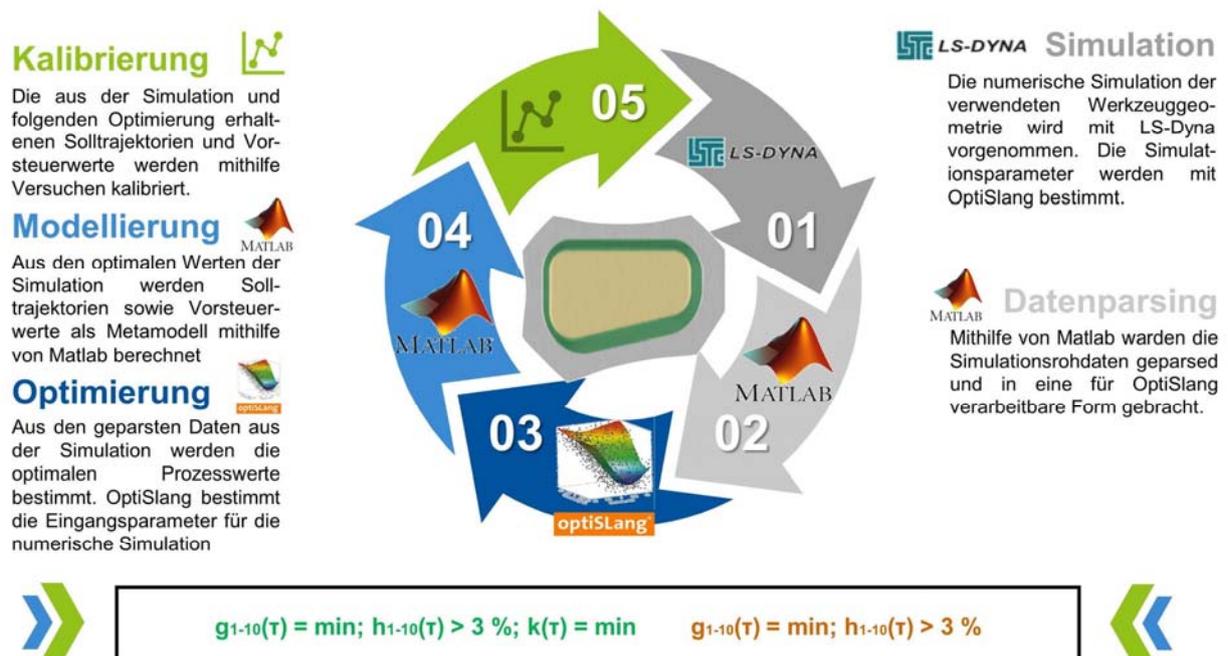


Abbildung 58: Grundsätzlicher Ablauf der Simulation zur Bestimmung des Metamodells des geregelten Prozesses.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Schritte in diesem Programmablauf genau erklärt. Da der hier verwendete Postprocessor (LS-PrePost) eine Skript-Steuerung erlaubt, konnte mithilfe eines Skriptes ein virtueller Sensor generiert werden, durch den die Zargenspannung aus der Simulation automatisiert ausgelesen und die Messwerte in ein ASCII-Format ausgeschrie-

ben werden können. Des Weiteren wurden mithilfe dieses Skripts die einzelnen Werte der Optimalitätskriterien, das Faltenkriterium sowie die Dehnungswerte der virtuellen Bauteilzonen (vgl. Abbildung 56) ausgeschrieben. Die mithilfe des Skripts aus den einzelnen LS-Dyna Simulationen ausgelesenen Daten werden für eine weitere Verwendung im Programm OptiSlang nun mithilfe eines VBA-Makros in Excel vorbereitet. Hierzu werden die ausgelesenen Simulationsrohdaten zunächst gefiltert und zusammengefasst. Dabei werden die numerischen Ausreißer ausgefiltert und die Ausdünnung für alle Bauteilzonen sowie das Faltenkriterium berechnet. Danach werden diese Ergebnisse in einem einzelnen ASCII-File zusammengefasst und an OptiSlang übermittelt. Mithilfe von OptiSlang wird einerseits die statistische Versuchsplanung für die einzelnen stochastischen Simulationen in LS-Dyna erzeugt, andererseits wird mit OptiSlang die stochastische Auswertung der einzelnen Simulationen für die Sensitivitätsanalyse sowie die Erzeugung der Parameter des optimalen Metamodells vorgenommen. Zur Erzeugung der statistischen Versuchsplanung für die Sensitivitätsanalyse wurde die LHC-Methode verwendet (vgl. 2.4.1). Die Sensitivitätsanalyse selbst hat zum Ziel, die Wirkzusammenhänge zwischen den Blechhaltersegmenten als Aktoren und den Prozessergebnissen zu finden. Für die Erzeugung des Metamodells des Prozesses wird die RSM-Methode (vgl. 2.6.3) verwendet. Hierbei werden nur einzelne Stützpunkte ausgegeben und keine vollständigen Solltrajektorien. Im Anschluss an die Simulation mit stochastisch verteilten Eingangsparemtern wurde mithilfe von Matlab das eigentliche Metamodell erzeugt. Aus den einzelnen Stützpunkten, welche von OptiSlang ausgegeben werden, wird das Metamodell in Form von Solltrajektorien erzeugt, indem die Solltrajektorien interpoliert werden. Dazu wurde die Matlab Curve Fitting Toolbox verwendet. Der zugrundeliegende Algorithmus ist eine Optimierung auf Basis der Regressionsanalyse (vgl. 2.6.3). In Abbildung 59 sind der gesamte Programmablauf, die Wechselwirkung der Programme sowie die Datenübergabe zwischen den Programmen dargestellt.

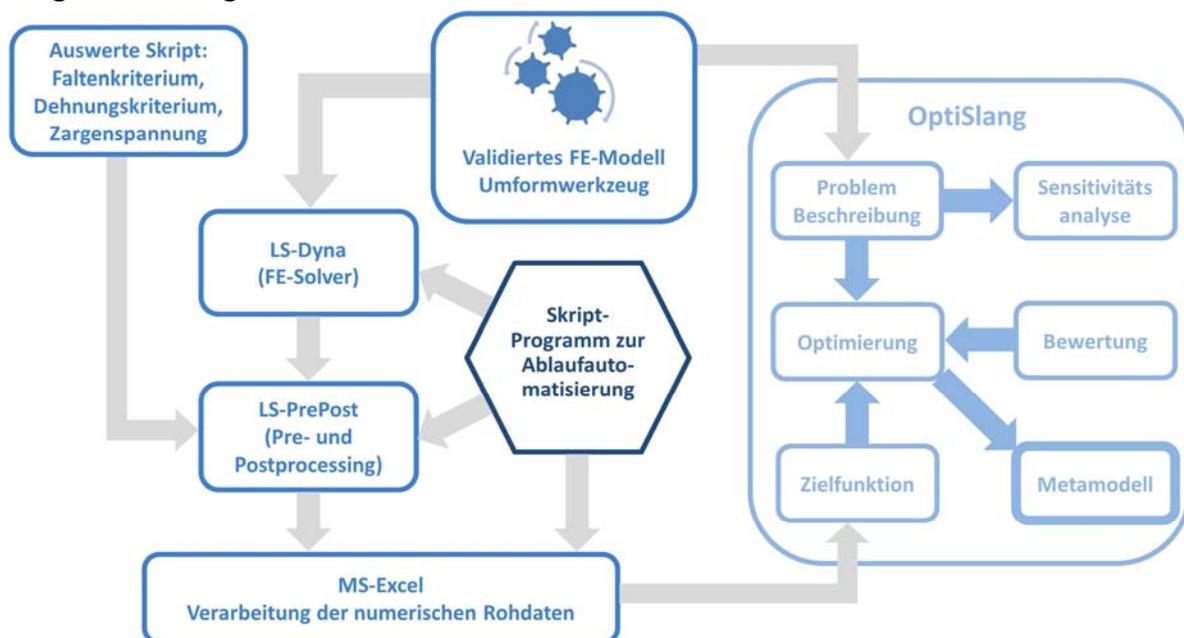


Abbildung 59: Detaillierte Darstellung des Simulationsablaufs zur Sensitivitätsanalyse und zur Bestimmung des Metamodells sowie der Parameter der Vorsteuerung.

Aufgrund des Umfangs der Simulation mit stochastisch verteilten Eingangsparametern, musste der beschriebene Simulationsablauf vollautomatisch erfolgen. Dazu wurden mithilfe eines Pythonskripts der gesamte Ablauf, das Zusammenspiel der einzelnen Programme sowie die Datenübergabe zwischen den einzelnen Programmen automatisiert.

## 7.6 Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Übertragungssystems

Nach dem Design des Regelkreises muss nun festgelegt werden, wie das Übertragungssystem gestaltet wird. Mit insgesamt zehn Blechhaltersegmenten im Werkzeug, ergeben sich auch zehn potentielle einzelne Aktoren sowie zehn einzelne Sensoren. Es stellt sich daher die Frage wie diese Sensoren und Aktoren untereinander verknüpft werden müssen. Durch das Vorhandensein mehrerer Aktoren und Sensoren handelt es sich prinzipiell um eine MIMO (Multi Input Multi Output) Übertragungssystem. Jedoch kann ein solches Übertragungssystem auch als ein multiples SISO (Single Input Single Output) Übertragungssystem behandelt werden. Bedingt durch die räumliche Verteilung (siehe Abbildung 56), bietet sich dies durch die Schaffung von zehn autonomen Regelkreisen an. Hierbei wird für jeden Regelkreis ein Zargenspannungssensor dem räumlich nächstgelegenen Blechhaltersegment zugeordnet. Da die vorliegende Bauteilgeometrie jedoch keine Symmetrien aufweist, muss das Übertragungsverhalten des Systems mithilfe einer Sensitivitätsanalyse (vgl. 0) untersucht werden.

Bei dieser Sensitivitätsanalyse wird untersucht, wie die zu regelnde Geometrie bzw. der Prozess sich bei Einflüssen verhält bzw. vom Aktor beeinflusst werden kann. Diese Sensitivitätsanalyse erfolgt mithilfe des Programms OptiSlang und dem in Kapitel 7.5 beschriebenen Vorgehen. Dazu wird eine Simulation mit stochastisch verteilten Eingangsparametern durchgeführt, wobei den einzelnen Blechhalterflächen eine Schwankungsbreite für die Blechhalterkraft zugewiesen wird, welche gleich der beim realen Versuchswerkzeug möglichen Stellbereiche der Blechhalterkraft entspricht. Es werden 100 einzelne Simulationen mit verschiedenen Blechhalterkräften in den einzelnen Blechhaltersegmenten durchgeführt, diese Anzahl an Einzelsimulationen ergibt sich aus der Anzahl der Parameter und ist abhängig vom verwendeten Verfahrens der statistischen Versuchsplanung bestimmt. Hierbei wurde als Verfahren der statistischen Versuchsplanung das LHC-Verfahren (vgl. 2.4.1) gewählt. Dabei werden die Einflüsse der Blechhalterkräfte auf die Ausdünnung in den einzelnen Bauteilzonen sowie das Maximum des IFU-Faltenkriteriums für das gesamte Bauteil untersucht. Das Faltenkriterium wurde ausschließlich für das gesamte Bauteil definiert, da ansonsten die Untersuchung zu komplex und die Konfidenzintervalle zu groß wären. Infolgedessen wird aus dieser Untersuchung abgeleitet, ob das Übertragungsverhalten des Systems als ein multiples SISO- oder ein MIMO-Übertragungsverhalten für die Regelkreise klassifiziert werden kann. Diese Untersuchung wird für zwei Werkstoffe durchgeführt, die Stahllegierung HC340 und die Aluminiumlegierung AA6016. Diese beiden Legierungen wurden gewählt, da diese einerseits bei den realen Versuchen verwendet werden und andererseits in der Automobilindustrie sehr verbreitet Anwendung finden.

### 7.6.1 Sensitivitätsanalyse für den Stahlwerkstoff HC340

Zunächst wird eine Sensitivitätsanalyse bzgl. der Stahllegierung HC340 durchgeführt, dafür sind in Tabelle 6 die Schwankungsbreiten der Blechhalterkräfte für jedes einzelne Blechhaltersegment für den Werkstoff HC340 zusammengefasst. Es wurden keine stochastische Schwankung der Werkstoffkennwerte berücksichtigt, da das Ziel der Untersuchung nicht die Bewertung der Prozessrobustheit war, sondern die Bewertung des Übertragungsverhaltens des jeweiligen Umformprozesses in Abhängigkeit von der Blechhalterkraft.

Tabelle 6: Schwankungsbreiten der Blechhalterkraft in den einzelnen Segmenten als untersuchte Eingangsgrößen für den Werkstoff HC340.

Werkstoff	HC340									
Segment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Schwankungsbreite [kN]	10 - 150									

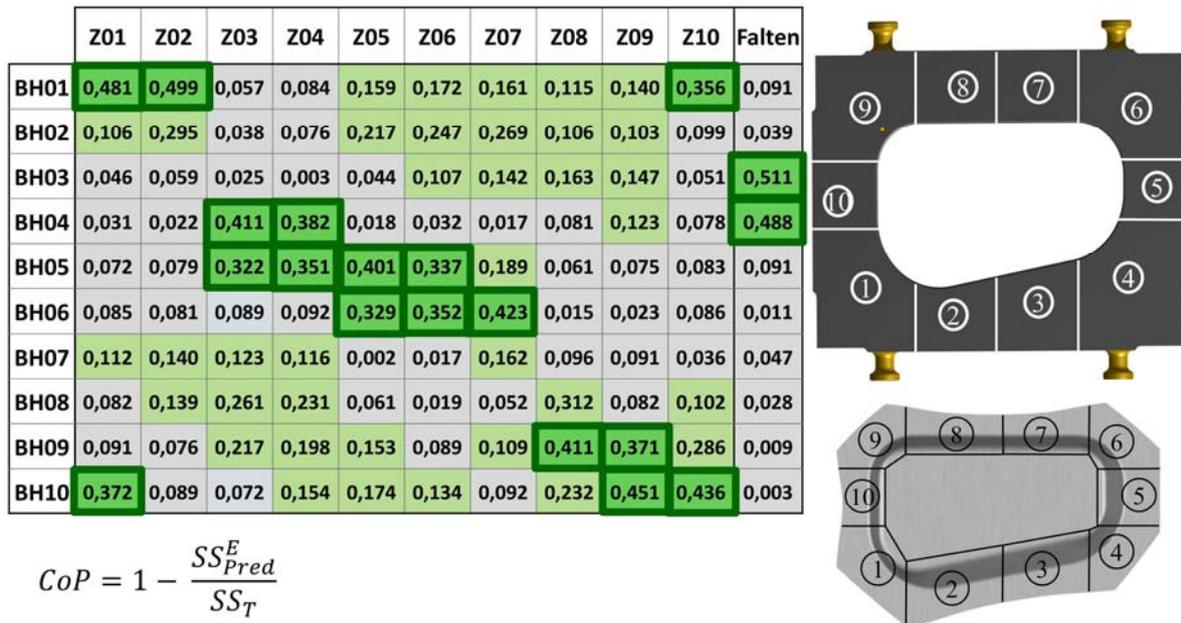
In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Werkstoff HC340 zu sehen. Hierbei handelt es sich um den in OptiSlang verwendeten CoP-Wert (vgl. 2.4.5). Hierbei wurde die Klassifizierung von starken bzw. vernachlässigbaren Korrelationen anhand von [Dyn17] bestimmt. Alle Korrelationen, deren Einflüsse als signifikant bezeichnet werden können, müssen über einem CoP-Wert von 0,1 liegen, diese sind in der Abbildung grün hinterlegt. Alle starken Korrelationen, die über einem CoP-Wert von 0,3 liegen, sind zusätzlich grün eingerahmt. Alle anderen Beziehungen zwischen Bauteilzonen und Blechhaltersegmenten müssen aufgrund mangelnder Aussagekraft der Ergebnisse vernachlässigt werden. Bei diesen Korrelationen ist kein maßgeblicher Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße feststellbar.

Die starken Korrelationen können anhand der Ergebnisse des CoP-Wertes als durchgehend lokal beschränkt klassifiziert werden. Dabei haben die einzelnen Blechhaltersegmente bis auf eines nur auf die direkte, korrespondierende Bauteilzone oder eine direkt angrenzende Bauteilzone einen hohen Einfluss (CoP-Wert über 0,3). Bzgl. eines hohen Einflusses auf das Prozessergebnis sind besonders die Blechhaltersegmente in den Eckbereichen zu nennen. Dies ist einerseits mit der in einem Eckenradius bei hohen Ziehtiefen dominant wirkenden ideellen Umformkraft zu erklären [Doe07] und andererseits durch die Blechaufdickungen in den Eckbereichen, welche durch einen prozessbedingten Materialüberschuss hervorgerufen werden [Lan02]. Dadurch erklärt sich der hohe lokale Einfluss der Segmente in den Eckbereichen. Besonders auffällig ist der hohe Einfluss des Blechhaltersegments 5, welches einen hohen Einfluss auf die gesamte rechte Seite des Bauteils hat. Dies kann durch die geringe Neigung der Zarge in diesen Bauteilzonen erklärt werden, dadurch sind die Einflüsse weniger lokal beschränkt [Lan02].

Auffallend sind des Weiteren die Blechhaltersegmente 2, 3, 7 und 8 in den geraden Bauteilzonen. Diese haben kaum Einfluss auf das Umformergebnis des Bauteils, selbst in den lokal korrespondierenden Bauteilzonen sind ihre Einflüsse gering und liegen konstant unter einem



Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 61 dargestellt. Sie stimmen in hohem Maße mit den Ergebnissen aus der vorherigen Sensitivitätsanalyse des Werkstoffs HC340 überein. Dies war so zu erwarten, da dieselbe Geometrie untersucht wurde und der Bauteilgeometrie ein großer Einfluss auf den Tiefziehprozess zugeschrieben wird [Lan02, Doe07]. Dies kann gut nachvollzogen werden bspw. anhand der Wichtigkeit der Ankonstruktion, in der Methodenplanung eines Bauteils beim Tiefziehen.



$$CoP = 1 - \frac{SS_{Pred}^E}{SS_T}$$

Abbildung 61: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Werkstoff AA6016 (links), sowie die Zoneneinteilung (Z01-Z10) des Bauteils sowie die Nummerierung der einzelnen Blechhaltersegmente (BH01-BH10) (rechts).

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorherigen Untersuchung für den Werkstoff HC340, sind die Einflüsse der Blechhaltersegmente in den Eckbereichen dominant; mit CoP-Werten über 0,3 für die direkt korrespondierenden Bauteilzone sowie für die direkt benachbarten Bauteilzonen. Die Einflüsse der Blechhaltersegmente in den kurzen, geraden Bauteilzonen (Segment 5 und 10) stimmen weitestgehend mit den vorherigen Ergebnissen überein. Auffallend ist hierbei, dass die Dominanz von Blechhaltersegment 5 etwas abgenommen hat, da der Einfluss auf Bauteilzone 7 geringer ausfällt als beim Werkstoff HC340. Die Dominanz der Segmente in den Eckbereichen hat im Gegensatz dazu weiter zugenommen. Dies kann mit der höheren Aufdickungsneigung im Vergleich zu Stahlwerkstoffen gegenüber dem Aluminiumwerkstoff erklärt werden [Lan02]. Durch die große Dominanz der Segmente in den Eckbereichen, hat der Einfluss der Segmente in den geraden Bauteilzonen 2, 3, 7 und 8 im Vergleich zum Stahlwerkstoff weiter abgenommen. Bei der Faltenbildung sind in Übereinstimmung zum Stahlwerkstoff die Segmente 3 und 4 dominant. Die Dominanz der beiden Segmente hat sogar zugenommen, was mit der höheren Faltenneigung von Aluminiumwerkstoffen erklärt werden kann [Doe07].

Auffällig bzgl. der Sensitivitätsanalyse beider Werkstoffe ist, dass viele Blechhaltersegmente auf fast alle Bauteilzonen einen schwachen, aber feststellbaren Einfluss haben. Hierbei ist

beispielhaft Blechhaltersegment 2 zu nennen. Es hat auf keine Bauteilzone einen signifikanten Einfluss, jedoch bis auf Bauteilzone 3, 4 und 10, einen leichten Einfluss auf alle anderen. Dieser beobachtete Effekt ist mit der starken Verkopplung der einzelnen Bauteilzonen des Bauteils, bedingt durch die stoffliche Verbindung der Platine, zu erklären. Daraus kann für die Regelung eine nicht unterdrückbare gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Regelkreise erwartet werden.

### 7.6.3 Bestimmung des Übertragungssystems

Auf Basis der beiden durchgeführten Sensitivitätsanalysen lässt sich das Übertragungsverhalten nun als überwiegend SISO-Regelung klassifizieren. Damit kann für eine Regelung des Tiefziehprozesses für das vorliegende Bauteil jeweils eine SISO-Regelung bestehend aus einem Zargenspannungssensor und dessen direkt korrespondierendem Blechhaltersegment abgeleitet werden. Infolgedessen werden zehn parallel geführte SISO-Regelkreise für jeweils eine Bauteilzone mit dem zugehörigen Blechhaltersegment realisiert. In Abbildung 62 ist die Zuordnung der einzelnen SISO-Regelkreise anhand der Zuordnung von Blechhaltersegmenten, Bauteilzonen und Sensoren dargestellt, sowie im Blockschaltbild die einzelnen Größen ausgewiesen beispielhaft für die Bauteilzone und Blechhaltersegment 3.

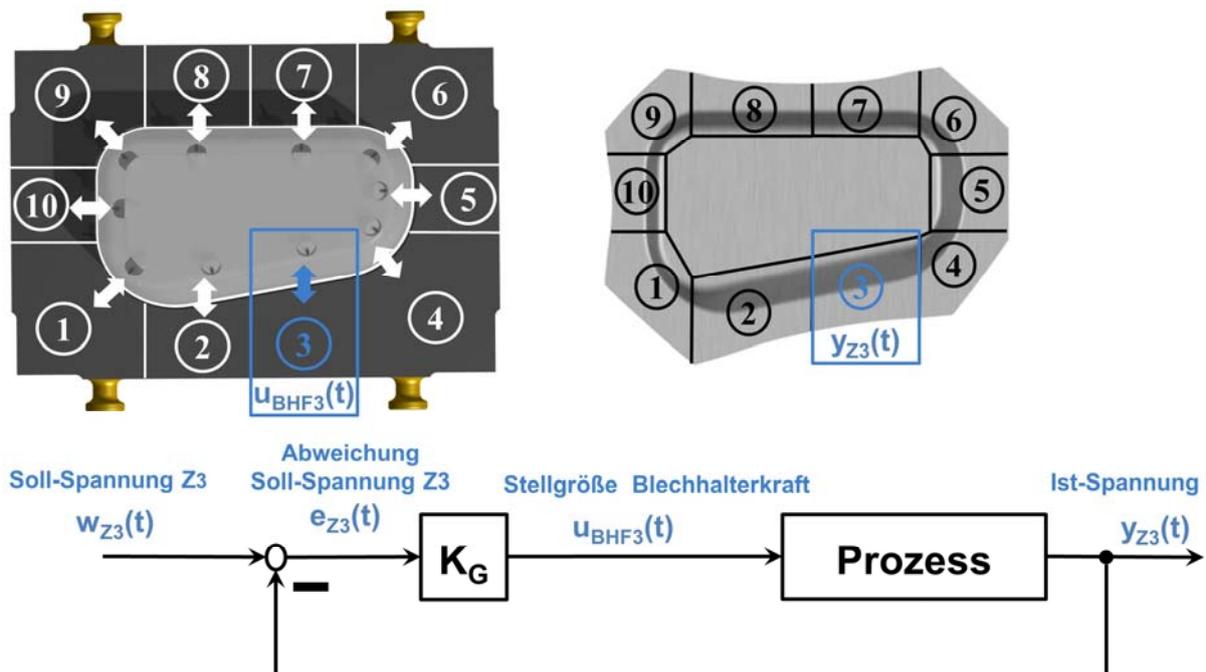


Abbildung 62: Darstellung der Zuordnung der Bauteilzonen und Blechhalterzonen sowie ein Blockschaltbild eines beispielhaften Regelkreises für Bauteilzone und Blechhaltersegment 3.

Durch dieses Vorgehen kann die starke Verkopplung des geregelten Systems zwar nicht unterdrückt werden, jedoch existiert für Systeme, für die keine Zustandsraumdarstellung erstellt werden kann, kein Verfahren, um diese Verkopplung auszulösen. Infolgedessen ist die einzige Möglichkeit, um diesen Effekt teilweise zu unterdrücken, die Wahl einer sehr hohen Regel-  
frequenz [Lun14].

## 7.7 Berechnung der Solltrajektorien für den Tiefziehprozess

Zur Approximation, manchmal auch Metamodell genannt, des Tiefziehprozesses werden die Solltrajektorien  $w_a(t)$  für alle Bauteilzonen berechnet. Hierbei enthalten diese die gewünschte Sollzargenspannung für jeden Zeitschritt des Umformprozesses. Die Trajektorien der Sollzargenspannung werden in Abhängigkeit von der Ziehtiefe des Tiefziehprozesses erstellt, somit ist die Eindeutigkeit im Prozess sichergestellt. Im verwendeten Versuchswerkzeug ist stets ein Zylinder pro Segment vorhanden. Als Teil der Approximation werden für die Hydraulikzylinder jeweils die Werte für die Vorsteuerung berechnet. Hierbei werden nur konstante Werte und keine Trajektorien verwendet, da dies einerseits zur Validierung des Regelungsansatzes nicht notwendig war und andererseits die Komplexität unnötig erhöht hätte. Es wurde ein Metamodell für den Werkstoff HC340 und für den Werkstoff AA6016 berechnet. Die berechneten Modelle werden später zu Beginn der Experimente mithilfe von Referenzhuben anhand von Gutteilen nachgebessert, um einen guten und optimalen Prozessverlauf zu garantieren.

Dabei ist die berechnete Modellapproximation nicht übertragbar, weder auf andere Werkstoffe noch auf andere Geometrien. Infolgedessen muss für weitere Geometrie oder für weitere Werkstoffe müssen neue Solltrajektorien berechnet werden, um Versuche mit diesem Regelungsansatz durchführen zu können. Die Solltrajektorien können, wenn nötig, während der Benutzung angepasst werden.

### 7.7.1 Die Solltrajektorie und Vorsteuerwerte für den Stahlwerkstoff HC340

Zur Berechnung der Solltrajektorien wurde eine Optimierung mit dem RSM-Algorithmus (vgl. Kapitel 0) vorgenommen, welches im Stochastikprogramm OptiSlang implementiert ist. Dabei wurde der zuvor beschriebene Simulationsablauf angewendet (vgl. Kapitel 7.5). Hierbei wurde mit diesem Ansatz eine optimale Simulation unter der Berücksichtigung der Optimalitätsbedingungen berechnet. Aus dieser optimalen Simulation wurden die jeweiligen Zargenspannungsverläufe, sowie die verwendeten Blechhalterkräfte der einzelnen Segmente als Werte für die Vorsteuerung der Blechhalterkraft extrahiert, welche für den Werkstoff HC340 der Tabelle 8 zu entnehmen sind.

Tabelle 8: Vorsteuerwerte für die Blechhaltersegmente des Segmentelastischen Blechhalters für den Werkstoff HC340.

Werkstoff	HC340									
	Segment	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kraft [kN]	66	112	118	88	75	38	102	106	70	92

Diese Vorsteuerwerte stimmen mit den Annahmen aus der Literatur [Lan02, Sie15, Doe12] überein. Erwartungsgemäß, ist die Blechhalterkraft in den Eckbereichen viel geringer als in den geraden Bauteilabschnitten. Dies ist durch die in den Ecken erhöhte ideelle Umformkraft bedingt, außerdem dickt die Platine in den Ecken relativ stark auf. Dagegen wird in den geraden Bauteilzonen die Rückhaltung der Platine nur durch die Reibung sowie die Blechhalter-

kraft erzeugt. Deshalb ist dort eine erheblich höhere Blechhalterkraft notwendig. In Abbildung 63 sind zwei Solltrajektorien für den Werkstoff HC340 zu sehen, die weiteren Solltrajektorien finden sich im Anhang 10.1 wieder.

Sie repräsentieren das Metamodell für die Tiefziehregelung mit dem Werkstoff HC340 und der vorliegenden KVG. Hierzu wurde eine beispielhafte Trajektorie aus einem Eckbereich der Bauteilzone 9 sowie eine beispielhafte Solltrajektorie der geraden Bauteilzone 7 ausgewählt. Dabei ist im dargestellten Eckbereich die Zargenspannung erheblich höher als die Zargenspannung im geraden Bereich. Dies kann mit den oben beschriebenen Effekten bei der Rückhaltung erklärt werden. Zusätzlich ist die Zargenspannung in Bauteilzonen mit starker Rückhaltung höher als in Bereichen mit schwächerer Rückhaltung, wobei dies den theoretischen Erkenntnissen bzgl. der Technischen Mechanik entspricht, da die Zargenspannung eine Reaktionskraft auf die Rückhaltung im Prozess ist. Gerade die Zargenspannung in dem gezeigten Eckbereich ist sehr hoch, was mit den Ergebnissen der FEM-Untersuchungen des Bauteils übereinstimmt, welche eine sehr hohe Ausdünnung für Bauteilzone 9 voraussagen, mithin die höchste für das gesamte Bauteil.

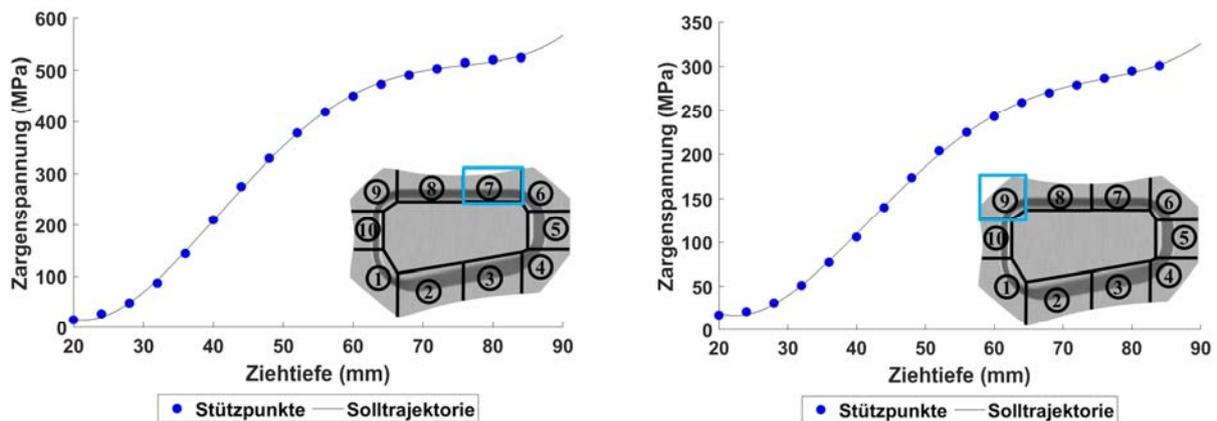


Abbildung 63: Simulativ ermittelte und im Experiment kalibrierte Solltrajektorien des Tiefziehprozesses für Bauteilzone 7 (links) und Bauteilzone 9 (rechts) für den Werkstoff HC340.

Die berechneten Solltrajektorien bilden die Führungsgröße  $w_a(t)$  des Regelkreises. Ihr folgt die Regelung der Zargenspannung während des Prozesses. Infolgedessen wird die Blechhalterkraft in dem zugeordneten Blechhaltersegment erhöht, sollte die Soll-Zargenspannung in einer Bauteilzone unterschritten werden. Analog hierzu wird bei Überschreitung der Soll-Zargenspannung die Blechhalterkraft verringert.

### 7.7.2 Die Solltrajektorie und Vorsteuerwerte für den Aluminiumwerkstoff AA6016

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben und für den Werkstoff HC340 angewendet, werden nun mit derselben Methodik die Solltrajektorien für den Aluminiumwerkstoff AA6016 erstellt. Dieses weitere Metamodell ist notwendig, da die Metamodelle spezifisch für jeden Werkstoff und jede Geometrie berechnet werden und nicht übertragbar sind. Die Mate-

rialkennwerte des Werkstoffs, welche zur Simulation verwendet wurden, sind im Anhang 10.2 hinterlegt. In Tabelle 9 sind die Werte für die Vorsteuerung unter Verwendung des Werkstoffs AA6016 hinterlegt, welche mit der Methodik berechnet wurden. Die Vorsteuerwerte sind quantitativ betrachtet kleiner als die bei der Verwendung des Stahlwerkstoffs HC340. Dies war so zu erwarten, da Aluminiumwerkstoffe geringere Blechhalterkräfte benötigen [Lan02]. Das Verteilungsverhältnis der Vorsteuerwerte ist jedoch übereinstimmend mit den Werten, die für den Werkstoff HC340 ermittelt wurden. Dies ist damit zu erklären, dass diese Vorsteuerwerte zwar für verschiedene Werkstoffe, aber für dieselbe Geometrie ermittelt wurden.

Tabelle 9: Vorsteuerwerte für die Blechhaltersegmente des Segmentelastischen Blechhalters für den Werkstoff AA6016.

Werkstoff	AA6016									
Segment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kraft [kN]	23	98	103	49	47	31	122	102	12	48

In Abbildung 64 sind ausgewählte Solltrajektorien dargestellt, welche die Approximation des Modells für den Werkstoff AA6016 repräsentieren. Es werden die Darstellung der Solltrajektorien für dieselben Bauteilzonen wie bei der Verwendung des Werkstoffs HC340 ausgewählt, um eine Vergleichbarkeit der Solltrajektorien zu gewährleisten. Dabei ist erkennbar, dass die Zargenspannungen beim Aluminiumwerkstoff im Vergleich zum Stahlwerkstoff geringer ausfallen. Die qualitativen Verläufe stimmen jedoch zwischen den beiden Werkstoffen überein. Die geringere Höhe der Zargenspannung beim Aluminiumwerkstoff kann auf die geringere Festigkeit des Werkstoffs zurückgeführt werden.

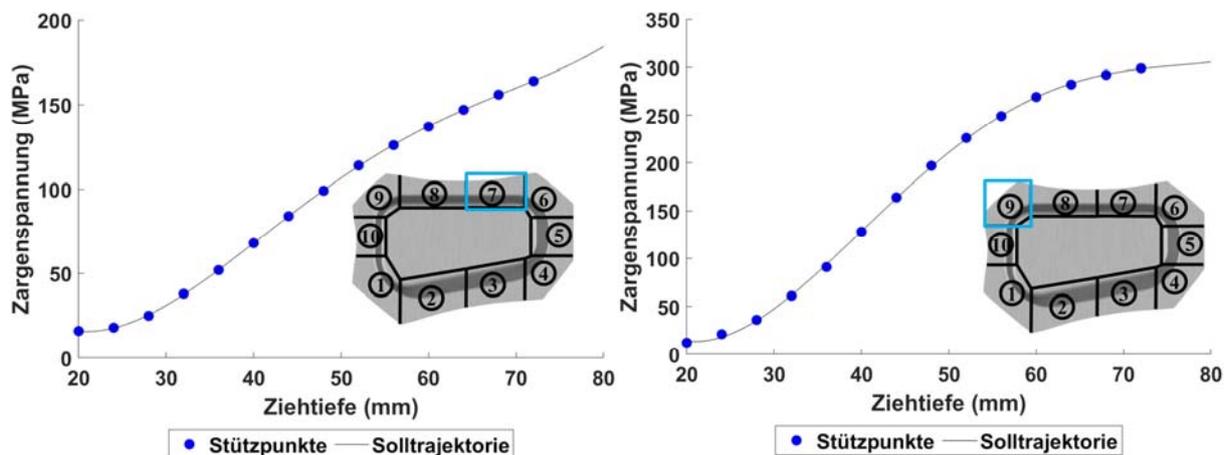


Abbildung 64: Simulativ ermittelte und im Experiment kalibrierte Solltrajektorien des Tiefziehprozesses für Bauteilzone 7 (links) und Bauteilzone 9 (rechts) für den Werkstoff AA6016.

Nachdem die Solltrajektorien mithilfe der Simulation grob bestimmt wurden, werden sie später zu Beginn der Experimente mithilfe von Referenzhuben anhand von Gutteilen nachgebessert.

## 8 Anwendung des neuartigen Regelungsansatz im Realprozess

Nach dem Entwurf der Regelung, der Erstellung des Metamodells sowie der Implementierung der Regelung in die Steuerungshardware und deren Inbetriebnahme, folgt nun die Erprobung der Regelung im umformtechnischen Einsatz. In Kapitel 6 wurden die Erprobung der Regelung und die Einstellung der Reglerwerte vorgestellt sowie die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Regelung nachgewiesen. Im Folgenden wird die Fähigkeit der Regelung zur Unterdrückung von Fehlern im realen Umformprozess, wie beispielsweise das Auftreten von Reißen und Falten, untersucht.

Dazu werden gezielt verschiedene Störungen in den Umformprozess eingebracht, bspw. Schwankungen bei der Schmierung des Bauteils oder der Positionierung der Platine im Werkzeug. Hierbei werden die Reaktionen der Regelung auf diese Störungen auf quantitativer Ebene sowie auf Signalebene analysiert, wodurch eine genaue Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Regelung ermöglicht wird. Im Fall der Fehlpositionierung der Platine wird zusätzlich eine genaue Vergleichsanalyse zwischen konventionellem und geregelter Tiefziehprozess mithilfe sogenannter Robustheitsdiagramme durchgeführt, welche eigens für diesen Zweck entworfen wurden.

In einem weiteren Schritt wird nachgewiesen, dass mithilfe der Zargenspannung Fehlteile detektiert werden können und mit dieser Zustandsgröße eine neue Möglichkeit der Qualitätssicherung im Presswerk zur Verfügung steht. Abschließend wird in einem letzten Schritt ein Abgleich von Realbauteilen mit der Simulation auf Basis einer Formänderungsanalyse durchgeführt, was der Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Metamodellansatzes zur modellbasierten Regelung dient.

Zum Nachweis der gesteigerten Prozessrobustheit durch den Einsatz der Regelung, werden verschiedene Umformparameter bewusst und definiert verändert, um eine Prozessstörung nachzubilden. Hierbei konnten bis auf die Alterung des Aluminiumblechs keinerlei Werkstoffkenngrößen verändert werden, da es hierbei kaum Möglichkeiten gibt, definierte und reproduzierbare Veränderungen an Werkstoffeigenschaften vorzunehmen. Deshalb wurde das Augenmerk auf die Prozessgrößen gelegt, bei denen eine reproduzierbare Variation der Parameter möglich ist. Mit Ausnahme der Versuche bzgl. veränderter Bauteilschmierung wurden alle weiteren Versuche ohne Schmierstoff durchgeführt. Damit sollte eine mögliche Verfälschung der Ergebnisse aufgrund eines besonders leistungsfähigen Schmierstoffs sowie abweichende Versuchsbedingungen auf Grund unregelmäßigen Schmierstoffauftrags verhindert werden. Es wurden für die zwei zu untersuchenden Werkstoffe HC340 sowie AA6016 entsprechende Versuchspläne erstellt. Die Versuchspläne der beiden Werkstoffe unterscheiden sich in ihrem Umfang. Hierbei wurde bei den Untersuchungen mit dem Stahlwerkstoff auch die Veränderung der Walzrichtung untersucht, bei Aluminium wurde aufgrund der höheren Relevanz die Alterung des Werkstoffs berücksichtigt. Jede einzelne Versuchsstufe im Versuchsplan wurde jeweils dreimal wiederholt und dessen Durchschnitt als Ergebniswert definiert. Dadurch wird eine statistische Absicherung der Ergebnisse erreicht und der Einfluss singulärer Fehler bei der Versuchsdurchführung minimiert.

Zu Beginn der Versuchsreihen wurde zur Gewährleistung einer sauberen und wissenschaftlichen Bearbeitung zunächst ein Arbeitsdiagramm des Tiefziehens für die jeweils verwendeten Werkstoffe erstellt. Somit wurde der optimale Arbeitspunkt bzgl. der Ziehtiefe in Abhängigkeit von der Blechhalterkraft bestimmt. Dazu wurden mit verschiedenen Blechhalterkräften Versuche mit den jeweiligen Werkstoffen durchgeführt und die erreichten Ziehtiefen in einem Ziehtiefe-Blechhalterkraft-Diagramm notiert. Die somit erhaltenen Diagramme stellen den Arbeitsbereich für die vorliegende Versuchsgeometrie KVG beim Tiefziehen dar. Dies stellt sicher, dass die Versuche bei konventioneller Prozessführung mit der optimalen Blechhalterkraft für den jeweils verwendeten Werkstoff und die vorliegende Versuchsgeometrie durchgeführt werden. Dadurch wird das optimal mögliche Ergebnis mit dem konventionellen Blechhalter erreicht und somit sichergestellt, dass das bestmögliche Prozessergebnis der konventionellen Prozessführung mit dem geregelten Prozess verglichen wird. Die erhaltenen Arbeitsdiagramme stimmen mit denen von [Bar16a] überein, in dieser Arbeit wurden mit denselben Werkstoffen und derselben Bauteilgeometrie Arbeitsdiagramme für das Tiefziehen erstellt. Die aus den Versuchen ermittelten Arbeitsdiagramme sind in Abbildung 65 dargestellt.

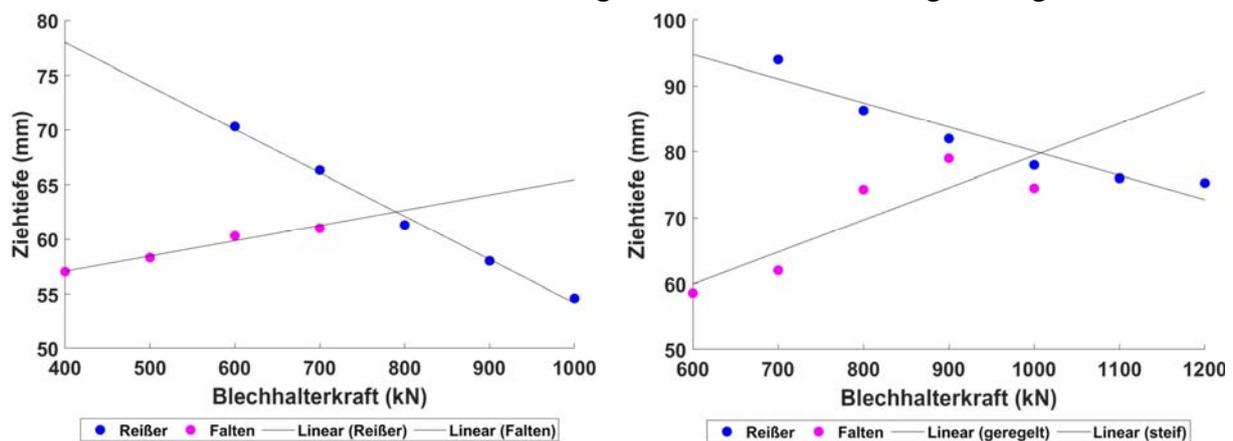


Abbildung 65: Arbeitsdiagramme der verwendeten Versuchswerkstoffe HC340 (rechts) und AA6016 (links) zur Bestimmung der optimalen Blechhalterkraft.

Auf Basis der ermittelten Arbeitspunkte wurden im Diagramm Näherungsgeraden bestimmt, deren Schnittpunkt die optimale Blechhalterkraft bzgl. der Erreichung der maximalen Ziehtiefe beschreibt. Hierbei beträgt die optimale Blechhalterkraft beim Werkstoff AA6016 800 kN und beim Werkstoff HC340 1.000 kN. Infolgedessen wurden die mit den Arbeitsdiagrammen bestimmten optimalen Blechhalterkräfte bei den folgenden Versuchen, zum Vergleich zwischen konventionellem Prozess und geregeltem Prozess, als Blechhalterkraft beim konventionellen Prozess verwendet.

### 8.1 Versuchsplanung zur Untersuchung der Unterdrückung von Prozessstörungen durch Einsatz des neuen Regelungsansatzes

Zunächst wurde die Robustheitssteigerung durch den Einsatz der neuen Regelung und unter Verwendung des Stahlwerkstoffs HC340 untersucht. Hierzu wurde der Versuchsplan, welcher in Tabelle 10 zu sehen ist, aufgestellt. Zunächst wurde die Schmierung variiert, wobei die

Parameter der Regelung als auch das Metamodell für eine Prozessführung mit trockener Platine berechnet wurden. Deshalb ist eine Umformung mit Schmierstoff in diesem Fall als Prozessstörung zu werten. Es wurde der Schmierstoff M-100 der Firma Oest mit einer Verteilung von ca.  $1 \text{ g/m}^2$  gewählt. Dieser Schmierstoff wurde ausgewählt, da seine Eignung für wissenschaftliche Untersuchung aus früheren Projekten bekannt ist und er einfach dosiert und angewendet werden kann. Als weiterer zu untersuchender Faktor wurden unterschiedliche Platinenfehlagen untersucht. Hierbei ist die angenommene optimale Platinenlage im Werkzeug die von [Häu02] festgelegte und auch von [Bla12] verwendete Platinenposition im Werkzeug. Aus dieser Nulllage heraus wurde die Platine in der Hochachse (die Hochachse des Bauteils läuft mittig durch die beiden langen Bauteilseiten, Koordinatensystem in Abbildung 66 dargestellt) des Bauteils nach oben und unten verschoben. Es wurde dabei eine Schrittweite von 5 mm gewählt, wobei die maximale Verschiebung auf  $\pm 15 \text{ mm}$  festgelegt wurde. Dadurch sollte in einem späteren Schritt die detailliertere bzw. tendenzielle Betrachtung der Störungsentwicklung ermöglicht werden. Als weitere Prozessstörung wurde der Platinenfehlbeschnitt untersucht. Dabei wurde die Platine entlang des Umfangs, um 15 mm orthogonal größer sowie um 15 mm orthogonal kleiner beschnitten als die nominale Platinengeometrie, welche bei den anderen Versuchen verwendet wurde. Damit wird die Reaktion der Regelung auf mögliche Platinenfehlbeschnitte im Realprozess untersucht. Bei den Versuchen mit dem Stahlwerkstoff wurde im Gegensatz zu denen mit dem Aluminiumwerkstoff die Walzrichtung als weiterer Faktor untersucht, wobei  $0^\circ$  zur Walzrichtung die Normalrichtung bei allen Versuchen darstellt und  $90^\circ$  zur Walzrichtung die Prozessstörung darstellt. Bei Platinenfehlbeschnitt sowie bei Änderung der Walzrichtung wurde aus praktikabilitätsgründen nur eine bzw. zwei Versuchsstufen realisiert.

Tabelle 10: Versuchsplanung für den Werkstoff HC340 zur Überprüfung der Robustheit der entwickelten Regelung im Realprozess.

Parameter	1. Versuchsstufe	2. Versuchsstufe	3. Versuchsstufe
<b>Schmierung</b>	$1 \text{ g/m}^2$	$0 \text{ g/m}^2$	
<b>Fehllage oben</b>	5 mm	10 mm	15 mm
<b>Fehllage unten</b>	-5 mm	-10 mm	-15 mm
<b>Platine zu groß</b>	15 mm	-	-
<b>Platine zu klein</b>	-15 mm	-	-
<b>Walzrichtung</b>	$0^\circ$ zur WZR	$90^\circ$ zur WZR	-

Für den Aluminiumwerkstoff AA6016 wurde der Versuchsplan von den Untersuchungen mit dem Stahlwerkstoff übernommen, wobei der Faktor ‚Walzrichtung‘ durch den Faktor ‚Werkstoffalterung‘ ersetzt wurde. Beim Faktor Werkstoffalterung wurde als Störung Aluminium AA6016 mit dem Alter von eineinhalb Jahren verwendet. Die Blechdicke aller Versuchsplatinen beträgt  $s_0 = 1 \text{ mm}$ . Des Weiteren stimmen die Versuchsdurchführungen beim Aluminiumwerkstoff mit denen beim Stahlwerkstoff überein und werden an dieser Stelle daher nicht

nochmals beschrieben. Der Versuchsplan bzgl. des Aluminiumwerkstoffs AA6016 ist in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Verwendete Versuchsplanung für den Werkstoff AA6016 zur Überprüfung der Steigerung der Robustheit.

Parameter	1. Versuchsstufe	2. Versuchsstufe	3. Versuchsstufe
Schmierung	1 g/m <sup>2</sup>	0 g/m <sup>2</sup>	-
Fehllage oben	5 mm	10 mm	15 mm
Fehllage unten	-5 mm	-10 mm	-15 mm
Platine zu groß	15 mm	-	-
Platine zu klein	-15 mm	-	-
Alterung	Neu	Alt	-

## 8.2 Untersuchung der Auswirkung von Platinenfehllagen auf den geregelten Prozess

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen wird die Prozessstörung ‚Platinenfehllage‘ detailliert bewertet. Dabei wird diese Größe ausgewählt, da sie sich sehr gut für eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen der Prozessstörung auf das Tiefziehen eignet, denn sie kann reproduzierbar verändert werden. Hierzu wurde, wie bereits in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellt, ein insgesamt sechsstufiger Versuchsplan für jeden verwendeten Werkstoff durchgeführt. Hieraus kann ein Graph über den Verlauf der Störungsentwicklung abgeleitet werden. In Abbildung 66 ist die Entwicklung der Störung eine Fehllage der Platine in einer Richtung von  $\pm 15$  mm der Fehllage abweichend von der optimalen Platinenlage dargestellt.

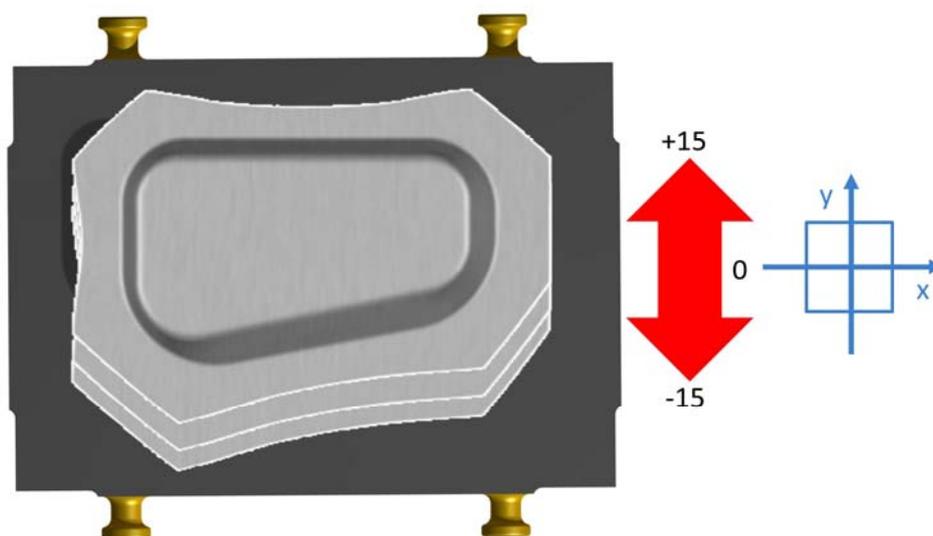


Abbildung 66: Schematische Darstellung untersuchter Fehllagen der Platine sowie das lokale Koordinatensystem bei den Untersuchungen.

Aus dieser Untersuchung können Erkenntnisse über die Störungsunterdrückung, sowie über das Verhalten des Regelungsansatzes gegenüber sich verändernden Prozessstörungen abgelei-

tet werden. Diese Untersuchung wird jeweils für den Stahlwerkstoff HC340 und den Aluminiumwerkstoff AA6016 durchgeführt. Dadurch wird der Einfluss verschiedener Werkstoffe auf die Reaktion der Regelung unter verschieden starken Störungen abgebildet.

### 8.2.1 Entwicklung eines neuartigen Robustheitsdiagramms

Für die Beurteilung der Robustheitssteigerung bzw. für das Robustheitsverhalten des entwickelten Regelungsansatzes unter sich verändernden Störungen wird eine neue Art von Diagrammen notwendig. Dazu wurde für diese Untersuchung das nachfolgende Robustheitsdiagramm entwickelt und herangezogen, da das klassische Arbeitsdiagramm zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der Prozesse in dem vorliegenden Fall nicht verwendet werden kann. Dies begründet sich durch die bei einem geregelten Prozess mit der vorliegenden Regelung sich verändernde Blechhalterkraft während des Tiefziehhubs. Es kann somit kein gemeinsamer Arbeitspunkt mit dem konventionellen Tiefziehprozess ermittelt werden, welcher zum Vergleich beider Prozesse mit Hilfe der klassischen Arbeitsdiagramme notwendig wäre. Zudem ist die Reaktion des geregelten Prozesses sowie des konventionellen Prozesses auf die Störungsentwicklung von größerem Interesse. Mithilfe von Robustheitsdiagrammen kann die Resilienz des geregelten sowie des konventionellen Tiefziehprozesses gegenüber Störungsentwicklungen miteinander verglichen werden. Um diese Untersuchungen zu erleichtern bzw. zu veranschaulichen, wurde die Idee der Robustheitsdiagramme entwickelt. Beispielhaft ist eine schematische Darstellung eines Robustheitsdiagramms in Abbildung 67 dargestellt.

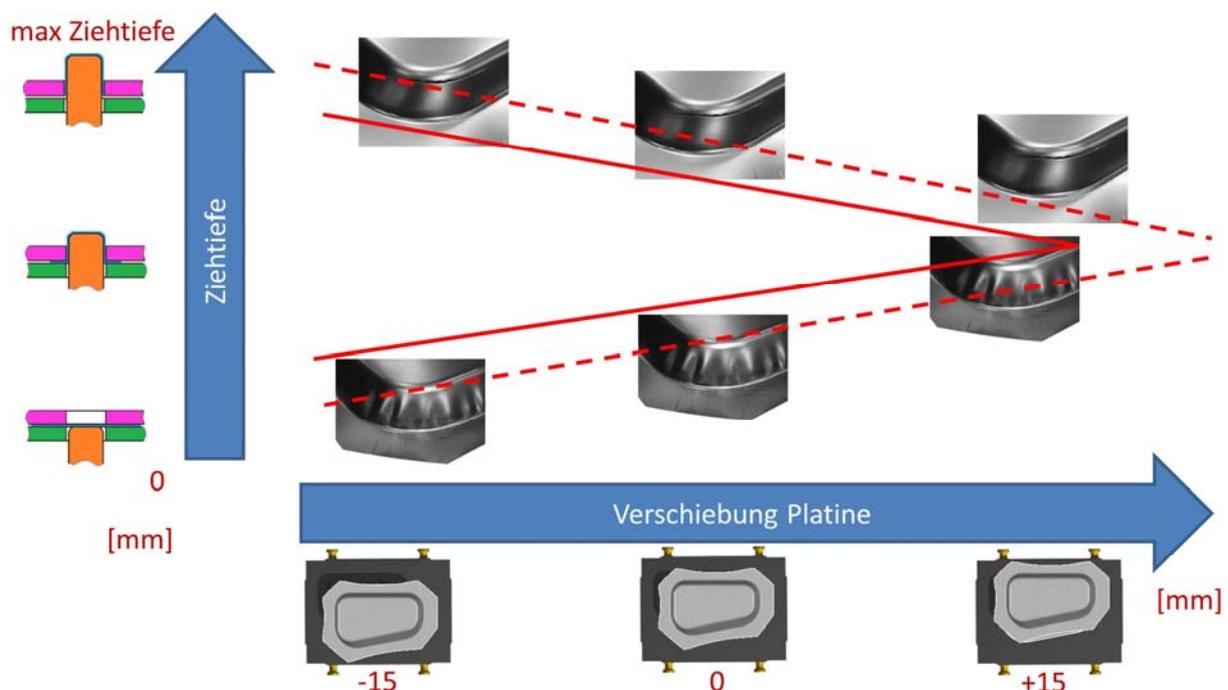


Abbildung 67: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Robustheitsdiagramms.

In diesen Robustheitsdiagrammen wird die Ziehtiefe, welche bei einem Arbeitspunkt erreicht wurde, gegen die Stärke der Störung an diesem Arbeitspunkt in dem Robustheitsdiagramm

aufgetragen. Somit wird die Robustheit des geregelten Prozesses mit der Robustheit des konventionellen Prozesses für eine Störungsart grafisch vergleichbar. Dabei werden die Versuche zu den einzelnen Arbeitspunkten jeweils dreimal durchgeführt und der Durchschnitt im Diagramm eingetragen, um eine statistische Absicherung der Ergebnisse zu gewährleisten. Hierzu werden für jede dieser Störungen zwei Arbeitspunkte bestimmt, einer für das Auftreten von Falten und einer für das Auftreten von Reißen.

Dies ist infolge der verwendeten Versuchsgeometrie möglich, da die sensitiven Zonen für das Auftreten von Falten und Reißen örtlich klar voneinander abgegrenzt sind. Trotzdem muss vorab die allgemeine Annahme getroffen werden, dass auftretende Reiße oder Falten einander nicht beeinflussen. Des Weiteren wurde die Ziehtiefe als Bezugsgröße aufgrund der einfachen Bestimmbarkeit sowie der Relevanz als Prozessgröße für den Tiefziehprozess gewählt. Zusätzlich kann die Ziehtiefe als Zielgröße für jede andere Bauteilgeometrie angewendet werden und kann auch dort zum Robustheitsvergleich zwischen geregeltem und konventionellem Prozess herangezogen werden. Das Layout der Robustheitsdiagramme weicht stark von dem des Arbeitsdiagramms des Tiefziehens ab. Infolge des Aufbaus dieser Robustheitsdiagramme können sich im Gegensatz zum Arbeitsdiagramm des Tiefziehens die Näherungsgeraden des konventionellen und des geregelten Prozesses bzgl. der Störungsentwicklung nicht treffen. Außerdem wirkt sich eine veränderte Störung unterschiedlich auf die Ziehtiefe aus als dies eine veränderte Blechhalterkraft tut.

## 8.2.2 Positiver Einfluss der Regelung auf die Reißergrenze

Zunächst wird das Robustheitsdiagramm bzgl. Reißen für jeden der beiden zu untersuchenden Werkstoffe erstellt. In Abbildung 68 ist jeweils ein Robustheitsdiagramm für den Stahlwerkstoff HC340 und für den Aluminiumwerkstoff AA6016 bzgl. dem Auftreten von Reißen zu sehen.

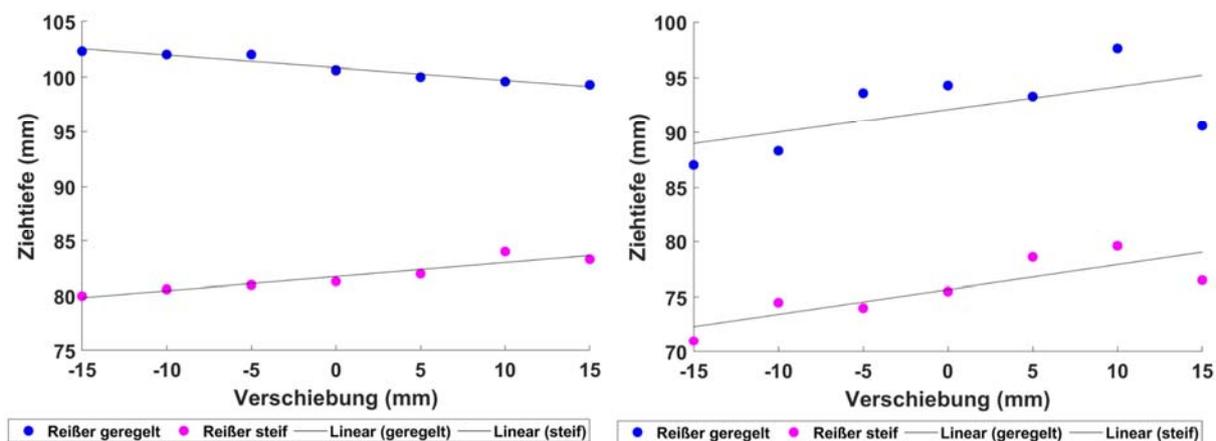


Abbildung 68: Robustheitsdiagramme bzgl. Reißen für die Werkstoffe HC340 (links) und AA6016 (rechts) für die Untersuchung des Einflusses der Verschiebung der regulären Platine um  $\pm 15$  mm.

Hierbei ist in den Diagrammen deutlich zu sehen, dass die Reiße beim geregelten Prozess erheblich später im Prozess bzw. bei einer erheblich höheren Ziehtiefe auftreten als bei kon-

ventioneller Prozessführung. Diese Entwicklung zeichnet sich bei beiden Werkstoffen gleichermaßen ab. Im Durchschnitt ergibt sich beim Stahlwerkstoff eine Erhöhung der Ziehtiefe um 19 mm, beim Aluminiumwerkstoff um 16 mm mit Verwendung der neuartigen Regelung. Dies bedeutet, dass Reißer im geregelten Prozess im Schnitt 19 mm bzw. 16 mm später auftreten als beim konventionellen Prozess.

Des Weiteren ist die Steigung der Näherungsgeraden bei den geregelten Prozessen erheblich geringer bzw. die Schwankung der Ziehtiefe in Abhängigkeit von der induzierten Störung deutlich kleiner. Die Ergebnisse zeigen eindeutig die geringere Sensitivität des geregelten Prozesses gegenüber Störungen als dies beim konventionellen Prozess der Fall ist. Die Steigung der Näherungsgeraden bzgl. der Ziehtiefe beim Stahlwerkstoff beträgt beim konventionellen Prozess in den hier betrachteten Grenzen 6 mm und beim geregelten Prozess 3 mm auf die gesamte Schwankungsbreite der Platinenverschiebung. Beim Aluminiumwerkstoff schwankt die Ziehtiefe bei den verschiedenen starken Fehllagen beim konventionellen Prozess um 11 mm, beim geregelten Prozess beträgt diese Schwankung lediglich 7 mm bzgl. der verschiedenen Fehllagen der Platine. Die allgemeine Schwankung der Ziehtiefe bzgl. verschieden starker Fehllagen ist beim Aluminiumwerkstoff höher als beim Stahlwerkstoff, dies ist mit dem reduzierten Formänderungsvermögens des Aluminiums zu erklären [Lan02].

### 8.2.3 Positiver Einfluss der Regelung auf die Faltengrenze

In einem weiteren Schritt wurde das Auftreten von Falten bei verschiedenen starken Platinenfehlagen unter Verwendung von Robustheitsdiagrammen betrachtet. Diese Versuche wurden übereinstimmend mit den Untersuchungen bzgl. des Auftretens von Reißern vorgenommen. Es gelten hierbei dieselben Einschränkungen, wie sie bereits in der Diskussion Robustheitsdiagramme bzgl. des Auftretens von Reißern erläutert wurden.

Hierbei zeigen sich die Ergebnisse bzgl. der Faltenentwicklung analog zu denen der Reißerentwicklung. Sie unterscheiden sich lediglich in ihren Absolutwerten. Dabei erreicht der geregelte Prozess im Schnitt eine um 15 mm höhere Ziehtiefe unter Verwendung des Stahlwerkstoffs und eine Ziehtiefenerhöhung von 8 mm bei Verwendung des Aluminiumwerkstoffs. Des Weiteren sind die Steigungen der Näherungsgeraden beim geregelten Prozess für beide Werkstoffe geringer als dies beim konventionellen Prozess der Fall ist. Daraus resultierend sind auch die Schwankungsbreiten bei der erzielten Ziehtiefe geringer. Dabei liegen die Schwankungsbreiten beim Stahl für den geregelten Prozess bei 2 mm und für den konventionellen Prozess bei 4 mm. Beim Aluminiumwerkstoff liegt die Schwankungsbreite der Ziehtiefe für den konventionellen Prozess bei 6 mm und für den geregelten Prozess bei 5 mm, wobei der Wert beim geregelten Prozess durch einen Ausreißer bedingt ist, welcher für sich allein etwa 40 % der Schwankung verursacht. Bei einer um diesen Ausreißer bereinigten Schwankungsbreite der Ziehtiefe liegt die Schwankung für den Aluminiumwerkstoff bei lediglich 3 mm. In Abbildung 69 sind die Robustheitsdiagramme bzgl. des Auftretens von Falten bei Platinenfehllage für die Werkstoffe HC340 und AA6016 dargestellt.

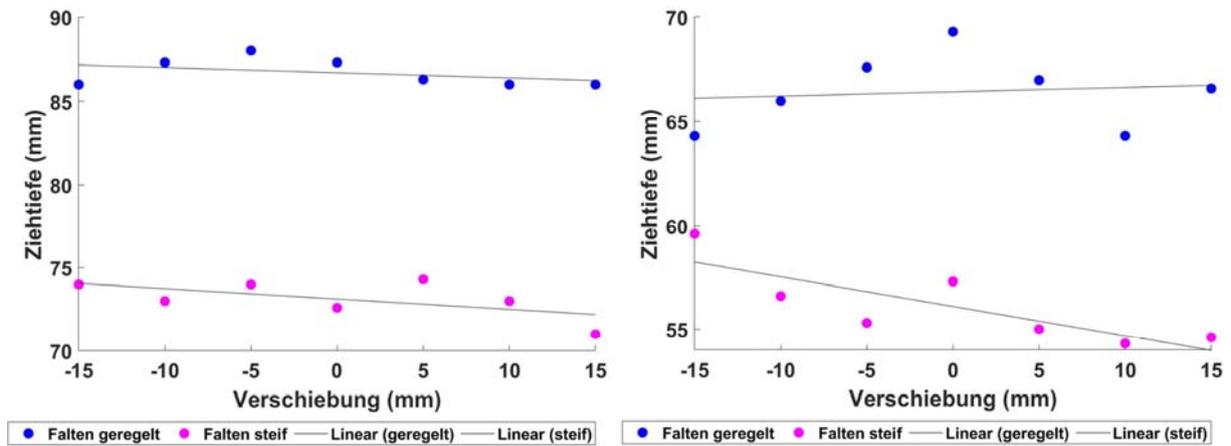


Abbildung 69: Robustheitsdiagramme bzgl. Falten für die Werkstoffe HC340 (links) und AA6016 (rechts) für die Untersuchung des Einflusses der Verschiebung der regulären Platine um  $\pm 15$  mm.

In der abschließenden Betrachtung der „Prozessrobustheit“ bzw. „Störungsunterdrückung“ mittels der dargestellten Robustheitsdiagramme zeigt sich eindeutig, dass durch den Einsatz der neuartigen Regelung die Robustheit bzgl. Prozessstörungen deutlich erhöht werden konnte. Dabei wird die Ziehtiefe durch die Verwendung der Regelung stark gesteigert und es erhöht sich zudem die Robustheit gegenüber von Störungen, was sich aus der geringen Streubreite bei der Ziehtiefe für verschiedene Störungen ablesen lässt. Ebenso ist bemerkenswert, dass selbst beim Auftreten einer Störung die Ziehtiefe beim geregelten Prozess lediglich moderat abnimmt und nur etwas geringer ausfällt, als dies die Stärke der Störung erwarten ließe. Dies allein ist ein Beweis für die Validität des gewählten und implementierten Regelungsansatzes. In allen untersuchten Kategorien schneidet der konventionelle Prozess erheblich schlechter ab.

### 8.3 Verhalten der Regelung auf Signalebene bei Platinenfehlagen

Um das Verhalten der Regelung besser analysieren bzw. nachvollziehen sowie die Regelungsqualität beurteilen zu können, werden die Signalverläufe des Regelkreises im Prozess betrachtet. Hierbei wird die Wechselwirkung zwischen gemessener Abweichung im Zargenspannungssignal, welches durch die Störung des Prozesses verursacht wird, und der daraus folgenden Entwicklung des Stellgrößensignals, nämlich der Blechhalterkraft, untersucht. Die Betrachtung der Signalverläufe der Zargenspannung ist dabei von wesentlicher Bedeutung, da sich daraus einerseits die Qualität der Metamodellbildung und andererseits die Qualität des Systems und dessen Fähigkeit anhand der Zargenspannung Abweichungen abzubilden, beurteilen lassen. Des Weiteren wird mit der Analyse der Stellgröße die Reaktion des Regelkreises begutachtet. Hierbei gilt es zu prüfen, inwieweit die Regelung nachvollziehbar richtig und in angemessener Stärke auf die auftretende Störung reagiert und ob dies in ausreichender Geschwindigkeit erfolgt. Die in den vorherigen Kapiteln in den Prozess eingebrachten und untersuchten Störungen werden nun bzgl. ihrer Signalverläufe analysiert. Beginnend mit den Versuchen zur Platinenfehlage, fortgesetzt mit dem Platinenfehlbeschnitt sowie abschließend die

Versuche mit abweichender Schmierung. Bei der Betrachtung der Signalverläufe wird im Rahmen dieser Untersuchungen das Augenmerk auf die Bauteilzonen 2, 3, 7 und 8 gelegt. Diese Fokussierung auf einige ausgewählte Bauteilzonen ist aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse notwendig.

In Abbildung 70 sind die Kräfte des Hydraulikzylinders 3 sowie die Zargenspannung in Bauteilzone 3 bei allen untersuchten Platinenfehlagen und unter konventioneller Prozessführung mit dem Werkstoff HC340 dargestellt. Die Signalverläufe der Blechhalterkraft in Segment 3 zeigen ein stationäres Verhalten in der Höhe des gewünschten Soll-Wertes der Blechhalterkraft von 100kN. Hierbei sind keinerlei Abweichungen vom gewünschten Soll-Wert zu sehen, wobei dieses statische Niveau des Blechhalterkraftsignals so zu erwarten ist, da es physikalisch keinerlei Rückkopplungsmöglichkeiten zwischen der Platine und dem Blechhalter gibt. Die Unstetigkeitsstellen im Blechhalterkraftverlauf bei einer Ziehtiefe von 43 mm sind mit einer Ventilschaltung der verwendeten Tiefziehpresse zu erklären. Dieses kurze, jedoch starke Schwanken der Blechhalterkraft schlägt sich in den Zargenspannungssignalen sehr deutlich nieder. Diese Unstetigkeitsstellen sind in vielen Messungen der Zargenspannung zu sehen, jedoch ausschließlich bei den Versuchen mit konventioneller Prozessführung. Hierdurch lässt sich die Leistungsfähigkeit der Zargenspannung als Zustandsgröße für das Tiefziehen gut erkennen. Trotz der Kürze und Intensität der Störung ist sie im Zargenspannungssignal eindeutig erkennbar.

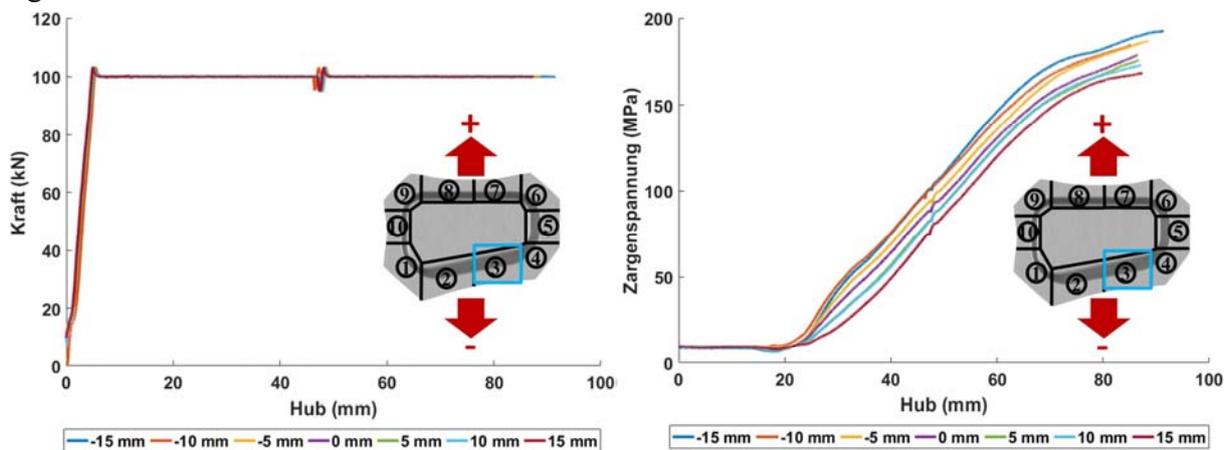


Abbildung 70: Ist-Kraftverläufe des Blechhaltersegments 3 bei verschiedenen Fehllagen (links), sowie Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 3 für verschiedene Platinenfehlagen bei einer konventionellen Prozessführung und unter Verwendung des Werkstoffs HC340.

An den Zargenspannungen ist des Weiteren eindeutig die Wirkung der verschiedenen Platinenfehlagen von -15 mm bis +15 mm in den einzelnen Versuchsstufen zu sehen (Abbildung 70 rechts). Da die Bauteilzone 3 im festgelegten negativen Bereich des Versuchsaufbaus liegt (Abbildung 66), ist die Zargenspannung bei der maximalen Verschiebung in den negativen Bereich am höchsten, da der Bauteilflansch in diesem Fall lokal am größten ist. Die Zargenspannung nimmt mit zunehmender Fehllage nach oben kontinuierlich in jeder einzelnen Versuchsstufe um etwa denselben Betrag ab, was das proportionale Verhalten zwischen Zargen-

spannung und Rückhaltung nochmals unterstreicht. Bei der maximalen Verschiebung in den positiven Bereich des Versuchsaufbaus (Abbildung 66) stellt sich eine minimale Zargenspannung in Bauteilzone 3 ein. Dieses Verhalten spiegelt die Abnahme des Bauteilflansches im Bereich der Bauteilzone 3 wider. Hierdurch wird durch die Verschiebung die Wirkfläche der Blechhalterkraft auf dem Bauteil verringert, wodurch eine Abnahme der Rückhaltung erfolgt. Dabei beträgt die Abnahme von maximaler zu minimaler Zargenspannung bei der Verschiebung der Platine etwa 40 MPa. Zur Überprüfung der Ergebnisse werden die Zargenspannungen auf der gegenüberliegenden Bauteilseite in Bauteilzone 8 für den Werkstoff HC340 ebenfalls betrachtet. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 71 zu sehen.

Die Blechhalterkraft verhält sich im Blechhaltersegment 8, welches der Bauteilzone 8 zugeordnet ist, vergleichbar wie jene im vorher betrachteten Blechhaltersegment 3. Es zeigen sich keinerlei Abweichungen zwischen den Ist-Kräften bei den verschiedenen starken Platinenfehlagen. Die Unstetigkeitsstelle findet sich in Übereinstimmung mit den Ergebnissen im Blechhaltersegment 3 (vgl. Abbildung 70) wieder, sie tritt bei derselben Ziehtiefe sowie in vergleichbarer Stärke auf.

Des Weiteren zeigen die Zargenspannungen in Bauteilzone 8 deutlich die Einflüsse der Platinenfehlage, wie anhand der vorherigen Ergebnisse in Bauteilzone 3 bereits zu erwarten war. Hierbei hat die Zargenspannung in Bauteilzone 8 ihr Maximum über alle verschiedenen Platinenlagen bei maximal positiver Verschiebung der Platine erreicht. Da sich die Bauteilzone 8 auf der als positiv festgelegten Seite des Versuchsaufbaus befindet (Abbildung 66), nimmt der Bauteilflansch mit Zunahme der Platinenverschiebung in positiver Richtung zu und mit ihr die Rückhaltekraft, welche auf die Platine wirkt. Des Weiteren gehen die Veränderungen bei der Zargenspannung in Bauteilzone 8 in betragsmäßig gleichgroßen Schritten vorstatten. Die betragsmäßige Veränderung bei der Zargenspannung verhält sich dementsprechend proportional zur Zu- bzw. Abnahme des Bauteilflanschs. Der Betrag der Zargenspannungsabnahme ist in Bauteilzone 8 höher als in Bauteilzone 3 und beträgt etwa 90 MPa.

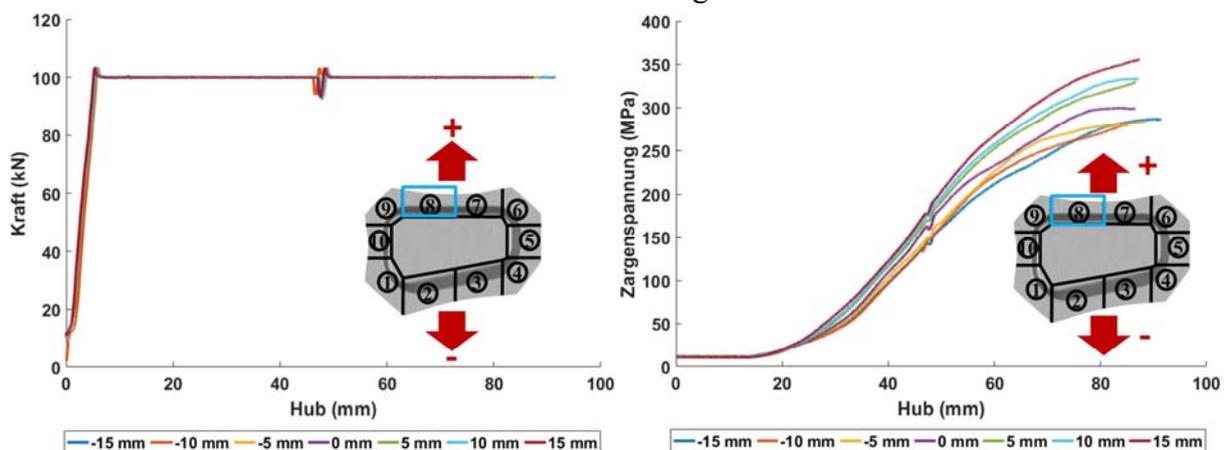


Abbildung 71: Ist-Kraftverläufe des Blechhaltersegments 8 bei verschiedenen Fehllagen der Platine (links), sowie Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 8 für verschiedene Platinenfehlagen bei einer konventionellen Prozessführung unter Verwendung des Werkstoffs HC340.

Die Signalverläufe der Blechhalterkraft sowie die der Zargenspannung im geregelten Prozess unterscheiden sich erheblich von denen einer konventionellen Prozessführung. Es werden zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieselben Bauteilzonen betrachtet wie beim konventionellen Prozess. Die Eingriffe der Regelung in die Blechhalterkraft sind sehr deutlich an der schnell wechselnden Signalstärke erkennbar. In Abbildung 72 sind die Verläufe der Blechhalterkraft in Blechhaltersegment 3 sowie die Signalverläufe der Zargenspannung in Bauteilzone 3 bzgl. der Platinenfehlage dargestellt.

Bei den Verläufen der Blechhalterkräfte ist deutlich zu erkennen, dass die implementierte Regelung individuell eingreift, um der Prozessstörung entgegenzuwirken. Nachdem Anrampen der Zargenspannung auf das gewünschte Soll-Niveau (vgl. Kapitel 6.4.2), wird durch die Regelung aktiv in den Prozess eingegriffen. Die Blechhalterkraft wird als Stellgröße derart angepasst, dass eine möglichst geringe Abweichung der Zargenspannung gegenüber der Soll-Vorgabe vorhanden ist. Es ist vor allem zu Beginn des Prozesses bzw. des regelnden Eingriffs in den Prozess gut zu erkennen, dass die Blechhalterkraft sich proportional zur veränderten Flanschgröße verhält. Je kleiner der Bauteilflansch, desto höher wird die Blechhalterkraft. Mit fortlaufendem Prozess nimmt dieser Effekt bedingt durch die geometrische Veränderung des Bauteils ab, denn diese beeinflusst die Rückhaltung stark [Lan02].

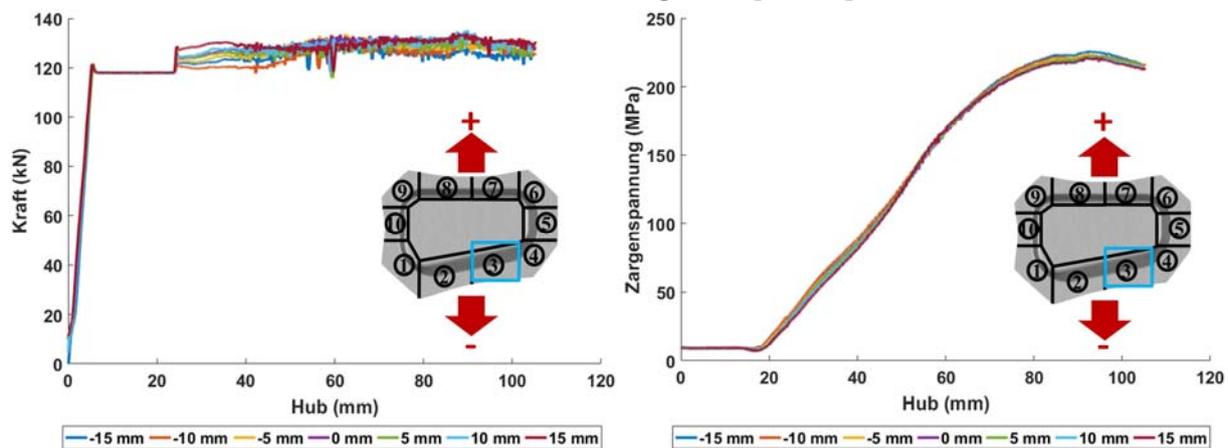


Abbildung 72: Ist-Kraftverläufe des Blechhaltersegments 3 bei verschiedenen Fehllagen (links), sowie Zargenspannungverläufe in Bauteilzone 3 für verschiedene Platinenfehlagen beim geregelten Prozess (rechts).

Die Zargenspannung in Bauteilzone 3 wird von der Regelung trotz schwankender Platinenlage auf quasi demselben Niveau gehalten. Es gibt kaum messbare Abweichungen der verschiedenen Zargenspannungen trotz der relativ starken induzierten Störung. Die Zargenspannungen aller 8 Fehllagen können als eine Kurve mit Rauschen wahrgenommen werden. Sie überlagern sich so stark, dass keine der Kurven einzeln erkennbar ist. Der Ventilschaltvorgang der verwendeten Umformpresse, welcher in den Signalverläufen der Zargenspannung bei den konventionellen Prozessen noch deutlich zu sehen war, ist bei den Zargenspannungverläufen des geregelten Prozesses nicht feststellbar. Diese Störungen werden vom Regler komplett auf ein nicht mehr feststellbares Niveau ausgeglichen. Diese Störung kann jedoch bei den Blechhalterkraftsignalen erkannt werden. Hier ist ein deutlicher Ausschlag der Blechhalterkräfte

(Abbildung 72 links) zu sehen, mit denen diese die Störung ausgleichen. Dies ist deshalb von Interesse, da diese Schaltungsvorgänge sich in Form eines Druckimpulses im Stößelantrieb und in kurzer Zeitdauer mit hoher Amplitude auswirken. Dies ist bei den Analysen des konventionellen Prozesses (Abbildung 70 und Abbildung 71) deutlich zu sehen. Trotz der Kürze und der Stärke dieser Störung ist der Regelkreis in der Lage, diese auszugleichen. Zur Vervollständigung der Signalanalyse bei der Platinenfehlage werden in Abbildung 73 die Signalverläufe in Bauteilzone 8 beim geregelten Prozess für den Werkstoff HC340 betrachtet.

Hierbei zeigt sich ein zu den vorherigen Ergebnissen analoges Bild bzgl. der Signalentwicklung sowie der Signalverläufe. Im Unterschied zum Blechhaltersegment 3 sind die Eingriffe des Reglers auf die Blechhalterkraft deutlicher zu erkennen. Die verschiedenen Blechhalterkraftverläufe weisen deutliche Abweichungen untereinander auf. Jedoch sind die betragsmäßigen Abstände zwischen den einzelnen Kurven vergleichbar groß, wodurch die Verläufe der Blechhalterkraft als proportional zu den auftretenden Störungen im Prozess bezeichnet werden können. Je weiter der Bauteilflansch in Bauteilzone 8 eingezogen wird aufgrund der eingebrachten Fehllagen der Platine, desto stärker wird die Blechhalterkraft in Bauteilzone 8. Dies unterstreicht nochmals die Qualität des entwickelten Regelungsansatz und die Festlegung der Regelgröße dieses Prozesses. Die verursachten Störungen sind nicht nur deutlich am gemessenen Zustandssignal abzulesen, sondern ebenso deutlich am Stellsignal des implementierten Regelkreises erkennbar. Die durch die Ventilschaltung der verwendeten Presse verursachte Unstetigkeitsstelle in der Blechhalterkraft ist hier deutlich zu erkennen, jedoch ausschließlich im Verlauf der Blechhalterkraft und nicht in dem der Zargenspannung. Weiterhin ist diese Unstetigkeit mit entgegengesetzten Vorzeichen erkennbar, um den pressenseitigen Druckimpuls des Stößelantriebs auszugleichen.

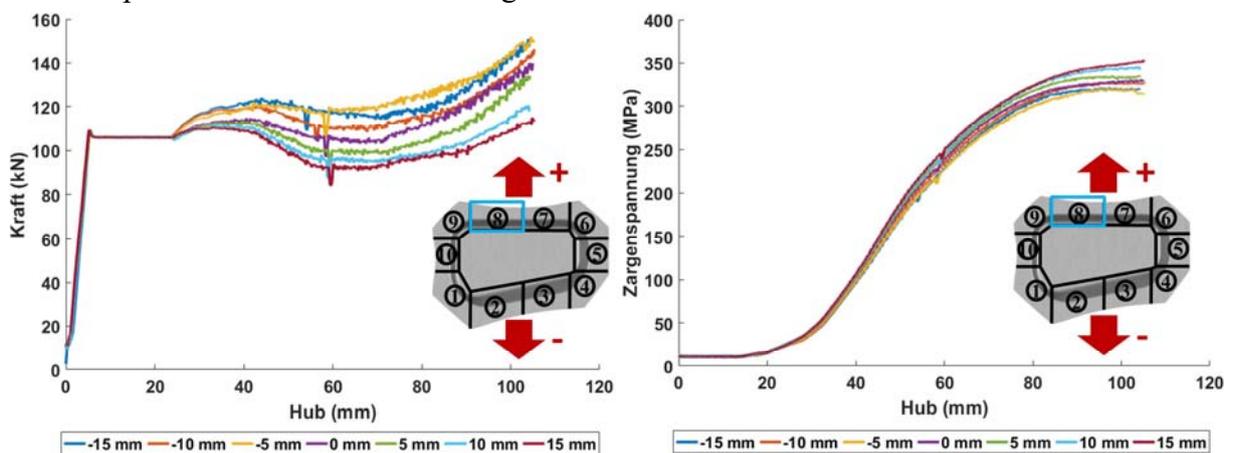


Abbildung 73: Ist-Kraftverläufe des Blechhaltersegments 8 für verschiedene Fehllagen (links), sowie Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 8 für verschiedene Platinenfehlagen unter Verwendung des Werkstoffs HC340 bei einem geregelten Prozess.

Bei den Zargenspannungsverläufen in Bauteilzone 8 ist ein stärkerer Einfluss der Platinenfehlage auf den Signalverlauf wahrnehmbar, als dies in Bauteilzone 3 der Fall ist. Zu Beginn der Umformung überlagern sich die Zargenspannungsverläufe stark, vergleichbar mit den

Verläufen in Bauteilzone 3, jedoch weichen die Zargenspannungsverläufe am Prozessende leicht voneinander ab. Dies ist mit dem zu schmalen Flansch gegen Ende des Prozesses zu erklären. Durch die Platinenverschiebung entsteht eine starke Verringerung der Flanschbreite. Zusätzlich ist Flansch bzw. die Ankonstruktion an dieser Stelle des Bauteils etwas schmaler, sodass er ab einem gewissen Zeitpunkt zu klein ist, um selbst bei höchster Blechhalterkraft noch genügend Rückhaltung zu erzeugen. Die Blechhalterkraft selbst ist begrenzt durch den maximal möglichen Hydraulikdruck in den Hydraulikzylindern. Darüber hinaus kann die Blechhalterkraft in den Segmenten nicht erhöht werden, deshalb kann die Störung nicht komplett ausgegeregelt werden. Die Abweichung der Zargenspannung zwischen Minimum und Maximum ist jedoch mit 20 MPa zum Prozessende hin erheblich geringer als bei der konventionellen Prozessführung. Hier steigt die Abweichung nahezu sprunghaft auf 50 MPa an, um sich dann auf 90 MPa zum Prozessende zu erhöhen (vgl. Abbildung 71).

#### 8.4 Verhalten der Regelung bei fehlerhaftem Bauteilbeschnitt

Zur weiteren Beurteilung des Regelkreises, seiner Regelgröße ‚Zargenspannung‘ und der Regelungsqualität werden die Signalverläufe bei fehlerhaftem Platinenbeschnitt untersucht. Es werden erneut dieselben Bauteilzonen betrachtet wie bei den vorhergehenden Untersuchungen, um eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Hierbei werden bei diesen Versuchsreihen drei Fälle betrachtet: die reguläre Platinengröße, eine Platine mit einer um 15 mm orthogonal größeren Abmessung in Längs- und Querrichtung als die Normalplatine über den gesamten Platinenumfang sowie eine Platine mit einem um 15 mm orthogonal kleinerer Abmessung in Längs- und Querrichtung über den gesamten Platinenumfang.

Zunächst wurden Versuche mit konventioneller Prozessführung durchgeführt, um die Auswirkung der Störung bei einem konventionellen Prozess, zu zeigen. Dabei wurden die fehlerbeschnittenen Platinen umgeformt und die Entwicklung der Blechhalterkräfte sowie der Zargenspannungen aufgezeichnet und analysiert. Dazu ist die Blechhalterkraft in Abbildung 74 in Blechhaltersegment 2 bei konventioneller Prozessführung dargestellt. Dabei verläuft die Blechhalterkraft konstant auf Höhe der gewünschten Soll-Kraft und zeigt keinerlei Abweichung. Die Zargenspannung hingegen zeigt bei konventioneller Prozessführung sichtbare Abweichungen, bei Verwendung unterschiedlicher Platinenabmessungen. Zwischen der zu großen und der zu kleinen Platine beträgt die Abweichung im Maximum der Zargenspannung eine Abweichung von 41 MPa. Dieser Unterschied der Zargenspannung ist mit der unterschiedlichen Flanschgröße erklärbar. Da die Blechhalterkraft konstant ist, nimmt bspw. durch die geringere Fläche, auf welche die Blechhalterkraft wirken kann, die Rückhaltung der Platine ab. In Abbildung 74 ist die Blechhalterkraft in Blechhaltersegment 2 sowie die Entwicklung der Zargenspannung in der dazu korrespondierenden Bauteilzone 2 bei einer konventionellen Prozessführung dargestellt.

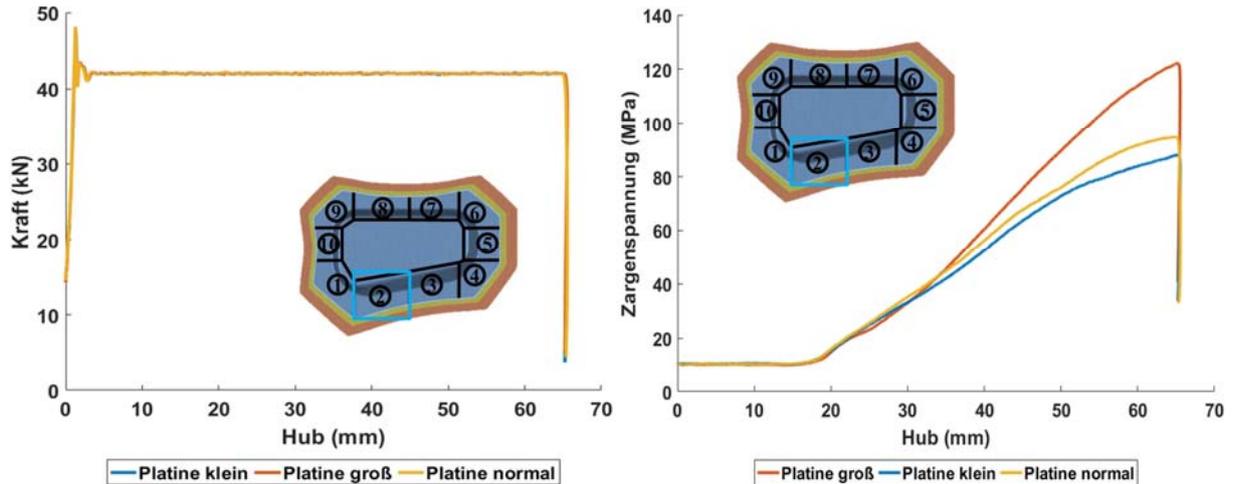


Abbildung 74: Blechhalterkraftverläufe des Blechhaltersegments 2 bei drei verschiedenen Platinengrößen (links). Zargenspannung in Bauteilzone 2 für drei verschiedene Platinengrößen bei einer konventionellen Prozessführung mit AA6016.

Im Vergleich zur konventionellen Prozessführung wird bei einer gleichartigen Störung beim geregelten Prozess ein großer Unterschied in den Blechhalterkräften im Blechhaltersegment erkennbar. Hierbei wirkt der Regelkreis aktiv der entstehenden Abweichung bei der Zargenspannung entgegen. Bei der nominalen Platinengröße bleibt die Blechhalterkraft relativ konstant. Hin-gegen nimmt die Blechhalterkraft bei zu kleiner Platine stark zu, respektive bei der zu großen Platine stark ab. Die betreffenden Verläufe der Blechhalterkraft in Segment 2 sowie die Verläufe Zargenspannung in Bauteilzone 2 für den geregelten Prozess sind in Abbildung 75 zu sehen.

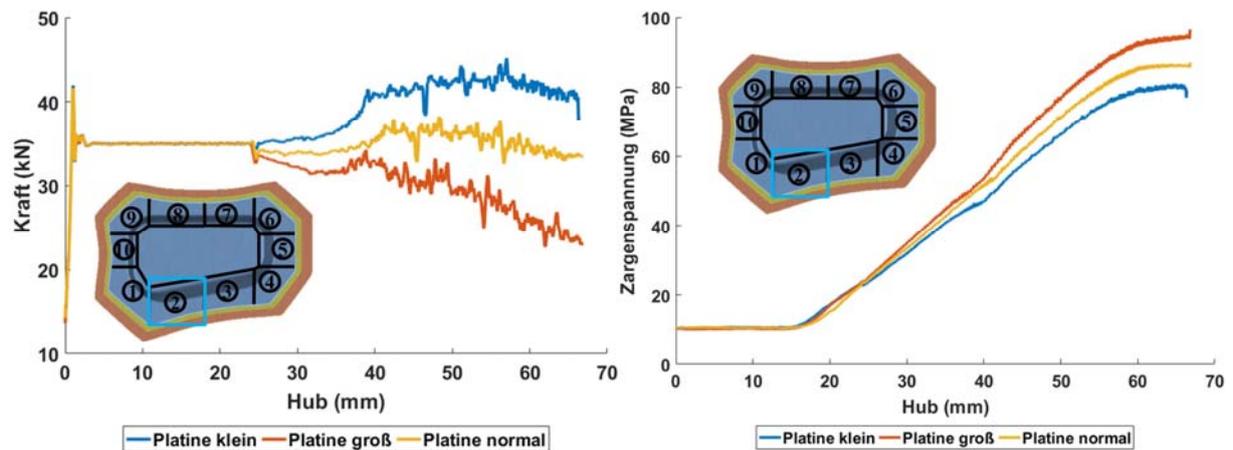


Abbildung 75: Ist-Kraftverläufe des Blechhaltersegments 2 für drei verschiedenen Platinengrößen (links), sowie Zargenspannung in Bauteilzone 2 für drei verschiedene Platinengrößen bei einem geregelten Prozess unter Verwendung des Werkstoffs AA6016.

Der Regelkreis strebt dadurch einen Ausgleich der Abweichung bei der Zargenspannung an, welcher durch die abweichende Platinengröße verursacht wird, indem eine Anpassung der Blechhalterkraft erfolgt. Dies gelingt dem Regelkreis recht gut, sodass die Abweichung bei

der Zargenspannung auf 15 MPa im Maximum reduziert werden kann, was einer Fehlerreduktion von 64 % im Vergleich zur konventionellen Prozessführung entspricht.

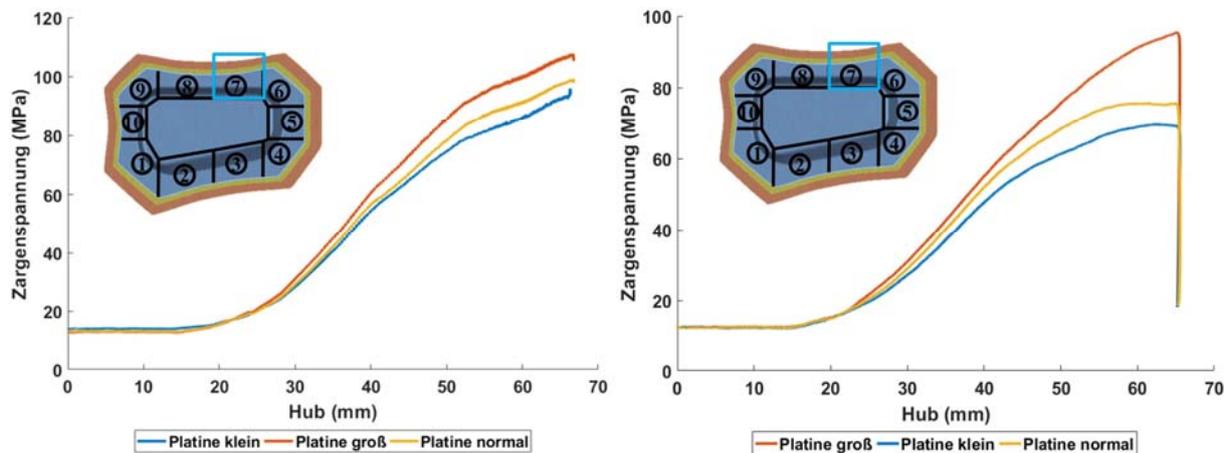


Abbildung 76: Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 7 für drei verschiedenen Platinen-Größen im geregelten Prozess (links), sowie gleiche Verläufe bei einer konventionellen Prozessführung (rechts) für den Werkstoff AA6016.

Zur weiteren Analyse des Regelkreises bzgl. möglicher Fehlgrößen von Platinen werden auch die im Bauteil gegenüberliegenden Bauteilzonen betrachtet. In Abbildung 76 ist die Zargenspannung in Bauteilzone 7 für den geregelten und den konventionellen Prozess für den Werkstoff AA6016 zu sehen. Diese vereinfachte Darstellung ohne Betrachtung der Stellgröße wurde gewählt, um einen direkten und übersichtlichen Vergleich zwischen beiden Prozessgrößen zu ermöglichen. Da die Regelkreise für jede Bauteilzone und jedes Blechaltersegment in ihrem Aufbau und bzgl. ihrer Parameter identisch sind, kann die Reaktionsweise des Regelkreises für die auftretende Störung als im Grundsatz als gleich zu denen in Abbildung 74 und Abbildung 75 angenommen werden. Beim direkten Vergleich der Zargenspannungen des geregelten und des konventionellen Prozesses bei übereinstimmender Störung, wie in Abbildung 76 dargestellt, ist eine signifikante Reduktion der Abweichungen bei den Zargenspannungsverläufen der einzelnen Platinen-Größen im geregelten Prozess gegenüber der Zargenspannung im konventionellen Prozess zu sehen. Als normaler Zargenspannungsverlauf kann der Signalverlauf der regulären Platine betrachtet werden.

Beträgt beim unregulierten Prozess die Abweichung bei der Zargenspannung zwischen kleinster und größter Platine noch 40 MPa, so wird diese Differenz beim geregelten Prozess auf 13 MPa verringert, dies ist ein Rückgang und damit eine Verbesserung um 68 %. Zum weiteren Vergleich sind in Abbildung 77 die Zargenspannungsverläufe der Bauteilzone 8 bei dem definierten Platinenfehlbeschnitt dargestellt. Dabei ist beim geregelten Prozess im Vergleich zum konventionellen Prozess eine ähnlich starke Verringerung der Abweichung bei der Zargenspannung zwischen kleinster und größter Platine feststellbar. Die Differenz bei der Zargenspannung zwischen größter und kleinster Platine beträgt beim konventionellen Prozess 70 MPa. Hingegen wird diese Abweichungen durch den Regelkreis im geregelten Prozess signi-

fikant verringert und auf eine Abweichung von 20 MPa Differenz zwischen größter und kleinster Platine reduziert, was einer Reduktion von etwa 72 % entspricht.

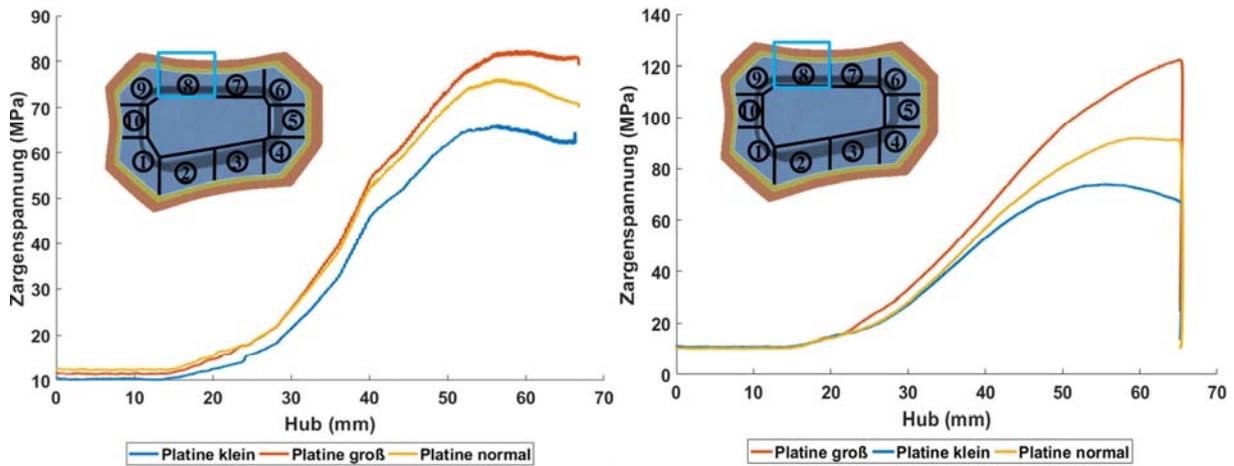


Abbildung 77: Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 8 für drei verschiedene Platinengrößen im geregelten Prozess (links), sowie Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 8 für drei verschiedene Platinengrößen bei einer konventionellen Prozessführung.

Der Grund, weshalb die Störungen nicht gänzlich ausgeglichen werden können, ist einerseits dem geschuldet, dass die Segmente des segmentelastischen Blechhalters stofflich miteinander verbunden sind und dadurch die Stellgrößen im System sich gegenseitig beeinflussen. Andererseits ist die induzierte Störung durch einen Platinenfehlbeschnitt von  $\pm 15\text{mm}$  groß gewählt. Dies tritt in einem industriellen Prozess so nicht auf. Jedoch musste diese Prozeßstörung derart stark gewählt werden, um die Grenzen der Reglercharakteristik im Realprozess charakterisieren zu können. Trotzdem zeigen die Versuche bzgl. des Platinenfehlbeschnitts deutlich die Verbesserungen auf, welche durch die Regelung möglich sind. Die Fehlerreduktion, hier definiert durch die Abweichung der Zargenspannung zwischen den verschiedenen Platinengrößen, wird durchschnittlich um etwa zwei Drittel verringert. Dies lässt auf eine signifikante Reduktion der Fehlerteile im realen Produktionsprozess aufgrund von fehlbeschnittenen Platinen durch den Einsatz der Regelung schließen.

### 8.5 Verhalten der Regelung bei Veränderung der Beölung auf der Platinenoberfläche

Als weitere Prozessstörung, deren Signalverläufe untersucht werden, wurde die Schwankung der Beölungsmenge auf der der Ober- bzw. Unterseite der Platine ausgewählt. Es wurde, wie in Tabelle 10 und Tabelle 11 beschrieben, die Schmierung zwischen einer nicht beöhlten Platine und einer Beölung der Platine mit  $1\text{ g/m}^2$  variiert. Das Metamodell des Prozesses, das zur Regelung verwendet wird, wurde für einen Prozess mit unbeöhlter Platine erstellt um eine Verfälschung der Ergebnisse auf Grund der Schmierung zu verhindern. Dadurch sind Solltrajektorien der Zargenspannung für eine unbeöhlte Platine erstellt bzw. optimiert worden. Dies bedeutet im Rückschluss, eine beöhlte Platine ist als eine Prozessstörung anzusehen, welche durch die Regelung ausgeglichen werden muss. In Abbildung 78 sind die Blechhalterkraftver-

läufe in Blechhaltersegment 7 sowie die Zargenspannung in Bauteilzone 7 bei einer konventionellen Prozessführung für zwei unterschiedliche Beölungszustände dargestellt.

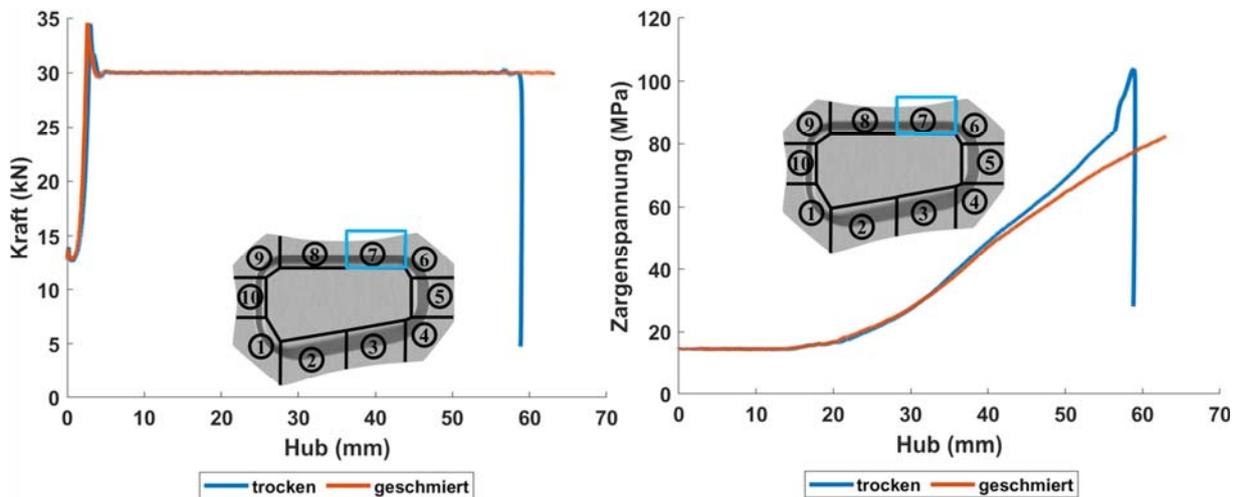


Abbildung 78: Ist-Kraftverläufe des Blechhaltersegments 7 bei abweichender Schmierung (links), sowie Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 7 bei abweichender Schmierung bei einer konventionellen Prozessauslegung.

Es zeigt sich, dass die Blechhalterkraft in Bauteilzone 7 keinerlei Abweichungen vom Sollwert aufweist, da ohne Regelung angesteuert werden. Bei der Zargenspannung dagegen ist ein deutlicher Einfluss der schwankenden Beölung auf deren Verlauf erkennbar. Die Zargenspannungen der beölten und unbeölten Platine unterscheiden sich in der zweiten Prozesshälfte erheblich. Bei der unbeölten Platine steigt die Zargenspannung erheblich stärker an als dies bei der Platine ohne Beölung der Fall ist. Gerade zu Prozessende erfährt die Zargenspannung der unbeölten Platine einen deutlich steileren Anstieg. Dieser Anstieg zum Prozessende kann mit einem ungleichmäßigen Auszug in der Platine, verursacht durch die mangelnde Beölung, erklärt werden. Des Weiteren kommt es bei der unbeölten Platine bei einer Ziehtiefe von etwa 59 mm zum Auftreten von Reißern, während bei der beölten Platine diese ohne Reißer bis zu einer Ziehtiefe von 64 mm tiefgezogen werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass der gestörte Prozess durch die applizierte Beölung zwar eine höhere Ziehtiefe erreicht als der ungestörte Prozess, jedoch liegt bei der Betrachtung der Signalverläufe darauf nicht der Fokus. Dieser liegt stattdessen auf der Abweichung zwischen den Signalverläufen bei der Zargenspannung zwischen den beiden Prozesseinstellungen. Hierbei zeigt sich, dass die Beölung starke Auswirkungen auf das Prozessgeschehen auf Signalebene hat. Die Abweichung bei der Zargenspannung beträgt hierbei bis zu 20 MPa.

Im Vergleich dazu ist in Abbildung 79 der geregelte Prozess für eine beölte und eine unbeölte Platine für dieselbe Bauteilzone zu sehen. Hierbei ist deutlich erkennbar, wie die Ist-Kraftverlauf im Blechhaltersegment bei der beölten Platine gegenüber dem Ist-Kraftverlauf der unbeölten Platine ansteigt. Damit gleicht der Regelkreis die fehlende Rückhaltung bei der beölten Platine aus. Bei der Zargenspannung gibt es zwischen beölter und unbeölter Platine keine signifikante Abweichung, beide Kurven verlaufen quasi deckungsgleich. Der implementierte Regelkreis ist fähig jegliche Abweichungen bei der Beölung auszugleichen, mögen

diese auch sehr starke Abweichungen bei der Beölung ausweisen. Die Abweichung bei der Zargenspannung beträgt beim geregelten Prozess 0 MPa. Im Vergleich zum Prozess mit beölter Platine beträgt die Reduktion bei der Differenz der Zargenspannung 100%. Des Weiteren kommt es beim geregelten Prozess bei der unbeölte Platine zu keinem Reißen, sodass der Tiefziehprozess erfolgreich abgeschlossen werden kann.

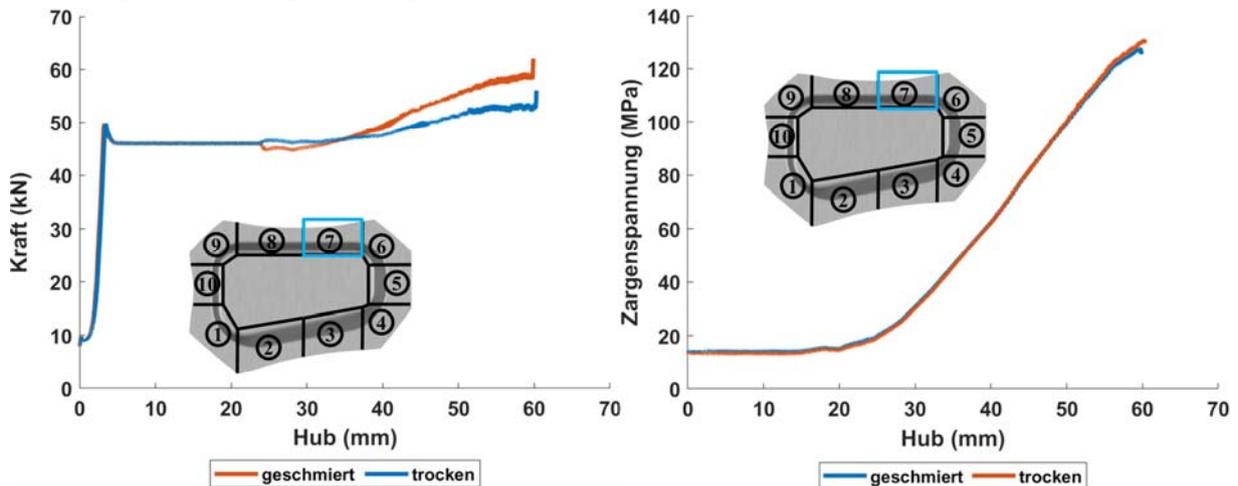


Abbildung 79: Ist-Kraftverläufe des Blechaltersegments 7 bei abweichender Schmierung (links), sowie Zargenspannungverläufe in Bauteilzone 7 bei abweichender Schmierung bei einem geregelten Prozess.

In Abbildung 80 sind die Zargenspannungsverläufe für einen geregelten Prozess und den konventionellen Prozess bei abweichender Beölung in Bauteilzone 2 im direkten Vergleich zu sehen.

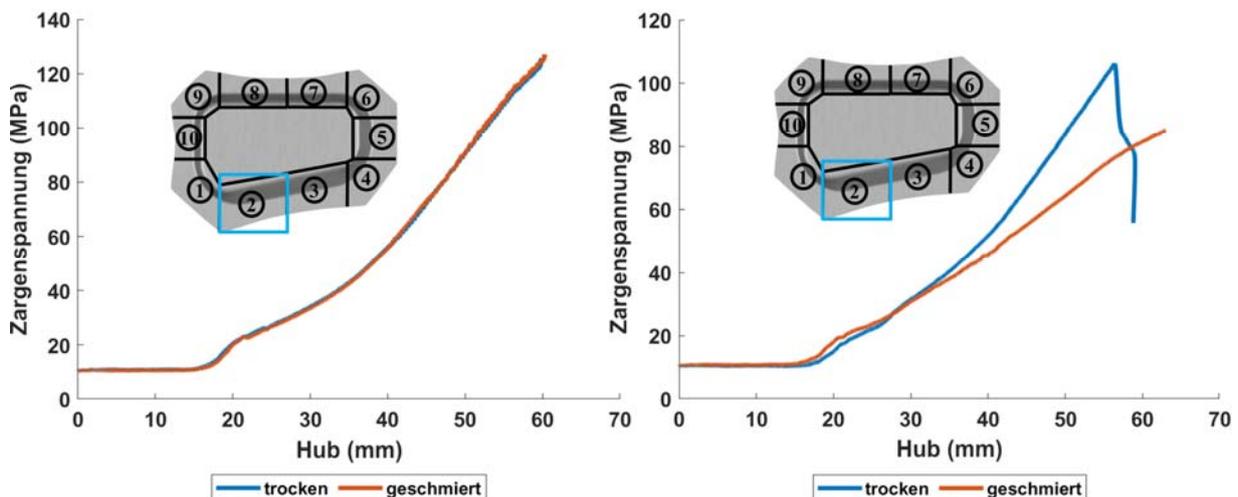


Abbildung 80: Die Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 2 bei abweichender Schmierung bei einem geregelten Prozess (links), sowie die Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 2 bei abweichender Schmierung bei einem konventionellen Prozess.

Wie schon in Bauteilzone 7 zeigt die Zargenspannung beim geregelten Prozess keinerlei Abweichung zwischen beölter und unbeölter Platine. Beide Kurven verlaufen, wie bereits bei der

untersuchten Bauteilzone 7, deckungsgleich. Beim konventionellen Prozess hingegen, ist die Abweichung bei der Zargenspannung sehr deutlich – bei Prozessende mit einer Spannungsdifferenz von etwa 23 MPa – sogar noch stärker als in Bauteilzone 7. Um ein abschließendes Bild der Signalverläufe bei abweichender Beölung zu ermöglichen, werden die Zargenspannungsverläufe in Bauteilzone 8 für den geregelten und für den konventionellen Prozess vergleichend gegenübergestellt (vgl. Abbildung 81).

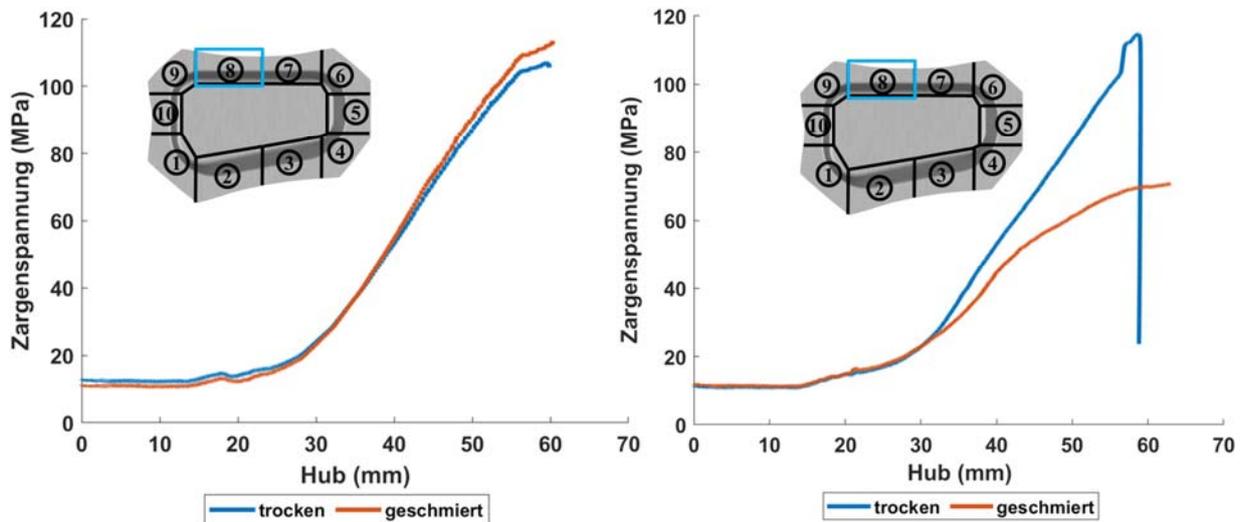


Abbildung 81: Die Zargenspannung in Bauteilzone 8 bei abweichender Schmierung bei einem geregelten Prozess (links), sowie die Zargenspannung in Bauteilzone 8 bei abweichender Schmierung bei einem konventionellen Prozess.

Hier zeigt sich dasselbe Bild wie in den anderen, vorher betrachteten Bauteilzonen. Beim geregelten Prozess gibt es keine signifikante Abweichung zwischen den Zargenspannungen beim Prozess mit beölter und unbeölter Platine. Gegen Prozessende ist beim geregelten Prozess eine leichte Abweichung zu sehen, diese beträgt jedoch lediglich 4 MPa. Beim konventionellen Prozess hingegen ist die Abweichung zwischen dem Prozess mit beölter und dem Prozess mit unbeölter Platine sehr deutlich zu sehen und beträgt 51 MPa. Es ist deutlich erkennbar, dass im Vergleich zur unbeölte Platine die Zargenspannung beim Prozess mit beölter Platine relativ stark absinkt. Im Gegensatz dazu gleicht der Regler beim geregelten Prozess die durch die Beölung fehlende Rückhaltung durch eine Erhöhung der Blechhalterkraft im betreffenden Blechhaltersegment aus.

#### Fazit zur Betrachtung der Signalverläufe

Auf Basis der Analyse der Signalverläufe zeigt sich die hohe Leistungsfähigkeit des hier entwickelten Regelkreises, um auftretenden Störungen im Umformprozess entgegenzuwirken und diese auszugleichen. Das Funktionsprinzip des Regelkreises ist an den Signalverläufen der Blechhalterkraft deutlich ablesbar. Bei den verschiedenen Störungen ist der Reglereingriff quantitativ am Blechhalterkraftsignal ablesbar. Selbst eine plötzlich oder deutlich auftretende Störung durch einen Krafteinbruch, welche durch die Tiefziehpresse hervorgerufen wird, kann durch den Regelkreis äußerst schnell ausgeglichen werden. Sie ist dadurch zwar noch

am Signal der Blechhalterkraft feststellbar, jedoch nicht mehr bei der Zargenspannung, welche als Regelgröße dient. Darüber hinaus reduziert der Regelkreis die Auswirkungen von starken und dauerhaften Prozessstörungen wie bspw. ein Platinenfehlbeschnitt oder eine falsche Beölung der Platine um mindestens Faktor drei. Des Weiteren zeigt sich die Zargenspannung als Regelgröße des Prozesses als sehr leistungsfähig bzgl. der Analyse des Tiefziehprozesses, da sie Prozessstörungen sehr sensitiv abbildet. Dies spricht für eine hohe Eignung der Zargenspannung als Messgröße bzw. als Regelgröße zur Zustandsbestimmung des Tiefziehprozesses.

## **8.6 Steigerung der Prozessrobustheit beim Tiefziehen**

In einer weiteren Untersuchung wurde die Steigerung der Prozessrobustheit durch die Verwendung der Regelung betrachtet.

### **8.6.1 Untersuchung der Robustheit unter Verwendung des Werkstoffs HC340**

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe zur Untersuchung der Prozessrobustheit durch Verwendung der neuartigen Regelung, auf Basis des Versuchsplans in Tabelle 10 und unter Verwendung des Werkstoffs HC340 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Steigerung der Prozessrobustheit durch die Verwendung der entwickelten Regelung. Die Ziehtiefe ist bei allen Versuchen mit der verwendeten Regelung höher als bei Versuchen mit konventioneller Prozessführung. Dies ist eindeutig auf die Verwendung der vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung zurückzuführen. Des Weiteren liegt durch den Einsatz der Regelung eine deutlich geringere Verschlechterung der Prozessergebnisse durch Prozessstörungen vor. Dies ist prozentual wie auch in absoluten Zahlenwerten den Ergebnissen zu entnehmen. Daraus lässt sich eine Steigerung der Prozessrobustheit beim Werkstoff HC340 durch Verwendung der entwickelten Regelung eindeutig feststellen. Verglichen mit einer konventionellen Prozessführung, ist der Tiefziehprozess weniger sensitiv gegenüber Prozessstörungen. Einzelne, gezielt eingebrachte Störungen zeigen bei Verwendung der Regelung keinerlei Einfluss mehr auf das Prozessergebnis, wie bspw. eine Veränderung bei der Walzrichtung. Bei konventioneller Prozessführung wird durch eine Veränderung der Walzrichtung um  $90^\circ$  die Ziehtiefe um 4 mm verringert, da die Faltenbildung im Bauteil früher einsetzt. Dieselbe Störung verursacht beim geregelten Prozess keinerlei Verminderung der Ziehtiefe.

Durch die Verwendung von Schmiermittel – die Prozessparameter beim konventionellen wie beim geregelten Prozess wurden für einen Prozess ohne Schmiermittel festgelegt – setzt die Faltenbildung beim geregelten Prozess erheblich später ein als beim konventionellen Prozess. Hierbei beträgt die Ziehtiefe beim geregelten Prozess 105 mm, beim konventionellen Prozess lediglich 86 mm. Dabei ist die Verwendung von Schmierstoff, abweichend von den anderen untersuchten Prozessstörungen, die einzige, welche zu einer Erhöhung der Ziehtiefe im Vergleich zum definierten Prozessnormalzustand führt. Dabei ist dies mit der allgemeinen Verbesserung des Ziehverhaltens von Werkstoffen beim Tiefziehen durch den Einsatz von Schmierstoffen zu erklären. Die Ergebnisse der Robustheitsuntersuchungen auf Basis des

Versuchsplans in Tabelle 10 für den Werkstoff HC340 sind in Tabelle 12 in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnis der Versuchsreihe mit dem Werkstoff HC340, aufgetragen ist die erreichte Ziehtiefe in Millimeter für die einzelnen Versuchsstufen.

Versuchsstufe	geregelt			konventionell		
	1	2	3	1	2	3
Schmierung [mm]	105	94		86	79	
Fehllage oben [mm]	95	94	93	81	80	79
Fehllage unten [mm]	94	93	93	81	80	81
Platine groß [mm]	83	-	-	64	-	-
Platine klein [mm]	80	-	-	59	-	-
Walzrichtung [mm]	94	94	-	79	75	-

Beim geregelten Prozess und unter Verwendung zu groß beschnittenen Platinen, setzt die Reißerbildung im Vergleich zur regulär beschnittenen Platine bzgl. der Ziehtiefe 11 mm früher ein. Hingegen verschlechtert sich bei denselben Vergleichsversuchen mit konventioneller Prozessführung die Ziehtiefe um 20 mm. Ebenfalls bei den Versuchen mit geregeltem Prozess und zu klein beschnittenen Platinen setzt die Faltenbildung im Vergleich zur regulär beschnittenen Platine bzgl. der Ziehtiefe 14 mm früher ein. Dagegen verschlechtert sich bei denselben Vergleichsversuchen mit konventioneller Prozessführung die Ziehtiefe um 20 mm. Dabei können die schlechteren Ergebnisse bei den zu klein beschnittenen Platinen mit dem fehlenden Bauteilflansch erklärt werden. Hierbei ist bei der zu klein beschnittenen Platine der Bauteilflansch ab einem Punkt im Prozess zu klein, als dass noch genügend Kraft für eine Rückhaltung eingebracht werden kann. Das verwendete Umformwerkzeug erreicht die obere Grenze seines Stellbereiches in den relevanten Segmenten des Blechhalters und es entstehen Falten.

### 8.6.2 Untersuchung der Robustheit unter Verwendung des Werkstoffs AA6016

Beim Aluminiumwerkstoff AA6016 stellen sich die erhaltenen Ergebnisse vergleichbar mit denen der Untersuchungen unter Verwendung des Stahlwerkstoffs HC340 dar. Dabei sind deutliche Steigerungen bei der Ziehtiefe durch die Verwendung des neuen Regelungsansatzes im Vergleich zur konventionellen Prozessführung erkennbar. Ebenfalls fallen die Minderungen der Ziehtiefe, welche durch die eingebrachten Prozessstörungen verursacht werden, bei der geregelten Prozessführung deutlich geringer aus als bei der konventionellen Prozessführung. Daraus lässt sich analog zu den Untersuchungen mit dem Stahlwerkstoff eine Steigerung der Prozessrobustheit durch Verwendung der Regelung ableiten.

Hierbei wird bei der Verwendung von Schmierstoff mit dem geregelten Prozess eine Ziehtiefe von 85 mm erreicht, beim konventionellen Prozess lediglich eine Ziehtiefe von 74 mm. Diese Steigerung der Ziehtiefe, lässt sich trotz einer eigentlich in diesem Fall vorliegenden Prozess-

störung mit einer homogeneren Plastifizierung der Platine und der dadurch verminderten Reißergefahr erklären. Dabei begünstigt der Schmierstoff das Auftreten von Falten, was die Regelung durch eine Erhöhung der Blechhalterkraft ausgleichen kann.

Bei der Versuchsreihe mit zu groß beschnittenen Platinen, setzt die Reißerbildung beim geregelten Prozess 20 mm früher ein, als dies bei der Umformung mit regulär beschnittener Platine der Fall ist. Im Gegensatz dazu wird bei der konventionellen Prozessführung mit zu groß beschnittener Platine die Ziehtiefe um 23 mm verringert. Des Weiteren verringert sich die Ziehtiefe bei zu klein beschnittenen Platinen und geregelter Prozessführung um 21 mm. Bei der gleichen Prozessstörung und konventioneller Prozessführung ergibt sich ein Ziehtiefenverlust von 25 mm. Hierbei werden die Prozessergebnisse jeweils durch die einsetzende Faltenbildung begrenzt, welche durch den zu kleinen Bauteilflansch verursacht wird. Im Unterschied zum Stahlwerkstoff, konnte beim Einsatz des Aluminiumwerkstoffs eine metallurgische Größe berücksichtigt werden, nämlich die Werkstoffalterung. Hierbei wurden wenige Wochen alte Bauteilplatinen mit eineinhalb Jahre alten Bauteilplatinen verglichen. Im Vergleich zwischen den wenige Wochen alten und eineinhalb Jahre alten Platinen verringert sich die Ziehtiefe bedingt durch die Alterung beim geregelten Prozess um 27 mm. Beim konventionellen Prozess beträgt diese Abnahme bereits 32 mm. Dies entspricht einer Reduktion der Ziehtiefe um 50 % im Vergleich zum konventionellen Prozess. Die Ergebnisse der Robustheitsuntersuchungen auf Basis des Versuchsplans in Tabelle 11 und Tabelle 10 für den Werkstoff AA6016 sind in Tabelle 13 in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 13: Ergebnis der Versuchsreihe mit dem Werkstoff AA6016, aufgetragen ist die erreichte Ziehtiefe in Millimeter für die einzelnen Versuchstufen.

Versuchsstufen	geregelt			konventionell		
	1	2	3	1	2	3
Schmierung [mm]	85	76				
Fehllage oben [mm]	74	71	73	62	61	60
Fehllage unten [mm]	75	73	71	62	64	65
Platine groß [mm]	56			41		
Platine klein [mm]	53			39		
Walzrichtung [mm]	76	49		64	32	

#### Fazit zur Betrachtung der Steigerung der Prozessrobustheit durch die Regelung

Retrospektiv, ist über die Untersuchungen zur Prozessrobustheit durch Verwendung der entworfenen Regelung deren deutliche Erhöhung dieser erkennbar. Hierbei ist die Ziehtiefe bei Versuchen mit geregelter Prozessführung signifikant höher und die Abnahme der Ziehtiefe zwischen gestörtem und ungestörtem Prozess geringer als bei konventioneller Prozessführung. Dabei ist dies ausnahmslos bei allen untersuchten Prozessstörungen festzustellen und bei beiden untersuchten Werkstoffen in vergleichbarer Intensität vorhanden. Des Weiteren

wird die Sensitivität des Tiefziehprozesses bzgl. Störungen durch den Einsatz der Regelung signifikant reduziert. Der Rückgang der Ziehtiefe beim Auftreten einzelner Störungen ist bei den Versuchen mit geregelter Prozessführung erheblich geringer als bei konventioneller Prozessführung. Dies schlägt sich sowohl in absoluten Zahlen als auch in der prozentualen Betrachtung nieder (vgl. Tabelle 12 u. Tabelle 13). Die Ergebnisse der Robustheitsuntersuchungen auf Basis des Versuchsplans in Tabelle 11 und Tabelle 10 für den Werkstoff AA6016 sind in Tabelle 13 in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 13).

## **8.7 Fehlteilerkennung mithilfe der Zargenspannung**

Eine geeignete Regelgröße ist entscheidend für eine hochwertige Regelgüte. Sie sollte dabei nicht nur, wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt, dazu geeignet sein, eine sichere Prozessführung zu gewährleisten, sondern sollte auch die Erkennung von Fehlteilen und qualitativen Mängeln ermöglichen. Hierbei sind die hauptsächlich zu detektierenden Fehler, welche zu Fehlteilen beim Tiefziehen führen, die Faltenbildung und das Auftreten von Reißern. Daher wurde in einem weiteren Untersuchungsschritt die Fähigkeit der Regelgröße, Zargenspannung untersucht, Fehlteile noch während des Umformvorgangs sicher und zuverlässig zu erkennen. Eine sichere Erkennung von Fehlteilen würde die Einsatzmöglichkeit von Reglersystemen auf Basis der Zargenspannung in der Industrie beträchtlich erweitern, bspw. im Bereich der Qualitätssicherung. Es soll im Folgenden einerseits untersucht werden, ob diese Qualitätsmängel während des Tiefziehens erkannt werden können und ob der Ort des Auftretens eines Bauteilfehlers detektiert werden kann. Hierbei wird untersucht, inwieweit an der Signalhöhe oder am Signalverlauf Qualitätsmängel erkannt werden können. Dies wurde schon in Grundzügen in der Arbeit von [Bar17b] untersucht.

### **8.7.1 Vergleich der Zustandsgrößen der Zargenspannung und des Platinenkanteneinzugs**

Die in der Literatur meist verwendete Regelgröße beim Tiefziehen stellt der Platinenkanteneinzug dar. Dazu soll dieser als Vergleichsgröße zur Zargenspannung herangezogen werden, um die Qualität der Zargenspannung als Regelgröße im Vergleich zum Platinenkanteneinzug beurteilen zu können. Zur Untersuchung der Zargenspannung als Regelgröße und zum Abgleich dieser mit dem Platinenkanteneinlauf wurden Versuche mit identischer Ziehtiefe, identischen Platinengrößen und wechselnder Beölungsmengen durchgeführt. Dadurch konnten bei absolut identischer Bauteilgeometrie Bauteile mit auftretenden Reißern, mit Faltenbildung und auch Gutteile gezielt gefertigt werden (vgl. Kapitel 3). In Abbildung 82 ist der Platinenkanteneinzug für Gut- und Fehlteile an den betroffenen Bauteilstellen zu sehen. Der Platinenkanteneinzug für Fehlteile wird dabei mit denen für Gutteile an der betroffenen Stelle verglichen.

Diese Untersuchung stellte somit im Grundprinzip die Bedingungen eines Serienprozesses nach, wobei eine wechselnde Schmierungsbedingung zur Erzeugung von Fehlteilen genutzt wird. Hierbei wurde für alle Untersuchungen der Stahlwerkstoff HC340 verwendet. Es konnten dabei ausschließlich Reißer im Grenzbereich zwischen Bauteilzone 9 und 10 festgestellt werden. Des Weiteren traten die Falten, um eine eindeutige Zuordnung der Versagensfälle zu gewährleisten, wie beabsichtigt im Grenzbereich zwischen Bauteilzone 7 und 8 auf. Daher wurden ausschließlich diese Bereiche intensiv untersucht. Es ist zu erkennen, dass der Platinenkanteneinzug eine recht ungenaue Regelgröße darstellt.

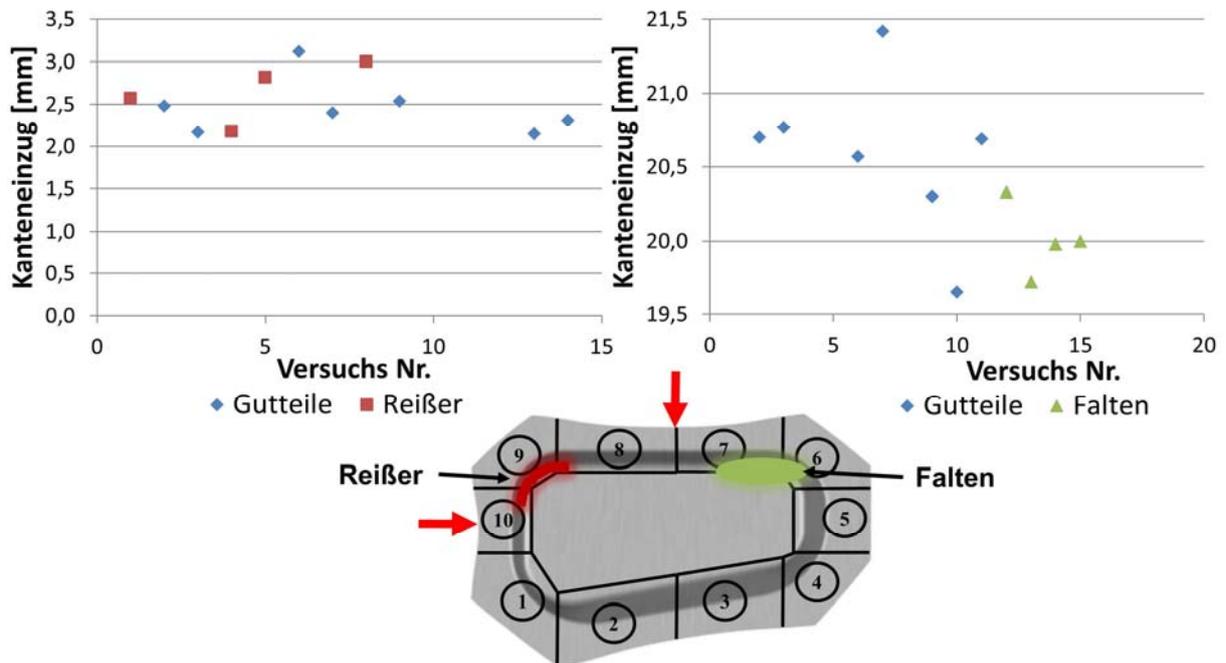


Abbildung 82: Der maximale Platinenkanteneinzug gemessen in den betreffenden Bauteilzonen bezüglich Bauteile mit Reißern, Gutteile und Teile mit Falten.

Er unterliegt nicht zuordenbaren Schwankungen von 15-30 %, was für eine möglichst qualittssignifikante Regelgröße hoch ist. Die Gründe für solch eine hohe Schwankung sind vermutlich mit den vielen Einflüssen, wie bspw. der Schmierung oder einer ungleichmäßigen Blechdickenreduktion erklärbar, die sich auf den Platinenkanteneinzug signifikant auswirken. Dadurch ist der Platinenkanteneinzug vielen Störungen unterworfen, welche das Ergebnis verfälschen. Infolge der hohen Streubreite des Einzugs kann keine eindeutige Aussage über die Bauteilqualität im Umformprozess getroffen werden. Dadurch erweist sich der Platinenkanteneinzug als weniger geeignet für eine eindeutige Erkennung von Fehlteilen. Dazu wäre eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Gut- und Fehlteilen sowie idealerweise zusätzlich eine Abgrenzung zwischen den Fehlteilarten notwendig. Zum Vergleich wird nun die maximale Zargenspannung in fehlerbehafteten Bauteilzonen mit dem Auftreten von Gut- und Fehlteilen korreliert (vgl. Abbildung 83).

Hierbei ist zunächst auffallend, dass die Zargenspannung eine geringe Streuung ihrer Beträge aktuellen aufweist. Die Schwankungsbreite beträgt nur etwa 2 % der absoluten Werte. Durch die geringe Schwankungsbreite ist eine genauere und zuverlässigere Rekonstruktion des Zu-

stands der Umformung möglich. Die Zargenspannung zeigt sich wirkungsvoller und aussagekräftiger als der Platinenkanteneinzug in den betroffenen Bauteilzonen – gerade aufgrund der geringeren Streuung. Infolgedessen können Grenzwerte für die Zargenspannung definiert werden, um bspw. Reißer oder Falten später in der Serienanwendung zu detektieren. Damit können anhand der Zargenspannung bei einer Anwendung in der Qualitätssicherung ohne die Regelung einsetzen zu müssen, Eingriffsgrenzen für den Umformprozess definiert werden, welche auf Basis der Zargenspannung Gut- und Fehlteile zuverlässig identifizieren.

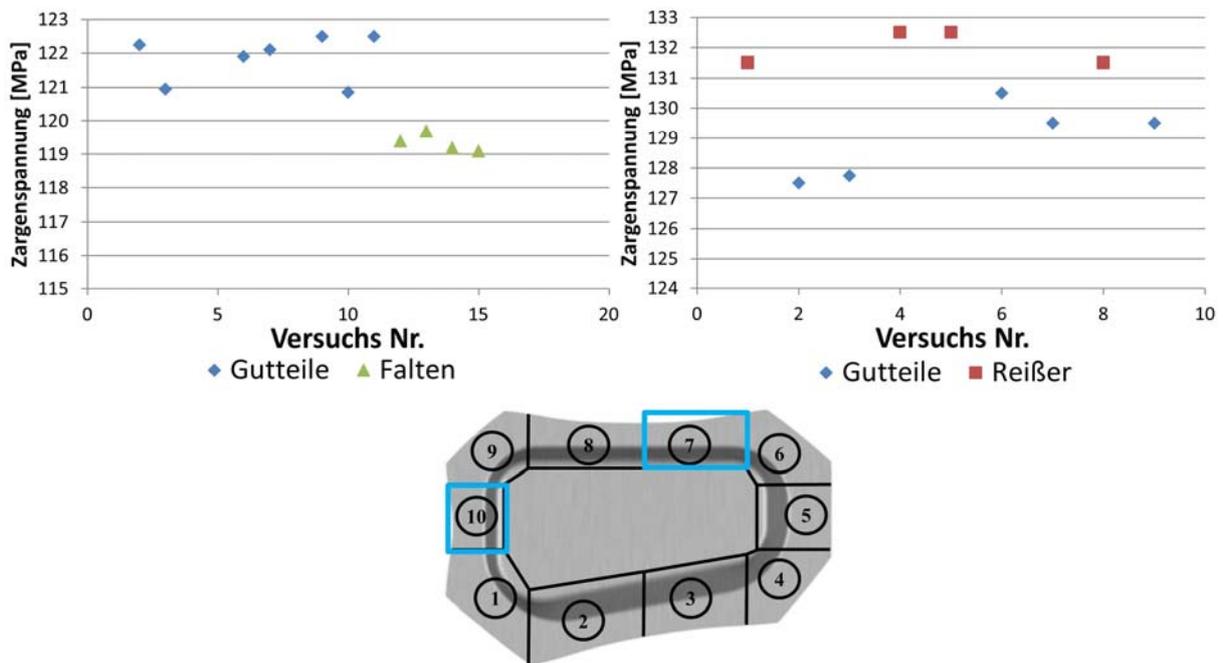


Abbildung 83: Die maximale Zargenspannung gemessen in den betreffenden Bauteilzonen bezüglich Bauteile mit Reißern, Gutteilen und Teilen mit Falten.

### 8.7.2 Detektion von Reißern mithilfe von Zargenspannungssensoren

Wie in Kapitel 8.5 beschrieben, erlaubt die Zargenspannung eine Erkennung von Fehlteilen nicht nur am Betrag des erreichten Maximalwertes, sondern auch durch den Signalverlauf der Zargenspannung selbst. Diese Möglichkeit der Fehlteildetektion mithilfe der Signalverläufe wird zunächst für die Detektion von Reißern untersucht. Die Verläufe eines Signals enthalten mehr und detailliertere Informationen, da das Signal im Gegensatz zu einem singulären Maximalwert zweidimensional ist. Dies entspricht den Grundlegenden Theoremen der Informationstheorie, wobei dies von Shannon als Entropie bzgl. der Information bezeichnet wird [Sha48, Hei95]. Die Signalverläufe der Zargenspannungen sind bei einem nicht geregelten, konventionellen Tiefziehprozess eines Gutteils mit ansteigender Ziehtiefe monoton steigend. Dies hat sich durchweg für alle Versuche und Simulationen gezeigt, wobei dieser Anstieg verschiedenen Gradienten mit unterschiedlichen Beträgen unterliegt. Dabei ist der konstante Anstieg der Zargenspannung durch die ansteigende Spannung in der Bauteilzarge und die ansteigende Kaltverfestigung im Bauteil erklärbar, da diese mit fortschreitendem Tiefziehprozess ansteigen. Daraus kann für die Signalverläufe der Zargenspannungen für ein Gutteil ein

monoton ansteigender Signalverlauf als notwendig erachtet werden. In Abbildung 84 sind die Signalverläufe eines Tiefziehprozesses zu sehen, an dessen Prozessende ein fehlerfreies Bauteil hergestellt wurden.

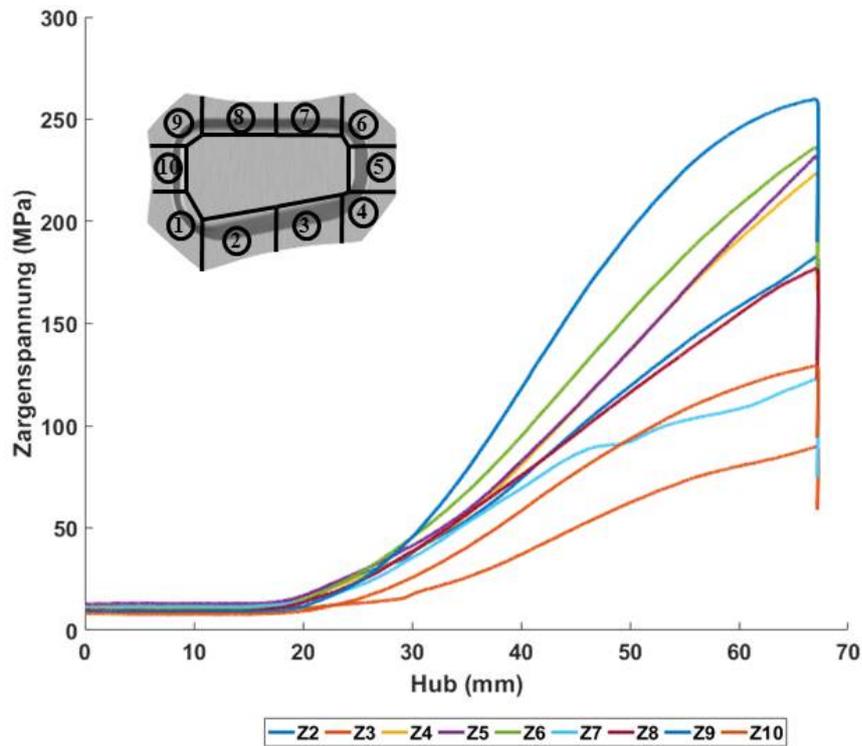


Abbildung 84: Signalverläufe für ein Gutteil ohne Auftreten von Reißern, Falten oder Einfallstellen.

Sobald ein Reißer in einem Bauteil auftritt, ist dies in dem Signalverlauf der Zargenspannung deutlich wahrzunehmen. Hierbei bricht die Zargenspannung in jener Bauteilzone, in der der Reißer auftritt, deutlich sichtbar ein. Somit ist ein Reißer eindeutig und relativ einfach mithilfe der Zargenspannung zu detektieren. Bei Betrachtung aller Zargenspannungen in einem Bauteil mit Reißern ist erkennbar, dass dieser Spannungsabfall selbst in jenen Zargenspannungsverläufen zu sehen ist, welche von Sensoren auf der gegenüberliegenden Bauteilseite des Versagensortes aufgezeichnet wurden. Die Zargenspannung in den anderen Bauteilzonen weisen deutliche Unstetigkeitsstellen zum Zeitpunkt des Risses auf, wobei sich die Stärke der Unstetigkeitsstelle in etwa proportional zu der Distanz zwischen Sensor und Ort des Auftretens des Reißers entwickelt.

Dies bedeutet, ein auftretender Reißer kann relativ sicher messtechnisch erfasst werden, selbst wenn der Sensor nicht in direkter Nähe zum Ort des Auftretens liegt. Somit ist für qualitätssichernde Maßnahmen bzgl. Reißern der Einbau eines Sensors in ein Werkzeug erforderlich, wenn der Versagensort vorher bekannt ist. Des Weiteren ist ein Zeitversatz in den einzelnen Zargenspannungssignalen beim Auftreten der Unstetigkeitsstellen feststellbar, welche sich proportional zur Entfernung des Sensors in Bezug auf die Stelle des Auftretens des Reißers verhält. Dadurch wäre bei ausreichend hoher Messfrequenz eine trianguläre Ortsbestimmung

des Reißers theoretisch möglich. Beispielhaft sind in Abbildung 85 Zargenspannungsverläufe eines solchen, fehlerbehafteten Tiefziehprozess mit auftretendem Reißer zu sehen.

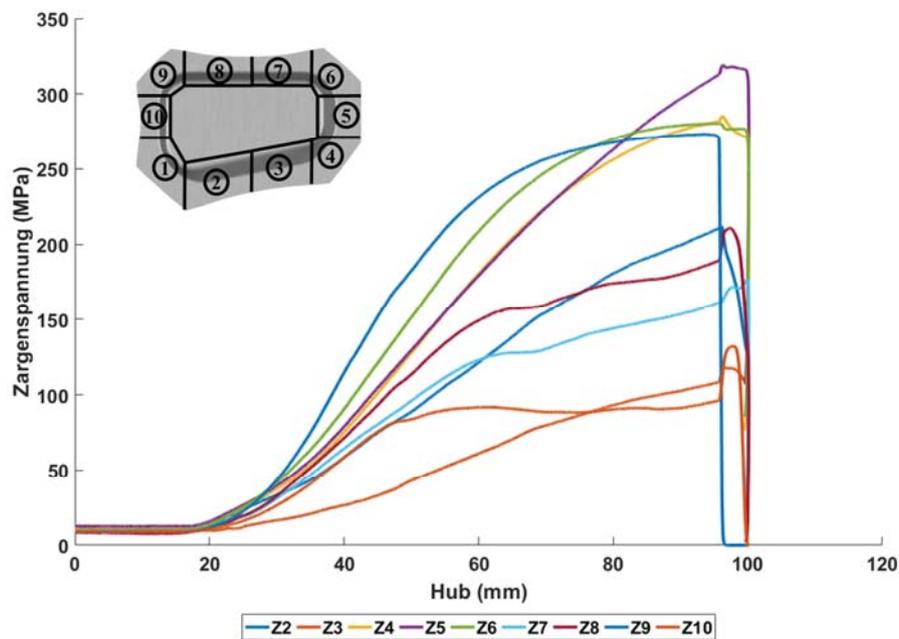


Abbildung 85: Die Signalverläufe der Zargenspannung in einem beispielhaften Tiefziehprozess beim Auftreten eines Reißers in Zone 9.

### 8.7.3 Detektion von Falten mithilfe der Zargenspannung

In einem weiteren Schritt werden die Signalverläufe auf die Tauglichkeit hin überprüft, auftretende Faltenbildung beim Tiefziehen zu detektieren. Hierbei können keine mit dem Auftreten von Reißern vergleichbaren, deutlichen Unstetigkeitsstellen oder ähnliches in den Signalverläufen festgestellt werden. Jedoch kann beim Sensorsignal des Sensors, welcher der Falte im Bauteil am nächsten ist, ein Signalarückgang festgestellt werden. Dabei bricht das Zargenspannungssignal deutlich um ca. 15 % ein um danach wieder deutlich anzusteigen. Statt dem gewöhnlichen Signalverhalten einer stetig monoton steigenden Kurve, ist ein stetig monoton fallendes Signalverhalten feststellbar. Es wird vom Signal eine Art Wellenbewegung vollzogen.

Dieses Verhalten konnte mithilfe mehrerer Versuche eindeutig der Faltenbildung in der Zarge zugeordnet werden. Falten in der Zarge treten im Kontext der Betrachtung der Zargenspannung ausschließlich dann auf, wenn die Zargenspannung während des Prozesses nicht mehr ansteigt, sondern abnimmt. Es konnte des Weiteren eine gewisse Proportionalität zwischen dem Signalarückgang und der Stärke der Faltenbildung festgestellt werden. Im Unterschied zum Auftreten eines Reißers ist die Bildung einer Falte nur durch Sensoren, die direkt im Bereich der Faltenbildung positioniert sind, feststellbar. Dieses Verhalten kann durch die kritische Spannungsdifferenz erklärt werden, welche sich zwischen Blechunter- und Blechoberseite aufbaut [Lie15] und welche zur Faltenbildung von Falten 2. Art führt. Diese Differenzspannung baut sich durch die Ausbildung einer Falte 2. Art ab, was dazu führt, dass die Span-

nung in der Bauteilzarge lokal abnimmt. Der Signalverlauf korreliert dahingehend mit dem Stand der Forschung. In Abbildung 86 sind ein Signalverlauf mit und eines ohne Faltenbildung in der Bauteilzone 7 zu sehen.

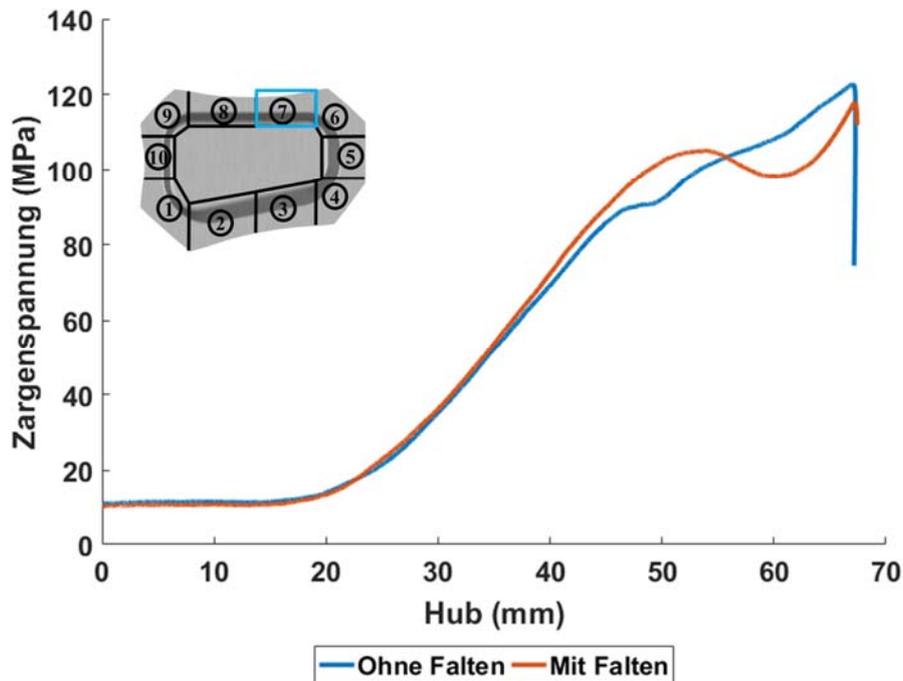


Abbildung 86: Signalverlauf der Zargenspannung in Bauteilzone 7 ohne (blau) sowie mit ausgeprägter Faltenbildung (orange).

Das Messprinzip der Zargenspannungssensoren ist folglich in der Lage neben der Qualitätssicherung bzgl. Reißen, auch für die Qualitätssicherung bzgl. Falten 2. Art im Bauteil eingesetzt werden. Die Sensoren müssen bei der Faltenerkennung jedoch direkt in dem Bereich des Werkzeugs positioniert werden, in denen sich die Falten voraussichtlich bilden. Dabei weist der Verlauf der Zargenspannung auf Falten 2. Art genau dann hin, wenn die Zargenspannung während des Prozesses nicht mehr ansteigt, sondern abnimmt. Infolgedessen können diese Erkenntnisse für eine Quantifizierung der Qualitätssicherung bei Tiefziehteilen in der Massenproduktion mithilfe der Zargenspannung eingesetzt werden. Durch Verwendung der Zargenspannungssensoren kann die dies bzgl. Qualitätssicherung weitestgehend automatisiert werden. Des Weiteren können der Falten- und Reißerbildung jeweils quantifizierbare Werte zugewiesen werden. Der Qualitätssicherungsansatz kann mit modernen Methoden des Maschinellen Lernens weiter verfeinert und stark verbessert werden. Mögliche Methoden zur Verbesserung wären Support Vector Machines oder Neuronale Netze. Diese Erweiterung der Qualitätssicherung mit Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) würden diese in hohem Maße verbessern und effizienter gestalten.

## 8.8 Verwendung der Regelung zur Steigerung der Bauteilqualität

### 8.8.1 Abgleich zwischen umgeformtem Bauteil und Simulation ohne induzierte Prozessstörungen

Als letztes wird die Genauigkeit der Modellbildung bzw. die Übereinstimmung der Ergebnisse des simulierten Bauteils mit dem real hergestellten Bauteil untersucht. Um dies angemessen untersuchen zu können, wurde von mehreren Bauteilen eine Formänderungsanalyse (FÄA) nach dem Umformprozess durchgeführt. Danach wurden die Ergebnisse der FÄA mit dem Ergebnis aus der Simulation abgeglichen. Hierbei wurden jeweils die erste Hauptspannung sowie die Ausdünnung verglichen. Daraus wird die Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität beurteilt.

Auf die Platinen wurde vor der Umformung in den Bereichen der beiden kurzen Bauteilseiten ein Vermessungsmuster (Gitter) elektrochemisch geätzt (galvanisches Ätzen). Diese Gitter werden durch die Umformung verzerrt und zur Erfassung der Formänderung im Nachgang mit einem optischen Verfahren vermessen. Zur Auswertung der FÄA wurde das System GOM ARGUS verwendet. Bei dieser Vermessung werden die Gitter auf dem umgeformten Blech mehrmals aus verschiedenen Winkeln fotografiert und daraus die Verformung des Gitters berechnet. Aus dieser Verformung des Gitters auf dem Blech erfolgt eine vollständige und automatische FÄA. Dieses Verfahren sowie das verwendete Messsystem haben sich in der Vergangenheit in Wissenschaft und Industrie als Standardverfahren durchgesetzt und bewährt. In Abbildung 87 ist der Vergleich zwischen dem Ergebnis der Metamodell-Simulation und einem Realbauteil, welches mit der vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung hergestellt wurde, zu sehen.

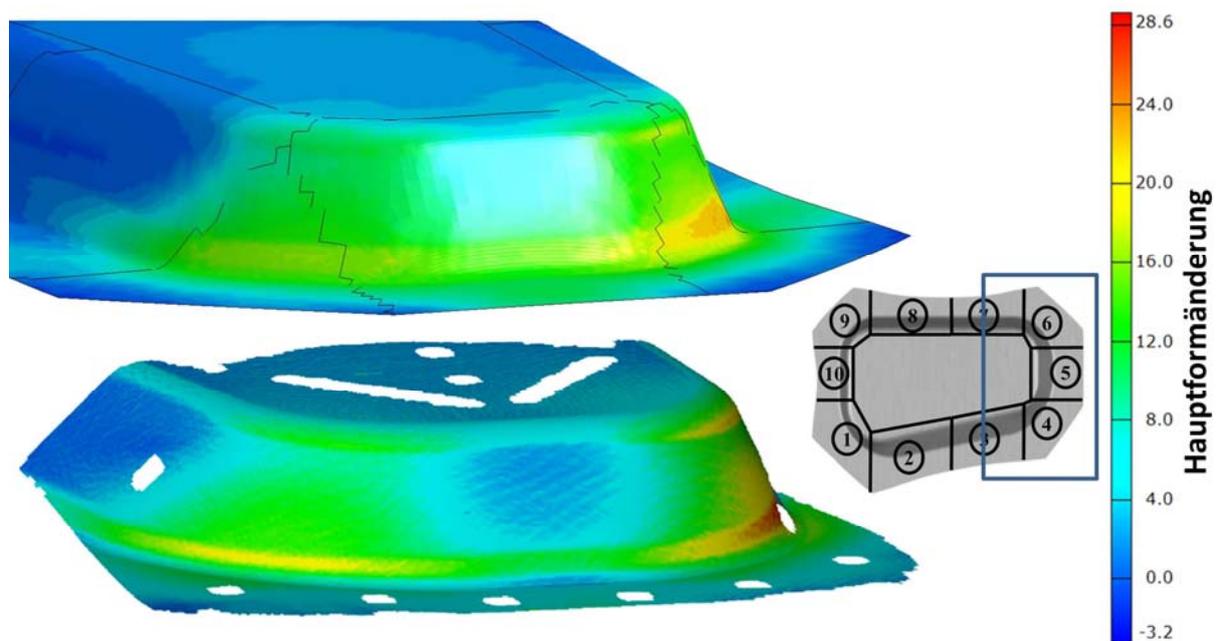


Abbildung 87: Vergleich der Hauptformänderung zwischen Simulation (oben) und geregelt hergestelltem umgeformtem Bauteil(unten).

Die Solltrajektorien wurden aus der Simulation, welche ihnen in der Abbildung 87 gegenübergestellt wird, entnommen und zur Herstellung des in der Abbildung 87 dargestellten Bauteils mithilfe der Regelung verwendet. Der bei den Versuchen verwendete Werkstoff ist der Stahlwerkstoff HC340. Dieser wurde verwendet, da das elektrochemische Ätzen auf Stahlwerkstoffen bessere Ergebnisse liefert als auf Aluminiumwerkstoffen. Die Simulation sowie der reale Versuch wurden ohne ein Applizieren von Schmierstoff auf die Platine berechnet bzw. durchgeführt. Die miteinander verglichenen Hauptspannungen zwischen Realbauteil und Simulation stimmen sehr gut in ihren Werten sowie deren Verteilung überein. Die maximale Hauptformänderung im Realbauteil mit  $\varphi=28,6$  liegt in der oberen Ecke in Bauteilzone 1. Bei der Simulation liegt der Bereich der maximalen Hauptspannung an derselben Stelle im Bauteil und weist in der Simulation mit  $\varphi=28,4$  fast denselben Wert auf.

Um den Vergleich zwischen den Ergebnissen des realen und des simulierten Bauteils abzuschließen, wurde ein Vergleich zwischen Simulation und geregelt umgeformtem Bauteil auf Basis der Ausdünnung durchgeführt (vgl. Abbildung 88). Dabei wird die Dickenverteilung zwischen umgeformtem Bauteil und Simulation als zweites Maß für die Ähnlichkeit zwischen Simulation und umgeformtem Bauteil verwendet und durch die FÄA verglichen auch hierbei sind die beiden Bauteilecken (Bauteilzone 1 und 9) diejenigen Bereiche mit den höchsten Ausdünnungen in der Simulation sowie im Bauteil. Außerdem stimmen die Ausdünnungen im Stempelradius sowie im Matrizeneinlaufradius jeweils gut überein. Die kleinen optischen Abweichungen in Abbildung 88 sind auf die begrenzten Darstellungsmöglichkeiten der Simulationsauswertung zurückzuführen.

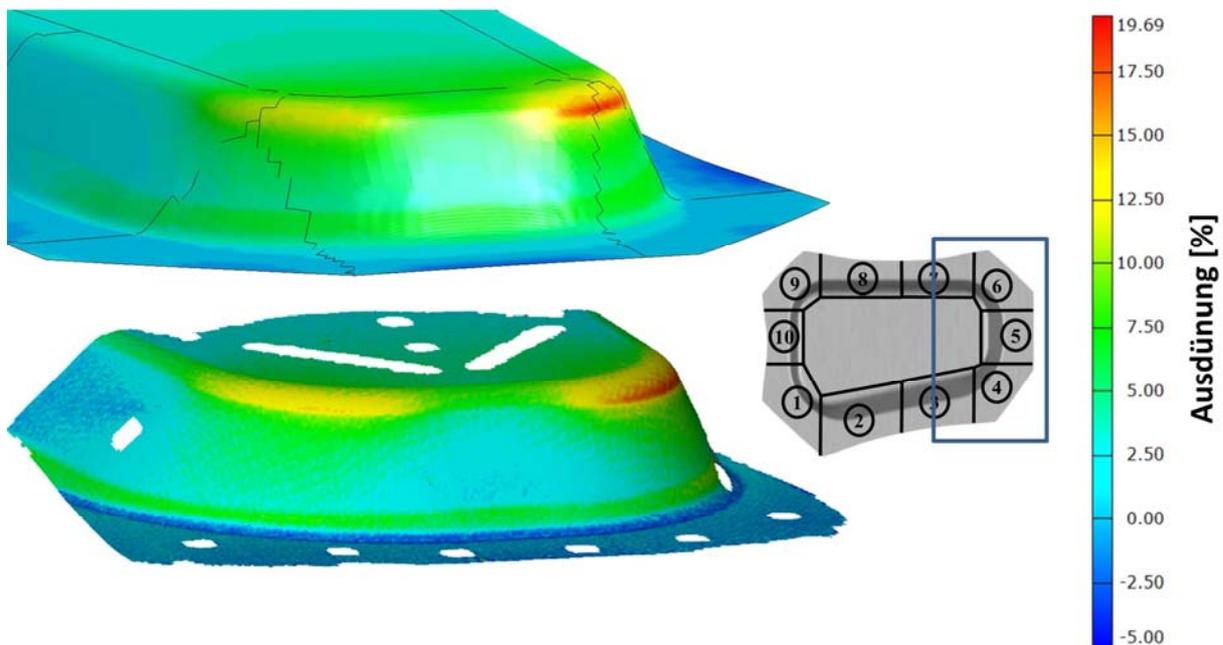


Abbildung 88: Vergleich der Ausdünnung in Prozent zwischen Simulation (oben) und geregelt umgeformtem Bauteil (unten).

Auch hier zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen dem simulierten und dem realen Bauteil. Die Maximalwerte in der Simulation sowie beim Realbauteil bei der Ausdünnung

stimmen gut überein. Hierbei liegt beim Realbauteil die maximale Ausdünnung bei 19,69 % im Vergleich dazu bei der Simulation bei 19,6 %. Somit ist eine Übereinstimmung der Absolutwerte betragsmäßig gegeben. Des Weiteren ist die Werteverteilung der Ausdünnung bei der Simulation und dem betreffenden Realbauteil von einer hohen Übereinstimmung, die höchsten Werte werden jeweils in den Ecken der Geometrie im Stempelradius erreicht. Durch die hohe Übereinstimmung bei der Hauptformänderung, der Ausdünnung und deren Verteilungen, können die Simulation und das Realbauteil vom umformtechnischen Standpunkt als übereinstimmend betrachtet werden. Zwar wurde mangels Durchführbarkeit keine Analyse des gesamten Bauteils vorgenommen, jedoch wurde mehr als ein Drittel des Gesamtbauteils betrachtet. Dies erlaubt den Schluss auf das gesamte Bauteil, zumal die Übereinstimmungen ein sehr hohes Maß erreichen.

### 8.8.2 Abgleich zwischen zwei umgeformten Bauteilen mit induzierter Prozessstörung

Zur weiteren Überprüfung der Leistungsfähigkeit des verwendeten Regelkreises wird die Hauptformänderung eines Bauteils, welches mit Beölung hergestellt wurde, mit der Hauptformänderung eines Bauteils, welches ohne Beölung hergestellt wurde, verglichen (vgl. Abbildung 89). Hierzu wurde erneut die FÄA herangezogen.

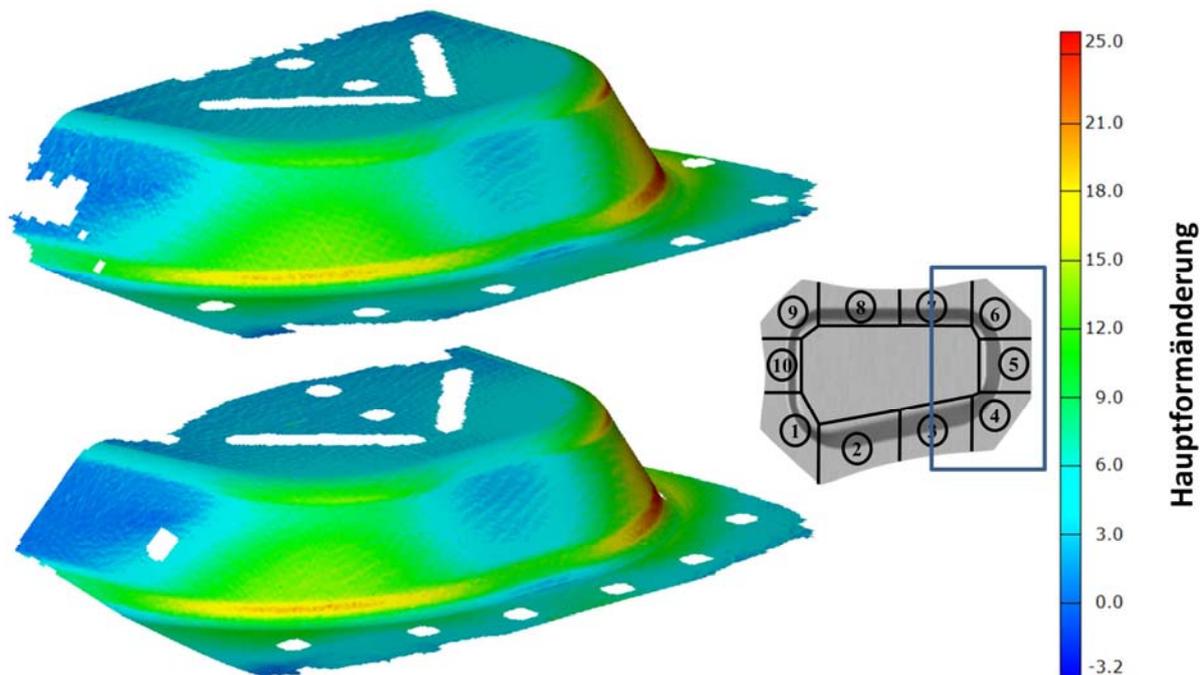


Abbildung 89: Vergleich der Hauptformänderung zweier geregelt hergestellte Umformbauteile mit (oben) und ohne (unten) Beölung.

Dabei ist die Übereinstimmung beider Bauteile in Bezug auf die Hauptformänderung sehr hoch. Sie weisen beide dieselbe maximale Hauptformänderung auf wobei beim Bauteil mit Beölung die Hauptformänderung  $\varphi=25,1$  und beim Bauteil ohne Beölung  $\varphi=25,4$  bestimmt wurde. Des Weiteren ist die Verteilung der ersten Hauptformänderung in beiden Bauteilen gleich. Hierbei stimmen bspw. die Orte der maximalen Hauptformänderung gut überein, ebenso wie die Orte zahlreicher Nebenmaxima und Minima der Hauptformänderung.

Zur Vervollständigung des Abgleichs wird die Ausdünnung in beiden Bauteilen verglichen, welche in Abbildung 90 dargestellt ist. Hierbei ergibt sich bei der Ausdünnung eine sehr hohe Übereinstimmung und die Maxima bei beiden Bauteilen liegen auf ähnlichem Niveau, bei 24,9 %, respektive bei 25,2 % Ausdünnung. Auch sind die Orte der Maximas sowie Minimas bei beiden Bauteilen dieselben. Die gesamte Verteilung der Ausdünnung ist bzgl. Betrag und Ort von großer Übereinstimmung, beide Bauteile können deshalb als übereinstimmend betrachtet werden.

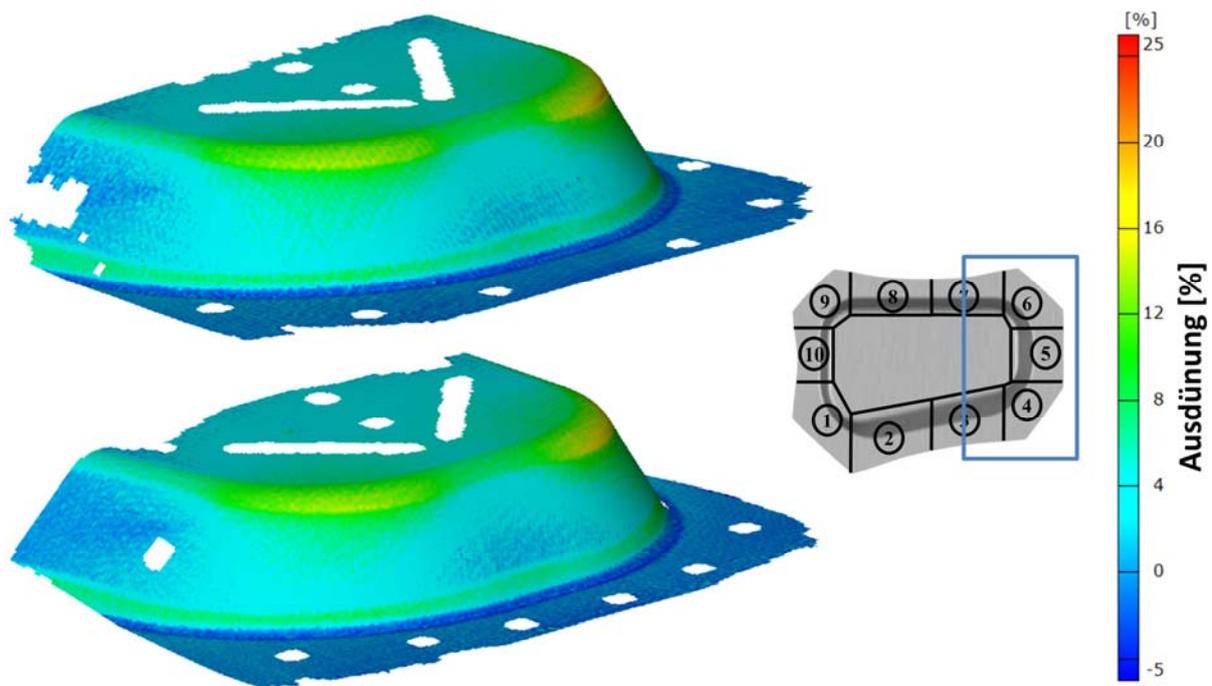


Abbildung 90: Vergleich der Ausdünnung zweier geregelter Umformbauteile mit (oben) und ohne (unten) Beölung.

### Fazit

Die hohe Übereinstimmung der Simulation und des Realbauteils, welches mithilfe der meta-modellbasierten Regelung hergestellt wurde, zeigt die hohe Leistungsfähigkeit des verwendeten Regelungsansatzes. Die FÄA beweist dies aufgrund der hohen Übereinstimmung der wichtigen umformtechnischen Zielgrößen Hauptformänderung und Ausdünnung. Dies wird durch den Vergleich eines mit der Regelung hergestellten Bauteils mit und ohne Beölung weiter verfestigt. Trotz der Schwankung der Beölung können bzgl. dieser umformtechnischen Zielgrößen mithilfe des Regelkreises zwei übereinstimmende Bauteile hergestellt werden. Diese Ergebnisse zeigen des Weiteren, dass sich die entwickelte Regelung sehr gut dazu eignet, Bauteileigenschaften bzw. die Verteilung der plastischen Dehnung im Bauteil gezielt zu beeinflussen. Dies erweitert die Möglichkeiten mithilfe des Umformprozesses die Funktionalität von Tiefziehteilen zu erhöhen und führt zu einer Steigerung der Fähigkeiten des Tiefziehprozesses.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Echtzeitregelung des Tiefziehens während des Hubs entwickelt und aufgebaut. Der hierbei verwendete Regelungsansatz basiert auf einer vorgesteuerten Trajektorienfolgeregelung. Die Solltrajektorien werden dabei aus der Simulation gewonnen und im realen Tiefziehprozess nachgestellt. Dabei enthalten die Solltrajektorien den Wert der Zargenspannung in Abhängigkeit von der Ziehtiefe sowie die Vorsteuerungswerte für die Drücke in den Hydraulikzylindern. Dabei werden die Soll-Zargenspannungen und die vorgesteuerten Hydraulikdrücke so gewählt, dass das erwünschte Prozessergebnis erzielt wird. Dieses kann vom Benutzer frei gewählt werden, bspw. kann bei der Erstellung der Solltrajektorien ein gewisses plastisches Dehnungsniveau gewählt werden.

Des Weiteren wurden Werkzeuge der stochastischen FE-Simulation und der numerischen Optimierung verwendet, um die Solltrajektorien gemäß der vom Benutzer erwünschten Eigenschaften zu erzeugen. Dieser Prozess kann für jedes Tiefziehbauteil angewendet werden, er ist nicht auf bestimmte Geometrien oder Prozesseigenschaften beschränkt. Die Solltrajektorien sind jedoch in Bezug auf den Werkstoff und der Bauteilgeometrie sensitiv und müssen spezifisch für jeden einzusetzenden Werkstoff und für jede weitere Umformgeometrie erzeugt werden. Da in der Produktion von Umformteilen die Werkstoffe sowie die Werkzeuggeometrie über den gesamten Lebenszyklus eines Werkzeuges unverändert bleiben, stellt dies keinen Nachteil dar. Die entworfene Regelung wurde auf einem Versuchswerkzeug implementiert, dessen elektronische Hardware sowie dessen Steuerungshardware im Rahmen dieser Arbeit geplant und aufgebaut wurden. Dieses Versuchswerkzeug wurde anschließend in Betrieb genommen und für umfangreiche Funktionsversuche und Fähigkeitsuntersuchungen mit der Regelung verwendet.

Zunächst wurde im Rahmen von Versuchen die Funktionalität der Regelung nachgewiesen. Danach wurden die Fähigkeiten der Regelung dahingehend untersucht, in wie weit die Robustheit des Prozesses gesteigert werden kann und sich eine Eignung der verwendeten Zustandsgröße zur Qualitätssicherung ergeben kann. Zur Vereinfachung der Betrachtung wurden neuartige Robustheitsdiagramme entwickelt, welche die Stärke einer Störung mit der fehlerfrei erreichbaren Ziehtiefe ins Verhältnis setzen. Durch die Verwendung der Regelung wird die Robustheit des Tiefziehprozesses gegenüber Störungen stark erhöht. Außerdem wird die Sensitivität gegenüber Störungen verringert und die Ziehtiefe kann selbst gegenüber ungestörten, konventionellen Tiefziehprozessen erhöht werden. Des Weiteren werden die Einflüsse von Störungen auf den Prozess teilweise komplett oder zumindest sehr stark verringert. Somit ergibt sich eine neue Möglichkeit beim Tiefziehen von Bauteilen, vor allem im Hinblick auf die stetig zunehmende Verwendung von Aluminiumwerkstoffen und hochfesten Stählen im Karosseriebau. Gerade hier sind die Ausschussraten in der Praxis bisweilen hoch, welche durch den Einsatz der Regelung verringert werden können. Durch die Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten Regelung und der damit verbundenen Reduktion der Ausschussra-

ten kann unter Verwendung solcher Werkstoffe die Wirtschaftlichkeit der Produktion erhöht werden.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnte die Eignung der Zargenspannung als Zustandsgröße, welche zur Zustandsrekonstruktion des Tiefziehprozesses verwendet wird, nachgewiesen werden. Die Zargenspannung ist fähig, den Zustand der Umformung bzw. der Abstreckung des Bauteils, das Entstehen von Reißen und die Faltenbildung mit einer hohen Genauigkeit zu detektieren. Diese Zustandsrekonstruktion ermöglicht den Einsatz der Zargenspannung als Qualitätsgröße für Tiefziehbauteile. Dadurch ergeben sich Möglichkeiten, die bisher manuell und mit großem Personaleinsatz durchgeführte, klassische Qualitätssicherung in einem hohen Maß zu automatisieren. Dies ermöglicht eine Reduktion des Personalaufwandes in der Qualitätssicherung, vor allem bei Karosseriebauteilen. Außerdem wird durch den Einsatz der Zargenspannung als Zustands- bzw. Qualitätskenngröße die Qualitätssicherung bei Tiefziehteilen von einer rein anschaulichen Prüfung zu einer quantitativen Prüfung anhand von Zargenspannungswerten weiterentwickelt. Dies erhöht die Transparenz dieses Prozesses und vereinfacht die Erhebung von Daten für Anwendungen in Bezug auf Industrie 4.0, für Big Data-Anwendungen sowie für das Anlernen von Modellen des maschinellen Lernens.

Die Untersuchung von Realbauteilen mithilfe der Formänderungsanalyse (FÄA) und der Abgleich dieser Ergebnisse mit der Simulation ergaben eine hohe Abbildungsgenauigkeit der Regelung. Die Realbauteile, welche mithilfe der Regelung hergestellt wurden, weisen eine sehr hohe Übereinstimmung bzgl. der Hauptformänderung und der Ausdünnung in kritischen Bauteilzonen mit den Werten der Simulationsergebnisse auf. Des Weiteren wurde die FÄA von Bauteilen, deren Fertigungsprozess durch eine falsche Beölung gestört wurde, mit der FÄA von Bauteilen, deren Fertigungsprozess nicht gestört wurde, verglichen. Hierbei haben alle Realbauteile trotz der induzierten Störung eine hohe Übereinstimmung bei den in der Simulation berechneten umformtechnischen Zielgrößen gezeigt. Dies beweist die Leistungsfähigkeit der Regelung sowie deren Genauigkeit bei der Zustandsrekonstruktion, sowie die Qualität des gesamten Ansatzes. Außerdem ergeben sich mit der Regelung neue Möglichkeiten in der gezielten Beeinflussung bzw. Einbringung von Bauteileigenschaften, wie beispielsweise bestimmter Abstreckungen für die spätere Bauteilverwendung. Diese Eigenschaften können mit dahingehend geplanten bzw. optimierten Solltrajektorien gezielt in die Bauteile eingebracht werden.

## 9.2 Ausblick

Der gewählte Regelungsansatz enthält das Potenzial zur Weiterentwicklung, bspw. für eine Erweiterung des Regelkreises zu einer adaptiven Regelung, wodurch eine weitere Steigerung der Fähigkeiten des Regelkreises bewirkt werden kann. Bei einer adaptiven Regelung werden mehrere verschiedene Solltrajektorien für einzelne Prozesssituationen hinterlegt. Beispielsweise werden zum Anfahren eines neuen Coils andere Solltrajektorien verwendet als in der Mitte einer Abpresskampagne. Zudem können bei einer solchen adaptiven Regelung verschiedene Solltrajektorien für verschiedene Werkzeugtemperaturen verwendet werden. Denkbar ist außerdem die adaptive Regelung auf Basis einer vorherigen Werkstoffkennwertbe-

stimmung mithilfe einer Wirbelstrommessung (vgl. [Hei11]) zu erweitern und in Abhängigkeit davon einzelne Platinen mit speziell angepassten Solltrajektorien zu verarbeiten. Diese Ansätze der adaptiven Regelung erlauben einen noch besseren und gezielteren Einsatz des entworfenen Regelungsansatzes. Dessen Leistungsfähigkeit wird nochmals stark erhöht, der Teileausschuss beim Tiefziehen komplexer Bauteile mit hochfesten- sowie mit Aluminiumwerkstoffen weiter verringert und die Einsatzmöglichkeiten der Regelung erweitert und flexibilisiert. In Abbildung 91 ist beispielhaft das Blockschaltbild eines solchen adaptiven Regelkreises dargestellt, in einer möglichen Fortführung dieser Arbeit aufgezeigt.

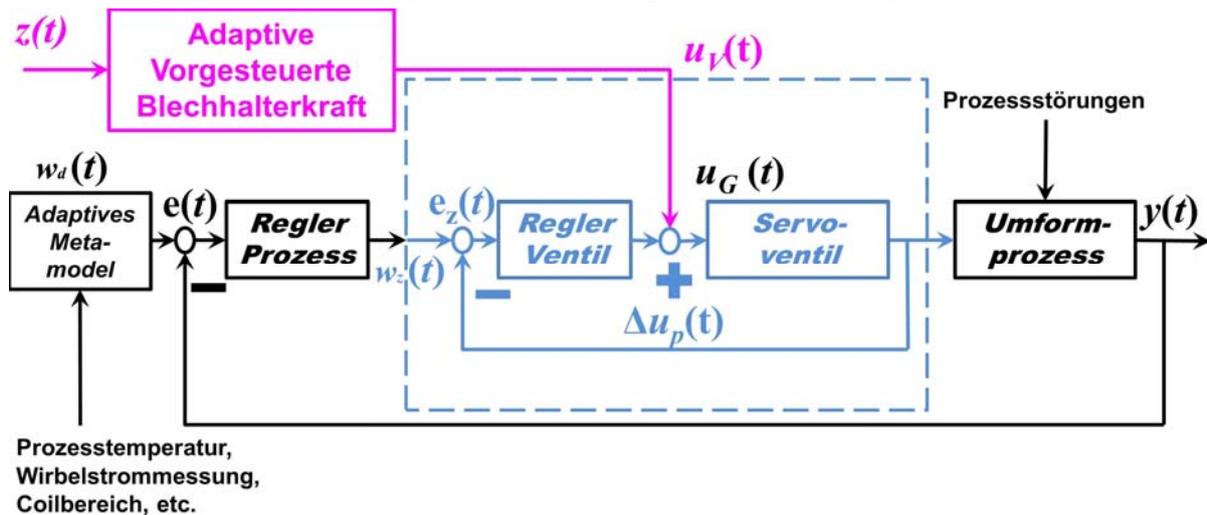


Abbildung 91: Weiterentwickeltes Regelkreisdesign einer vorgesteuerten Trajektorien-Folgeregelung mit adaptiven Solltrajektorien.

Des Weiteren kann die Regelgröße der ‘Zargenspannung‘ für die Qualitätssicherung eingesetzt werden, ohne dabei regelnd in den Prozess eingreifen zu müssen. Dies ist vor allem bei niederpreisigen Verstärkungsteilen sowie Strukturbauteilen der Fahrzeugkarosserie von Interesse. Einerseits, um einen quantitativen Eigenschaftsnachweis zu erbringen, beispielsweise um eine bestimmte Abstreckung bei crashrelevanten Bauteilen nachzuweisen. Andererseits bei kostengünstigen Bauteilen, bei denen eine Regelung wirtschaftlich nicht darstellbar ist. Weiterhin ist ein Einsatz für Bauteile mit hoher Reißergefahr oder für Bauteile, welche die gewünschte Eigenschaft nicht erfüllen denkbar, um diese dennoch automatisiert aussondern zu können. Ein großes Einsatzgebiet dieser Art der Qualitätssicherung ergibt sich zudem beim Tiefziehen von Außenhautteilen. Hierbei wird eine aufwendige Qualitätssicherung mit hohem Personalaufwand betrieben. Die Zargenspannung kann als absolute Zustandsgröße in einer vollautomatisierten Qualitätssicherung oder zur Vorauswahl von gefährdeten Bauteilen eingesetzt werden. Dabei kann in einer Mensch-Maschine-Kooperation ein Werker die vorausgewählten Bauteile oder Bauteilbereiche näher untersuchen.

Weiterhin kann mit der Zargenspannung als quantitative Qualitätsgröße ein großer Schritt bei der Herstellung von Tiefziehteilen in Richtung Industrie 4.0 unternommen werden. Durch die quantitative Erfassung von Bauteileigenschaften in Kombination mit Data-Mining-Strukturen können tiefgehende, auf Statistik basierende Erkenntnisse über die Herstellung von Tiefziehteilen erzielt werden. Mit diesen Daten können Anwendungen des maschinellen Lernens, wie

beispielsweise neuronale Netze oder Support Vector Maschinen, entwickelt werden. Diese ermöglichen es, langfristige Prozesseingriffe durchzuführen oder diese zu prognostizieren. Hierbei wäre eine Kombination der erfassten Zargenspannung mit den Werten einer auf Wirbelstrom basierenden Werkstoffkennwerterfassung denkbar.

Um diese Methodik auszubauen können die Betriebsdaten moderner Servopressen, welche für den Pressenbetrieb notwendigerweise erfasst werden, mit den Daten der Zargenspannungssensoren sowie den Daten der Werkstoffkennwerterfassung auf Basis von Wirbelstrommessungen kombiniert werden. Dies wäre interessant für die Entwicklung einer passiven Prozessüberwachung mithilfe einer Anwendung des maschinellen Lernens, welche anhand der erfassten Pressenbetriebsdaten Abschätzungen über den Prozesszustand bzw. das Bauteil trifft. Dazu wird ein KI-System, beispielsweise ein Convolutional Neural Network, mit den Pressenbetriebsdaten, den erfassten Zargenspannungen des Prozesses und den Werkstoffkennwerten angelemt. Damit wäre der Einsatz einer KI ausschließlich auf Basis der Betriebsdaten der Servopresse sinnvoll, welche im späteren Betrieb grobe Abschätzungen über die Bauteilqualität oder die Prozessqualität vornimmt. Dies würde die Möglichkeiten der Prozessüberwachung bei geringen Kosten deutlich erweitern, da die passive Prozessüberwachung keine zusätzlichen Sensoren im Werkzeug oder in der Umformpresse benötigt, sondern auf die vorhandenen zurückgreift.

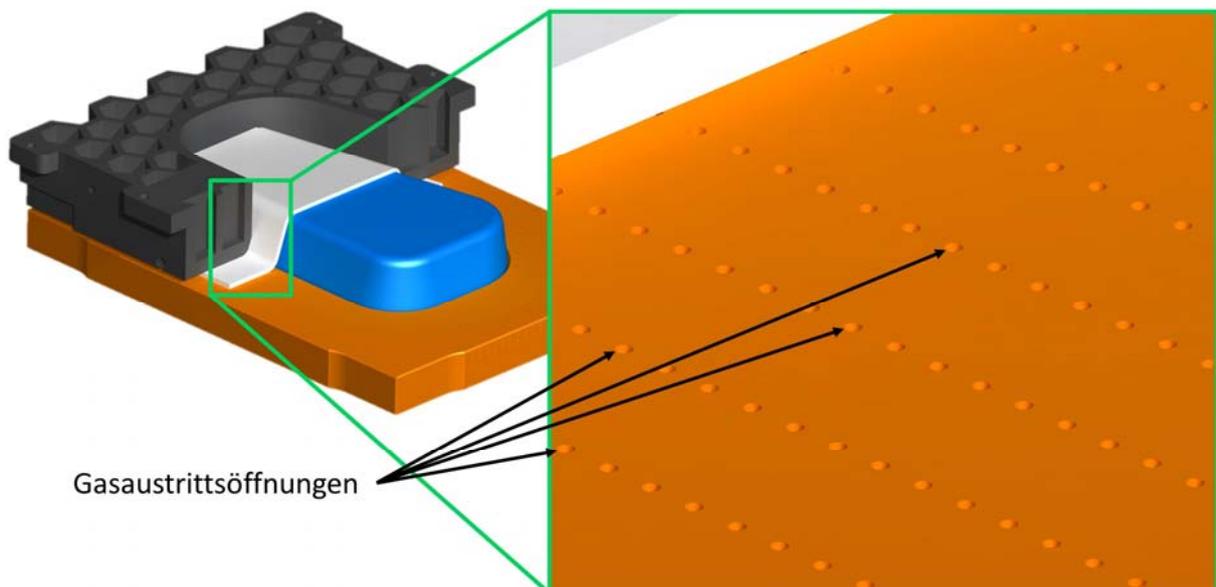


Abbildung 92: Weiterentwicklung des Aktors im Tiefziehprozess vom segmentelastischen Blechhalter mit einer gezielt, lokal veränderlicher Gasschmierung.

Eine weitere mögliche Weiterentwicklung betrifft den Blechhalter in seiner Funktion als Aktor des Gesamtsystems. Der bisher als Aktor verwendete segmentelastische Blechhalter beruht auf dem Prinzip der lokal einstellbaren Flächenpressung. Da der segmentelastische Blechhalter jedoch trotz seiner Pyramidenstruktur eine stoffliche Verbindung zwischen den Segmenten besitzt, ist eine Verkopplung der Stellsignale und somit eine gegenseitige Beeinflussung der Flächenpressungen der benachbarten Segmente nicht zu verhindern. Diesem Problem kann

mit Verwendung der in [Sin14] beschriebenen Trockenschmierung auf Basis von Stickstoff oder CO<sub>2</sub> begegnet werden. Durch diese Schmierung wird der Reibungskoeffizient lokal zwischen Blechhalter, Blechoberfläche und Matrize stark beeinflusst. In Abbildung 92 ist ein solches Werkzeugkonzept beispielhaft dargestellt.

Würde diese Schmierung mit dem entwickelten Regelkreis verbunden und die Ventiltechnik hoch variabel gestaltet, kann die Rückhaltung anstatt mit der Normalkraft des Blechhalters stattdessen mit einer Veränderung des Reibkoeffizienten beeinflusst werden. Die Vorteile eines solchen Systems liegen in einer erheblich einfacheren technischen Ausstattung, sowie verglichen mit der bisher verwendeten Hydraulik, in den niedrigen Drücken. Weiterhin kann, bedingt durch die bereits versuchsweise von [Sin14] verwendete Trockenschmierung, gänzlich auf Schmierstoff verzichtet werden. Die Regelung des Reibkoeffizienten und dadurch der Rückhaltung des Bauteils kann je nach Verteilung und Anzahl der Bohrungen sowie der Ventile, viel feiner und granularer vorgenommen werden als dies mit dem segmentelastischen Blechhalter möglich ist. Ebenso können die einzelnen Aktoren physisch völlig voneinander entkoppelt werden, was sich positiv auf die Regelungsqualität und die Regelungsgenauigkeit auswirken würde.

## 10 Anhang

### 10.1 Solltrajektorien für den Stahlwerkstoff HC340

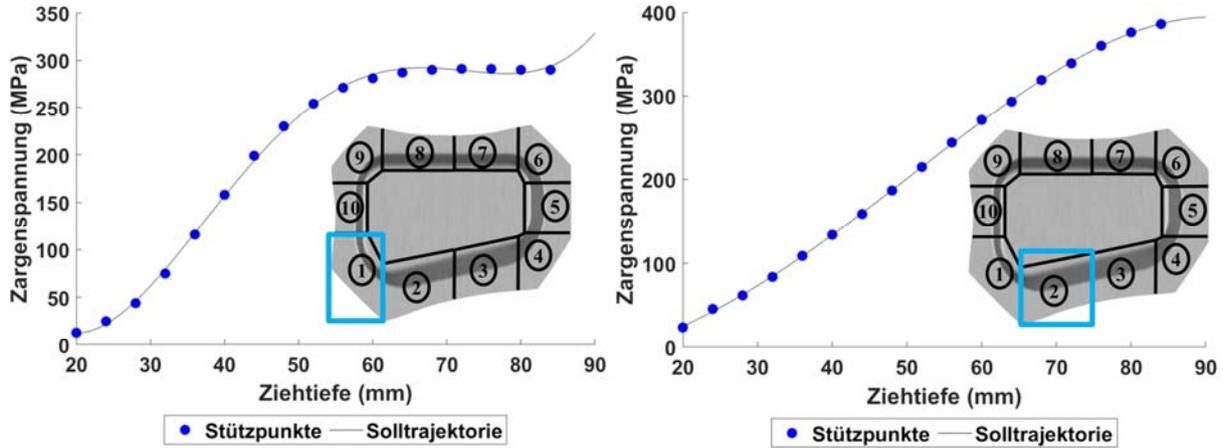


Abbildung 93: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 1 und 2 mit dem Werkstoff HC340, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

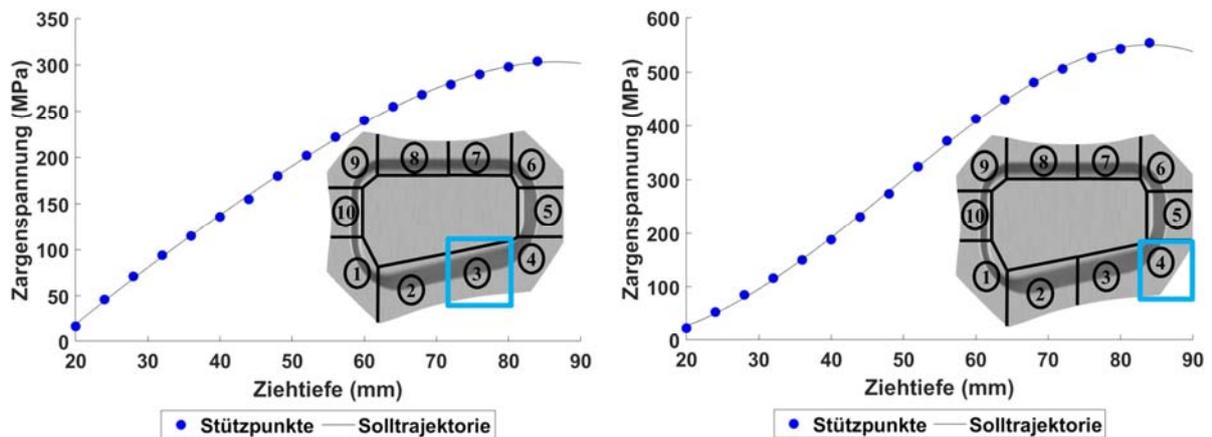


Abbildung 94: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 3 und 4 mit dem Werkstoff HC340, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

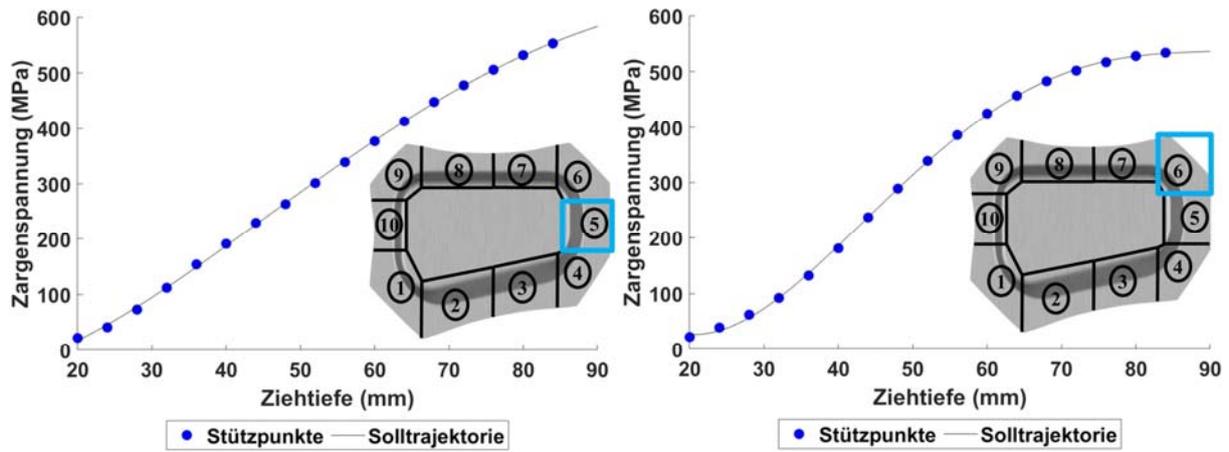


Abbildung 95: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 5 und 6 mit dem Werkstoff HC340, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

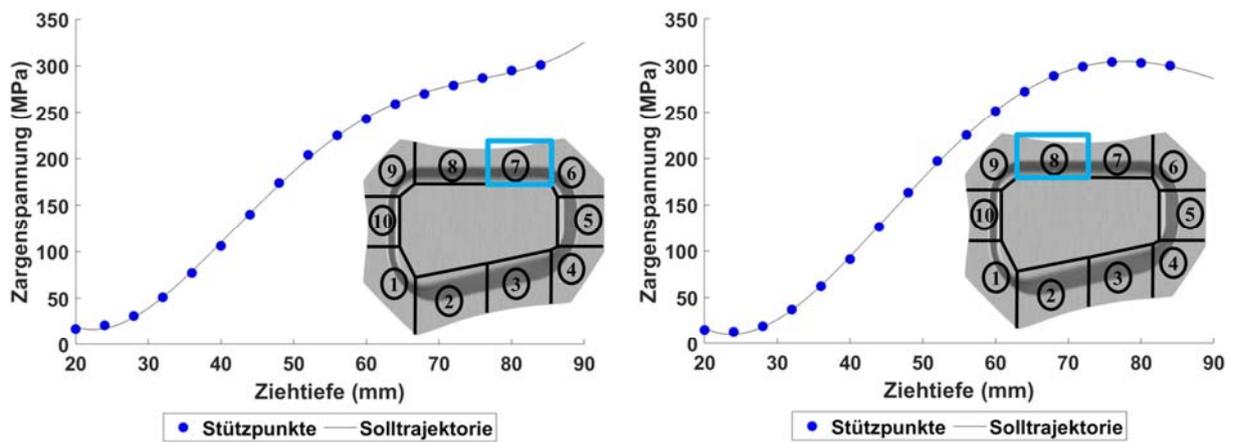


Abbildung 96: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 7 und 8 mit dem Werkstoff HC340, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

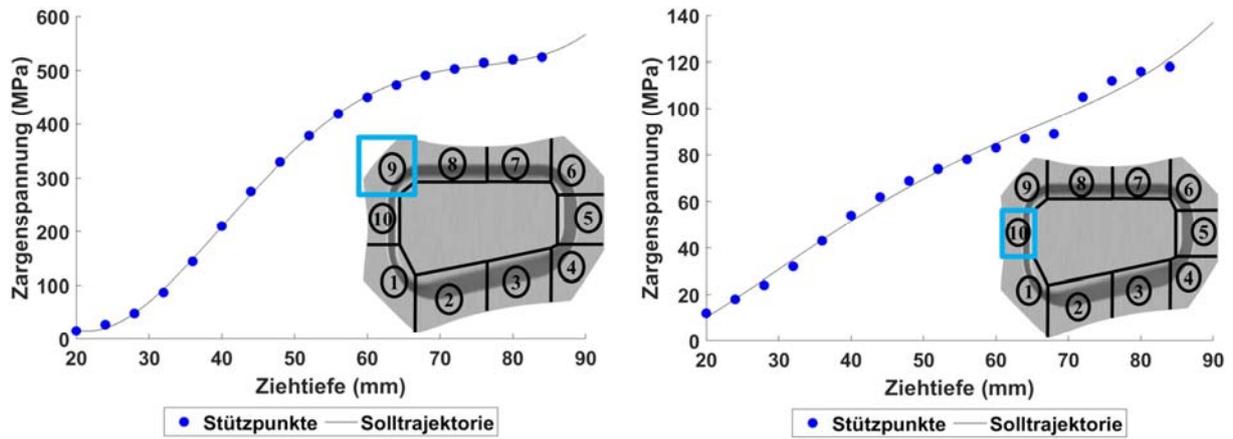


Abbildung 97: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 9 und 10 mit dem Werkstoff HC340, welche aus

## 10.2 Metamodell für den Aluminiumwerkstoff AA6016

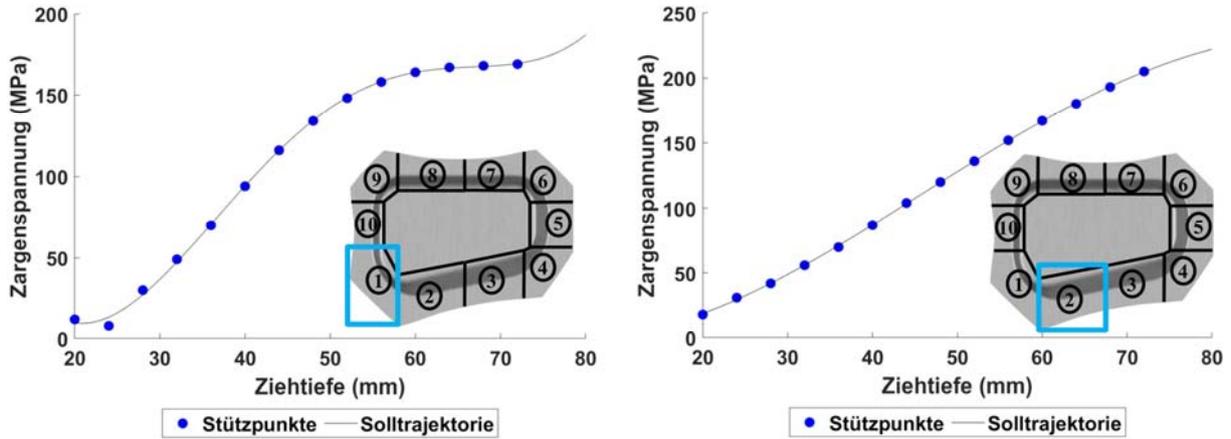


Abbildung 98: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 1 und 2 mit dem Werkstoff AA6016, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

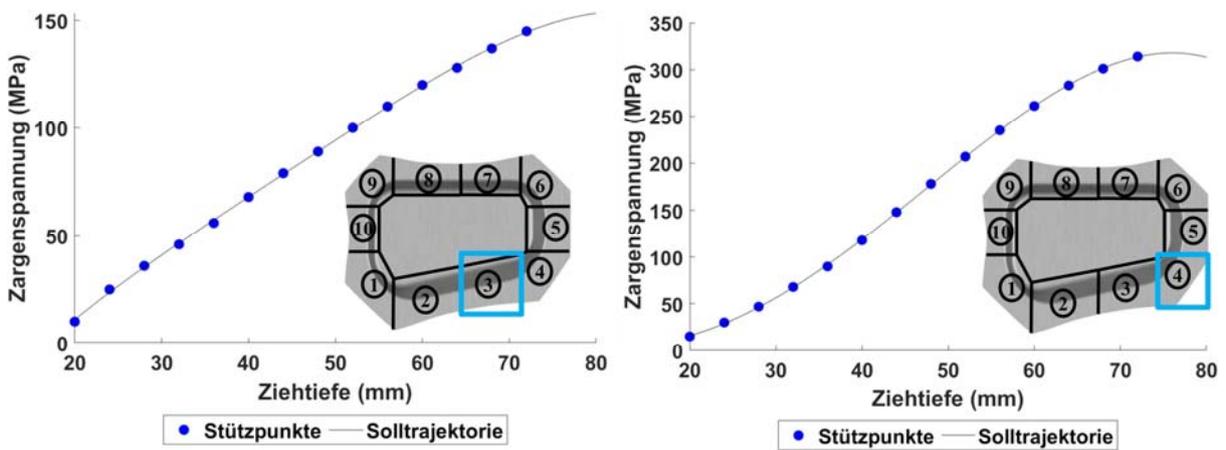


Abbildung 99: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 3 und 4 mit dem Werkstoff AA6016, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

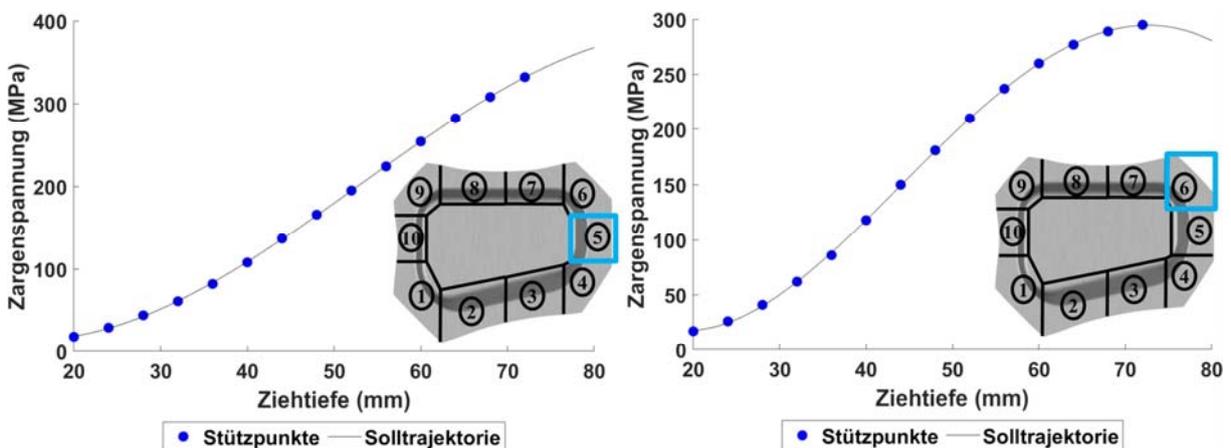


Abbildung 100: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 5 und 6 mit dem Werkstoff AA6016, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

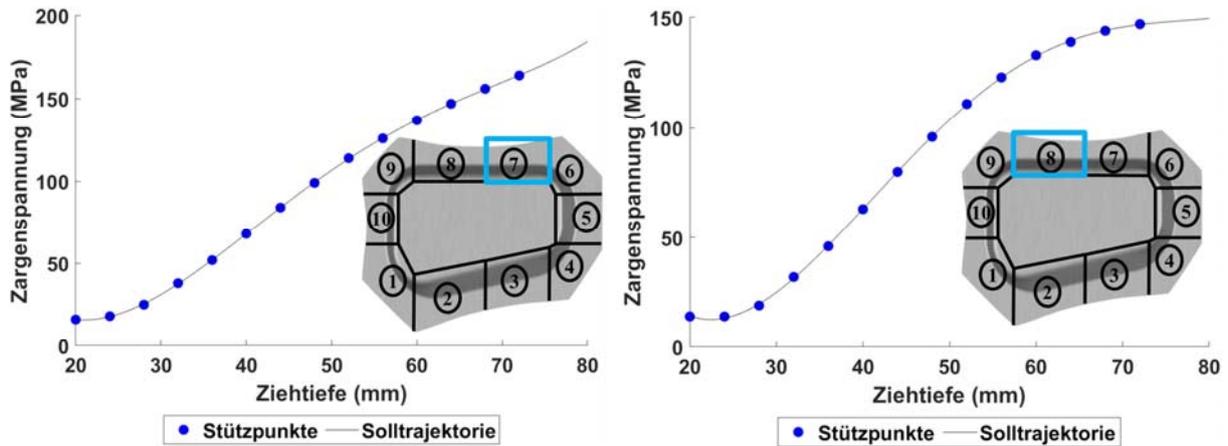


Abbildung 101: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 7 und 8 mit dem Werkstoff AA6016, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

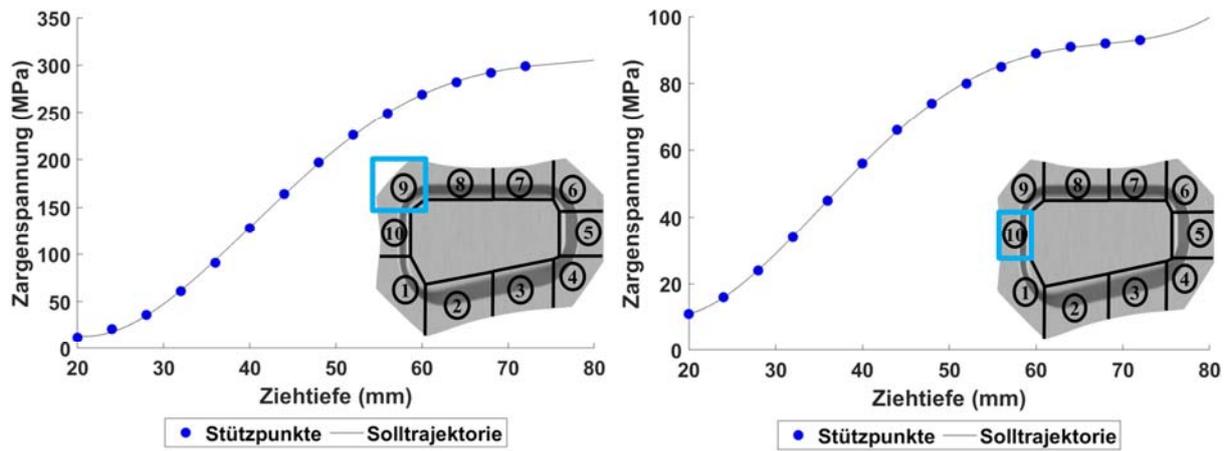


Abbildung 102: Solltrajektorie für die Bauteilzonen 9 und 10 mit dem Werkstoff AA6016, welche aus der Simulation extrahiert wurden.

### 10.3 Materialkarte für den Stahlwerkstoff HC340

Tabelle 14: Werkstoffkennwerte HC340.

Dichte	E-Modul	n-Wert	P1	P2	R <sub>0</sub>	R <sub>45</sub>	R <sub>90</sub>
7,85 kg/m <sup>3</sup>	207000 MPa	0,28	658,9	0,124	0,89	0,963	1,194

Umformgrad [-]	Fließspannung [MPa]
0,000	0,000
0,010	321,759
0,020	353,792
0,040	396,860
0,060	428,027
0,080	452,469
0,100	472,259
0,120	488,572
0,140	502,193
0,160	513,688
0,180	523,487
0,200	531,926
0,250	548,674
0,300	561,297
0,350	571,448
0,400	580,078
0,450	587,735
0,530	598,702
0,610	608,640
0,690	617,876
0,770	626,592
0,850	634,903
0,930	642,891
1,000	649,666

#### 10.4 Materialkarte für den Aluminiumwerkstoff AA6016

Tabelle 15: Werkstoffkennwerte AA6016.

Dichte	E-Modul	n-Wert	P1	P2	R <sub>0</sub>	R <sub>45</sub>	R <sub>90</sub>
2,7 kg/m <sup>3</sup>	69000 MPa	0,33	412	0,26	0,75	0,504	0,736

Tabelle 16: Fließkurve AA6016

Umformgrad [-]	Fließspannung [Mpa]
0,000	0,000
0,010	129,044
0,020	153,805
0,040	186,506
0,060	209,460
0,080	227,001
0,100	240,945
0,120	252,328
0,140	261,822
0,160	269,900
0,180	276,898
0,200	283,066
0,250	295,964
0,300	306,565
0,350	315,803
0,400	324,159
0,450	331,897
0,530	343,358
0,610	353,993
0,690	364,023
0,770	373,594
0,850	382,809
0,930	391,748
1,000	399,389

### 10.5 Gesamtversuchsplan

Versuch Nr.	Material	Prozessführung	Störung	Versuchsgegenstand
1	AA6016	konventionell	Keine	Robustheitsuntersuchung
2	AA6016	konventionell	Keine	Robustheitsuntersuchung
3	AA6016	konventionell	Keine	Robustheitsuntersuchung
4	AA6016	konventionell	Keine	Robustheitsuntersuchung
5	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
6	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
7	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
8	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
9	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
10	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
11	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
12	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
13	AA6016	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
14	AA6016	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
15	AA6016	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
16	AA6016	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
17	AA6016	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
18	AA6016	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
19	AA6016	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
20	AA6016	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
21	AA6016	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
22	AA6016	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
23	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
24	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
25	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
26	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
27	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
28	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung

<b>29</b>	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
<b>30</b>	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
<b>31</b>	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
<b>32</b>	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
<b>33</b>	HC340	geregelt	Keine	Robustheitsuntersuchung
<b>33</b>	HC340	geregelt	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>34</b>	HC340	geregelt	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>35</b>	HC340	geregelt	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>36</b>	HC340	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>37</b>	HC340	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>38</b>	HC340	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>39</b>	HC340	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>40</b>	HC340	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>41</b>	HC340	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>42</b>	HC340	konventionell	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>43</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>44</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>45</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>46</b>	HC340	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>47</b>	HC340	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>48</b>	HC340	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>49</b>	HC340	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>50</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>51</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>52</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>53</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>55</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>55</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>56</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>57</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung

<b>58</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>59</b>	AA6016	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>60</b>	AA6016	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>61</b>	AA6016	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>62</b>	AA6016	konventionell	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>63</b>	AA6016	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>64</b>	AA6016	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>65</b>	AA6016	geregelt	Fehlbeschnitt	Robustheitsuntersuchung
<b>66</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>67</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>68</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>69</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsuntersuchung
<b>70</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>71</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>72</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Robustheitsuntersuchung
<b>73</b>	HC340	geregelt	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>74</b>	HC340	geregelt	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>75</b>	HC340	geregelt	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>76</b>	HC340	konventionell	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>77</b>	HC340	konventionell	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>78</b>	HC340	konventionell	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>79</b>	HC340	konventionell	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>80</b>	HC340	geregelt	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>81</b>	HC340	geregelt	Walzrichtung	Robustheitsuntersuchung
<b>82</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>83</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>84</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>85</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>86</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>87</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung

<b>88</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>89</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>90</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>91</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>92</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>93</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>94</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>95</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>96</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>97</b>	AA6016	geregelt	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>98</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>99</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>100</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>101</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>102</b>	AA6016	konventionell	Alterung	Robustheitsuntersuchung
<b>103</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>104</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>105</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>106</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>107</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>108</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>109</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>110</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>111</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>112</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>113</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>114</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>115</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>116</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>117</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung

<b>118</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>119</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>120</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>121</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>122</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>123</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>124</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>125</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>126</b>	HC340	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>127</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>128</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>129</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>130</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>131</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>132</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>133</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>134</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>135</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>136</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>137</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>138</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>139</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>140</b>	AA6016	konventionell	Keine	Signaluntersuchung
<b>141</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>142</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>143</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>144</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>145</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>146</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>147</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm

<b>148</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>149</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>150</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>151</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>152</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>153</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>154</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>155</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>156</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>157</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>158</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>159</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>160</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>161</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>162</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>163</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>164</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>165</b>	HC340	konventionell	Keine	Arbeitsdiagramm
<b>166</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>167</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>168</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>169</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>170</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>171</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>172</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>173</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>174</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>175</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>176</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>177</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm

<b>178</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>179</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>180</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>181</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>182</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>183</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>184</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>185</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>186</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>187</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>188</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>189</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>190</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>191</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>192</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>193</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>194</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>195</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>196</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>197</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>198</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>199</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>200</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>201</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>202</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Arbeitsdiagramm
<b>203</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>204</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>205</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>206</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>207</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm

<b>208</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>209</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>210</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>211</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>212</b>	AA6016	geregelt	Keine	Simulationsabgleich
<b>213</b>	AA6016	geregelt	Keine	Simulationsabgleich
<b>214</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich
<b>215</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich
<b>216</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>217</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>218</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>219</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>220</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>221</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>222</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>223</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>224</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>225</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>226</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>227</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>228</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>229</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>230</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>231</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>232</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>233</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>234</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>235</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>236</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>237</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm

<b>238</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>239</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>240</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>241</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>242</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>243</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>244</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>245</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>246</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>247</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>248</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>249</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>250</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>251</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>252</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>253</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>254</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>255</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>256</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>257</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>258</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>259</b>	AA6016	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>260</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>261</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>262</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>263</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>264</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>265</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>266</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>267</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm

<b>268</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>269</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>270</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>271</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>272</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>273</b>	AA6016	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>274</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>275</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>276</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>277</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>278</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>279</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>280</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>281</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>282</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>283</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>284</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>285</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>286</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>287</b>	HC340	konventionell	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>288</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>289</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>290</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>291</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>292</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>293</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>294</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>295</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>296</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>297</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm

<b>298</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>299</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>300</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>301</b>	HC340	geregelt	Fehllage	Robustheitsdiagramm
<b>302</b>	HC340	geregelt	keine	Simulationsabgleich
<b>303</b>	HC340	geregelt	keine	Simulationsabgleich
<b>304</b>	HC340	geregelt	Keine	Simulationsabgleich
<b>305</b>	HC340	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich
<b>306</b>	HC340	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich
<b>307</b>	HC340	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich
<b>308</b>	AA6016	geregelt	keine	Simulationsabgleich
<b>309</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich
<b>310</b>	AA6016	geregelt	Schmierung	Simulationsabgleich

## 11 Literaturverzeichnis

- [Ada79] Adams, D.: The Hitchhiker's Guide to the Galaxy (Per Anhalter durch die Galaxis). Harmony Books, New York 1979
- [All16] Allwood, J.M.; Duncan, S.R.; Cao, J.; Groche, P.; Hirt, G.; Kinsey, B., Kuboki, T.; Liewald, M.; Sterzing, A.; Tekkaya, A.E.: Closed-loop control of product properties in metal forming, CIRP Annals Manufacturing Technology, 2016
- [And06] Andrieux, S.; Baranger, T.N.; Ben Abda, A.: Solving Cauchy problem by minimizing an energy-like functional, Institute of Physics Publishing – Inverse Problems 22, S. 115–133, 2006
- [Arn10] Arnold; E.: Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung, Skript zur Vorlesung, Universität Stuttgart 2010
- [Alt08] Altperter, I.; Sklarczyk, C.; Kopp, M.; Kröning, M.; Voges-Schwieger, K.; Hübner, S.; Behrens, B.-A.: Nondestructive Characterizing Stress States in Conventional Deep Drawing Processes by Means of Electromagnetic Methods, Proceeding of the ENDE Conference, Korea, 2008
- [Aut17] Autoform: Autoform documentation, Version R7, Pfäffikon Schweiz, 2017
- [Ban94] Bandemer, H. ; Bellmann, A.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Statistische Versuchsplanung 4, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig, 1994
- [Ban00] Banabic, D.; Bunge, H. J. ; Pöhlandt, K. ; Tekkaya, A.E.: Formability of Metallic Materials, Springer, 2000
- [Ban10] Banabic, D.: Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. Springer, Berlin, 2010
- [Bar03] Barlat, F. ; Brem, J.C. ; Yoon, J.W. ; Chung, K. ; Dick, R.E. ; Lege, D.J. ; Pourboghrat, F.; Choi, S.-H. ; Chu, E.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets part1: theory, International Journal of Plasticity 19, S.1297–1319, 2003
- [Bar16a] Barthau, M.; Liewald, M.; Radonjic, R.: New die concept using a passive elastic blank holder, Proceedings of the IDDRG 2016
- [Bar16b] Barthau, M.; Liewald, M.: New approach on controlling strain distribution manufactured in sheet metal components during deep drawing process, Proceedings of the ICTP 2016
- [Bar16c] Barthau, M.; Liewald, M.: New Approach for Closed Loop Control of Deep Drawing Process for a control intervention during deep drawing stroke, WGP Jahreskongress Hamburg, 2016

- [Bar17a] Barthau, M.; Liewald, M.; Held, C.: Improved process robustness by using closed loop control in deep drawing applications, Proceedings of the IDDRG 2017
- [Bar17b] Barthau, M.; Liewald, M.; Held, C.: Verification of a Closed loop control for deep drawing process, Proceedings of the FTF 2017
- [Bec01] Beck, S.: Aktive Ziehsicken – Den Ziehprozess mit aktiven Ziehsicken steuern, wt Werstatttechnik online Jahrgang 91 Heft 10, Springer Verlag Düsseldorf, 2001
- [Bec04] Beck, S.: Optimierung der Zargenspannung beim Ziehen unregelmäßiger Blechformteile. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, IFU, 2004
- [Bec18] Beckhoff GmbH: TwinCat 2 Dokumentation, Verl, 2017
- [Bir13] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen. Springer Vieweg, Berlin, 2013
- [Bla08] Blaich, C.; Liewald, M.: Neue Ansätze zur Regelung von Tiefziehprozessen. In: Mathias Liewald (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Vortragstexte zur Veranstaltung Internationale Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“; Werkstoff-Informationsgesellschaft; Frankfurt 2008. S. 391-412
- [Bla08b] Blaich, C.; Liewald, M.: Closed Loop Control Strategy for Deep Drawing Processes Based on Utilizing Part Wall Stress. In Proceedings of the iddrg 2008 Conference Best in Class Stamping Olofström, Sweden, 16-18 June 2008. PP. 545-556
- [Bla10] Blaich, C.; Liewald, M.: Erfassung und Regelung lokaler Zargenspannungen zur Optimierung von Tiefziehprozessen. In: Mathias Liewald (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Vortragstexte zur Veranstaltung Internationale Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“; Werkstoff-Informationsgesellschaft; Frankfurt, S. 381-414, 2010
- [Bla10b] Blaich, C.; Liewald, M.; Wurster, K.: Optimization of Blank Holder Force Distribution for Deep Drawing by the Use of Wrinkle Criteria, ANSYS Conference & 28. CADFEM Users' Meeting, Aachen, 3.-5. November 2010
- [Bla12] Blaich, C.: Robuster Tiefziehprozess durch Erfassung und Optimierung der örtlichen Bauteilqualität, Dissertation, Universität Stuttgart, 2012
- [Bie10] Biehl, S.; Staufenbiel, S.; Hauschild, F.: Novel measurement and monitoring system for forming processes based on piezoresistive thin film systems. Microsystem Technologies, 16, S 879-883, 2010
- [Bra94] Brammer, K.; Siffling G.: Kalman-Bucy-Filter: Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung. Oldenbourg, München, Wien, 4. Auflage, 1994

- [Brä02] Bräunlich, H.: Blecheinzugsregelung beim Tiefziehen mit Niederhalter – ein Beitrag zur Erhöhung der Prozessstabilität. Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2002
- [Bos13] Bosch GmbH: Hydraulische Formelsammlung, Stuttgart 2013
- [Box51] Box, G. E. P. and Wilson, K.B.: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions Series B 13(1):1–45, 1951
- [Den07] Dennis B. H.; Jin, W.; Dulikravich, G. S.; Jaric, J.: Application of the Finite Element Method to Inverse Problems in Solid Mechanics. International Journal of structural changes in solids – Mechanics and Applications, Volume 3, Number 2, June 2011, pp.11-21
- [Doe98a] Doege, E.; Dröger, K.; Elend, L.-E.: Einsatz passiver nachgiebiger Niederhaltersysteme. Bänder Bleche Rohre, Jahrgang 39, 1998. S. 24 ff
- [Doe98b] Doege, E.; Kracke, M.: Vorhersage der Faltenbildung in geneigten Ziehteilzangen mit elementaren Ansätzen, Blech, Rohre und Profile 11/98, 1998
- [Doe02] Doege, E.; Seidel, H.-J.; Griesbach, B.; Yun, J.-W.: Contactless on-line measurement of material flow for closed loop control of deep drawing. In: Journal of Materials Processing Technology 130/131 2002. pp. 95-99
- [Doe03] Doege, E.; Schmidt-Jürgensen, R.; Huinink, S.; Yun, J.-W.: Development of an optical sensor for the measurement of the material flow in deep drawing processes. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 52 (2003), S.225-228
- [Doe07] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch der Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen; Universität Hannover; Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2007
- [DIN03a] DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003
- [DIN03b] DIN 8584: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen – Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003
- [DIN03c] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag Berlin, 2003
- [DIN03d] DIN 50114; Prüfung metallischer Werkstoffe; Zugversuch ohne Feindehnungsmessung an Blechen, Bändern oder Streifen mit einer Dicke unter 3 mm, Beuth Verlag Berlin, 2003
- [DIN09a] DIN 12004-1: Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder – Bestimmung der Grenzformänderungskurve, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- [DIN09b] Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- [Dyn17] Dynardo: OptiSLang documentation, Version 7.1.0, Weimar, 2017

- [Ele01] Elend, L.-E.: Einsatz elastischer Niederhaltersysteme zur Erweiterung der Prozessgrenzen beim Tiefziehen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [Emr13] Emrich, Albert: Systematik zur Robustheitsanalyse von Umformprozessen für Karosserieteile aus Blech. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, IFU, 2013
- [End12] Endelt, B.; Toemmerup, S.; Danckert, J. : Experimental verification of a deep drawing tool system for adaptive blank holder pressure distribution, Journal of Materials Processing Technology, 2529-2540, 201, 2013
- [Faa09] Faaß, I.: Prozessregelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken. Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [Fah07] Fahrmeir ; Künstler ; Pigeot ; Tutz: Statistik, Der Weg zur Datenanalyse. 5. Springer, 2007
- [Fen89] Fenn, R.: Closed-loop Control of forming stability during metal stamping, Phd Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1989
- [Fis16] Fischer, P.; Heingärtner, J.; Hora, P.; Harsch, D.; Renke, Y.: A knowledge-based control system for the robust manufacturing of deep drawn parts, ICTP, 2017
- [For00] Forstmann, U.: Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen. Dr.- Ing. Dissertation, Produktionstechnisches Zentrum Berlin, 2000
- [Gft02] Gesellschaft für Tribologie.: Tribologische Grundlagen, Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [Ger10] Li; Gerlach; Luo; Wierzbicki: Prediction of shear-introduced fracture in sheet metal forming, p.12, Materials and Processing Technologies, 2010
- [Ges10] Gese, H., Dell, H., Metzenbacher, G.: Beschreibung der isotropen, isotropkinematischen und anisotropen Verfestigung von Blechwerkstoffen-experimentelle Aufnahme und numerische Modellierung, Tagungsband 13. Workshop Simulation in der Umformtechnik, Stuttgart, 2010
- [Gil73] Gilles E.-D.: Systeme mit verteilten Parametern: Einführung in die Regelungstheorie. München: Oldenbourg, 1973. ISBN: 978-3-486-33911-7
- [Gir04] Girschewski, B.: Optimierung des Umformprozesses ziehkritischer Blechteile. Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität München, 2004
- [Gri00] Griesbach, B.: In- Prozess Stoffflussmessung zur Analyse und Führung von Tiefziehvorgängen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2000
- [Gro08] Grossenbacher, K.: Virtuelle Planung der Prozessrobustheit in der Blechumformung, Dissertation, ETH Zürich, 2008

- [Had53] Hadamard, J.: Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equation, Dover, New York, 1953
- [Har16] Virtual tryout planning in automotive industry based on simulation metamod-els, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.159012007
- [Häu00] Häussermann, M.: Weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Ge- staltung von Umformwerkzeugen. Forschungsbericht Nr. 152 Europäische For- schungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., 2000
- [Häu02] Häussermann, M.: Zur Gestaltung von Tiefziehwerkzeugen. Dr.-Ing. Disserta- tion, Universität Stuttgart, IFU, 2002
- [Hei95] Heise, W.; Quattrocchi, P.: Informations- und Codierungstheorie. Mathemati- sche Grundlagen der Daten-Kompression und -Sicherheit in diskreten Kom- munikationssystemen, 3. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg 1995, ISBN 3- 540-57477-8
- [Hei11] Heingärtner, J.: Intelligente Datenanalyse für die zerstörungsfreie Werkstoff- prüfung in der Umformtechnik, Zürich, Dissertation ETH Zürich, 2011
- [Hei17] Heingärtner et. al.: Q-Guard – an intelligent process control system, Proceed- ings of the IDDRG 2017
- [Hen06a] Hengelhaupt, J.; Vulcan, M.: Task 1b: Robust Deep Drawing Process of an Experimental Part. DoE- Bericht , 2006
- [Hen06b] Hengelhaupt, J.; Vulcan, M.; et al.: Robuste Prozesse beim Ziehen großfläch- iger Karosserieteile. In: Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Oberursel: DGM 2006
- [Hil48] Hill, R.: A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals,. Proc. Roy. Soc. London A 193, 1948
- [His93a] Hishida, Y., Wagoner, R.: Experimental Analysis of Blank Holding Force Con- trol in Sheet Metal Forming, Journal of Materials and Manufacturing, Section 5 Volume 102, USA, 1993
- [His93b] Hishida, Y., Wagoner, R.: Analysis of Blank Holding Force Control Forming Using Hydraulic Forming Simulator, Advanced Technology of Plasticity, Pro- ceedings of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity, 1993
- [Hoc75] Hockett, J.E.; Sherby, O.D.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. In: J. Mech. Phys. Solids 23, S. 87 – 98, 1975
- [Hol49] Hollomon, J.H.: Tensile Deformation. Trans. Americ. Inst. Min. Metallurg. Eng. 162, S.268–290, 1949
- [Hor20] Hora, P.: Umformtechnik I: Grundlagen umformtechnischer Verfahren, Institut für Virtuelle Produktion, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, 2020

- [IST09] Allgöwer, F.: Convex Optimization, Skript zur Vorlesung, Institut für Systemtheorie, 2009
- [Kel99] Kelley, C. T.: Iterative Methods for Optimization, SIAM; Philadelphia 1999
- [Ker97] Kernosky, S.; Weinmann, K.; Michler, J.; Kashani, A.: Development of a Die Shoulder Force Transducer for Sheet Metal Forming Research, Trans ASME, Journal of Manufacturing, Science and Engineering, 1997
- [Kis18a] Kistler GmbH: Kraftmessdübel 9247a: Technische Daten bzgl. des Kraftmessdübels sowie benötigte Einstellungen, Technische Dokumentation, Winterthur, CH, 2018
- [Kis18b] Kistler GmbH: Verstärker 5073a, ICAM: Industrieller Ladungsverstärker für Anwendungen in der Fertigung, Winterthur, CH, 2018
- [Kla94] Klamser, M.: Ziehen von Blechformteilen auf einfachwirkenden Pressen mit hydraulischer Zieheinrichtung im Pressentisch. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, IFU, 1994
- [Kle09] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren, 6. überarbeitete Auflage
- [Kra17] Kraft, M.; Buerger, U.: Novel concept for measurement of global blank draw-in when deep drawing outer skin automotive components, Proceedings of the IDDRG 2017
- [Kri08] Krieger, K.: Regelung eines Portalkrans mit einer geregelten flachen Vorsteuerung, Studienarbeit, ISYS, Universität Stuttgart, 2008
- [Kub06] Kubli, W.: “Designing for Robust Stamping - During Product and Tooling Design”, Auto 2006
- [Lan02] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft Band 1-4, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [Len10] Lenze, F.-J. et al.: Further development of manganese boron steels for the lightweight design of body in white structures. In: Proceedings of the iddrg 2010 50th Anniversary Konferenz Tools and Technologies for the Processing of Ultra High Strength Steels. Graz, Austria, 31. May – 2. June 2010. PP. 17-26
- [Lep18] Leps, O.: Der Aufbau von Betriebs- und Steuerungsanlagen. In: Hybride Testumgebungen für Kritische Infrastrukturen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018
- [Lie09a] Liewald, M., Blauch, C.: Approaches for Closed-loop Control and Optimization of Deep Drawing Processes. In: Proceedings of the Ansys Conference and 27th CADFEM Users’ Meeting, Leipzig, November 18th–22nd 2009

- [Lie09b] Liewald, M., Blaich, C.: Approaches for Evaluation of Robustness and Optimization of Manufacturing Process in Sheet Metal Press Shop. In: Proceedings of the 9th International Stuttgart Symposium on Automotive and engine Technology, FKFS, 24th - 25th March, Haus der Wirtschaft Stuttgart 2009, P. 419 - 434
- [Lie15] Liewald, M.; Han, F.: A New Approach for Determination of the Wrinkling Limit Curve (WLC) in Deep Drawing, in Forming Technology Forum 2015, Zürich, 2015
- [Lie16] Liewald, M.; Barthau, M.; Braun, S.: Trajectory-based closed loop control for controlling deep-drawing process, wt-online - Ausgabe 10-2016, S. 684-689, 2016
- [Lun14] Lunze, J.: Regelungstechnik 2. Springer, Berlin, Heidelberg, 6. Auflage, 2007
- [Lud09] Ludwik, P.: Über den Einfluss der Deformationsgeschwindigkeit bei bleibenden Deformationen mit besonderer Berücksichtigung der Nachwirkungerscheinungen, Phys. Zeitschrift 10, S. 411–417, 1909
- [Mar02] Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J.: Mechanics of Sheet Metal Forming, 2nd. Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, Woburn, 2002
- [Mat94] Mathieu, H.; Schroeder, M.; Kruska, J.-U.: Werkzeuge aus einfachen Elementen – Flexibles Tiefziehen von Feiblechen, Bänder Bleche Rohre 35. Jahrgang Heft 3, Vogel Verlag Würzburg, 1994
- [McK79] McKay; Conove; Beckman: A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, Technometrics 21 S. 239–245, 1979
- [Mis28] Mises, R. v.: Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 8, 161–185, 1928
- [Mor11] Mork, R.: Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze. Dissertation, Technische Universität München, 2011
- [Mül08] Müllerschön, H.; Roux, W.; Roll, K.: Stochastic analysis of uncertainties for metal forming processes with LS-OPT, p. 9, Numisheet, 2008
- [Mun04] Munser, R.; Jacubasch, A.; Wagner, U.: Messen beim Pressen, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 94 Heft 10, S. 544-545, 2004
- [Neu06] Neugebauer, R.; Hoffmann, M.; Roscher, H.-J.; Scheffler, S; Wolf, K.: Control of sheet-metal forming processes with piezoactuators in smart structures. Proc. SPIE6171, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 61710E, 2006
- [Neu11a] Neumann, A; Hortig, D.; Merklein, M.: Contribution to a virtually supported design of a closed-loop control using material flow as control variable, Pro-

- ceedings of the 4th Forming Technology Forum – Zero Failure Production Methods, Zürich, Schweiz, 2011
- [Neu11b] Neumann, A; Hortig, D.; Merklein, M.: Measurement of material flow in series production, Key Engineering Materials Vol. 473 Sheet Metal Trans Tech Publications, Schweiz, 2011
- [Neu11c] Neumann, A; Albert, A.; Scheffler, S.: Systems for monitoring and control of sheet metal forming processes, Proceedings of the 4th Forming Technology Forum – Zero Failure Production Methods, Zürich, Schweiz, 2011
- [Neu11d] Neugebauer, R.; Mainda, P.; Drossel, W.G.; Kerschner, M.; Wolf, K.: Integrated piezoelectric actuators in deep drawing tools. Proc. SPIE7979, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 79790F, 2011
- [Rei90] Reissner, J.; Schmid, W.: Tiefziehen, In Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft Band 3: Blechbearbeitung, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1990
- [Res10] Resch, M. (Hrsg.): Gedanken zur Information, Vortragsreihe, Höchstleistungs Rechenzentrum der Universität Stuttgart, 2010
- [Rit07] Rittmeier, S.: Systemgestützte Umformung. Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007
- [Rus09] Rust, W.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen, Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2009
- [Sal00] Saltelli, A. ; Chan, K. ; Scott, E. M.: Sensitivity Analysis, John Wiley & Sons Ltd., 2000
- [Sal08] Saltelli, A.; Ratto M., Andres, T.; Campolongo, F.; Cariboni, J.; Gatelli, D.; Sainsana, M.; Tarantoal, S.: Global Sensitivity Analysis: The Primer, John Wiley & Sons Ltd., 2008
- [Sch16] Schneider, R.: Analyse Kontinuumsmechanischer, anisotroper Materialparameter Mikrostrukturierter Volumina mithilfe direkter mechanischer Simulation, Höchstleistungs Rechenzentrum Stuttgart, Dissertation Universität Stuttgart, 2016
- [Sei87] Seifritz, W.: Wachstum, Rückkopplung und Chaos, Eine Einführung in die Welt der Nichtlinearität und des Chaos. Hanser, 1987
- [Sha48] Shannon, C. E.: A mathematical theory of communication. Bell System Tech. J., 27:379–423, 623–656, 1948.
- [Sie06] Siegert, K.: Regelung der Ziehstabhöhe beim Ziehen von Blechformteilen zur Erzielung ebener Zargenflächen, Abschlussbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn, 2006

- [Sie07] Siegert, K.; Liewald, M.; Blaich, C.; Großmann, K.; Kauschinger, B.: Robuster Tiefziehprozess durch Ziehsickenstabhöhenregelung. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag: wt Werkstatttechnik online Heft 10, 2007. S. 781-791
- [Sie10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE), Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2010
- [Sie15] Siegert, K. Hrsg.: Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen. Springer Vieweg, Berlin, 2015
- [Sim89] Simon, H.: Rechnerunterstützte Ziehteilauslegung mit elementaren Berechnungsmethoden, Dissertation Universität Hannover, 1989
- [Sin14] Singer, M.; Liewald, M.: Effect of surface enlargement and of viscosity of lubricants on friction behavior of advanced high strength steel material during deep drawing, Advanced Materials Research Vol. 1018, p. p.p. 253-260, 2014
- [Som86] Sommer, N.: Niederhalterdruck und Gestaltung des Niederhalters beim Tiefziehen von Feinblechen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1986
- [Spu94] Spur, G.(Hrsg.):Handbuch der Fertigungstechnik, 6 Bände in 10 Teilen, Carl Hanser Verlag, München/Wien 1979–1994
- [Sto95] Stock, G.: Alternative Verfahren zur Verbesserung des Tiefziehergebnisses auf einfachwirkenden Pressen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1995
- [Sto97] Stock, G., Schulz-Marner, H.: Untersuchungen und Ergebnisse beim Tiefziehen mit unterschiedlichen Niederhalterbauformen. In: Bänder Bleche Rohre, Heft 4 1997, S. 16-23
- [Sto88] Story, J. M.; Trageser, A. B.; Smith, G. L.: Blankholder for a draw press. United States Patent, Nr. 4,745,795, 1988
- [Sto06] Stöber, M.; Müller, D.; Thümmler, A.; (2006). Einsatz der Response-surface-Methode zur Optimierung komplexer Simulationsmodelle. 10.17877/DE290R-7704.
- [Str02a] Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager, Z. Verein. Deut. Ing. Vol. 46 Seite 38ff. 1341–1348, 1902
- [Str02b] Streilein, T., Hillmann, J.: "Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton", VDI-Tagung Würzburg, 2002
- [Str82] Strackerjahn, W.: Die Voraussage des Versagensfalls beim Tiefziehen rechteckiger Teile, Dissertation, Universität Hannover, 1982
- [Str94] Straube, O.: Untersuchungen zum Aufbau einer Prozessregelung für das Zeihen von Karosserieteilen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Berlin, 1994
- [Swi52] Swift, M.W.: Plastic instability under plane stress, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1 (1952), S. 1–18

- [Par03] Parisch, H.: Festkörper-Kontinuumsmechanik: Von den Grundgleichungen zur Lösung mit Finiten Elementen, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2003
- [Tel53] Teller, E.; Metropolis, N.; Rosenbluth, A. W.; Rosenbluth, M. N.; Teller, A.H.: Align of State Calculations by Fast Computing Machines; The Journal of Chemical Physics 21 (1953), Nr. 6, S. 1087–1092
- [Tho93] Thoms, V.: Anpassung der Werkzeugsysteme zur Blechumformung an die Umformmaschine. Blech Rohre Profile, Jahrgang 40, Heft 5 1993, S.375ff
- [Tho08] Thoms, V.; Schatz, M.: Regelung des Materialflusses in Niederhaltersystemen von Zieh- und Nachformwerkzeugen durch Piezoaktoren. Forschungsbericht Nr. 278 Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., 2008
- [Unb08] Unbehauen, H.: Regelungstechnik I/II. Springer, Berlin, Heidelberg, 15. Auflage, 2008
- [Voc48] Voce, E.: The relationship between stress and strain for homogeneous deformation Journal of the institute of metals 74 (11), S. 537–562, 1948
- [Wal14] Walzl, H.; Selbstoptimierung der Einarbeit von Karosseriewerkzeugen durch Werkzeug integrierte Aktorik, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, IWU, 2014
- [Wey97] Wey, T.; Lemmen, M.: Flachheitsbasierte Regelung - Folgeregelung eines hydraulischen Differentialzylinders. Forschungsbericht, Universität Duisburg, 1997
- [Wil06] Will, J.: Rechnerische Robustheitsbewertungen von Umformprozessen, Internationale Konferenz Blechumformung, S. 1–15, 2006;
- [Wit80] Witthüser, K.-P.: Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1980
- [Wol15] Wollridge, J., M.: Introductory econometrics: A modern approach. 4. Auflage. Nelson Education, 2015
- [Wys98] Wyss, G.: A User's Guide to LHS: Sandia's Latin Hypercube Sampling Software, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-0747, 1998
- [Yag04] Yagami, T.; Manabe, K.; Yang, M.; Koyama, H.: Intelligent sheet stamping process using segment blankholder modules. In: Journal of Materials Processing Technology Vol. 155-156 2004, S. 2099-2105
- [Yun07] Yun, J.-W.: Stoffflussregelung beim Tiefziehen mittels eines optischen Sensors und eines Fuzzy-Reglers. Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [Zei09] Zeitz, M.: Flache Systeme in Theorie und Anwendung, Skript zur Vorlesung, Institut für Systemdynamik (ISYS), 2009

- [Zie99] Ziegler, M.: Schwingende Niederhalterkräfte und Regelkreise beim Tiefziehen axialsymmetrischer Blechformteile. Dissertation, Universität Stuttgart, 1999



## 12 Curriculum Vitae

### Persönliche Daten

Name Martin Paul Barthau  
Geburtsdatum 07.01.1985  
Geburtsort Schwäbisch Hall  
Staatsangehörigkeit deutsch  
Familienstand ledig

### Ausbildung

2007-2013 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus Fachrichtung  
Technische Kybernetik  
Abschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)  
2004-2007 Ausbildung zum Reserveoffizier der Fernspähtruppe  
1995-2004 Besuch des Gymnasiums St. Michael in Schwäbisch Hall  
Abschluss: Abitur

### Beruflicher Werdegang

2013-2017 Universität Stuttgart  
Institut für Umformtechnik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

