Systemunterstützte Umformung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

vorgelegt
der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

von
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sebastian Rittmeier
geboren am 14.05.1979 in Leinefelde

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Volker Thoms Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann Dr.-Ing. Josef Meinhardt

Eingereicht am:	14. Februar 2007
Tag der Verteidigung:	22. Oktober 2007

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2007
Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-419-7

Als wissenschaftliches elektronisches Dokument veröffentlicht auf dem Hochschulschriftenserver der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden (SLUB) unter:
http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-1193690438091-2170
http://hsss.slub-dresden.de/hsss/servlet/hsss.urlmapping.MappingServlet?id=1193690438091-2170

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2007
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-419-7

Wer das Unmögliche nicht versucht,

wird das Mögliche nicht erreichen.

nach Hermann Hesse (1877-1962)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Bereich ‚Innovationen' der ‚Technologie Umformen' bei der BMW Group in München.

Das wesentliche Ziel der Promotion bestand in der Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzeptes, mit dem die Potentiale einer Überwachung, Steuerung bzw. Regelung des Umformprozesses auf serienreifem Niveau unter Verwendung der bestehenden, einfachwirkenden Pressenanlagen erschlossen werden können.

Für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptreferates bedanke ich mich bei Prof. Volker Thoms. Seinem entgegengebrachten Vertrauen und der wohlwollenden Unterstützung gilt mein besonderer Dank.

Herrn Prof. Hartmut Hoffmann danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die freundliche Annahme der Zweitberichterstattung.

Ebenfalls möchte ich Herrn Dr. Josef Meinhardt für die Erstellung eines Mitberichtes sowie seinen fachlichen Rat, die eingehende Durchsicht der Ergebnisdokumentation und die sich daraus ergebenen Anregungen danken.

Weiterer Dank gebührt den Herren Konrad Schnupp und Dr. Burghard Korneffel, die durch ihre Unterstützung bei der Aufgabenfindung und -präzisierung, ihre fachlichen Denkanstöße sowie ihre Bereitschaft zur Diskussion maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei meinen Vorgesetzten Karl Hirmer und Anton Wecker bedanke ich mich für das Vertrauen in meine Person und die Bereitstellung aller notwendigen Ressourcen, ohne die eine Bearbeitung des Themas unmöglich gewesen wäre.

Nicht zuletzt gilt der Dank allen beteiligten Kollegen für das hervorragende Arbeitsklima und die Hilfsbereitschaft bei technischen sowie administrativen Fragestellungen. Durch die Kooperation Vieler und nicht durch die Bemühungen eines Einzelnen entstanden die vorliegenden Ergebnisse.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei meiner Familie bedanken, die mit ihrer persönlichen Unterstützung während meiner Ausbildung die Grundlage für diese akademische Arbeit schuf.

Meiner Ehefrau Daniela schulde ich mehr als nur Dank. Sie hat mit ihrem Verständnis, ihrer unendlichen Geduld und ihrem permanentem Zuspruch einen enormen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

München, im November 2007 Sebastian Rittmeier

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis IX

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen X

Abkürzungen X

Formelzeichen XI

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 5

2.1 Produktionsprozess von Karosseriebauteilen 5

2.1.1 Einflussgrößen 5

2.1.2 Versagensarten 7

2.2 Werkzeug- und Pressentechnik 9

2.2.1 Pressentechnik 9

2.2.2 Werkzeugtechnik 12

2.3 Elastische Werkzeugkonzepte und zugehörige Anlagen 15

2.3.1 Passiv elastische Werkzeugkonzepte 15

2.3.2 Aktiv elastische Werkzeuge 17

2.3.3 Erforderliche Anlagentechnik 22

2.4 Sensorkonzepte zur Prozessüberwachung 25

2.4.1 Erfassung von Prozesskräften 25

2.4.2 Messung von Faltenhöhe und Körperschall 26

2.4.3 Stoffflussmessung 27

2.4.3.1 Tastzunge 28

2.4.3.2 Rollkugelsensor 28

2.4.3.3 Induktiver Sensor 29

2.4.3.4 Lasertriangulationssensor 30

2.4.3.5 Optischer Sensor 31

2.5 Zusammenfassung 32

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung 35

4 Aufbau des Versuchswerkzeuges 37

4.1 Sensorkonzept 37

4.1.1 Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise 37

4.1.2 Konkrete Umsetzung 40

4.1.3 Diskussion des Sensorkonzeptes 44
4.2 Werkzeugkonzept 45
4.2.1 Umformsimulation 45
4.2.1.1 Ablauf und Grenzen der Umformsimulation 45
4.2.1.2 Modifikation der Tiefziehsimulation 47
4.2.2 Konzeptentwurf 51
4.2.3 Auswahl der Aktorik und Ansteuerung 52
4.2.3.1 Mechanische Aktuatorik 53
4.2.3.2 Elemente mit piezoelektrischem Effekt 54
4.2.3.3 Hydraulische Linearachsen 54
4.2.3.4 Gasdruckfedern 57
4.2.3.5 Ansteuerung der aktiven Werkzeugelemente 58
4.2.4 Dimensionierung des definiert elastischen Einsatzes und simulative Konzeptabsicherung 61
4.2.4.1 Dickenbestimmung mit Hilfe der Balkentheorie 63
4.2.4.2 Konzeptanalyse mittels FEM-Simulationen 68
4.2.5 Optimierung der Flächenpressungsverteilung 69
4.2.6 Konstruktion und Aufbau des Versuchswerkzeuges 73
4.2.6.1 Werkzeuggestaltung 74
4.2.6.2 Realisierung des Umformwerkzeuges 75
4.2.6.3 Kalkulation der Lebensdauer 76

5 Experimentelle Analysen 79

5.1 Eingesetzte Umformtechnik 79
5.2 Auswahl der Versuchswerkstoffe 80
5.3 Ablauf der Experimente 81
5.4 Auswertung der Ergebnisse 81
5.4.1 Einlaufwegsensorik 82
5.4.1.1 Analysen zur Messfähigkeit 82
5.4.1.2 Teilerkenntnisse aus Verlaufinformationen 84
5.4.1.3 Fazit 86
5.4.2 Niederhalter mit definiert elastischem Einsatz 87
5.4.2.1 Inbetriebnahme 87
5.4.2.2 Beeinflussungszonen der Aktuatoren 88
5.4.2.3 Bestimmung des Prozessfensters 90
5.4.2.4 Weitere Potentialfelder des definiert elastischen Niederhalters 91
5.4.3 Aspekte des Bauteilwerkstoffes 95

6 Möglichkeiten zum Aufbau eines Regelkreises 98

6.1 Modellbildung 98

6.2 Hard- und softwareseitige Implementierung 101

6.3 Experimentelle Untersuchungen 101

6.4 Resultate 102

6.4.1 Abzuleitendes Verbesserungspotential 103

6.4.2 Ansatz zur Identifikation von Einschnürungen und Rissen 104

6.4.3 Zusammenfassung 106

7 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse 108

7.1 Alternativen zum Transfer in Serienwerkzeuge 109

7.1.1 Definiert elastischer Ringeinsatz 109

7.1.2 Blechhalter partiell elastisch gestalten 109

7.1.3 Verlagerung der Aktuatoren in das Ziehkissen der Presse 110

7.2 Alternativen zur weiteren Vereinfachung 111

7.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 112

8 Zusammenfassung und Ausblick 114

9 Literaturverzeichnis 117

9.1 Zitierte Quellen 117

9.2 Zusätzliche Literatur 124

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Entwicklung des spezifischen Rohbaugewichtes am Beispiel der BMW 3er Reihe [Bra00] 1
Abb. 1-2 Entwicklung Leer- und Karosseriegewicht am Beispiel der BMW 3er Reihe [nach Bra00] 1
Abb. 1-3 Gewichtsanteile verschiedener Werkstoffgüten, Rohkarosserie BMW 1er [Lüd04] 2
Abb. 1-4 BMW Z4 Coupe 2
Abb. 1-5 BMW 3er Coupe 2
Abb. 2-1 Versagensarten 8
Abb. 2-2 mechanische, doppeltwirkende Presse [Sch96] 10
Abb. 2-3 hydraulische, einfachwirkende Presse [Sch96] 10
Abb. 2-4 doppeltwirkendes Werkzeug [Sch96] 10
Abb. 2-5 einfachwirkendes Werkzeug [Sch96] 11
Abb. 2-6 Gegenüberstellung Einpunkt- und Vierpunktziehkissen [Häu02] 12
Abb. 2-7 konventionelle Kastenprofil-Verrippung und C-Profil-Verrippung [Häu02] 13
Abb. 2-8 Gummi-elastischer Niederhalter [Wit80] 16
Abb. 2-9 Hydro-elastischer Niederhalter [Sto95] 16
Abb. 2-10 passiv elastischer Niederhalter [Ele01] 17
Abb. 2-11 Segmentierter Niederhalter nach Griesbach [Gri99] 17
Abb. 2-12 Segmentierter Niederhalter nach Story, Trageser und Smith [STS88] ... 18
Abb. 2-13 biegeweicher Niederhalter [Tho93] 18
Abb. 2-14 Segmentelastischer Niederhalter [Häu02] 19
Abb. 2-15 Elastischer Niederhalter [Ele01] 20
Abb. 2-16 Gegenzugmaschine und elastischer Blechhalter zur Herstellung von Edelstahlspülmulden [Sch03] 20
Abb. 2-17 Shimming Plate [Hyd04] 21
Abb. 2-18 Versuchswerkzeug „Behälterhälfte“ [Bräu02] 21
Abb. 2-19 Gegenzugmaschine mit aktiv elastischem Niederhalter [Ele01] 23
Abb. 2-20 Direkt wirkende Vielpunktziehanlage mit n Hydraulikzylindern [Bie91, Sei02] 24
Abb. 2-21 Indirekt wirkende Vielpunktziehanlage mit aktiven Pinolen [Che91, SK91, Kla94, Hoh98, Sie98, Häu00, Sie00] 24
Abb. 2-22 Umformwerkzeug mit integrierter Zieheinrichtung und segmentelastischem Pyramidenstumpfniederhalter [Häu00, Sie00, Häu02, Hal04] ... 25
Abb. 2-23 Faltensensorik [Kla94] 27
Abb. 2-24 Aufbau des Rollkugelsensors [Gri99] 29
Abb. 2-25 induktiver Sensor [For00] 30

Abb. 2-26 Lasertriangulationssensor [Brä02] 31
Abb. 2-27 Optischer Sensor [Sei02, Yun05]....32
Abb. 4-1 Niederhalter und Stempel im Führungskasten [Rit05] 37
Abb. 4-2 Werkzeugmatrize im Führungsrahmen [Rit05]....37
Abb. 4-3 Ziehteil [Rit05]....37
Abb. 4-4 Prinzipieller Aufbau des Sensors [Rit05]....38
Abb. 4-5 Struktureinzelheiten der Blechoberfläche und deren zugeordnetes Positionssignal [Kor94] 39
Abb. 4-6 Speichermatrix der Funktionspunkte aller erfassten Struktureinzelheiten zu den Zeitpunkten t1 bis t5 [Kor94]....39
Abb. 4-7 Histogramm der erkannten Geradenanstiege aus einer Bildsequenz [Kor94] 40
Abb. 4-8 Sensorkopf....41
Abb. 4-9 Messschrank mit vier Bildverarbeitungsrechnern 42
Abb. 4-10 Bauteil mit Sensorpositionen 43
Abb. 4-11 Sensorintegration in Matrize [Rit05]....43
Abb. 4-12 Explosionsdarstellung des Simulationsmodells 46
Abb. 4-13 Blechhalter mit homogen verteilter Niederhalterkraft 46
Abb. 4-14 Niederhaltersegmentierung Variante1 mit rechtwinkligen Segmentfugen 48
Abb. 4-15 finale Niederhaltersegmentierung mit Liniensicke [Rit05] 48
Abb. 4-16 suboptimale Flächenpressungsverteilung (Anfangs- und Endzustand) ..49
Abb. 4-17 finale Flächenpressungsverteilung, Anfangs- und Endzustand [Rit05] ...49
Abb. 4-18 Abstreckung (l.) und Aufdickung (r.) des i.O.-Ziehteils aus der Umformsimulation....49
Abb. 4-19 simulierte Endlage der Platinenkante nach der Umformung für verschiedene Kraftkonfigurationen 50
Abb. 4-20 reales i.O.-Ziehteil mit deutlich sichtbarer Anhaukante....51
Abb. 4-21 Einlaufbild anhand der Anhaukante eines i.O.-Bauteiles aus der Simulation....51
Abb. 4-22 Bodenplatte, angepasste Verrippung und Aktorik [Rit05] 52
Abb. 4-23 Schwimmend gelagerter, definiert elastischer Einsatz [Rit05] 52
Abb. 4-24 Niederhalterkonzept mit Gussgrundkörper und elastischem Einsatz [Rit05] 52
Abb. 4-25 Gesamtübersicht des Simulationsmodells [Rex05]....55
Abb. 4-26 Simulationsergebnis: Lageabweichung der Kraftregelzylinder [Rex05] ..57
Abb. 4-27 eingesetzte Gasdruckfeder mit ihren Abmessungen [Fib05]....58
Abb. 4-28 Ventilblock Vor- und Rückseite sowie Modulschnitt....60
Abb. 4-29 Dosierstation....61
Abb. 4-30 elastischer Einsatz, Ansicht von unten, Catia Konstruktion 62

Abb. 4-31 Prinzipdarstellung des Niederhalteraufbaus 62
Abb. 4-32 Durchbiegungsvergleich von mehreren Blättern und einem Balken 62
Abb. 4-33 Biegebalkenmodell: Darstellung definiert elastischer Einsatz auf 3 Zylindern 63
Abb. 4-34 Biegebalkenmodell: Darstellung als Stabdiagramm 63
Abb. 4-35 Schnitt: elastischer Einsatz, außermittige Sickenprägekraft 65
Abb. 4-36 Stabmodell mit Flächentorsionsmoment 65
Abb. 4-37 Flächenpressungsverteilung mit definiert elastischem Einsatz und Gasdruckfedern zu Beginn der Umformung 68
Abb. 4-38 Distribution der Flächenpressung am Ende des Umformvorganges 68
Abb. 4-39 einfaches Simulationsmodell zur Optimierung der Flächenpressung 70
Abb. 4-40 Explosionsdarstellung des Optimierungsmodells 70
Abb. 4-41 Prinzipskizze des Niederhalteraufbaus mit Aussparungen in den Druckplatten 70
Abb. 4-42 Flächenpressungsverteilung vor der Optimierung ohne Aussparung in der Druckplatte 71
Abb. 4-43 Flächenpressungsverteilung nach der Optimierung 71
Abb. 4-44 zugehörige Geometrie der Druckplatte 71
Abb. 4-45 Aufbau des definiert elastischen Niederhalters zur Optimierung der Flächenpressungsverteilung 72
Abb. 4-46 gleichmäßigere Verteilung der Flächenpressung aufgrund T-Aussparungen in den Druckplatten (Beginn der Umformung) 72
Abb. 4-47 Flächenpressungsverteilung mit T-Aussparungen in den Druckplatten am Ende des Umformvorganges 72
Abb. 4-48 Unterteilung der 16 Niederhaltersegmente in konzentrische Kreissegmente 73
Abb. 4-49 Flächenpressungsverteilung nach Segmentierung mit konzentrischen Kreisen 73
Abb. 4-50 Simulationsergebnis der Kontrollrechnung hinsichtlich Abstreckung / Blechausdünnung 73
Abb. 4-51 Schnittdarstellung der Werkzeugkonstruktion, die unterschiedliche Höhenniveaus der GDF zeigt 74
Abb. 4-52 Finale Niederhalterkonstruktion [Rit05] 75
Abb. 4-53 Styropormodell / Gussmodell 75
Abb. 4-54 Gussgrundkörper nach Bearbeitung der Normgeometrie 75
Abb. 4-55 Grundgestell mit eingebauter Aktorik 76
Abb. 4-56 definiert elastischer Ringeinsatz 76
Abb. 4-57 elastischer Einsatz im Grundgestell 76
Abb. 4-58 neuer Niederhalter im Führungskasten 76
Abb. 5-1 Try-Out-Doppelständerpresse, Baujahr: 1990 79
Abb. 5-2 Ty-Out-Doppelständerpresse, Baujahr: 1994 79

Abb. 5-3 Produktionsanlage 80
Abb. 5-4 Sensorprüfstand 82
Abb. 5-5 Gegenüberstellung Messwert und mechanische Einzugsbestimmung an Sensor 0 & 2 mit Korrelationskoeffizienten 83
Abb. 5-6 Gegenüberstellung Messwert und mechanische Einzugsbestimmung an Sensor 1 & 3 mit Korrelationskoeffizienten 84
Abb. 5-7 FFT des Umformgeräusches 85
Abb. 5-8 Geschwindigkeitssignal mit harmonischer Schwingung 85
Abb. 5-9 vergrößerter Ausschnitt im Bereich von 3,2-3,3 sec 85
Abb. 5-10 FFT des Geschwindigkeitssignals 86
Abb. 5-11 Gegenphasiger Blecheinzug an Sensor 0 & 2 86
Abb. 5-12 vergrößerter Ausschnitt im Bereich von 0,4-1,1 sec 86
Abb. 5-13 Tuschierbild 88
Abb. 5-14 Werkzeugmacher, der Druckstelle einebnet 88
Abb. 5-15 erstes falten- und rissfreies Bauteil 88
Abb. 5-16 unterschiedlich lange Flanschränder aufgrund von Druckunterschieden in den Eckfedern (Nr.: 8, 12, 16) 89
Abb. 5-17 Flächenpressung über GDF 10 mit 60bar Innendruck 90
Abb. 5-18 Flächenpressung über GDF 10 mit 110bar Innendruck 90
Abb. 5-19 Einlaufwegkurven für Falten- , i.O. und Rissbauteil (Prozessfenster exemplarisch an Messstelle 3) 91
Abb. 5-20 verkleinerte Platine 92
Abb. 5-21 i.O.-Bauteil aus reduziertem Blechzuschnitt 92
Abb. 5-22 i.O.-Bauteil aus HC260BD+Z100 93
Abb. 5-23 Abstreckungsprotokoll für Versuchsbauteile 93
Abb. 5-24 Messpunkte der Restblechdicke am Fertigteil 93
Abb. 5-25 lasergeschweißte tailored blank Platine 94
Abb. 5-26 tailored blank Bauteil mit starker Faltenbildung und Materialüberlappung 94
Abb. 5-27 Detail 94
Abb. 5-28 tailored blank Bauteil ohne Falten, kurz vor UT 95
Abb. 5-29 falten- und rissfreies tailored blank Bauteil, vollständig ausgeprägt 95
Abb. 5-30 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse in AutoForm® mit Erläuterung und Benennung der Einflussfaktoren 97
Abb. 6-1 Bauteil mit vier Einzelabweichungsvektoren 99
Abb. 6-2 gekennzeichnete GDF zur Minimierung des zusammengesetzten Gesamtabweichungsvektors 99
Abb. 6-3 Zuordnung der GDF zu den 4 Sensorpositionen 100
Abb. 6-4 Auszug aus Versuchsprotokoll für Messposition 3 102
Abb. 6-5 Bauteil mit großem Riss 104

Abb. 6-6 Versuchsteile mit Einschnürungen, Dünnzügen und kleinen Rissen zwischen zwei Sensorpositionen 105
Abb. 6-7 Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverläufe eines Rissteils und eines i.O.-Bauteils 105
Abb. 7-1 Serienwerkzeug mit definiert elastischem Niederhaltereinsatz an neuralgischer Stelle 110
Abb. 7-2 Prinzipdarstellung eines Ziehkissens mit Gasdruckfedern 111

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Einflussgrößen 7
Tab. 5-1 Protokoll der Prüfstandsmessungen 82
Tab. 5-2 Intervallgrenzen der Einlaufwege von den 4 Sensoren, Gegenüberstellung zu Werten aus der Simulation (Pam Stamp®) 91
Tab. 5-3 Werkstoffkennwerte des HC260BD+Z100 im Vergleich zum Serienmaterial HC180B+ZE75/75 93
Tab. 5-4 Werkstoffkennwerte der Laserplatine 94
Tab. 6-1 Werkstoffspektrum der Materialkennwerte (Extrema sind fett markiert) 101
Tab. 7-1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand dreier Szenarien 113

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

3D	dreidimensional
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DB	Druckbegrenzungsventil
DN	Diameter Nominal (Nennweite)
DSP	Digitaler Signalprozessor
EFB	Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
FEM	Finite Element Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
GD	gleitender Durchschnitt
GDF	Gasdruckfeder
HSC	High Speed Cutting
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
i.O.	in Ordnung
KBN	Kaltbandnummer (Nummer einer Materialcharge)
l.	links
LED	Licht emittierende Diode
LUT	Lehrstuhl für Ur- und Umformtechnik
Mat.	Material
max.	maximal(e, ~m, ~n, ~r, ~s)
min.	minimal(e, ~m, ~n, ~r, ~s)
Min.	Minute(n)
MW	Mittelwert
NG	Nenngröße
Nr.	Nummer
OT	oberer Totpunkt
PC	Personalcomputer
PDT_1	Regler mit proportionalem, differentialem Anteil und Zeitverzögerungselement
PID	Regler mit proportionalem, integralem sowie differentialem Anteil

r.	rechts
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
Stck.	Stück
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TU	Technische Universität
u.ä.	und ähnliche(s)
usw.	und so weiter
UT	unterer Totpunkt
vgl.	vergleiche

Formelzeichen

A_{80}	Bruchdehnung
A_F	innere Kolbenfläche der Kompaktgasdruckfeder
b	Breite
c_2	Formfaktor
$Cpress_i$	Kontaktdruck (Flächenpressung) des Elementes i
E	E-Modul
e	Exzentrizität (Hebelarm)
F	Kraft
f_m	maximale Durchbiegung
G	Gleitmodul
G	Steigung der Weg-über-Zeit-Gerade als Maß der Geschwindigkeit
h	Höhe
i	Laufindex des aktuellen Elementes
I_y	axiales Flächenträgheitsmoment
k	Steigungsexponent der Wöhlerlinienextrapolation
k_a	Oberflächenfaktor
k_b	Größenbeiwert (Erfassung des Einflusses der Bauteilgröße)
K_t	Kerbfaktor (Berücksichtigung von Spannungsspitzen)
I_P	polares Flächenträgheitsmoment
l	Länge
M_b	Biegemoment
M_T	Torsionsmoment
N	Anzahl Lastwechsel
n	Verfestigungsexponent
n	Anzahl Hydraulikzylinder, Jahreszyklen, Solid-Elemente u.ä.
P_{Min}	minimaler Stickstofffederdruck
q	Flächenlast
r	senkrechte Anisotropie
R_a	Mittenrauwert

R_e	Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
s	Blechdicke (Materialstärke)
S_{vorh}	vorhandene Sicherheit
W_b	Widerstandsmoment gegenüber Biegebeanspruchung
W_P	polares Widerstandsmoment
y	Dauer der technischen Werkzeugnutzung
Δz	maximale Auslenkung in z-Richtung
φ	Verdrehwinkel
μ	Reibbeiwert
ν	Querdehnungszahl, Poissonzahl
σ	Spannung
τ	Schubspannung

1 Einleitung

Einer der wesentlichen Bestandteile eines Automobils ist dessen Karosserie. Durch ihr Gewicht beeinflusst sie in hohem Maße die Wirtschaftlichkeit und das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeuges. Darüber hinaus muss sie den kundenrelevanten Anforderungen hinsichtlich ihres optischen Erscheinungsbildes und ihrer Verarbeitungsqualität gerecht werden.

Um die Freude am Fahren durch bestmögliche Fahrdynamik zu steigern, suchen Automobilhersteller permanent nach Möglichkeiten zur Gewichtsreduktion bei der Rohkarosserie, den Aggregaten und den Anbauteilen. Dem stehen jedoch Markt- und Kundenwünsche nach zusätzlichen Ausstattungsmerkmalen sowie gesetzliche Bestimmungen für verbesserte Crasheigenschaften gegenüber.

Vor diesem Hintergrund bestätigen rückläufige, spezifische Rohbaugewichte (vgl. Abb. 1-1), lediglich moderat steigende Gesamtfahrzeugmassen und nahezu konstant bleibende Rohkarosseriegewichte (vgl. Abb. 1-2) die erfolgreiche Umsetzung von Leichtbaukonzepten.

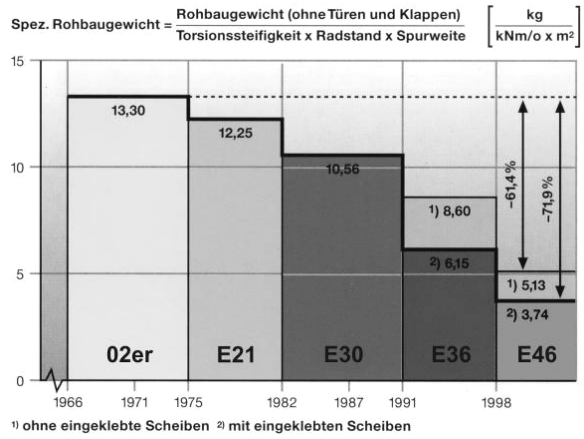

Abb. 1-1 Entwicklung des spezifischen Rohbaugewichtes am Beispiel der BMW 3er Reihe [Bra00]

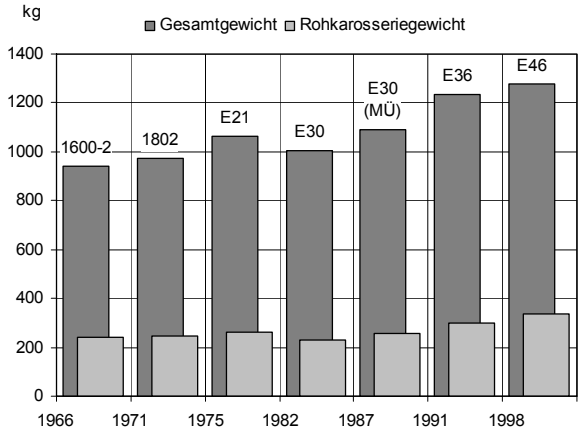

Abb. 1-2 Entwicklung Leer- und Karosseriegewicht am Beispiel der BMW 3er Reihe [nach Bra00]

Erreichbar sind die Gewichtsvorteile im Bereich der Rohkarosserie ausschließlich durch die Reduktion der Wandstärke bei Stahlteilen und durch die geringere Dichte anderer Metallwerkstoffe. So ist aktuell festzustellen, dass nach Aluminium auch Magnesium als Material für Karosseriebauteile in Frage kommt [Beh05]. Damit die Verringerung der Blechdicke und des Bauteilgewichtes nicht zu einem Verlust an Festigkeit sowie Steifigkeit führt, werden Strukturteile vermehrt aus höher- und höchstfesten Stahllegierungen hergestellt (vgl. Abb. 1-3).

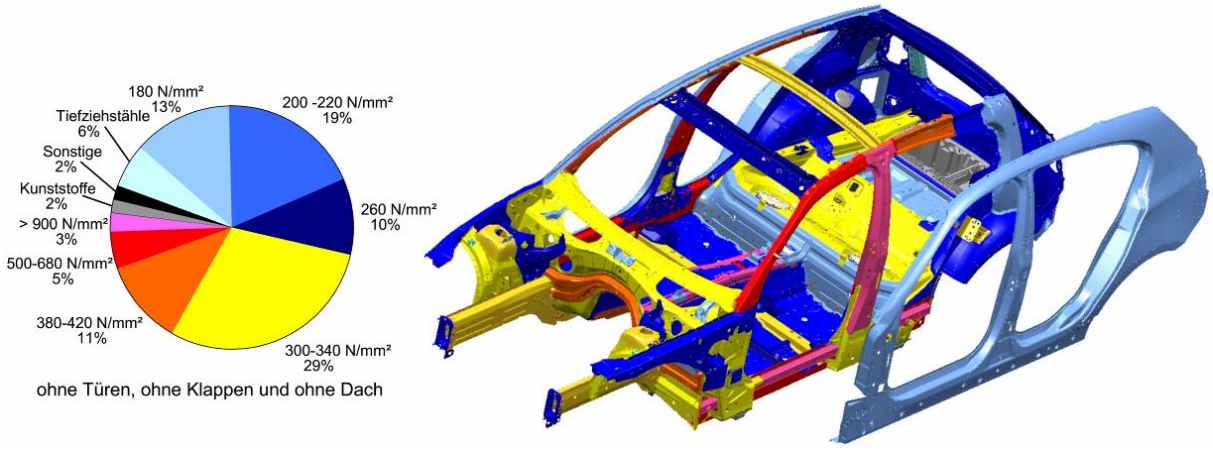

Abb. 1-3 Gewichtsanteile verschiedener Werkstoffgüten, Rohkarosserie BMW 1er [Lüd04]

Den zum Teil eingeschränkten Umformeigenschaften dieser alternativen Werkstoffvarianten stehen die Forderungen nach Reduktion der Anzahl an Arbeitsfolgen sowie der Qualitätsverbesserung der Baugruppen bzw. der gesamten Rohkarosserie in engen Toleranzbereichen gegenüber [Ele01].

Die daraus resultierende Erhöhung der Bauteilkomplexität wird durch die hohen Designansprüche an neue Karosseriebauteile zusätzlich gesteigert [HS00]. Modernes, sportliches Fahrzeugdesign zeichnet sich durch markante Charakterlinien (vgl. Abb. 1-4 und Abb. 1-5) mit sehr kleinen und umformtechnisch anspruchsvoll darzustellenden Radien aus. Es befriedigt damit Markt- und Kundenbedürfnisse nach einer Differenzierung vom Wettbewerb.

Abb. 1-4 BMW Z4 Coupe

Abb. 1-5 BMW 3er Coupe

Des Weiteren führen die ständig wachsende Anzahl von Fahrzeugfunktionen und die damit einhergehenden notwendigen Aggregate seitens des Packaging zu immer komplexeren Strukturteilgeometrien.

Insgesamt lässt sich aus den geschilderten Entwicklungstrends eine dauerhaft zunehmende und weiterhin ansteigende Komplexität in der Blechumformung ableiten, welche die Automobilindustrie einem hohen Innovationsdruck aussetzt.

Zur Erfüllung der gestellten Ansprüche sind stabile und sicher beherrschte Produktionsprozesse erforderlich. In der Praxis ist jedoch zu beobachten, dass aufgrund unzureichender Kenntnisse über das umformtechnische Verhalten der neuen Blechwerkstoffe die bislang manuelle, erfahrungsbasierte Prozessführung an ihre Grenzen stößt.

Im Gegensatz zum Karosseriebau, der in den zurückliegenden 20 Jahren mit Hilfe von Industrierobotern nahezu vollständig automatisiert wurde, sind in Großserienpresswerken der Automobilindustrie nach wie vor erfahrene Fertigungsfachleute zur Korrektur des Umformprozesses bei veränderten Einfluss- und Störgrößen erforderlich. Allerdings ist unklar, inwieweit bestehende Erfahrungsschätze des Fachpersonals auf die neuen Entwicklungstrends (Werkstoffgüten) übertragbar sind, weshalb verstärkt nach neuen Möglichkeiten zur Stabilisierung des Umformprozesses gesucht wird.

An Hochschulen und Forschungsinstituten sind diesbezüglich Entwicklungen im Bereich der Werkzeug- sowie Anlagentechnik zu verzeichnen, welche eine objektive, gezielte und vor allem lokale Beeinflussung des Umformprozesses ermöglichen. Zusätzlich zu den elastischen Werkzeugkonzepten, den Gegenzuganlagen und der Vielpunktziehtechnik wurde eine Vielzahl von Parametern hinsichtlich ihrer Eignung zur Prozessüberwachung analysiert. Ferner bestätigen die Ergebnisse der Forschungsaktivitäten das Potential einer Vollautomatisierung bzw. Regelung des Umformprozesses bei kontinuierlicher Erfassung eines charakteristischen, aussagekräftigen Prozessparameters und der Möglichkeit, den Tiefziehvorgang örtlich gezielt zu beeinflussen.

Allerdings überzeugte keines der vorgestellten Sensorkonzepte durch die notwendige Einfachheit, Kompaktheit und vor allem Robustheit, so dass in Großserienpresswerken bislang auf zusätzliche Informationen über den Prozesszustand bezogen auf sein Gutteilfenster verzichtet werden muss. Gleichermaßen finden neue Werkzeugkonzepte ebenfalls keine Anwendung in der Serienproduktion, da bei ihrer Entwicklung das in der Automobilindustrie aus technischen und wirtschaftlichen Vorteilen vorrangig eingesetzte Prinzip des einfachwirkenden Tiefziehens vernachlässigt wurde. Außerdem sind hohe Anschaffungskosten und lange wirtschaftliche sowie technische Nutzungsdauern der bestehenden, einfachwirkenden Presswerkstrukturen maßgeblich dafür verantwortlich, warum bislang kein Ersatz durch neue, funktionserweiternde Vielpunktziehanlagen stattgefunden hat.

Ausgehend von diesen gegebenen Rahmenbedingungen besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit darin, einen Ansatz zu finden, durch den Innovationen dennoch Einzug in Großserienpresswerke der Automobilindustrie halten können. Der Fokus liegt dabei auf dem Umformwerkzeug selbst. Denn es muss im Gegensatz zur Pressenanlage mit jedem Modellwechsel (ca. alle sieben Jahre) erneuert werden.

Aus diesem Grund ist die Untersuchung eines Werkzeugkonzeptes mit integrierter Sensorik und Aktorik Gegenstand dieses Beitrages. Mit Hilfe der Messaufnehmer (Sensoren) findet eine Prozessüberwachung bei gleichzeitiger Beurteilung des Prozesszustandes anhand des erfassten Parameters statt und die Aktuatoren dienen der gezielten, lokalen Reaktion auf die detektierte Prozessschwankung.

Grundlegende Prämisse bei der Entwicklung dieses Werkzeugkonzeptes ist jedoch der Einsatz bestehender Presswerksstrukturen, speziell der Anlagen und Maschinentechnik ohne zusätzliche Modifikationen. Lassen sich die Potentiale einer gezielten Prozessüberwachung und -beeinflussung auf diese Weise mit serienreifem Niveau erschließen, können die Anlaufzeit/Einarbeitsphase neuer Ziehwerkzeuge drastisch verkürzt, Ausschussproduktion und Stillstandszeiten sowie der Qualitätsaufwand während der Serienproduktion stark reduziert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Produktionsprozess von Karosseriebauteilen

Die Produktion von Automobilkarosserien beginnt mit der Anlieferung von Coils. Diese ca. 20 Tonnen schweren, zu Rollen aufgewickelten Blechbänder werden anschließend in einer Coilanlage gerichtet und zu Platinen (Tafeln) geschnitten. Dabei sind Formplatinen mit komplexeren Konturen und einfache zweidimensionale Geometrien zu unterscheiden. Die zu Stapeln kommissionierten ebenen Blechzuschnitte kommen als nächstes in den Platinenlader der Umformmaschine. So genannte Feeder legen die Blechtafel in das geöffnete Werkzeug ein und mit dem darauf folgenden Pressenhub entsteht daraus ein Ziehteil. Noch bis zu fünf weitere Arbeitsfolgen (Schneiden, Lochen, Abkanten, Nachschlagen bzw. Kalibrieren) sind erforderlich, um ein verbaubares Karosseriebauteil herzustellen.

Zur Umformung werden demnach eine Presse, das Werkzeug und der passende Werkstoff benötigt. Bei der Pressenanlage handelt es sich in der Regel um eine Universalmaschine, die lediglich den Antrieb und die Kraft liefert. Formgebend und damit bauteilspezifisch ist das Umformwerkzeug, welches in die Presse eingebaut das Blech zu einem Ziehteil formt. Dabei beeinflusst eine Vielzahl von Parametern das Ergebnis des Umformvorganges [Gra85].

2.1.1 Einflussgrößen

In der Literatur gilt der eingesetzte Werkstoff mit seinen mechanischen Kennwerten dabei zumeist als wichtigster Einflussfaktor [Gri99, Str94]. Die Materialeigenschaften, ausgedrückt durch Streckgrenze, Zugfestigkeit, Verfestigungsexponent und Anisotropie, bestimmen die Umformbarkeit hinsichtlich maximalem Umformgrad, Abstreckung und elastischem Rückfederungsverhalten. Schwankungen dieser Parameter, welche aus den Gieß- und Walzprozessen im Stahl- bzw. Aluminiumwerk resultieren, beeinträchtigen die Prozessstabilität in hohem Maße [Str94]. Ebenfalls starken Einfluss auf das Umformergebnis haben die geometrischen Abmessungen der Blechplatine. Ihre Beschnittkontur wird im Rahmen der Serienproduktion zwar nur selten geändert (vgl. Kapitel 5.4.2.4), jedoch unterliegt die Platinendicke stärkeren Schwankungen.

Neben dem eingesetzten Werkstoff stellt auch das Umformwerkzeug einen entscheidenden Parameter bezüglich des Umformergebnisses dar [Gri99, Str94]. Speziell die Abstimmung der Wirkflächen und die Genauigkeit des Werkzeuges bestimmen die Qualität des Ziehteils. Sowohl die Steifigkeit als auch der Kraftfluss im Werkzeug resultieren aus dessen Konstruktion. Der Fertigungsmittelkonstrukteur legt über die Anzahl der Krafteinleitungsstellen, die gewählte Verrippungsstrategie und den

Werkzeugwerkstoff die Beanspruchung des Werkzeuges fest [Tho93, Str94]. Bisher galt dabei, je steifer ein Umformwerkzeug und seine Führungen sind, desto besser ist dessen Genauigkeitsverhalten. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass der gezielte Einsatz der Werkzeugelastizität, bei Bedarf in Kombination mit so genannten Vielpunktziehanlagen, vorteilhaft sein kann [Tho93, Str94, Hoh98, Ele01, Häu02, usw.].

Dritter wesentlicher Einflussfaktor auf das Ergebnis des Umformprozesses ist die Pressenanlage. Speziell das Spiel in Führungen und Elastizitäten im Maschinengestell sowie dem Pressentisch führen zu Prozessschwankungen und beeinflussen die Reproduzierbarkeit des Umformergebnisses [Pah93]. Des Weiteren ist der Bewegungsablauf von der Maschinenbauart abhängig. So gibt das Gelenkgetriebe mechanischer Pressen bei konstanter Hubzahl die Stößelgeschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt der Umformbewegung vor. Dagegen kann sie bei hydraulischen Pressen frei über dem Stößelweg eingestellt werden [DS93]. Im tribologischen System Blech – Schmierstoff – Werkzeug hängt insbesondere die Reibzahl (μ) von dieser Bewegungsgeschwindigkeit ab, was speziell bei mechanischen Pressen bezüglich Output (hohe Hubzahl) und fehlerfreiem Ziehteil durch langsamere Umformung zu Zielkonflikten führen kann.

Zuletzt stellen auch die eingesetzte Schmierstoffart und -menge relevante Einflussparameter dar. Im Anlieferungszustand verfügen die Blechbänder über eine walzwerkseitig aufgetragene Grundbeölung, die hauptsächlich dem Transport- und Korrosionsschutz dient [Gra85]. Hierbei handelt es sich in der Regel um hochviskose Trockenschmierstoffe, die auch im Coil (aufgerolltes Blechband) auf der Fläche bleiben und nicht im Aufstandspunkt zusammenlaufen. Durch den Transport und die Lagerung der Coils sowie der Platinenstapel vor der Verarbeitung kann es dennoch zu Inhomogenitäten im Beölungsgrad aufeinander folgender Bleche kommen. Diese wirken sich neuerdings immer stärker aus, da aktuelle Produktionstrends den Einsatz von Zusatzschmierstoffen, wenn möglich, vermeiden (Kostenreduktion, Waschvermeidung). Außerdem besteht bei Verwendung hochviskoser Ziehfette die Gefahr, dass sie nicht in die eigentliche Umformzone gelangen und bei höheren Geschwindigkeiten der Schmierfilm abreißt [Gra85, Str94]. Ein daraus resultierender Anstieg der Reibkräfte zwischen Halbzeug und Werkzeug führt zu Aufschweißungen und erhöhtem Werkzeugverschleiß [Gra85, Mei05].

Der Mensch mit seiner Qualifikation und Kompetenz sowie die peripheren Rahmenbedingungen (Zuschnittgenauigkeit, Einlegeposition, Richtzustand des Bleches, usw.) werden zwar ebenfalls als Einflussgrößen auf den Produktionsprozess angesehen, jedoch misst man ihnen keine große Bedeutung zu. Tab. 2-1 fasst die prozessbeeinflussenden Faktoren noch einmal systematisch zusammen.

Werkstoff	Werkzeug	Maschine	Schmierung	Mensch
Eigenschaften	**Abstimmung**	**Genauigkeit**	**Medium**	**Qualifikation**
Festigkeit	Blechhaltertragbild	Steifigkeit	Art	Ausbildung
Verfestigungsverhalten	Distanzierung	Führungsspiel	Viskosität	Erfahrung
Anisotropie	Ziehstäbe	Pinolentragbild	Produkt	
Elastizität				
Duktilität	**Wirkflächen**	**Bauart**	**Menge**	**Kompetenz**
	Geometrie	Ziehapparat	Mediumdruck	Erfahrung
	Rauheit	Leistung / Arbeitsvermögen	Abquetschdruck	Verantwortung
	Beschichtung	Anzahl der Wirkungen		
Abmessungen	**Genauigkeit**	**Parametereinstellungen**		**Organisation**
Geometrie	Steifigkeit	Presskraft		Methoden
Dicke	Führungsspiel	Blechhaltekraft bzw.		Kommunikation
	Verschleiß	Ziehkissendruck		Flexibilität
		Geschwindigkeiten		
Oberfläche	**Bauart**			**Anforderungen**
Topographie	einfach bzw.			Kosten
Textur	mehrfach wirkend			Termine
Rauheit	Komplexität			Qualität
	Methode			

Tab. 2-1 Einflussgrößen

2.1.2 Versagensarten

Bei nicht ausreichender Robustheit gegenüber den Schwankungen der zuvor beschriebenen Einflussgrößen ist der Fertigungsprozess nur schwer zu beherrschen. Durch diese mangelnde Reproduzierbarkeit kommt es immer wieder zu Fehlern bei der Umformung von Karosseriebauteilen. Falten, Einschnürungen, Risse, Maßabweichungen und Oberflächenfehler sind die häufigsten Versagensarten, welche im Verlauf des Umformprozesses auftreten können [Str94]. Eine Systematik der Qualitätsmängel stellt Abb. 2-1 dar.

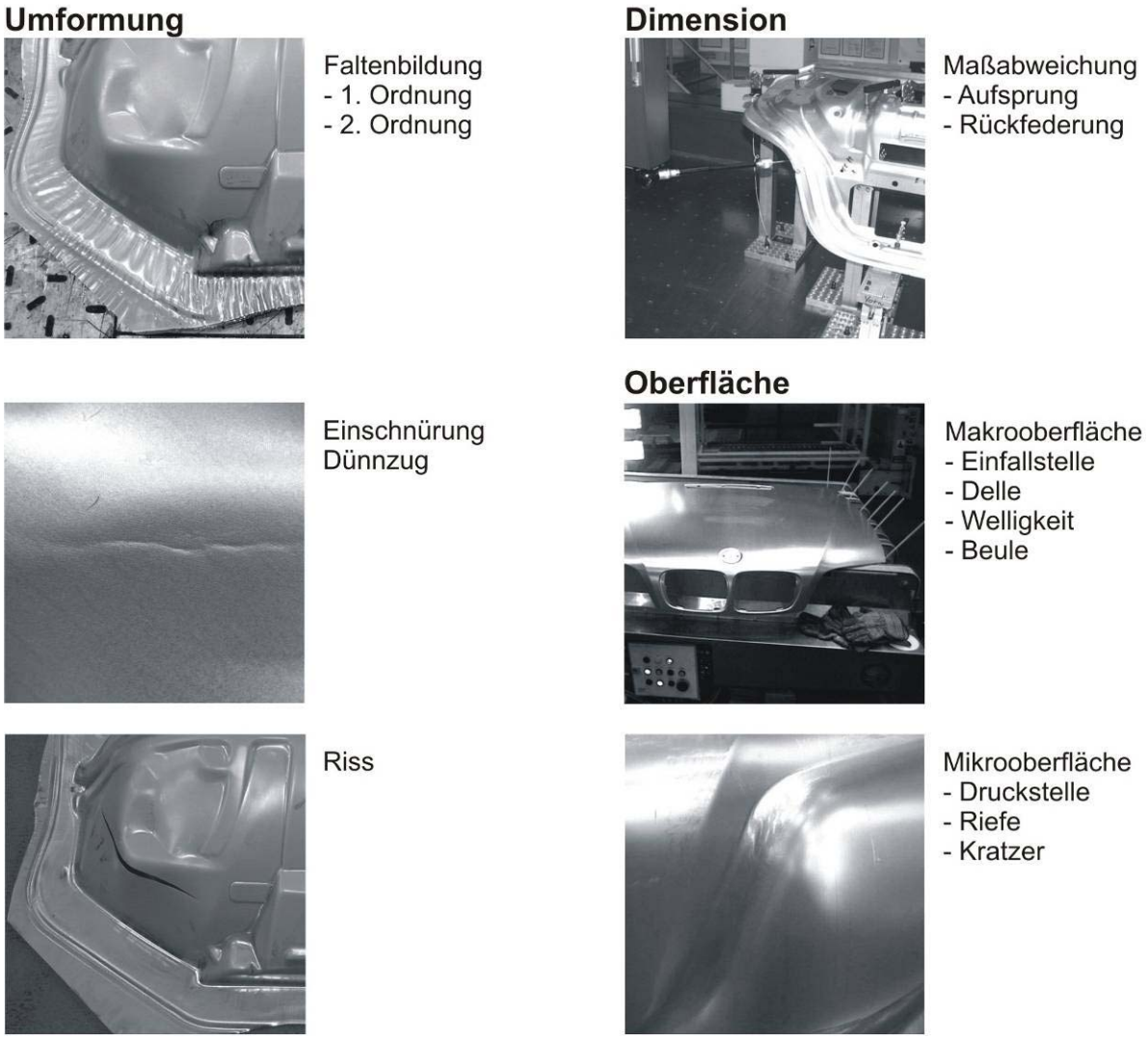

Abb. 2-1 Versagensarten

Falten sind nach dem Ort ihres Auftretens in Falten erster sowie zweiter Ordnung zu unterscheiden [Som86]. Tangentiale Druckspannungen im Flanschbereich vor gekrümmten Ziehkanten lassen insbesondere dünnes Feinblech in Dickenrichtung ausknicken und führen zu Falten erster Art. Um sie zu vermeiden, ist eine formschlüssige Führung des Ziehteilflansches mit Hilfe eines Niederhalters notwendig [Häu02]. Falten zweiter Art entstehen durch weite Bereiche freier Umformung speziell bei konischen Formelementen und geneigter Zarge [Gri99, Yun05]. Das Verhältnis von radialen Zugspannungen zu tangentialen Druckspannungen in der Ziehteilzarge bestimmt die Intensität dieser Falten [Som86, Ele01]. Somit kann die Faltenbildung zweiter Ordnung durch eine Erhöhung der Radialspannungen im Zargenbereich verhindert werden. Erreicht wird dies durch eine verstärkte Behinderung des Materialeinzuges im Flanschbereich infolge erhöhten Niederhalterdruckes [Hes95, Gri99, Ele01]. Gleichzeitig führt eine gestiegene Flächenpressung im Flanschbereich auch zur Vermeidung von Falten erster Art [Gri99].

Einschnürungen und Risse entstehen, wenn die in das Bauteil eingeleiteten Spannungen das lokale Formänderungsvermögen erschöpfen [Häu02]. Ursachen können eine zu hohe Blechhaltekraft [Gri99], ein Werkstoff mit zu geringem Umformvermögen, eine ungünstige Werkzeuggeometrie und eine nicht ausreichende Schmierung sein [Spu85, Lan90, Tsc97, Gir04].

Die Maßhaltigkeit, als weiteres entscheidendes Qualitätsmerkmal von Karosseriebauteilen, hängt stark von der Rückfederung des Materials ab. Inhomogene Spannungszustände aufgrund ungleichmäßiger Plastifizierung des Werkstoffes über der Blechdicke führen nach der Umformung durch ihre elastische Entspannung zum so genannten Aufsprung [Gri99, Ele01, Yun05]. Dabei ist die Formabweichung umso größer, je höher der Anteil der elastischen Verformung an der Gesamtverformung ist [Bet93]. Zur Gewährleistung der Maßhaltigkeit ist die Rückfederung mit Hilfe konstruktiver und fertigungstechnischer Maßnahmen zu minimieren. Vorhaltewerte, die bereits während der Werkzeugkonstruktion den möglichen Aufsprung berücksichtigen, als auch die Erhöhung der Niederhalterkraft zur gleichmäßigeren Plastifizierung [Bet93, Gri99, Ele01] stellen in diesem Zusammenhang bevorzugte Lösungsansätze dar.

Zuletzt sind auch Oberflächenfehler in Form von Wellen, Einfallstellen, Dellen und Beulen sowie Riefen und Kratzer insbesondere bei Außenhautteilen hinreichend als Qualitätsmängel bekannt. Während die beiden letzten, mikroskopischen Oberflächenfehler auf Werkzeugverschleiß, Materialaufschweißungen oder Verschmutzungen zurückzuführen sind, verursachen unmittelbar benachbarte Zonen starker und schwacher Umformung die makroskopischen Fehler [Gir04]. Analog zur Vermeidung von Falten lassen sich diese Oberflächenirritationen mittels höherer Niederhalterkraft (stärkere Plastifizierung) in gewissen Grenzen vermeiden [Gri99].

2.2 Werkzeug- und Pressentechnik

Die Umformanlage stellt in der Regel eine Universalmaschine dar, welche durch Ihre Wirkbewegung und nur in Kombination mit einem bauteilspezifischen Werkzeug die Produktion von Blechformteilen ermöglicht. Um das Auftreten fertigungstechnischer Schwierigkeiten zu minimieren, ist eine optimale Anpassung von Ziehwerkzeug und Presse notwendig [Pah93].

2.2.1 Pressentechnik

Produktionsanlagen zur Herstellung von Karosseriebauteilen sind nach ihrer Antriebsart in mechanische und hydraulische Pressen zu unterscheiden. Ferner differenziert man die Maschinen hinsichtlich Ihres Bewegungsablaufes in einfach- und doppeltwirkend. Bei mechanischen, also weggebundenen, Pressen erfolgt die Kraftübertragung auf den Stößel durch Pleuel [Sch96]. Ähnlich dem Kolbenhub im

Verbrennungsmotor wird der Pressenstößel von einem, um zusätzliche Gelenkgetriebe erweiterten, Exzenterantrieb auf und ab bewegt. Die Bewegungscharakteristik des Stößels wird dabei vom Getriebe vorgegeben. Im Gegensatz dazu ist die Kinematik des Stößels hydraulischer, also kraftgebundener, Maschinen frei wählbar. Bei diesen Anlagen erfolgt die Krafteinleitung über die Kolbenstangen der Hydraulikzylinder [Sch96].

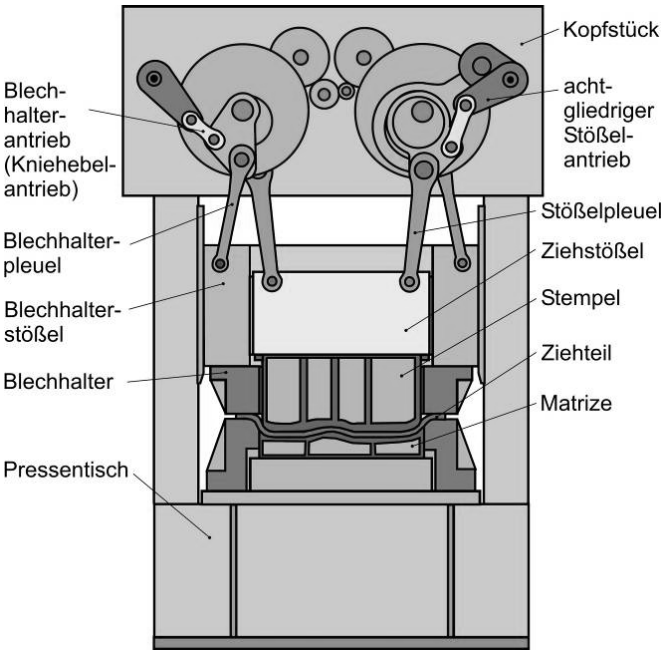

Abb. 2-2 mechanische, doppeltwirkende Presse [Sch96]

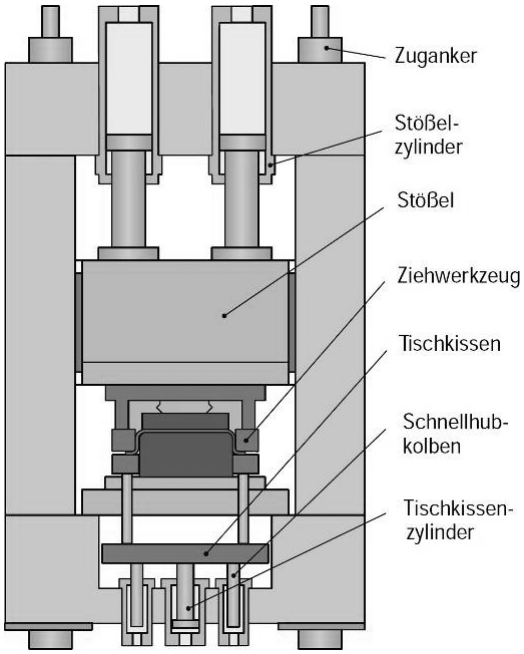

Abb. 2-3 hydraulische, einfachwirkende Presse [Sch96]

Zweifachwirkende Pressen verfügen über zwei getrennte, oben angeordnete Stößelantriebe [Kla94]. Am innen liegenden Ziehstößel wird der Stempel und am äußeren Blechhalterstößel der Niederhalter eines doppeltwirkenden Werkzeuges befestigt. Die Matrize befindet sich dabei unten auf dem Pressentisch [Sch96].

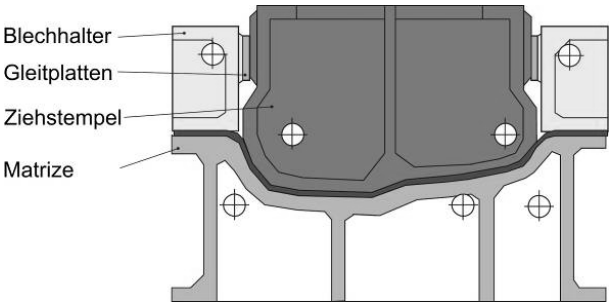

Abb. 2-4 doppeltwirkendes Werkzeug [Sch96]

Einfachwirkende Umformanlagen weisen lediglich einen Stößelantrieb auf. Aus diesem Grund wird bei einfachwirkenden Ziehwerkzeugen die Matrize oben angeordnet, der Stempel befindet sich ortsfest auf dem Pressentisch und der Niederhalter erfordert eine so genannte Zieheinrichtung im Maschinenfundament [Kla94].

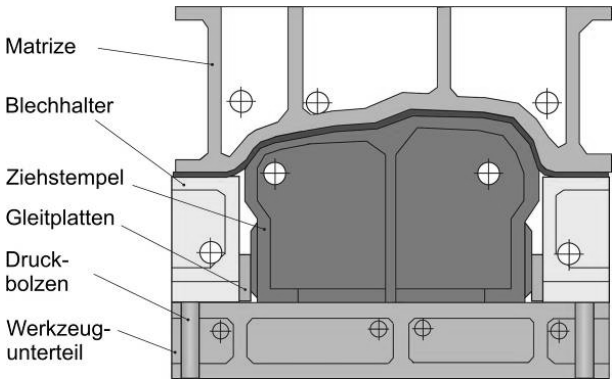

Abb. 2-5 einfachwirkendes Werkzeug [Sch96]

Die Hauptnachteile einfachwirkender Pressen sind zum einen das ungünstige Energieverhältnis aufgrund einer der Stößelbewegung entgegengesetzt gerichteten Ziehkissenkraft [Häu02] und zum anderen der Auftreffstoß beim Schließen des Werkzeuges durch die schlagartige Beschleunigung des Ziehapparates auf Stößelgeschwindigkeit [Som86].

Dagegen muss der Ziehstößel doppeltwirkender Pressen lediglich die Umformenergie aufbringen und auch beim Schließen des Werkzeuges sind mit diesem Maschinenkonzept keine Auftreffschläge zu erwarten. Der Niederhalter einer zweifachwirkenden mechanischen Presse befindet sich beim Schließen mit der Matrize in seiner unteren Totpunktlage (UT), wodurch er sich der Platine nur sehr langsam nähert und schlagartiges Aufsetzen vermeidet [Som86]. Mit hydraulischen Anlagen ist das harte Zusammenfahren der Werkzeugteile aufgrund frei wählbarer Bewegungsabläufe ohnehin unnötig [Hoh99].

Einen gravierenden Nachteil doppeltwirkender mechanischer Karosseriepressen stellen abnehmende Niederhalterkräfte während des Umformvorganges durch die elastische Dehnung der Pressenständer dar [Zün69]. Ihnen kann lediglich mittels hydraulischer Druckgarnituren unter den Antriebspleueln entgegengewirkt werden. Generell negativ am zweifachwirkenden Maschinenkonzept sind die höheren Investitionen resultierend aus der aufwendigeren Stößelmechanik [Zün69, Häu02]. Außerdem ist die Wannenlage des Ziehteils ungünstig, da sie in der Regel eine kosten- sowie platzintensive Wendeoperation für nachfolgende Schneidprozesse erfordert [Sch96, For00, Häu02].

Aufgrund der Nachteile doppeltwirkender Anlagen und wirtschaftlicher Kostenpotentiale sowie technischer Handhabungsvorteile setzt die Automobilindustrie zur Herstellung von Karosseriebauteilen vorrangig einfachwirkende Pressen ein [Str94, For00]. Der wesentlich einfachere und damit finanziell günstigere Aufbau sowie die korrekte Orientierung des Werkstückes nach der Umformoperation stellen die maßgeblichen Vorteile dieses Maschinenkonzeptes dar. Zudem ermöglicht das einfachwirkende Tiefziehen die Integration der Ziehstufe in eine Großteiltransferpresse – eine

Maschinenbauart, welche gegenüber den zu Pressenstraßen verketteten Einzelpressen immer stärker eingesetzt wird [Sch91].

Einfachwirkende Umformwerkzeuge, die keine integrierte Zieheinrichtung aufweisen, erfordern maschinenseitig einen Ziehapparat [For00]. Dieses so genannte Ziehkissen wurde früher aus Kostengründen pneumatisch ausgeführt. Nachteile in Form von Schwingungen beim Auftreffen des Stößels [Sch96] sowie des hubzahl- und kissenwegabhängigen Kraftanstieges [Som86] führten jedoch sehr schnell zur Entwicklung hydraulischer Zieheinrichtungen [Häu02]. In beiden Fällen wird die Niederhalterkraft durch die Verdrängung eines Mediums erzeugt und über die Steuerung des Druckes bzw. des abfließenden Volumenstromes variiert. Dabei wirken die Zylinderkräfte auf die Ziehkissenplatte von wo aus sie über Pinolen (Druckbolzen) an den Blechhalter des Umformwerkzeuges weitergeleitet werden (vgl. Abb. 2-3).

Gegenwärtig am häufigsten im Einsatz sind Ein- und Vierpunktziehkissen. Die Einpunktzieheinrichtung erzeugt die Niederhalterkraft durch einen zentral angeordneten Ziehkissenzylinder, was eine entsprechende Führung der Ziehkissenplatte zur Vermeidung von Verkippungen bei außermittiger Krafteinleitung voraussetzt. Im Vergleich dazu sitzt bei einem Vierpunktziehapparat in jeder Ecke des Druckkastens ein Zylinder, wodurch Verkippungen nahezu ausgeschlossen sind. Außerdem lässt sich dadurch die Verteilung der Pinolenkräfte in gewissen Grenzen durch eine Variation der einzelnen Zylinderdrücke beeinflussen [Häu02].

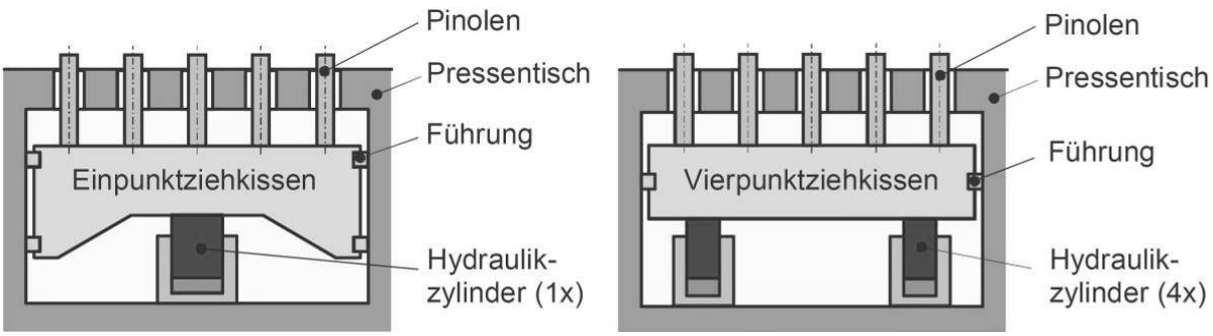

Abb. 2-6 Gegenüberstellung Einpunkt- und Vierpunktziehkissen [Häu02]

Moderne Zieheinrichtungen auf aktuellstem Entwicklungsstand verfügen über vier, sechs oder gar acht Druckpunkte [Sch91, HS00]. Sie erlauben die Vorgabe eines optimal angepassten Druck-Weg-Verlaufes über der Ziehtiefe [Kla94] und können den Auftreffstoß beim Schließen des Werkzeuges durch eine Ziehkissenvorbeschleunigung vermeiden [Hof91, Ele01].

2.2.2 Werkzeugtechnik

Um ein Umformwerkzeug herzustellen, bedarf es zunächst einer Bauteilkonstruktion des betrachteten Karosserieteiles. Stand der Technik ist dabei der Einsatz von CAD-Tools zur Beschreibung der Bauteilgeometrie.

Basierend auf dieser Konstruktion legt der Methodenplaner die Fertigungsfolge fest. Diese so genannte Methode enthält die Reihenfolge und Anzahl der Fertigungsschritte [Sch96]. Außerdem beschreibt sie die für Umform- sowie Beschnittoperationen erforderlichen Wirkflächen und deren Bewegungen. Bei komplexen Karosserieteilen wird die Planung der Stadienfolge durch Umformsimulationen zur Identifikation kritischer Bauteilbereiche unterstützt. Ziel dabei ist, den späteren Produktionsprozess durch Kenntnis der neuralgischen Zonen und entsprechend geschickte Methodenauslegung möglichst robust gegenüber schwankenden Eingangsparametern zu gestalten.

Nach Freigabe der Methode und Ziehanlage beginnt unter Berücksichtigung pressenspezifischer sowie struktureller Randbedingungen deren Umsetzung in eine Werkzeugkonstruktion [Gir04]. Obwohl sich in der Literatur kaum Hinweise auf eine optimale Auslegung und belastungsorientierte Gestaltung von Werkzeugkörpern finden, verfügen viele Hersteller über firmeninterne Normen und Bauvorschriften. Allen gemein ist die standardmäßige C- oder Kastenprofilbauweise, gekennzeichnet durch ein orthogonales Verrippungsmuster, homogene Wandstärken und einheitliche Abstände [Häu01, Häu02].

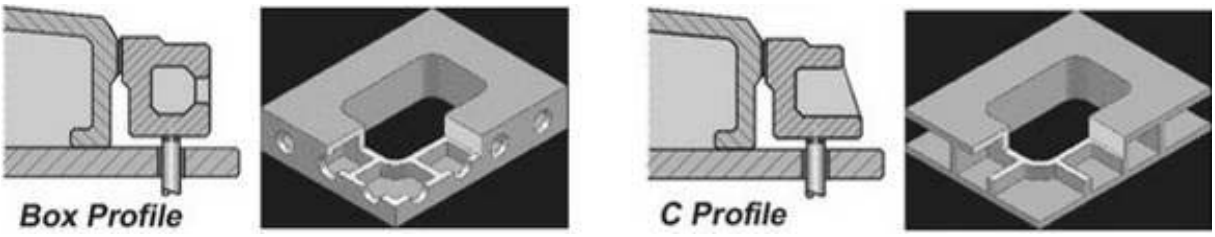

Abb. 2-7 konventionelle Kastenprofil-Verrippung und C-Profil-Verrippung [Häu02]

Mit Hilfe der konventionellen Verrippungsstrategien entstehen Werkzeuge mit maximierter Steifigkeit bei gleichzeitig minimiertem Gewicht. Ziel der hohen Eigensteifigkeit ist die Unabhängigkeit des Werkzeuges von maschinenseitigen Einflüssen. So geht eine bislang vorherrschende Auffassung innerhalb der Fertigungsmittelkonstruktion davon aus, dass pressenseitige Toleranzen, wie Verkippungen oder Führungsspiel, vom eingebauten Werkzeug auszugleichen sind [Tho93, Hoh99].

Im Anschluss an die Werkzeugkonstruktion erfolgen die Erstellung eines Styropormodells und der anschließende Gießprozess. Handelt es sich bei dem Werkzeugkonzept um eine Schweißkonstruktion, findet der Werkzeugaufbau statt. Mit dem Fräsen von Regelgeometrien (bspw. Grund- und Führungsflächen) beginnt die maschinelle Bearbeitung des Rohgusses. Den Abschluss bildet die HSC- (High Speed Cutting) Bearbeitung der Freiformflächen.

Nach der Montage von Kleinteilen wie Gleitplatten, Platineneinweisern und anderen Normelementen kann der Werkzeugbau mit der Try-Out-Phase des Umformwerkzeuges fortgesetzt werden. Trotz des vorausgegangenen Einsatzes modernster CAM-Technik ist dieser Werkzeugeinarbeitungsprozess stark von manueller Tätigkeit

geprägt. So sind die Wirkflächen von Stempel, Matrize und Blechhalter in langwieriger Handarbeit aufeinander abzustimmen [Gir04]. Ursache für die minimalen Ungenauigkeiten in den Aktivflächen des Werkzeuges sind die Toleranzen beim Auf- und Umspannen während der Fräsbearbeitung sowie die Elastizitäten der Maschine und des Werkzeuges selbst. Sie führen beim ersten Zusammenfahren des Umformwerkzeuges in der Try-Out-Presse zu einem inhomogenen Tragbild, weshalb speziell im Niederhalterbereich solange Werkzeugwerkstoff abzutragen ist, bis ein gleichmäßiger Kontakt von Matrize und Blechhalter vorliegt. Erst im Anschluss daran können Bauteilzonen, welche während des Umformvorganges aufgrund lokaler Schubspannungen aufdicken, durch weiteres Abschleifen eintuschiert werden. Außerdem sind der Materialfluss während der Umformung und die daraus resultierende Blechausdünnung über eine örtliche Anpassung der Rückhaltekräfte im Niederhalterflansch solange zu optimieren, bis das Ziehteil den Qualitätsanforderungen entspricht [Häu00, Häu01, Häu02]. Dazu muss der Werkzeugmacher einerseits mit der Methode des Hart-Weich-Tuschierens ein Oberflächenrelief einarbeiten, welches die Flächenpressung lokal variiert. Örtlich größere Abstände der Blechhalterflächen begünstigen dabei den Werkstoffffluss, wogegen geringere Spaltweiten zu höherer Flächenpressung führen und den Materialfluss aufgrund erhöhter Reibung behindern [Kla94]. Andererseits hat er die Einlauf-, Auslauf- und Kopfradien der Ziehsicke bzw. des Ziehstabes lokal entsprechend so einzutuschieren, bis das Blecheinzugsverhalten akzeptabel ist. Schwierigkeiten ergeben sich aus der Verrippungsstrategie (sich gegenüberstehende Vertikalrippen bzw. Zonen zwischen den Rippen) [Häu01] und dem elastischen Verhalten der Presse sowie des Werkzeuges [Kla94]. Deshalb sind lediglich Werkzeugmacher mit langjähriger Erfahrung und viel Know How über den Umformvorgang in der Lage, ein Werkzeug möglichst schnell und prozesssicher einzuarbeiten.

Nachdem auf der Try-Out-Presse mit der einen zur Verfügung stehenden Materialcharge Gutteile abgepresst werden konnten, erfolgt der Transfer des Werkzeuges in die Produktionspresse. Im Regelfall führen die maschinenseitigen Unterschiede im Führungsspiel und der Anlagensteifigkeit zur Notwendigkeit des Umtuschierens [Kla94, For00]. Sollte dies jedoch nicht in dem dafür vorgesehenen Zeitfenster der Produktionsunterbrechung realisierbar sein, findet eine weitere Qualitätsschleife auf der Try-Out-Anlage statt.

Der hohe Ressourcenbedarf (Arbeitszeit und Anlagenkapazität), das Vorgehen nach dem Prinzip des Trial and Error sowie die geringe Verschleißbeständigkeit [Hoh99, For00] erhobener Werkzeugbereiche sind die Hauptnachteile des manuellen Eintuschierens. Außerdem bieten starre, eintuschierte Umformwerkzeuge dem Fertigungsfachmann während der laufenden Serienproduktion nur wenige Möglichkeiten, um auf Prozessveränderungen aufgrund von schwankenden Eingangsparametern (bspw. Chargenwechsel des Materials) zu reagieren. So bleibt neben einer Änderung

des Ziehkissendruckes der Presse, welche sich global auf das gesamte Bauteil auswirkt, lediglich eine Anpassung der Blechhalterdistanzen. Diese so genannten Ziehhilfen dienen einer definierten, lokalen Spaltweiteneinstellung zwischen Ober- und Unterwerkzeug, wodurch die Flächenpressung und damit der Materialfluss gesteuert werden kann [HS00]. Die Höhe, der an mehreren Stellen des Niederhalters angebrachten Distanzen, lässt sich durch Unterlegen von Lehrenbändern oder Verschieben zweier schrägverzahnter Platten ändern. Allerdings führt der Kraftnebenschluss zwischen Blechplatine und Ziehhilfe zu unkontrollierten Wechselwirkungen mit der Materialstärke [Gir04]. Des Weiteren können kleine Änderungen in einem Bereich des Werkzeuges große Auswirkungen in den übrigen Regionen des Bauteilflansches hervorrufen. Aus den genannten Gründen ist der Einsatz von Blechhalterdistanzen als kritisch anzusehen und es stellt sich die Frage, ob eine Materialflusssteuerung über Ziehhilfen auch zukünftig zum Erfolg führt [HS00].

2.3 Elastische Werkzeugkonzepte und zugehörige Anlagen

Die im vorangegangenen Gliederungspunkt vorgestellten starren, eintuschierten Umformwerkzeuge mit Blechhalterdistanzierung sind aktueller Stand der Technik in den Großserienpresswerken der Automobilindustrie. Ihre beschriebenen Nachteile motivierten Forschungs- und Hochschulinstitute zu weitergehenden Entwicklungen im Werkzeug- und Anlagenbau. Der entscheidende Ansatz dabei ist die bewusst elastische Gestaltung der Werkzeugwirkflächen. Das führt zu wesentlich homogeneren Tragbildern und bietet bei Einsatz von Verstellelementen die Möglichkeit zur gezielten Prozessbeeinflussung durch Anpassung der lokalen, partiellen Niederhalterkräfte. Zu unterscheiden sind in diesem Zusammenhang passiv und aktiv elastische Werkzeugkonzepte [Ele01].

2.3.1 Passiv elastische Werkzeugkonzepte

Ein hinreichend erforschtes Konzept aufseiten der passiv elastischen Werkzeuge ist der niederhalterseitige Einsatz von Gummikissen bzw. Elastomerplatten kombiniert mit einer dünnen Stahlplatte (vgl. Abb. 2-8). Witthüser [Wit80] stellte 1980 erstmals einen solchen Gummi-elastischen Niederhalter vor. Basierend auf diesen Erkenntnissen führte Sommer [Som86] 1986 eine Weiterentwicklung der Bauform durch und anschließend nutzte Zharkov [Zha92] 1992 dieses Prinzip bei seinem zweifachwirkenden Umformwerkzeug mit differenziertem Blechandruck. Zuletzt optimierte Stock [Sto95] 1995 die Konstruktionsform aufgrund gewisser Nachteile in Sommers Ausführung, wie bspw. der Notwendigkeit von Zentrierungen und Stützringen.

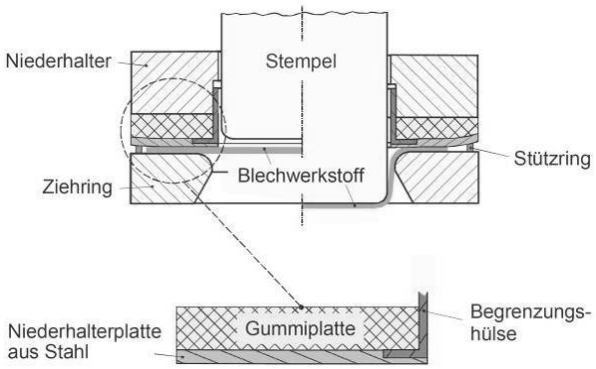

Abb. 2-8 Gummi-elastischer Niederhalter [Wit80]

Die Untersuchungen mit dem Gummi-elastischen Niederhalter zeigen, dass sich die Werkzeugwirkfläche der örtlichen Blechaufdickung anpasst. Dadurch sind eine homogene Verteilung der Flächenpressung, ein höheres Grenzziehverhältnis sowie die Verbesserung der Ziehteiloberfläche im Flanschbereich erreichbar. Ein weiterer Vorteil dieses Werkzeugkonzeptes besteht in dem Potential, Maschinenkippungen in gewissen Grenzen auszugleichen [Sto95]. Als nachteilig sind die nicht verstellbare Niederhalterelastizität sowie die geringe Verschleißbeständigkeit zu werten. Aus diesen Gründen erweist sich laut Thoms [Tho91] der Einsatz von elastischen Zwischenlagen bei Großwerkzeugen für die Serienproduktion als unpraktikabel.

Gleiches gilt mit Sicherheit auch für das Hydro-elastische Niederhalterkonzept, welches ebenfalls von Stock [Sto95] 1995 vorgestellt wurde (vgl. Abb. 2-9). Allerdings besteht hierbei zumindest die Möglichkeit einer Anpassung der Niederhaltersteifigkeit an geänderte Prozessparameter (bspw. Materialkennwerte) durch Variation des Mediendruckes.

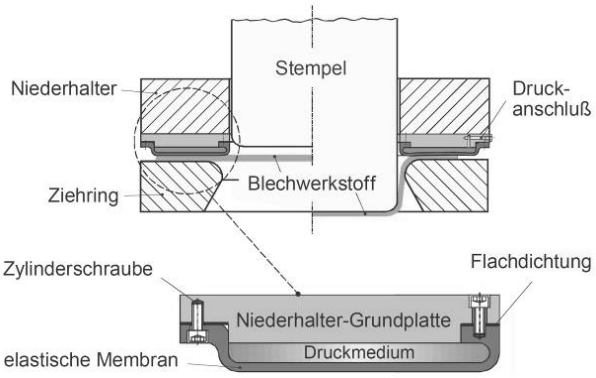

Abb. 2-9 Hydro-elastischer Niederhalter [Sto95]

Eine zuletzt analysierte Bauform passiv elastischer Werkzeuge wurde 2001 von Elend [Ele01] vorgestellt. Sein aus mehreren Komponenten montierter, passiv elastischer Niederhalter zeichnet sich durch die optimierte Anordnung der Stützrippen sowie der angepassten Plattenstärke aus.

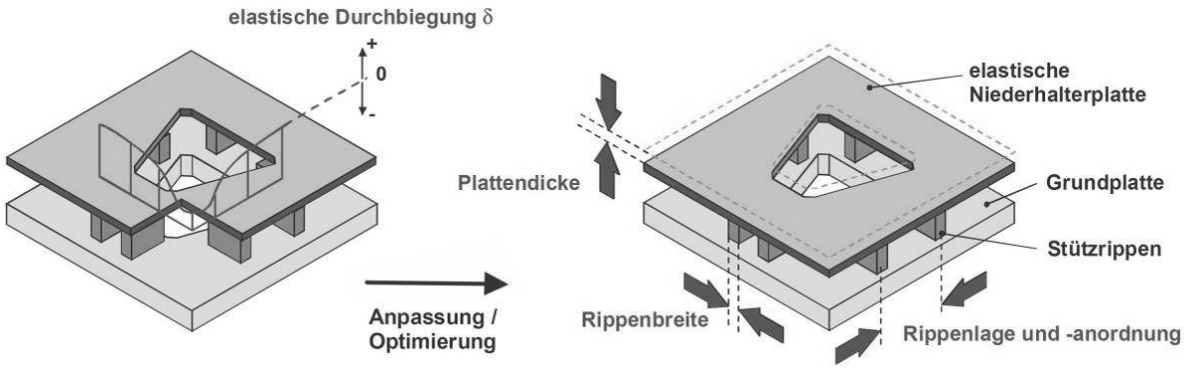

Abb. 2-10 passiv elastischer Niederhalter [Ele01]

Die Methode, sowohl die Lage als auch die Anordnung der Krafteinleitungspunkte zu optimieren, lässt sich ohne weiteres auf Guss- bzw. Schweißkonstruktionen übertragen. Dadurch ist dieses Konzept von den hier vorgestellten wohl am ehesten für den Einsatz in Serienwerkzeugen geeignet. Allerdings erlauben die passiv elastischen Werkzeuge keine lokale Variation der Flächenpressung, was jedoch zur gezielten Einflussnahme auf den Werkstoffffluss erforderlich ist. Aus diesem Grund wurden aktiv elastische Bauformen entwickelt, die im folgenden Gliederungspunkt näher erläutert werden.

2.3.2 Aktiv elastische Werkzeuge

Um den Tiefziehprozess durch eine lokal differenzierte Krafteinleitung aktiv zu beeinflussen, sind Niederhaltersysteme mit integrierten Stellgliedern notwendig. Ein erstes in diesem Zusammenhang vorgestelltes Konzept verwendete auch Griesbach [Gri99] bei seinen Untersuchungen. Es handelt sich um einen in mehrere Segmente aufgeteilten Niederhalter, wobei jedes dieser Teilstücke von einem werkzeuginternen Kurzhubhydraulikzylinder angesteuert wird. Damit lassen sich einzelne Bereiche des Blechflansches mit unterschiedlichen Niederhalterkräften beaufschlagen und der Werkstoffffluss partiell beeinflussen.

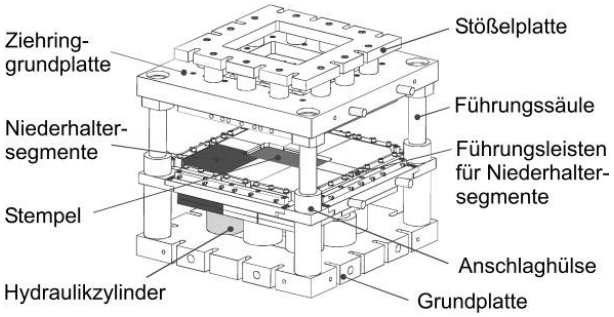

Abb. 2-11 Segmentierter Niederhalter nach Griesbach [Gri99]

Einen ähnlichen, segmentierten Niederhalter zur lokalen Beeinflussung der Flächenpressung in radialer sowie tangentialer Richtung ließ sich die *Aluminium Company of America* bereits 1988 patentieren [STS88].

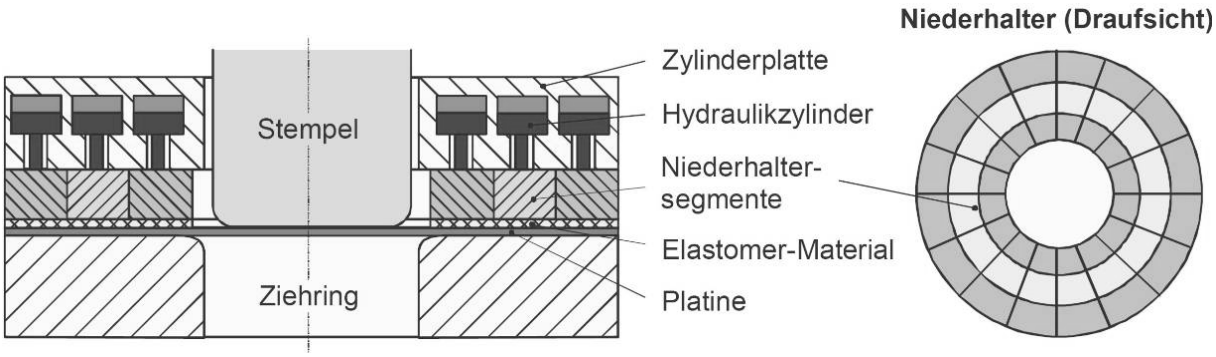

Abb. 2-12 Segmentierter Niederhalter nach Story, Trageser und Smith [STS88]

Neben der örtlich unterschiedlichen Niederhalterkrafteinleitung bieten segmentierte Werkzeuge die Möglichkeit zur Einstellung der jeweiligen Segmenthöhe. Hierdurch lassen sich unterschiedliche Materialstärken ausgleichen, was wiederum Vorteile bei der Umformung von tailored blanks[1] bringt. Den gravierenden Nachteil dieser geteilten Niederhaltersysteme stellt jedoch die Markenbildung auf der Blechoberfläche im Bereich der Trennungsfugen dar.

Ein anderes elastisches Werkzeugkonzept ohne dieses Manko präsentierte Thoms 1993 [Tho93]. Sein biegeweicher Blechhalter entsteht durch die Verkettung biegesteifer Balken mittels definierter Gelenkpunkte.

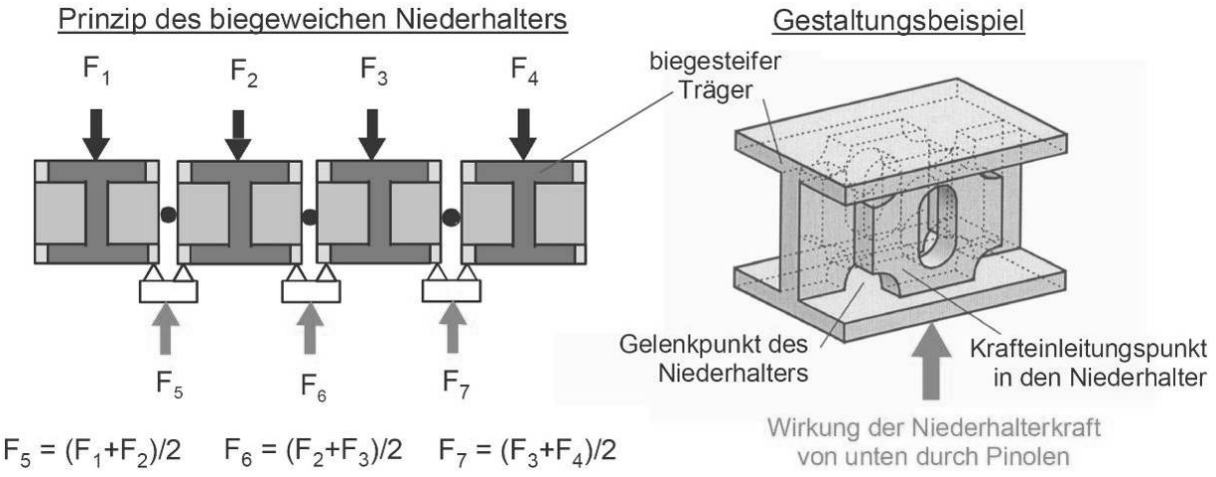

Abb. 2-13 biegeweicher Niederhalter [Tho93]

Die Gelenke werden durch Aussparungen in der Verrippung realisiert und dienen der Anpassung des Werkzeugsystems an die Umformmaschine [Ele01]. Auf diese Weise lassen sich zum einen Tisch- und Stößeldurchbiegung der Presse kompensieren aber zum anderen auch lokal unterschiedliche Blechhaltekräfte einleiten. Allerdings sind hierzu Vielpunktziehanlagen (vgl. Kapitel 2.3.3) bzw. werkzeuginterne Zieheinrichtungen erforderlich.

Letzteres gilt auch für den so genannten segmentelastischen Niederhalter, welcher am Institut für Umformtechnik von Professor Siegert und seinen Mitarbeitern

[1] Blechplatinen mit partiell unterschiedlicher Materialstärke, entweder flexibel herabgewalzt oder aus verschiedenen Werkstoffgüten zusammengeschweißt

entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um Pyramidenstümpfe, die über eine Deckplatte miteinander verbunden sind [Hoh98].

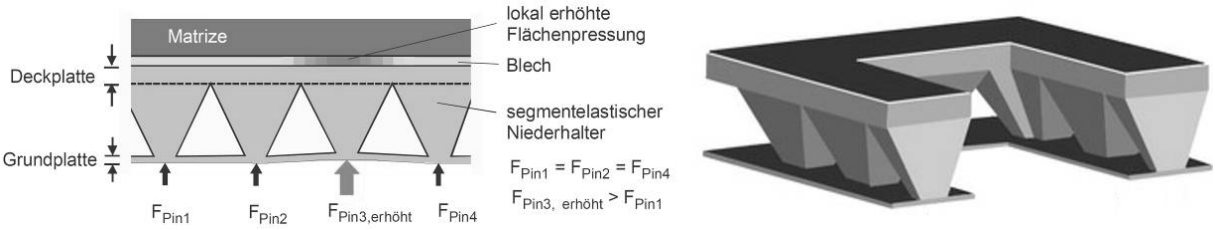

Abb. 2-14 Segmentelastischer Niederhalter [Häu02]

Ähnlich dem Konzept von Thoms sind hier mit den auf dem Kopf stehenden Pyramidenstümpfen sehr steife Elemente über „elastische Filmscharniergelenke“ aneinander gekoppelt. Der entscheidende Vorteil dieser Konstruktion ist die von den Nachbarsegmenten unabhängige Einstellbarkeit einer homogenen Flächenpressung über jedem einzelnen Pyramidenstumpf. Allerdings sind die erwartungsgemäß sehr hohen Scherspannungen bei nicht ebenen Werkzeugwirkflächen und der erhebliche konstruktive Aufwand, um sie zu kompensieren, als nachteilig zu bewerten. Zusätzlich erschwert wird dieser Sachverhalt durch die Ausführung des segmentelastischen Niederhalters als Gussbauteil. Des Weiteren macht die Bindung an ein spezielles Pinolenbild den Wechsel auf Pressen mit anderem Rastermaß unmöglich [Ele01]. Schließlich ist auch die verstärkte Kippneigung der hoch aufbauenden Pyramidenstümpfe in Blecheinzugsrichtung ein gravierender Nachteil dieses Konzeptes. Ihm kann durch den Einsatz einer dünnen Grundplatte zur Verbindung der Segmentunterseiten etwas entgegengewirkt werden.

Ein letztes, in mehreren Forschungsarbeiten verwendetes Konzept eines aktiv elastischen Werkzeuges besteht aus einer möglichst dünn ausgeführten und steifigkeitsoptimierten Niederhalterplatte, in welche die Blechhaltekraft direkt durch eine Vielzahl von Aktoren eingeleitet wird.

Kergen et al. stellten in diesem Zusammenhang 1996 ein Multi-Bereichs-Blechhaltekraft-Steuersystem vor [KDT96]. Damit lässt sich die Niederhalterkraft sowohl über dem Pressenhub als auch ortsabhängig im Bauteilflansch variieren. Mehrere Kurzhubzylinder, welche in den Blechhalter dieses zweifachwirkenden Umformwerkzeuges integriert sind, leiten lokal unterschiedliche Kräfte in die etwa 100mm starke Niederhalterplatte ein [DCK00]. Auf diese Weise kann der Werkstoffffluss in vier unabhängigen Zonen, den zwei langen und kurzen Ziehteilseiten sowie jeweils zwei Ecken, gezielt beeinflusst werden.

2001 veröffentlichte Elend [Ele01] seine Untersuchungen mit einem aktiv elastischen Werkzeug für die Gegenzugmethode (vgl. Kapitel 2.3.3). Auch bei diesem Werkzeug stützt sich eine gerade mal 15mm dicke Niederhalterstahlplatte auf acht Kurzhubhydraulikzylindern ab. Ausgehend von konstanten Drücken in den Eckzylindern und diesbezüglich um 15% bzw. 25% erhöhten Aktorkräften in den geraden Ziehteilseiten

wurden die Auswirkungen hinsichtlich der Bauteilgeometrie (speziell: des elastischen Rückfederungsverhaltens) analysiert. Allerdings fand keine Variation der Druckwerte in Abhängigkeit des Umformergebnisses zur möglichen Verbesserung der Bauteilqualität statt.

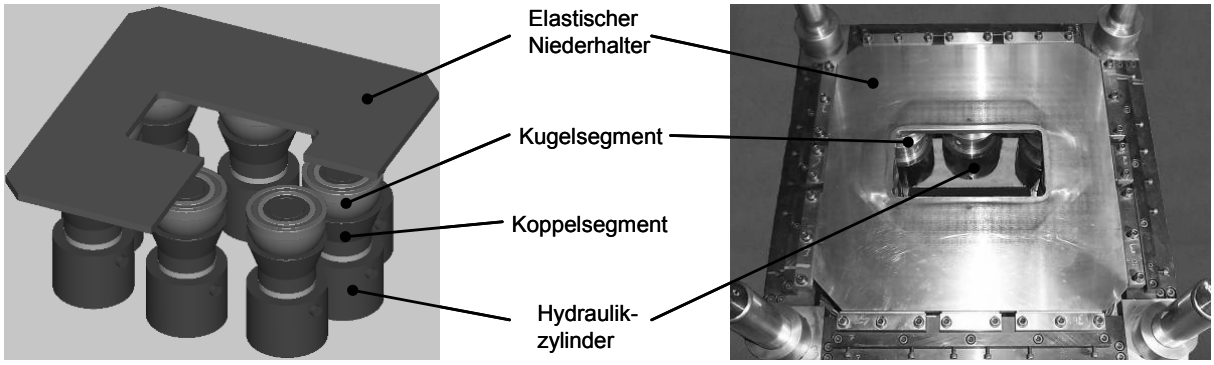

Abb. 2-15 Elastischer Niederhalter [Ele01]

Seine Praxistauglichkeit bestätigt dieses Konzept durch den Einsatz eines derartigen Werkzeuges in der Serienproduktion der Firma *FRANKE*. Auf einer von Schuler aufgebauten Anlage zur Herstellung von Edelstahlspülmulden wird die Niederhalterfunktion mittels einer Mehrpunktblechhaltezylindereinheit realisiert. Der elastische Blechhalter besteht aus einer flexiblen AMCO-Platte [Sch03].

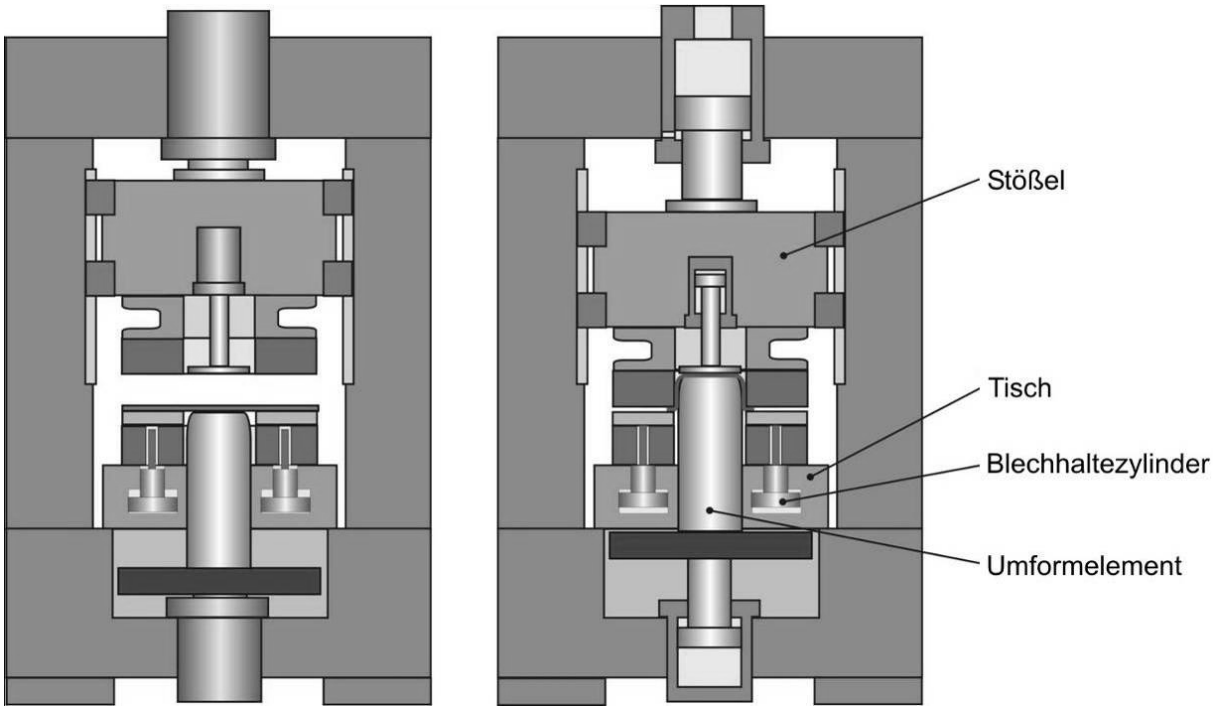

Abb. 2-16 Gegenzugmaschine und elastischer Blechhalter zur Herstellung von Edelstahlspülmulden [Sch03]

Ein ebenfalls in diese Kategorie einzuordnendes, allerdings etwas anders geartetes Konzept stellt die so genannte Shimming Plate der Firma *Hydraulico* dar. Sie dient ebenfalls der Produktion von Spülbecken im Gegenzugverfahren. Mehrere „Drucknester“, welche nahe der Stempelkante in diese Niederhalterplatte eingearbeitet sind, erlauben die örtlich differenzierte Einleitung von Blechhaltekräften und gestatten somit die gezielte, lokale Beeinflussung des Werkstoffflusses [Hyd04].

Abb. 2-17 Shimming Plate [Hyd04]

Zuletzt ist in diesem Zusammenhang auch auf die Arbeit von Bräunlich [Bräu02] hinzuweisen. Sein Niederhalter eines Tiefziehwerkzeuges zur Herstellung einer Behälterhälfte ist analog zu Elends Konstruktion ebenfalls als dünne Stahlplatte ausgeführt. Für die Analysen mit diesem einfachwirkenden Versuchswerkzeug standen mehrere Blechhalterplatten mit unterschiedlicher Dicke von 15mm bis 80mm zur Verfügung. Die lokal differenzierte Krafteinleitung geschah durch die 12 separat angesteuerten Pinolen des Vielpunktziehkissens der Umformpresse.

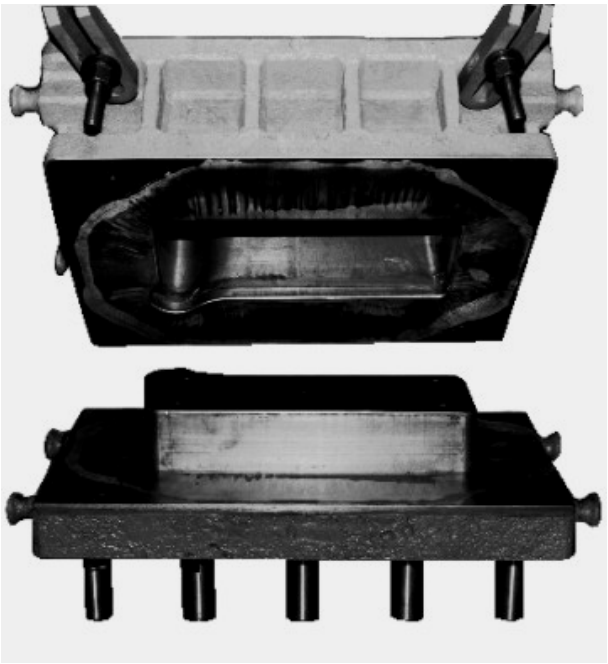

Abb. 2-18 Versuchswerkzeug „Behälterhälfte“ [Bräu02]

Völlig andersartig und hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt, ist die Möglichkeit, den Materialfluss während der Umformung mittels aktiver Ziehstäbe zu beeinflussen. Erstmals veröffentlicht wird diese Idee 1939 in der Patentschrift Nr. 681 196 [Bud39]. Dabei handelt es sich um in der Höhe verstellbare Ziehstäbe, die ab einer bestimmten Ziehtiefe mittels Keilschiebern ausgefahren werden und beim Tiefziehen eines Kotflügels die Faltenbildung vermeiden. Aufbauend auf dieser mechanischen Steuerung der Ziehstabhöhe präsentierte Oehler [Oeh60] 1960 rein hydraulische Konstruktionskonzepte. Mit Hilfe der ausfahrbaren Ziehleisten lassen sich sehr leicht hohe Rückhaltekräfte erzeugen, welche durch zusätzliche Biege- und Reibungskräfte an den Radien eines erhöhten Ziehstabes entstehen. Aktuelle Untersuchungen von Weinmann et al. [XBW98] und Beck [Bec00, Bec04] bestätigen, dass die über Hydraulikzylinder, Steuerelektronik und Keilschiebermechanismen verstellbaren Ziehstäbe eine gezielte Beeinflussung des Blecheinzuges im Flanschbereich

ermöglichen. Die größten Nachteile aktiver Ziehstäbe sind in der Gefahr von Oberflächenbeschädigungen und dem hohen Aufwand bei Justage, Reparatur bzw. Ersatz zu sehen. Letzteres gilt speziell dann, wenn umlaufende Ziehstäbe in eine Vielzahl von Segmenten unterteilt sind, um möglichst lokal Einfluss nehmen zu können. Nachteilig wirkt sich weiterhin der schlechtere Materialnutzungsgrad aus, welcher aus dem Beschnitt des Bauteilflansches mit der Sickengeometrie resultiert. Aus den genannten Gründen hat sich dieses Konzept in der industriellen Praxis bislang nicht durchgesetzt und wird auch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.3.3 Erforderliche Anlagentechnik

Die vorausgehenden Ausführungen zeigen, dass bewusst elastisch gestaltete Niederhalter ausreichend Potential bieten, um sie in der Serienproduktion einzusetzen. Speziell die Reduktion von manuellem Tuschieraufwand sowie die Chance mit Hilfe von Stellgliedern den Materialfluss und damit den Umformprozess gezielt lokal zu beeinflussen, sind sehr gute Gründe, sich die genannten Vorteile auch in Produktionswerkzeugen zu Nutze zu machen. Jedoch vernachlässigen diese Entwicklungen in Bezug auf die Automobilindustrie und die Herstellung von Karosseriebauteilen einen entscheidenden Aspekt. Es ist der aufgrund technischer und wirtschaftlicher Vorzüge vorrangige Einsatz des einfachwirkenden Tiefziehens mit passivem Ziehkissen [Rit05].

Vor diesem Hintergrund wird neben der Unpraktikabilität [Tho91] ein weiterer Nachteil der Gummi-elastischen Niederhalter von Sommer [Som86] und Zharkov [Zha92] als auch des hydroelastischen Blechhalters von Stock [Sto95] deutlich. Sie wurden für zweifachwirkende Maschinen konzipiert. Ebenso sind die aktiv elastischen Konzepte des segmentierten Werkzeuges von Story et al. [STS88] und des Multi-Bereichs Blechhaltekraft Steuersystems von Kergen et al. [KDT96, DCK00] für doppeltwirkende Anlagen gedacht.

Eine ganz andere Maschinenkategorie setzen die Entwicklungen von Griesbach [Gri99] und Elend [Ele01] als auch die Shimming Plate (vgl. Abb. 2-17) der Firma *Hydraulico* [Hyd04] voraus. Bei der hier angewandten Methode des Gegenziehens wird der Maschinenstößel samt Matrize auf Festanschläge herabgefahren und anschließend mechanisch verriegelt oder mit einer Schließkraft beaufschlagt, welche die Summe aus Gesamtniederhalterkraft und Stempelkraft übersteigt [Gri99]. Hiernach findet der Druckaufbau in den Kurzhubzylindern bzw. „Drucknestern“ zum Schließen des verbliebenen Werkzeugspaltes sowie zum Aufbringen der lokalen Niederhalterkräfte statt. Zuletzt fährt das aktive Ziehkissen den Stempel nach oben und formt das Bauteil in der Matrize aus. Dabei kann der Materialfluss mit Hilfe örtlich differenzierter Niederhalterkräfte über die Segmentierung bzw. die dünne, elastische Blechhalterplatte partiell gesteuert werden.

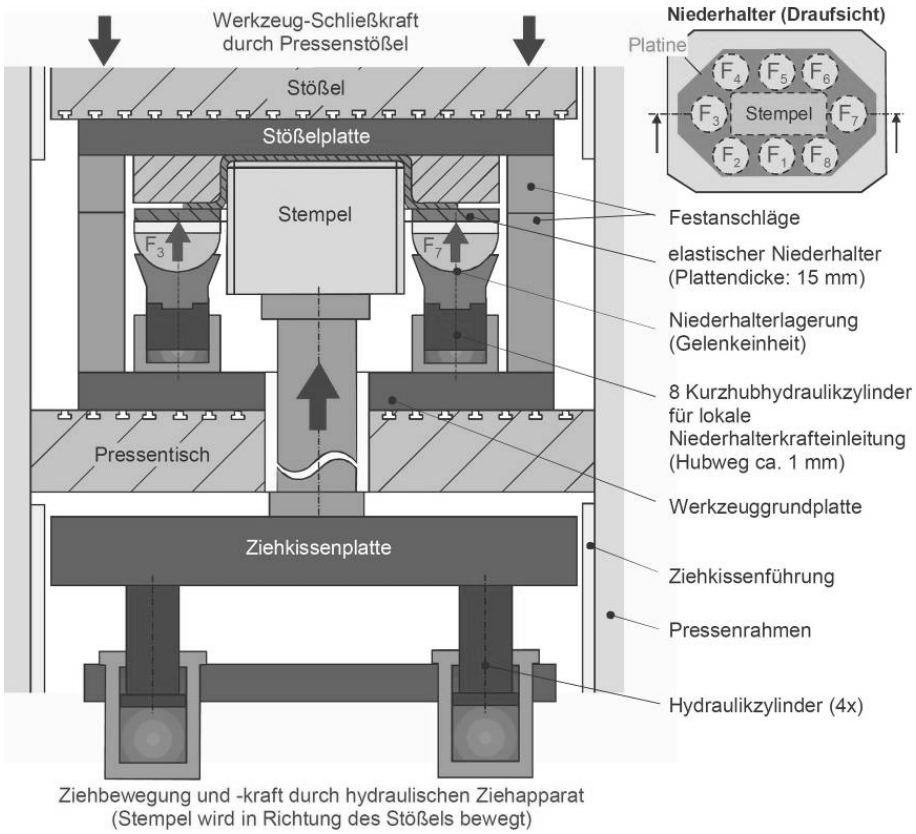

Abb. 2-19 Gegenzugmaschine mit aktiv elastischem Niederhalter [Ele01]

Obwohl die Anordnung des Umformwerkzeuges bei der Gegenzugmethode mit der beim einfachwirkenden Tiefziehen identisch ist, lässt sich dieses Verfahren aufgrund der passiven Ziehkissen von Großserienpressen nicht ohne weiteres zur Herstellung von Karosseriebauteilen anwenden. Außerdem ist anzunehmen, dass mit diesem Maschinenkonzept bedingt durch den Verriegelungsvorgang bisherige Hubzahlen von bis zu 14 Hub/Minute nicht erreichbar wären.

Elastische Werkzeugkonzepte wie der biegeweiche Niederhalter von Thoms [Tho93], der segmentelastische Blechhalter [Hoh98] und der aktiv elastische Faltenhalter [Ele01] wurden speziell für den Einsatz auf Vielpunktziehanlagen, einer weiteren sehr interessanten Maschinenbauform, entwickelt. In diesem Zusammenhang ist zwischen direkt und indirekt wirkenden Mehrpunktzieheinrichtungen zu unterscheiden [Hoh98]. Der grundsätzliche Maschinenaufbau entspricht dem einer einfachwirkenden Presse. Jedoch wird die Niederhalterkraft nicht über einen zentralen Zylinder und Pinolen, sondern im Fall der direkt wirkenden Variante über eine Vielzahl separat ansteuerbarer Hydraulikzylinder übertragen [Ele01]. Kommt die indirekt wirkende Ausführung zum Einsatz, so findet die örtlich differenzierte Krafteinleitung durch höhenverstellbare Druckstifte statt. Diese ausfahrbaren Pinolen stützen sich über die beim einfachwirkenden Ziehkissen übliche Ziehkissenplatte gegen die steuer- bzw. regelbaren Ziehkissenzylinder ab [SK91].

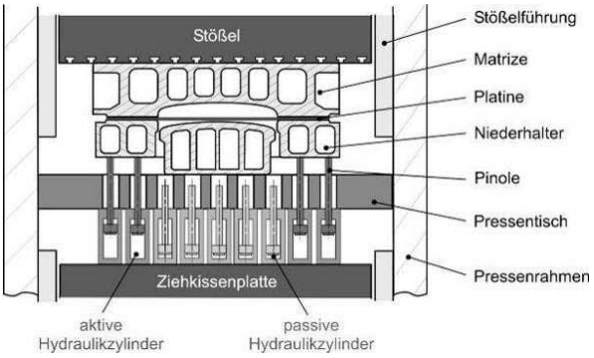

Abb. 2-20 Direkt wirkende Vielpunktziehanlage mit n Hydraulikzylindern [Bie91, Sei02]

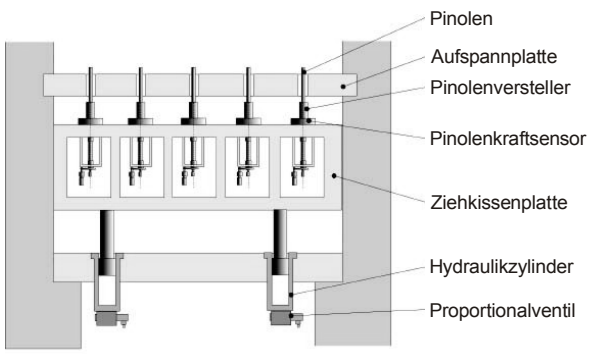

Abb. 2-21 Indirekt wirkende Vielpunktziehanlage mit aktiven Pinolen [Che91, SK91, Kla94, Hoh98, Sie98, Häu00, Sie00]

Über die Anpassung der einzelnen Zylinderdrücke bzw. Pinolenlängen lässt sich das Umformwerkzeug elastisch so verformen, dass einerseits die Stößel- und Tischdurchbiegung der Presse kompensiert und andererseits der Materialfluss durch örtlich unterschiedliche Flächenpressung lokal gesteuert werden kann [SK91]. Allerdings findet trotz dieses Vorteils und intensiver Forschungs- sowie Entwicklungsarbeit [Bie91, Che91, Sch91, SK91, Tho91, Kla94, Hoh98, Sie98, Bräu99, Sie00, Sei02] die Vielpunktziehtechnik bislang keinen übergreifenden Einsatz in der industriellen Großserienproduktion bei Automobilherstellern [Rit05]. Stattdessen ist sie vornehmlich an Hochschulen und Forschungsinstituten anzutreffen. Mögliche Gründe hierfür sind die höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu konventionellen, einfachwirkenden Anlagen und der enorme steuer- bzw. regelungstechnische Aufwand [Brä99]. Des Weiteren existieren derzeit lediglich wenige Konzeptvorgaben für entsprechend angepasste Werkzeugkonstruktionen, so dass Manager Zusatzinvestitionen für Mehrpunktzieheinrichtungen scheuen, da ihnen ein finanzieller Benefit durch verminderten Tuschieraufwand und weniger Ausschuss nicht garantiert werden kann.

Eine interessante Alternative zur Anschaffung einer teuren und komplexen Vielpunktziehanlage besteht in der Integration der Zieheinrichtung in das Umformwerkzeug [Häu00, Sie00, Häu02, Hal04]. Dazu sind im Unterwerkzeug Blockhydrauliken oder Gasdruckfedern verbaut, welche die Ziehkissenfunktion übernehmen. Die bei dieser Vorgehensweise frei wählbare Anordnung der Druckpunkte kombiniert mit einem elastischen Niederhalterkonzept gestattet es, den Umformprozess bauteilspezifisch optimal zu gestalten.

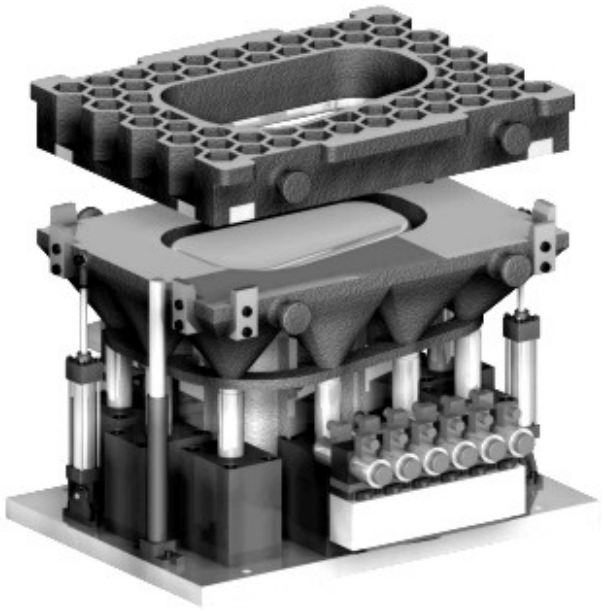

Abb. 2-22 Umformwerkzeug mit integrierter Zieheinrichtung und segmentelastischem Pyramidenstumpfniederhalter [Häu00, Sie00, Häu02, Hal04]

Hinderlich für einen Einsatz in der Serienproduktion wirken sich die vergleichsweise hohen Investitionskosten und das stark steigende Gewicht eines derartigen Werkzeuges aus. Darüber hinaus sind bei Bauteilen mit entsprechend großer Ziehtiefe enorme Öffnungsquerschnitte (Pressenmäuler) der Maschinen erforderlich und der vorhandene, ebenfalls teure Ziehapparat der Umformpresse bliebe ungenutzt [Rit05].

2.4 Sensorkonzepte zur Prozessüberwachung

Elastische Werkzeugkonzepte bieten die Möglichkeit, den Materialfluss gezielt lokal zu beeinflussen. Um dieses Potential zur Steigerung der Bauteilqualität und Reduktion des Ausschusses effizient auszuschöpfen, sind detaillierte Informationen über den aktuellen Zustand des Umformprozesses erforderlich. Aus diesem Grund wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten bereits eine Fülle von Parametern hinsichtlich ihrer Eignung zur Prozessüberwachung, ihrer kontinuierlichen Erfassbarkeit und ihrer Aussagekraft über die Prozessqualität analysiert.

2.4.1 Erfassung von Prozesskräften

Vergleichsweise einfach gestaltet sich die Erfassung von Prozesskräften, die während der Umformung auftreten. Hierzu sind in der Regel handelsübliche Dehnungsmessstreifen, piezoelektrische Sensoren oder komplette Kraftmessdosen basierend auf diesen beiden Messverfahren einsetzbar. Eine in diesem Zusammenhang mehrfach untersuchte Größe ist die Stempelkraft [Kla94, KDT96]. Als Maß für die in das Blech eingeleitete Umformkraft dient sie vorrangig zur Identifikation von Rissen. Sobald die zur Umformung erforderlichen Kräfte nicht mehr über die Zarge übertragen werden können, kommt es zum Bauteilversagen und abrupten Abfall der Stempelkraft. Dem Vorteil, die Kräfte sowohl in bewegten als auch feststehenden Stempeln durch leicht integrierbare Kraftaufnehmer ohne weiteres messen zu

können, steht die geringe Reaktion auf veränderte tribologische Prozessparameter gegenüber [Z_b98]. Außerdem gibt die Gesamtstempelkraft keine Auskunft über örtliche Kraftunterschiede [Yun05].

Ein weiterer sehr interessanter Parameter zur Beurteilung des Prozesszustandes ist die Reibkraft zwischen Blechoberfläche und Werkzeugwirkfläche. Sie hängt maßgeblich von den vorherrschenden tribologischen Bedingungen ab und bestimmt den Materialfluss zwischen Ober- sowie Unterwerkzeug. Um sie zu messen, integrierte Ziegler [Z_b98] in ein Napfwerkzeug ein Segment, welches sich auf drei 3-Komponenten-Kraftsensoren abstützt. Das Teilstück mit einem Öffnungswinkel von 60° ermöglicht die Erfassung der Reibkraft in der Blecheinzugsebene und der lokalen Niederhalterkraft. Entscheidender Nachteil dieser Anordnung ist die prinzipbedingte Segmentierung des Blechhalters zur Integration des Messsegmentes. Hierbei besteht ähnlich wie bei den segmentierten Werkzeugen (vgl. Kapitel 2.3.2) die Gefahr von sichtbaren Spuren auf dem Fertigteil (Marken), einer Verschmutzung der Segmentfugen [For00] und der Schwächung des Niederhalters.

Zuletzt lässt sich auch die Gesamt-Blechhaltekraft in Form des Ziehkissendruckes messtechnisch vergleichsweise einfach erfassen. Jedoch dient sie eher der Reaktion auf veränderte Eingangsparameter (Materialkennwerte usw.) und damit als Stellgröße in einer Prozesssteuerung bzw. -regelung. Lediglich zur Faltenvermeidung durch Vorgabe eines minimal erforderlichen Niederhalterkraftverlaufes und dessen Einhaltung wäre ihre Überwachung geeignet.

2.4.2 Messung von Faltenhöhe und Körperschall

Der Beginn von Faltenbildung im Flanschbereich charakterisiert die untere Grenze des Prozessfensters. Aus diesem Grund stellten Kergen et al. [KDT96] und Klamser [Kla94] eine Sensorik eigens zur Messung der Faltenhöhe vor. In Kergens Ausführung wird die Faltenhöhe über die Bestimmung des Abstandes von Matrize und Blechhalter ermittelt. Bei dieser Vorgehensweise muss jedoch die normale Blechaufdickung im Flanschbereich durch ein geeignetes Prognosemodell berücksichtigt werden. Klamsers Aufbau vermeidet diese Schwierigkeit, in dem er zwei Wegaufnehmer kombiniert und einander gegenüberliegend anordnet. Die Addition beider Signale ergibt die Höhe der Falten unabhängig von deren Lage und der Aufdickung des Bauteilflansches. Für eine zuverlässige Erfassung ist es wichtig, dass der Tastkopf eine wesentlich kleinere Oberfläche als die Welligkeit der Falten aufweist.

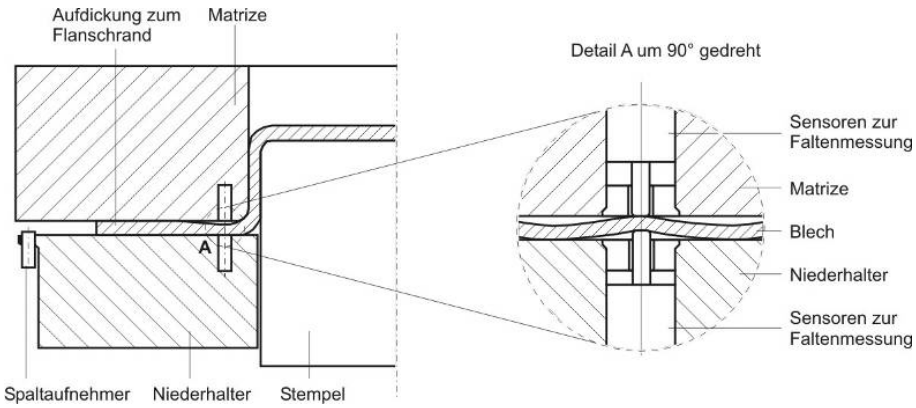

Abb. 2-23 Faltensensorik [Kla94]

Nachteile dieses Messverfahrens sind die Schwächung des Niederhalters aufgrund der notwendigen Bohrungen für die Faltensensoren und der hohe Verschleiß der berührenden Tastspitzen [For00].

Ebenfalls als Möglichkeit zur Prozessüberwachung untersucht wurde die Aufnahme von Körperschallsignalen. In der Dreh- und Schleifbearbeitung sowie für Stanz- und Schneidprozesse ist diese Technik bereits erfolgreich im Einsatz, um Versagensfälle in Form von Materialbrüchen zu erkennen [Str94]. Auch Tiefziehvorgänge rufen im umgeformten Werkstoff akustische Emissionen hervor, die Rückschlüsse auf veränderte Prozessbedingungen (Reibungs- und Schmierzustand), Rissbildung und Faltenentstehung zulassen. Allerdings sind Umformprozesse durch eine Vielzahl schallemittierender Verformungs- und Reibungsvorgänge gekennzeichnet, was eine erfolgreiche Prozessüberwachung basierend auf Körperschallsignalen erschwert. So ist bspw. der Beginn von Faltenbildung durch veränderte Signalverläufe feststellbar, jedoch in seiner Intensität von anderen Schallemissionen überlagert, was eindeutige Korrelationen verhindert [For00]. Weitere Nachteile dieses Verfahrens sind die lediglich nachträgliche Versagensidentifikation [Ruz99] und der hohe Aufwand bei der Signalauswertung [Str94]. Schließlich ist auch die örtliche Lokalisierung eines Risses im Bauteil aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Körperschalls unmöglich [Str94].

2.4.3 Stoffflussmessung

Einer der vielversprechendsten Ansätze zur praxisgerechten Überwachung des Tiefziehvorganges ist die Erfassung des Blecheinzuges. Vor allem die Tatsache, dass erfahrene Fertigungsfachmänner den Bauteilabschnitt, also den Flanscheinzug zur Einschätzung der Prozessqualität begutachten, unterstreicht die Bedeutung des Werkstoffflusses als einen der wichtigsten Prozessparameter [Gri99].

Sowohl der Einlaufweg als auch die Geschwindigkeit des Platinenflansches stellen dabei integrale Messgrößen dar, die auf eine Vielzahl von Einfluss- und Störfaktoren sensibel reagieren. Veränderungen im tribologischen System (Oberflächenrauhigkeit, Schmierzustand, Reibung), schwankende Niederhalterkräfte, variierender

Ziehkissendruck, Pressen- und Werkzeugspiel sowie Verkippungen und Temperatureinflüsse wirken sich gleichermaßen auf Materialeinzug, Einlaufgeschwindigkeit und die Bauteilqualität aus. Eine kontinuierliche Erfassung beider Prozessparameter enthält somit vielfältige Informationen über den aktuellen Prozesszustand [Rit05].

Allerdings findet zu Beginn des Umformprozesses hauptsächlich Streckziehen statt. Erst nachdem die Zugkräfte in der Zarge und dem Platinenflansch groß genug sind, um die Haftreibung zu überwinden, läuft Material aus dem Flanschbereich ein [For00]. Ziegler zeigte in diesem Zusammenhang auf, dass die Veränderung tribologisch relevanter Parameter bei kleinen Ziehtiefen zu lediglich geringen Differenzen im Blecheinzug führt [Z_b98]. Ebenso sind die Erfinder des Patentes DE 43 38 828 C2 der Ansicht, dass andere Qualitätsindikatoren als der Einlaufweg für bestimmte Bauteile oder Umformphasen höhere Relevanz besitzen [LSS93].

Dennoch lassen sich Gut-, Riss- und Faltenteile eindeutig anhand ihres Blecheinlaufweges unterscheiden. So ist bei einem gerissenen Bauteil im Vergleich zum Gutteil weniger und beim Faltenteil wesentlich mehr Material aus dem Flanschbereich nachgelaufen [Str94].

2.4.3.1 Tastzunge

Idealerweise erfolgt die Messung des Stoffflusses direkt am Matrizeneinlaufradius, der eigentlichen Umformzone. Allerdings ist das aufgrund der hohen Beanspruchungen und des Verschleißes messtechnisch sehr schwer zu realisieren [For00]. Aus diesem Grund stellte Straube [Str94] 1994 einen ersten Flanscheinlaufsensor vor, der über eine im Werkzeugspalt nachgeführte Blechzunge den Einzug der Platinenkante misst. Die Messzunge weist dabei eine geringere Stärke als das Tiefziehmaterial auf und wird während des Umformvorganges über einen Pneumatikzylinder permanent gegen die Kante der einlaufenden Restflanschkontur gedrückt. Ein mit der Blechzunge verbundener, handelsüblicher, induktiver Tauchankerwegaufnehmer erfasst die Bewegung und somit den Materialeinzug. Die Gefahr des Ausknickens und Einklemmens der dünnen Metallzunge [Gri99, For00] sowie die prinzipbedingte Einschränkung der Einsetzbarkeit bei ausschließlich ebenen Niederhaltergeometrien ohne Ziehsicken stellen die Hauptnachteile dieses Sensors dar. Des Weiteren beansprucht der außen liegende Wegaufnehmer kostbaren Bauraum.

2.4.3.2 Rollkugelsensor

In Kenntnis dieser Nachteile stellte Griesbach [Gri99] 1999 einen zweiten taktilen Sensor zur Stoffflussmessung innerhalb des Umformwerkzeuges vor. Dieser so genannte Rollkugelsensor arbeitet nach dem Prinzip der Computermaus bzw. eines Trackballs. Die Sensorkugel wird von der einlaufenden Platine in Rotation versetzt und überträgt ihre Bewegung auf zwei rechtwinklig angeordnete Messwalzen. Mit Hilfe zweier in Gabellichtschranken laufenden Lochblenden lassen sich die

Drehbewegungen der Messrollen in elektrische Signale umwandeln und die Sensorkugelrotation um die beiden orthogonalen Achsen auswerten. Damit können alle ebenen Platinenbewegungen, speziell die Richtung und die Geschwindigkeit des Stoffflusses sowie der Einlaufweg, erfasst werden.

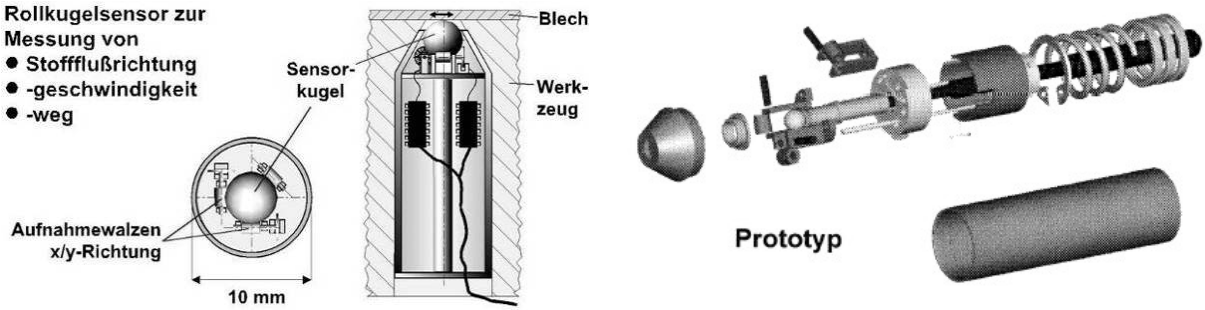

Abb. 2-24 Aufbau des Rollkugelsensors [Gri99]

Der als gekapselte Einheit aufgebaute Sensor ist in das Ziehwerkzeug integrierbar und macht eine Stoffflussmessung nahe dem Matrizeneinlaufradius grundsätzlich möglich. Allerdings besteht durch die prinzipbedingte Öffnung für die Sensorkugel eine große Verschmutzungsgefahr und aufgrund flacher Kopfwinkel sind tiefe Freibohrungen bis kurz unter die Werkzeugoberfläche nötig [For00]. Die dadurch hervorgerufene Schwächung des Werkzeuges führt bei hohen Flächenpressungen zu unerwünschten Eindruckstellen. Durch die Verwendung einer zweiten Kugel sind unter gegebenen Platzrestriktionen zwar spitzere Sensorkopfwinkel erreichbar, jedoch muss dann die Platinenbewegung ein drittes Mal mittels schlupfbehaftetem Reibschluss übertragen werden [Gri99].

2.4.3.3 Induktiver Sensor

Da taktile Sensoren wie die Tastzunge und der Rollkugelsensor den rauen Presswerkbedingungen aufgrund ihrer Störanfälligkeit nicht gerecht werden, stellte Forstmann [For00] 2000 ihre Ergebnisse aus der Entwicklung berührungsloser Stoffflusssensoren vor. In ihren Vorüberlegungen bewertete sie zunächst kapazitive als auch induktive Wegsensoren. Das Sensorkonzept auf Basis einer sich ändernden Kondensator-Kapazität wurde ausgeschlossen, da zum einen eine elektrische Kontaktierung der einlaufenden Platine erforderlich ist und zum anderen die am Markt erhältlichen Werkstoffe für den Aufbau einer dünnen Dielektrikumsschicht zwischen den beiden Kondensatorplatten (Werkzeug und Blechplatine) ungeeignet sind. Ein induktiv transformatorischer Ansatz kommt infolge der Notwendigkeit, Sensorspulen (Erreger- sowie Empfängerspule) und Versorgungskabel in Ober- sowie Unterwerkzeug zu integrieren, ebenfalls nicht in Frage [For00].

Stattdessen präsentierte Forstmann einen Sensor, der auf dem Messprinzip der Induktivitätsänderung basiert. Diese Lösung erfordert lediglich eine Sensorspule, die zudem in einem nichtmagnetischen sowie elektrisch nichtleitfähigen Kunststoff gekapselt und somit vollständig in das Umformwerkzeug integriert werden kann.

Das Einlaufen der Platine verringert die vom magnetischen Spulenfluss durchsetzte Fläche, was eine entsprechende Rückwirkung auf die Sensorspule sowie deren Impedanz zur Folge hat. Diese veränderliche Spulenimpedanz dient als Maß für den Einlaufweg [For00]. Im Falle nichtferromagnetischer Blechwerkstoffe (bspw. Aluminiumlegierungen) wird die Wegmessung mittels Wirbelstromeffekt durchgeführt [For00].

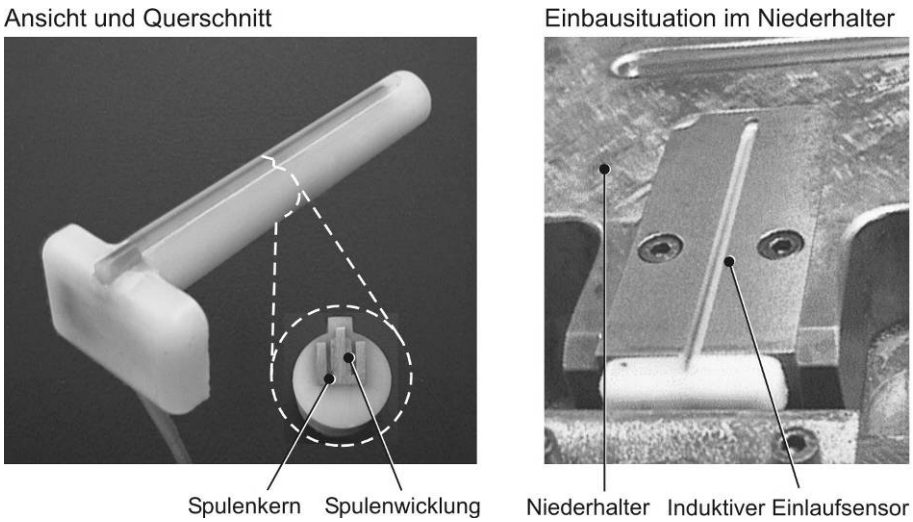

Abb. 2-25 induktiver Sensor [For00]

Für zuverlässige Messergebnisse ist durch eine Mindestflächenpressung [For00] das permanente Anliegen der Platine zu gewährleisten. Außerdem muss der Sensor außerhalb von Bauteilzonen mit Faltenbildung positioniert werden [For00]. Denn Luftspalte zwischen Platine und Sensorspule führen zu zusätzlichen Induktivitätsänderungen und verhindern eine eindeutige Signalinterpretation hinsichtlich des Einlaufweges. Ein weiteres Manko stellt die Signalabhängigkeit von Umgebungseinflüssen wie den Materialparametern, dem Schmierzustand und der Oberflächenbeschichtung dar. Sie setzt die vorherige Ermittlung von Sensorkenndaten für die zu messende Werkstoffgüte und Blechdicke voraus [Yun05]. Neben der Schwächung des Werkzeuges durch die notwendige Unterbrechung seiner Aktivfläche ist auch der nutzbare Bereich der Spule mit lediglich 80% ihrer Gesamtlänge [Str94] unbefriedigend. Enorm nichtlineares Verhalten in den Randbereichen der Sensorspule verursacht diese Einschränkung. Zuletzt stellt auch analog zur Tastzunge die Nichtanwendbarkeit unter Ziehstäben oder bei gekrümmten Blechhaltergeometrien einen gravierenden Nachteil dieses Sensorkonzeptes dar.

2.4.3.4 Lasertriangulationssensor

Ein zweiter berührungslos messender Stoffflusssensor arbeitet nach dem Prinzip der Lasertriangulation. Zur Erfassung des Flanscheinzuges verwendete erstmals Bräunlich [Brä02] dieses Verfahren, bei dem der aus einer Laserdiode ausgesandte Strahl von der Platinenkante reflektiert und über eine Optik auf ein positionsempfindliches Objekt fokussiert wird. Die einlaufende Blechkante reduziert den Reflektions-

winkel und verändert damit die Auftreffposition des reflektierten Laserstrahls auf dem optischen Element, was als Maß für den Einlaufweg dient [For00].

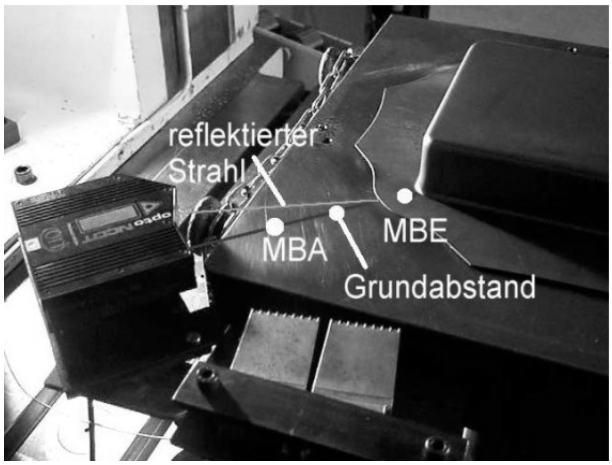

Abb. 2-26 Lasertriangulationssensor [Brä02]

Nachteile dieses Sensors ergeben sich aus den erforderlichen Strahldurchmessern für die Messung größerer Einlaufwege [For00]. So ist die Lichtfleckausdehnung am Messbereichende in der Regel wesentlich größer als die Materialstärke [Brä02]. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Tatsache, dass die Öffnung zwischen Matrize sowie Blechhalter als Spaltblende wirkt und die reflektierte Lichtleistung reduziert, ist eine zuverlässige Erfassung des Einlaufweges fraglich. Analog zur Tastzunge beschränkt der prinzipbedingt geradlinige Strahlengang den Einsatzbereich dieses Sensors auf ebene Niederhaltergeometrien ohne Ziehsicken und die außerhalb des Umformwerkzeuges anzuordnenden Sensorkomponenten sind der Gefahr mechanischer Beschädigung ausgesetzt [For00]. Zuletzt wirkt sich auch der an der Platinenkante entstehende Schmierstoffwulst nachteilig auf dieses Messkonzept aus. Eine kontinuierliche Datenerfassung ist lediglich durch Zusatzmaßnahmen wie dem Freiblasen des Messkanals mittels Pressluft zu gewährleisten [Brä02].

2.4.3.5 Optischer Sensor

Nachdem bereits der Rollkugelsensor von der Computermaus inspiriert war und die Innovationen im Bereich der PC-Technik inzwischen optische Mäuse hervorgebracht haben, lag es nahe, daraus einen optischen Blecheinzugssensor abzuleiten. Mitarbeiter des IFUM entwickelten einen berührungslosen, optischen Stoffflusssensor, der aus einem integrierten CMOS-Chip (Complementary Metal Oxide Semiconductor) in Kombination mit einem DSP (Digitaler Signalprozessor) besteht. Zur Beleuchtung und Vergrößerung der Blechoberfläche kommen außerdem LED's und eine Optik zum Einsatz [Sei02, Yun05].

Der CMOS-Sensor nimmt in seiner Funktion als Hochgeschwindigkeitskamera von der einlaufenden Materialoberfläche bis zu 1.500 Bilder pro Sekunde auf. Anschließend werden charakteristische Hell-Dunkel-Strukturen der Blechoberfläche in den aufeinander folgenden Aufnahmen vom Signalprozessor verglichen und im Rahmen

dieser Bildverarbeitung die Relativbewegung der Platine in der Blecheinzugsebene berechnet [Bag04].

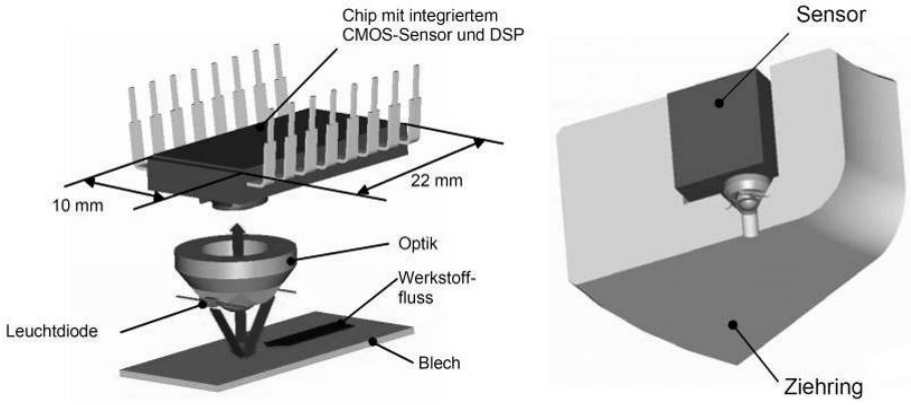

Abb. 2-27 Optischer Sensor [Sei02, Yun05]

Analog zum Rollkugelsensor ermöglicht auch der optische Sensor die Stoffflussmessung nahe dem Matrizeneinlaufradius. Der Aufbau als gekapselter Einsatz gestattet die vollständige Integration in das Umformwerkzeug. Allerdings besteht auch hier durch die prinzipbedingte Öffnung in der Niederhalterfläche die Gefahr der Verunreinigung des Sensorkopfes. Des Weiteren sind ähnlich dem Rollkugelsensor tiefe Freibohrungen bis kurz unter die Werkzeugoberfläche erforderlich, da der optische Sensor nur aus kurzer Entfernung zum Blech messen kann. Zuletzt stellt auch die vom Platinenwerkstoff abhängige Auflösung (mm/Impuls) einen Nachteil dieses Sensorkonzeptes dar. Sie muss zuvor durch experimentelle Kalibrierung mit Materialproben ermittelt werden. Yun [Yun05] stellte dabei fest, dass die von ihm verwendete Aluminiumlegierung zwischen zwei Sensorimpulsen rund 0,1mm mehr Weg zurücklegt, als die untersuchten Stahlwerkstoffe.

Theoretisch sollte dieses Messverfahren unabhängig von der betrachteten Oberfläche sein, sofern diese nicht völlig unstrukturiert ist [Bag04]. Allerdings hängt die Impulsfolge auch sehr stark von den hardwarecodierten Bildverarbeitungsalgorithmen im DSP ab. Im Fall der optischen Computermaus wurden diese Algorithmen für eine durch den Bediener visuell überwachte und nachgeführte Zeigeoparation entwickelt, bei der Genauigkeiten im Millimeterbereich völlig ausreichend sind.

2.5 Zusammenfassung

Die zahlreichen an Hochschulen und Forschungsinstituten entwickelten Werkzeug- sowie Sensorkonzepte stellen eine hervorragende Basis zum Aufbau einer Regelung des Umformprozesses dar. Einige Ansätze hierzu werden in den Veröffentlichungen bereits beschrieben.

Kergen et al. [KDT96] bauten eine Prozessregelung auf, welche die Stempelkraft (vgl. Kapitel 2.4.1) als Regelgröße und die Niederhalterkraft als Stellgröße verwendet. Analog zu Klamser [Kla94] schlagen sie die Faltenhöhe (vgl. Kapitel 2.4.2) als zweite Prozessregelgröße vor. Einer beginnenden Faltenbildung im Bauteil-

flansch wirkt der Regler durch Erhöhung der Blechhalterkraft entgegen. Daraus resultiert ein minimaler Niederhalterkraftverlauf mit der erforderlichen Mindestflächenpressung zur Faltenvermeidung. Bei Überwachung der Stempelkraft wird ein vorgegebener konstanter Kraftsollwert durch die veränderliche Blechhalterkraft eingehalten. Der Sollwert liegt geringfügig unter der maximalen Stempelkraft wodurch sich aus dieser Vorgehensweise ein maximaler Niederhalterkraftverlauf zur Gewährleistung der Rissfreiheit ergibt.

Ziegler [Z_b98] benutzte seine Reibkraftsensorik (vgl. Kapitel 2.4.1) zum Aufbau eines Prozessregelkreises. Als Sollwertvorgabe dienten Reibkraftverläufe, die während der Produktion von Gutteilen aufgenommen wurden. Abweichungen zwischen Ist- und Sollwert gleicht der Regler über angepasste Niederhalterkräfte wieder aus.

In vielen Regelungen kam die Stoffflussmessung als Führungsgröße zum Einsatz. Als Erster beschrieb Straube [Str94] 1994 einen Regelkreis unter Verwendung des Einlaufweges, gemessen mit der Tastzunge (vgl. Kapitel 2.4.3.1), und einer variablen Niederhalterkraft, direkt eingeleitet von einer Vierpunktziehanlage. Der Druck in jedem dieser vier Krafteinleitungspunkte wurde basierend auf dem Signal des zugeordneten Einzugssensors geregelt.

Griesbach [Gri99] nutzte den von ihm entwickelten Rollenkugelsensor (vgl. Kapitel 2.4.3.2) in Kombination mit einem segmentierten Umformwerkzeug (vgl. Kapitel 2.3.2). Symmetriebedingt genügte ein Sensor, positioniert in einem Ecksegment des Blechhaltes, zur Regelung der Drücke unter allen vier Niederhalterecksegmenten. Die Kräfte der übrigen vier geraden Segmente dieses Ziehwerkzeuges für eine Kastengeometrie wurden manuell vorgegeben.

An einer ähnlichen Bauteilgeometrie, einer Behälterhälfte, realisierte Bräunlich [Brä02] die Regelung des Blecheinzuges mit Hilfe eines Lasertriangulationssensors (vgl. Kapitel 2.4.3.4). Die gezielte lokale Beeinflussung der Blechhalterkraft nahm er über die im Pressentisch einer hydraulischen Doppelständerpresse integrierte direktwirkende Vielpunktzieheinrichtung (vgl. Kapitel 2.3.3) in Kombination mit einer elastischen Niederhalterplatte (vgl. Kapitel 2.3.2) vor.

Zuletzt setzt auch Yun [Yun05] seinen optischen Sensor zusammen mit einem Fuzzy-Regler zum Aufbau eines Stoffflussregelkreises ein. Dabei liefert der am Eckenauslauf einer rechteckigen Ziehteilgeometrie positionierte Messkopf Informationen über die aktuelle Radiallängung. Der Fuzzy-Regler generiert daraus mit Hilfe des experimentell ermittelten und hinterlegten Regelwissens die Soll-Niederhalterkraft als Input für den Blechhalterkraftregelkreis. Obwohl Yun eine Vielpunktziehanlage (vgl. Kapitel 2.3.3) in Kombination mit dem aktiv elastischen Niederhalter (vgl. Kapitel 2.3.2) von Elend [Ele01] benutzt, verzichtet er aufgrund der einfachen, symmetrischen Bauteilgeometrie auf eine örtlich differenzierte Krafteinleitung.

Stattdessen wird lediglich die Gesamtniederhalterkraft in Abhängigkeit des Materialeinzuges variiert und gleichmäßig auf die zehn Pinolen verteilt [Yun05].

Die bereits im Detail beschriebenen Nachteile der einzelnen elastischen Werkzeugkonzepte sowie die fehlenden Vorraussetzungen hinsichtlich spezieller Anlagentechnik (vgl. Kapitel 2.3) führen dazu, dass in Großserienpresswerken der Automobilindustrie nach wie vor mit Werkzeugen konventioneller Kasten- bzw. C-Profil-Bauweise produziert wird. Außerdem muss dabei auf zusätzliche Informationen über den Prozesszustand bezogen auf dessen Prozessfenster verzichtet werden, da sich keines der vorgestellten Sensorkonzepte (vgl. Kapitel 2.4) durch die notwendige Einfachheit, Kompaktheit und Robustheit für den Einsatz in einem Serienpresswerk auszeichnet [Rit05]. Die aufgezeigten Potentiale einer Prozessüberwachung, -steuerung oder gar -regelung bleiben in diesem Zusammenhang bislang ungenutzt.

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Werkzeugkonzept zu entwickeln, mit dessen Hilfe sich die angesprochenen Potentiale einer Überwachung, Steuerung oder gar Regelung des Umformprozesses auf serienreifem Niveau erschließen lassen. Konkret geht es dabei um die Integration eines Systems, bestehend aus Sensorik und Aktorik, in ein Tiefziehwerkzeug. Die Sensoren dienen der Überwachung und Beobachtung des Umformprozesses, um dessen Zustand in Bezug auf sein Prozessfenster zu beurteilen. Des Weiteren ermöglichen die Messwerte den Abgleich mit Simulationsergebnissen. Aktive Elemente, die Aktuatoren, erlauben die gezielte Reaktion auf Prozessschwankung und -veränderungen.

Grundlegende Prämisse für die Konzeptentwicklung ist der Einsatz bestehender Presswerkstrukturen. Speziell die vorhandenen Anlagen und Maschinen sollen ohne vorherige Modifikationen verwendbar sein. Die vergleichsweise lange Nutzungsdauer der existenten Pressenanlagen stellt die entscheidende Motivation für diese Einschränkung dar. Deshalb wird in diesem Zusammenhang nicht von der Anschaffung neuer Pressentechnik wie bspw. Vielpunktziehanlagen oder Gegenzugmaschinen ausgegangen.

Stattdessen konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf das Umformwerkzeug, da im Bereich des Werkzeugbaus Innovationen in deutlich kürzeren Zyklen umgesetzt werden können als in der Pressentechnik. Dafür verantwortlich ist der ca. alle sieben Jahre stattfindende Generationswechsel eines Fahrzeugmodells, für den in der Regel neue Tiefziehwerkzeuge notwendig sind. Eine Pressenanlage weist demgegenüber eine dreißigjährige Nutzungsdauer sowie ein Vielfaches der Investitionskosten eines Werkzeugsatzes auf. Nicht zuletzt deshalb dürfte die Bereitschaft, Zusatzkosten für Aktorik und Sensorik in Kauf zu nehmen, im Bereich des Werkzeugbaus eher gegeben sein [Rit05].

Seitens der Betreiber (Presswerk) und der Hersteller (Werkzeugbau) eines Tiefziehwerkzeuges besteht weiterhin der Anspruch, durch eine derartige Systemintegration keinen Mehrbedarf an zusätzlichem Werkzeugbauraum zu verursachen.

Die maßgebliche Zielsetzung dieser Arbeit ist die Erschließung folgender Potentiale einer derartigen Werkzeugkonzeption:

Mittels der implementierten Aktorik und Sensorik, dem Abgleich mit Simulationsergebnissen und der gezielten, partiellen Beeinflussung des Umformprozesses wird eine Verkürzung der Anlaufzeit und eine schnellere Inbetriebnahme neuer Ziehwerkzeuge erreicht. Darüber hinaus sind weniger Korrekturschleifen beim Transfer des Werkzeuges von der Try-Out- auf die Produktionspresse erforderlich, da vorhandene Pressenunterschiede und individuelle Maschinencharakteristika wie bspw. die

Stößelverkippung vom Umformwerkzeug kompensiert werden. Außerdem reduziert sich durch die Möglichkeit des Verstellens der Aktorik der Qualitätsaufwand (Nachtuschieren) am Presswerkzeug während der laufenden Serienproduktion. Stillstandszeiten und die Ausschussproduktion bei schwankenden Prozessparametern können durch eine Erhöhung der Prozessstabilität vermieden werden. Ferner lassen sich minimierte, optimierte Platinenzuschnitte und damit eine Material- sowie Kosteneinsparung realisieren. Zuletzt stellt auch die Option, mit Hilfe eines werkzeuginternen Systems aus Sensorik und Aktorik einen Prozessregelkreis zu schließen, ein nennenswertes Potential dieser Werkzeugkonzeption dar.

In Erweiterung zum bisherigen Stand der Technik und zur Abgrenzung von den Entwicklungen an Hochschulen sowie Forschungsinstituten zeichnet sich die hier vorliegende Arbeit durch die Verwendung eines neuartigen, optisch messenden Sensorkonzeptes aus. Des Weiteren kommt lediglich der Einsatz eines einfachwirkenden Umformwerkzeuges unter Verwendung bestehender Anlagen ohne Modifikation der Pressentechnik in Frage. Notwendige Aktoren zur zielgerichteten Krafteinleitung [HS00] und lokalen Beeinflussung des Umformvorganges werden im Ziehwerkzeug integriert. Die eigentliche Umformbewegung findet dabei nach wie vor im vorhandenen Ziehapparat der Presse statt. Außerdem werden Möglichkeiten analysiert, wie eine Homogenisierung der Flächenpressungsverteilung im Bereich des Platinenflansches auf minimalem Bauraum realisierbar ist. Mit dem Fokus auf die Try-Out- und Einarbeitsphase eines neuen Tiefziehwerkzeuges und deren zeitlicher Verkürzung ergibt sich ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Zuletzt stellen auch die präsentierten Ansätze zur Umsetzung der Ergebnisse in zukünftigen Serienwerkzeugen (vgl. Kapitel 7.1.2) und das vorgeschlagene Regelkonzept (vgl. Kapitel 6.1) wesentliche Innovationen dieser Arbeit dar.

4 Aufbau des Versuchswerkzeuges

Bei dem zur Entwicklung einer neuen Werkzeugkonzeption und Ableitung einer entsprechenden Vorgehensweise bzw. Methodik exemplarisch ausgewählten Bauteil handelt es sich um die Ziehstufe des vorderen rechten und linken Radhauses der ausgelaufenen BMW 3er Reihe und des aktuellen BMW X3. Beide Radhäuser bestehen aus einer Vorder- und Hinterschale, weshalb die Umformoperation als anspruchsvolles Vierfachteil ausgeführt ist. Mit der vergleichsweise hohen Ziehtiefe von ca. 200mm, einer komplexen Geometrie sowie dem ersten höherfesten Material, dem H180B, gehört diese Radhausschale zu den risskritischen Bauteilen und war für diese Untersuchung prädestiniert.

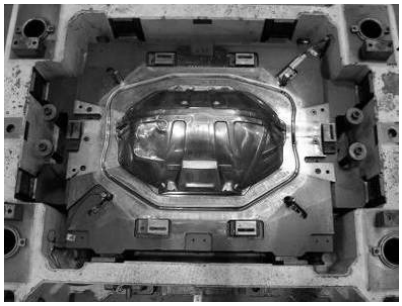

Abb. 4-1 Niederhalter und Stempel im Führungskasten [Rit05]

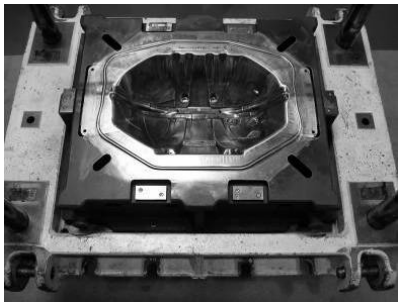

Abb. 4-2 Werkzeugmatrize im Führungsrahmen [Rit05]

Abb. 4-3 Ziehteil [Rit05]

4.1 Sensorkonzept

Um eine Überwachung und darauf aufbauend eine Steuerung bzw. Regelung des Umformprozesses zu realisieren, sind detaillierte Informationen über dessen aktuellen Zustand erforderlich. Die kontinuierliche, messtechnische Erfassung aussagekräftiger Prozessparameter bildet die Basis zur Beurteilung der Prozessqualität. Als sehr viel versprechende, interessante Messgrößen wurden diesbezüglich bereits in Kapitel 2.4.3 die Geschwindigkeit und der Weg, mit denen das Blech während der Umformung in das Ziehwerkzeug einläuft, identifiziert. Deshalb kam in dieser Arbeit ein im Bereich der Umformtechnik neues, patentiertes [Kor94, Kor96] Sensorkonzept zur optischen Blecheinzugsmessung zum Einsatz.

4.1.1 Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise

Die durch die Offenlegungsschrift DE 196 50 177 A1 [Kor96] geschützte Vorrichtung ermöglicht die Geschwindigkeitsmessung längs der Blechoberfläche, wobei die optische Achse des Aufbaus senkrecht dazu steht. In der konkreten Ausführungsform im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet ein Laser die Blechplatine mit einem kohärenten, in sich parallelen Lichtbündel. Dessen Reflektion erzeugt aufgrund der Mikrostruktur des Bleches eine räumliche Strahlungsstruktur im halbkugelförmigen Raum über der Materialoberfläche. Eine in diesem Raum positionierte CCD-Zeile

(Charge Coupled Device) erfasst das charakteristische Hell-Dunkel-Muster ohne zusätzliche, fokussierende bzw. abbildende Elemente.

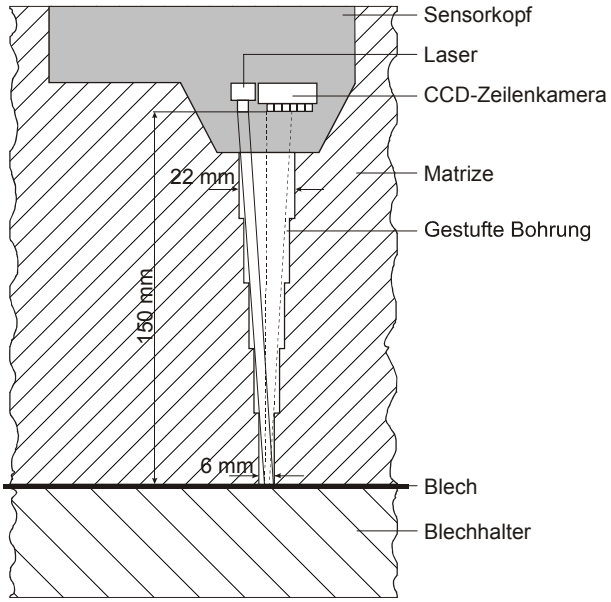

Abb. 4-4 Prinzipieller Aufbau des Sensors [Rit05]

Läuft die Blechplatine während der Umformung in das Tiefziehwerkzeug ein, so wandert synchron dazu das Interferenzmuster über die CCD-Zeile. Die Auswertung der Signale dieser linear angeordneten Strahlungsempfänger mit Hilfe von Verfahren zur Bildverarbeitung liefert zunächst die Geschwindigkeit der einlaufenden Platine und deren Integration über die Zeit ergibt ihren Einlaufweg [Kor94].

Das in der Offenlegungsschrift DE 44 44 661 A1 [Kor94] beschriebene und im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Verfahren ordnet hierzu einer vom optischen Empfangselement erkannten Struktureinzelheit ein elektronisches Signal mit der Ortsinformation bezüglich der lichtempfindlichen Zellen des CCD-Sensors zu. Weder die Signalform noch -größe muss in einem Zusammenhang mit dem Grauwert der Struktureinzelheit stehen, da in dem hier angewandten Verfahren keine Abbildung der betrachteten Oberfläche stattfindet. Stattdessen wird das elektronische Signal aus der Positionsadresse der Struktureinzelheit bezüglich des lichtempfindlichen Elementes der CCD-Zeile gebildet (vgl. Abb. 4-5). Die elektronischen Signale aus einer Sequenz von Bildern der bewegten Oberfläche werden als Funktionspunkte in einem Speichermedium abgelegt. Mit hinreichender Genauigkeit lassen sich die aus den Funktionspunkten generierten Weg(Position)-über-Zeit-Kurven durch Geraden annähern, wobei der Anstieg jeder einzelnen Gerade ein unmittelbares Maß für die Geschwindigkeit zwischen der entsprechenden Struktureinzelheit und dem CCD-Sensor darstellt (vgl. Abb. 4-6).

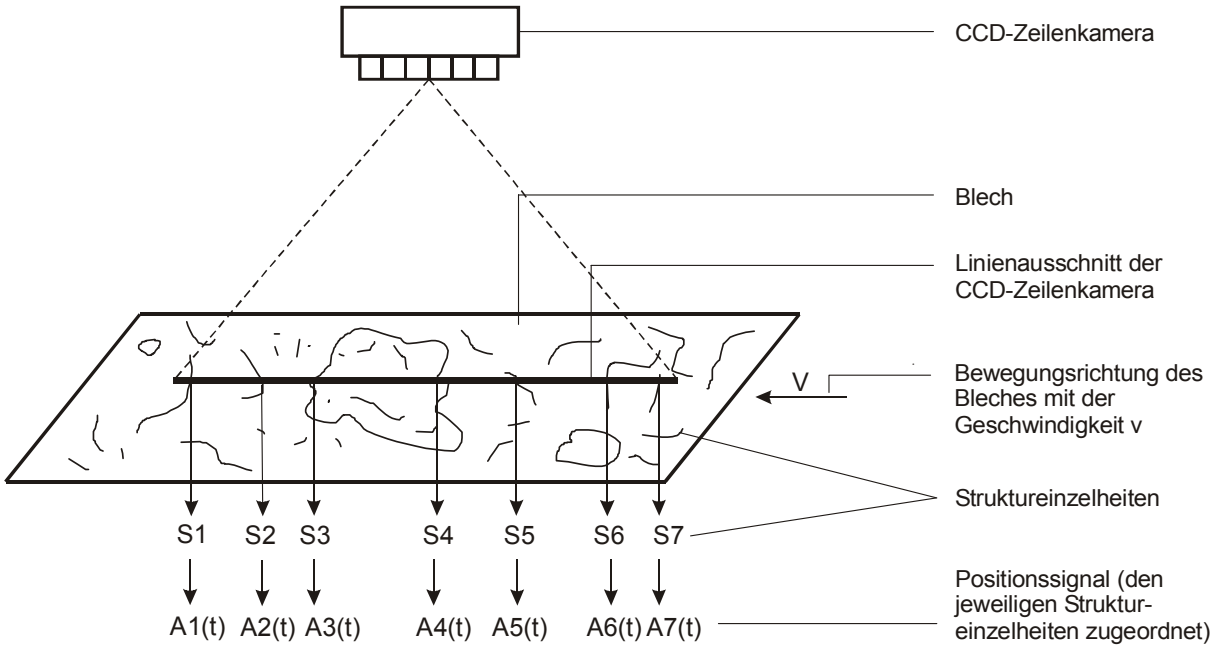

Abb. 4-5 Struktureinzelheiten der Blechoberfläche und deren zugeordnetes Positionssignal [Kor94]

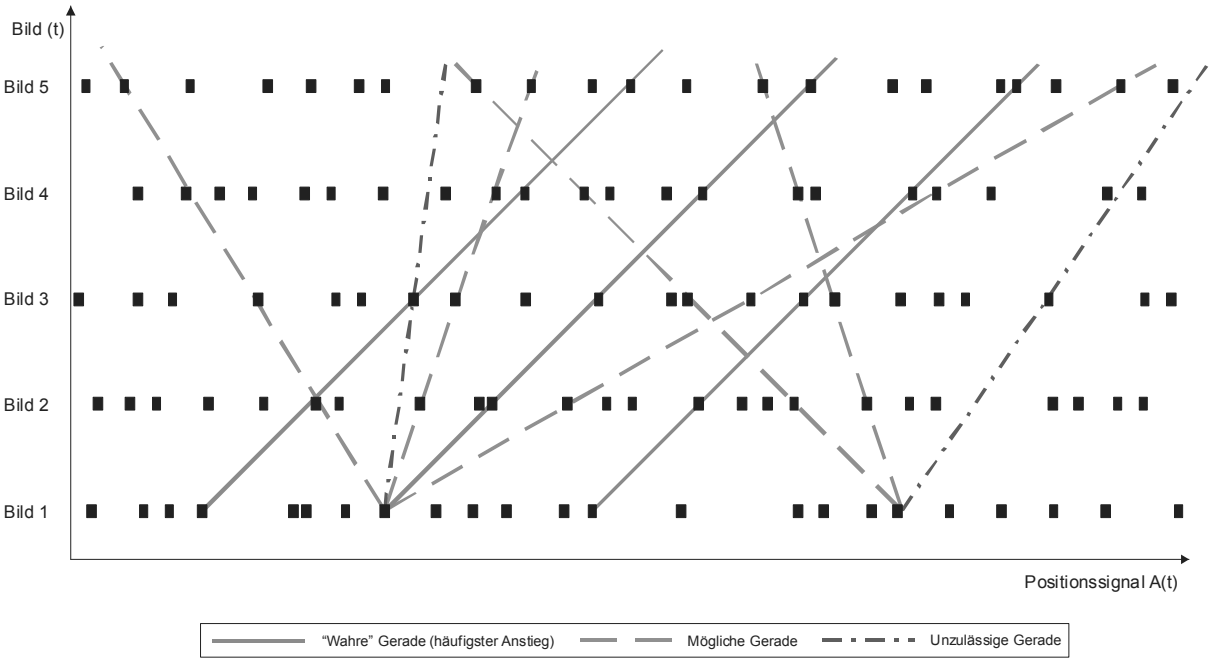

Abb. 4-6 Speichermatrix der Funktionspunkte aller erfassten Struktureinzelheiten zu den Zeitpunkten t1 bis t5 [Kor94]

Um aus der Vielzahl der in die Punktewolke approximierbaren Kurven die Kurvenschar herauszusuchen, bei der jeder Einzelkurve eine Struktureinzelheit zuordenbar ist, kommt eine spezielle Datenverknüpfung zum Einsatz (vgl. Abb. 4-6). Dabei wird zunächst ein Funktionspunkt des zeitlich ersten Bildes (Fußpunkt) mit einem willkürlichen Funktionspunkt des zeitlich letzten Bildes (Endpunkt) geradlinig verbunden. Lediglich diejenigen Verbindungen zwischen Fuß- und Endpunkt, für die auch in allen zeitlich dazwischen liegenden Bildern Funktionspunkte zu finden sind, welche einen definierten Abstand zur Geraden nicht überschreiten, gelten als erkannt. Anschließend werden die Steigungen sämtlicher von einem Fußpunkt zu unterschiedlichen Endpunkten ausgehenden, erkannten Geraden in einem Histogramm notiert. Nachdem für alle Fußpunkte die positiven als auch negativen Anstiege der möglichen

Geraden in diese Häufigkeitsverteilung aufgenommen wurden, schneidet man die Werte, die das Maximum und seine angrenzenden Flanken bilden, heraus. Sie sind als die Anstiege der gesuchten Geraden anzusehen, welche die Kurven der Struktureinzelheiten annähern [Kor94].

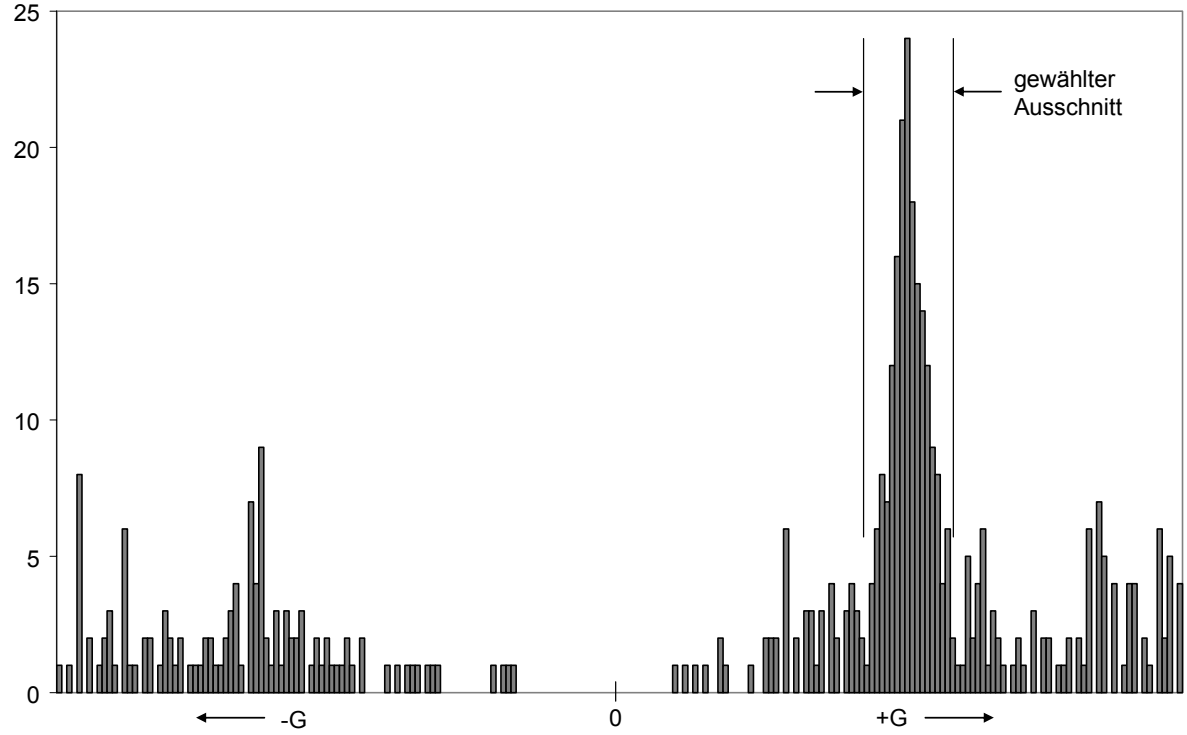

Abb. 4-7 Histogramm der erkannten Geradenanstiege aus einer Bildsequenz [Kor94]

Die Identifikation der „wahren“ Kurven lässt sich durch die Suche nach aufeinander folgenden Geradenpaaren weiter verbessern. Außerdem führt die nachträgliche Anwendung bekannter Methoden der statistischen Mathematik (bspw. Mittelwertbildung) auf die Vielzahl der Messwerte aus einer Bildsequenz zur drastischen Reduktion des resultierenden statistischen Messfehlers. Die auf diese Weise ermittelte Steigung und die entsprechende Geschwindigkeit stellen sehr wahrscheinliche, präzise Messwerte der beobachteten Bewegung dar. Um die Geradensuche und damit den Auswertealgorithmus zu beschleunigen, empfiehlt sich die Definition einer sinnvollen Bandbreite möglicher Anstiege. Startwerte für die Breite und den Mittelwert dieses Steigungssuchintervalls werden während der Messung laufend durch technisch mögliche Beschleunigungen und die zuletzt gemessene Geschwindigkeit aktualisiert. Somit lassen sich selbst die Geschwindigkeitsverläufe von stark beschleunigten Bewegungen mit hoher zeitlicher Auswertefolge sehr genau messen [Kor94].

4.1.2 Konkrete Umsetzung

Aus umformtechnischer Sicht ist die Messung des Stoffflusses möglichst nah am Matrizeneinlaufradius zu bevorzugen [For00, Yun05]. Einerseits stellt dieser Bereich die eigentliche Umformzone dar und andererseits herrschen hier im Vergleich zur

Platinenkante andere Spannungszustände. Deshalb ist auch der Stoffffluss am Ziehkanteneinlauf aufgrund zusätzlicher Materialdehnung bzw. -stauchung nicht identisch mit dem Blecheinzug des Flanschrandes [Yun05].

Die Tatsache, dass die Platine des ausgewählten Bauteils während der Umformung über die Ziehsicke hinaus einläuft (vgl. Abb. 4-3), hat die Stoffflussmessung zwischen Ziehstab und Matrizeneinlaufradius zusätzlich motiviert. Allerdings ist die dazu erforderliche Integration einer gekapselten Sensoreinheit in das Umformwerkzeug lediglich mit einem Messprinzip realisierbar, bei dem die optische Achse senkrecht auf der beobachteten Blechoberfläche steht.

Neben den Hauptkomponenten, Laserlichtquelle und CCD-Zeile, befinden sich ein Servomotor, periphere Versorgungs- sowie umfangreiche Schnittstellenelektronik im Sensorkopf. Der Servomotor dient der komfortablen Ausrichtung der CCD-Zeile auf die Blecheinzugsrichtung im eingebauten Zustand des Sensors. Denn die lineare Anordnung der lichtempfindlichen Zellen gestattet die Detektion von Geschwindigkeit und Weg ausschließlich in eindimensionaler Richtung. Außerdem besteht bei nicht geradlinigem Blecheinlauf die Möglichkeit, das Empfangselement entsprechend nachzuführen.

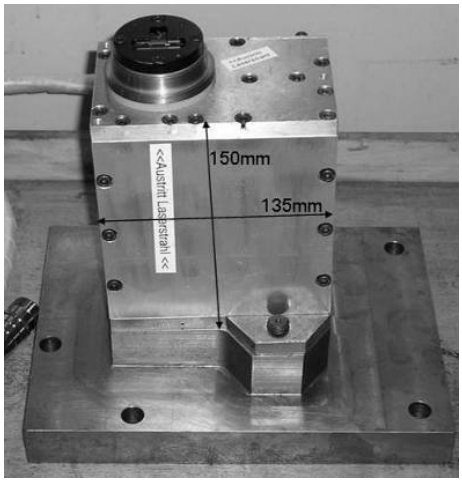

Abb. 4-8 Sensorkopf

Die Schnittstelle zum Bildverarbeitungsrechner wurde mit Hilfe der Ethernet Technologie und einem integrierten Schaltkreis namens iPort® realisiert. Bislang stellte die begrenzte Kabellänge bei Datenübertragungen mit hohem Durchsatz das Problem aller bekannten Lösungen dar. Doch mit diesem Gigabit-Netzwerk sind Kabellängen von 100m bei einer maximalen Datenrate von 1.000MBit/s möglich.

Zur Bereitstellung der unterschiedlichen, notwendigen Betriebsspannungen von Laser, CCD-Zeile, Servomotor und iPort® dient die periphere Versorgungselektronik. Pro Sensorkopf sind somit ein Netzwerkkabel zur Datenübertragung und ein Strom-/Steuerkabel zur Spannungsversorgung aller Komponenten sowie zur Ansteuerung des Servomotors anzuschließen.

Der beschriebene Bildverarbeitungsalgorithmus zur Berechnung der Materialgeschwindigkeit und des Einlaufweges läuft auf einem hochleistungsfähigen Industrierechner im 19“-Rack. Dieser verfügt über einen 3GHz Intel® Pentium 4 Prozessor, 800 MHz Frontsidebus, 1GByte Hauptspeicher und eine schnelle 37GByte SCSI Festplatte.

Abb. 4-9 Messschrank mit vier Bildverarbeitungsrechnern

Im Rahmen der Umformsimulationen (vgl. Kapitel 4.2.1.2) für die Ziehstufe der Radhausschalen wurde die Positionierung der Messstellen im Tiefziehwerkzeug entscheidend unterstützt. Dabei kristallisierten sich vor allem die vier Zonen des maximalen Blecheinzuges als geeignete Sensorpositionen heraus. Einerseits zeigten diese Bereiche die größten Reaktionen auf veränderte Parameter in den Simulationsrechnungen (vgl. Abb. 4-19). Andererseits sind laut der FEM-Analyse auf den zugehörigen Segmenten des Blechhalters die höchsten Flächenpressungen zur Herstellung eines Gutteils erforderlich (vgl. Abb. 4-17). Somit bieten diese Zonen des Bauteilflansches die größten Möglichkeiten zur Beeinflussung des Umformprozesses. Eine daraus resultierende, auf den ersten Blick symmetrisch erscheinende Anordnung der Messpunkte ist bei näherem Hinsehen nicht gegeben, da das Ziehteil aufgrund lokal unterschiedlicher Geometriemerkmale keine Symmetrie aufweist.

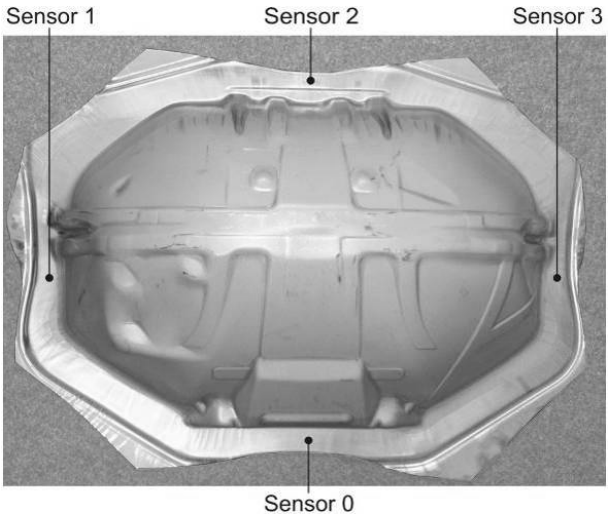

Abb. 4-10 Bauteil mit Sensorpositionen

Zweckmäßigerweise wurden die vier Sensoren in der Werkzeugmatrize des einfachwirkenden Ziehwerkzeuges angeordnet. Dadurch können keine Verunreinigungen in die Optik fallen und der begrenzte Bauraum im Niederhalter steht, wie vorgesehen, vollständig für die Integration der Aktorik zur Verfügung. Größte Schwierigkeit beim Einbau der Sensorik in das Oberwerkzeug und der Stoffflussmessung zwischen Ziehstab und Matrizeneinlaufradius ist die optische Zugänglichkeit der Blechoberfläche innerhalb des geschlossenen Umformwerkzeuges direkt in der Flächenpressungszone am Platinenflansch. Die dazu notwendige Durchgangsbohrung konnte aufgrund sehr kleiner, steil gewählter Ein- und Ausfallswinkel des Laserlichtes auf 7mm Durchmesser minimiert werden. Sowohl der Laser als auch die CCD-Zeile sind bei diesem Aufbau in einer senkrechten Entfernung von ca. 70mm zur Blechoberfläche angeordnet. Um den kegelförmigen (Reflektions-)Strahlengang zu gewährleisten, nimmt der Bohrungsdurchmesser mit steigender Distanz zur Platine stufenförmig zu. In Bezug auf die Werkzeugstabilität kommt es durch diese Stufenbohrung (vgl. Abb. 4-4) zu einer wesentlich geringeren Beeinträchtigung als durch eine tiefe Sensor-Freibohrung bis kurz unter die Aktivfläche.

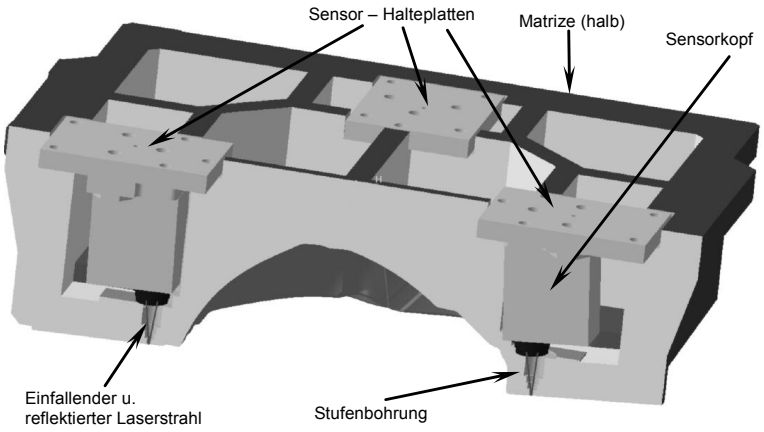

Abb. 4-11 Sensorintegration in Matrize [Rit05]

4.1.3 Diskussion des Sensorkonzeptes

Essentieller Nachteil des hier vorgestellten Sensorprinzips ist die angesprochene Notwendigkeit, eine Bohrung in die Werkzeugwirkfläche im Platinenflansch einzubringen. Sie führt zu einer gewissen Schwächung der Matrize bzw. des Niederhalters und birgt insbesondere beim Härten der Aktivfläche die Gefahr von Rissbildung im Werkzeug. Anfängliche Bedenken bezüglich Zinkabrieb, Markenbildung und der Verschmutzung des Durchgangsloches mit Schmierstoff haben sich jedoch im Rahmen dieser Untersuchung bislang nicht bestätigt, stellen aber speziell bei Außenhautbauteilen ein gewisses Risiko dar. Zuletzt besteht auch in der lediglich punktuellen Erfassung des Stoffflusses an der jeweiligen Messstelle ein generelles Manko der Blecheinzugssensoren. Leider ist jedoch bis dato kein alternatives Messverfahren mit großflächiger Aufnahme des Materialeinlaufverhaltens bekannt.

Ein entscheidender Vorteil, der zur Auswahl dieses Sensorprinzips im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit führte, ist die hochpräzise, berührungslose, optische Erfassung von Geschwindigkeit und Einlaufweg. Dabei unterstreicht vor allem die Fähigkeit des Verfahrens, auf jeder strukturierten Oberfläche, selbst auf Glas oder verchromtem Metall, messen zu können [Kor96], die Eignung für den Einsatz im Presswerkzeug. Ferner wird durch die Verwendung einer CCD-Zeile als optischem Empfangselement eine wesentlich höhere Auflösung als bei einer CMOS-Matrix erreicht. Denn durch ihre sehr hohen Taktfrequenzen ermöglichen eindimensionale Anordnungen lichtempfindlicher Zellen in Kombination mit dem beschriebenen Auswertealgorithmus (vgl. Kapitel 4.1.1) die Ausgabe von 10.000 Geschwindigkeitswerten pro Sekunde. Mit einer derart hohen Abtastrate (10.000Hz) sind selbst stark beschleunigte oder gar schwingende Bewegungsabläufe erfassbar. Des Weiteren gewährleistet die Verwendung eines Lasers als Lichtquelle eine hohe Messgenauigkeit und gestattet die Messung des Stoffflusses aus senkrechten Entfernungen von bis zu 150mm zum Messobjekt. Die daraus resultierenden, vergleichsweise kleinen Bohrungsdurchmesser für den Strahlengang führen zwar zu der bereits erwähnten, relativ geringen Schwächung der Werkzeugstabilität, stellen aber aufgrund ihrer minimalen Abmessungen einen weiteren Vorteil gegenüber anderen Sensorkonzepten dar. Zuletzt sind auch der stabile Aufbau sowie die robuste Funktionsweise zwei sehr positive Aspekte dieses Sensorkonzeptes, die einen Einsatz unter den rauen Umgebungsbedingungen eines Großserienpresswerkes erst ermöglicht haben. Ein Indiz für die Dauerfestigkeit dieses Sensorprinzips ist die problemlose Messung von ca. 5.000 Umformvorgängen von allen vier Einlaufwegsensoren während der hier vorliegenden Untersuchung.

Trotz der zwei prinzipbedingten Schwachstellen zeichnet sich das vorgestellte Sensorkonzept durch die Vielzahl der aufgeführten Vorteile gegenüber allen bislang

bekannten Stoffflusssensoren (vgl. Kapitel 2.4.3) aus und rechtfertigt damit seinen Einsatz im Rahmen dieser Arbeit.

4.2 Werkzeugkonzept

Eine lokale Beeinflussung des Umformprozesses ist mit starren Werkzeugen der Kasten- oder C-Profil-Bauweise nicht möglich (vgl. Kapitel 2.2.2). Demgegenüber gestatten elastische Niederhalter durch partiell differenzierte Krafteinleitung die gezielte Steuerung des Materialflusses (vgl. Kapitel 2.3). Aus diesem Grund wird im Anschluss ein Blechhalterkonzept vorgestellt, welches die Potentiale örtlich unterschiedlicher Flächenpressung speziell bei Verwendung bestehender, einfachwirkender Pressenanlagen ohne Vielpunktzieheinrichtung erschließt.

4.2.1 Umformsimulation

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 ausgeführt, wird die Methodenplanung neuer Werkzeuge durch Finite-Element-Simulationen (FE) des Tiefziehvorganges unterstützt. Speziell für kritische Bauteilgeometrien (Seitenrahmen, Heckklappen-Innenblech, Stirnwand u.ä.) findet diese Machbarkeitsanalyse statt. Aussagen über das Einlaufverhalten, die Ausdünnung, die Flächenpressungsverteilung im Platinenflansch, die Sickenkräfte[2] und neuerdings auch das Rückfederungsverhalten ermöglichen eine Beurteilung der Herstellbarkeit. Ist sie nicht gewährleistet, sind Änderungen an der Methodenauslegung oder/und Modifikationen der Karosserieteilgeometrie notwendig.

4.2.1.1 Ablauf und Grenzen der Umformsimulation

Basierend auf der Bauteilkonstruktion und einer ersten Methodenplanung findet zunächst die Erstellung eines Simulationsmodells statt. Dazu werden die Aktivflächen des Umformwerkzeuges und die Blechplatine näherungsweise durch ein Netz aus kleinen, ebenen und räumlich begrenzten (finiten) Elementen (Dreiecken, Rechtecken u.ä.) abgebildet. Anschließend erfolgen die Kontaktdefinition und die Beschreibung der Randbedingungen (bspw. Bewegungsablauf). Schließlich berechnen implizite oder explizite Solver die Verschiebungen, Spannungen, Dehnungen und lokalen Kräfte in den einzelnen, finiten Elementen, woraus sich qualitätsrelevante Ergebnisgrößen, wie bspw. Abstreckung und Faltenbildung, für das Gesamtbauteil ableiten lassen.

Im Bereich der Umformsimulation hat sich die Verwendung von Schalen- (Shell) bzw. Membranelementen zur Diskretisierung des Werkstückes als auch der Werkzeugwirkflächen durchgesetzt. Auf die Modellierung des kompletten Ziehwerkzeuges samt seiner Verrippungsgeometrie oder der Umformmaschine mit Hilfe von Volumen- (Solid) Elementen wird aufgrund des daraus resultierenden, exorbitant hohen,

[2] Rückhaltekräfte durch Ziehstab-Sicken-Kombination

numerischen Rechenaufwandes verzichtet. Stattdessen definiert man die formgebende Werkzeuggeometrie als Starrkörper (Rigid Body), was jedoch die Berücksichtigung der Elastizität von Werkzeug und Presse (Durchbiegung) sowie Führungsspiel und ähnlicher Effekte verhindert.

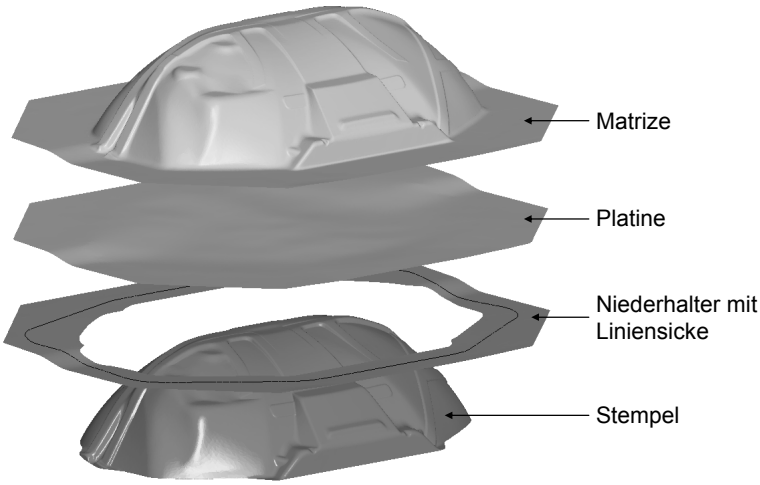

Abb. 4-12 Explosionsdarstellung des Simulationsmodells

Analog zur Realität wirkt auf den Blechhalter im Simulationsmodell die Ziehkissenkraft. Nach dem Schließen von Ober- und Unterwerkzeug dient sie zur Rückhaltung des Platinenflansches und Vermeidung von Faltenbildung während der Umformung über dem Stempel. Allerdings verteilt sie sich aufgrund der Rigid-Body-Definition völlig gleichmäßig auf der Niederhalterfläche.

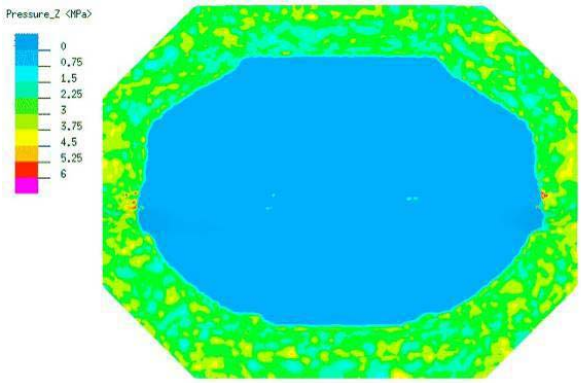

Abb. 4-13 Blechhalter mit homogen verteilter Niederhalterkraft

Die in der Realität vorherrschenden sowie notwendigen [Kla94, Häu00, Häu01, Häu02], lokal differenzierten Rückhaltekräfte im Bereich des Bauteilflansches werden in der Umformsimulation durch Liniensicken erzeugt. Mit Hilfe dieser eindimensionalen Stabelemente lässt sich der Blechfluss in unterschiedlich großen Regionen des Bauteilumfanges durch Auswahl individueller Sickenkräfte für die einzelnen Linienabschnitte gezielt partiell beeinflussen.

Auf die geometrische Modellierung der Ziehstäbe mit entsprechenden Höhen und Kopfradien sowie der Sicken mit ihren Einlauf- und Auslaufradien wird in der Regel verzichtet. Zum einen liegen sie zu diesem Zeitpunkt in der Werkzeugkonstruktion noch nicht vor und zum anderen erzeugen sie in der Umformsimulation meist keine

realistischen Rückhaltekräfte. Überdies führt die notwendige, feinmaschige Vernetzung (Diskretisierung) dieser Partie zu einer drastischen Beeinträchtigung der Rechenperformance und Erhöhung der Antwortzeit.

Um den Materialfluss ausschließlich über die Flächenpressung zwischen Matrize und Blechhalter zu steuern und damit den Einsatz von Ziehstäben und Ziehsicken in Umformwerkzeugen vollständig zu vermeiden, sind wesentlich höhere Niederhalterkräfte (mindestens Faktor drei) erforderlich [NKSI01]. Aufgrund dieser Herabsetzung des erforderlichen Ziehkissenkraftniveaus weisen reale Tiefziehwerkzeuge häufig sogar umlaufende Stab-Sicken-Kombinationen auf.

Inzwischen erlauben neuere Erkenntnisse von Hahn [Hah04] aus den in der Simulation für die einzelnen Linienabschnitte eingestellten Kraftwerten Rückschlüsse auf die tatsächlich erforderliche Geometrie der Ziehsicke. Allerdings muss diese nach erfolgreichem Abschluss der Simulationen, der Methodenplanung und der Werkzeugkonstruktion von erfahrenen Werkzeugmachern in das Ziehwerkzeug eingearbeitet werden. Die Nachteile dieses langwierigen, manuellen, undeterminierten und nicht reversiblen Eintuschierens neuer Umformwerkzeuge wurden bereits in Kapitel 2.2.2 hinreichend beschrieben.

4.2.1.2 Modifikation der Tiefziehsimulation

Für das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Werkzeugkonzept ist die beschriebene Vorgehensweise bei der Simulation des Umformvorganges grundlegend zu verändern. Die zur Herabsetzung des Niederhalterkraftniveaus umlaufende Liniensicke erfährt dabei keine Unterteilung in verschiedene Abschnitte. Stattdessen wird sie mit einem konstanten Kraftwert versehen. Daraus resultiert eine Geometrie, die bereits weitgehend während der späteren, mechanischen Bearbeitung des Werkzeugkörpers maschinell erzeugt werden kann und das langwierige Einarbeiten durch den Werkzeugmacher erspart. Konkret für dieses Beispiel ist die umlaufende Liniensicke (vgl. Abb. 4-15) mit einer Kraft von 60 N/mm beaufschlagt, was einer stark abgearbeiteten Rundsicke mit einer Höhe von 7mm, einem Kopfradius von 6,5mm und Gegenradien von 6mm entspricht.

Um dennoch die erforderliche, lokal unterschiedliche Rückhaltung der Platine zu ermöglichen, ist eine örtliche Differenzierung der Flächenpressung zwischen Niederhalter, Blech und Matrize erforderlich. Aufgrund der in der Simulation üblichen Starrkörper-Definition für Teile des Umformwerkzeuges lässt sich das jedoch lediglich durch eine Segmentierung des Niederhalters erreichen (vgl. Abb. 4-14, Abb. 4-15). Die Variation der Blechhalterkräfte auf jedem Segment erlaubt dann die gezielte Beeinflussung des Blechflusses während der Umformung.

Vorrangiges Ziel der Aufteilung des Blechhalters und der Kraftvariation ist das Auffinden einer optimalen Niederhalterzerlegung sowie einer Kraftverteilung bei der sich

ein falten- und rissfreies Bauteil herstellen lässt, welches bezüglich Aufsprung und Abstreckung im geforderten Toleranzbereich liegt.

In Analogie zu der Vorgehensweise ähnlicher Arbeiten [Gri99, Ele01, Häu02] wurde bei der Segmentierung des Niederhalters von der Grundüberlegung ausgegangen, das Bauteil grob in vier Eck- und vier Geradenbereiche aufzuteilen. Aufgrund der Größe sollte eine weitere Unterteilung der geraden Sektoren erfolgen, um den Materialfluss möglichst lokal und nicht nur großflächig beeinflussen zu können. Die seitlichen Bauteilabschnitte wurden in drei einzelne Segmente untergliedert, so dass sich aus den 4 x 3 Geradensegmenten zuzüglich der vier Ecksegmente insgesamt 16 Niederhalterteilstücke ergeben. Der konkrete Zuschnitt dieser Blechhalterabschnitte wurde manuell vorgenommen und dabei auf die annähernd gleiche Größe der entstehenden Segmentflächen geachtet. Basierend auf den Ergebnissen der Umformsimulation fand schließlich noch die Abwandlung und Verbesserung der Segmentaufteilung statt.

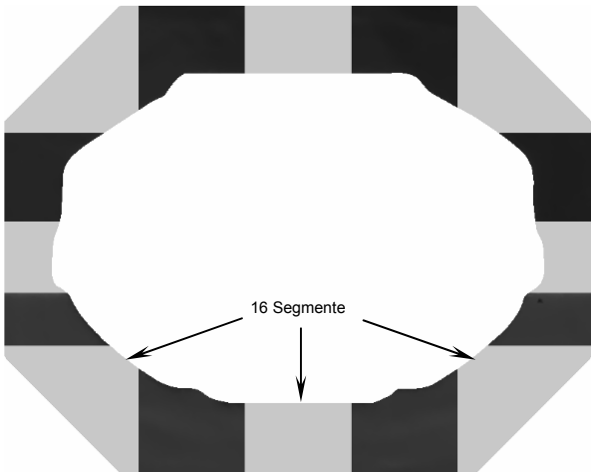

Abb. 4-14 Niederhaltersegmentierung Variante1 mit rechtwinkligen Segmentfugen

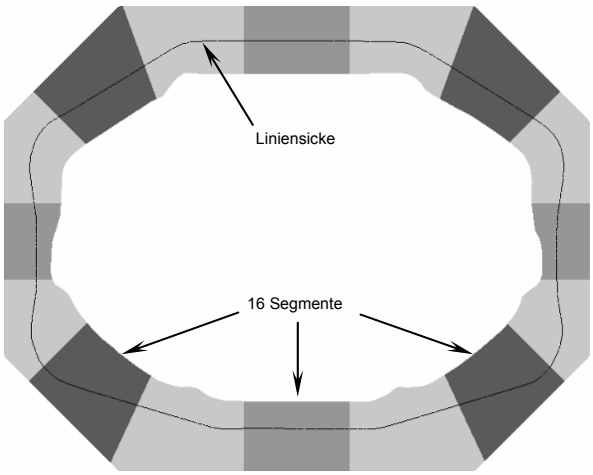

Abb. 4-15 finale Niederhaltersegmentierung mit Liniensicke [Rit05]

Parallel zur Segmentierung des Niederhalters erfolgt im Rahmen mehrerer Iterationsschleifen die Bestimmung der optimalen Kraftverteilung. Dazu wird zunächst mit gleichen Segmentkräften und annähernd homogener Flächenpressung im Flanschbereich ein erstes Simulationsergebnis berechnet. Basierend auf diesem Resultat sind die Krafteinstellungen in Zonen zu großen Blecheinzuges (Gefahr der Faltenbildung) zu erhöhen. Dagegen muss die Blechhalterkraft im Bereich zu geringen Materialeinlaufes (Gefahr der Rissbildung) gesenkt werden.

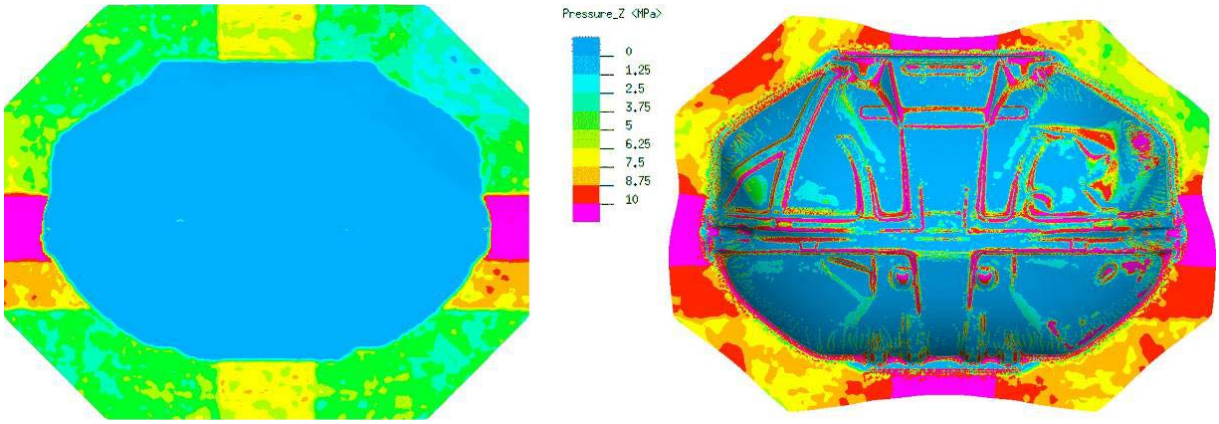

Abb. 4-16 suboptimale Flächenpressungsverteilung (Anfangs- und Endzustand)

Nach einigen Zyklen des Iterationsprozesses, bestehend aus der Veränderung des Simulationsmodells, der Berechnung, Auswertung und Beurteilung des Ergebnisses sowie einer erneuten Anpassung der Einstellungen, lässt sich die Konfiguration für die Herstellung eines i.O.-Ziehteiles bestimmen.

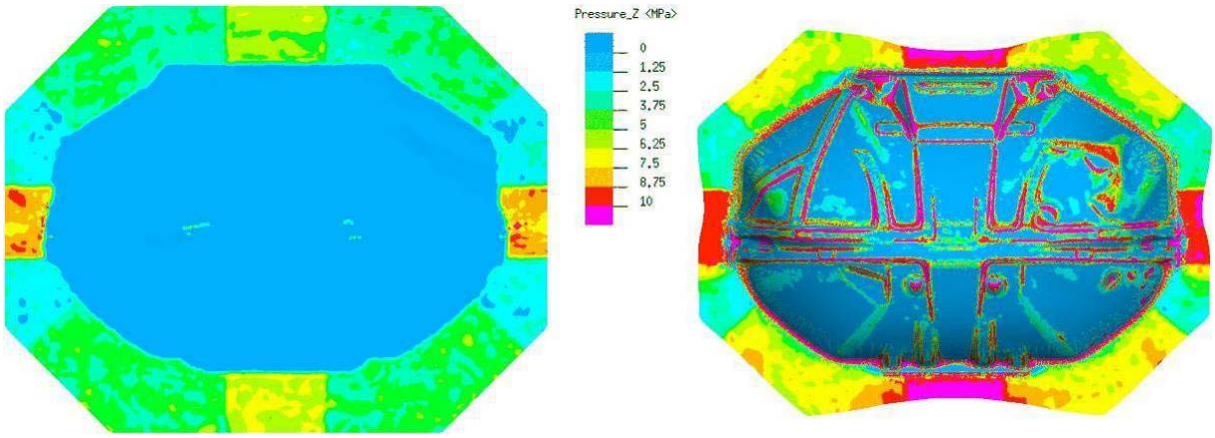

Abb. 4-17 finale Flächenpressungsverteilung, Anfangs- und Endzustand [Rit05]

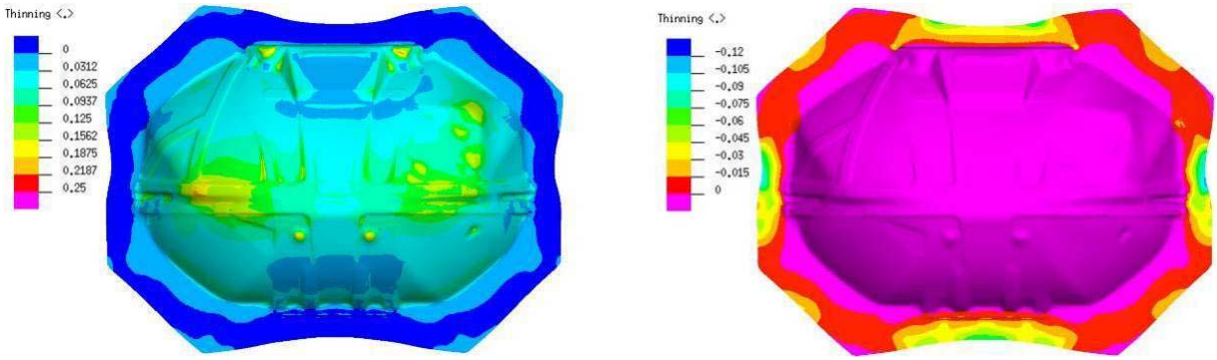

Abb. 4-18 Abstreckung (l.) und Aufdickung (r.) des i.O.-Ziehteils aus der Umformsimulation

Nebenbei erwähnt, ließen sich zukünftig die manuellen Tätigkeiten bei der Aufteilung des Niederhalters und der iterativen Gutteilsuche mit Hilfe des Einsatzes automatischer Vernetzungsalgorithmen und geeigneter Optimierungstools vermeiden. Nach der Definition entsprechender Zielkriterien (wie max. Abstreckung, Aufsprung, Faltenhöhe oder min. Restblechdicke) würde dann die optimale Segmentierung und Kraftverteilung für ein i.O.-Bauteil automatisiert bestimmt werden.

Ein Vergleich der Ergebnisdarstellungen für das Gutteil zeigt deutlich die Zunahme des Flächenpressungsniveaus zum Ende des Umformvorganges aufgrund des kleiner werdenden Platinenflansches bei konstanter Segmentkraft (vgl. Abb. 4-17). Des Weiteren fallen die für Rigid-Body-Definitionen charakteristische, gleichmäßige Verteilung der Flächenpressung auf den einzelnen Niederhalterteilstücken sowie der sprungartige Übergang an den Segmentkanten auf. Eine derartige Distribution des Blechhalterdruckes wird in Realität so jedoch nicht zu erreichen sein, selbst bei Verwendung eines segmentierten Niederhalters (vgl. Kapitel 2.3.2) nicht.

Ebenso lassen sich in den Ergebnissen der Umformsimulationen für die verschiedenen Kraftkonfigurationen deutliche Unterschiede im Einlaufverhalten erkennen. Am anschaulichsten ist dieser Sachverhalt an der Endlage der Platinenkante nach der Umformung sichtbar (vgl. Abb. 4-19). Allerdings ist die Verschiebung der Blechkante in der Tiefziehsimulation aufgrund der fehlenden Sickenabwicklung nicht korrekt und mit der von Realbauteilen nur schwer vergleichbar.

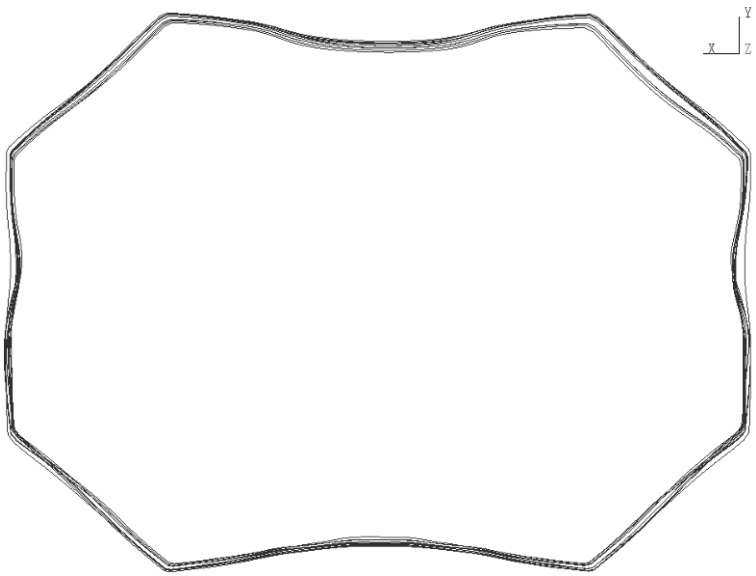

Abb. 4-19 simulierte Endlage der Platinenkante nach der Umformung für verschiedene Kraftkonfigurationen

Für einen qualitativen Abgleich des Einlaufbildes aus der Simulation mit der Realität eignet sich die Anhaukante[3] des Matrizeneinlaufradius. Sie ist sowohl am Realbauteil gut zu erkennen (vgl. Abb. 4-20) und kann auch durch entsprechende Konfigurationen im Postprozessor der Umformsimulation (vgl. Abb. 4-21) angezeigt werden.

[3] entsteht am Ort der ersten Berührung des Bleches mit einer Werkzeugkante und hinterlässt beim Verziehen (Nachlaufen unter Zugspannungen) Spuren auf der Bauteiloberfläche

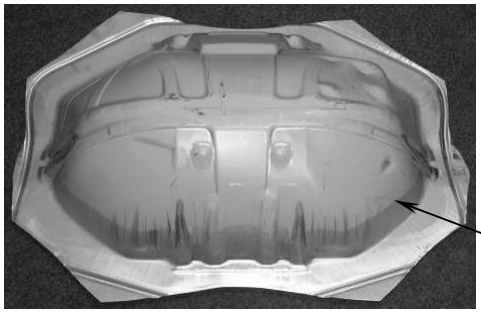

Abb. 4-20 reales i.O.-Ziehteil mit deutlich sichtbarer Anhaukante

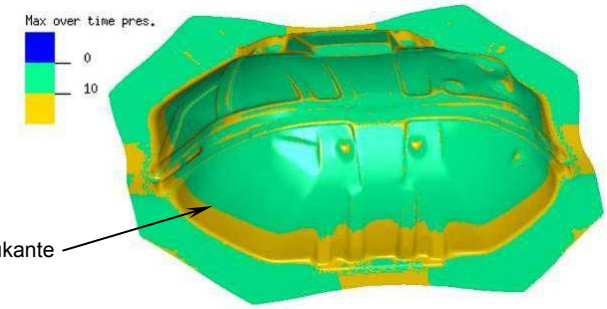

Abb. 4-21 Einlaufbild anhand der Anhaukante eines i.O.-Bauteiles aus der Simulation

4.2.2 Konzeptentwurf

Nachdem im Rahmen der Umformsimulation gezeigt wurde, dass eine örtlich differenzierte Einstellung der Flächenpressung die gezielte, lokale Beeinflussung des Materialeinlaufes ermöglicht, besteht nun die Herausforderung im Entwurf eines neuartigen Werkzeugkonzeptes zur Realisierung der genannten Potentiale.

Die grundlegende Idee stellt die bereits im Kapitel 3 angesprochene Integration zusätzlicher Aktivelemente im Niederhalter dar. Mit ihrer Hilfe soll die zielgerichtete Krafteinleitung zur Steuerung des Werkstoffflusses für eine prozesssichere, hohe Teilequalität [HS00] trotz schwankender und sich verändernder Prozessparameter möglich sein.

Auf den Aktoren ruht ein definiert elastischer Einsatz, der die eingeleiteten, lokal unterschiedlichen Kräfte durch seine Flexibilität und Durchbiegung an die Blechplatine weitergibt.

Das Konstruktionskonzept sieht eine Grundstruktur bestehend aus massiver Bodenplatte und angepasster Verrippung vor (vgl. Abb. 4-22). Die stabile Grundplatte dient einer soliden Auflage des Niederhalters auf den Pinolen (Druckbolzen) des einfachwirkenden Ziehapparates und der homogenen Einleitung der Ziehkissenkraft. Über die Anpassung der Rippenanordnung wird der Platzbedarf zur Integration der Aktorik bereitgestellt.

Die 16 Aktoren sind tangential und somit möglichst nah an der Kante des Stempeldurchbruches angeordnet (vgl. Abb. 4-22). Ihre Verteilung über dem Bauteilumfang erfolgt in Analogie zur Niederhaltersegmentierung aus der Umformsimulation (vgl. Kapitel 4.2.1.2). Durch ihre Positionierung direkt unterhalb der eigentlichen Umformzone wird der maximale Wirkungsgrad des Aktoreinflusses erreicht. Außerdem ist auf diese Weise gewährleistet, dass die einlaufende Blechplatine über den gesamten Umformvorgang mit der Aktorkraft beaufschlagt werden kann.

Als Aktivelemente kommen grundsätzlich mechanische, hydraulische, pneumatische oder piezomechanische Linearachsen (vgl. Kapitel 4.2.3) in Frage, welche die kraft- oder wegabhängige Druckbeaufschlagung des Bauteilflansches ermöglichen. Da die

entsprechenden Normelemente häufig eine zylindrische Bauform aufweisen, sind die Aktoren im Konzeptentwurf zunächst als einfachwirkende Zylinder dargestellt (vgl. Abb. 4-22).

Der definiert elastische Einsatz wird auf der Aktorik schwimmend gelagert und ist in seinen äußeren Abmessungen nur unwesentlich größer als die umzuformende Platine (vgl. Abb. 4-23). Horizontale Führung erfährt er durch die äußere Abschlussplatte, welche sich zusammen mit der Verrippung und der Bodenplatte zu einem Werkzeuggrundkörper ergänzt (vgl. Abb. 4-24).

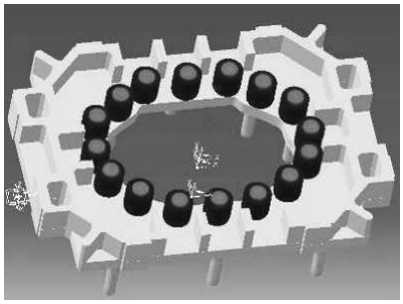

Abb. 4-22 Bodenplatte, angepasste Verrippung und Aktorik [Rit05]

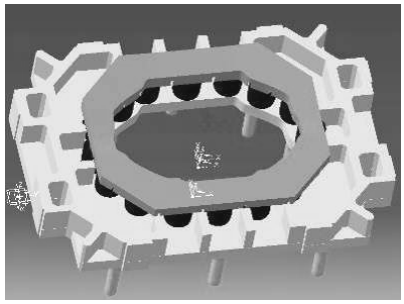

Abb. 4-23 Schwimmend gelagerter, definiert elastischer Einsatz [Rit05]

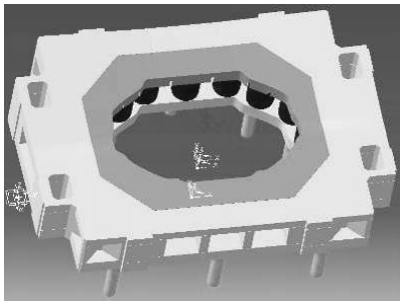

Abb. 4-24 Niederhalterkonzept mit Gussgrundkörper und elastischem Einsatz [Rit05]

Um eine möglichst homogene Krafteinleitung seitens des Ziehkissens in den Niederhalter zu gewährleisten, ist der Werkzeuggrundkörper als Gusskonstruktion mit maximaler Biegesteifigkeit auszulegen. Darüber hinaus empfiehlt sich die Verwendung der maximal möglichen Anzahl an Pinolen (vgl. Abb. 4-52). Hierbei entsteht in der Regel keinerlei Mehraufwand, da neuerdings bereits alle Druckbolzen zur Reduktion der Rüstzeit im Steckbild des Pressentisches vorhanden sind.

Mit 44 (Versuchswerkzeug) anstatt 14 (Serienwerkzeug) Pinolen stützt sich der Blechhalter wesentlich gleichmäßiger gegenüber dem Ziehapparat der Umformmaschine ab, was die Durchbiegung des Gussgrundkörpers minimiert. Gleichzeitig trägt dieser Umstand der Forderung Rechnung, den definiert elastischen Einsatz lediglich durch unterschiedliche Aktorkräfte und nicht bereits aufgrund von Durchbiegungen des Werkzeuggrundkörpers zu verformen.

Die unterschiedlichen Aktorkräfte führen zu einer gezielten, lokalen Verteilung der vom Ziehkissen eingeleiteten Gesamtniederhalterkraft, weshalb auf den Einsatz werkzeugseitiger Distanzen (Ziehhilfen, vgl. Kapitel 2.2.2) verzichtet werden kann. Allerdings ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die Krafterhöhung (bzw. -senkung) eines einzelnen Aktors bei konstanter Ziehkissenkraft gleichzeitig eine geringe Abnahme (bzw. Zunahme) der Flächenpressung über den verbliebenen Aktivelementen zur Folge hat.

4.2.3 Auswahl der Aktorik und Ansteuerung

Um den Ziehkissendruck bei herkömmlichen Presswerkzeugen bauteilspezifisch zu verteilen, erzeugt der Werkzeugmacher im Bereich des Blechflansches ein Berg-Tal-

Profil (Tuschieren, vgl. Kapitel 2.2.2). Während der laufenden Serienproduktion ist diese langwierige Handarbeit nicht vorstellbar, weshalb der Fertigungsfachmann gegebenenfalls mit den Ziehhilfen versucht, eine Anpassung der lokalen Flächenpressung zu erreichen (vgl. Kapitel 2.2.2).

Die Umformsimulation (vgl. Kapitel 4.2.1.2) hat gezeigt, dass eine Variation der Niederhaltersegmentkräfte, die allerdings während des einzelnen Tiefziehvorganges konstant sind, das Ergebnis der Umformung stark beeinflusst. Aus diesem Grund wird nach einer Aktorik gesucht, mit deren Hilfe der definiert elastische Einsatz gezielt verformt und so das Tuschieren des Werkzeugmachers zur örtlichen Anpassung der Flächenpressung nachempfunden werden kann.

Dabei wird es im Rahmen dieser Arbeit als völlig ausreichend angesehen, wenn die Veränderungen an den Aktoreinstellungen zwischen zwei Pressenhüben vorgenommen werden und die Konfiguration während des einzelnen Umformvorganges konstant bleibt. Unter dieser Maßgabe lässt sich eine drastische Vereinfachung des Problems erzielen und das Spektrum an einsetzbarer Aktorik (in Bezug auf Dynamik, Ventiltechnik, Ansteuerung usw.) wird wesentlich erweitert.

Soll demgegenüber ein Eingreifen noch während des aktuellen Pressenhubes möglich sein, ist mit exorbitant höherem Aufwand zu rechnen. Allerdings wird dadurch bestenfalls der „Verlust“ einiger, weniger Bauteile bzw. Pressenhübe vermieden, die sich keinesfalls gravierend auswirken.

4.2.3.1 Mechanische Aktuatorik

Prinzipiell kommen mechanische, hydraulische, pneumatische und piezomechanische Aktivelemente in Frage. Eine mögliche, mechanische Lösung lässt sich aus den höhenverstellbaren Pinolen [SK91] der indirekt wirkenden Vielpunktziehanlage (vgl. Kapitel 2.3.3) ableiten. In diesem Fall würden die über Vielkeilwellen unterschiedlich weit ausgefahrenen Verstellspindeln aufgrund ihrer Längendifferenz während des Umformprozesses zu einer Durchbiegung des definiert elastischen Einsatzes führen. In Analogie zu Patentschrift DE 103 31 939 A1 [AGHH03] ist eine weitere mechanische Höhenverstellung zur elastischen Verformung des Niederhaltereinsatzes mit Hilfe von Keilschiebern vorstellbar. Zur Verschiebung der Keile eignen sich dabei neben elektro-mechanischen Spindelantrieben wiederum hydraulische, pneumatische oder piezomechanische Linearachsen.

Die Robustheit gegen stoßartige Belastungen und damit die geringe Gefahr einer Funktionsbeeinträchtigung durch den Auftreffschlag beim Schließen des Umformwerkzeuges stellen die entscheidenden Vorzüge mechanischer Aktoren dar. Jedoch spricht der Aufwand bei der Sonderanfertigung von Keilplatten, Spindelgetrieben und Motoren für den begrenzt zur Verfügung stehenden Bauraum gegen eine Realisierung der mechanischen Ausführung. Außerdem ist der Zusammenhang zwischen der

eingestellten Höhe bzw. Länge und dem Anteil der lokalen Flächenpressung an der Gesamtniederhalterkraft nur mit Hilfe umfangreicher Erfahrungswerte zu beschreiben.

4.2.3.2 Elemente mit piezoelektrischem Effekt

Piezo-Aktoren zeichnen sich durch ihre sehr hohe Dynamik aus und bieten dadurch das Potential, noch während des Umformprozesses regulierend einzugreifen. Aus diesem Grund findet im Rahmen eines gemeinsamen EFB-Projektes mit dem LUT der TU Dresden die Analyse der Einsetzbarkeit von Piezo-Aktoren zur Regelung des Umformprozesses statt [Sch06].

Der Stellweg eines Piezos liegt derzeit im Bereich von ca. 0,18% der Keramikscheibendicke [Bra96]. Um relevante Längenänderungen zu erzielen, müssen mehrere Piezoelemente in so genannten Stapelpiezos in Reihe geschaltet werden, woraus entsprechend große Bauhöhen resultieren. Außerdem ist eine vergleichsweise hohe elektrische Feldstärke von 1kV/mm für eine Ausdehnung um 0,1% erforderlich [Bra96], was aus Sicht des Arbeitsschutzes kritisch zu bewerten wäre. Von Vorteil sind die hohe Steifigkeit und Eigenfrequenz der Piezoelemente. Doch ihre Empfindlichkeit gegenüber Stoß- bzw. Schlagbelastung, die über dem Stellweg abnehmende Kraftübertragung und vor allem die sehr hohen Anschaffungskosten verhindern bislang den Einsatz in Serienwerkzeugen.

4.2.3.3 Hydraulische Linearachsen

Demgegenüber wurden hydraulische [Häu00, Häu02, Ele01] und pneumatische [Schl96, Hal04] Aktoren bereits erfolgreich in Ziehwerkzeugen getestet. Ihr Hauptvorteil besteht in der Vielfalt an Ausführungen und Bauformen, welche als vergleichsweise kostengünstige Normelemente in zahlreichen Katalogen erhältlich sind.

Die größte Beanspruchung der Aktorik ruft der bereits erwähnte Auftreffschlag beim Schließen des Umformwerkzeuges hervor. Er resultiert aus der schlagartigen Beschleunigung des ruhenden Niederhalters und Ziehkissens auf die Stößelgeschwindigkeit [Kla94]. Infolge der wirkenden Trägheitskräfte und dem Geschwindigkeitsunterschied kommt es zu einer Impulsbelastung. Beim Einsatz hydraulischer Pressen lässt sich der Stoß durch Abbremsen des Oberwerkzeuges kurz vor dem Schließen mit dem Unterwerkzeug mindern, wogegen er auf mechanischen Anlagen aufgrund der sinusförmigen Bewegungscharakteristik des Stößels nicht zu vermeiden ist. Die negativen Auswirkungen des Auftreffschlages auf den Umformprozess (Abreißen des Schmierfilms, Oberflächenbeschädigungen, usw.) führten zur Entwicklung von Ziehkissenvorbeschleunigungen [Che91, Sch91, Sch96] und Gelenkgetrieben [Sch96]. Leider sind derartige technische Weiterentwicklungen in den in Betrieb befindlichen, zumeist älteren Pressenanlagen nicht vorhanden und der Auftreffstoß bei entsprechend hoher Hubzahl (Maximierung der Ausbringung) ohnehin nicht zu verhindern.

Unter diesem Aspekt erscheint der Einsatz von Kurzhubhydraulikzylindern angesichts der „Inkompressibilität“ ihres Mediums (Öl) im Rahmen der vorliegenden Arbeit problematisch. Der Auftreffschlag erzeugt eine Druckspitze in den Zylindern, die zu einer Überdimensionierung der Aktoren führt oder mit Hilfe von Regelventilen abzubauen ist. Letzteres setzt hochdynamische Ventiltechnik voraus, mit deren Hilfe ein Druckausgleich innerhalb kürzester Zeit realisierbar und ein rechtzeitiger Druckaufbau vor Beginn des Umformvorganges möglich sind. Im ersten Fall erfordert der massive Aufbau der Zylinder, bei dem der Peak kein Problem darstellt, sehr viel kostbaren Bauraum.

Um die Druckspitze beim Schließen des Werkzeuges und die Ausweichbewegung der 16 Hydraulikzylinder zu beurteilen, wurde in Zusammenarbeit mit *Bosch Rexroth* [Rex05] ein Gesamtmodell, bestehend aus Presse, Umformwerkzeug sowie allen erforderlichen Hydraulikkomponenten, erstellt und damit das dynamische Verhalten simuliert.

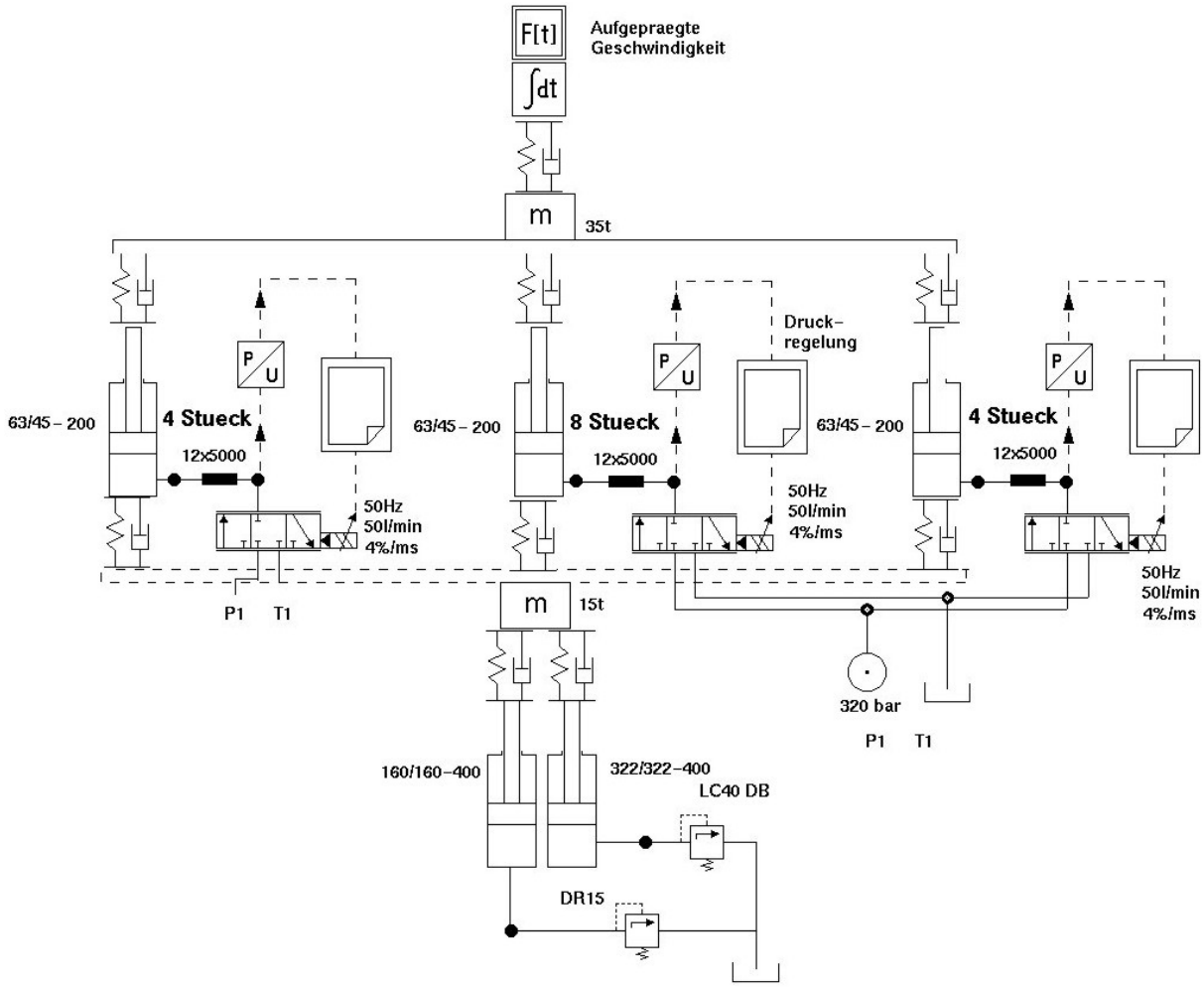

Abb. 4-25 Gesamtübersicht des Simulationsmodells [Rex05]

Dafür sind zunächst die Massen des Pressenstößels inklusive des Oberwerkzeuges mit 35t und des Ziehapparates einschließlich des Niederhalters mit 15t bestimmt worden. Der Teleskopzylinder im Ziehkissen der Produktionspresse (360/160-400mm) ist im Simulationsmodell durch zwei Plungerzylinder ersetzt, um die

kolbenseitige Volumenstromteilung auf zwei Druckbegrenzungsventile (NG15 und NG40) nachzubilden. Damit ein Verdrängen des Ziehkissens möglich ist, wird an diesen DB's 90% der Summenkraft aller 16 Kraftregelzylinder eingestellt. Zur Modellvereinfachung sind die 16 Kurzhubzylinder in Annäherung an die Ergebnisse aus der Umformsimulation in drei Gruppen eingeteilt. Für ein hohes, mittleres sowie niedriges Kraftniveau werden je vier, acht und nochmals vier Aktoren zusammengefasst.

Anschließend waren die Bewegungscharakteristik und daraus die Geschwindigkeit des Stößels während des Schließens vom Werkzeug sowie des Umformprozesses zu bestimmen. Bei einer Ziehtiefe von 200mm und einer Hubzahl von ca. acht Bauteilen pro Minute ergeben sich 7,5 Sekunden (= 60s / 8) für jedes Ziehteil. Drittelt man die Zeit für die Vorgänge Einlegen der Platine plus Schließen des Werkzeuges, Umformung des Bleches sowie Öffnen des Werkzeuges plus Entnahme des Bauteils, so erfolgt der Tiefziehvorgang innerhalb von 2,5 Sekunden (= 7,5s / 3) und erfordert eine mittlere Arbeitsgeschwindigkeit von 80mm/s (= 200mm / 2,5s). Geht man dagegen einfach davon aus, dass für die Entnahme eines 200mm tiefen Ziehteils eine Werkzeugöffnung von ebenfalls 200mm erforderlich ist, so muss vom oberen Totpunkt (OT) bis zum unteren Totpunkt (UT) des Stößels ein Weg von mindestens 400mm (= 200mm x 2) zurückgelegt werden. Während eines Pressenhubes sind demnach 800mm (= 400mm x 2) innerhalb von 7,5 Sekunden zurückzulegen, was einer mittleren Arbeitsgeschwindigkeit von 106,67mm/s (= 800mm / 7,5s) entspricht.

In Anbetracht der Tatsache, dass das Werkzeug im Eilgang geschlossen bzw. geöffnet wird, der Pressenstößel jedoch während des Einlegens der Platine sowie der Entnahme des Bauteils steht, erscheint die Annahme einer Stößelgeschwindigkeit von 100mm/s während des Umformvorganges realistisch. Des Weiteren sind die Kolben der drei Zylindergruppen im Simulationsmodell mit einem Druck von 8t, 4t und 2t vorgespannt, woraus sich eine Gesamtkraft von 72t (= 8t x 4 + 4t x 8 + 2t x 4) ergibt. Trifft nun die Masse des Stößels und Oberwerkzeuges (35t) mit 100mm/s auf die 16 ausgefahrenen Kraftregelzylinder auf, versucht pro Achse ein PDT_1-Druckregler in Kombination mit einem 3/3-Wege-Proportionalventil, die Druckspitze sowie die Positionsabweichung zu minimieren.

Das Simulationsergebnis bestätigt die Bedenken beim Einsatz von hydraulischen Aktoren. Die mit 0,5mm bis 0,7mm zu hohe Positionsabweichung sowie die vergleichsweise lange Zeit von 0,6s bis Lage und Druck des Zylinders wieder stimmen, sind aus umformtechnischer Sicht nicht zufrieden stellend.

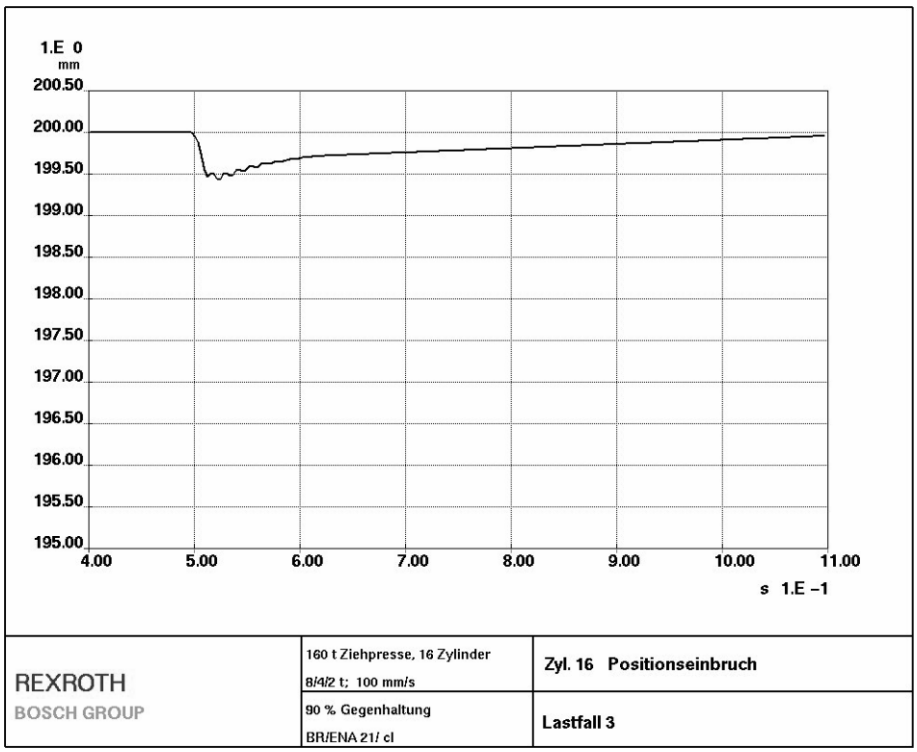

Abb. 4-26 Simulationsergebnis: Lageabweichung der Kraftregelzylinder [Rex05]

Wie das Ergebnis zeigt, ist die Verwendung von Kurzhubhydraulikzylindern zur gezielten Aufteilung der Ziehkissenkraft in verschiedene Druck- bzw. Kraftzonen grundsätzlich möglich. Doch der erforderliche Aufwand (Ventiltechnik, Druckregler, Peripherie usw.) zur Gewährleistung einer entsprechenden Dynamik und die dadurch entstehenden Kosten sind vergleichsweise hoch. Auch die gezielte Anpassung der hydraulischen Komponenten an die eingesetzte Produktionspresse mit ihrer konkreten Stößelmasse sowie dem individuellen Ziehkissenaufbau ist für die Praxis unvorteilhaft. Das Umformwerkzeug muss sowohl auf Try-Out-Pressen, der Produktionspresse und designierten Ersatzpressen problemlos einsetzbar sein. Überanpassungen des Aktorsystems an eine konkrete Umformanlage sind daher unerwünscht.

4.2.3.4 Gasdruckfedern

Wesentlich unproblematischer ist die Verwendung von Kompaktgasdruckfedern zur gezielten, lokalen Beeinflussung des Platinenflansches. Ihr Druckmedium, Stickstoff, kann den beschriebenen Stoßimpuls durch seine Kompressibilität abfedern und vereinfacht so die Konzeption der notwendigen Peripherie. Deutlich geringere Kraftanstiege als bei konventionellen Federn [Hal04] und sehr kleine Druckaufbaufaktoren von unter 1,1 [Fib05] führen bei Federwegen bis zu 4mm zu nahezu konstanten Innendrücken. Im Anschluss an den Beschleunigungsvorgang des Ziehkissens samt Unterwerkzeug erfolgt die sofortige Entspannung des Stickstoffvolumens und der lokale Blechhalterdruck liegt mit Beginn des Umformvorganges an.

Zwischen zwei Pressenhüben lässt sich mit Hilfe der Peripherie die Federvorspannung der Gasdruckfedern verändern. Während des einzelnen Umformvorganges

bleibt die eingeschlossene Stickstoffmenge konstant. Die dazu erforderliche Ventiltechnik ist einfach und klein in ihren geometrischen Abmessungen, analog den notwendigen Schlauchverbindungen.

Unter den genannten Voraussetzungen bietet der Einsatz von Stickstofffedern sogar das Potential einer kostengünstigeren Ausführungsvariante. Dabei ist es vorstellbar, nach einer Druckabstimmung in den Gasdruckfedern das Umformwerkzeug ohne die Peripherie und die ständige Option einer erneuten Druckanpassung zu betreiben. Lediglich bei Problemen würde eine Stickstoffflasche über den Anschlussblock mit der entsprechenden Gasdruckfeder verbunden und ihr Druck mit Hilfe eines einfachen Handrades und Manometers angepasst.

Aufgrund der überwiegenden Vorteile fiel im Rahmen dieser Arbeit bezüglich der Aktivelemente die Wahl auf Gasdruckfedern. Ihre häufige Verwendung in Folgeoperationen (Schnitten) bei der Herstellung von Karosseriebauteilen und die positiven Erfahrungen mit ihrer Robustheit gegenüber den Belastungen bei Serienbetrieb im Presswerk unterstützten diese Entscheidung.

4.2.3.5 Ansteuerung der aktiven Werkzeugelemente

Laut Herstellerangaben sind die als Aktorik eingesetzten Stickstofffedern mit mindestens 25bar und maximal 150bar Fülldruck zu betreiben [Fib05]. Die Auswahl von Kompaktgasdruckfedern mit sehr kurzem Hub (10mm) und minimalem Innenvolumen (0,33l) hat zur Folge, dass bereits geringste Mengen des Füllmediums zur Änderung des Vorspanndruckes ausreichen.

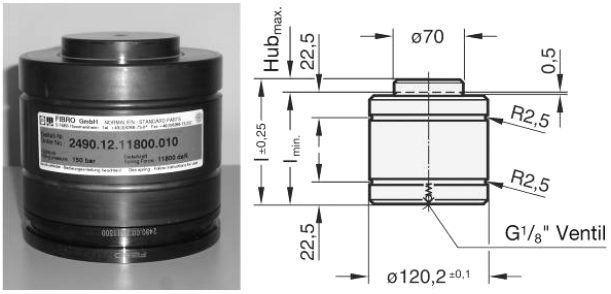

Abb. 4-27 eingesetzte Gasdruckfeder mit ihren Abmessungen [Fib05]

Einzige Schwierigkeit stellt dabei das geringe Spektrum geeigneter Ventiltechnik dar, mit denen kleinste Volumina und Durchflussmengen selbst bei hohen Druckdifferenzen zwischen Vor- und Hinterdruck innerhalb kürzester Zeit dosiert werden können.

Stetig- bzw. Proportionalventile sind für pneumatische Anwendungen mit einem Systemdruck zwischen 150bar und 200bar äußert selten oder gar nicht erhältlich. Forschungsarbeiten zu geregelten Gasdruckfedern mit über dem Federweg vorgegebenen Sollprofilen für den Innendruck und die Federkraft setzten aus diesem Grund unter anderem modifizierte Hydraulikventile ein. Der gravierende Nachteil besteht hierbei erwartungsgemäß in der mangelhaften Dichtheit der Ventile [Schl96, Hal04].

Pneumatisch vorgesteuerte Druckregeleinheiten, welche Gasdrücke bis 1.400bar regeln [Tes05], sind technisch sehr aufwendig und dementsprechend teuer. Für die simple Druckänderung zwischen zwei Pressenhüben ist ein derartiger Aufwand analog zur hydraulischen Variante nicht gerechtfertigt.

Also fiel die Entscheidung im Rahmen der vorliegenden Arbeit zugunsten einfacher 2/2-Wege-Schaltventile. Sie wurden bereits mit Erfolg versprechenden Resultaten ebenfalls in den genannten Forschungsarbeiten untersucht [Schl96, Hal04]. Ihre Vorteile liegen im einfachen Aufbau, der direktwirkenden Ansteuerung und der kompakten Bauweise (80 x 50 x 120mm im Vergleich zu 300 x 50 x 150mm des hydraulischen 3/3-Wege-Proportionalventils).

Um die gewünschte Druckänderung von ca. 5bar in den zwei bis fünf Sekunden zwischen zwei Pressenhüben mit einer Genauigkeit von ±0,5bar gewährleisten zu können, ist bei der Ventilauswahl auf kleinste Nennweiten und schnellstmögliche Schaltzeiten zu achten. Selbst unter dieser Voraussetzung besteht die Gefahr, dass die Durchflussmenge für die verhältnismäßig kleinen Druckstufen zu groß ist. In diesem Fall ist der Volumenstrom mit Hilfe von zusätzlichen Blenden bzw. Drosseln so zu begrenzen, dass ein Überschwingen während der Druckanpassung vermieden wird. Auf diese Weise lässt sich der Druckauf- bzw. -abbau entsprechend verzögern und die Schaltzeiten der Magnetventile reichen wieder aus.

In der konkreten Umsetzung kommen 32 direktwirkende Sitzventile der Firma *Bürkert* zum Einsatz. Sie setzten sich in umfangreichen Tests gegenüber den Produkten von *Coax* und *Seitz* aufgrund schnellerer und genauerer Druckanpassungsvorgänge durch. Pro Kompaktgasdruckfeder sind ein Ventil zum Befüllen und ein weiteres zum Ablassen des Stickstoffs erforderlich. Der Elektromagnet dieses Typs 2200 weist Schaltzeiten zum Öffnen und Schließen von ca. 20ms auf. Die Nennweite beträgt 1,2mm und das Ventil ist laut Herstellerangaben für Gasdrücke von 0bar bis 250bar geeignet.

Zur Reduktion des erforderlichen Bauraumes sowie des Aufwandes beim Anschluss erfolgt eine Zusammenfassung der 32 Schaltventile zu zwei baugleichen Blöcken. Gleichzeitig sind darin die Einschraubblenden (DN 0,3) für den Ein- und Auslass sowie die Drucktransmitter mit einer Messgenauigkeit von 0,1% integriert. Die Verbindung zur Gasdruckfeder stellt ein ca. 5m langer Minimessschlauch mit 2mm lichter Weite und lediglich 5mm Außendurchmesser (im Vergleich zu 12mm Innendurchmesser bei der hydraulischen Variante) her (vgl. Abb. 4-55).

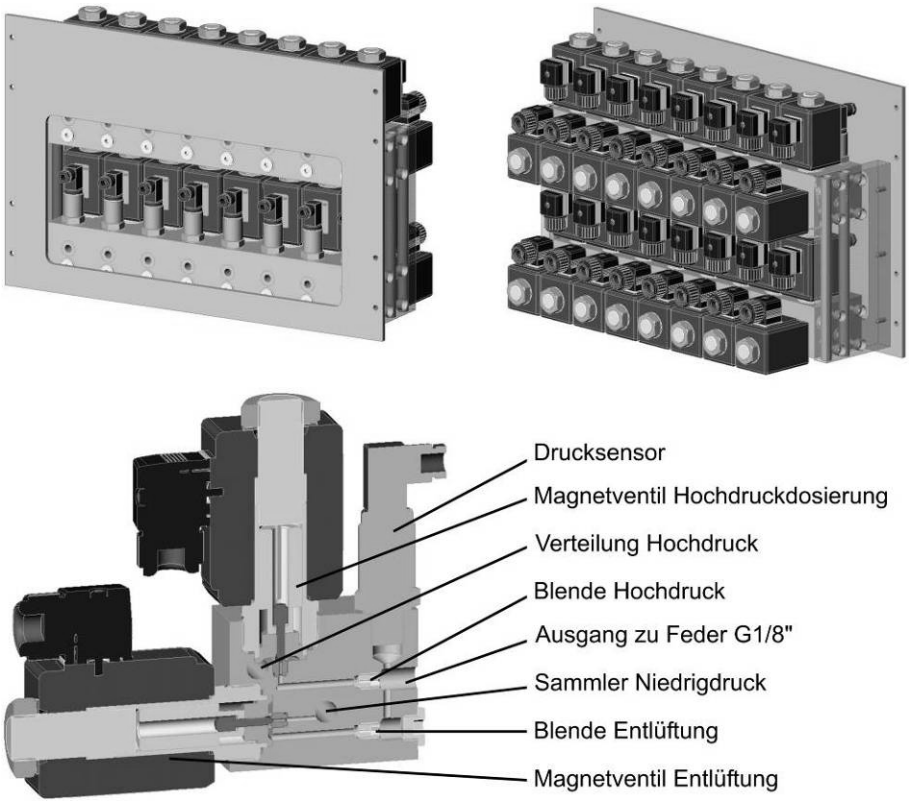

Abb. 4-28 Ventilblock Vor- und Rückseite sowie Modulschnitt

Um die Magnetventile elektronisch anzusteuern, vergleicht eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) den Messwert des Drucktransmitters der jeweiligen Gasdruckfeder mit einem zuvor am Touchpanel eingegebenen Sollwert. Ein SPS-Programmbaustein mit integriertem PID-Regler steuert das Füll- bzw. Ablassventil entsprechend an, um den Istdruck mit dem Sollwert in Übereinstimmung zu bringen. Alle Komponenten (Ventilblock, Touchpanel und SPS) sind in einem fahrbaren Industrieschrank untergebracht (vgl. Abb. 4-29).

Abb. 4-29 Dosierstation

Im Falle eines Großserieneinsatzes derartiger Dosierstationen sollte ein geschlossener Stickstoffkreislauf analog zu hydraulischen Systemen mit Hochdruck- und Niederdruckkreis sowie einem Booster aufgebaut werden. Bislang wird der freigesetzte Stickstoff bei Drucksenkungen einfach abgeblasen.

4.2.4 Dimensionierung des definiert elastischen Einsatzes und simulative Konzeptabsicherung

Nachdem die Festlegung der Aktorik als erste konstruktive Randbedingung stattgefunden hat, müssen in einem weiteren Schritt zur Vorbereitung der Werkzeugkonstruktion die Abmessungen des definiert elastischen Einsatzes bestimmt werden. Dabei geht es um eine Kompromisslösung, die einerseits ausreichende Flexibilität zur Durchbiegung durch einen möglichst dünnen Querschnitt und andererseits die geforderte Dauerfestigkeit bietet.

Ein erster Ansatz zur Erhöhung der Biegsamkeit sieht Nuten in der Unterseite des elastischen Einsatzes an den korrespondierenden Segmentübergängen aus der Umformsimulation vor. Jedoch sind diese Zonen aufgrund ihrer Kerbwirkung hinsichtlich Dauerfestigkeit selbst bei entsprechend großen Radien gefährdet.

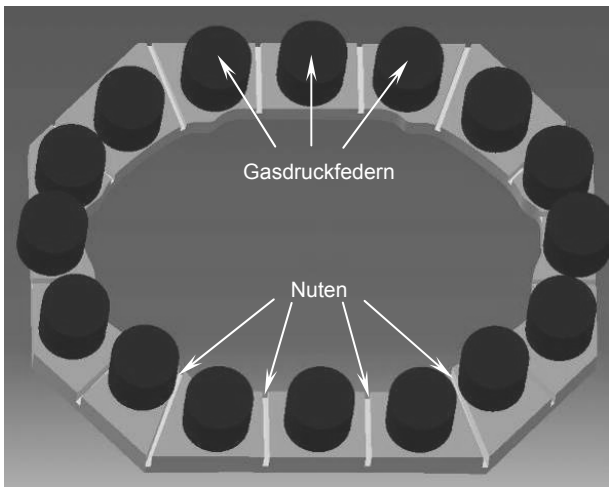

Abb. 4-30 elastischer Einsatz, Ansicht von unten, Catia Konstruktion

Aus diesem Grund wird eine mehrteilige Ausführung des elastischen Einsatzes bevorzugt. Sie besteht aus einem umlaufenden Ring und 16 Druckplatten, von denen jede einer Gasdruckfeder zugeordnet ist und dem zugehörigen Niederhaltersegment aus der Tiefziehsimulation entspricht. Zwischen zwei benachbarten Druckplatten ist ein Spalt von zehn Millimetern vorgesehen.

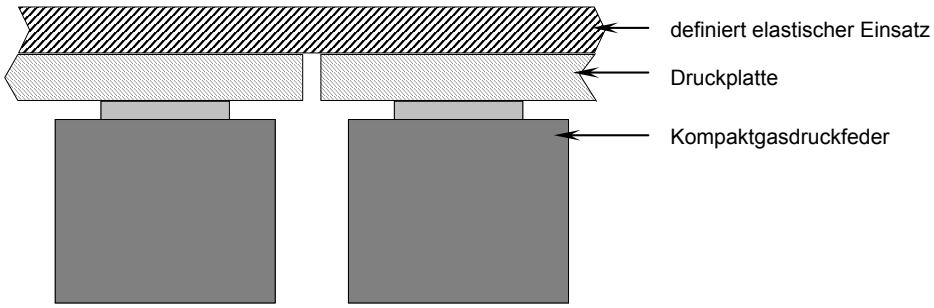

Abb. 4-31 Prinzipdarstellung des Niederhalteraufbaus

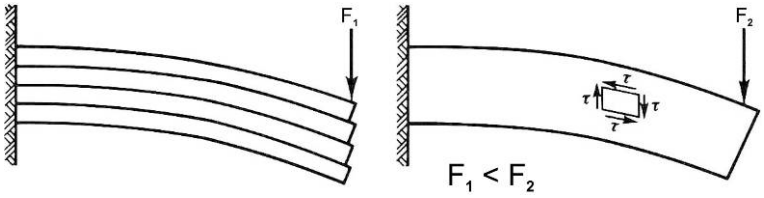

Abb. 4-32 Durchbiegungsvergleich von mehreren Blättern und einem Balken

Die Verbindungen zwischen dem Niederhalterring und den Druckplatten sollen mit Hilfe von jeweils zwei diagonal angeordneten Schrauben erfolgen. Dazu sind in die Druckplatten Bohrungen mit entsprechend großen Plustoleranzen als Durchgangslöcher einzubringen und die Schrauben lediglich handfest anzuziehen, um die Relativbeweglichkeit zwischen dem elastischen Einsatz und den Druckplatten weiterhin zu gewährleisten. Durch die rückseitige Verschraubung zusätzlicher Druckplatten wird die Flexibilität des dann dünner ausfallenden elastischen Einsatzes erhöht (vgl. Abb. 4-32) und die Druckeinleitung seitens der Gasdruckfedern homogener verteilt. Außerdem bieten diese Druckplatten eine zusätzliche Option zur Optimierung der Flächenpressung (vgl. Kapitel 4.2.5). Zuletzt dienen die Druckplatten einer erhöhten

Wartungsfreundlichkeit und gestatten gegebenenfalls die Reparatur. So können bspw. einzelne Platten problemlos ersetzt werden, falls sich die Kolben der Gasdruckfedern eingearbeitet haben.

4.2.4.1 Dickenbestimmung mit Hilfe der Balkentheorie

Zur grundlegenden Abschätzung der maximal zulässigen Querschnittshöhe des elastischen Einsatzes dient ein einfaches Biegebalkenmodell. Darin wird der Ausschnitt eines Geradenbereiches mit drei Gasdruckfedern betrachtet. Die angesprochenen Druckplatten finden hierbei der Einfachheit halber keine Berücksichtigung. Als Auflager des Biegebalkens dienen die beiden äußeren Stickstofffedern, welche mit Maximaldruck beaufschlagt sind. Die mittlere Gasdruckfeder ist nur mit Minimaldruck vorgespannt und wird aufgrund der Blechaufdickung verdrängt. Um den definiert elastischen Einsatz entsprechend durchzubiegen, ist eine zusätzliche Biegekraft erforderlich. Ihr Betrag soll ebenfalls der Aktor-Minimalkraft entsprechen.

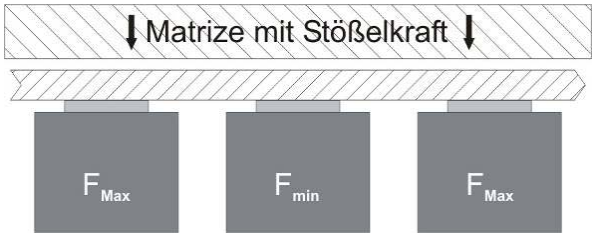

Abb. 4-33 Biegebalkenmodell: Darstellung definiert elastischer Einsatz auf 3 Zylindern

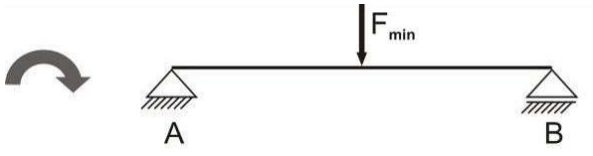

Abb. 4-34 Biegebalkenmodell: Darstellung als Stabdiagramm

Laut den Ergebnissen der Umformsimulation beträgt die maximale Blechaufdickung zwischen 0,12mm und 0,15mm (vgl. Abb. 4-18). Des Weiteren ergibt sich aus dem Konzeptentwurf eine durchschnittliche Entfernung von 160mm zwischen den Mittelpunkten zweier benachbarter Kompaktgasdruckfedern (vgl. Abb. 4-22). Ebenfalls aus dem Konstruktionskonzept stammt die maximale Querschnittsbreite des elastischen Niederhaltereinsatzes mit ca. 160mm (vgl. Abb. 4-23). Somit ergibt sich die maximale Querschnittshöhe, bei der eine Federvorspannung von 25bar eine Durchbiegung von 0,15mm hervorruft, aus folgender Berechnung:

Gegeben:

$l = 320mm = 2 \cdot 160mm$ (Länge des Biegebalkens)

$b = 160mm$ (Breite des Biegebalkens)

$f_m = 0{,}15mm$ (max. Durchbiegung des Biegebalkens)

$P_{Min} = 25bar$ (min. Federdruck)

$A_F = \frac{\Pi}{4} \cdot (100mm)^2$ (innere Kolbenfläche der Kompaktgasdruckfeder)

$E = 210000 \frac{N}{mm^2}$ (E-Modul, allgemein für Stahl und Guss)

$R_e = 200 \frac{N}{mm^2}$ (Streckgrenze, allgemein für Stahl und Guss)

Gesucht:

I	(axiales Flächenträgheitsmoment)
h	(Höhe des Biegebalkens)
S_{Vorh}	(vorhandene Sicherheit)

Ein Innendruck von 25bar entspricht einer minimalen Federkraft von:

$$F_{Min} = P_{Min} \cdot A_F = 2{,}5\frac{N}{mm^2} \cdot \frac{\Pi}{4} \cdot (100mm)^2 = \underline{\underline{19{,}63kN}} \qquad \textit{(Gl. 4-1)}$$

Die Gleichung der maximalen Durchbiegung eines mittig mit einer Kraft belasteten Trägers auf zwei Stützen lässt sich nach dem Flächenträgheitsmoment umstellen:

$$f_m = \frac{F_{Min} \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} \quad \Rightarrow \quad I_y = \frac{F_{Min} \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot f_m} = \frac{19635N \cdot (320mm)^3}{48 \cdot 210\frac{kN}{mm^2} \cdot 0{,}15mm} = \underline{\underline{4{,}26 \cdot 10^5 mm^4}} \qquad \textit{(Gl. 4-2)}$$

Aus der Formel des axialen Flächenträgheitsmomentes für den Rechteckquerschnitt ist nun die Höhe des elastischen Niederhalterringes zu bestimmen:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \Rightarrow \quad h = \sqrt[3]{12 \cdot \frac{I_y}{b}} = \sqrt[3]{12 \cdot \frac{425528mm^4}{160mm}} = \underline{\underline{31{,}72mm}} \qquad \textit{(Gl. 4-3)}$$

Fertigungstechnisch vertretbar ist eine minimale Höhe von 25mm. Sie wird in diesem Fall zur Gewährleistung maximaler Flexibilität des Einsatzes und in Anbetracht der vernachlässigten Druckplatten festgelegt. Dabei ergeben sich folgendes Biegemoment und die zugehörige Biegespannung:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{160mm \cdot (25mm)^3}{12} = \underline{\underline{2{,}08 \cdot 10^5 mm^4}}$$ (aktuelles Flächenträgheitsmoment nach (Gl. 4-3))

$$W_b = \frac{2 \cdot I_y}{h} = \frac{b \cdot h^2}{6} = \underline{\underline{1{,}66\bar{6} \cdot 10^4 mm^3}}$$ (aktuelles Widerstandsmoment) *(Gl. 4-4)*

$$M_{b\max} = \frac{F_{Min} \cdot l}{4} = \frac{19635N \cdot 320mm}{4} = \underline{\underline{15{,}7 \cdot 10^5 Nmm}}$$ (Biegemoment) *(Gl. 4-5)*

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{b\max}}{W_b} = \frac{15{,}7 \cdot 10^5 Nmm}{1{,}66\bar{6} \cdot 10^4 mm^3} = \underline{\underline{94{,}25\frac{N}{mm^2}}}$$ (Biegespannung) *(Gl. 4-6)*

Unter Berücksichtigung einer für viele Stahlsorten und Gusswerkstoffe zutreffenden, sehr niedrigen Streckgrenze von 200N/mm² ergibt sich eine vorhandene Sicherheit von:

$$S_{vorh} = \frac{R_e}{\sigma_{\max}} = \frac{200\frac{N}{mm^2}}{94{,}25\frac{N}{mm^2}} = \underline{\underline{2{,}12}} \qquad \textit{(Gl. 4-7)}$$

In Anbetracht dieser zweifachen Sicherheit bei der gewählten, vergleichsweise geringen Streckgrenze ist für den elastischen Einsatz bei der gewünschten Durchbiegung weder mit plastischer Verformung noch mit Bauteilversagen zu rechnen. Die Tatsache, dass die meisten Stahlsorten eine wesentliche längere Hook'sche Gerade mit entsprechend höherer Dehngrenze aufweisen, unterstreicht dieses Ergebnis.

Aufgrund einer im Vergleich zu den Gasdruckfederkräften außermittig wirkenden Sickenprägekraft ist der gewählte Querschnitt in einem weiteren Schritt hinsichtlich Torsion zu überprüfen. Dazu werden die beiden äußeren, mit Maximaldruck beaufschlagten Kompaktfedern im Zusammenspiel mit der Werkzeugmatrize als Gabellager aufgefasst. Die mittlere Stickstofffeder mit minimaler Vorspannung gibt nach und ermöglicht so die Verdrehung infolge der Torsion durch die Prägekraft des Ziehstabes. Während des Blecheinzuges auftretende Reibkräfte und die Rückhaltekraft der Ziehsicke sind konstruktiv durch Widerlager am äußeren Rand des elastischen Einsatzes als auch auf der gegenüberliegenden Ringseite abzufangen und können demnach bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden. Ebenso bleiben die Druckplatten aus Gründen der Einfachheit erneut unberücksichtigt.

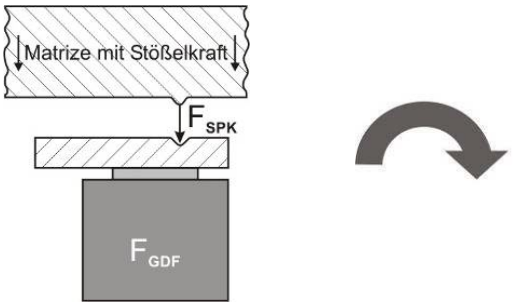

Abb. 4-35 Schnitt: elastischer Einsatz, außermittige Sickenprägekraft

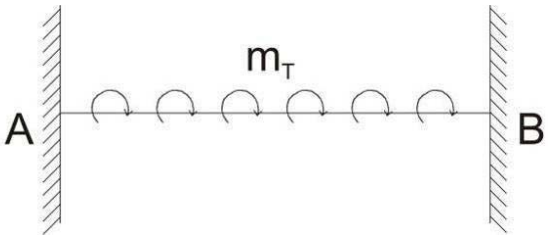

Abb. 4-36 Stabmodell mit Flächentorsionsmoment

Eine über die gesamte Balkenlänge verlaufende Ziehsicke ruft ein Flächentorsionsmoment hervor, welches am Rand der Gabellager sein Maximum aufweist.

$$M_{T_A} = -M_{T_B} = \frac{q_{SPK} \cdot e \cdot l}{2} \qquad \text{(Gl. 4-8)}$$

Die Flächenlast der Sickenprägekraft, q_{SPK}, kann im Rahmen einer Ziehstabsimulation nach den Erkenntnissen von Hahn [Hah00_a] mit 125N/mm für eine vorgegebene Rückhaltekraft von 60N/mm (vgl. Kapitel 4.2.1.2) ermittelt werden. Der Hebelarm bzw. Abstand zwischen der Ziehsicke und dem Mittelpunkten der Kompaktgasdruckfedern, e, lässt sich aus dem Werkzeugkonzept mit ca. 20mm abschätzen. Demnach ergeben sich für den gewählten Querschnitt das Moment, der Verdrehwinkel und die Vergleichsspannung aus folgender Berechnung:

Zusätzlich gegeben:

$e = 20mm$ (Hebelarm der Sickenprägekraft)

$q_{SPK} = 125\frac{N}{mm^2}$ (Flächenlast der Sickenprägekraft)

$\nu = 0{,}3$ (Querdehnungszahl für Stahl, Poissonzahl)

Gesucht:

$M_{T_{Max}}$ (max. Torsionsmoment)

φ (max. Verdrehwinkel)

Δz (max. Auslenkung des Einsatzes am Innenrand)

S_{Vorh} (vorhandene Sicherheit)

Torsionsmoment:

$$M_{T_{Max}} = \frac{q_{SPK} \cdot e \cdot l}{2} = \frac{125\frac{N}{mm} \cdot 20mm \cdot 320mm}{2} = \underline{\underline{4 \cdot 10^5 Nmm}} \qquad \text{(Gl. 4-9)}$$

Der maximale Verdrehwinkel stellt sich in der Mitte des Balkens bei l/2 ein und lässt sich aus einer Verknüpfung des Torsionsmomentes mit dem Gleitmodul, G, sowie dem polaren Flächenmoment zweiten Grades, I_p, ermitteln.

$$\varphi = \frac{M_{T_{Max}} \cdot \frac{l}{2}}{G \cdot I_p} = \frac{4 \cdot 10^5 Nmm \cdot \frac{320mm}{2}}{80{,}8\frac{kN}{mm^2} \cdot 7{,}5 \cdot 10^5 mm^4} = \underline{\underline{1{,}06 \cdot 10^{-3} rad}} \text{ , wobei} \qquad \text{(Gl. 4-10)}$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} = \frac{210\frac{kN}{mm^2}}{2 \cdot (1+0{,}3)} = \underline{\underline{80{,}77\frac{kN}{mm^2}}} \text{ und} \qquad \text{(Gl. 4-11)}$$

$$I_p = \frac{b \cdot h^3}{3} \cdot \left(1 - 0{,}630 \cdot \frac{h}{b} + 0{,}052 \cdot \frac{h^5}{b^5}\right) = \underline{\underline{7{,}5 \cdot 10^5 mm^4}} \text{ gilt.} \qquad \text{(Gl. 4-12)}$$

Die größte Auslenkung des definiert elastischen Einsatzes entsteht ebenfalls in der Mitte des Balkens bei l/2 und errechnet sich aus dem Produkt des Verdrehwinkels mit der halben Breite des Niederhalterringes.

$$\Delta z = \varphi \cdot \frac{b}{2} = 1{,}06 \cdot 10^{-3} rad \cdot \frac{160mm}{2} = \underline{\underline{0{,}084mm}} \qquad \text{(Gl. 4-13)}$$

In Anbetracht einer Auslenkung von lediglich acht Hundertstel Millimetern, was einer Größenordnung von ca. 50% der Blechaufdickung entspricht, sind keine negativen Auswirkungen einer Torsion des elastischen Blechhaltereinsatzes zu erwarten. Allerdings ist der gewählte Querschnitt noch auf seine Sicherheit gegenüber den Schubspannungen sowie den Biegespannungen durch die Sickenprägekraft zu überprüfen.

Schubspannung:

$$\tau_{xy} = \frac{M_{T_{Max}}}{W_p} = \frac{4 \cdot 10^5 \, Nmm}{29980 mm^3} = \underline{\underline{13{,}34 \frac{N}{mm^2}}} \qquad \text{(Gl. 4-14)}$$

Wobei sich das polare Widerstandsmoment für den Rechteckquerschnitt aus folgendem Zusammenhang mit einem aus Tabellenwerten zu interpolierenden Formfaktor, c_2, ergibt:

$$W_p = c_2 \cdot b \cdot h^2 = 0{,}2998 \cdot 160 mm \cdot (25 mm)^2 = \underline{\underline{29980 mm^3}} \qquad \text{(Gl. 4-15)}$$

Die Flächenlast der Sickenprägekraft ruft neben der Torsion auch Biegung hervor. Allerdings entstünde das maximale Biegemoment in der Mitte des Balkens, wenn das Modell aus der ersten Biegeberechnung mit den beiden Auflagern am Rand des Stabes zugrunde gelegt wird (vgl. Abb. 4-33) und die Randmomente wären null. Da die Torsionsspannungen analog dem Torsionsmoment am Rand der Gabellager ihr Maximum erreichen, soll im Zuge einer Worst-Case-Betrachtung nun zu einem beiderseits fest eingespannten Biegebalken übergegangen werden, um die Randspannungen aus Torsion und Biegung schließlich zu überlagern.

$$M_{b_A} = M_{b_B} = \frac{q_{SPK} \cdot l^2}{12} = \frac{125 \frac{N}{mm} \cdot (320 mm)^2}{12} = \underline{\underline{1{,}0\bar{6} \cdot 10^6 \, Nmm}} \qquad \text{(Gl. 4-16)}$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{1{,}0\bar{6} \cdot 10^6 \, Nmm}{1{,}6\bar{6} \cdot 10^4 \, mm^3} = \underline{\underline{64{,}0 \frac{N}{mm^2}}} \qquad \text{(Gl. 4-17)}$$

Gemäß der Schubspannungshypothese ergibt sich eine Vergleichsspannung von

$$\sigma_v = \sqrt{{\sigma_b}^2 + 4 \cdot {\tau_{xy}}^2} = \sqrt{\left(64{,}0 \frac{N}{mm^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(13{,}34 \frac{N}{mm^2}\right)^2} = \underline{\underline{69{,}34 \frac{N}{mm^2}}} \qquad \text{(Gl. 4-18)}$$

und damit eine Sicherheit von

$$S_{vorh} = \frac{R_e}{\sigma_v} = \frac{200 \frac{N}{mm^2}}{69{,}34 \frac{N}{mm^2}} = \underline{\underline{2{,}88}}. \qquad \text{(Gl. 4-19)}$$

Wie diese 2,88-fache vorhandene Sicherheit bestätigt, stellt auch die Torsionsbeanspruchung durch die Prägekraft des Ziehstabes keine Gefahr für den definiert elastischen Niederhaltereinsatz hinsichtlich plastischer Verformung oder Bauteilversagen dar. Somit kann der gewählte Querschnitt mit einer Höhe von 25mm und einer Breite von 160mm als Richtwert für die bevorstehende Werkzeugkonstruktion herangezogen werden.

4.2.4.2 Konzeptanalyse mittels FEM-Simulationen

Nach der Idee für ein neuartiges Werkzeugkonzept, der Festlegung geeigneter Aktorik und der überschläglichen Dimensionierung des elastischen Einsatzes entstand im Rahmen einer ersten Grobkonstruktion ein 3D-Modell des Niederhalters (vgl. Abb. 4-22 bis Abb. 4-24).

Zur Veranschaulichung der tatsächlichen, realitätsnahen Kraft- und Spannungsverhältnisse lässt sich daraus mit Hilfe von Solid-Elementen ein Simulationsmodell des Umformwerkzeuges erstellen. Es dient zur Beantwortung der Frage, ob sich mit verschiedenen Aktorkräften in der Tat lokal unterschiedliche Flächenpressungen im Bereich des Blechflansches einstellen lassen.

Wie bereits erwähnt (vgl. Kapitel 4.1.2) führen unterschiedliche Geometriemerkmale im Bereich des Bauteilstempels zur Asymmetrie des Ziehteils. Bei ausschließlicher Betrachtung der Flächenpressungen im Platinenflansch sowie der Belastungen des definiert elastischen Niederhaltereinsatzes ist jedoch von einer Symmetrie der Ankonstruktion auszugehen. Zur Reduktion der Antwortzeiten und Performancesteigerung der Simulationen reicht somit die Abbildung des halben Umformwerkzeuges aus.

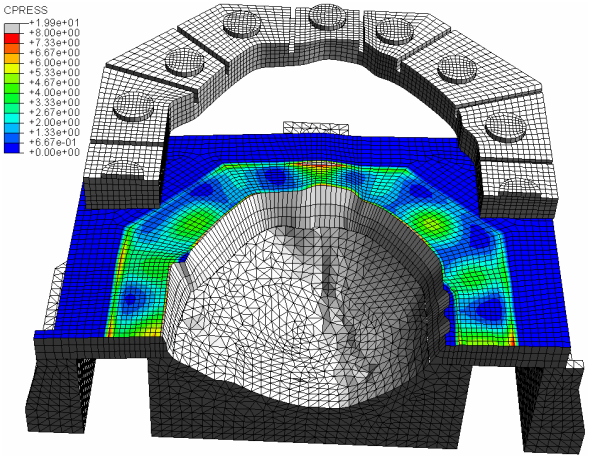

Abb. 4-37 Flächenpressungsverteilung mit definiert elastischem Einsatz und Gasdruckfedern zu Beginn der Umformung

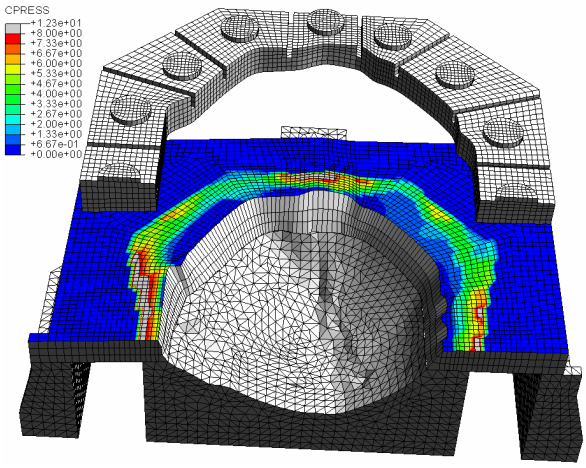

Abb. 4-38 Distribution der Flächenpressung am Ende des Umformvorganges

Umgekehrt zur Einbaulage in der Umformpresse ist die halbe Matrize in Abb. 4-37 unten dargestellt. Des Weiteren sind der elastische Einsatz und die zugehörigen Druckplatten zur Vereinfachung des Simulationsmodells und Vermeidung zusätzlicher Kontaktdefinitionen als ein Teil mit den entsprechenden Nuten an den Segmentübergängen abgebildet. Nach Auffahren des Ringeinsatzes zeigt ein Blick auf die Kontaktfläche die von den unterschiedlichen Aktorkräften hervorgerufene Flächenpressung. Obwohl die Biegesteifigkeit dieser einteiligen Ausführung etwas höher sein dürfte, wird anhand von Regionen mit hohen, mittleren und niedrigen Drücken deutlich, dass mit diesem Werkzeugkonzept eine gezielte Beeinflussung des Platinenflansches möglich ist.

Die Drücke auf den angedeuteten Kolben der einzelnen Gasdruckfedern korrespondieren mit den entsprechenden Segmentkräften aus der Umformsimulation (vgl. Abb. 4-17) und rufen vergleichbare Flächenpressungen hervor. Allerdings ist deren lokale Ausbreitung im 3D-Simulationsmodell längst nicht so homogen wie auf den Niederhaltersegmenten in der Umformsimulation (vgl. Abb. 4-17). Stattdessen führt die zylindrische Bauweise der Aktorik zu Drucklinsen, welche im Zentrum ihr Maximum und in konzentrischen Kreisen nach außen hin abnehmende Flächenpressungswerte aufweisen.

Weiterhin zeigt das Realbild der Druckverteilung im Vergleich zum Idealbild aus der Umformsimulation eine ausgeprägte Kantenpressung am Platinenrand auf. Sie resultiert aus den großvolumigen Kammern in der bereits vorhandenen Werkzeugmatrize, welche aufgrund der ungünstigen Kastenverrippung entstehen. Deshalb empfiehlt es sich bei Umsetzung des vorgestellten Konzeptes in neuen Umformwerkzeugen matrizenseitig innovativere Verrippungsstrategien anzuwenden. Erste Ansätze hierzu liefern die Arbeiten von Hohnhaus [Hoh99] und Häussermann [Häu02], in denen unter anderem wabenförmige Strukturen näher untersucht wurden.

Abschließend ist das Simulationsergebnis jedoch als Erfolg zu bewerten, da es bestätigt, dass unterschiedliche Drücke in den Gasdruckfedern lokal differenzierte Flächenpressungen hervorrufen. Ferner widerlegt es Bedenken hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung aneinandergrenzender Bereiche. Somit gestattet das vorgestellte Werkzeugkonzept eine zielgerechte Krafteinleitung in den Flansch der Bauteilplatine sowie die örtliche Beeinflussung des Einlaufverhaltens.

4.2.5 Optimierung der Flächenpressungsverteilung

Obwohl die Ergebnisse der Konzeptanalyse bereits sehr vielversprechend sind und die Umsetzung in eine detaillierte Werkzeugkonstruktion motivieren, soll eine weitergehende Simulationsstudie dazu dienen, die Möglichkeiten zur Homogenisierung der lokalen Flächenpressungsverteilung zu untersuchen. Anlass für diese Untersuchung geben die Arbeiten von Hohnhaus [Hoh98, Hoh99] und Häussermann [Häu00, Häu01, Häu02], in denen die Notwendigkeit einer gleichmäßigen Ausbreitung des Niederhalterdruckes über den einzelnen Krafteinleitungsstellen stark betont wird.

In den Werkzeugkörper eingeleitete Kräfte breiten sich unter einem Raumwinkel von ca. 15° aus [Tho04]. Für eine homogene Flächenpressungsverteilung prognostiziert Hohnhaus aus diesem Grund entsprechend große Bauhöhen seines Pyramidenstumpfniederhalters [Hoh98]. Um auf sehr kleinem und nur begrenzt zur Verfügung stehendem Bauraum ebenfalls eine gleichmäßige Verteilung des Blechhalterdruckes zu erreichen, besteht die grundlegende Idee in einer gezielten Störung dieses Kraftflusses.

Mit Hilfe eines einfachen Simulationsmodells für einen Ausschnitt aus der Matrize und dem elastischen Einsatz kombiniert um eine Druckplatte sowie den stilisierten Kolben der zugehörigen Gasdruckfeder findet eine Optimierung der Flächenpressungsverteilung statt.

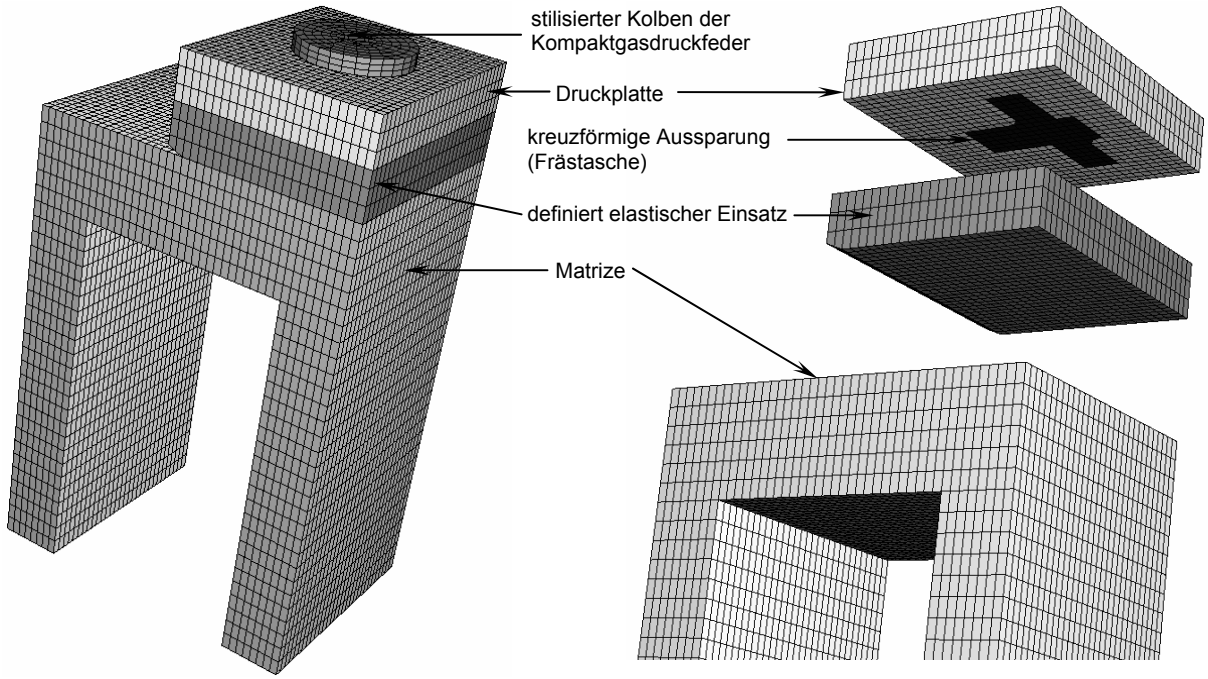

Abb. 4-39 einfaches Simulationsmodell zur Optimierung der Flächenpressung

Abb. 4-40 Explosionsdarstellung des Optimierungsmodells

Basierend auf der grundsätzlichen Überlegung, den Kraftfluss gezielt abzulenken, ist die Druckplatte in ihrer Kontaktfläche zum elastischen Einsatz mit einer Aussparung zu versehen. Die vom Kolben der Gasdruckfeder in die Unterseite der Druckplatte eingeleitete Kraft kann im Bereich der Aussparung nicht in den Niederhaltereinsatz übertragen werden und muss sich stattdessen seitlich der Frästasche ausbreiten.

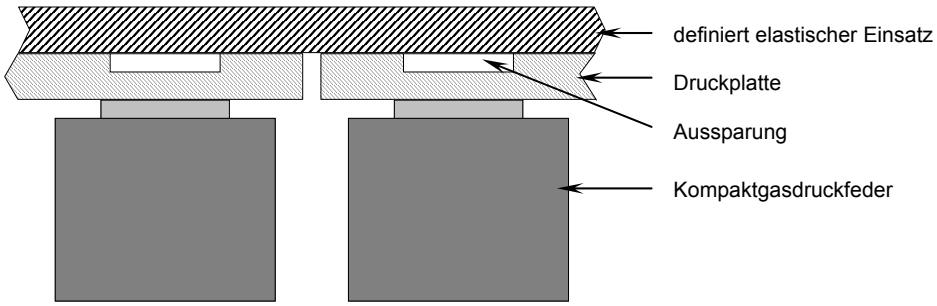

Abb. 4-41 Prinzipskizze des Niederhalteraufbaus mit Aussparungen in den Druckplatten

Form und Größe der Materialaussparung lassen sich durch den Einsatz entsprechender Optimierungstools unter Vorgabe geeigneter Zielkriterien und Randbedingungen automatisch bestimmen. In der vorliegenden Optimierungsstudie besteht die Zielfunktion in der Minimierung des Gradienten der Flächenpressungsverteilung:

$$Minimize\left[\sum_{i=1}^{n}\left|Cpress_i-\frac{\sum_{i=1}^{n}Cpress_i}{n}\right|\right]. \qquad \text{(Gl. 4-20)}$$

Dazu variiert der Optimierer des Programmpakets HyperStudy® durch Modifikation der Design Variablen (so genanntes Morphing) das Erscheinungsbild des FEM-Netzes. Einschränkungen ergeben sich hierbei lediglich aus dem grundsätzlichen Verlauf der Netzlinien (kreisförmig oder rechtwinklig). Die anschließende Simulation des Kraftflusses zeigt die Auswirkung der jeweiligen Veränderung auf die Flächenpressungsverteilung. Zuletzt wird die Netzgeometrie, welche den besten Zielfunktionswert liefert, als Optimum deklariert.

Aus einer Vielzahl von Optimierungszyklen mit den verschiedensten Geometrien der Materialaussparung (Kreistaschen, Kreisringnuten, quadratische, U-förmige und rechteckige Aussparungen sowie die Kombination mehrerer Ausschnitte) geht eine T- bzw. kreuzförmige Frästasche als optimales Resultat hervor.

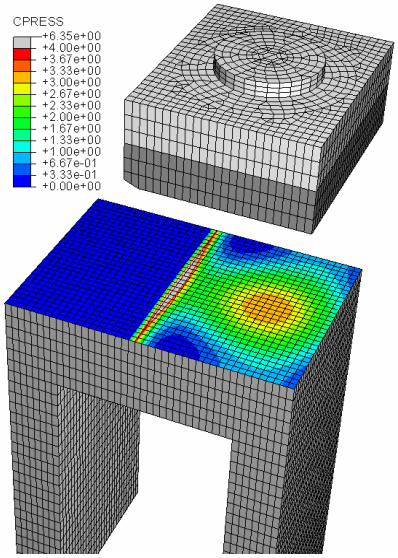

Abb. 4-42 Flächenpressungsverteilung vor der Optimierung ohne Aussparung in der Druckplatte

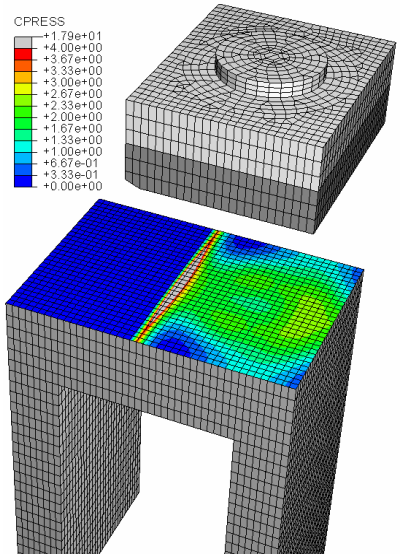

Abb. 4-43 Flächenpressungsverteilung nach der Optimierung

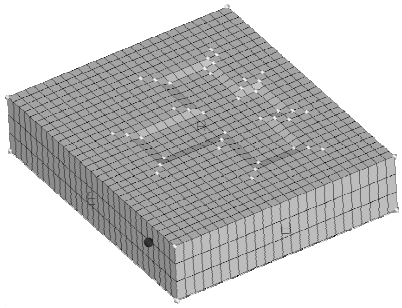

Abb. 4-44 zugehörige Geometrie der Druckplatte

Im Ergebnis der Optimierungsstudie ist deutlich zu erkennen, dass eine gezielte Störung des Kraftflusses die Entstehung einer Druckspitze im Zentrum der Kontaktfläche von definiert elastischem Einsatz und Werkzeugmatrize vermeidet. Des Weiteren lässt sich dadurch eine homogenere Verteilung der Flächenpressung und Reduktion der Regionen mit sehr geringem Blechhalterdruck am Segmentrand erreichen. Die nach wie vor stark ausgeprägte Kantenpressung ist aufgrund der unvorteilhaften Matrizenverrippung nicht zu vermeiden und wurde deshalb während der Optimierung ignoriert.

Übertragen auf das Gesamtwerkzeug empfiehlt sich demnach die mehrteilige Ausführung des definiert elastischen Einsatzes bestehend aus einem umlaufenden Blechhalterring und 16 Druckplatten, die zur Homogenisierung der Flächenpressungsverteilung eine kreuzförmige Aussparung aufweisen.

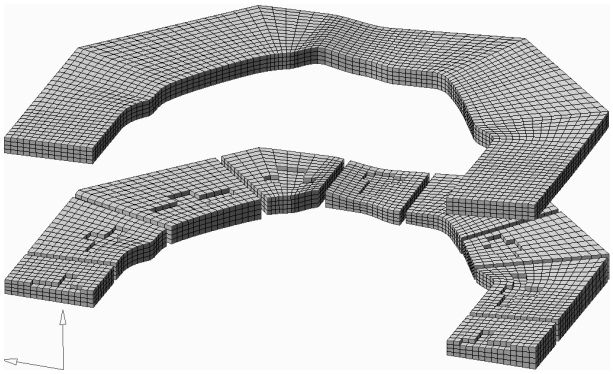

Abb. 4-45 Aufbau des definiert elastischen Niederhalters zur Optimierung der Flächenpressungsverteilung

Die zugehörige Druckverteilung in der Kontaktfläche von Niederhaltereinsatz und Matrize bestätigen die Vorteilhaftigkeit eines derartigen Aufbaus.

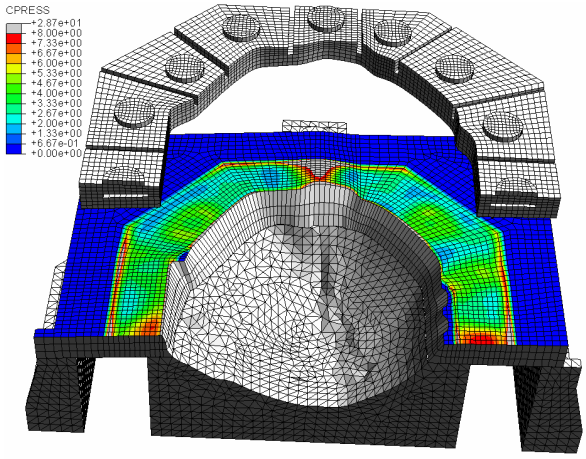

Abb. 4-46 gleichmäßigere Verteilung der Flächenpressung aufgrund T-Aussparungen in den Druckplatten (Beginn der Umformung)

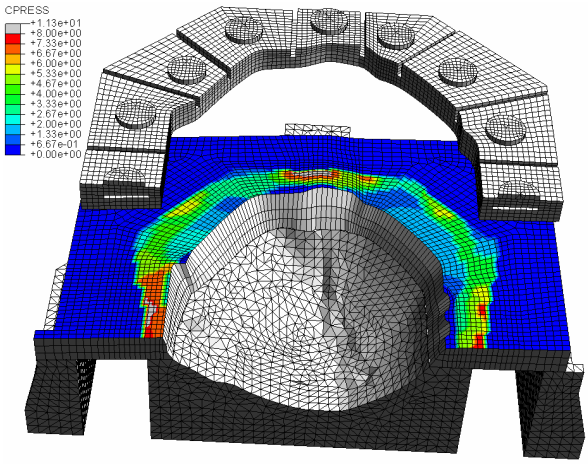

Abb. 4-47 Flächenpressungsverteilung mit T-Aussparungen in den Druckplatten am Ende des Umformvorganges

Aufgrund der Tatsache, dass die Einbringung zusätzlicher Frästaschen in die Druckplatten einen gewissen fertigungstechnischen Aufwand darstellt, sollte vor ihrer konstruktiven Festlegung im Rahmen einer Kontrollrechnung der Umformsimulation die Notwendigkeit einer sehr gleichmäßigen Druckverteilung über den einzelnen Gasdruckfedern bestätigt werden. Dazu erfolgt eine Erweiterung des Modells der Tiefziehsimulation mit einer zusätzlichen Unterteilung der 16 Niederhaltersegmente. Auf konzentrischen Kreisabschnitten nimmt die Segmentkraft von einem Maximum im Zentrum nach außen hin ab und entspricht damit dem Realbild der Flächenpressungsverteilung aus der Werkzeugsimulation (vgl. Abb. 4-37).

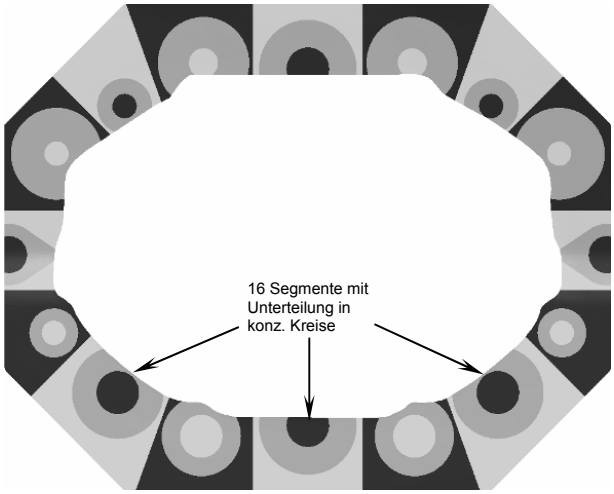

Abb. 4-48 Unterteilung der 16 Niederhaltersegmente in konzentrische Kreissegmente

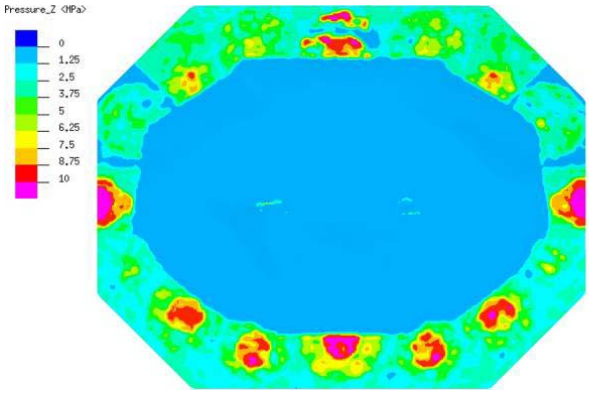

Abb. 4-49 Flächenpressungsverteilung nach Segmentierung mit konzentrischen Kreisen

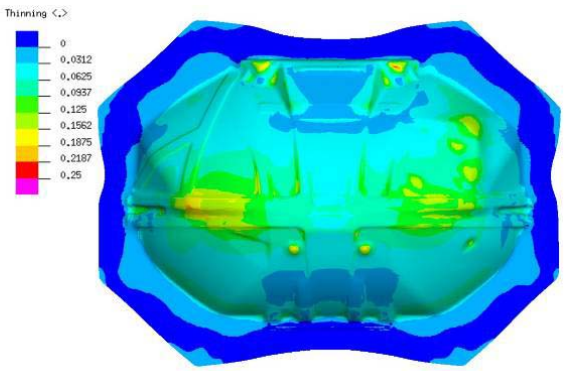

Abb. 4-50 Simulationsergebnis der Kontrollrechnung hinsichtlich Abstreckung / Blechausdünnung

Laut dem Ergebnis dieser Kontrollrechnung der Umformsimulation sind mit einer leicht inhomogenen Flächenpressung über den einzelnen Gasdruckfedern ebenfalls falten- und rissfreie Ziehteile herstellbar. Aus diesem Grund wird in der Umsetzung des Versuchswerkzeuges zunächst auf die Aussparung in den Druckplatten verzichtet. Allerdings besteht bei Bedarf nachträglich noch die Möglichkeit, jederzeit eine speziell für die jeweilige Aktorkraft optimierte Frästasche einzubringen.

4.2.6 Konstruktion und Aufbau des Versuchswerkzeuges

Mit der Festlegung geeigneter Aktorik (vgl. Kapitel 4.2.3) und der überschläglichen Dimensionierung (vgl. Kapitel 4.2.4.1) des definiert elastischen Einsatzes sind alle Randbedingungen für eine detaillierte Konstruktion des neuen Niederhalters gegeben. Speziell die positiven Resultate der Konzeptanalyse mittels FEM-Simulationen (vgl. Kapitel 4.2.4.2) motivieren die Umsetzung dieses neuen Werkzeugkonzeptes. Durch die mehrteilige Ausführung des elastischen Blechhalterringes besteht sogar die Option, bei Bedarf die Vorteile einer homogenen Kraftverteilung aus der Optimierungsstudie zur Distribution der Flächenpressung (vgl. Kapitel 4.2.5) zu erschließen.

4.2.6.1 Werkzeuggestaltung

Zur Detailkonstruktion des Niederhaltes gehört in erster Linie der Grundkörper mit entsprechend angepasster Verrippung, um in Form von Kammern ausreichend Bauraum für die 16 Kompaktgasdruckfedern zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus sind bei der Konstruktion des Grundgestells der Plan zur Verschlauchung der Aktorik und die dabei erforderlichen Wanddurchbrüche zu berücksichtigen.

Zweiter essentieller Bestandteil des neuen Blechhalters ist der definiert elastische Einsatz. Um ihn in der Blecheinzugsebene (xy-Ebene) zu führen und eine Relativbewegung zum Gussgrundkörper lediglich entlang der z-Achse (entlang der Stößelbewegung) zuzulassen, sind entsprechende Widerlager, die sowohl die Rückhaltekräfte der Ziehsicke als auch die Reibkräfte während des Platineneinzuges aufnehmen, erforderlich. Sie werden durch Gleitplatten, die in entsprechende Taschen des Werkzeuggrundgestells eingreifen und von unten an den Niederhalterring verschraubt sind, realisiert. Ferner ist über die Höhe der Verrippung ein Anschlag für den Blechhaltereinsatz nach zwei Millimetern Relativverschiebung in negativer z-Richtung gegeben. Damit wird eine Notlauffunktion des Niederhalters bei Versagen der Aktorik (bspw. durch schlagartigen Druckabfall in mehreren Gasdruckfedern) gewährleistet.

Das entscheidende Merkmal des Einsatzes ist jedoch seine Flexibilität. Um sie trotz einer Freiformoberfläche des Niederhalters lokal zu gewährleisten, reduzieren bereits unterschiedliche Niveaus der Stickstofffederaufstandsflächen die Höhenunterschiede in den einzelnen Blechhalterregionen. Dadurch sind die Dickenunterschiede des definiert elastischen Einsatzes minimal und es können planparallele Druckplatten mit einer Höhe von 25mm verwendet werden. Mit ca. 20mm die dünste Stelle des Niederhalterringes befindet sich direkt unterhalb der Ziehsicke und die mit ca. 40mm dickste Zone entsteht am äußeren Rand.

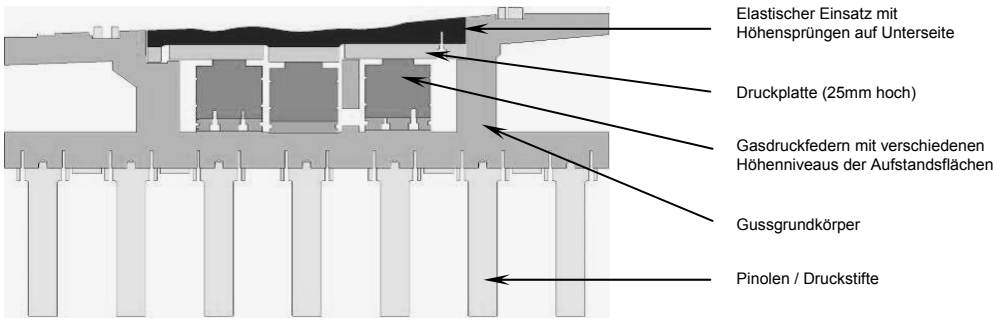

Abb. 4-51 Schnittdarstellung der Werkzeugkonstruktion, die unterschiedliche Höhenniveaus der GDF zeigt

Zuletzt sind im Rahmen der detaillieren Konstruktion des Blechhalters noch Ausfallsicherungen des Einsatzes sowie des gesamten Niederhalters in Kombination mit seinem Führungskasten vorzusehen, um bei Handlingaktivitäten das Herausfallen einzelner Werkzeugkomponenten zu verhindern. Ebenso müssen Platineneinweiser

zur Gewährleistung einer reproduzierbaren Lage des Blechzuschnittes während der Serienproduktion vorgesehen werden.

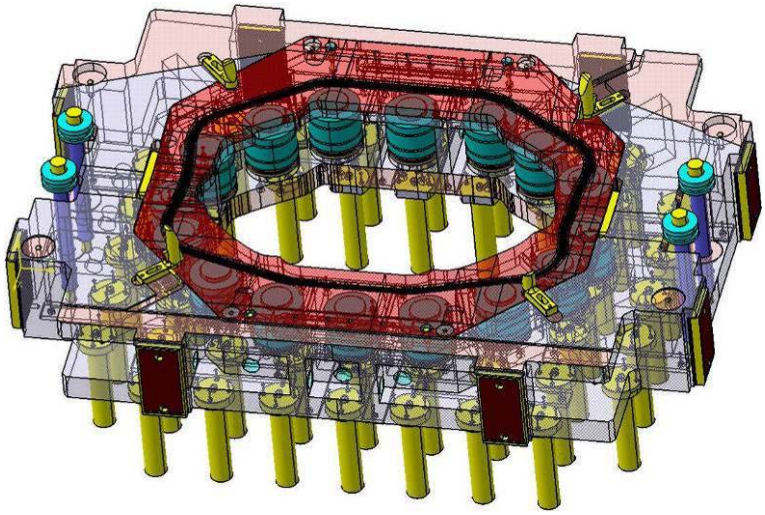

Abb. 4-52 Finale Niederhalterkonstruktion [Rit05]

4.2.6.2 Realisierung des Umformwerkzeuges

Nachdem die Konstruktion alle erforderlichen Details berücksichtig hat, erfolgt der hardwareseitige Aufbau des Werkzeuges. Für den Gussgrundkörper ist dazu zunächst ein Styropormodell zu erstellen, welches dann im Sandgießverfahren zur Herstellung des Rohgusses verloren geht. Die Wandstärken des Niederhalters betragen zur Maximierung des verfügbaren Bauraumes lediglich 30mm, weshalb als Werkstoff der Stahlguss, GS-45 (1.0446), zum Einsatz kommt.

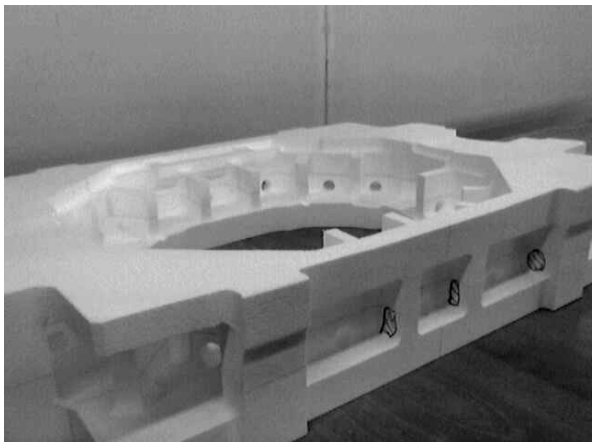

Abb. 4-53 Styropormodell / Gussmodell

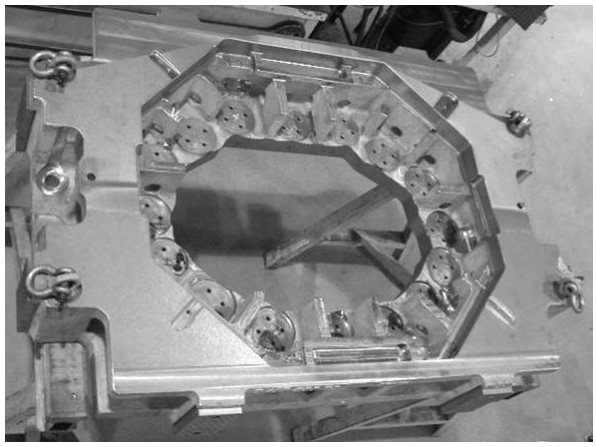

Abb. 4-54 Gussgrundkörper nach Bearbeitung der Normgeometrie

Im Anschluss an den Abguss des Grundgestells findet die mechanische Bearbeitung der Normgeometrien (Grundfläche, Führungsflächen etc.) statt. Danach ist der Einbau der Aktorik vorgesehen.

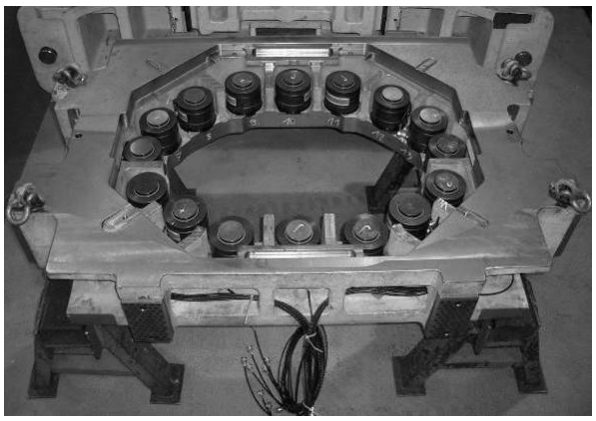

Abb. 4-55 Grundgestell mit eingebauter Aktorik

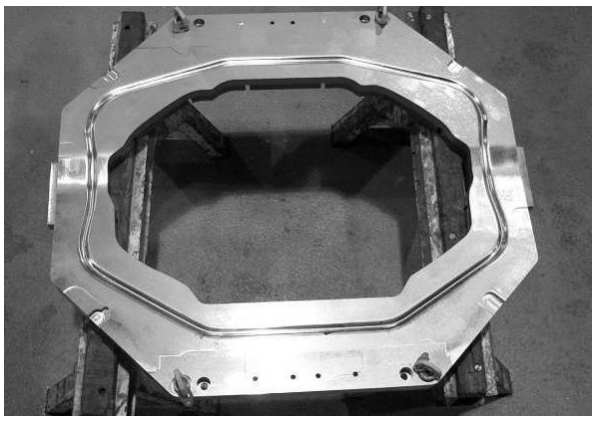

Abb. 4-56 definiert elastischer Ringeinsatz

Schließlich erfolgt durch die Abstimmung der Druckplatten die Einpassung des definiert elastischen Niederhalters und das Fertigfräsen der Freiformoberfläche des Blechhalterbereiches. In der Regel geschieht diese finale mechanische Bearbeitung im Zusammenbau des Werkzeuges mit seinem Führungskasten, um mögliche Fertigungstoleranzen zu kompensieren.

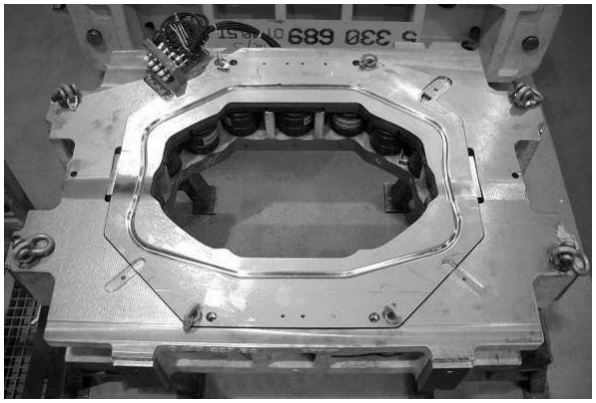

Abb. 4-57 elastischer Einsatz im Grundgestell

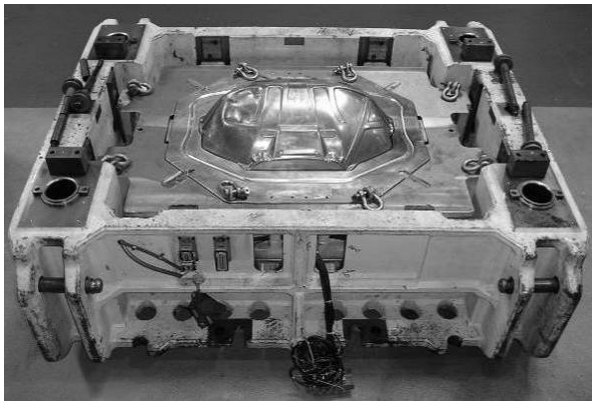

Abb. 4-58 neuer Niederhalter im Führungskasten

4.2.6.3 Kalkulation der Lebensdauer

Während der Produktion erfährt der definiert elastische Niederhaltereinsatz dieses Umformwerkzeuges mit jedem Pressenhub wiederkehrende Biegebeanspruchungen. Denn nach Einlegen der Platine fährt der Stößel zum Schließen des Werkzeuges herab und verdrängt das Ziehkissen zur Umformung des Blechbauteils. Dabei baut sich im Flanschbereich die Blechhalterkraft in Form von Flächenpressung auf. Wird sie lokal größer als der Gegendruck durch die entsprechende Gasdruckfeder, so gibt letztere leicht nach und ermöglicht die elastische Durchbiegung des Ringeinsatzes. Somit wirkt im Bereich des Platinenflansches maximal die Kraft der zugehörigen Kompaktstickstofffeder. Zum Abschluss der Werkzeugkonstruktion soll folgende Betriebsfestigkeitsanalyse den Nachweis der Dauerfestigkeit des elastischen Blechhaltereinsatzes gegenüber diesen periodischen Belastungen bringen.

Aus den Simulationen im Rahmen der Konzeptanalyse (vgl. Kapitel 4.2.4.2) geht die maximale Biegespannung von

$\sigma_{Max} = 300 \frac{N}{mm^2}$ hervor.

Die minimale Spannung ist aufgrund der reinen Schwellbeanspruchung durch den Pressenhub null. Für die Mittelspannung als auch den Spannungsausschlag ergeben sich daraus:

$$\sigma_{mittel} = \frac{\sigma_{Max} + \sigma_{Min}}{2} = \frac{300 \frac{N}{mm^2} + 0 \frac{N}{mm^2}}{2} = \underline{\underline{150 \frac{N}{mm^2}}} \quad \text{(Mittelspannung)} \qquad \textit{(Gl. 4-21)}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{Max} - \sigma_{Min}}{2} = \frac{300 \frac{N}{mm^2} - 0 \frac{N}{mm^2}}{2} = \underline{\underline{150 \frac{N}{mm^2}}} \quad \text{(Spannungsausschlag)} \qquad \textit{(Gl. 4-22)}$$

Als Werkstoff für den definiert elastischen Einsatz dient der universell verwendbare Warmarbeitsstahl 1.2343 (X38CrMoV5-1). Seine Zugfestigkeit beträgt ca. 1.200 N/mm² und die Streckgrenze beläuft sich auf ca. 900 N/mm². Empirische Näherungen der Wechselfestigkeit ergeben damit eine Dauerfestigkeitsspannung des Probenstabes gegen Wechselbeanspruchung von:

$$\sigma_{w_{Probe}} = 0{,}45 \cdot R_m = 0{,}45 \cdot 1200 \frac{N}{mm^2} = \underline{\underline{540 \frac{N}{mm^2}}} \qquad \textit{(Gl. 4-23)}$$

Zur Bestimmung der Dauerfestigkeit des betrachteten Bauteils ist die Angabe für den polierten Probenstab durch entsprechende Korrekturfaktoren aus Lehr- und Arbeitsblättern bzw. geeigneten Tabellenbüchern (bspw. [Pil97, RM05]) anzupassen:

$$\sigma_{w_{Bauteil}} = \sigma_{w_{Probe}} \cdot \frac{k_a \cdot k_b}{K_t} = 540 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{0{,}9 \cdot 0{,}85}{1{,}45} = \underline{\underline{284{,}9 \frac{N}{mm^2}}} \qquad \textit{(Gl. 4-24)}$$

Darin sind:

$k_a = 0{,}9$ Oberflächenfaktor, aufgrund geschliffener statt polierter Oberfläche,

$k_b = 0{,}85$ Größenbeiwert zur Erfassung des Einflusses der Bauteilgröße und

$K_t = 1{,}45$ Kerbfaktor zur Berücksichtigung der Spannungsspitzen an den Höhenabsätzen des definiert elastischen Einsatzes mit einem Radius von 8mm im Übergang.

Um mit diesem Dauerfestigkeitswert gegenüber wechselnder Belastung die vorhandene Sicherheit zu bestimmen, ist die Ausschlagspannung der vorliegenden Schwellbeanspruchung nach der Theorie von Goodman entsprechend zu erhöhen. Dies geschieht über die Verknüpfung mit der Mittelspannungsempfindlichkeit (m), für die in der Praxis häufig der Wert 0,3 Anwendung findet.

$$\sigma_{a_w} = \sigma_a + m \cdot \sigma_{mittel} = 150 \frac{N}{mm^2} + 0{,}3 \cdot 150 \frac{N}{mm^2} = \underline{\underline{195 \frac{N}{mm^2}}} \qquad \textit{(Gl. 4-25)}$$

Die vorhandene Sicherheit ergibt sich damit zu:

$$S_{vorh} = \frac{\sigma_{w_{Bauteil}}}{\sigma_{a_w}} = \frac{284{,}9 \frac{N}{mm^2}}{195{,}0 \frac{N}{mm^2}} = \underline{\underline{1{,}46}} \qquad \textit{(Gl. 4-26)}$$

Für Schwellbeanspruchen werden in der Literatur erforderliche Sicherheiten von eins bis zwei verlangt. Mit einer knapp 1,5-fachen Sicherheit ist also davon auszugehen, dass der definiert elastische Einsatz aufgrund seiner Abmessungen eine ausreichende Festigkeit gegenüber den wiederkehrenden Biegebeanspruchen aufweist.

Zur Abschätzung der Lastspiele bis zum Bauteilversagen kann die modifizierte Wöhlerlinienextrapolation in den Dauerfestigkeitsbereich mit einem praxisüblichen Steigungsexponenten für gekerbte Proben von k=3 herangezogen werden:

$$N_{fiktiv} = N_D \cdot \left(\frac{\sigma_{a_w}}{\sigma_{w_{Bauteil}}} \right)^{-(2 \cdot k - 1)} = 10^7 \cdot \left(\frac{195{,}0 \frac{N}{mm^2}}{284{,}9 \frac{N}{mm^2}} \right)^{-(2 \cdot 3 - 1)} = \underline{\underline{6{,}66 \cdot 10^7}} \qquad \textit{(Gl. 4-27)}$$

Bei acht Pressenhüben pro Minute, 24 Stunden pro Tag, ca. zwei Produktionstagen pro Woche und etwa 26 Einsatzwochen pro Jahr ergeben sich daraus

$n = 8 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 2 \cdot 26 = \underline{\underline{599040}}$ Zyklen pro Jahr. *(Gl. 4-28)*

Verknüpft mit der fiktiven Anzahl maximaler Lastwechsel erhält man

$$y = \frac{N_{fiktiv}}{n} = \frac{6{,}66 \cdot 10^7}{599040} = \underline{\underline{111{,}12}} \text{ Jahre} \qquad \textit{(Gl. 4-29)}$$

der voraussichtlichen, technischen Werkzeugnutzungsdauer. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer eines Umformwerkzeuges in der Automobilindustrie orientiert sich an der Produktionszeit des zugehörigen Fahrzeugmodells und beträgt in der Regel zwischen sieben und zehn Jahren. Anschließend wird das Werkzeug nur noch sporadisch zur Ersatzteilversorgung eingesetzt. Unter diesem Aspekt kann im vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass der gewählte Querschnitt des definiert elastischen Einsatzes ausreichende Dauerfestigkeit besitzt.

5 Experimentelle Analysen

Nach der Überprüfung der Betriebsfestigkeit und Fertigstellung des Werkzeugaufbaus steht ein komplettes Versuchswerkzeug mit integrierter Sensorik und Aktorik zur Verfügung. Die anschließende Durchführung experimenteller Untersuchungen dient zur Analyse der Potentiale, Möglichkeiten und Grenzen durch die Systemintegration.

5.1 Eingesetzte Umformtechnik

Im Rahmen dieser Experimente kamen zwei Try-Out-Pressen und die für das Radhaus vorgesehene Serienproduktionspresse zum Einsatz. Die etwas ältere der beiden hydraulischen Einarbeitspressen des Herstellers Müller (Baujahr: 1990) erreicht eine maximale Stößelkraft von 16.000kN und eine maximale Ziehkissenkraft von 4.000kN bei einer Tischgröße von 5 x 2,5 Metern. Aufgrund ihrer moderneren Steuerung wurde die zweite Try-Out-Anlage, ebenfalls von Müller Weingarten, jedoch aus dem Jahr 1994, häufiger benutzt. Sie bietet auch eine maximale Presskraft von 16.000kN und einen höchstmöglichen Ziehkissendruck von 4.000kN bei Tischabmessungen von 5 x 2,6 Metern.

Abb. 5-1 Try-Out-Doppelständerpresse, Baujahr: 1990

Abb. 5-2 Ty-Out-Doppelständerpresse, Baujahr: 1994

Im Gegensatz dazu ist der Einbauraum der hydraulisch angetriebenen Produktionsanlage gerade mal 2.500 x 1.730 Millimeter groß und auch das verfügbare Kraftniveau mit einer Stößelkraft von höchstens 6.500kN sowie einer Blechhalterkraft von maximal 2.500kN deutlich geringer. Anhand dieser Unterschiede wird ersichtlich,

dass die Try-Out-Pressen Universalmaschinen für alle Werkzeuggrößen darstellen und die Produktionspresse (Baujahr: 1965) lediglich Bauteile bis Pressengruppe drei abdecken kann.

Abb. 5-3 Produktionsanlage

5.2 Auswahl der Versuchswerkstoffe

Zur Analyse des Materialeinflusses kommen während der Versuche ca. 15 verschiedene Chargen des kaltgewalzten Bake-Hardening Stahls HC180B+ZE75/75 zum Einsatz. Die Dicke dieses Serienmaterials beträgt 0,7mm und wird mit einer Minustoleranz von 0,07mm, also im Bereich von 0,63 bis 0,7mm akzeptiert. Im Anlieferzustand ist auf dem elektrolytisch verzinkten Grundmaterial der Trockenschmierstoff Drylube E1 von *Zeller+Gmelin* mit einer Schichtdicke von 1,8(±0,3)g/m² appliziert.

Schwankungen der Materialparameter (Blechdicke, Festigkeitskennwerte, Anisotropie, Oberflächentopologie und Schmierzustand) innerhalb der vereinbarten Toleranzgrenzen führen bei kritischen Bauteilen regelmäßig zu Problemen während der Serienproduktion. Um die Auswirkungen dieser Streuungen zu untersuchen, wurden einige Parameter extrem verändert. So kann mit Hilfe gereinigter und getrockneter Platinen sowie stark zusätzlich beölten Blechen der Einfluss des Schmierzustandes und seiner prozessbedingten Schwankungen bestimmt werden. Die Reinigung der Materialoberfläche erfolgt mit Spiritus, um jeglichen Schmierstoff zu entfernen. Andererseits dient eine Rolle zur möglichst gleichmäßigen Applikation eines performanten, vollsynthetischen Zusatzschmierstoffes (Multidraw ALS 80 von

Zeller+Gmelin), wobei die homogene Verteilung der Schichtdicke von 3g/m² mittels eines so genannten Ölhandys (bspw. von der Firma *Fuchs*) zu kontrollieren ist.

Durch die Umformung einer höheren Werkstoffgüte, dem kaltgewalzten, feuerverzinkten Bake-Hardening Stahl HC260BD+Z100, sind die Auswirkungen von Schwankungen der Materialkennwerte des Serienwerkstoffes abschätzbar. Hierbei lassen sich Möglichkeiten zur Reaktion auf derartige Veränderungen mit Hilfe des definiert elastischen Niederhalters ermitteln.

Um Toleranzen in der Geometrie des Platinenzuschnittes und der Einlegeposition des Bleches im Werkzeug hinsichtlich ihres Einflusses auf das Umformergebnis zu analysieren, kommen verkleinerte Ausgangsbleche zum Einsatz. Zusätzlich bietet diese Untersuchung ein enormes Potential zur Kostenreduktion durch Materialeinsparung.

Schließlich sollen die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des definiert elastischen Niederhalters durch die Umformung von tailored blanks mit einem Dickensprung von 0,4mm eindrucksvoll dargestellt werden. Hierin zeigen sich die Robustheit dieses Werkzeugkonzeptes gegenüber Schwankungen der Blechdicke und sein Potential bei der Herstellung von Karosseriebauteilen mit gezielter Verteilung der Materialstärke.

5.3 Ablauf der Experimente

Nach sehr kurzer, werkzeugtechnischer Einarbeit dienen die ersten Analysen auf den Try-Out-Pressen zur Überprüfung der Messfähigkeit des Sensorsystems. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Einflussbereiches jeder einzelnen Gasdruckfeder auf den Platinenflansch sowie zugehörige Bauteilzonen. Dabei lässt sich durch Messung des Einlaufverhaltens und die beobachteten Reaktionen auf veränderte Prozessparameter (Material, Druck usw.) das Prozessfenster ausloten. All diese Untersuchungen auf den Try-Out-Anlagen tragen zur Vorbereitung der abschließenden Großserienabpressung auf der Produktionspresse bei. Mit ihr sollen die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse sowie die Möglichkeit zum Schließen eines Regelkreises analysiert werden.

5.4 Auswertung der Ergebnisse

Im aktuellen Gliederungspunkt erfolgt die Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse über die einzelnen Teilaspekte des im Rahmen dieser Arbeit analysierten Werkzeugkonzeptes. Dazu werden zunächst die Resultate der Sensorik und des definiert elastischen Niederhalters im Detail beschrieben. Anschließend sind noch Rückschlüsse bezüglich des Bauteilwerkstoffes zu treffen, bevor im folgenden Kapitel auf Möglichkeiten und Konsequenzen eines geschlossenen Regelkreises eingegangen wird.

5.4.1 Einlaufwegsensorik

5.4.1.1 Analysen zur Messfähigkeit

Noch vor der Integration der vier Blecheinzugssensoren in das Umformwerkzeug findet eine Messfähigkeitsuntersuchung mit einem Prüfstandsaufbau statt. Dazu wird unter dem Sensorkopf ein Blechstreifen des Radhauswerkstoffes auf einem elektrisch angetriebenen Schlitten hindurch gefahren. Die Verschiebung des Materialabschnittes wird mechanisch mit einem Messschieber nachgemessen. Aus dem Vergleich von Sensorwerten und manuellen Messungen ergibt sich eine mittlere Messgenauigkeit von rund ±0,1%.

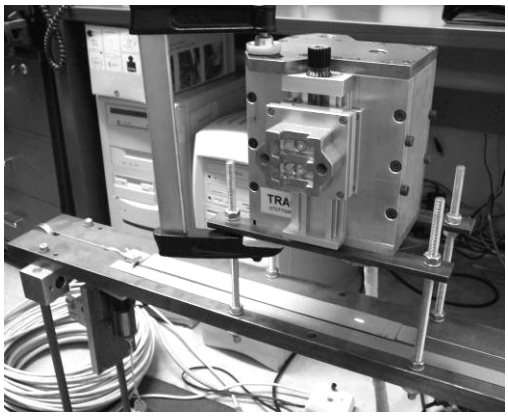

Abb. 5-4 Sensorprüfstand

Nr.	Sensorwert [mm]	Messschieber [mm]	Differenz [mm]	Senorwert / Messschieber	Differenz / Messschieber
1	240,50	240,0	0,5000	100,21%	0,208%
2	249,24	249,0	0,2436	100,10%	0,098%
3	254,87	255,0	-0,1283	99,95%	-0,050%
4	262,01	262,0	0,0073	100,00%	0,003%
5	263,62	264,0	-0,3847	99,85%	-0,146%
6	266,33	266,5	-0,1712	99,94%	-0,064%
7	240,90	241,0	-0,0980	99,96%	-0,041%
8	247,84	248,0	-0,1634	99,93%	-0,066%
9	250,55	250,5	0,0501	100,02%	0,020%
10	238,59	238,5	0,0904	100,04%	0,038%
MW	**251,44**	**251,45**	**-0,01**	**100,00%**	**± 0,073%**

Tab. 5-1 Protokoll der Prüfstandsmessungen

Im eingebauten Zustand ist eine Kontrolle der absoluten Messwerte zurzeit nicht möglich. Denn durch die Messposition zwischen Ziehsicke und Einlaufradius erfasst die Sensorik neben dem reinen Stoffffluss auch die radiale Materialdehnung [Yun05]. Aufgrund dieser unterschiedlichen Spannungszustände [Yun05] weist der Einlauf der Platinenkante, welcher sich mit Hilfe eines Tiefenmessers durch die Bestimmung der Blechlage vor und nach der Umformung ermittelt lässt, andere Wegdifferenzen auf.

Eine Gegenüberstellung der Sensorwerte mit mechanischen Messwerten des Platinenkanteneinzuges zeigt dennoch eine zufrieden stellende Übereinstimmung im Verlauf und ergibt auch eine ausreichend positive Korrelation. An den Messstellen null und zwei (vgl. Abb. 4-10) nehmen die optisch gemessenen Stoffflusswege erwartungsgemäß etwas höhere Werte als der taktil bestimmte Blechkanteneinzug an. Der Materialeinlauf an diesen beiden Positionen erfolgt annähernd senkrecht zur Kante der Ausgangsplatine, weshalb er auch mit dem Tiefenmesser sehr gut zu erfassen ist. Lediglich die Sickenabwicklung und die radiale Materialdehnung bleiben dabei unberücksichtigt.

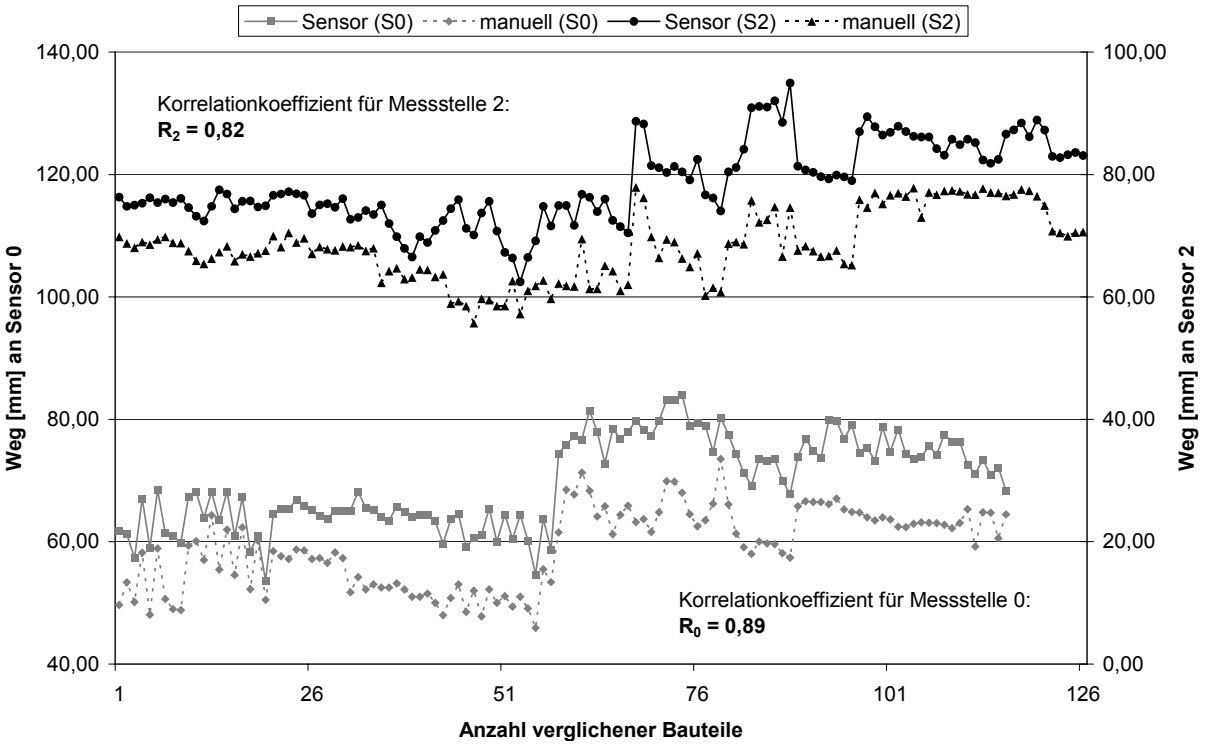

Abb. 5-5 Gegenüberstellung Messwert und mechanische Einzugsbestimmung an Sensor 0 & 2 mit Korrelationskoeffizienten

An den beiden Stirnseiten, Sensorposition eins und drei (vgl. Abb. 4-10), läuft das Blech unter einem Winkel größer 90° zur Ausgangsplatinenkante ein. Die Optik der Sensorik lässt sich darauf mit Hilfe des geregelten Servomotors (vgl. Kapitel 4.1.2) sehr komfortabel ausrichten. Doch die taktile Bestimmung der Blechkantenlage vor und nach dem Pressenhub erfolgt stets senkrecht zu einer Bezugsgeometrie des Werkzeuges. Der Bauteilrand weist nach der Umformung einen charakteristisch geschwungenen Verlauf an den Messstellen eins und drei auf, so dass der Maximalwert der senkrechten Kantenverschiebung zum Vergleich herangezogen wird. Vermutlich aufgrund der bereits angesprochenen Unterschiede im Spannungszustand an der Platinenkante und der Sensorposition zwischen Ziehstab und Einlaufradius weisen die optisch ermittelten Wege teilweise etwas geringere Werte als die taktilen Vergleichsmessungen auf. Dennoch zeigt sich auch für die Sensoren eins und drei eine gute Übereinstimmung im Verlauf und es besteht ebenfalls eine positive Korrelation.

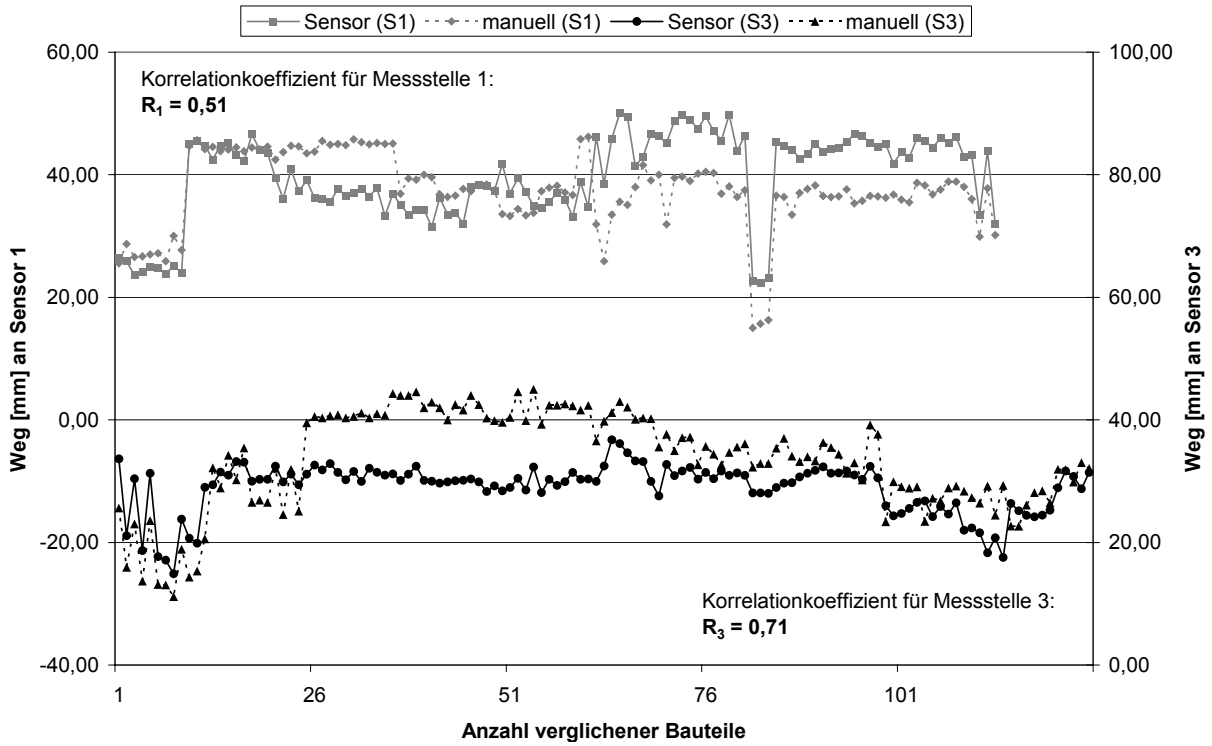

Abb. 5-6 Gegenüberstellung Messwert und mechanische Einzugsbestimmung an Sensor 1 & 3 mit Korrelationskoeffizienten

Bezüglich der Reproduzierbarkeit findet eine zehnfache Wiederholung der Blecheinzugsmessung mit ansonsten konstanten Prozessparametern (Material, Drücke usw.) statt. Die Messwerte der Sensorik liegen nah beieinander und weisen eine maximale Abweichung von 2% auf. Als Ursachen für die geringe Streuung kommen Schwankungen der übrigen Prozessparameter, bspw. des Schmierzustandes, der Einlegeposition der Platine, der Pressenkräfte oder Führungsspiel, Verkippungen und Durchbiegungen in Frage.

Obwohl zu einer präziseren Überprüfung der Messfähigkeit des Sensorsystems ein Prüfstandsaufbau zur gleichzeitigen Materialverschiebung und -dehnung (bspw. in einer Streifenziehanlage) erforderlich wäre, bestätigen die vorgestellten Ergebnisse eine ausreichend zuverlässige Erfassung des Einlaufverhaltens während der Umformung. Außerdem ist in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass auch die manuelle Messung des Blechkanteneinzuges mit Tiefenmesser fehlerbehaftet ist. Ihre Verlässlichkeit hängt von der Wiederholgenauigkeit der Anlegeposition und der Ablesegenauigkeit ab. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, die optische Messung des Materialflusses liefert zufrieden stellende Resultate und gewährleistet die relative Vergleichbarkeit der Blecheinzugswege untereinander.

5.4.1.2 Teilerkenntnisse aus Verlaufinformationen

Wie bereits bei der Beschreibung der Funktionsweise des Sensorkonzeptes (vgl. Kapitel 4.1.1) ausgeführt, stellt die aktuelle Blechgeschwindigkeit die originäre Messgröße der Sensorik dar. Erst deren Integration über der Zeit liefert den Weg des Materialeinlaufes.

Alle Analysen im Rahmen dieser Arbeit sowie die vorgestellte Möglichkeit zum Schließen eines Prozessregelkreises (vgl. Kapitel 6) konzentrieren sich jedoch lediglich auf den Endwert des Blecheinzuges nach der Umformung. Damit werden wertvolle Informationen über den Tiefziehvorgang, die sich aus dem Verlauf der Geschwindigkeit und des Einlaufweges über der Dauer eines Pressenhubes ergeben, der Einfachheit halber zunächst vernachlässigt.

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit keine detaillierte Auswertung dieser Verlaufinformationen erfolgt, deuten folgende zwei Teilaspekte das darin beinhaltete Erkenntnispotential an. Das erste Beispiel betrifft ein häufig auftretendes, charakteristisches Geräusch während des Tiefziehvorganges der Radhausschale. Seine akustischen Schwingungen weisen einen Peak bei ca. 310Hz bzw. ca. 350Hz auf. Interessanterweise lassen sich diese harmonischen Schwingungen mit ähnlicher Frequenz im Geschwindigkeitssignal der Blecheinzugssensorik ebenfalls nachweisen. Die messtechnische Auflösung dieser hochfrequenten Schwankung der Materialgeschwindigkeit stellt eine große Herausforderung dar und ist mit der eingesetzten Sensorik lediglich aufgrund der hohen Abtastrate von 10.000Hz (vgl. Kapitel 4.1.3) zu gewährleisten.

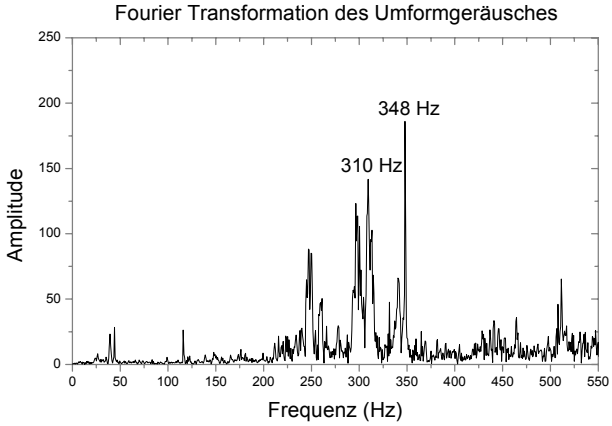

Abb. 5-7 FFT des Umformgeräusches

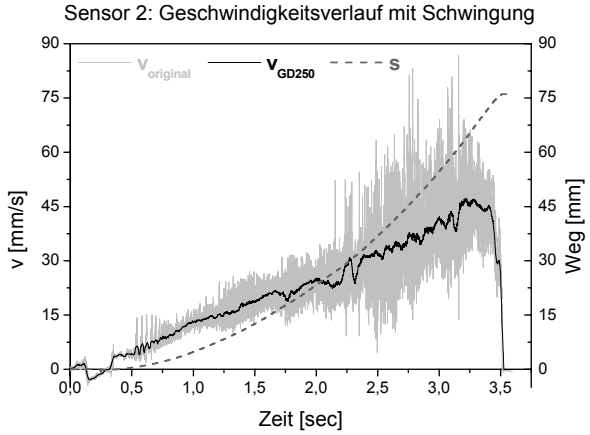

Abb. 5-8 Geschwindigkeitssignal mit harmonischer Schwingung

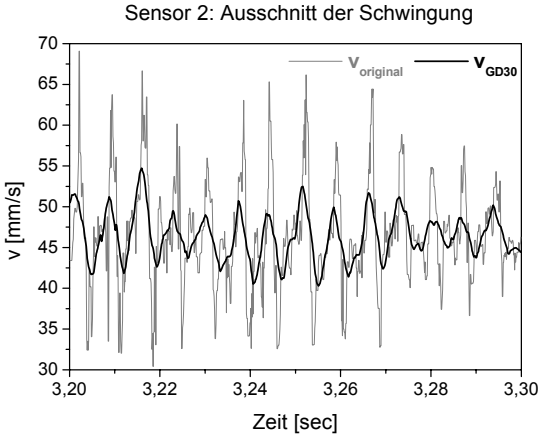

Abb. 5-9 vergrößerter Ausschnitt im Bereich von 3,2-3,3 sec

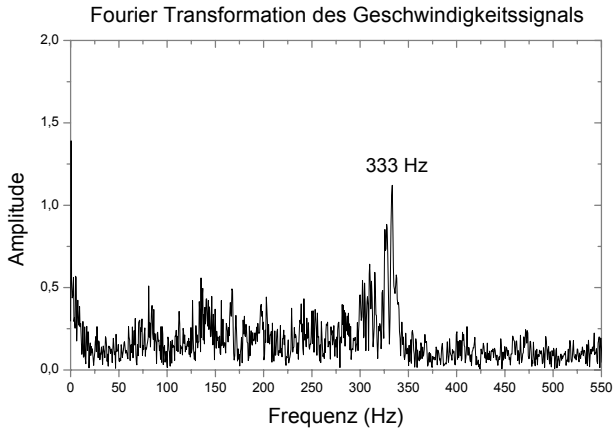

Abb. 5-10 FFT des Geschwindigkeitssignals

Eine zweite Erkenntnis ergibt sich bei gleichzeitiger Betrachtung der Geschwindigkeitsverläufe an Sensor null und zwei (vgl. Abb. 4-10). Die Signale der beiden sich gegenüberliegenden Messpositionen schwingen teilweise gegenphasig. Daraus ist zu schlussfolgern, dass der Materialeinzug mal stärker von der einen und anschließend wieder stärker von der anderen Seite erfolgt. Die beiden Längsseiten beeinflussen sich also in einem gewissen Maß gegenseitig.

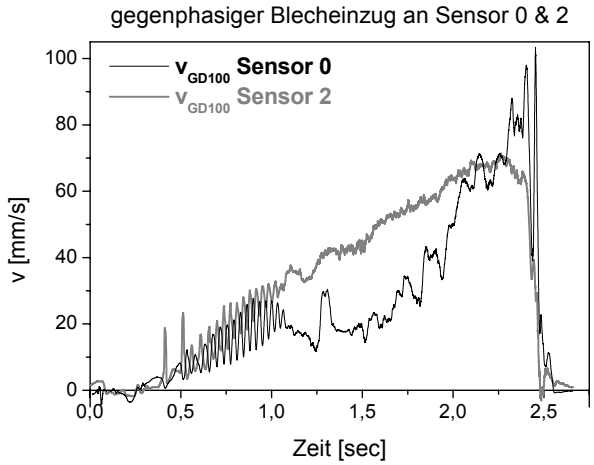

Abb. 5-11 Gegenphasiger Blecheinzug an Sensor 0 & 2

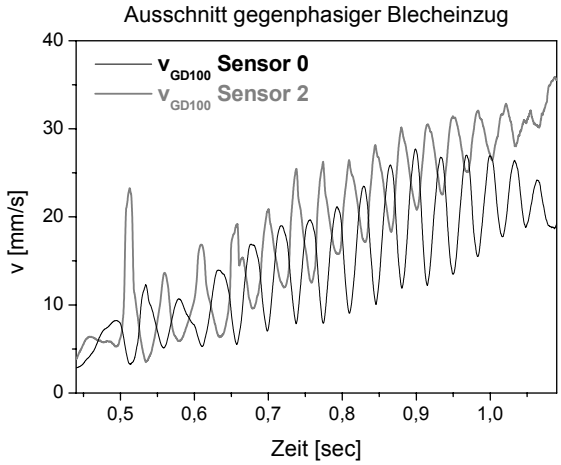

Abb. 5-12 vergrößerter Ausschnitt im Bereich von 0,4-1,1 sec

Bislang ungeklärt ist die Auswirkung des Vorhandenseins bzw. Nichtvorhandenseins der Schwingungen im Geschwindigkeitsverlauf sowie des akustischen Geräusches während des Tiefziehens auf das Ergebnis des Umformvorganges und die erzeugte Bauteilqualität. Sowohl mit als auch ohne „Kreischen“ des Bleches sind bei den experimentellen Analysen Gut- sowie Schlechtteile entstanden.

5.4.1.3 Fazit

Die positiven Ergebnisse der Messfähigkeitsuntersuchung sowie die interessanten Erkenntnisse erster Analysen der Verlaufinformationen bestätigen die Erwartungen an das Sensorkonzept und gewährleisten eine zuverlässige Erfassung des Einlaufverhaltens. Des Weiteren unterstreicht die problemlose Messung von ca. 5.000 Umformvorgängen die Robustheit der präsentierten Sensorik. Mit ihr liegt ein Messinstrument zur Bestimmung der Wegabweichungen bei veränderten

Prozessparametern (Material, Druck usw.) vor. Deren Analyse bringt die Erkenntnis über Soll-Intervalle der vier Einlaufwege in denen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ein i.O.-Bauteil entsteht. Damit bildet die Stoffflussmessung die Grundlage für einen geschlossenen Regelkreis (vgl. Kapitel 6).

5.4.2 Niederhalter mit definiert elastischem Einsatz

Bevor in diesem Abschnitt auf die Resultate hinsichtlich der Einflussmöglichkeiten durch die Aktorik, die Ermittlung der Verfahrensgrenzen und zusätzliche Vorteilspotentiale des vorgestellten elastischen Blechhalterkonzeptes eingegangen wird, erfolgt zunächst die Beschreibung seiner Einarbeitsphase. Sie unterscheidet sich im Aufwand und Zeitbedarf grundlegend von der konventioneller, „starrer“ Ziehwerkzeuge.

5.4.2.1 Inbetriebnahme

Nach dem Schlichten der Niederhaltergeometrie, als finale mechanische Oberflächenbearbeitung mit der Fräsmaschine, erfolgt in der Regel eine manuelle Politur der Aktivfläche des Blechhalters zur Glättung der Fräsriefen. Anschließend kann mit dem zusammengesetzten Ziehwerkzeug ein erster Probehub durchgeführt werden. Zum Test, ob der Arbeitsgang des Tuschierens eventuell vollständig entfallen kann, erhält dazu jede Gasdruckfeder den Innendruck, der mit den entsprechenden Segmentkräften aus der Umformsimulation korrespondiert (vgl. Kapitel 4.2.1.2). Erwartungsgemäß führen jedoch die Toleranzen beim Auf- und Umspannen während der Fräsbearbeitung sowie die Elastizitäten von Maschine und Werkzeug zu einem inhomogenen Tragbild, mit dem im Gegensatz zu eintuschierten Aktivflächen kein Gutteil entsteht (vgl. Kapitel 2.2.2).

Aus diesem Grund sind die 16 Stickstofffedern im nächsten Schritt mit gleichhohem Druck von jeweils ca. 100bar zu befüllen, um mit diesem „starren“ Werkzeug ein Tuschierbild zu erzeugen. Dieser Farbabdruck hilft dem Werkzeugmacher, die kleinen Druckstellen an denen sich Niederhalter und Matrize im Bereich des Platinenflansches berühren und über die der Großteil der Blechhalterkraft geleitet wird, sichtbar zu machen. Beim vorliegenden definiert elastischen Niederhaltereinsatz reicht es aus, die Hotspots zu entfernen und im Anschluss eine Druckverteilung durch die Einstellung der Gasdruckfedern vorzunehmen. Innerhalb von etwa 30Min. lassen sich die daumengroßen Druckstellen einebnen und eine großflächigere Anlage von Niederhalter und Matrize erzielen. Hätte der definiert elastische Ringeinsatz wie gewöhnlich flächig tuschiert werden müssen, wäre dafür deutlich mehr Zeit nötig gewesen.

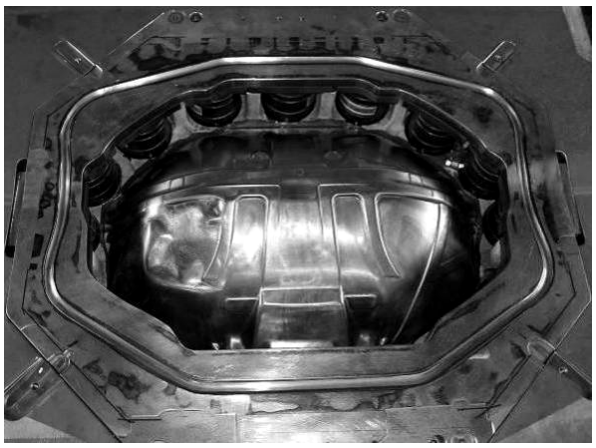

Abb. 5-13 Tuschierbild

Abb. 5-14 Werkzeugmacher, der Druckstelle einebnet

Durch die Entfernung der Druckstellen (Hotspots) entstehen großflächigere Kontaktzonen, die sich mit den 16 Kompaktgasdruckfedern beeinflussen lassen. Jedoch führt die Startkonfiguration der Druckeinstellung, welche aus der Tiefziehsimulation abgeleitet wird, nicht zwangsläufig zu einem Gutteil. Stattdessen sind anhand des Umformergebnisses weitere Druckanpassungen in den Stickstofffedern erforderlich, um Bereiche mit Faltenbildung stärker zu halten und Stellen mit Rissentstehung durch lokale Niederhalterkraftreduktion zu entlasten. Iterativ wird auf diese Weise, binnen weniger Pressenhübe (ca. fünf) eine Gasdruckfederkonfiguration erzeugt, bei der ein falten- und rissfreies Ziehteil entsteht.

Abb. 5-15 erstes falten- und rissfreies Bauteil

Allerdings weicht die Druckeinstellung in den Stickstofffedern nun von den idealen Simulationswerten ab und weist auch keine Symmetrie mehr auf. Dafür kompensiert sie das Pressenspiel sowie die Unterschiede aus den Frästoleranzen und den übrigen Einflussfaktoren auf die Flächenpressungsverteilung im Bereich des Platinenflansches.

5.4.2.2 Beeinflussungszonen der Aktuatoren

Analog der Blechhaltersegmentierung aus der Umformsimulation soll jede Stickstofffeder die Flächenpressung einer örtlich begrenzten Region verändern und ihre beiden Nachbarn dabei möglichst nicht beeinflussen. Um diese Vorgabe aus der

Niederhalterkonzeption zu überprüfen, ist der jeweilige Einflussbereich der Gasdruckfedern experimentell zu analysieren.

Dazu werden extreme Druckunterschiede in einzelnen Aktoren hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Einlaufverhalten und den verbleibenden Flanschrand untersucht. Exemplarisch für die gewonnen Erkenntnisse zeigen folgende Abbildungen zwei übereinander liegende Ziehteile, wobei das obere Bauteil aufgrund geringen Stickstoffdruckes in den vier Eckfedern (4, 8, 12 und 16) einen deutlich kürzeren Flanschrand als das darunter liegende Bauteil mit entsprechend hohem Druck in diesen vier Eckfedern aufweist.

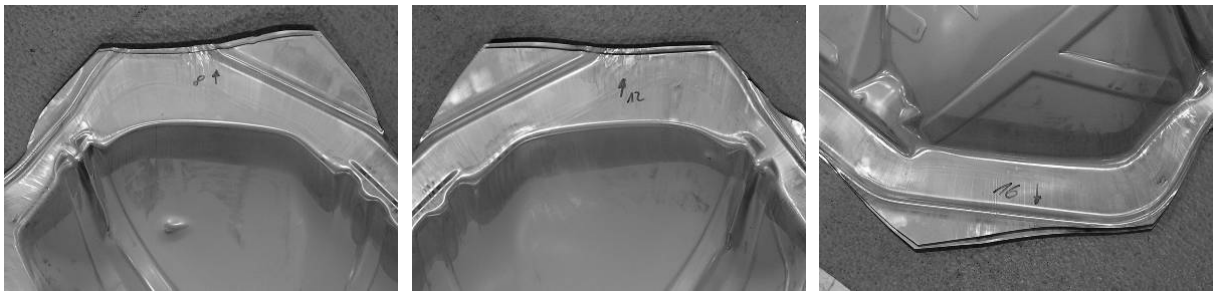

Abb. 5-16 unterschiedlich lange Flanschränder aufgrund von Druckunterschieden in den Eckfedern (Nr.: 8, 12, 16)

Niedriger Stickstoffdruck führt zu einer kleinen Flächenpressung und lässt das Material während der Umformung weiter einlaufen, woraus letztendlich ein kürzerer Flanschrand als bei hohem Federdruck resultiert. Interessant an diesem Ergebnis ist die Tatsache, dass der Unterschied in der Länge des Bauteilflansches auf eine vergleichsweise kleine Region in der Nähe der variierten Gasdruckfeder beschränkt ist. Im Übergang zu den Bereichen der benachbarten Kompaktgasdruckfedern gleichen sich die Verläufe der Blechkante beider Bauteile wieder an.

Um den Nachweis des lokal begrenzten Wirkungsbereiches einer Gasdruckfeder messtechnisch zu untermauern, kommt in einer zweiten Untersuchung die digitale Druckmessfolie von Tekscan zum Einsatz. (Für eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise dieser Sensorfolie sei auf die Arbeit von Hohnhaus [Hoh99] verwiesen.) Die Messung muss am bereits fertigen Ziehteil erfolgen, da der radiale Materialfluss während der Umformung das zwischen Blech und Niederhalter eingelegte Messhandle[4] zerstören würde. Des Weiteren ist die Dicke der Sensorfolie von 0,1mm für eine korrekte Messung über dem gesamten Flanschbereich auszugleichen. Dazu eignet sich am besten die statische Fuji-Druckmessfolie. (Auch deren Funktionsbeschreibung findet sich in der Dissertation von Hohnhaus [Hoh99] bzw. in den Ausführungen von Elend [Ele01].) Wird mit eingelegtem Ziehteil und angeschlossenem Messhandle[4] ein Pressenhub durchgeführt, zeichnet der Computer den Zustand der Flächenpressung auf der Sensorfolie auf. Somit lässt sich die Auswirkung einer Druckänderung in der betrachteten Gasdruckfeder durch zwei Pressenhübe,

[4] Eigenname Fa. Tekscan

zunächst mit niedrigem und anschließend mit hohem Stickstoffdruck ermitteln. Folgende Abbildungen zeigen die Druckverteilung über Gasdruckfeder zehn in der Mitte der hinteren, langen Geradenseite, direkt unter Sensor zwei (vgl. Abb. 4-10).

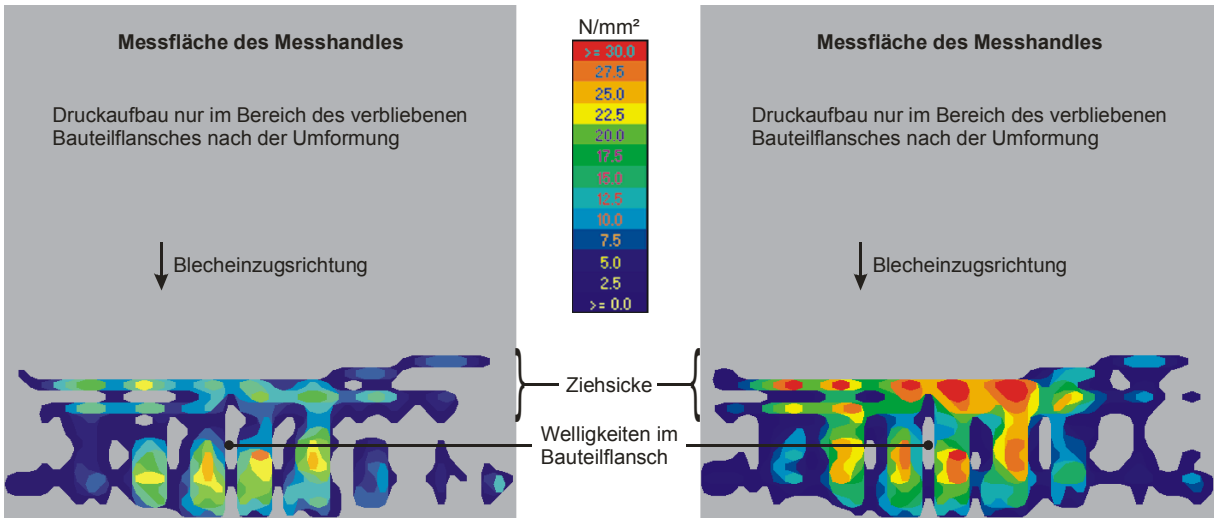

Abb. 5-17 Flächenpressung über GDF 10 mit 60bar Innendruck

Abb. 5-18 Flächenpressung über GDF 10 mit 110bar Innendruck

Darauf ist der örtlich limitierte Einflussbereich der Gasdruckfeder gut zu erkennen. Denn bereits am linken und rechten Rand des Folienmessbereiches herrscht lediglich geringe Flächenpressung vor. Von einer Beeinflussung der Nachbarregionen ist demnach nicht auszugehen. Um das Zentrum verteilt sich der Druck annähernd homogen und zeigt einen deutlichen Niveauunterschied für die verschiedenen Stickstofffederdrücke. Die geradlinigen Regionen ohne messbare Flächenpressung in der Mitte der Sensorfolie werden von marginalen Welligkeiten im Bauteilflansch verursacht. Sie kommen durch tangentiale Druckspannungen während der Umformung zu Stande und „waschen“ sich über den Produktionszeitraum in den Aktivflächen des Werkzeuges ein, so auch in die verwendete Bestandsmatrize. Ein Qualitätsproblem stellen sie nicht dar, denn sie werden mit dem Bauteilbeschnitt entfernt.

5.4.2.3 Bestimmung des Prozessfensters

Nach Bestätigung der präzisen Erfassung des Einlaufverhaltens durch die eingesetzte Sensorik und der gezielten Beeinflussbarkeit lokal begrenzter Bauteilzonen durch die implementierte Aktorik lassen sich die Prozessgrenzen mit Hilfe unterschiedlicher Einstellungskonfigurationen der Kompaktgasdruckfedern ermitteln. Aus der Vielzahl der im Rahmen der experimentellen Analysen durchgeführten Pressenhübe ergibt sich bezüglich des Einlaufweges und dem Verlauf der Blecheinzugsgeschwindigkeit über der Dauer des Umformvorganges ein Gutteilfenster. Die obere Begrenzung stellt das Bauteilversagen aufgrund von Falten dar, wogegen die untere Grenze die Entstehung von Einschnürungen und Rissen charakterisiert.

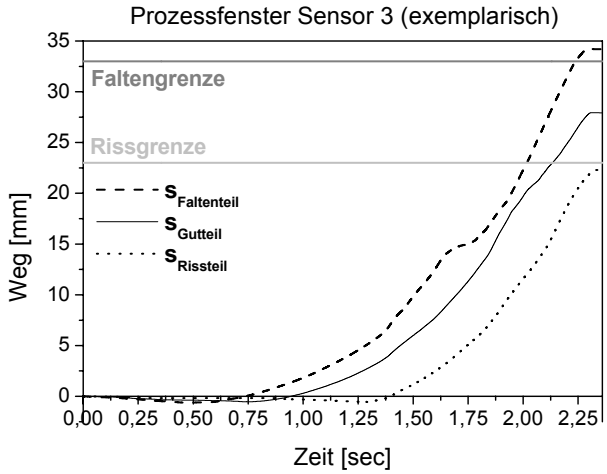

Abb. 5-19 Einlaufwegkurven für Falten- , i.O. und Rissbauteil (Prozessfenster exemplarisch an Messstelle 3)

INTERVALLGRENZEN		Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
experimentell ermittelt	obere Grenze (faltig)	85,0 mm	50,0 mm	89,0 mm	33,0 mm
	untere Grenze (gerissen)	75,0 mm	40,0 mm	79,0 mm	23,0 mm
Umform-simulation	faltig	85,3 mm	50,6 mm	84,2 mm	42,2 mm
	i.O.	79,0 mm	46,4 mm	75,4 mm	38,0 mm
	gerissen	76,8 mm	39,5 mm	72,1 mm	33,7 mm

Tab. 5-2 Intervallgrenzen der Einlaufwege von den 4 Sensoren, Gegenüberstellung zu Werten aus der Simulation (Pam Stamp®)

Neben der experimentellen Ermittlung der Verfahrensgrenzen besteht auch die Möglichkeit, im Rahmen der Umformsimulation Anhaltswerte bezüglich des Materialeinlaufes für Gutteile sowie Falten- bzw. Rissbildung zu erhalten. Wie Tab. 5-2 bestätigt, stimmen die Werte hinreichend genau überein.

Ziel jeder Abpressung ist die Einhaltung des jeweiligen Gutteil-Intervalls der Einlaufwege aller vier Messpositionen, um falten- und rissfreie Ziehteile herzustellen. Die aufgrund schwankender Einflussgrößen mögliche Über- bzw. Unterschreitung der Intervallgrenzen sollte durch adäquate Reaktionsmaßnahmen vermieden werden, wobei der gemessene Einlaufweg als Prozessführungsgröße dient (vgl. Kapitel 6).

5.4.2.4 Weitere Potentialfelder des definiert elastischen Niederhalters

Konventionelle, „starre“ Umformwerkzeuge bieten in der Regel kaum Möglichkeiten maschinenseitige Unterschiede im Führungsspiel bzw. der Pressensteifigkeit auszugleichen. Aus diesem Grund besteht nach erfolgreicher Werkzeugeinarbeit auf der Try-Out-Presse und dem Transfer in die Produktionspresse häufig die Notwendigkeit des Umtuschierens (vgl. Kapitel 2.2.2).

Ein erwarteter Vorteil elastischer Werkzeugkonzepte ist deren Anpassungsfähigkeit bei bspw. veränderten Verkippungen bzw. Durchbiegungen einzelner Pressenkom-

ponenten. Das beschriebene Umformwerkzeug mit definiert elastischem Niederhaltereinsatz bestätigt sein Potential beim Ausgleich von Pressenunterschieden durch die problemlose Einsetzbarkeit auf den drei vorgestellten Umformmaschinen (vgl. Kapitel 5.1) im Rahmen der experimentellen Analysen. Innerhalb weniger Pressenhübe (ca. fünf) gelingt ohne zusätzliches Tuschieren der Blechhalterfläche die manuelle Anpassung der Gasdruckfederkonfiguration zur Herstellung von Gutteilen. Bei der Inbetriebnahme neuer Ziehwerkzeuge entsteht so ein drastisches Kosten- und Zeiteinsparungspotential durch die enorme Reduktion von Qualitätsschleifen (vgl. Kapitel 2.2.2).

Eine zweite Möglichkeit zur Kostensenkung, in dem Fall durch Materialeinsparung, ergibt sich aus den Ergebnissen von Umformexperimenten mit verkleinerten Platinenzuschnitten. Dabei sind an allen Kanten der achteckigen Serienplatine 10mm breite Streifen abgeschnitten worden. Der auf diese Weise reduzierte Flanschbereich der Blechplatine erfordert aufgrund der geringeren Blechhalterfläche Erhöhungen der Stickstoffdrücke sowie des Ziehkissendruckes und eine geeignete Anpassung der Druckverteilung.

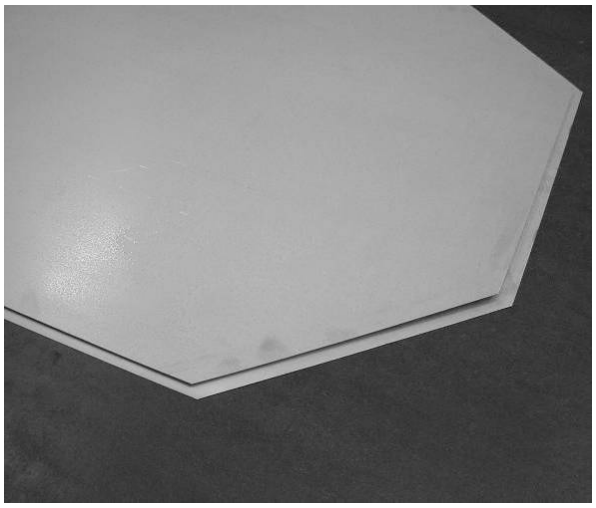

Abb. 5-20 verkleinerte Platine

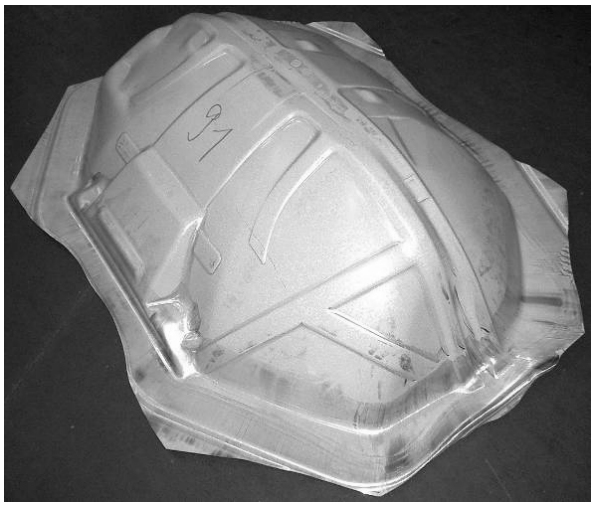

Abb. 5-21 i.O.-Bauteil aus reduziertem Blechzuschnitt

Aufgrund der Anpassungsfähigkeit des definiert elastischen Ringeinsatzes und unter Berücksichtigung der ermittelten Verfahrensgrenzen ergeben sich nach wenigen Pressenhüben die Drücke der zu den vier Sensorpositionen zugeordneten Stickstofffedern, mit denen ein falten- und rissfreies Bauteil herstellbar ist. Neben der Kostenreduktion durch minimierte Platinengeometrien verdeutlicht das Untersuchungsergebnis die sehr guten Reaktionsmöglichkeiten des definiert elastischen Niederhalterkonzeptes auf Lage- und Zuschnitttoleranzen der Ausgangsbleche, die bislang den Produktionsprozess negativ beeinflussen.

Analog zu den Blechen mit gekürzten Abmessungen erfordern auch Platinen mit einer höheren Werkstoffgüte aufgrund der größeren Steckgrenze sowie Bruchfestigkeit im Vergleich zum Serienmaterial etwas höhere Niederhalterkräfte und eine entsprechende Umverteilung der Flächenpressung im Flanschbereich. Im Gegensatz zu

konventionellen, „starren“ Umformwerkzeugen gelingt mit dem definiert elastischen Einsatz ohne Tuschierarbeiten an den Aktivflächen des Werkzeuges die notwendige Anpassung der Einstellungskonfiguration. Innerhalb von vier bis fünf Pressenhüben findet unter Beachtung der Prozessfenstergrenzen die erfolgreiche Modifikation der entsprechenden Stickstofffederdrücke für den höherfesten, kaltgewalzten, feuerverzinkten Bake-Hardening Stahl HC260BD+Z100/100 statt.

Abb. 5-22 i.O.-Bauteil aus HC260BD+Z100

Kennwert	HC260BD +Z100 Soll	HC260BD +Z100 Ist	HC180BD +ZE75/75 Serienmat.
R_e	260 - 300 N/mm²	279 N/mm²	180 - 230 N/mm²
R_m	370 - 450 N/mm²	387 N/mm²	280 - 360 N/mm²
A_{80}	≥ 28%	31,9%	≥ 32%
r_{90}	-	2,1	≥ 1,6
n_{90}	-	0,17	≥ 0,17
s	0,63 - 0,71 mm	0,69 mm	0,7 mm

Tab. 5-3 Werkstoffkennwerte des HC260BD+Z100 im Vergleich zum Serienmaterial HC180B+ZE75/75

Eine endgültige Beurteilung der Bauteilqualität ist am Ziehteil nicht durchführbar. Dazu fehlen entsprechende Kriterien- und Merkmalsdefinitionen. Stattdessen erfolgt die Klassifikation in Ausschuss- und Gutteil nach Durchlauf aller Folgeoperationen (Schneiden, Lochen, Abkanten, Nachformen bzw. Kalibrieren) am fertigen Karosseriebauteil. Aus diesem Grund werden falten- und rissfreie Ziehteile aus den verkleinerten Platinen, dem Werkstoff HC260BD+Z100 sowie dem Serienmaterial, welche mit dem Versuchswerkzeug umgeformt wurden, mit den Folgewerkzeugen fertig gestellt und einer Qualitätsüberprüfung unterzogen. Folgende Darstellung bestätigt die Einhaltung des konstruktiven Mindestmaßes mit einer maximalen Abstreckung zwischen 20% und 30% für alle Bauteile aus dem Versuchswerkzeug. Zumeist wird sogar der Idealwert zur Prozessbeherrschung mit einer Ausdünnung kleiner 20% bezogen auf die Ausgangsblechdicke erreicht.

Abstreckung	Restblechdicke Minimum		Maximum	
verkleinerte Platine	0,53 mm	(24%)	0,63 mm	(10%)
HC260BD +Z100	0,54 mm	(23%)	0,64 mm	(9%)
Serienmaterial	0,56 mm	(20%)	0,63 mm	(10%)
Basis = Zeichnungsmaß:				0,70 mm
1. Ziel = 20% zur Prozessbeherrschung:				0,56 mm
2. Ziel = 30% konstr. Mindestmaß:				0,49 mm

Abb. 5-23 Abstreckungsprotokoll für Versuchsbauteile

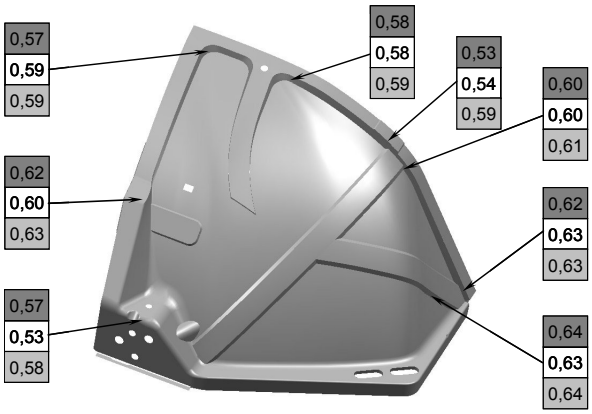

Abb. 5-24 Messpunkte der Restblechdicke am Fertigteil

Des Weiteren ist jeweils die Maßhaltigkeit der vier fertigen Radhausschalen mit einer Vielzahl von Messpunkten zu kontrollieren. Auch diesbezüglich liegen die analysierten Versuchsbauteile innerhalb der vereinbarten Toleranzgrenzen der Serienproduktion, so dass bei der Umformung mit dem definiert elastischen Niederhalter von der Herstellung qualitativ hochwertiger Karosserieteile ausgegangen werden kann.

Ein letztes, sehr interessantes Potentialfeld des definiert elastischen Niederhalters stellt die Umformung von tailored blanks dar. Analog zu segmentierten Werkzeugen (vgl. Kapitel 2.3.2) bietet er die Möglichkeit, Blechdickenunterschiede auszugleichen und stellt damit seine Anpassungsfähigkeit und Flexibilität eindrucksvoll unter Beweis. Im konkreten Fall kommen lasergeschweißte Platinen aus 1mm dickem H220YD+Z100 Stahl und 0,6mm dünnem DX54D+Z100 Tiefziehstahl zum Einsatz.

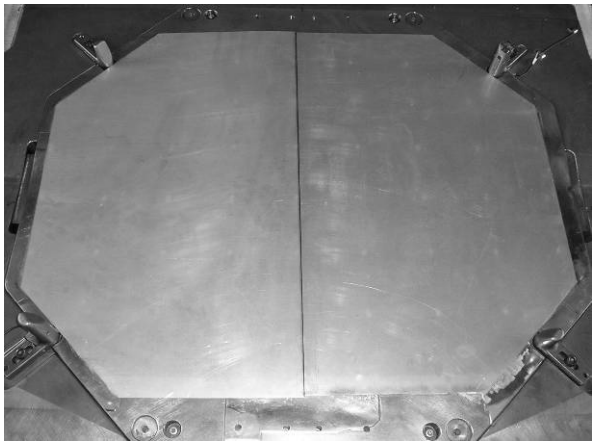

Abb. 5-25 lasergeschweißte tailored blank Platine

Kennwert	DX54D +Z100 links	HC220YD +Z100 rechts	HC180BD +ZE75/75 Serienmat.
R_e	140 - 200 N/mm²	220 - 270 N/mm²	180 - 230 N/mm²
R_m	270 - 350 N/mm²	340 - 420 N/mm²	280 - 360 N/mm²
A_{80}	≥ 38%	≥ 33%	≥ 32%
r_{90}	≥ 1,8	≥ 1,6	≥ 1,6
n_{90}	≥ 0,19	≥ 0.18	≥ 0,17
s	**0,6 mm**	**1,0 mm**	**0,7 mm**

Tab. 5-4 Werkstoffkennwerte der Laserplatine

Bei der Umformung des tailored blank mit der Gasdruckfederkonfiguration für ein Gutteil aus dem Serienwerkstoff läuft die dünnere Hälfte der Platine so weit ein, dass es zu Materialdopplungen kommt. In diesem Fall sollte das vollständige Zusammenfahren des Werkzeuges bis zum unteren Totpunkt (UT) durch Einlegen von Distanzstücken verhindert werden, um Beschädigungen an Matrize oder Stempel zu vermeiden.

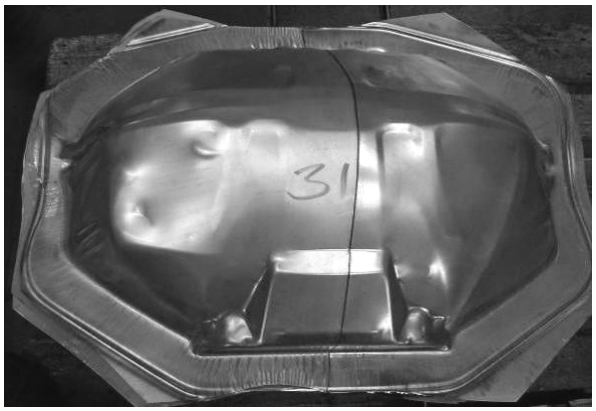

Abb. 5-26 tailored blank Bauteil mit starker Faltenbildung und Materialüberlappung

Abb. 5-27 Detail

Eine Erhöhung der Gasdrücke auf der dünnen Seite des tailored blank reduziert den zu großen Blecheinzug durch die Verstärkung der Rückhaltekräfte. Bei gleichzeitiger

Senkung der Stickstofffederkräfte auf der dicken Seite wird das Einlaufen der höheren Materialstärke begünstigt. Nach Überprüfung der Faltenfreiheit ist anschließend auch ein Durchfahren bis zum unteren Totpunkt (UT) möglich.

Abb. 5-28 tailored blank Bauteil ohne Falten, kurz vor UT

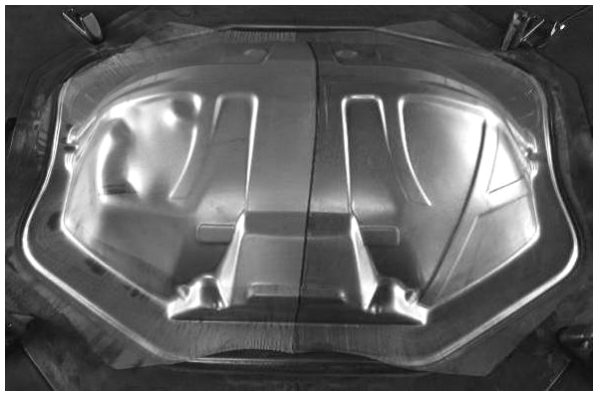

Abb. 5-29 falten- und rissfreies tailored blank Bauteil, vollständig ausgeprägt

Obwohl der Einsatz von Blechen mit einem Dickensprung und zwei unterschiedlichen Werkstoffgüten für die Radhausschale nicht in Frage kommt, bestätigt das Versuchsresultat die Vorteilhaftigkeit elastischer Werkzeugkonzepte bei der Umformung von tailored blanks. Ohne den Blechdickenunterschied von 0,4mm langwierig in das Tiefziehwerkzeug einzuarbeiten, gelingt es, nach vier bis fünf Anpassungshüben ein falten- und rissfreies Ziehteil herzustellen. Direkt an der Schweißnaht entsteht allerdings auf Seiten der geringeren Materialstärke eine kleine Übergangszone, in der sich der definiert elastische Niederhaltereinsatz nur langsam an das dünnere Blech anschmiegt. Demzufolge kann eine leichte Faltenbildung in diesem Bereich nicht vollständig vermieden werden. Die bessere Alternative stellen in diesem Zusammenhang tailored rolled blanks dar. Das kontinuierlich dünner gewalzte Blech weist im Gegensatz zu den tailored welded blanks keinen sprungartigen Wechsel der Materialstärke auf.

5.4.3 Aspekte des Bauteilwerkstoffes

Bezüglich des Ausgangsmaterials bringen die Untersuchung von gereinigten, trockenen Platinen und der Vergleich zu zusätzlich beölten Blechen eine unerwartete Erkenntnis. Obwohl die Werkstückoberfläche mit Spiritus gesäubert und jeglicher Schmierstoff entfernt wurde (Kontrolle mittels Ölhandy), zeigen die unbeölten Bleche kein anderes Einlaufverhalten und lassen sich mit der gleichen Gasdruckfederkonfiguration für ein Gutteil aus dem Serienwerkstoff zu einem falten- und rissfreien Ziehteil umformen. Erwartungsgemäß hätten die höheren Reibkräfte im Flanschbereich eine stärkere Behinderung des Materialeinzuges hervorrufen und eine Drucksenkung erforderlich machen müssen. Vermutlich reicht jedoch der Restschmierstoff vorausgegangener Platinen auf der Werkzeugoberfläche aus, um während der Umformung der zehn präparierten Bleche keine deutlichen Effekte hervorzurufen.

Auch die mit dem hochviskosen, vollsynthetischen Schmierstoff, Multidraw ALS 80 von *Zeller+Gmelin* und einer Schichtdicke von 3g/m² zusätzlich beölten Platinen, weisen keine signifikanten Unterschiede im Blecheinzug auf. Sie lassen sich ebenfalls ohne Druckveränderungen mit der Konfiguration für ein Gutteil aus dem Serienmaterial tiefziehen. Theoretisch reduzieren ein qualitativ hochwertiges Ziehöl und eine höhere Schichtdicke die Reibung während der Blechumformung, wodurch das Material weiter einlaufen kann. Demnach hätten Druckerhöhungen in den Gasdruckfedern zur Herstellung eines faltenfreien Ziehteils notwendig werden müssen. Doch vermutlich reicht der Unterschied zwischen 1,8(±0,3)g/m² des Trockenschmierstoffes Drylube E1 von *Zeller+Gmelin* auf dem Serienmaterial zu einer Schichtdicke von 3g/m² des Ziehöls Multidraw ALS 80 auf den zehn präparierten Platinen nicht aus, um deutliche Veränderungen im Einlaufverhalten hervorzurufen.

Insgesamt ist daraus zu schlussfolgern, dass für die Produktion der Radhausschale gewisse Schwankungen im Schmierzustand des Ausgangsmaterials lediglich einen untergeordneten Einfluss auf das Umformergebnis haben. Dennoch ist davon auszugehen, dass für eine prozesssichere Herstellung dieses Bauteils eine Grundbeölung unerlässlich ist.

Weitaus größeren Einfluss auf das Resultat der Umformung hat im Fall der betrachteten Radhausschale die senkrechte Anisotropie (r) des umzuformenden Ausgangsmaterials. Sie gibt das Verhältnis der Umformgrade in Breiten- und Blechdickenrichtung an und charakterisiert somit die Tiefzieheignung eines Werkstoffes. Höhere r-Werte (r>1) bedeuten, dass die Umformung zu Lasten der Blechbreite und nicht der Blechdicke erfolgt. Des Weiteren haben höhere Werte der senkrechten Anisotropie eine Senkung der erforderlichen Ziehkraft bei gleichzeitigem Anstieg der maximal übertragbaren Ziehkraft zur Folge [Lan90].

Im Rahmen der experimentellen Analysen hat sich gezeigt, dass für eine prozesssichere Produktion der Radhausschale die Werkstoffchargen mit r-Werten größer zwei am besten geeignet sind. Fällt der Wert unter zwei auf eine Größenordnung von 1,8 kommt es häufiger zu Einschnürungen, Dünnzügen und Rissen, die durch erneute Feinabstimmung der Gasdruckfederkonfiguration zu vermeiden sind.

Diese Erkenntnis bestätigt auch das Ergebnis einer simulativen Sensitivitätsanalyse, bei der die senkrechte Anisotropie den größten Einfluss auf die Ausdünnung bzw. Abstreckung in weiten Teilen des Ziehteils hat.

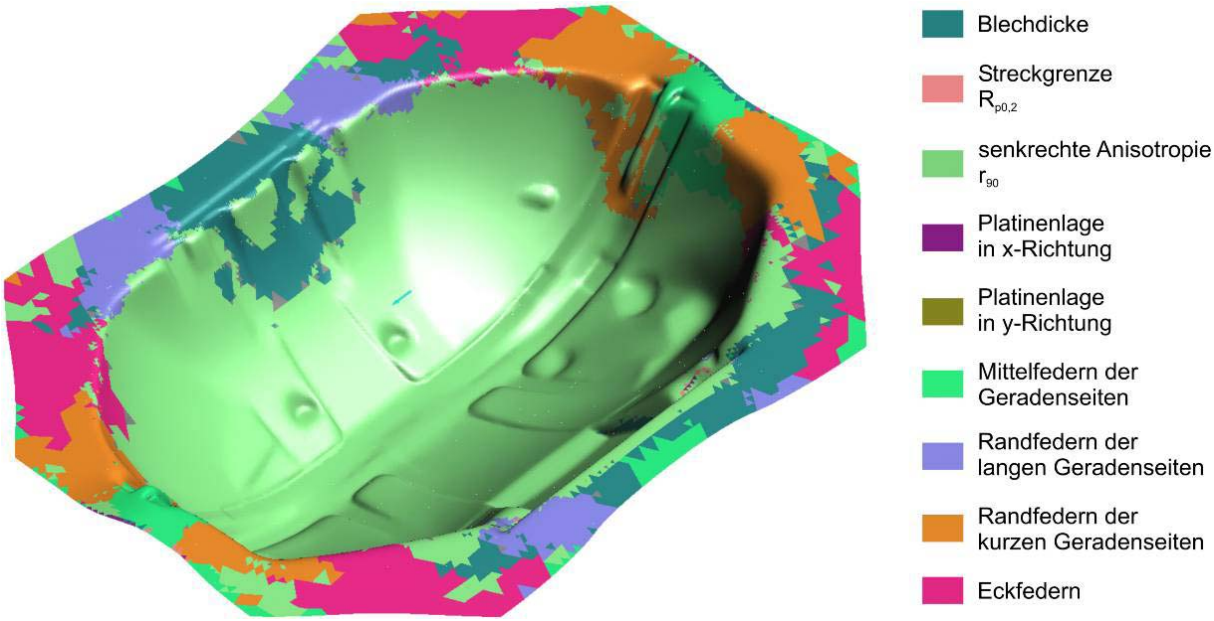

Abb. 5-30 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse in AutoForm® mit Erläuterung und Benennung der Einflussfaktoren

In der Darstellung, Abb. 5-30, sind die verschiedenen Bauteilregionen mit der Farbe des korrespondierenden Einflussparameters markiert, dessen Variation in dem jeweiligen Bereich die größten Veränderungen der Blechausdünnung hervorruft. Da die Stempel- bzw. endgültige Bauteilgeometrie nahezu komplett in der Farbe der senkrechten Anisotropie dargestellt ist, sind alle übrigen Einflussparameter, wie die Blechdicke, die Einlegeposition und die Streckgrenze in dieser Region hinsichtlich der Abstreckung von untergeordneter Bedeutung.

Obwohl der definiert elastische Niederhalter durch seine Flexibilität und Anpassungsfähigkeit in der Lage ist, auf Veränderungen des Ausgangsmaterials durch lokale Druckänderungen in den Gasdruckfedern zu reagieren und damit die Herstellung eines Gutteils zu gewährleisten, ist zu hinterfragen, ob die Radhausschale mit dem Serienwerkstoff HC180BD+ZE75/75 optimal geplant ist. Die mit Werkstofflieferanten vereinbarte Spezifikation fordert eine minimale senkrechte Anisotropie von 1,6, weshalb Werte von 1,8 die Lieferbedingungen vollständig erfüllen. Werte über zwei, bei denen die Radhausschale problemlos tiefgezogen werden kann, sind typisch für Tiefziehgüten wie den DX54. Eventuell stellt er die bessere Alternative für das Ausgangsmaterial dar.

6 Möglichkeiten zum Aufbau eines Regelkreises

Die im vorangegangenen Kapitel präsentierten Ergebnisse der experimentellen Analysen bestätigen anschaulich die Messfähigkeit der Sensorik und deren zuverlässige Erfassung des Materialeinlaufverhaltens während der Umformung. Des Weiteren verdeutlichen die vorgestellten Resultate die Vielzahl der Möglichkeiten zur gezielten, lokalen Prozessbeeinflussung durch die Anpassung der Einstellungen des Aktoriksystems.

Unter der Voraussetzung, den Blecheinzug durch die Aktuatoren zielgerichtet beeinflussen zu können, bietet eine präzise Messung des Einlaufweges zusätzlich die Option, einen Regelkreis zu schließen. Dazu sind das Messsystem und die Aktorik in geeigneter Weise miteinander zu verknüpfen sowie eine Prozessmodellierung zur Beschreibung der Zusammenhänge durchzuführen.

6.1 Modellbildung

Der Einfachheit halber wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass bei Einhaltung eines festgelegten Solleinlaufweges ein Gutteil entsteht. Dabei bleibt der Verlauf des Blecheinzuges über der Dauer des Umformvorganges unberücksichtigt (vgl. Kapitel 5.4.1.2). Außerdem finden keine Analyse des Geschwindigkeitsverlaufes und keine Verknüpfung mit zusätzlichen Einflussparametern wie den Materialkennwerten statt.

Befindet sich der Messwert des Platineneinlaufes innerhalb der definierten Ober- sowie Untergrenze des Gutteil-Intervalls ist keine Reaktion seitens der Stellglieder (Aktuatoren) erforderlich. Liegt der aktuell ermittelte Blecheinlaufweg außerhalb des Bereiches für ein i.O.-Bauteil muss vor dem nächsten Arbeitsgang eine Druckanpassung in den Stickstofffedern erfolgen.

Basierend auf den während des aktuellen Pressenhubes gemessenen Einlaufwegen erfolgt die Druckeinstellung der Aktuatoren für den darauf folgenden Umformvorgang. Ein einzelner Pressenhub isoliert betrachtet ist demnach gesteuert und seitens der Stoffflusssensorik überwacht. Der Produktionsprozess über mehrere Zyklen wird jedoch durch das Konzept der Prozessnachführung geregelt.

Ein möglicher Ansatz, die bei Regelabweichungen anzusteuernden Kompaktgasfedern zu bestimmen, besteht in der vektoriellen Verknüpfung der vier Messwerte des Materialeinzugs. Dazu sind die Differenzen jedes Einlaufweges in Bezug auf seinen korrespondierenden Sollwert mit der Richtung seiner Messachse ausgehend vom Mittelpunkt des Bauteils in der Ebene der Ausgangsplatine aneinander zu reihen. Daraus ergibt sich ein resultierender Abweichungsvektor vom Platinenmittelpunkt bis zum Endpunkt der vier verketteten Einzelabweichungsvektoren.

Diesen gilt es, durch gezielte Druckerhöhung in den Gasdruckfedern „hinter“ dem Gesamtabweichungsvektor oder/und Drucksenkung in den Kompaktstickstofffedern „vor“ dem Gesamtabweichungsvektor betragsmäßig auf null zu reduzieren.

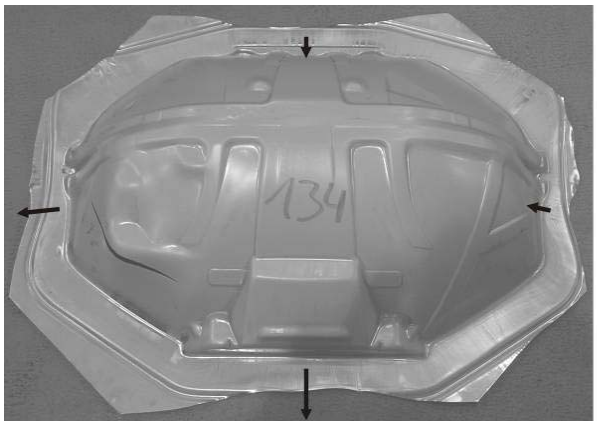

Abb. 6-1 Bauteil mit vier Einzelabweichungsvektoren

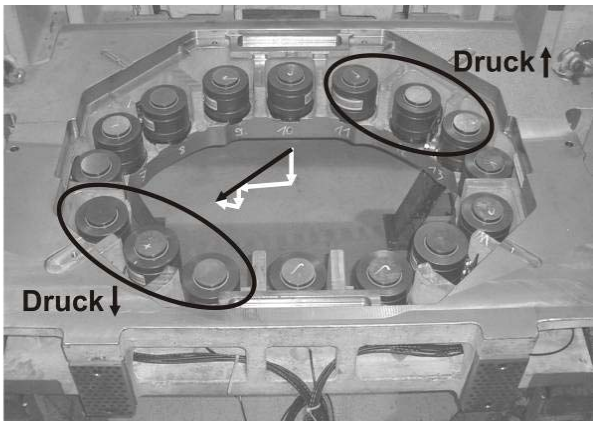

Abb. 6-2 gekennzeichnete GDF zur Minimierung des zusammengesetzten Gesamtabweichungsvektors

Die softwaretechnische Umsetzung einer derartigen Berechnung von Vektoren ist mit der eingesetzten SPS-Hardware zur Ansteuerung der Gasdruckfedern (vgl. Kapitel 4.2.3.5) nicht möglich und zur PC-seitigen Realisation wäre ein weiterer Computer erforderlich. Denn die vier Bildverarbeitungsrechner der Sensorik (vgl. Kapitel 4.1.2) sind mit den Auswertungsalgorithmen bereits vollständig ausgelastet.

Deshalb und aus Gründen der Vereinfachung findet eine statische Zuordnung der 16 Stickstofffedern zu jeweils einem der vier Sensoren statt. Naheliegend ist in diesem Zusammenhang die Verknüpfung der drei Kompaktgasdruckfedern eines Geradenbereiches (vgl. Kapitel 4.2.1.2) mit der zugehörigen Messposition. Etwas schwerer fällt die Entscheidung bezüglich der vier verbleibenden Eckbereiche. Hier besteht einerseits die Möglichkeit, sie keinem Sensor zuzuordnen. Bei Regelabweichungen würde dann in diesen vier Stickstofffedern keinerlei Druckänderung vorgenommen. Ihre Federkraft wäre statisch und manuell vorzugeben. Andererseits bestätigen die Ergebnisse der Vorversuche auf den Try-Out-Pressen den Einfluss der vier Eckfedern auf die Sensorwerte der zwei langen Geradenseiten des Bauteils und motivieren somit deren Verknüpfung. Den Sensoren null und zwei (vgl. Abb. 4-10) sind demnach jeweils fünf Gasdruckfedern und den Sensoren eins und drei (vgl. Abb. 4-10) je drei Aktoren zugeordnet.

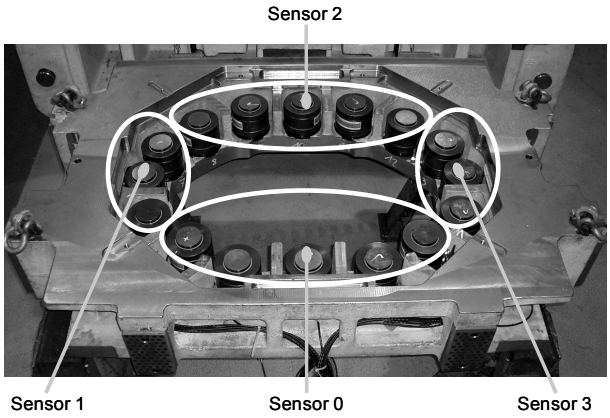

Abb. 6-3 Zuordnung der GDF zu den 4 Sensorpositionen

Unabhängig vom Betrag der Über- bzw. Unterschreitung des aktuell gemessenen Blecheinlaufweges in Bezug auf sein Soll-Intervall werden die Drücke der korrespondierenden Stickstofffedern nach einem zuvor definierten Schema um jeweils 5bar (vgl. Kapitel 4.2.3.5) erhöht bzw. gesenkt. So findet bspw. bei den Sensoren null und zwei (vgl. Abb. 4-10) nach der ersten Überschreitung der oberen Intervallgrenze eine Druckerhöhung um je 5bar in den mittleren drei Kompaktgasdruckfedern statt. Ein zweites Durchbrechen des Intervalls infolge ruft eine Kraftsteigerung in der mittleren sowie den zwei Eckfedern hervor. Reicht diese Anpassung auch im nächsten Pressenhub nicht aus, um den Blecheinlaufweg zurück in sein Prozessfenster zu bringen, werden erneut die drei mittleren Stickstofffedern um je 5bar stärker vorgespannt. Zuletzt sind alle fünf Gasdruckfedern gleichzeitig um je 5bar zu erhöhen, wenn die vierte aufeinander folgende Überschreitung des Intervalls registriert wird. Bei einer fünften Verletzung des Gutteilfensters infolge beginnt der Durchlauf des Schemas analog zur erstmaligen Intervallüberschreitung von vorn. Sobald eine Anpassungsmaßnahme im darauf folgenden Pressenhub zur Einhaltung des Soll-Intervalls führt, findet ein Reset im Schrittzähler statt und die nächste Verletzung der Prozessfenstergrenze gilt als erste Über- bzw. Unterschreitung (infolge). Innerhalb weniger Pressenhübe stellt sich somit automatisch eine Druckverteilung in den Kompaktstickstofffedern ein, die einen zulässigen Blecheinlaufweg gewährleistet.

Die beschriebene Vorgehensweise stellt nur eine Möglichkeit der Druckanpassung bei mehrmaligem, aufeinander folgendem Durchstoßen der Intervallgrenzen dar. Allerdings orientiert sie sich an einer Gewichtung des Einflusses der fünf Aktoren auf den Blecheinzug. Am größten ist dessen Beeinflussbarkeit durch die mittlere Gasdruckfeder, wogegen Veränderungen in den Eckfedern die geringste Auswirkung aufweisen.

In der konkreten, softwaretechnischen Umsetzung lassen sich sowohl die Druckänderung in Höhe von derzeit 5bar als auch das Schema der Druckanpassung für jeden der vier Sensoren individuell festlegen.

6.2 Hard- und softwareseitige Implementierung

Zunächst erfolgt die Realisierung einer Datenübertragung von den vier Bildverarbeitungsrechnern (vgl. Kapitel 4.1.2) auf die SPS-Hardware der Gasdruckfederdosierstation (vgl. Kapitel 4.2.3.5). Als bester Kompromiss hinsichtlich Hardwareaufwand, Übertragungsgeschwindigkeit und Performance der Einzelsysteme stellt sich dabei die Ethernetverbindung mit Hilfe des TCP/IP Protokolls heraus.

Der auf der SPS programmtechnisch realisierte Regelalgorithmus vergleicht die übertragenen Sensormesswerte mit den manuell eingegebenen Intervallgrenzen und bestimmt bei Abweichungen ausgehend von den aktuellen Stickstoffdrücken der Kompaktgasdruckfedern anhand der ebenfalls manuell definierten Druckänderungsschemen die 16 neuen Sollwerte der Aktoren. Letztere werden analog der Beschreibung in Kapitel 4.2.3.5 über einen SPS-Programmbaustein mit integriertem PID-Regler und die Ansteuerung der Füll- bzw. Ablassventile eingeregelt.

6.3 Experimentelle Untersuchungen

Die Druckanpassungsschemen sowie die jeweiligen Intervallgrenzen lassen sich aus den Ergebnissen der Vorversuche auf den Try-Out-Anlagen ermitteln und gemeinsam mit dem geschlossenen Regelkreis im Rahmen einer Großserienabpressung auf der Produktionsanlage hinsichtlich ihrer Funktionsweise analysieren. Dazu werden insgesamt rund 2.000 Platinen aus sieben verschiedenen Chargen des Serienmaterials umgeformt und eine möglichst hohe Anzahl an Materialwechseln provoziert.

MaterialNr.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
KBN	75387	10802	11001	33048	wie Mat. 2	76797	34658	70641	wie Mat. 7
Anzahl [Stck.]	98	81	104	84	18	99	496	472	496
R_e [N/mm²] 180-230	**211,0**	221,0	**228,0**	212,0	wie Mat. 2	216,0	223,0	220,0	wie Mat. 7
R_m [N/mm²] 280-260	334,0	331,0	**338,0**	335,0	wie Mat. 2	**330,0**	337,0	333,0	wie Mat. 7
A_{80} [%] ≥ 32	38,1	**40,0**	38,5	37,6	wie Mat. 2	39,2	37,5	**37,3**	wie Mat. 7
r_{90} ≥ 1,6	2,16	1,94	1,98	1,94	wie Mat. 2	**2,36**	**1,80**	2,20	wie Mat. 7
n_{90} ≥ 0,17	0,182	**0,207**	0,185	0,186	wie Mat. 2	0,187	0,180	**0,170**	wie Mat. 7
R_a [µm] 1,3-1,8	**1,6**	1,8	**2,1**	1,9	wie Mat. 2	1,8	1,9	1,8	wie Mat. 7
R_a [µm] 1,3-1,8	1,8	**1,6**	**2,0**	1,9	wie Mat. 2	1,7	1,8	1,8	wie Mat. 7
s [mm] 0,7	0,68	**0,66**	0,67	0,69	wie Mat. 2	0,69	0,69	**0,70**	wie Mat. 7
Grundbeölung g/mm²	1,3 / 1,4	1,5 / 1,3	**1,2 / 0,9**	1,8 / 1,5	**1,1 / 1,1** (trocken)	1,4 / 1,3	1,3 / 1,2	**2,2 / 1,9**	wie Mat. 7
Zusatzbeölung g/mm²			2,9 / 2,0 Beöler an	**3,1 / 2,8** Beöler an			1,7 / 1,4 Beöler an		wie Mat. 7

Tab. 6-1 Werkstoffspektrum der Materialkennwerte (Extrema sind fett markiert)

In der Regel stellt ein Materialwechsel die größte Schwierigkeit während der laufenden Serienproduktion dar. Nach erfolgreicher Anpassung des Werkzeuges und der Presse auf die aktuelle Werkstoffcharge läuft die Bauteilherstellung aufgrund sehr geringer Schwankungen innerhalb der Platinen einer Kaltbandnummer (KBN) dann meist problemlos.

Aus diesem Grund wird das Versuchswerkzeug bei aktivierter Prozessregelung zunächst mit den ca. 500 Platinen der Materialien eins bis sechs aus fünf verschiedenen Kaltbandnummern konfrontiert. Mit Material fünf sind darin auch trockene / gereinigte (Beölungsgrad ≈ 1g/m²) sowie innerhalb der Materialien drei und vier zusätzlich beölte (Schichtdicke ≈ 3g/m²) Ausgangsbleche enthalten. Abschließend sind die ca. 1.500 Platinen der Materialien sieben bis neun abzupressen, um die Auswirkungen der Schwankungen innerhalb einer Werkstoffcharge zu untersuchen.

6.4 Resultate

Folgender, exemplarischer Auszug von ca. 300 Umformvorgängen aus dem Versuchsprotokoll der Großserienabpressung für Sensor drei (vgl. Abb. 4-10) bestätigt die Funktionsweise des geschlossenen Regelkreises und charakterisiert den angestrebten Idealfall.

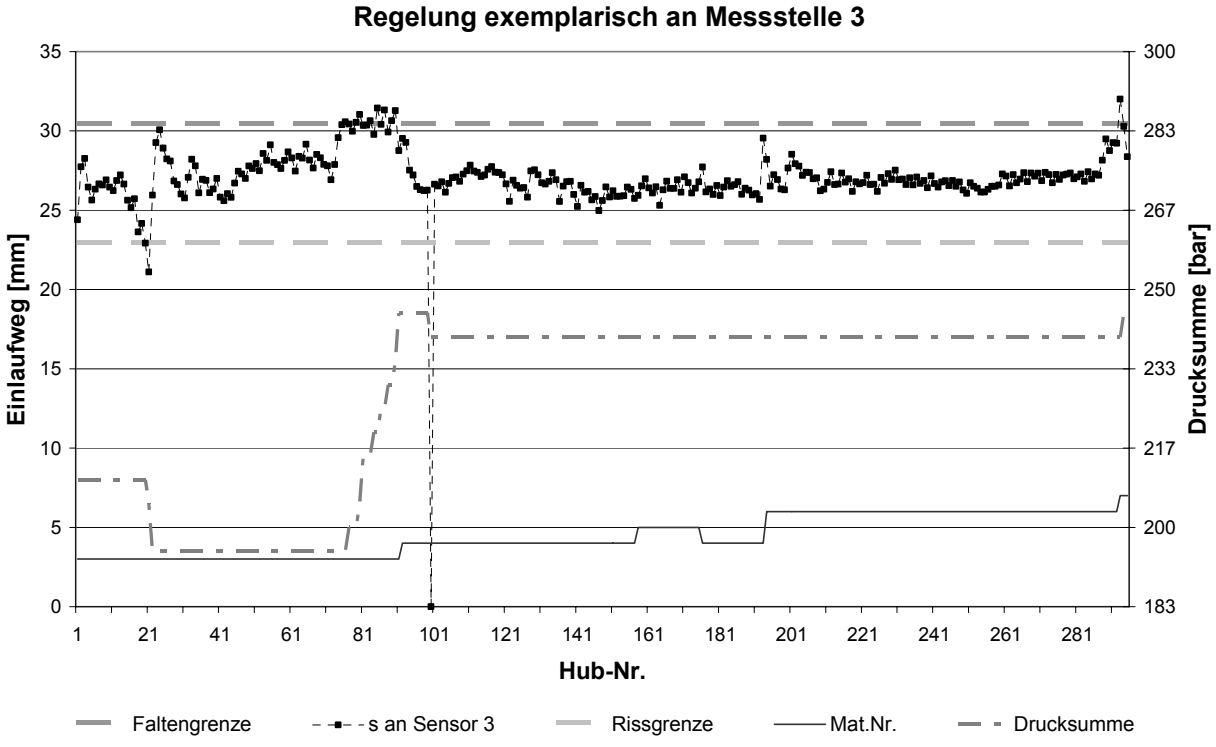

Abb. 6-4 Auszug aus Versuchsprotokoll für Messposition 3

Wie gut zu erkennen ist, liegt der Messwert für die ersten ca. 20 Pressenhübe dieses Ausschnittes innerhalb der Intervallgrenzen und ruft somit keinerlei Reaktion zur Änderung der Drucksumme in den korrespondierenden Gasdruckfedern hervor. Danach nimmt der gemessene Einlaufweg kontinuierlich ab, bis er die untere Grenze des Prozessfensters durchstößt. Mehrfache Drucksenkungen im Laufe der drei folgenden

Pressenhübe bringen den Blecheinzug zurück in das Gutteilfenster. Darin verbleibt er bis etwa zum Hub Nr. 75.

In den nun folgenden Pressenhüben führen ständige Verletzungen der oberen Intervallgrenze zu wiederholten Druckerhöhungen in den drei Stickstofffedern des dritten Sensors. Ab etwa Pressenhub Nr. 90 ist dann eine Druckkonfiguration erreicht, bei der die Einhaltung des Prozessfensters wieder gewährleistet ist.

Interessanterweise geht diese Phase häufiger Störungen mit dem Ende der Platinen von Material drei und dem Wechsel zu Material vier einher. Positiv ist in diesem Zusammenhang hervorzuheben, dass der geschlossene Regelkreis die Anpassung des Werkzeuges auf die neue Materialcharge vollautomatisch vorgenommen hat.

Der Messwert des Pressenhubes 100 stellt mit einem Einlaufweg von null Millimetern den einzigen Messfehler im Feld dar und führt aufgrund der durchbrochenen unteren Schranke des Gutteilintervalls zu sofortiger Drucksenkung.

Obwohl es mit Material fünf während der Pressenhübe 158 bis 175 mittendrin trockene Platinen der gleichen Kaltbandnummer wie Material zwei und anschließend die Materialcharge Nr. sechs umzuformen galt, liegt der Messwert des Blecheinzuges bis einschließlich Pressenhub 292 innerhalb des vorgeschriebenen Prozessfensters. Somit sind trotz der drei Werkstoffwechsel keinerlei Druckänderungen erforderlich.

Allerdings zeigen sich speziell am Übergang von Material vier zu Material sechs bei Hub 195 stärkere Schwankungen der gemessenen Einlaufwege, wogegen die Messwerte der Werkstoffcharge sechs (Pressenhübe 195 bis 292) sehr konstant sind und kaum variieren.

Mit dem Materialwechsel von Nr. sechs auf sieben beim Pressenhub 293 wird die obere Intervallgrenze erneut durchbrochen, doch die sofortige Druckerhöhung führt bereits in den letzten beiden Umformvorgängen dieses Auszuges zur Einhaltung der Prozessfenstergrenzen.

6.4.1 Abzuleitendes Verbesserungspotential

Aufgrund der Tatsache, dass der geschlossene Regelkreis jedoch nicht über die gesamte Großserienabpressung in der Lage war, vollautomatisch ausschließlich Gutteile hervorzubringen, sind an dieser Stelle ein paar Weiterentwicklungsmöglichkeiten zu benennen.

Zunächst wirken sich ein Aufschwingen der Regelung und der einhergehende Drift in ein Extremum (massive Faltenbildung bzw. Entstehung kapitaler Risse) sehr störend aus. Bereits leichte Verschiebungen der Intervallgrenzen aber vor allem eine Desensibilisierung der Regelstrategie machen dieses Problem beherrschbar. Um toleranter gegenüber Messungenauigkeiten, leichten Messwertschwankungen und auch einzelnen Messfehlern zu reagieren, sollte ein mehrfach aufeinander folgendes

Durchbrechen der Grenzen des Prozessfensters abgewartet werden. Nach eindeutiger Erkennung eines Trends über ca. drei Pressenhübe ist anschließend eine Reaktion durch Druckänderung in den entsprechenden Gasdruckfedern auszulösen.

Um die, durch die Trendermittlung vergrößerte Reaktionszeit des Prozessregelkreises zu kompensieren, lassen sich engere Intervallgrenzen festlegen. Wesentlich wichtiger ist in diesem Zusammenhang jedoch die höhere Gewichtung der unteren Grenze des Gutteilfensters, da es sich bei der ausgewählten Radhausschale um ein risskritisches Bauteil handelt.

Zuletzt besteht auch noch die Möglichkeit, die Größenordnung der Druckanpassung von derzeit 5bar weiter herabzusetzen, um die Veränderungen durch den Regelkreis nicht zu sprungartig sondern etwas kontinuierlicher vorzunehmen. Erste Tests derartiger Konfigurationsmodifikationen im Rahmen einer zweiten Großserienabpressung auf der Produktionsanlage mit ebenfalls ca. 2.100 Ziehteilen aus fünf Blechchargen verliefen sehr viel versprechend.

6.4.2 Ansatz zur Identifikation von Einschnürungen und Rissen

Ein weiteres Problem während der Serienproduktion stellt das Bauteilversagen aufgrund von sehr kleinen Rissen, Dünnzügen und Einschnürungen dar. Obwohl die Sensorik das Einlaufverhalten zuverlässig erfasst, ist deren Detektierung äußerst schwierig. Größere Risse lassen sich ohne weiteres an ausreichend hohen Veränderungen des gemessenen Einlaufweges erkennen, auch wenn der Bauteilfehler zwischen zwei Messpositionen auftritt.

Abb. 6-5 Bauteil mit großem Riss

Dagegen verursachen Risse mit einer Breite kleiner 0,5mm und Einschnürungen lediglich sehr geringe Längenunterschiede der gemessenen Einlaufwege. In der Regel ist die räumliche Ausbreitung der Fehlstelle stark begrenzt und zudem zwischen zwei Sensoren angeordnet. Unter diesen Umständen ist fraglich, wie groß die Veränderung in den beiden Messwerten gegenüber einem Gutteil ausfällt. Es erscheint zunächst unmöglich mit der eingesetzten Sensorik aufgrund der

physikalisch begrenzten Messgenauigkeit, Fehler in Form von sehr schmalen Rissen und Einschnürungen im Einlaufweg zu detektieren.

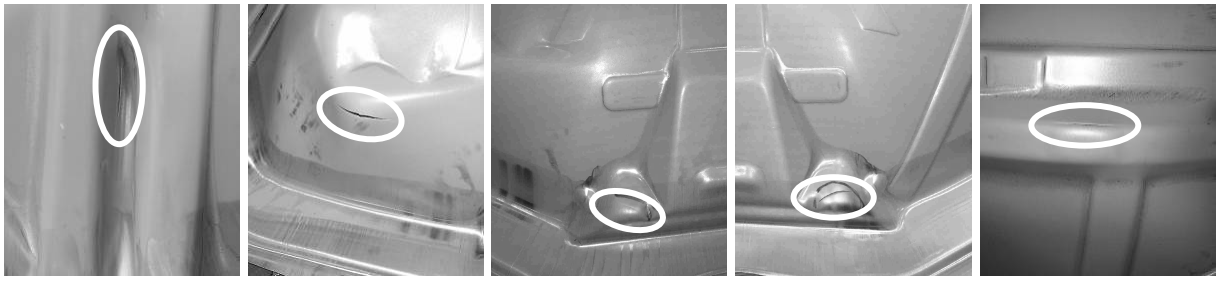

Abb. 6-6 Versuchsteile mit Einschnürungen, Dünnzügen und kleinen Rissen zwischen zwei Sensorpositionen

Sehr viel versprechend sehen in diesem Zusammenhang erste Ergebnisse basierend auf Analysen der Geschwindigkeitsverläufe (vgl. Kapitel 5.4.1.2) gerissener und eingeschnürter Ziehteile aus. Sie weisen im zeitlich letzten Drittel des Umformvorganges (bei etwa 2sec) markante Einbrüche der Blecheinzugsgeschwindigkeit auf. Zum Teil geht die Geschwindigkeit zurück auf null oder kehrt ganz und gar die Richtung um.

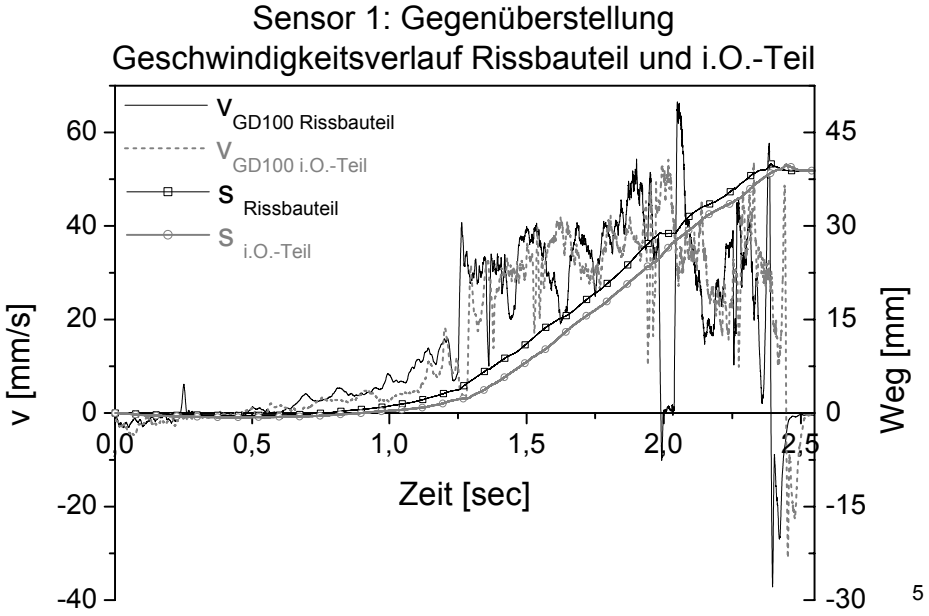

Abb. 6-7 Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverläufe eines Rissteils und eines i.O.-Bauteils

Der starke Geschwindigkeitsrückgang im Blecheinzug während des Tiefziehprozesses deutet darauf hin, dass nicht ausreichend Material für die beabsichtigte Umformung und einhergehende Vergrößerung der Oberfläche nachfließt. Die Richtungsänderung des Stoffflusses bei Erreichen negativer Geschwindigkeitswerte[5] ist als Zeitpunkt der Entstehung offener Risse zu interpretieren. Aufgrund der hohen Zugspannungen, welche das Blech letztendlich zerreißen, zieht sich der Platinenflansch unterhalb des Messkopfes beim Öffnen des Risses leicht zurück. Der Unterschied zu zuvor detektierten Schwingungen (vgl. Kapitel 5.4.1.2) auf dem Geschwindigkeitssignal besteht in dem abrupten Einbruch der Stoffflussgeschwindigkeit, dem anschließenden, kurzzeitigen Verweilen bei sehr geringen bzw. negativen Werten und

[5] negative Geschwindigkeitswerte dienen der Veranschaulichung einer Richtungsumkehr

schließlich in der Rückkehr zu einer positiven Geschwindigkeit, nachdem die Rissbildung abgeschlossen ist.

Untermauert wird diese These von weiteren Messdaten, die auf den Try-Out-Anlagen erhoben wurden. In deren Geschwindigkeitsprofilen finden sich analoge, charakteristische Einbrüche im Verlauf der Blecheinzugsgeschwindigkeit für dokumentierte Riss- und Einschnürungsteile, die bei Gutteilen nicht vorzufinden sind.

Ferner besteht in diesem Zusammenhang ein sehr positiver Aspekt in der kontinuierlichen Ankündigung der Prozessveränderung. Analysen der Pressenhübe vor den dokumentierten Ausschussteilen deuten bereits in ihren Geschwindigkeitsprofilen einen zunehmenden Rückgang des Blecheinzuges kurz vor Ende des Umformprozesses an. Daraus ergibt sich das Potential einer Früherkennung und möglichen Rissprävention.

Durch die Implementierung einer Onlineauswertung des Geschwindigkeitsverlaufes ließe sich der Vergleich mit einem Soll-Geschwindigkeitsprofil durchführen und bei festgestellten Abweichungen mit zuvor definierten Einstellungsänderungen (Druckanpassung in den Kompaktgasdruckfedern) vollautomatisch darauf reagieren.

6.4.3 Zusammenfassung

Obwohl die vollautomatische Druckkonfiguration in den Stickstofffedern durch den geschlossenen Prozessregelkreis während der Großserienabpressung noch nicht 100%ig zufrieden stellend war, bestätigte das vorgestellte Werkzeugkonzept aufgrund seiner Elastizität und Anpassungsfähigkeit erneut das Potential, auf Prozessveränderungen (Materialwechsel, Temperaturänderungen usw.) adäquat zu reagieren.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der geschlossene Regelkreis während seines ersten Einsatzes in der Serienproduktion hinreichend gut funktioniert hat. Alle aufgetretenen Schwierigkeiten ließen sich spätestens mit Hilfe manueller Einstellungskorrekturen beheben und ermöglichten so die Produktion von ca. 2.000 Bauteilen bei einer Hubzahl von ca. 7,5 Hub/Min.

Die Fertigteile der 1.500 Ziehteile aus den Materialchargen sieben bis neun sind im Rahmen einer Qualitätskontrolle stichprobenartig untersucht worden. Ihre Maßhaltigkeit liegt innerhalb der mit den Prozesspartnern (Karosseriebau) vereinbarten Toleranzgrenzen und ihre Blechausdünnung unterschreitet in keinem Fall das konstruktive Mindestmaß von kleiner/gleich 30%. Damit bestätigen die Versuchsbauteile ihr hohes Qualitätsniveau und rechtfertigen die Tatsache, dass sie anschließend im Verlauf der weiteren Serienproduktion verbaut wurden.

Werkstoffseitig zeigt sich während der Großserienabpressung ebenfalls ein lediglich geringer Einfluss der Schmierstoffschichtdicke des Ausgangsmaterials (vgl. Kapitel

5.4.3). So sind zur Umformung der trockenen/gereinigten Platinen des Materials fünf keinerlei Druckanpassungen erforderlich (vgl. Abb. 6-4). Außerdem lassen sich anhand der gemessenen Einlaufwege keine Unterschiede zu den Umformvorgängen der im Anlieferungszustand belassenen Bleche des Materials vier feststellen. Ebenso erfordern zusätzlich beölte Platinen innerhalb der Materialien drei und vier zur Umformung eines Gutteils weder eine Anpassung der Stickstoffdrücke in den 16 Aktoren noch weisen sie einen signifikanten Unterschied im Blecheinzugsverhalten auf.

Allerdings unterstreichen die Ergebnisse des Großversuches auf der Produktionspresse den enormen Einfluss der senkrechten Anisotropie (vgl. Kapitel 5.4.3). Bspw. erreichen die Fertigteile der Materialcharge acht mit einem r-Wert von 2,2 (vgl. Tab. 6-1) im Rahmen der Abstreckungskontrolle immer das Ziel zur Prozessbeherrschung mit einer Blechausdünnung kleiner/gleich 20%. Die Bauteile der Chargen sieben und neun, welche im betrachteten Werkstoffspektrum die minimale senkrechte Anisotropie von 1,8 aufweisen (vgl. Tab. 6-1), gewährleisten dagegen lediglich das konstruktive Mindestmaß, einer Abstreckung kleiner/gleich 30%. Zur Produktion rissfreier Ziehteile ist in diesem Zusammenhang eine Änderung der Stickstoffkonfiguration in den Gasduckfedern gegenüber Material acht erforderlich. Des Weiteren erweist sich zur Erhöhung der Prozesssicherheit und -stabilität die lokale Schmierstoffapplikation in gefährdeten Bauteilregionen als sehr hilfreich.

Unter diesem Aspekt könnte eine Verknüpfung des Soll-Einlauf-Intervalls mit einem charakteristischen Werkstoffparameter (in diesem Fall die senkrechte Anisotropie) sinnvoll sein. Für verschiedene Größenordnungen des Materialkennwertes innerhalb seiner vorgeschriebenen Toleranzgrenzen sind dann individuelle Prozessfenster zu definieren. Ausgangswerkstoffen mit vergleichsweise niedriger senkrechter Anisotropie würden dann bspw. längere Soll-Einlaufwege zugeordnet, da dieses Material stärker zur Ausdünnung neigt.

7 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Die Vorteile elastischer Werkzeugkonzepte und ihre Potentiale in Kombination mit entsprechender Sensorik hinsichtlich Überwachung, Steuerung bzw. Regelung des Umformprozesses sind bereits in zahlreichen Forschungsarbeiten vorgestellt worden (vgl. Kapitel 2.3 und 2.4). Einzelne Nachteile und vor allem das Fehlen vorausgesetzter, spezieller Anlagentechnik verhindern bislang einen Einsatz derartiger Umformwerkzeuge im Großserienbetrieb der Automobilindustrie (vgl. Kapitel 2.5).

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Werkzeugkonzept ist es möglich, unter Nutzung bestehender, einfachwirkender Pressenanlagen, die angesprochenen Potentiale auf serienreifem Niveau zu erschließen. Die als Aktuatoren eingesetzten Kompaktgasdruckfedern nehmen eine gezielte Verteilung des Ziehkissendruckes vor und der auf ihnen schwimmend gelagerte, definiert elastische Niederhaltereinsatz gestattet die lokale Beeinflussung der Flächenpressung im Bauteilflansch.

Das Versuchswerkzeug bestätigt die drastische Verkürzung der üblicherweise undeterminierten, zeit- sowie kostenintensiven und stochastischen Einarbeitsphase eines neuen Tiefziehwerkzeuges. Anstatt tage- und wochenlanger Trial and Error Einarbeit ist nach ca. 30-minütiger Entfernung der Druckstellen und ca. fünf weiteren Pressenhüben eine Druckkonfiguration der 16 Stickstofffedern gefunden, mit der sich Gutteile produzieren lassen (vgl. Kapitel 5.4.2.1). Im Rahmen dieser strukturierten Inbetriebnahme dienen die Ergebnisse der Umformsimulationen zum Abgleich mit dem realen Blecheinzugsverhalten.

Ein weiterer Vorteil des beschriebenen Werkzeugkonzeptes ergibt sich durch seinen problemlosen Wechsel zwischen den drei vorgestellten Umformanlagen (vgl. Kapitel 5.1) während der experimentellen Analysen. Ohne den bei konventionellen Umformwerkzeugen üblichen, zusätzlichen Tuschieraufwand können innerhalb weniger Pressenhübe die Unterschiede aufgrund verschiedener Maschinencharakteristika (Durchbiegung, Verkippung, Gesamtsteifigkeit oder Antriebskonzept) durch Anpassung der Gasdruckfederkonfiguration ausgeglichen werden.

Obwohl die zwei Try-Out-Pressen als auch die verwendete Produktionsmaschine hydraulisch angetrieben sind, ist das entwickelte Werkzeugkonzept ebenfalls für den Einsatz auf mechanischen Umformmaschinen geeignet. Speziell die als Aktorik ausgewählten Kompaktstickstofffedern sind in der Lage, die bei mechanischen Pressen höheren Auftreffschläge während des Schließens des Umformwerkzeuges durch die Kompressibilität ihres Füllmediums zu kompensieren.

Zuletzt ergibt sich ein enormes Vorteils- sowie Kostenpotential des definiert elastischen Niederhaltereinsatzes durch die Umformung minimierter/optimierter Platinenzuschnitte und die damit einhergehende Materialeinsparung. Eine Kombination der

Aktorik mit geeigneter Sensorik ermöglicht zudem das Schließen eines Prozessregelkreises und dient damit zur Erhöhung der Prozessstabilität sowie zur Vermeidung von Stillstandszeiten und Ausschussproduktion bei schwankenden Eingangsparametern.

7.1 Alternativen zum Transfer in Serienwerkzeuge

Aufgrund der benannten Vorteile und Potentiale definiert elastischer Niederhalter sollte ein Transfer der mit dem betrachteten Versuchswerkzeug gewonnenen Erkenntnisse in neue Serienwerkzeuge stattfinden. Der Zusatzaufwand durch ein System bestehend aus Aktorik oder/und Sensorik rentiert sich allerdings nicht bei allen Bauteilen. Im Zweifel sind daher die Umformwerkzeuge der tiefziehkritischen Karosserieteile auszuwählen.

7.1.1 Definiert elastischer Ringeinsatz

Analog dem in dieser Arbeit vorgestellten Versuchwerkzeug besteht die erste Umsetzungsmöglichkeit darin, den kompletten Flanschbereich des Blechhalters elastisch zu gestalten. Durch die Vielzahl der dabei eingesetzten Aktuatoren ergibt sich eine sehr hohe Flexibilität des Niederhalters. Die enorme Anpassungsfähigkeit eines solchen definiert elastischen Einsatzes zeigt sich bspw. bei der Umformung von tailored blanks (vgl. Kapitel 5.4.2.4), worin ferner ein mögliches Einsatzpotential derartiger Tiefziehwerkzeuge zu sehen ist.

Bei gleichzeitiger Integration mehrerer Blecheinzugssensoren in die Werkzeugmatrize lassen sich eine Prozessüberwachung und ein geschlossener Regelkreis realisieren. Der Aufbau und die Herstellung der Sensorik sind soweit zu vereinfachen und zu optimieren, dass sich der finanzielle Mehraufwand speziell durch höhere Absatzstückzahlen auf ein vertretbares Maß reduziert.

Weitere Kostenpotentiale lassen sich durch die gemeinsame Nutzung einer Dosierstation sowie einer Bildverarbeitungseinheit für mehrere Umformwerkzeuge erschließen. Die universelle Gestaltung der Ansteuereinheit für die Stickstofffedern und der Sensor-Mess-PC’s gestattet den Anschluss jedes aktiven, definiert elastischen Werkzeuges im Presswerk, wodurch die Anschaffungskosten auf diverse Bauteile umgelegt werden können. Lediglich die Logistiksteuerung eines Presswerkes hat unter diesen Umständen dafür Sorge zu tragen, dass nicht mit mehreren aktiven Werkzeugen auf verschiedenen Pressenanlagen parallel produziert wird.

7.1.2 Blechhalter partiell elastisch gestalten

Eine zweite, sehr interessante und zu bevorzugende Alternative stellt die gezielte, elastische Gestaltung des Niederhalterbereiches in der Nähe kritischer Bauteilzonen

dar. Zum einen reduziert sich dadurch der konstruktive Aufwand und zum anderen werden der Aufbau und die Bedienung des Ziehwerkzeuges stark vereinfacht.

Die Identifikation der „neuralgischen Stelle“ eines Karosserieteils erfolgt mit Hilfe der Umformsimulation und Erfahrungswerten von Vorgängerbauteilen. Durch Kombination einer definiert elastischen Einsatzplatte und wenigen Aktuatoren (max. drei Gasdruckfedern) wird die gezielte, lokale Beeinflussung der Flächenpressung in der kritischsten Flanschregion ermöglicht. Alle übrigen Blechhalterbereiche des Ziehteilflansches werden herkömmlich hergestellt, bearbeitet und eintuschiert. Der Niederhalter wäre lediglich so elastisch wie nötig und nicht so elastisch wie möglich.

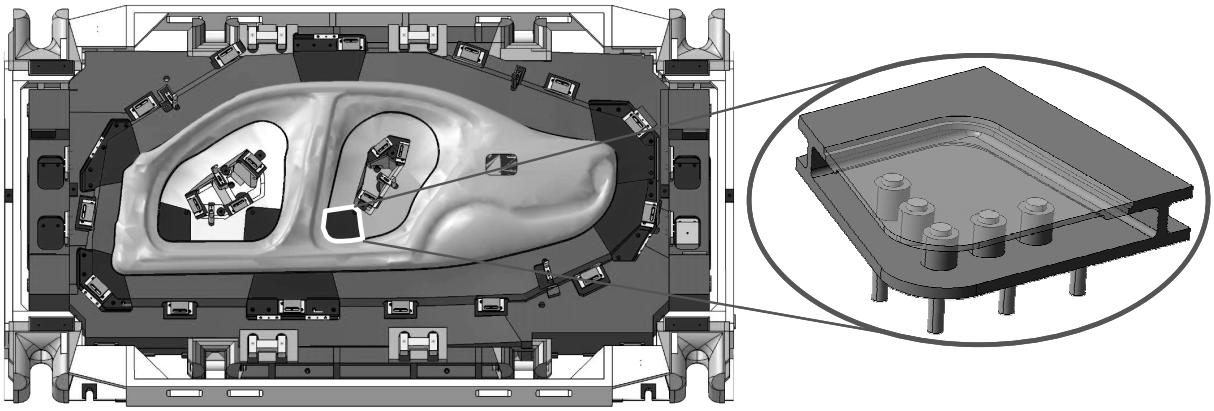

Abb. 7-1 Serienwerkzeug mit definiert elastischem Niederhaltereinsatz an neuralgischer Stelle

Bei zusätzlicher Verwendung eines Stoffflusssensors in der Werkzeugmatrize ist zudem wieder eine Prozessüberwachung oder -regelung für den kritischen Bauteilbereich realisierbar. Zur Kostenminimierung sind in diesem Fall bezüglich Sensorik und Aktorik standardisierte, wieder verwendbare Module vorstellbar, die in größeren Stückzahlen kosteneffizient hergestellt werden.

7.1.3 Verlagerung der Aktuatoren in das Ziehkissen der Presse

Die dritte und letzte Möglichkeit zum Transfer der gewonnenen Erkenntnisse in neue Serienumformwerkzeuge besteht darin, aktive Elemente im Ziehapparat unter den Druckstiften (Pinolen) zu integrieren. Nach einem Einmalaufwand des Umrüstens der Presse bzw. des Ziehkissens stehen durch das genormte Lochbild der geläufigen Umformanlagen eine Vielzahl von Aktuatoren zur gezielten, lokalen Beeinflussung einzelner Bauteilbereiche zur Verfügung.

Aktuelle Bauvorschriften empfehlen eine maximale Belastung einzelner Pinolen mit höchstens acht bis zehn Tonnen. Der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Kompaktgasdruckfedertyp verfügt über eine Maximalkraft von rund 12 Tonnen. Darüber hinaus existieren bereits Stickstofffedern mit einer zulässigen Belastung bis 18 Tonnen. Außerdem bietet das Pinolenraster von 150mm x 150mm ausreichend Bauraum für die Gasdruckfederintegration.

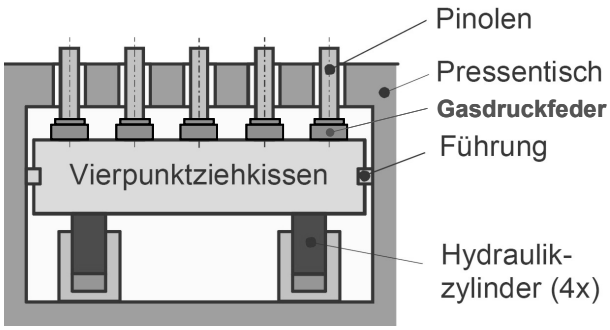

Abb. 7-2 Prinzipdarstellung eines Ziehkissens mit Gasdruckfedern

Diese letzte Alternative weißt eine gewisse Verwandtschaft zur Vielpunktziehtechnik (vgl. Kapitel 2.3.3) auf. Jedoch ist sie aufgrund der Nachrüstbarkeit bei bestehenden Anlagen wesentlich kostengünstiger. Um allerdings den Mehraufwand der Funktionserweiterung zu rechtfertigen, sind die kritischen Ziehteile auf der speziell umgebauten Pressenanlage zu konzentrieren. Des Weiteren ist ein Umdenken bei der Werkzeugkonstruktion erforderlich [Gri99]. Die bislang bei konventionellen Serienwerkzeugen eingesetzten, möglichst steifen Kasten- bzw. C-Profil Bauweisen mit Verrippungen sind ungeeignet. Stattdessen sollten die Werkzeugkonzepte überdacht und definiert elastische Bauweisen, wie bspw. von Thoms [Tho93] vorgestellt, eingesetzt werden. Denn nur dadurch lassen sich die unterschiedlichen Kräfte der verschiedenen Einleitungspunkte vom Werkzeugkörper an das Blech weitergeben.

Denkbar ist in diesem Zusammenhang auch der Einsatz des am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart entwickelten, segmentelastischen Niederhalters bestehend aus Pyramidenstümpfen (vgl. Kapitel 2.3.2). Außerdem empfiehlt es sich, elastische Blechhalter mit wabenförmig verrippten Oberwerkzeugen zu kombinieren, um durch maximale Steifigkeit der Matrize eine definierte Anlagefläche zu gewährleisten (vgl. Arbeiten von Hohnhaus [Hoh99] und Häussermann [Häu02]).

7.2 Alternativen zur weiteren Vereinfachung

Um die Erfahrungen mit werkzeugintegrierten Blecheinzugssensoren und Aktuatoren während der Vielzahl von Großserienabpressungen mit Serienwerkzeugen weiter zu vertiefen, besteht die Möglichkeit, einzelne Aspekte dieser Arbeit separat umzusetzen.

Die präzise Erfassung des Einlaufverhaltens durch die vorgestellte Sensorik motiviert den matrizenseitigen Einsatz eines oder weniger Messaufnehmer in konventionellen Tiefziehwerkzeugen zur gezielten Prozessüberwachung. Bauteile, deren Umformergebnis bekanntermaßen stark vom Flanscheinlauf abhängt, lassen sich somit automatisch einer Qualitätskontrolle unterziehen. Weist der Messwert signifikante Abweichungen zu zuvor definierten Soll-Werten auf, gibt das System eine Warnmeldung für die Fertigungsmannschaft aus. Der Prozess ist zu überprüfen und gegebenenfalls neu zu justieren.

Ebenfalls ohne geschlossenen Regelkreis kommt die Verwendung weniger Gasdruckfedern zur gezielten Beeinflussung kritischer Bauteilbereiche aus. Bereits die Ergebnisse dieser Arbeit beim Werkzeugwechsel zwischen den drei Versuchspressen zeigen, dass die manuelle Anpassung und Druckabstimmung sehr schnell zum gewünschten Erfolg führt (vgl. Kapitel 5.4.2.4 und 7). Fertigungsfachmänner, denen bislang lediglich Ziehhilfen (vgl. Kapitel 2.2.2) zur Prozessbeeinflussung zur Verfügung standen, bieten die sich direkt im Kraftfluss befindlichen Kompaktstickstofffedern wesentlich diffizilere und lokalere Einstellungsmöglichkeiten. Um periphere Aufwendungen und Kosten (bspw. für eine Dosierstation) zu minimieren, reicht es in diesem Zusammenhang sogar aus, an dem Tiefziehwerkzeug ein Anschlusspanel zu montieren, von dem aus über Steckschnellkupplungen die Drücke der einzeln verschlauchten Gasfedern mit Hilfe eines Druckminderventils manuell eingestellt werden.

Bei zukünftig verstärkter Notwendigkeit der Regelung des Umformprozesses zu dessen Beherrschung und Stabilisierung sind neben der Einlaufwegsensorik flächig abtastende Qualitätsprüfsysteme [ELC00] von großer Bedeutung. Der essentielle Nachteil aller bislang bekannten Stoffflusssensoren besteht in ihrer punktuellen Aussagekraft. Zur Erfassung aller Bauteilbereiche ist deshalb eine Vielzahl von Messaufnehmern in einem Werkzeug zu integrieren. Durch bspw. Kamerasysteme, welche die Ziehteiloberfläche hinsichtlich Rissen oder/und Falten analysieren, lassen sich Sektoren mit Bauteilfehlern identifizieren und über diesen Bereichen zugeordneten Aktuatoren der Umformprozess lokal beeinflussen.

7.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Grundsätzlich ist ein Umformwerkzeug mit integriertem System aus Blecheinzugssensoren und einer Vielzahl Aktuatoren teurer als vergleichbare konventionelle Ziehwerkzeuge. Schöpft man jedoch Potentiale zur Verkürzung der Einarbeit und Vermeidung von Ausschuss sowie Stillstandszeiten während der Serienproduktion aus, lassen sich sogar Kostenvorteile erzielen.

Ausgehend von angenommenen, akzeptablen Marktpreisen eines standardisierten Blecheinzugssensors kostet das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Versuchsziehwerkzeug der Radhausschale mit vier Stoffflusssensoren und 16 Gasdruckaktoren ca. 145% des konventionellen Umformwerkzeuges.

Um den geleisteten Mehraufwand zumindest zu amortisieren, sind gegenüber dem Serienwerkzeug Einsparungen in Höhe von 40% des Einarbeitsaufwandes sowie 20% des Ausschusses und der Stillstandszeiten während der Serienproduktion erforderlich. Allerdings lassen die Ergebnisse der Inbetriebnahme des Versuchswerkzeuges (vgl. Kapitel 5.4.2.1) vermuten, dass mit dem definiert elastischen Niederhaltereinsatz mindestens 60% des Einarbeitsaufwandes entfallen und auch

während der Serienlaufzeit 40% Einsparungspotential gegenüber dem konventionellen Tiefziehwerkzeug besteht. Unter diesen Voraussetzungen erwirtschaftet das beim Bau des Versuchswerkzeuges zusätzlich eingesetzte Kapital bereits eine Rendite von 26%.

Etwas optimistischere Annahmen einer 70%igen Reduktion der Aufwendungen bei der Werkzeugeinarbeit, die Verminderung des Ausschusses und der Stillstandszeiten während der Serienproduktion um 50% sowie die Kosteneinsparung durch Materialreduktion aufgrund minimierter/optimierter Platinenzuschnitte (vgl. Kapitel 5.4.2.4) ergeben sogar eine Rendite von 135%.

Mehrinvest: 145%	**Annahmen**		**Ergebnis**
	Einsparpotential gegenüber dem Serienwerkzeug während der:		
Szenario	Einarbeit / Inbetriebnahme	Serienproduktion (Ausschuss, Stillstandszeiten usw.)	**Rendite des anfänglichen Mehrinvest über Laufzeit**
vorsichtig	40%	20%	2,5%
normal	60%	40%	26,0%
optimistisch zzgl. Platinenreduktion	70%	50%	135,0%

Tab. 7-1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand dreier Szenarien

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die steigende Komplexität bei der Herstellung von Karosseriebauteilen erfordert eine Erhöhung der Sicherheit, Stabilität und Robustheit des Umformprozesses. Der Einsatz höher- und höchstfester Werkstofflegierungen für konsequenten Leichtbau und verbessertes Crashverhalten stellt dabei nur einen Aspekt kleiner werdender Prozessfenster dar. Ein weiterer Grund für die erhöhte Sensibilität des Tiefziehvorganges gegenüber schwankenden Einflussparametern (Material, Schmierzustand, usw.) ist in den anspruchsvollen Bauteilformen und Designgeometrien zu sehen, welche dem verstärkten Kundenwunsch nach einer Differenzierung vom Wettbewerb Rechnung tragen. Vor diesem Hintergrund der beschriebenen Entwicklungstendenzen werden die Grenzen manueller Prozessführung deutlich spürbar und es wird nach neuen Wegen zur Umformprozesssicherung gesucht.

Ausgehend von dieser Problemstellung beschreibt die vorliegende Arbeit zunächst den Produktionsprozess von Karosseriebauteilen (vgl. Kapitel 2.1) sowie die dazu eingesetzte Maschinen- und Werkzeugtechnik in Großserienpresswerken (vgl. Kapitel 2.2) der deutschen Automobilindustrie. Im Anschluss daran findet die Diskussion von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen zu elastischen Werkzeugkonzepten (vgl. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2), dazu erforderlichen Pressenanlagen (vgl. Kapitel 2.3.3) und Prozessüberwachungssensoren (vgl. Kapitel 2.4) statt.

Ursachen, die bislang einen Transfer dieser Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis verhinderten, bilden die Motivationsgrundlage der vorliegenden Entwicklungsarbeit. So wird in diesem Beitrag ein neues Werkzeugkonzept (vgl. Kapitel 4.2) vorgestellt, welches unter Verwendung bestehender, einfachwirkender Pressenanlagen die gezielte, lokale Beeinflussung des Umformprozesses ermöglicht.

Zusätzlich ist ein im Bereich der Umformtechnik neuartiges, optisch messendes Sensorkonzept (vgl. Kapitel 4.1) beschrieben, welches zur hochpräzisen, berührungslosen Erfassung des Blecheinzugsverhaltens entwickelt und für den Einsatz in Tiefziehwerkzeugen angepasst wurde. In Analysen zur Messfähigkeit (vgl. Kapitel 5.4.1.1) bestätigt sich die hohe Präzision der matrizenseitig in das Umformwerkzeug integrierten Blecheinlaufwegsensoren und erste Untersuchungen zeigen weitergehende Potentiale der Informationen aus dem Geschwindigkeitsverlauf auf (vgl. Kapitel 5.4.1.2 und 6.4.2).

Die Herstellung des auf der neuen Werkzeugkonzeption basierenden, exemplarischen Versuchswerkzeuges einer Radhausschale erfolgte analog einer ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prozesskette. Dabei werden zunächst mit Hilfe von CAD-Wirkflächen aus der Werkzeugkonstruktion Umformsimulationen zur Identifikation der kritischen Bauteile und ihrer neuralgischen Zonen durchgeführt. Anschließende Modifikationen des Simulationsmodells dienen der Bestimmung von Anzahl

und Aufteilung einzelner Niederhaltersegmente zur gezielten, örtlichen Beeinflussung der Flächenpressung im Flanschbereich des Karosserieteils. Zukünftig lässt sich dieser Arbeitsschritt mit Hilfe von geeigneten Optimierungstools und selbständigen Vernetzungsalgorithmen automatisieren.

Nach erfolgreichem Abschluss der FEM-Tiefziehsimulationen findet auf Basis der entstandenen Blechhaltersegmentierung der Entwurf eines angepassten, definiert elastischen Werkzeuges statt. Dazu muss der Konstrukteur die Implementierung von definiert elastischen Einsätzen und zusätzlichen Aktuatoren (vorzugsweise Kompaktgasdruckfedern) an neuralgischen Stellen von Werkzeugen kritischer Karosseriebauteile vornehmen.

Solange ausreichendes Erfahrungswissen der Fertigungsmittelkonstrukteure fehlt, sollte die entworfene Konstruktion mittels Volumenmodellen in weiteren FEM-Analysen hinsichtlich ihrer ausreichenden Flexibilität untersucht werden. Des Weiteren empfiehlt es sich, die Dauerfestigkeit der elastisch hoch beanspruchten Werkzeugteile zu überprüfen.

Nach der detaillierten Konstruktion des Umformwerkzeuges findet schließlich der mechanische Aufbau des neuen Ziehwerkzeuges statt, bevor dessen Einarbeit im Rahmen einer strukturierten Inbetriebnahme erfolgt.

Speziell in diesem Bereich der Try-Out-Phase zeigen die experimentellen Analysen mit dem Versuchswerkzeug die Vorteilspotentiale aufgrund der Anpassungsfähigkeit sowie Flexibilität des definiert elastischen Werkzeugkonzeptes. Deutlich reduzierter Tuschieraufwand führt zu drastischen Verkürzungen der Anlaufzeit und damit zu einer schnelleren Inbetriebnahme neuer Tiefziehwerkzeuge (vgl. Kapitel 5.4.2.1). Beim Wechsel von Einarbeitspressen auf die Produktionsanlage sind weniger Korrekturschleifen erforderlich (vgl. Kapitel 5.4.2.4) und der Qualitätsaufwand (Nachtuschieren) während der laufenden Serienproduktion wird verringert.

Die werkzeugintegrierte Kombination aus zusätzlichen Aktuatoren mit definiert elastischen Niederhaltereinsätzen zur gezielten Verteilung der Ziehkissenkraft bietet außerdem erweiterte Anwendungsmöglichkeiten bei der Umformung von tailored blanks (vgl. Kapitel 5.4.2.4).

Zuletzt ergeben sich aus der Minimierung/Optimierung des Platinenzuschnittes (vgl. Kapitel 5.4.2.4) und der Vermeidung von Stillstandszeiten sowie Ausschussproduktion enorme Einsparungs- und Kostenpotentiale. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Möglichkeiten zur Verknüpfung von den mit Hilfe der Sensorik gemessenen Blecheinlaufwegen und der Ansteuerung der Kompaktstickstofffedern zu einem geschlossenen Regelkreis (vgl. Kapitel 6) untersucht. Vor allem die Erhöhung der Prozessstabilität bei schwankenden Prozessparametern

durch die gezielte, lokale Verteilung der Flächenpressung ist in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung.

Aufgrund der Tatsache, dass die durchgeführten Untersuchungen mit dem definiert elastischen Niederhalterwerkzeug alle erwarteten Vorteile bestätigten, wurden am Ende des vorliegenden Beitrages Möglichkeiten zum Transfer der Verbesserungspotentiale in kommende Serienwerkzeuge diskutiert (vgl. Kapitel 7.1). Dabei fanden vor allem Kostenrestriktionen sowie die Minimierung des konstruktiven und bedientechnischen Aufwandes Berücksichtigung. Die Umsetzung partieller Lösungen sowie die separate Nutzung einzelner Ergebnisaspekte (bspw. Sensoren ausschließlich zur Prozessüberwachung, vgl. Kapitel 7.2) dienen der Absicherung der Serientauglichkeit von werkzeuginternen Messsystemen und Aktuatoren.

Zukünftige Arbeiten sollten sich ferner mit der Weiterentwicklung der Sensorik und ihrer erforderlichen Peripherie beschäftigen. Durch die hardwareseitige Codierung der Bildverarbeitungsalgorithmen in einem digitalen Signalprozessor (DSP) ließe sich eine Miniaturisierung des Messkopfes sowie eine Reduktion der erforderlichen Anzahl an Auswertungsrechnern erreichen. Des Weiteren ist aus Sicht eines Presswerkes eine robustere Bauweise der Messaufnehmer zu entwickeln. Vor allem die Abdichtung gegenüber Wasser und Öl stellt eine Herausforderung dar, die für planmäßige Werkzeugwäschen mit Dampfstrahlern im Rahmen vorbeugender Instandhaltung unerlässlich ist.

In Bezug auf geschlossene, vollautomatische Regelkreise für den Umformprozess sind die Entwicklungen flächig abtastender Qualitätsprüfsysteme voranzutreiben. Sie zeichnen sich gegenüber allen bislang bekannten Stoffflusssensoren mit lediglich punktueller Aussagekraft durch die Analyse der gesamten Ziehteiloberfläche hinsichtlich Rissen oder/und Falten aus. Fehlstellen lassen sich in Sektoren einordnen und mit Hilfe von Aktuatoren zur lokalen Beeinflussung des Umformprozesses, welche diesen Bereichen zugeordnet sind, vermeiden.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Zitierte Quellen

[AGHH03] Altner, Werner; Girschewski, Bardo; Hadrys, Hans-Jochem; Hirmer, Karl
Blechumformwerkzeug
Offenlegungsschrift: DE 103 31 939 A1, Anmeldetag: 15.07.2003

[Bag04] Baggen, Harry
Licht steuert Mäuse
elektor 2004 Heft 4 S. 32-33

[Bec00] Beck, Steffen
Steuerung des Ziehprozesses durch aktive Ziehsicken
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ Fellbach 2000

[Bec04] Beck, Steffen
Optimierung der Zargenspannung beim Ziehen unregelmäßiger Blechformteile
Stuttgart, Univ., Diss. 2004

[Beh05] Behrens, Bernd-Arno
Hin zum perfekten Bauteil
MM Maschinen Markt 16 (2005) S. 28-29

[Bet93] Beth, Matthias
Untersuchung zum Rückfederungsverhalten von Feinblechen bei Tief- und Streckziehvorgängen
Darmstadt, PtU, Diss. 1993

[Bie91] Bielfeldt, F.B.
Ausgeführte hydraulische Zieheinrichtungen der Firma Dieffenbacher und Zielsetzungen für die Zukunft
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung“, Stuttgart 1991

[Bra96] Brand, Stefan
Piezoelektrische Aktoren in Fertigungssystemen
Hannover, Univ., Diss. 1996
Fortschritt-Bericht VDI Reihe 2 Nr. 390, Düsseldorf: VDI Verlag 1996

[Bra00] Braess, Hans-Hermann
„Das Original“ Die BMW 3er-Reihe: Konzept, Technik, Design
BMW Group Mobile Tradition, ISBN 3-932169-06-9, Bosch Druck, Landshut/Ergolding

[Brä99] Bräunlich, Hans
Auf dem Weg zum beherrschten Tiefziehprozess
Tagungsband „Prozesssicherheit in der Blechbearbeitung“, Chemnitz 1999

[Brä02] Bräunlich, Hans
Blecheinzugsregelung beim Tiefziehen mit Niederhalter – ein Beitrag zur Erhöhung der Prozessstabilität
Chemnitz, TU, Diss. 2002

[Bud39] Budd, Edward G.
Verfahren und Vorrichtung zum Pressen großer, unregelmäßig gestalteter Blechteile, z.B. Kotbleche für Kraftwagen
Deutsche Patentschrift Nr.: 681 196, Anmeldetag: 24.08.1939

[Che91] Cherek, Hartmut
Ziehkissen an hydraulischen und mechanischen Pressen
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung“, Stuttgart 1991

[DCK00] Descamps, R.; Chamont, B.; Kergen, R.
Regelung der Niederhalterkraft beim Tiefziehen – Anwendungen an einem kritischen industriellen Teil
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ Fellbach 2000

[DS93] Doege, Eckart; Stock, Guido
Geregelter Tiefziehprozess mit verriegeltem Werkzeug ohne Ziehapparat
Blech Rohre Profile 40 (1993) Heft 2 S. 149-155

[ELC00] o.V.
Der schmale Grat
Fa. ELCO-PRO Pressemitteilung, Blech 7 (2000) S. 167

[Ele01] Elend, Lutz-Eike
Einsatz elastischer Niederhaltersysteme zur Erweiterung der Prozessgrenzen beim Tiefziehen
Hannover, Univ., Diss. 2001, Düsseldorf: VDI Verlag 2002

[Fib05] o.V.
Kompakt-Gasdruckfeder: 2490.12.11800
Produktkatalog Fa. Fibro

[For00] Forstmann, Ute
Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzuges beim Tiefziehen
Berlin, TU, Diss. 2000

[Gir04] Girschewski, Bardo
Optimierung des Umformprozesses ziehkritischer Blechteile
München, TU, Diss. 2004, Hieronymus 2004

[Gra85] Grahnert, R.
Reibungsverhältnisse im Flanschbereich beim Tiefziehen rechteckiger Ziehteile
Fortschritt-Bericht VDI Reihe 2 Nr. 105, Düsseldorf: VDI-Verlag 1985

[Gri99] Griesbach, Bernd
In-Prozess Stoffflussmessung zur Analyse und Führung von Tiefziehvorgängen
Hannover, Univ., Diss. 1999, Düsseldorf: VDI Verlag 2000

[Hah00_a] Hahn, Martin
FE-Simulation von Standardsicken
Interne Veröffentlichung, BMW Group, München 2000

[Hah04] Hahn, Martin
Beurteilung der Ausprägung von Anhau- und Nachlaufkanten
München, TU, Diss. 2004, Hieronymus 2004

[Hal04] Haller, Dirk
Ziehwerkzeuge mit steuerbaren Stickstoffzylindern
Stuttgart, Univ., Diss. 2004

[Häu00] Häussermann, Markus
Vielpunktziehtechnik – Möglichkeiten und Werkzeuggestaltung
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 2000

[Häu01] Häussermann, Markus
Weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Gestaltung von Umformwerkzeugen
EFB-Forschungsbericht Nr. 152, Hannover 2001

[Häu02] Häussermann, Markus
Zur Gestaltung von Tiefziehwerkzeugen
Stuttgart, Univ., Diss. 2002

[Hes95] Hesberg, Ulrich
Auslegung konischer Tiefziehteile mit elementaren Methoden
Hannover, Univ., Diss. 1995, Düsseldorf: VDI Verlag 1996

[Hof91] Hoffmann, Hartmut
Vergleichende Untersuchungen über hydraulische und pneumatische Zieheinrichtungen
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung“, Stuttgart 1991

[Hoh98] Hohnhaus, Jürgen
Optimierung des Systems Zieheinrichtung/Werkzeug
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 1998

[Hoh99] Hohnhaus, Jürgen
Optimierung des Systems Vielpunkt-Zieheinrichtung/Werkzeug
Stuttgart, Univ., Diss. 1999

[HS00] Hohnhaus, Jürgen; Schöllhammer, D.
Ganzheitliche Betrachtung des Systems Presse/Werkzeug zur Herstellung von Karosserieteilen
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 2000

[Hyd04] o.V.
electronic shimming
Fa. Hydraulico, Company presentation, http://www.hydraulico.com/knowledge_base/seminar2004/hydr_presentation.pdf

[KDT96] Kergen, Richard; Dauby, Bernard; Traversin, Marc
Regelbarer Niederhalter: Ein System, das eine unabhängige Regelung der Niederhalterkraft an verschiedenen Stellen des Niederhalters ermöglicht
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 1996

[Kla94] Klamser, Martin
Ziehen von Blechformteilen auf einfachwirkenden Pressen mit hydraulischer Zieheinrichtung im Pressentisch
Stuttgart, Univ., Diss. 1994

[Kor94] Korneffel, Burghard
Verfahren zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit
Offenlegungsschrift: DE 44 44 661 A1, Anmeldetag: 15.12.1994

[Kor96] Korneffel, Burghard; Korneffel, Martin
Vorrichtung und Verfahren zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit
Offenlegungsschrift: DE 196 50 177 A1, Anmeldetag: 04.12.1996

[Lan90] Lange, Kurt
Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft
Bd. 3 Blechbearbeitung, Berlin: Springer Verlag 1990

[LSS93] Liewald, Mathias; Spur, Günter; Straube, Oliver
Verfahren zum Betreiben von Ziehpressen sowie hierzu geeignete Ziehpresse
Patentschrift: DE 43 38 828 C2, Anmeldetag: 13.11.1993

[Lüd04] Lüdke, Bruno
Der Bedarf an hochfesten Stählen in der Fahrzeuganwendung – Motivation und Strategie aus Sicht eines OEM
Tagungsband „Processing State of the Art Multi-Phase Steels“,
Berlin 2004

[Mei05] Meiler, Markus
Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk
Erlangen, Univ., Diss. 2005, Meisenbach Verlag Bamberg 2005

[NKSl01] Neugebauer, Reimund; Klose, Lutz; Siegert, Klaus; Ioussoupow, Artem
Einfluss von Vielpunktziehapparate-Bauweisen auf die Eliminierung von Ziehstäben bei Tiefziehwerkzeugen
EFB-Forschungsbericht Nr. 165, Hannover 2001

[Oeh60] Oehler, G.
Der Einbau hydraulisch gesteuerter Druckelemente zur Veränderung des Ziehwulstdruckes während der Blechumformung
Werkstatt und Betrieb 93 (1960) Heft 5 S. 271-272

[Pah93] Pahl, Klaus-Jürgen
Elastische Wechselwirkungen im Ziehapparat einfachwirkender Pressen
Kassel, Univ., Diss. 1993

[Pil97] Pilkey, Walter D.
Peterson's stress concentration factors
John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-53849-3, New York: 1997

[Rex05] Rexroth (Bosch Group); Langenstein, Christian
Bericht zur Simulation einer Ziehpresse 160t für BMW
Projektdokumentation Nr.: ENA 21-0506-080-A, Version 22.06.2005

[Rit05] Rittmeier, Sebastian
Strukturierte Inbetriebnahme neuer Ziehwerkzeuge durch Systemunterstützung bei der Umformung
Tagungsband „Sächsische Fachtagung für Umformtechnik", Dresden 2005

[RM05] Roloff, Hermann; Matek, Wilhelm
Maschinenelemente
(Normung, Berechnung, Gestaltung und Tabellen) 17. Auflage
Vieweg Verlag 2005

[Ruz99] Ružovič, Martin
Diagnose und Korrektur von Umformprozessen im Rahmen der In-Prozess-Qualitätssicherung
Zürich, ETH, Diss. 1999, Düsseldorf: VDI Verlag 2000

[Sch91] Schneider, Franz
Ausgeführte hydraulische Zieheinrichtungen der Firma Schuler und Zielsetzungen für die Zukunft
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung", Stuttgart 1991

[Sch96] o.V.
Handbuch der Umformtechnik
Fa. Schuler, Berlin: Springer Verlag 1996

[Sch03] o.V.
Hydraulische Pressenlinie zur Herstellung von Edelstahlspühlbecken
Fa. Schuler, Kundenpräsentation über Fa. FRANKE Küchentechnik AG, Aarburg, Schweiz

[Sch06] Schatz, Marko
Regelung des Werkstoffflusses in Niederhaltersystemen von Zieh- und Nachformwerkzeugen durch Piezo-Aktoren
EFB-Forschungsprojekt Nr.: AiF 14443 BR

[Schl96] Schlegel, Michael
Gesteuerte Stickstofffedersysteme für Tiefziehwerkzeuge
Stuttgart, Univ., Diss. 1996

[Sei02] Seidel, H.-J.
Visualisierung des Umformprozesses als Voraussetzung zur Prozessregelung
Arbeits- und Ergebnisbericht „Fertigen in Feinblech“, Hannover 2002

[Sie98] Siegert, Klaus
Entwicklungen und Tendenzen bei der Herstellung von Blechformteilen
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ Fellbach 1998

[Sie00] Siegert, Klaus
Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Blechumformung am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ Fellbach 2000

[SK91] Siegert, Klaus; Klamser, Martin
Hydraulische Vielpunktzieheinrichtungen im Pressentisch einfach-wirkender Pressen
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung“, Stuttgart 1991

[Som86] Sommer, Norbert
Niederhalterdruck und Gestaltung des Niederhalters beim Tiefziehen von Feinblechen
Hannover, Univ., Diss. 1986, Düsseldorf: VDI Verlag 1986

[Spu85] Spur, G.
Handbuch der Fertigungstechnik
Band 2/3, München, Wien: Carl Hansen Verlag 1985

[Sto95] Stock, Guido
Alternative Verfahren zur Verbesserung des Tiefziehergebnisses auf einfachwirkenden Pressen
Hannover, Univ., Diss. 1995, Düsseldorf: VDI Verlag 1996

[Str94] Straube, Oliver
Untersuchungen zum Aufbau einer Prozessregelung für das Ziehen von Karosserieteilen
Berlin, TU, Diss. 1994, Wien: Hanser Verlag 1994

[STS88] Story, J. M.; Trageser, A. B.; Smith, G. L.
Blankholder for a draw press
United States Patent, Nr.: 4,745,795, erteilt am: 24.05.1988

[Tes05] o.V.
Elektropneumatischer Druckregler ER 3000
http://www.tescom-europe.com/fileadmin/pdf/1361_ER3000.pdf
Produktprogramm Fa. TESCOM EUROPE

[Tho91] Thoms, Volker
Anforderungen an die Umformstufe der Maschinen in der Blechumformung (speziell Karosseriebau)
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung“, Stuttgart 1991

[Tho93] Thoms, Volker
Anpassung der Werkzeugsysteme zur Blechumformung an die Umformmaschine
Blech Rohre Profile 40 (1993) Heft 5 S. 375-378

[Tho04] Thoms, Volker
Werkzeugtechnik
(Dresden, TU, Vorlesungsscript 2004)

[Tsc97] Tschätsch, H.
Praxiswissen Umformtechnik
5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag 1997

[Wit80] Witthüser, Klaus-Peter
Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen
Hannover, Univ., Diss. 1980

[XBW98] Xu, S.G.; Bohn, M.L.; Weinmann K.J.
Steuerbare Ziehsicken für Ziehwerkzeuge
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ Fellbach 1998

[Yun05] Yun, Jae-Woong
Stoffflussregelung beim Tiefziehen mittels eines optischen Sensors und eines Fuzzy-Reglers
Hannover, Univ., Diss. 2005, Garbsen: PZH Verlag 2005

[Z_b98] Ziegler, M.
Prozessregelung zur Regelung der Reibkraft
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 1998

[Zha92] Zharkov, V. A.
Diffenzierter Blechandruck beim Tiefziehen
Bänder, Bleche, Rohre 9 (1992) S. 30-32

[Zün69] Zünkler, B.
Der Einfluss der Elastizität auf Bewegung und Kraft des Blechhalters beim Tiefziehen
Werkstatt und Betrieb 102 (1969) Heft 12 S. 885-887

9.2 Zusätzliche Literatur

[BGT90] Bauer, Dietrich; Gücker, Gerhard; Thor, Reinhold
Rechnergesteuerter Niederhalterdruck optimiert das Tiefziehen
Bänder Bleche Rohre 1990 Heft 5 S. 50-54

[Bie89] Bielfeldt, F.B.
Hydroelastische Tiefziehtechnik
wt Werkstattstechnik 79 (1989) S. 573-576

[DFKB71] Doege, Eckart; Fetzer, H.; Kellenbenz R.; Bergmann, E.
Tiefziehen auf einfach- und doppeltwirkenden Karosseriepressen unter Berücksichtigung des Gelenkantriebs
Werkstatt und Betrieb 104 (1971) Heft 10 S. 737-747

[DIN8584-3] o.V.
Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, Teil3: Tiefziehen
Berlin: Beuth Verlag 1971-04

[DIN8585-4] o.V.
Fertigungsverfahren Zugumformen, Teil4: Tiefen
Berlin: Beuth Verlag 1971-04

[DIN EN ISO 9000] o.V.
Qualitätsmanagement-, Qualitätssicherungsnormen, Leitfaden zur Auswahl und Auslegung
Berlin: Beuth Verlag 1990

[DIN19226] o.V.
Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Teil 1 bis 6
Berlin: Beuth Verlag 1994

[DS83] Doege, Eckart; Sommer, Norbert
Optimierung der Niederhalterkraft beim Tiefziehen rechteckiger Teile
Stahl und Eisen 103 (1983) Nr. 3 S. 139-142

[DS87] Doege, Eckart; Sommer, Norbert
Der Niederhalterdruck beim Tiefziehen nichtrotationssymmetrischer Ziehteile
Stahl und Eisen 107 (1987) Nr. 8 S. 345-350

[Gro56] Groß, H.
Der „unstarre“ Faltenhalter und seine praktische Anwendung
Fertigungstechnik 6 (1956) Heft 10 S. 456-459

[Gro57] Groß, H.
Der Niederhalter und seine Anwendung beim Tiefziehen
Fertigungstechnik 7 (1957) Heft 5 S. 235-238

[Hah00_b] Hahn, Martin
Untersuchungen zu Rechtecksicken
Interne Veröffentlichung, BMW Group, München 2000

[Hal00] Haller, Dirk
Steuerbare Stickstofffedersysteme für den Werkzeugbau
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ Fellbach 2000

[NHR02] Neugebauer, Reimund; Hupfer, Peter; Riedel, Mathias
Simulation des Betriebsverhaltens von Zieheinrichtungen in Tiefziehpressen
UTF science I/2002 S. 4-9

[Oeh74] Oehler, G.
Zur Regelung des Niederhalterdruckes während des Tiefziehens
Blech Rohre Profile 21 (1974) Heft 9 S. 316-319

[PGS91] Petter, W.; Geist, Gr.; Schlag, A.
Energiesparende Zieheinrichtung mit prozeßgerechter Mehrpunktsteuerung
Tagungsband „Zieheinrichtungen einfachwirkender Pressen für die Blechumformung“, Stuttgart 1991

[SL02] Schumacher, W.; Leonhard, W.
Grundlagen der Regelungstechnik
Braunschweig, TU, Vorlesungsscript 2002

[Sch93] Schlitt, Herbert
Regelungstechnik
Physikalisch orientierte Darstellung fachübergreifender Prinzipien
Würzburg: Vogel Verlag 1993

[SLB89] Schnupp, Konrad; Loster, Peter; Billinger, Alfons
Flink und genau – Hydroelektronisches Regeln von Drücken am Beispiel des Tiefziehens
MM Maschinenmarkt 95 (1989) 4 S. 2-6

[SZ_a96] Siegert, Klaus; Ziegler, M.
Schwingungsüberlagerte Niederhaltekraft
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 1996

[SZ_b96] Siegert, Klaus; Ziegler, M.
Geschlossener Regelkreis beim Tiefziehen
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 1996

[Str99] Straub, S.
Prozesssicherheit, ein Kosten-, Qualitäts- und Produktivitätsfaktor
Tagungsband „Prozesssicherheit in der Blechbearbeitung“, Chemnitz 1999

[Z_a98] Ziegler, M.
Schwingender Niederhalter
Tagungsband „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 1998