

Berücksichtigung formänderungsbedingter Effekte  
(Rückfederung) im Entwicklungsprozeß der  
Methodenplanung von tiefgezogenen Karosseriebauteilen

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz

von	Dipl.-Ing. Philipp Weigert
geboren am	13.11.1973 in Hamburg
eingereicht am	14.12.2009

Chemnitz, den 14.Dezember 2009

# Impressum

## **Berücksichtigung formänderungsbedingter Effekte (Rückfederung) im Entwicklungsprozess der Methodenplanung von tiefgezogenen Karosseriebauteilen**

### **Autor:**

Dipl.-Ing. Philipp Weigert

### **Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Reimund Neugebauer

### Wichtiger Hinweis:

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

**Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation  
sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.**

**The results, opinions and conclusions expressed in this thesis  
are not necessarily those of Volkswagen AG.**

© 2010 Fraunhofer-Institut für  
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU  
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz

Verlag Wissenschaftliche Scripten  
[www.verlag-wiss-scripten.de](http://www.verlag-wiss-scripten.de)

ISBN: 978-3-942267-07-6

# Bibliografische Beschreibung

Weigert, Philipp:

Berücksichtigung formänderungsbedingter Effekte (Rückfederung) im Entwicklungsprozeß der Methodenplanung von tiefgezogenen Karosseriebauteilen

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Chemnitz, 2009.

112	Seiten
49	Abbildungen
13	Tabellen
7	Anlagen
102	Quellen

## Referat

Steigende Anforderungen an die Paßgenauigkeit von tiefgezogenen Karosseriebauteilen stellen in Zukunft neue Herausforderungen an die Automobilhersteller dar. Das Tiefziehen ist unter den blechverarbeitenden Herstellungsverfahren das Bedeutendste, da geometrisch komplexe Formen in hoher Stückzahl in anhaltend guter Qualität hergestellt werden. Rückfederungserscheinungen nach dem Entlasten der Werkzeuge sind prozessbedingt nicht vermeidbar. Die virtuelle Optimierung der Karosseriebauteile und der Herstellungsmethode ist notwendig, um der Forderung des Einsatzes von hoch- und höchstfesten Blechwerkstoffen gerecht zu werden. Bei steigender Werkstoffgüte erhöhen sich auch die Rückfederungserscheinungen, welche kostenintensive Einarbeitungsschleifen zur Folge haben, wenn die Rückfederungseffekte nicht direkt bei der Konzeption von Bauteil und Herstellungsmethode mit berücksichtigt werden. Es wird ein Konzept vorgestellt Rückfederungserscheinungen bei der Auslegung der Bauteilgeometrie zu optimieren, um danach in einem zweiten Schritt bei der Festlegung der Herstellungsmethode die voraus berechneten maßlichen Abweichungen durch eine Wirkflächenkompensation bestmöglich zu reduzieren.

## Schlagnworte

Rückfederung, tiefgezogene Karosseriebauteile, Tiefziehen, numerische Simulation, numerische Optimierung, Finite-Elemente-Simulation, Methodenplanung

Für meine Eltern.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Methodenplanung der Produktionsplanung bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Neugebauer, dem Leiter des Fraunhofer Institutes für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik. Weiterhin bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Michael, Herrn Dr. Sterzing, Herrn Dr. Kunke und Herrn Dr. Bräunlich, mit deren Unterstützung, verbunden mit vielen fachlichen Diskussionen, die wissenschaftliche Basis der Dissertation begründet worden ist.

Ein besonderes Dankeschön spreche ich Herrn Prof. Dr. Hoffmann vom UTG München für die Betreuung der Arbeit und seine gutachterliche Tätigkeit aus.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Voelkner danke ich herzlich für die Zusammenarbeit, die Anregungen und Korrekturen, welche maßgeblich dazu beigetragen haben, die Dissertation promotionswürdig zu gestalten.

Weiter möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Stalman für das entgegengebrachte Vertrauen, die fachlichen Diskussionen und Anregungen bedanken. Die Umsetzung des Versuchswerkzeuges wäre ohne seine Unterstützung und die Hilfe von Herrn Dr. Pfister in der Form nicht möglich gewesen, was meine besondere Anerkennung und Hochachtung verdient. Ein Dankeschön möchte ich den Kollegen der Methodenplanung aussprechen, welche mir immer mit Rat und Tat und Unterstützung zur Seite standen. Ein besonderen Dank möchte ich Herrn Dr. Hubert Verhoeven widmen, welcher mich mit seinen fachlichen Beiträgen und inhaltlichen Gesprächen über den gesamten Zeitraum äußerst positiv begleitet hat. Für die tatkräftige Unterstützung bei der Fertigstellung der Versuchsbau- teile möchte ich mich bei Herrn Weitzbrich aus dem Preßwerk Wolfsburg bedanken, den Mitarbeitern von Herrn Gerlach, die das Versuchswerkzeug intensivst begleitet haben, sowie bei Herrn Wieland vom Laserzentrum und den Herren Schäfer und Büllsbach, welche die Digitalisierung der Bauteile unkompliziert ermöglicht haben.

Ein weiteres Dankeschön möchte ich an die Firmen GNS, Fe-Design, ICAPP und INPRO richten, die mich mit Hilfestellungen gerne bereitwillig unterstützt haben. Ein besonderes Dankeschön geht an meine Familie und meine Freunde, welche mich mit zahlreichen Gesprächen und Hilfestellungen beim Erstellen der Dissertation sehr unterstützt haben.

Wolfsburg, Dezember 2009

Philipp Weigert



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	8
Kurzzeichenverzeichnis . . . . .	10
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	12
<b>1. Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>15</b>
2.1. Tiefziehen und Rückfederung bei der Herstellung von Karosseriebauteilen	15
2.1.1. Maßliche Abweichungen beim Tiefziehen . . . . .	15
2.1.2. Ursachen der Rückfederung . . . . .	16
2.1.3. Stellgrößen zur Beeinflussung der Rückfederung . . . . .	17
2.1.4. Rückfederungsbetrachtung im derzeitigen Einsatz . . . . .	18
2.1.5. Rückfederungsberechnung im derzeitigen Einsatz . . . . .	18
2.1.6. Bedarf, maßliche Abweichungen einstellen zu können . . . . .	19
2.1.7. Notwendigkeit, maßliche Abweichungen im Vorweg zu berechnen	19
2.2. Beschreibung von Werkstoffeigenschaften . . . . .	20
2.2.1. Aufnahme von Werkstoffkennwerten . . . . .	20
2.2.2. Einfluß der Werkstoffgüte auf die Rückfederung . . . . .	21
2.2.3. E-Modul . . . . .	21
2.2.4. Stoffmodell . . . . .	22
2.2.5. Fließkriterium . . . . .	23
2.2.6. Werkstoffverfestigungsmodelle . . . . .	26
2.2.7. Fließkurvenextrapolation . . . . .	27
2.3. Simulation . . . . .	28
2.3.1. Die Solverwahl . . . . .	29
2.3.2. Integrationsmethode . . . . .	29
2.3.3. Rezoning oder adaptive Netzverfeinerung . . . . .	31
2.3.4. Kontakt . . . . .	32
2.3.5. Tribologie und Reibung . . . . .	32
2.3.6. Kompensation von Werkzeugwirkflächen . . . . .	35

2.3.7. Ziehleistenersatzmodell . . . . .	37
2.4. Zusammenfassung Stand der Technik . . . . .	39
<b>3. Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>40</b>
3.1. Zielsetzung . . . . .	40
3.2. Abgrenzung . . . . .	40
3.3. Vorgehensweise . . . . .	41
<b>4. Neue Methoden zur Verringerung der maßlichen Abweichungen</b>	<b>42</b>
4.1. Vorstellung des Gesamtkonzeptes/ Regelkreis der Rückfederung . . . . .	42
4.2. Bauteilgeometriebezogene Bewertung ohne Betrachtung des Fertigungsprozesses . . . . .	43
4.2.1. Energie-Verschiebungs-Steifigkeitszusammenhang . . . . .	43
4.2.2. Vergleich des Rückfederungsverhaltens gezogener U-Profilvarianten	49
4.3. Ziehanlagenbezogene Rückfederungsoptimierung auf Basis einer Ziehanlage	50
4.3.1. Ablauf der Prozeßkette zur Optimierung einer Ziehanlage . . . . .	50
4.3.2. Bewertung von Rückfederung . . . . .	51
4.3.3. Flächennormierte Auswertung maßlicher Abweichungen . . . . .	55
4.3.4. Proportionalität zwischen maßlichen Abweichungen und Rückfederungsenergie . . . . .	55
4.3.5. Vorteil der Energiemethode . . . . .	57
4.3.6. Unschärfe bei der Beurteilung von Rückfederungssimulationen .	57
4.3.7. Ablauf der Prozeßkette zur Kompensation einer Ziehanlage . . .	60
4.3.8. Übertragung in methodenplanerische Herstellungskonzepte . . .	60
4.4. Zusammenfassung . . . . .	61
<b>5. Umsetzung der Maßnahmen</b>	<b>62</b>
5.1. Optimierung einer Bauteilgeometrie . . . . .	62
5.1.1. Vorstellung des Bauteils . . . . .	63
5.1.2. Eingebrachte Versteifungssicken . . . . .	63
5.1.3. Rückfederungsverhalten des Referenzbauteils . . . . .	63
5.1.4. Bewertung des Rückfederungsverhaltens auf Basis der Bauteilgeometrie . . . . .	64
5.1.5. Rückfederungsverhalten aus dem Tiefziehprozeß . . . . .	67
5.1.6. Fazit der Bauteilgeometriebewertung . . . . .	69
5.2. Optimierung der Ziehanlage . . . . .	69
5.2.1. Vorstellung des Bauteils . . . . .	71

5.2.2.	Optimierungsberechnung des Versuchswerkzeugs Längsträger PQ-Mix . . . . .	73
5.2.3.	Versuchswerkzeug Längsträger PQ-Mix . . . . .	77
5.3.	Zusammenfassung . . . . .	82
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>84</b>
<b>A.</b>	<b>Anlagen</b>	<b>86</b>
A.1.	Ergebnisse im Vergleich der maßlichen Abweichungen zwischen Versuch und Serie . . . . .	86
A.2.	Lüdersband . . . . .	88
A.3.	Verwendete Software . . . . .	88
A.4.	Differentialgleichungsentwicklung von Optimus . . . . .	89
A.4.1.	Algorithm Introduction . . . . .	89
A.4.2.	Algorithm of Differential Evolution . . . . .	89
A.4.3.	Parameter Choosing . . . . .	90
A.5.	Verwendete Werkstoffe . . . . .	91
A.5.1.	Tiefziehstahl DX54D . . . . .	91
A.5.2.	Tiefziehstahl H260LAD . . . . .	92
A.6.	Programmierarbeit . . . . .	93
A.6.1.	Geradengleichung . . . . .	93
A.6.2.	Winkel zwischen zwei Geraden . . . . .	93
A.6.3.	Ebenengleichung . . . . .	93
A.6.4.	Elementflächenberechnung . . . . .	94
A.6.5.	Normalenberechnung . . . . .	94
A.6.6.	Abstandsberechnung . . . . .	94
A.6.7.	Autopositionierung . . . . .	95
A.7.	Optimierungskette . . . . .	95
A.7.1.	Datensatzinhalt . . . . .	95
A.7.2.	Ablauf Simulationskette . . . . .	96
A.7.3.	Auswertung der Rückfederung . . . . .	97
A.7.4.	Eingangsdatenerstellung zur Berechnung der Rückfederungsenergie	97

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Entwicklung des Stahl- und Aluminiemeinsatzes im Karosseriebau [97] . . . . .	19
2.2. Rückfederung am offenen Kopf des hinteren Längsträgers der PQ46 . . . . .	20
2.3. Rückfederung in Abhängigkeit von $R_{p0,2}$ [41] . . . . .	22
2.4. Stoffmodelle für große plastische Formänderungen [41] . . . . .	23
2.5. Fließbedingung des Corus-Vetger-Modells nach [25] . . . . .	25
2.6. Werkstoffverfestigungsmodelle [89] . . . . .	26
2.7. Unterschiedliche Extrapolationsverfahren der Meßwerte zur Festlegung der Fließkurve . . . . .	27
2.8. Glättungsfaktor beim Vorzeichenwechsel der Reibkraft . . . . .	34
2.9. Schematische Darstellung von Rückfederung und Kompensation am Bei- spiel eines tiefgezogenen und beschnittenen Profils . . . . .	35
2.10. Ziehleiste in einem Werkzeug . . . . .	38
4.1. Regelkreis der Rückfederung . . . . .	42
4.2. Verringerung der Rückfederung durch Erhöhung der Steifigkeit . . . . .	43
4.3. U-Profile unter Einheitsbelastungen . . . . .	44
4.4. U-Profile mit versteifenden Sicken . . . . .	45
4.5. 4 Profile mit unterschiedlichen Versteifungen . . . . .	45
4.6. Schnitt durch in U-Profil eingebrachte Sicke . . . . .	46
4.7. Lagerung der U-Profile . . . . .	46
4.8. Lastfall 1 & 2 der Profile . . . . .	47
4.9. Ergebnisse Lastfall 1 (Verschiebung): Energie Mod 0, 1, 2 und 3 . . . . .	48
4.10. Ergebnisse Lastfall 2 (Verdrehung): Energie Mod 0, 1, 2 und 3 . . . . .	49
4.11. Unterschiedliche maßliche Abweichungen . . . . .	52
4.12. Ausschnitt aus einem Profil mit schwarz gekennzeichneten Zwangsbedin- gungen . . . . .	53
4.13. Netzkonvertierung zur strukturmechanischen Simulation . . . . .	54
4.14. Zusammenhang Rückfederungsenergie und maßliche Abweichungen am Beispiel des Längsträgers PQ-Mix bei 160 Simulationen . . . . .	56

4.15. Numerische Abweichungen der Rückfederungsauswertung: Abweichungen am unteren Totpunkt Beispiel der Frontklappe innen . . . . .	58
4.16. Numerische Abweichungen der Rückfederungsauswertung: Rückfederung am Beispiel der Frontklappe innen . . . . .	59
5.1. Frontklappe VW EOS . . . . .	62
5.2. Zusätzliche Sicken Frontklappe EOS . . . . .	63
5.3. Rückfederung Referenzbauteil Frontklappe innen VW Golf 5 . . . . .	64
5.4. Lastfall der Bauteilgeometriebewertung Frontklappe innen VW EOS . . .	65
5.5. Durch Zwangsverschiebungen berechnetes Deformationsbild Frontklappe innen VW EOS . . . . .	65
5.6. Energetischer Zustand, Frontklappe innen VW EOS . . . . .	66
5.7. Fertigungsfolge Frontklappe innen VW EOS . . . . .	67
5.8. Rückfederung der Ausgangs CAD-Geometrie der Frontklappe innen VW EOS . . . . .	68
5.9. Ablauf beim Kompensieren einer Ziehanlage . . . . .	70
5.10. Ziehanlage Längsträger PQ-Mix und Platinenoptimierung . . . . .	72
5.11. Unschärfe bei der Beurteilung von Rückfederungen am Längsträger PQ-Mix	73
5.12. Ziehparameter: 10 Ziehleisten und Blechhalterkraft . . . . .	74
5.13. Rückfederungsenergie der CAD-Wirkflächen über 12 Iterationen . . . . .	74
5.14. Rückfederungsenergie aller Wirkflächenoptimierungen im Durchschnitt .	75
5.15. Berechnete maßliche Abweichungen der Ziehanlage auf Basis der CAD-Daten und der ersten und zweiten Kompensation . . . . .	76
5.16. Darstellung der Rückfederung und Kompensation beim Längsträger . . .	77
5.17. Herstellung von Bauteilen mit kompensiertem Versuchswerkzeug . . . . .	78
5.18. Laserbeschneiden der Zienteile . . . . .	79
5.19. Digitalisierung der matrizenseitigen Oberfläche . . . . .	80
5.20. Anordnung der 20 Messpunkte . . . . .	81
5.21. Maßliche Abweichung der 20 Messpunkte . . . . .	82
5.22. Vergleich der maßlichen Abweichung aus Kompensations- und Serienwerkzeug und Simulation . . . . .	83
A.1. Das Lüdersband beim Zugversuch . . . . .	88
A.2. Elementfläche . . . . .	94

# Kurzzeichenverzeichnis

Symbol	Einheit	Benennung
	$kg$	Kilogramm
	$mm$	Millimeter
	$s$	Sekunde
	$J = N \cdot mm$	Joule
	$N = \frac{kgm}{s^2}$	Newton
$\epsilon_L$	%	Lüdersdehnung, siehe A.2 auf Seite 88
$\gamma$	$mm$	maßliche Abweichungen zwischen zwei unterschiedlichen Geometrien
$\bar{\gamma}$	$mm$	Betrag der flächennormierten maßlichen Abweichung
$\bar{\gamma}_Q$	$mm$	Mittelwert über das Bauteil der flächennormierten maßlichen Abweichung
$\kappa$	–	Korrelationsmaß
$\rho_{rf}$	$J$	Rückfederungsenergie
$A$	$mm^2$	Fläche
$A_{80}$	%	Bruchdehnung
$A_{Lüd}$	%	Bruchdehnung im Bereich des Lüdersbandes
$A_g, AG$	%	Gleichmaßdehnung
$C$	$N \cdot s/mm$	Dämpfungsmatrix
$c_{reib}$	–	Reibkoeffizient
<b>E</b>		Ebene
<b>G</b>		Gerade
$F_1, F_2$	$N$	aus Zwangsverschiebung $u_1$ oder $u_2$ resultierende Kraft
$F_m$	$N$	Höchstzugkraft: größte Kraft, welche eine Probe im Laufe des Zugversuches nach Überschreiten der Streckgrenze zu ertragen hat; für Werkstoffe ohne ausgeprägte Streckgrenze ist es der Maximalwert während des Zugversuches;
$F_N$	$N$	Kontaktnormalkraft
$F_{Reib}$	$N$	Reibkraft
$FLC_{max}$	%	Wert bei einer Tiefziehsimulation, welcher prozentual den geringsten Abstand zur Forming Limit Curve (FLC) aufweist
<b>K</b>	$N/mm$	Steifigkeitsmatrix
<b>M</b>	$kg$	Massenmatrix

$n$	-	Verfestigungsexponent
$n$	-	Anzahl notwendiger Berechnungsläufe
<b>P</b>	$N$	Spalte der äußeren Knotenkraftgrößen $P_j$
<b>R</b>	$N$	Reaktionskräftevektor
$R_e$	$N/mm^2$	Streckgrenze
$R_{eH}$	$N/mm^2$	obere Streckgrenze, temporäre Spannung, bevor der erste deutliche Kraftabfall auftritt;
$R_{eL}$	$N/mm^2$	untere Streckgrenze, kleinste Spannung im Fließbereich, wobei Einschwingerscheinungen nicht berücksichtigt werden;
$R_{p0.2}$	$N/mm^2$	Dehngrenze bei nichtproportionaler Dehnung (der Gerätemeßlänge); Spannung bei einer bestimmten nichtproportionalen Dehnung der Gerätemeßlänge; das Formelzeichen wird ergänzt durch einen Index, der den Zahlenwert der nichtproportionalen Dehnung der Gerätemeßlänge in Prozent angibt, hier 20% ;
$R_m$	$N/mm^2$	Zugfestigkeit: Spannung, die der Höchstzugkraft ( $F_m$ ) entspricht;
$s_c$	-	Glättungsparameter zum Aufbringen der Reibkraft
<b>K</b>	$N/mm$	Steifigkeitsmatrix
$u_1, u_2$	$mm$	Zwangsverschiebung
<b>U</b>	$mm/s$	Geschwindigkeitsvektor
<b>Ü</b>	$mm$	Verschiebungsvektor
<b>Ü</b>	$mm/s^2$	Beschleunigungsvektor
<b>v</b>	$mm$	Spalte der unabhängigen Weggrößen
<b>V</b>	$mm$	Spalte der wesentlichen Knotenfreiheitsgrade $V_j$ ,
$\vec{V}_{rel}$	$mm/s$	Vektor der tangentialen Relativgeschwindigkeit zwischen Knoten und Werkzeug
$ \vec{V}_{rel} $	-	Norm von $\vec{V}_{rel}$
$W^{(a)}, W^{(i)}$	<i>Joule</i>	äußere, innere Formänderungsarbeit

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BDR	Blechdickenreduzierungen in %, welche mit negativem Vorzeichen definiert sind. Blechdickenreduzierungen mit positivem Vorzeichen sind als Aufdickungen definiert
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
DS	Durchschnitt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
et al.	et alii, lateinisch für weitere Autoren
FEM	Finite-Elemente-Methode
FLC	Forming Limit Curve [44]
FLD	Forming Limit Diagramm [44]
Komp	Kompensation
MP	Meßpunkt
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEP	Produktentstehungsprozeß
PMP	Prüfmerkmalplan
PQ46	Plattform für Fahrzeuge des B-Segments
PQ-Mix	Plattform für Fahrzeuge des Kompakt-SUV-Segments
PuD-S	Prüf- und Dokumentationrichtlinie [101]
PVS	Produktionsversuchsserie
RPS	Referenzpunktesystem
SB	Serienbauteil
SKD	Sonder-Konstruktions-Dokumentation
SOP	Start of Production
SUV	Sports-Utility-Vehicle
UT	unterer Totpunkt

# 1. Einleitung

Innovationszyklen von technischen Produkten werden durch die hohe Konkurrenz und den technischen Fortschritt laufend verkürzt. Im Zusammenhang mit dem sich permanent verschärfenden internationalen Wettbewerb und der Forderung an die Automobilhersteller, emissionsarme Fahrzeuge auf den Markt zu bringen, stellen sich neue Anforderungen an die Fertigungsmethoden hinsichtlich der Herstellbarkeit, der Qualität und der Entwicklungszeit. Das Tiefziehen stellt unter den blechverarbeitenden Herstellungsverfahren das bedeutendste dar, da geometrisch komplexe Bauteile in hoher Stückzahl in anhaltend hochwertiger Qualität gefertigt werden. Um eine Gewichtsreduzierung der Karosserien umzusetzen, ist die Planung von Leichtbaukonzepten unter Verwendung von hoch- und höchstfesten Werkstoffen die Motivation an die Fahrzeughersteller, ihre Position am Markt zu festigen oder auszubauen. Die zunehmende Automatisierung verstärkt die Notwendigkeit von paßgenauen Bauteilen. Durch den internationalen Wettbewerb verringert sich der mögliche Aufwand bei der Einarbeitung der Werkzeuge stetig. Daraus leitet sich die Forderung ab, Umformwerkzeuge im Vorwege so auszulegen, daß nach der Werkzeugentlastung Bauteile bestmöglich der Sollgeometrie entsprechen. Das Problem der formänderungsbedingten Abweichungen ist somit für die Automobilindustrie von zentraler Bedeutung.

Legierungen von hoch- und höchstfesten Werkstoffen zeigen im Vergleich zu konventionellen Ziehstählen eine höhere Rückfederung. Die umgeformten Werkstücke weisen eine inhomogene Spannungs- und Dehnungsverteilung nach der Umformung auf. Die Kombination des geometrischen Formwiderstands mit den elasto-plastischen Werkstoffeigenschaften bestimmen nach der Entlastung die sich einstellende Rückfederung. Die Simulationsgenauigkeit von Rissen und Falten liegt bei kommerziell eingesetzten Programmen unter Verwendung herkömmlicher Werkstoffe im einstelligen Prozentbereich. Um die Karosserieplanung wirtschaftlich zu gestalten, gilt es, das Aufsprungverhalten des Bauteils frühstmöglich in die Entwicklung des Werkzeugkonzeptes einzubeziehen. Die steigenden Genauigkeitsanforderungen erfordern eine individuell auf das Bauteil, den Werkstoff und den Herstellungsprozeß optimierte Einstellung der Prozeßparameter. Die für die Simulation zu treffenden Vereinfachungen wesentlicher Einflußgrößen, wie Werkstoffverhalten, Reibverhältnisse und Werkzeugelastizität stellen offensichtliche Fehlerquellen dar. Rückfederungsbedingte Formabweichungen tiefgezogener Bauteile stellen

für Karosserieanlagen ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar, da die Kompensation maßlicher Abweichungen der Einzelteile in Fügeanlagen mit zusätzlichem Aufwand und Kosten verbunden ist. Somit ist die Simulation formänderungsbedingter Rückfederungen während der Produktenstehung von Bauteilen eine Notwendigkeit, um die Kompensationsaufwendungen zu vermeiden.

Die analytische Bestimmung des Aufsprungverhaltens eines Bauteils ist aufgrund der hohen Komplexität der Plastizitätstheorie in Kombination mit der geometrischen Bauteilform nicht möglich. Heutzutage werden mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) Untersuchungen in einer frühen Planungsphase hinsichtlich Qualität und Herstellbarkeit durchgeführt, um die optimale Werkzeuggeometrie zu ermitteln. Änderungen an Werkzeugen während des Produktenstehungsprozesses können bis zu 30% der eigentlichen Werkzeugkosten ausmachen [89]. Die Konstruktion der Blechformwerkzeuge basierte bis vor wenigen Jahren auf Erfahrungswissen. Die optimale Auslegung der Werkzeuge erfolgt kostenintensiv in der Werkzeugeinarbeitung. Die Berechnung rückfederungsbedingter Abweichungen ist mit den meisten kommerziellen Programmen möglich, jedoch ist die Güte der Rückfederungsvorhersage verbesserungswürdig. Die starr diskretisierten Werkzeuge in Kombination mit den Reib- und Kontaktbedingungen müssen genau bestimmt und simuliert werden, um ein möglichst zuverlässiges Ergebnis der Rückfederungsberechnung zu erhalten. Durch den Einsatz von Simulationsmethoden ist ein großes Einsparpotential vorhanden, welches bei der Planung der Werkzeuge mittels einer durchgängigen Simulationstrategie bestmöglich ausgeschöpft werden muß.

## 2. Stand der Technik

### 2.1. Tiefziehen und Rückfederung bei der Herstellung von Karosseriebauteilen

„ Die Umformtechnik ist ein Fertigungsverfahren, bei dem die Herstellung eines umgeformten Werkstückes bis vor einigen Jahren in der Regel erst nach Vorversuchen und/ oder durch Nutzen von Expertenwissen möglich war. Der Grund für die Notwendigkeit von Vorversuchen liegt in der Tatsache begründet, daß die umformtechnischen Verfahren nicht mit geschlossenen analytischen Beziehungen beschrieben werden können. In den vergangenen 30 Jahren wurden deshalb Verfahren entwickelt, die eine realitätstreue „Vorfertigung“ eines Werkstückes auf dem Rechner erlauben und somit kostenintensive Versuche ersparen bzw. drastisch reduzieren“ [16].

Zum Thema Genauigkeit von Tiefziehsimulationsprogrammen gibt es eine große Anzahl an Veröffentlichungen. Rückfederungssimulationen stehen im Fokus vieler Firmen und Arbeitskreise. In den letzten Jahren hat die Genauigkeit ein Niveau erreicht, welches es ermöglicht, Rückfederungsuntersuchungen auf Basis von FEM-Ergebnissen in den Entwicklungsprozeß von tiefgezogenen Karosseriebauteilen einfließen zu lassen [66]. Im folgenden Kapitel werden erreichte Ergebnisse und auch noch vorhandene Defizite erläutert, bevor auf das Thema der vorliegenden Dissertation eingegangen wird, die Entwicklung der Bauteilgeometrie und den Herstellungsprozeß numerisch derart zu begleiten, daß verbleibende formänderungsbedingte Rückfederungen ein heute mögliches Minimum erreichen.

#### 2.1.1. Maßliche Abweichungen beim Tiefziehen

Der Begriff Rückfederung wird innerhalb dieser Dissertation immer in Verbindung mit dem Ergebnis einer Umformsimulation verwendet. Nach dem Umformprozeß erfolgt eine Werkzeugentlastung. Vor der Entlastung wirken die Kräfte der Werkzeuge auf die umgeformte Platine ein. Durch die Werkzeugentlastung stellt sich ein neues Kräftegleichgewicht im umgeformten Werkstoff ein [88, 87, 27, 28]. Auf dieses neue Gleichgewicht reagiert die umgeformte Platine mit einer Deformationsantwort, die Rückfede-

rung oder auch Rücksprung oder Auffederung benannt wird. In dieser Dissertation wird grundsätzlich der Begriff Rückfederung (englisch „springback“) verwendet. Durch das Beschneiden der umgeformten Platine werden Eigenspannungen freigesetzt, welche zu einem neuen Gleichgewichtszustand führen, welcher ebenfalls eine Deformationsantwort bewirkt. Auch diese Deformationsantwort wird als Rückfederung bezeichnet. In dieser Dissertation werden maßliche Abweichungen als geometrische Differenzen zwischen dem Ergebnis eines umgeformten Werkstücks in Relation zu seiner Sollgeometrie beschrieben.

### 2.1.2. Ursachen der Rückfederung

Während des Tiefziehens stellt sich im Ziehteil ein sich ständig ändernder Spannungs-Dehnungszustand ein. Dabei steht die umgeformte Platine über die Kontaktbedingungen im Gleichgewicht mit den Werkzeugwirkflächen. Werden die Werkzeuge entlastet, so stellt sich ein neues Gleichgewicht im Ziehteil ein. Auf diesen neuen Spannungszustand reagiert die Platine mit Deformation, der Rückfederung.

Unterschiedliche Rückfederungsergebnisse sind dadurch zu erklären, daß sich aufgrund verschiedener Einflüsse andere Dehnungszustände am Ende des Ziehvorganges einstellen, wie z.B. durch unterschiedliche Prozeßparameter. So unterliegen beispielsweise die Fließgrenze, der E-Modul, die Gleichmaßdehnung und der Verfestigungsexponent der Fließkurve grundsätzlichen Chargenschwankungen der Tiefziehbleche. Sie entstehen bei der Herstellung der Bleche in den Stahlwerken und bezeichnen das Schwanken einzelner Parameter innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen. Sie bewirken Unterschiede im Einzugverhalten der Platine und haben somit einen direkten Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Platine. Neben den Werkstoffeigenschaften der umzuformenden Platine üben Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit ebenfalls einen Einfluß auf das Einzugverhalten der Platine aus, was in gängigen Simulationsprogrammen zur Zeit nicht berücksichtigt wird.

Das ausschlaggebende Maß für die Größe der Rückfederung [2, 88] ist der Anteil der elastischen Dehnung an der Gesamtdehnung.

### 2.1.3. Stellgrößen zur Beeinflussung der Rückfederung

Nach [3] werden Einflußgrößen auf die Rückfederung in vier unterschiedliche Gruppen kategorisiert.

1. Kategorie Werkstoff: Elastizitätsmodul (a), Streckgrenze (a), Verfestigungsexponent (a), Vorbehandlung (c), plastische Dehnung (a,b)[21], Anisotropie; (a)
2. Kategorie Geometrie: Blechdicke (b), Blechabmessungen (b), Radien (b), Umformtiefe (b);
3. Kategorie Verfahrensbedingungen: Umformverhalten (b), Werkzeuge (b,c), Kräfte (b), Tribologie (a,b)[18], Geschwindigkeit (c) [19], Temperatur (b,c);
4. Kategorie Simulation: Zeitdiskretisierung (a), Ortsdiskretisierung (a), Elementtyp (a), Werkstoffmodell (a), Konvergenzkriterium (a), Dämpfung (a);

Die Berücksichtigung innerhalb der vorliegenden Arbeit ist wie folgt gekennzeichnet:

- (a) durch den gültigen FEM-Berechnungsstandard abgedeckt
- (b) wird durch die FEM-Simulation für jedes Bauteil und jede Fertigungsmethode individuell abgedeckt
- (c) findet keine Berücksichtigung

Im Rahmen dieser Dissertation kommen ausschließlich quasi-statische Solver zum Einsatz, da die dynamischen Anteile bisher vernachlässigt werden konnten.

Nach der Einordnung der Einflußgrößen bleiben ohne Berücksichtigung:

1. Vorbehandlung: Bisher ist kein FEM-Standard zur Berechnung definiert worden.
2. Geschwindigkeit: Es existieren FEM-Programme, welche die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsterme bei der Aufstellung der Bewegungsgleichung mit berücksichtigen.
3. Temperaturen: Sie werden bisher in Kombination mit der Tiefziehberechnung im Rahmen von Kaltumformprozessen standardmäßig nicht abgebildet.

Innerhalb dieser Arbeit wird das Rückfederungsverhalten in zwei Hauptbeeinflussungsgruppen zusammengefaßt:

Zum ersten wird es durch die geometrische Form der Bauteilgeometrie determiniert. Diese wiederum wird durch die ihr innewohnende Steifigkeit beeinflusst. Ist die Steifigkeit an einigen Bereichen höher, so sind die elastischen Deformationen der elastoplastischen Spannungumlagerungen geringer und umgekehrt. Nachdem stehen die dem Tiefziehproß entstehenden Membran- und Biegespannungsanteile mit der Teileform im Gleichgewicht, was einen direkten Einfluß auf die Art und Weise der Rückfederungen hat.

Zum zweiten wird sie durch den Spannungs- Dehnungszustand der Platine determiniert.

Grundsätzlich werden zwei unterschiedliche Dehnungsarten unterschieden: Der für die Rückfederung verantwortliche elastische Dehnungsanteil und der plastische Dehnungsanteil. Je größer der plastische in Relation zum elastischen Dehnungsanteil in einem Abschnitt ist, desto geringer wird die Rückfederung sein. Maßnahmen zur Beeinflussung des Verhältnisses der plastischen zur elastischen Dehnung sind beispielsweise Veränderungen von Radien [11], Ziehleisten, Niederhalterkräften [10] und Werkstoffen.

#### **2.1.4. Rückfederungsbetrachtung im derzeitigen Einsatz**

In der Regel wird das Rückfederungsverhalten auf Erfahrungsbasis bei der Ziehanlagenentwicklung mit berücksichtigt. Um das Erfahrungswissen abzusichern, werden für einige Bauteile seriennahe Prototypen-Werkzeuge angefertigt. Mit diesen Werkzeugen werden erste Bauteile abgepreßt, um erste Schritte hinsichtlich der Optimierung maßlicher Abweichungen zu unternehmen.

Ohne Simulationen können maßliche Abweichungen erst mit den ersten fallenden Bauteilen [75] gemessen werden. Da die CAM-Fräsdaten grundsätzlich der Soll-Geometrie entsprechen, kommt es zur Optimierung der maßlichen Abweichungen in der Werkzeuggearbeitung. In mehreren Werkzeuggearbeitungsschleifen fließen Modifikationen ein. Die Art und Anzahl ist vorweg nicht zu bestimmen.

#### **2.1.5. Rückfederungsberechnung im derzeitigen Einsatz**

Die Genauigkeit und Möglichkeit, rückfederungsbedingte Formänderungen zu berechnen, ist in mehreren Veröffentlichungen vorgestellt worden [88, 89, 12, 84]. Dabei stellte sich es als notwendig heraus, die Werkstoffkennwerte und Werkstoffmodelle stetig zu verbessern. Voraussetzung für wirkflächenmodifizierende Maßnahmen ist eine gewisse Güte der Berechnungsmodelle. Außerdem wird man auf Erfahrungen beim Einsatz von Rückfederungsberechnungen nicht verzichten können. Erst wenn Rückfederungssimulation in den entsprechenden Fachabteilungen eingesetzt wird, ist es möglich, in Abhängigkeit unterschiedlicher Programme und Werkstoffkennwerte Schwächen zu identifizieren und zu beheben.

## 2.1.6. Bedarf, maßliche Abweichungen einstellen zu können

Nach der im Jahr 2005 von McKinsey veröffentlichten Studie [97] „Tomorrows automotive production“ ist Stahl bei der Entwicklung von Karosserien nach wie vor der dominierende Werkstoff für die nächsten Jahre.

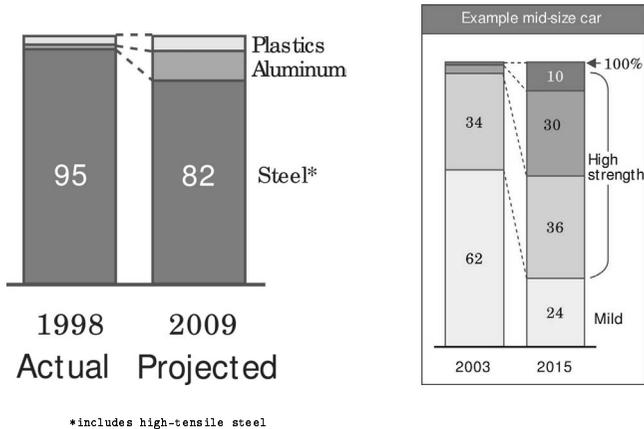


Abbildung 2.1.: Entwicklung des Stahl- und Aluminiumeinsatzes im Karosseriebau [97]

Der Anteil von Kunststoffbauteilen wird demnach geringfügig steigen. Aluminium und Stahl bleiben jedoch die Hauptbestandteile im Karosseriebau. Nach Abbildung 2.1 wird der Einsatz von hoch- und höchstfesten Stählen von 38 % im Jahre 2003 auf 76 % im Jahre 2015 steigen. Höhere Werkstoffgüten ziehen jedoch, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, größere Rückfederungserscheinungen nach sich. Durch die Verwendung von hoch- und höchstfesten Stählen wird eine Verringerung der eingesetzten Blechdicken erzielt, weshalb die Bauteile, geometrisch bedingt, zunächst an Steifigkeit verlieren, wodurch in der Regel zusätzliche Rückfederungen in Erscheinung treten.

## 2.1.7. Notwendigkeit, maßliche Abweichungen im Vorweg zu berechnen

In Abbildung 2.2 ist beispielhaft das offene Ende eines tiefgezogenen Längsträgers dargestellt, wobei das Bauteil auf dem Stempel liegt. Die Ziehrichtung geht von unten nach

oben und beschreibt die Bewegung des Stempels während des Umformvorgangs. Dieses Beispiel zeigt sehr anschaulich durch Rückfederung verursachte maßliche Abweichungen.

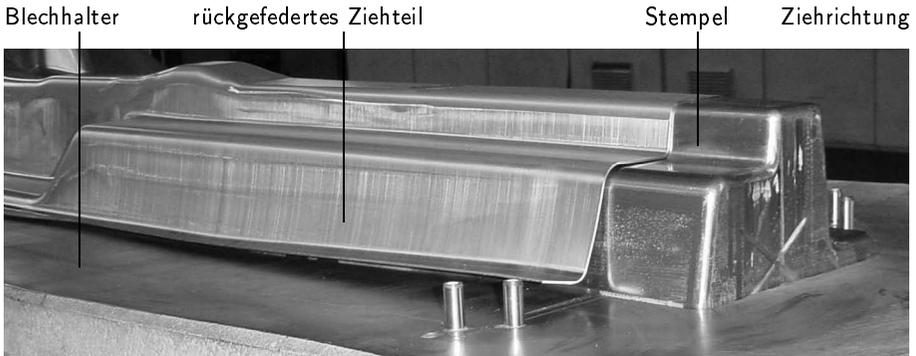


Abbildung 2.2.: Rückfederung am offenen Kopf des hinteren Längsträgers der PQ46

Die Werkzeuge sind auf Basis der CAD-Daten gefräst. Am rechten Ende des Bauteils ist gut zu erkennen, daß das Ziehteil nicht am Stempel anliegt und maßliche Abweichungen des Bauteils die Folge sind. Abhilfe schaffen hier nur geometrische Maßnahmen, die die Rückfederung kompensieren.

## 2.2. Beschreibung von Werkstoffeigenschaften

### 2.2.1. Aufnahme von Werkstoffkennwerten

Die Aufnahme der Werkstoffkennwerte ist in der Prüf- und Dokumentationsrichtlinie (PuD-S [101]) dokumentiert. Diese Richtlinie ist für Institute, die Werkstoffdaten aufnehmen, sowie für den Bereich der Methodenplanung und Tiefziehsimulation der Volkswagen AG bindend. Die Ergebnisse der Tiefziehsimulation sind direkt von den Werkstoffkennwerten abhängig, weshalb es wichtig ist, standardisierte Vorgehensweisen einzuhalten. Neue Werkstoffe erfordern neue Werkstoffversuche, um die Simulationsprogramme mit den notwendigen Daten versorgen zu können. Die PuD-S beschreibt die Aufnahme der elastischen und plastischen Werkstoffkennwerte mit Hilfe des einachsigen Zugversuches. Weitere Versuchsarten sind einzeln erklärt.

Mit dem Zugversuch werden sowohl elastische als auch plastische Materialwerte aufgezeichnet [4]. Zu den elastischen zählt der E-Modul. Die Messungen erfolgen nach

DIN EN 10002 [98]. Nach dieser Norm ist die Probenform 2 zu verwenden, ebenso gilt die Probenpräparation. Bei der Bestimmung des E-Moduls ist eine Vorlast von  $10\text{MPa}$  und eine Spannungszunahmegeschwindigkeit von  $20\text{MPa/s}$  einzuhalten. Dabei sind drei gültige Versuche durchzuführen. Sollten die Versuchsergebnisse um mehr als 5% voneinander abweichen, sind zwei weitere Versuche durchzuführen. Es sind dabei folgende Werte über den Versuch aufzuzeichnen: Anfangsbreite, -dicke und -meßlänge, darüber hinaus auch Zeit, Kraft, Weg und Breitenänderung (für r-Werte).

Somit werden aus den nachgeschalteten Auswerteprozessen folgende Werkstoffkennwerte ermittelt [101, 99]:

- $R_{p0,2}$  ( $R_{eL}$ ,  $R_{eH}$ ) nach DIN EN 10002
- $R_m$  nach DIN EN 10002
- $A_{Lüd}$ ,  $A_g$ ,  $A_{s0mm}$  nach DIN EN 10002
- $n$ -Wert nach ISO 10275
- Bake-Hardening-Index nach prEn 10325:2002

Die Messung der Grenzformänderung erfolgt im Nakajima Versuch. Es werden mindestens sechs verschiedene Probengeometrien benötigt, um eine gleichmäßige Verteilung der Haupt- und Nebendehnung vom Tiefziehbereich bis zur biaxialen Dehnung zu erhalten [51, 40].

### 2.2.2. Einfluß der Werkstoffgüte auf die Rückfederung

Der Anteil von hoch- und höchstfesten Stählen, die im Automobilbau Verwendung finden, steigt stetig [97, 102]. Dabei sind diese Stähle in der Lage, unter Beanspruchung höhere Spannungen versagensfrei aufnehmen zu können, um mit geringeren Blechdicken eine Gewichtsreduzierung zu erreichen.

In Abbildung 2.3 ist schematisch der Einfluss der Streckgrenze  $R_{p0,2}$  auf die Rückfederung dargestellt. Mit abnehmender Streckgrenze reduziert sich der elastische Dehnungsanteil und somit die Rückfederung [41].

### 2.2.3. E-Modul

Die Größe des E-Moduls beeinflusst das Ergebnis der Rückfederung maßgeblich [84, 89]. Die Variation des E-Moduls um  $\pm 10\%$  wirkt sich auf das Ergebnis der Rückfederung

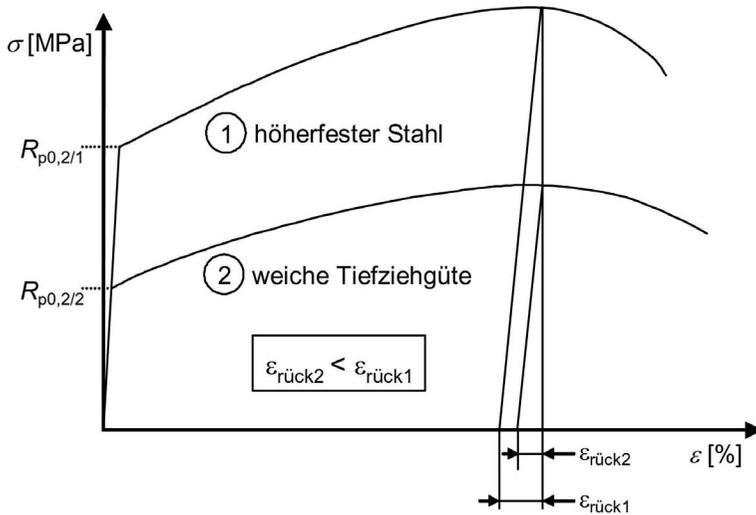


Abbildung 2.3.: Rückfederung in Abhängigkeit von  $R_{p0,2}$  [41]

relativ zu den Standardwerten um circa 30 % aus [88]. Die Untersuchung der Dehnungsabhängigkeit eines E-Moduls ist bedingt empfehlenswert [89]. Bei der Berechnung einer tiefgezogenen Wanne, bei welcher die rückfederungsrelevanten Bereiche eine Mindestdehnung von 2,5 % aufweisen, ergibt sich eine Verringerung des E-Moduls aus der Simulation. Aufgrund der erhöhten Rechenzeiten wird empfohlen, mit einem konstanten, verringerten E-Modul zu rechnen. Besonders bei einer beginnenden Lastwechselbeanspruchung ist eine rückfederungserhöhende Abnahme des E-Moduls festgestellt worden [84].

## 2.2.4. Stoffmodell

Die Stoffmodelle lassen sich in zwei Hauptgruppen unterscheiden [41], elasto-plastische und starr-plastische (siehe Abbildung 2.4). Mit zunehmenden Anforderungen an die Genauigkeit der Geometrie und der Werkstoffeigenschaften der umformtechnischen Produkte steigen die Bedürfnisse an elastisch-plastischen Stoffmodellen [53].

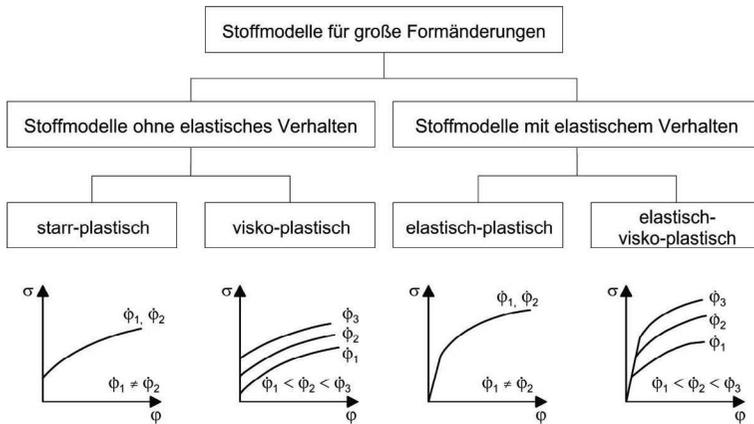


Abbildung 2.4.: Stoffmodelle für große plastische Formänderungen [41]

Die starr-plastischen Stoffmodelle weisen folgende Nachteile auf:

- Sie erlauben keine Berechnung von Eigenspannungen und Rückfederungen.
- Sie sind nicht geeignet für Instabilitätsuntersuchungen wie Faltenbildung, Knicung, Beulen.
- Bleiben während der Umformung eines Werkstückes gewisse Gebiete desselben elastisch (bzw. starr), so können keine Spannungsspitzen am Übergang zwischen elastischen und plastischen Gebieten erfaßt werden. Ferner können die Reibungskräfte in diesen elastischen (bzw. starren) Gebieten nicht erfaßt werden.

## 2.2.5. Fließkriterium

Im Bereich der Umformtechnik unterliegen die Elemente in der StoffgesetZRoutine einem Fließkriterium. Das Fließkriterium beschreibt den Beginn des plastischen Fließens des Werkstoffes. Folgende Fließkriterien stehen zur Verfügung:

### Fließkriterium nach von Mises

Beim Erreichen der von-Mises-Vergleichsspannung tritt plastisches Fließen ein [59, 48, 82].

$$\sigma_{v. Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_{pl} \quad (2.1)$$

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  sind die Hauptspannungen der Hauptrichtungen. Das Fließmodell beschreibt den isotropen Fließort. Es tritt Plastifizieren ein, wenn die Fließspannung  $\sigma_{pl}$  erreicht wird.

### Fließkriterium nach Hill 48

Bei der Fließbeschreibung von Hill wird zwischen dem orthotropen und anisotropen Fließkriterium unterschieden.

Anisotropes Kriterium:

$$\sigma_{Hill48} = \sqrt{H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2N\sigma_{12}^2} = \sigma_{pl} \quad (2.2)$$

Dabei sind  $H$ ,  $F$ ,  $G$  und  $N$  die Hill'schen-Anisotropie Koeffizienten:

$$H = \frac{r_0}{1 + r_0}; \quad F = \frac{r_0}{r_{90}(1 + r_0)}; \quad G = \frac{1}{1 + r_0}; \quad N = \frac{(1 + 2 \cdot r_{45}) \cdot (r_{90} + r_0)}{2 \cdot r_{90}(1 + r_0)} \quad (2.3)$$

Dabei stellen  $r_0$ ,  $r_{45}$  und  $r_{90}$  die Anisotropiewerte im Winkel zur Walzrichtung dar.

Orthotropes Fließkriterium: Die Koeffizienten nach Gleichung 2.3 werden mit einem mittlerem  $r$ -Wert bestimmt:

$$r_m = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4}$$

### Fließkriterium nach Hill90

Hill 90 ist speziell für Schalenformulierungen entwickelt worden und stellt einen ebenen, anisotropen, elastisch-plastischen Spannungszustand dar.

$$\begin{aligned} & |\sigma_{11} + \sigma_{22}|^2 + \alpha^m [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4 \cdot \sigma_{12}^2]^{\frac{m}{2}} + \\ & [\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 2 \cdot \sigma_{12}^2]^{\frac{m}{2} + 1} \cdot [\beta(\sigma_{11}^2 - \sigma_{22}^2) + \gamma(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2] \\ & = (1 + \alpha^m + \beta + \gamma) \cdot \sigma_{22}^m = (2 \cdot \sigma_y^b)^m \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dabei sind  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  und  $m$  Werkstoffparameter,  $\sigma_{22}$  die Fließspannung bei einachsiger Zugbeanspruchung in Walzrichtung und  $\sigma_y^b$  stellt die Fließspannung bei zweiachsiger Zugbeanspruchung dar.

### Fließkriterium nach Corus-Vetger

Die Fließbedingung beim Corus-Vetger-Modell ist abhängig von den Hauptspannungen im Raum. Die Fließspannung bestimmt sich aus zwei Normalspannungskomponenten,

wobei die Schubspannungen beim Aufstellen der Fließspannung wegfallen.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (2.5)$$

Der Winkel  $\theta$  zwischen den Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  und den Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  ergibt sich wie folgt:

$$\cos(2 \cdot \theta) = \frac{\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}} \quad (2.6)$$

Bestimmte Punkte der Fließortkurve können bei den Versuchen zur Bestimmung der Werkstoffparameter eindeutig zugeordnet werden. Das Corus-Vegter Werkstoffmodell

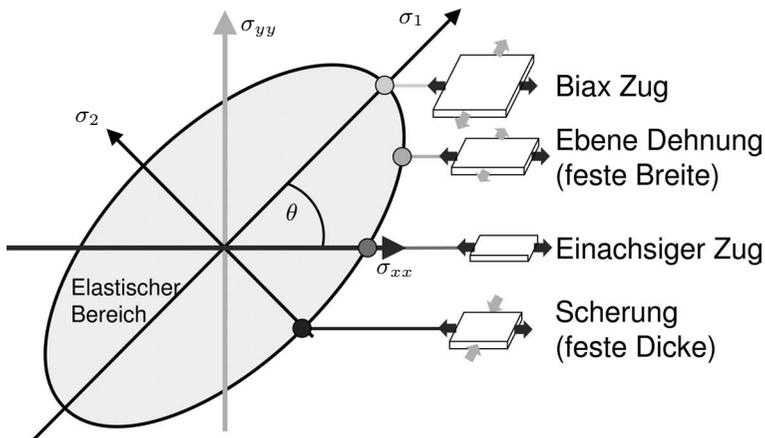


Abbildung 2.5.: Fließbedingung des Corus-Vegter-Modells nach [25]

benötigt folgende Parameter:

- r-Werte des einachsigen und zweiachsigen Zuges, abhängig von der Walzrichtung in 0, 45 und 90 Grad
- Fließspannung des einachsigen Zuges in Abhängigkeit der Walzrichtung von 0, 45 und 90 Grad
- Fließspannung des zweiachsigen Zuges

- Fließspannung bei ebener Dehnung
- Fließspannung bei reiner Scherung

## 2.2.6. Werkstoffverfestigungsmodelle

In Abhängigkeit des Umformgrades steigt die Fließspannung in Abhängigkeit des Werkstoffes. Die Erhöhung der Fließspannung wird als Verfestigung bezeichnet [56, 64, 45, 42]. Es gibt folgende Verfestigungsmechanismen [38, 84]: Verfestigung durch Versetzungen, Kornverfeinerung, Mischkristallverfestigung, Ausscheidungshärtung. Die Verfestigungsmechanismen haben einen wesentlichen Einfluß auf das Simulationsergebnis und werden durch Simulationsprogramme mit den drei in Abbildung 2.6 aufgezeigten Modellen beschrieben.

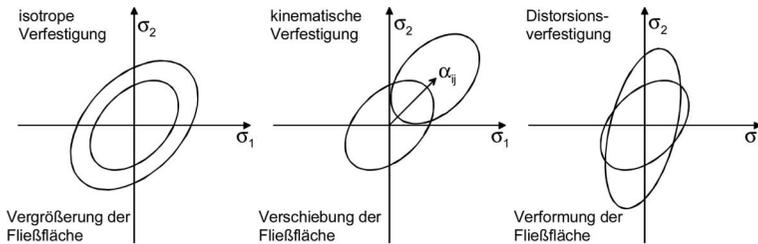


Abbildung 2.6.: Werkstoffverfestigungsmodelle [89]

Nach [89] ist das Interesse an der Berücksichtigung der kinematischen Verfestigung gestiegen, um die Güte von Rückfederungssimulationen verbessern zu können [89, 6]. Allerdings ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte unklar [88, 5], wobei die verwiesenen Quellen aus den Jahren 1990 und 1998 stammen.

Um die realen Verhältnisse besser abbilden zu können, erscheint eine Kombination aus kinematischer und isotroper Verfestigung den besten Kompromiß an Güte und Aufwand zu bieten. Die Kombination von kinematischer mit Distorsionsverfestigung ist entsprechend aufwendig und eher selten [89]. Um die Spannungen für Wechselbiegeprozesse besser abbilden zu können, ist ein erweitert kombiniertes isotrop-kinematisches Verfestigungsmodell entwickelt worden, welches für jeden Biegeprozeß eine eigene Fließfläche verwendet. Dabei konnten deutliche Verbesserungen bei der Rückfederungsberechnung von Aluminium erzielt werden [89]. Das „MROZ mehrfach Fließflächenmodell“ ist bei den Simulationen dieser Dissertation nicht zugrunde gelegt worden.

## 2.2.7. Fließkurvenextrapolation

Die Fließkurven für die Simulation werden experimentell [9, 13] bis zu einem Umformgrad von ungefähr 0,2 bestimmt. In der Simulation treten sehr viel höhere Umformgrade auf, weshalb die Notwendigkeit besteht, die Fließkurve zu extrapolieren. Die Extrapolation wird bis zum Umformgrad 1,0 durchgeführt, wofür verschiedene Methoden zur Verfügung stehen. Je nach angewandter Extrapolationsmethode ergeben sich für die Simulation unterschiedliche Fließkurven, welche wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen und unterschiedlichen Rückfederungen führen.

Zur Extrapolation der Fließkurve stehen z.B. folgende mathematische Modelle zur Verfügung [48, 31, 32, 33, 78]:

- Linear Continuation  $k_f = a \cdot \varphi + c$
- Swift/ Krupowski:  $k_f = a \cdot (b + \varphi)^n$
- Ludwik/ Hollomon:  $k_f = a \cdot \varphi^n$
- Hocket-Sherby:  $k_f = b - (b - a) \cdot e^{(-m \cdot \varphi^n)}$
- Voce/ Palm:  $k_f = b - (b - a) \cdot e^{(-m \cdot \varphi)}$
- Prager:  $k_f = a \cdot (b + \varphi)^n - c$

In Abbildung 2.7 sind die aus der Messtechnik stammenden Werte mit blauen Rauten dargestellt.

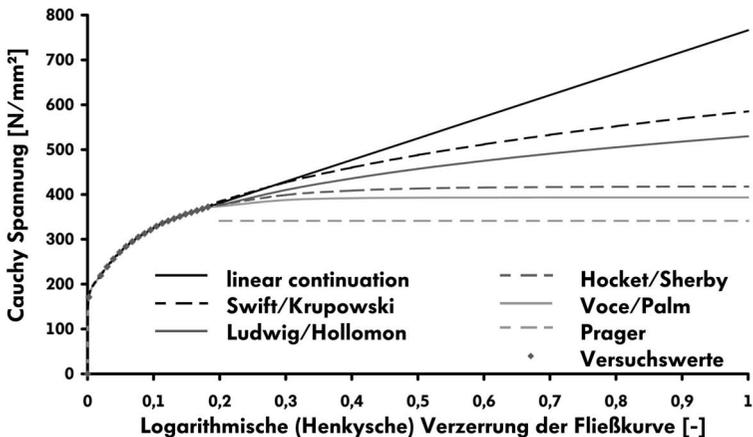


Abbildung 2.7.: Unterschiedliche Extrapolationsverfahren der Meßwerte zur Festlegung der Fließkurve

Die Fließkurven zeigen einen identischen Verlauf im Bereich der vorhandenen Meßwerte bei einer Dehnung von 0 bis 0,2. Ab einer Dehnung größer 0,2 kommt es zu großen Differenzen. Bei dem von Rohleder [88] untersuchten kreiszylindrischem Napf wurden die Extrapolationsverfahren für den Werkstoff DC04 untersucht. Dabei haben sich folgende durchschnittliche Fehler ergeben: Voce 5,9%, Hockett-Sherby 7,9%, Gosh 9,4%, Swift und Ludwik mit jeweils 10,3%.

## 2.3. Simulation

Die Methode der Finiten Elemente bei der Auslegung von Tiefziehanlagen stellt eine allgemein anerkannte Berechnungsmethode dar, wobei durch die stetige Verfeinerung der Berechnungsmethode seitens der Softwarehersteller, der Anwender und durch Forschungsinstitute die Genauigkeit steigt. Es darf dabei nicht vergessen werden, daß es sich hierbei um Näherungsverfahren mit gewissen mechanischen Vereinfachungen handelt, um Werkzeuggeometrien vor ihrer Herstellung zu optimieren. Die aufwendige Werkzeugearbeitung kann durch die Simulation zwar reduziert, aber nicht ersetzt werden. Um die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Anwendern und Simulationssystemen zu gewährleisten, ist die Einhaltung standardisierter Simulationsparameter von außerordentlicher Wichtigkeit [69, 71, 67].

Erfahrungen bei der Rückfederungssimulation haben gezeigt, daß die Automatisierung von Simulationvorgängen unumgänglich ist. Durch die Wahl unterschiedlicher Randbedingungen federt ein Bauteil bei einer statisch unbestimmten Lagerung auch unterschiedlich auf. Bei einer statisch bestimmten Lagerung ergibt sich eine eindeutige Rückfederung, allerdings kann es je nach Position der Randbedingungen zu einer Starrkörperverlagerung kommen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Positionieren der Sollgeometrie relativ zur rückgefederten Platine. Um im Alltag die Aussagesicherheit der Rückfederungsergebnisse garantieren zu können, wird die Berechnung automatisiert gestartet. Das Positionieren der Geometrien für die Auswertung von Soll- und Ist-Position ist ebenfalls automatisiert worden. Ausgangspunkt hierbei ist die Definition der Lagerungspunkte. Die Rückfederungssimulation bedient sich der RPS-Lagerung [81], da das reale Bauteil später nach der RPS-Ausrichtung bewertet wird. Dabei ist die Wahl des ersten RPS-Punktes von besonderer Bedeutung. Es wird davon ausgegangen, daß RPS 1 die Hauptaufnahme ist, da auf diese Stelle die Sollgeometrie positioniert wird. Eine günstige Position für RPS 1 ist ein relativ flacher Bauteilbereich. Wird ein relativ steiler Bauteilbereich gewählt (z.B. in der Nähe eines Flansches), so wird der Betrag, um den die Sollgeometrie in Ziehrichtung verschoben wird, bei unterschiedlichen Simulationen

stark schwanken.

### 2.3.1. Die Solverwahl

Wie bereits erwähnt, ist die Simulation von Tiefziehvorgängen mit einigen Vereinfachungen verbunden. Die Güte der berechneten Rückfederung hängt direkt vom errechneten Spannungszustand der Platine ab. Da sich die Rückfederung aus der Spannungsumlagerung nach der Werkzeugenlastung ergibt, läßt sich annehmen, daß sich die Rückfederung um so genauer einstellt, je exakter der Spannungs-Dehnungszustand mittels FEM bestimmt wird. Eine von vielen Vereinfachungen der Tiefziehsimulation ist die Annahme von starren Werkzeugwirkflächen. Kontaktalgorithmen sorgen dafür, daß die Platine in ihre gewünschte Form gebracht wird und über ein Reib- und Ziehleistenmodell die entsprechende Rückhaltung auf die Platine aufgebracht wird. Die unterschiedlichen Programme benutzen unterschiedliche Kontakte und unterschiedliche Werkzeugvernetzungs-güten.

### 2.3.2. Integrationsmethode

Um die kinematische Antwort eines Systems zu erhalten [36], ist allen Systemen die allgemeine Bewegungsgleichung gemeinsam:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (2.7)$$

Dabei sind  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  und  $\mathbf{K}$  die Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen des Systems. Zur Lösung der Bewegungsgleichung kann auf zwei verschiedene Verfahrensklassen zurückgegriffen werden, das explizite und das implizite Verfahren (auch direktes und indirektes Verfahren genannt).

Die gebräuchlichsten numerischen Zeitintegrationsverfahren [65, 54, 60, 43] sind:

- zentrale Differenzenverfahren
- Houbolt-Verfahren
- Wilson- $\Theta$ -Verfahren
- Newmark-Verfahren
- Hilber-Hughes-Taylor-Verfahren
- lineares Beschleunigungsverfahren

## Explizites Verfahren

Unter expliziter Integration versteht man die direkte Lösung der Gleichung mit Hilfe der Zentralen-Differenzen-Methode (auch als explizierter Programmlöser bezeichnet). Der Nachteil ist ein sich entwickelnder Fehler, da bei der Beschleunigung der Term  $\frac{1}{\Delta t^2}$  vorkommt und „unscharf“ formuliert ist. Dieser kleine Fehler addiert sich bei der Integration über die Geschwindigkeit und die Verschiebung weiter fort. Diese explizite Lösung erfordert keine Faktorenerlegung bei der Integration der Bewegungsgleichung. Sie wird auch als direkte Lösung bezeichnet, da die Systemgleichung zum Zeitpunkt  $t$  aufgestellt wird und für den Zeitpunkt  $t + \Delta t$  gelöst wird.

Der hauptsächliche Vorteil der Methode besteht darin, daß die Lösung von  ${}^{t+\Delta t}\vec{U}$  keine Dreieckszerlegung einer Koeffizientenmatrix nach sich zieht, wenn  $M$  eine Diagonalmatrix ist. Nachteilig ist die strenge Beschränkung und damit eine spürbare Verkleinerung des Zeitschritts: Stabilität ist nur gewährleistet, wenn der Zeitschritt  $\Delta t$  kleiner ist als ein kritischer Zeitschritt  $\Delta t^{kr} = T_n/\pi$ , wobei  $T_n$  die kleinste Periodendauer im Finite-Elemente-System ist (diese Beschränkung des Zeitschritts wurde für ein lineares System hergeleitet, gilt aber auch eingeschränkt für nichtlineare Systeme, wenn man die Antwort einer nichtlinearen Berechnung für jeden Zeitschritt näherungsweise als linear betrachtet).

Während einer linearen Berechnung bleiben die Steifigkeitseigenschaften konstant, da sich diese in den Eigenschaften der nicht-linear berechneten Antwort verändern. Diese Änderungen der materiellen oder geometrischen Eigenschaften gehen in die Berechnung des Kraftvektors  ${}^t\vec{F}$  ein. Da deshalb der Wert von  $T_n$  während der Berechnung nicht konstant bleibt, muss der Zeitschritt  $\Delta t$  verkleinert werden, wenn das System steifer wird, wobei die Bedingung  $\Delta t \leq T_n/\pi$  mit Sicherheit für alle Zeitschritte erfüllt ist.

Hierbei ist  $T_n$  die kleinste Periodendauer des Netzes, die als eine Schranke anzusehen ist. Diese Schranke ist durch die kleinste Periodendauer  $T_n^{(m)}$  irgendeines von  $m$  Elementen des Netzes gegeben [36].

## Implizites Verfahren

Andere Methoden stellen die Bewegungsgleichung zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  auf und bestimmen durch numerische Verfahren die Lösung. Daher wird diese Lösungsweise auch als implizite Integrationsmethode bezeichnet. Zur Verfügung stehen die Houboltsche, Wilsonsche und Newmarksche Methode. Die implizite Integrationsmethode hat den Nachteil, mehr Rechenleistung zu konsumieren, da für jedes Zeitinkrement der Gleichgewichtszustand ausiteriert werden muss. Bei einem impliziten Solver sind die Zeitschritte größer und stabiler als bei einer expliziten Berechnung. Einen kleinen Zeitvorteil hat die impli-

zite Integration bei der Berechnung der Rückfederung, da sich vor der Entlastung das Gleichungssystem bereits im Gleichgewichtszustand befindet und direkt die Entlastung berechnet werden kann. Ein expliziter Solver muss vor der Rückfederungsberechnung das Gleichgewicht erst bestimmen.

### 2.3.3. Rezoning oder adaptive Netzverfeinerung

Um die Berechnungszeiten der Simulationen zu verkürzen, findet eine adaptive Verfeinerung der Ausgangsplatine während der Tiefziehsimulation statt. Dabei startet die Berechnung mit einer grob diskretisierten Platine, welche sich nach unterschiedlichen Kriterien verfeinern oder auch wieder vergrößern kann. Die Prüfung der Netzanpassung läuft automatisch ab, wobei folgende Prüfungskriterien zur Verfügung stehen:

- Krümmungskriterium: Betrachtet den Winkel der Normalen zweier benachbarter Elemente.
- Formquotient-Kriterium:  $\varphi_f = 2 \cdot \frac{R_i}{R_u}$  mit  $R_i$ : Innenkreisradius und  $R_u$ : Umkreisradius
- Norm des Fehlers innerhalb einer Elementgröße. Als Fehler wird die Abweichung der FE-Lösung von einer geglätteten (siehe 2.8, Seite 34) Lösung betrachtet.
- Werkzeugdurchdringungskriterium: Die Werkzeugdurchdringung wird mit Bezug auf die Platinenmittelfläche betrachtet.
- Glättungskriterium: Änderung der Elementwinkel.
- Glättungskriterium: Änderung der Elementschlankheit.
- Vergrößerungskriterium nach dem Krümmungskriterium.
- Aufdickungskriterium.
- Verfeinerung entlang eines Polygonzuges bei der Abbildung von Beschnitten.

Die adaptive Netzverfeinerung hat einen direkten Einfluss auf bestimmte Ergebnissgrößen. Für die Tiefziehsimulation mit INDEED wird empfohlen, als adaptive Werkzeugverfeinerungskriterien das Werkzeugdurchdringungskriterium in Kombination mit dem Krümmungskriterium zu verwenden [68, 67, 69, 71].

### 2.3.4. Kontakt

Die Wirkflächen der Werkzeuge werden als starre Kontaktflächen diskretisiert, mit welchen die Knoten der Platine in Kontakt stehen können. Wirkt bei der Integration eines Zeitinkrements eine Zugkraft auf einen Platinenknoten, so wird dieser beim Überschreiten eines Grenzwertes vom Werkzeug gelöst und das Inkrement wird erneut berechnet [85].

Für implizite Verfahren stehen die folgenden drei Kontaktprozessoren zur Verfügung:

- Penalty-Verfahren: Dem eindringenden Knoten wirkt eine entgegengesetzt erzeugte Penalty-Kraft entgegen, die die Lage des Knotens (fast) auf die Lage der Werkzeugoberfläche zurück zwingt. Die Durchdringung wird also mathematisch mit dieser Rückstellkraft „bestraft“ (das englische Wort für Strafe ist Penalty). Der Vorteil ist eine relativ einfache numerische Umsetzung. Der Nachteil besteht darin, daß die Kontaktbedingung geometrisch nicht exakt erfüllt ist und die Wahl einer zu großen Penalty-Funktion bei der Gleichgewichtsiteration zu numerischen Problemen führen kann.
- Lagrangesche Multiplikatoren: Es werden zusätzliche Gleichungen ins Gleichungssystem eingefügt. Vorteilhaft ist die exakte Erfüllung der Kontaktbedingungen, da Probleme einer zu großen Steifigkeit wie beim Penalty-Verfahren nicht existieren. Der Nachteil ist, daß durch die zusätzlichen Gleichungen das Gleichungssystem anwächst. Dieses erhöht den Rechenaufwand bei der Tiefziehsimulation erheblich, da sehr viele Knoten in Kontakt stehen.
- Schräge Randbedingungen: Der Kontakt wird durch Randbedingungen berücksichtigt. Sobald ein Knoten die Werkzeugfläche durchdrungen hat, wird der Knoten auf die Kontaktfläche zurückgesetzt. Die Knotenfreiheit wird derart gesetzt, daß die Verschiebungsfreiheit nur noch orthogonal zur Werkzeugnormalen existiert.

Explizite FEM: Da keine Integration des Gleichgewichtes nötig ist, können die Kontaktbedingungen recht einfach gesetzt werden. Neben dem Penalty-Verfahren werden auch kinematische Randbedingungen gesetzt.

### 2.3.5. Tribologie und Reibung

Die tribologischen Verhältnisse werden durch die Topographie der Umformwerkzeuge und den Schmierzustand (Art, Menge und Verteilung des Schmierstoffs) beschrieben

[84, 47]. Sie übt einen Einfluß auf den Spannungs- und Formänderungszustand und somit auch auf die Rückfederung aus [29, 30]. Der experimentelle Nachweis des Tribologieverhaltens bedingt aufwendige Dauerversuche. Eine definierte Einstellung der Schmierstoffmenge und -verteilung erscheint nach Hütte [84] unpraktikabel.

Aufgrund des Kontaktes zwischen Platine und Werkzeug entsteht durch die Reibung eine der Reibkraft entgegengesetzte Rückhaltekraft. Da sich mehrere Einflußgrößen, wie z.B. die wahre Kontaktfläche, der Schmierzustand, die Umformtemperatur, die Umformgeschwindigkeit oder die Flächenpressung auf die Reibung auswirken [49], wird in der Tiefziehsimulation mit einem Ersatzmodell gerechnet.

Die Formulierung der Reibung wird anhand des FEM-Programms Indeed [90] exemplarisch beschrieben, wobei die Reibkräfte nach folgendem Ansatz bestimmt werden:

$$F_{reib} = -F_N \cdot c_{reib} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan \frac{|\vec{V}_{rel}|}{s_c} \cdot \frac{\vec{V}_{rel}}{|\vec{V}_{rel}|} \quad (2.8)$$

Dabei sind:

$F_{reib}$	:	Reibkraft
$F_N$	:	Kontaktnormalkraft
$c_{reib}$	:	Reibkoeffizient (in der Fachliteratur auch häufig durch $\mu$ beschrieben)
$\vec{V}_{rel}$	:	Vektor der tangentialen Relativgeschwindigkeit zwischen Knoten und Werkzeug
$ \vec{V}_{rel} $	:	Norm von $\vec{V}_{rel}$
$s_c$	:	Glättungsparameter

Die auf die Platinenknoten aufgebrachtten Reibkräfte sind in ihrer Richtung von der Geschwindigkeit [91] abhängig. Die Reibungskraft errechnet sich über eine Sprungfunktion. Bei einer negativen Geschwindigkeit wird eine negative Reibkraft eingeleitet, welche sich bei einer Vorzeichenumkehr ebenfalls im Vorzeichen umdreht.

Um einen harmonischeren Verlauf der Berechnung zu erzielen, ist eine Glättung beim Vorzeichenwechsel in das Reibmodell eingebracht worden. In Abhängigkeit des Glättungsfaktors wechselt das Vorzeichen mittels eines geglätteten Übergangsbereichs, welcher durch die arctan-Funktion beschrieben ist. In Abbildung 2.8 ist der Übergang bei Vorzeichenumkehr für folgende Beispielkonfiguration dargestellt:

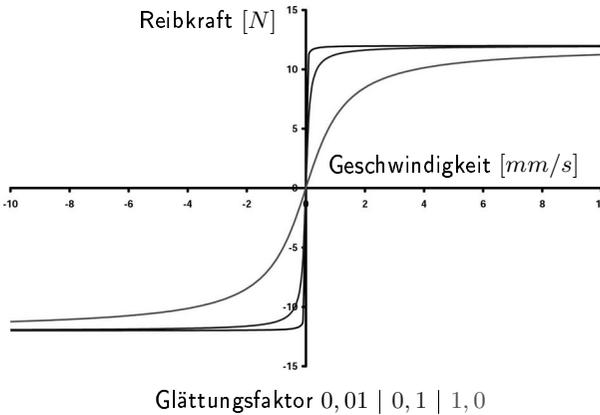


Abbildung 2.8.: Glättungsfaktor beim Vorzeichenwechsel der Reibkraft

$$F_N = 100N ; \quad c_{Reib} = \mu = 0,12 ; \quad F_{Reib} = 12N$$

$$\vec{V}_{rel} = -10 \quad \text{bis } 10 \text{ mm/s}$$

In Abbildung 2.8 sind folgende Glättungsparameter dargestellt:

$$s_{c1} = 0,01 \quad (\text{schwarzer Graph})$$

$$s_{c2} = 0,1 \quad (\text{blauer Graph})$$

$$s_{c3} = 1,0 \quad (\text{roter Graph})$$

Es existiert ein Zusammenhang zwischen Kontaktnormalspannungen und Reibwert [89, 83], welcher exemplarisch für den Werkstoff DC04 bei einer herkömmlichen Schmierung aufgezeigt worden ist. Demnach verringert sich der Reibwert von 0,18 bei einer Kontaktflächenspannung von 5 MPa auf 0,08 bei 45 MPa. Die Verringerung wird auf Oberflächenglättungseffekte bei zunehmender Kontaktnormalspannung zurückgeführt. Die nach [88] untersuchte Heraufsetzung des Reibfaktors von 0,07 auf 0,09 hat keinen Einfluß auf das Ergebnis der Rückfederung, da der Unterschied der Ergebnisse bei einer Differenz von +0,9% liegt.

Innerhalb dieser Dissertation wird der Reibfaktor bei den Simulationen als konstant angesehen und entspricht für Tiefziehstähle 0,12 [86].

### 2.3.6. Kompensation von Werkzeugwirkflächen

Innerhalb dieser Dissertation werden als Werkzeugwirkflächen die Flächen definiert, welche durch den CAD-Datensatz die Oberfläche der Werkzeuge am Anfang beschreiben. In der Simulation werden sie als starr angenommen, können allerdings durch die nachfolgend beschriebene Kompensation eine Änderung erfahren. Dieses gilt für die Bereiche der Matrize, des Stempels und Teilbereiche des Blechhalters.

Die Werkzeugkompensation [92, 24, 7, 8, 34, 76] bedient sich des Prinzips, ein Abweichungsfeld zwischen zwei Geometrien zu bestimmen und diese Korrektur in entgegengesetzter Richtung auf die Werkzeugoberfläche aufzubringen. Befindet sich die rückgefederte Geometrie nach erfolgter Kompensation nicht in der erwarteten Lage, so erfolgt mit Hilfe des neu entstandenen Abweichungsfeldes die nächste Kompensation u.s.w.

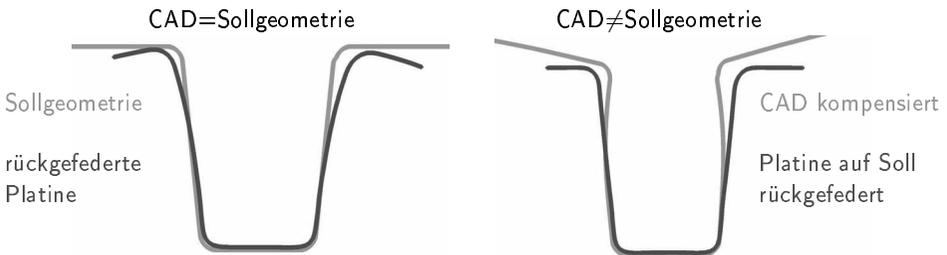


Abbildung 2.9.: Schematische Darstellung von Rückfederung und Kompensation am Beispiel eines tiefgezogenen und beschnittenen Profils

Die Abbildung 2.9 zeigt auf der linken Seite das Ergebnis einer Rückfederung. Dabei ist die Sollgeometrie grün dargestellt. Die rechte Seite der Abbildung zeigt die aus der Rückfederung entstehende Kompensationsform. Allerdings ist in diesem Beispiel eine Korrektur des Hinterschnitts nicht erfolgt.

#### Anforderungen an die Wirkflächenkompensation

Eine Überdrückung der Werkzeuge erfolgt unter Einhaltung folgender Regeln:

- Hinterschnittigkeit der Werkzeuge: Die Werkzeuge verfahren während des Tiefziehprozesses ineinander. Kommt es zu einem vorzeitigem Kontakt zwischen Stempel und Matrize, kann das Ziehteil nicht bis zum Ende ausgeformt werden. Wird eine Kompensation angewandt, besteht die Gefahr von auftretenden Hinterschnitten, welche zu unterbinden ist. In Abbildung 2.9 ist beispielhaft eine Kompensation dargestellt. Das Profil kann maximal mit einer senkrecht zur Ziehrichtung

stehenden Wand gezogen werden. Das Abweichungsfeld zwischen Soll- und Ist-Geometrie wird mit negativem Vorzeichen auf die Wirkflächen aufgebracht. In diesem Beispiel ist die kompensierte Werkzeuggeometrie auf der rechten Seite (in Grün dargestellt) hinterschnittig. Diese Wirkflächen können nicht kollisionsfrei ineinander fahren. Die Hinterschnittprüfung im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem Programm MASHAL<sup>©</sup> durchgeführt, welches eine Prüfung auf Hinterschnitt beim Kompensieren durchführt. Die Elemente werden bis zu einer Grenze kurz vor Entstehen eines Hinterschnittes kompensiert.

- Oberflächenbeschaffenheit der vernetzten Wirkfläche: Während des Tiefziehprozesses fließt der Werkstoff in die Matrizenform. Kanten in den Wirkflächen stellen einen erhöhten Widerstand dar und führen zu Reißern. Aus diesem Grund wird während der CAD-Konstruktion auf Stetigkeit der Flächen geachtet. Bei der Diskretisierung für die Simulation werden die CAD-Flächen mit einer Sehnablenkung von  $0,01\text{ mm}$  zur CAD-Fläche vernetzt, damit die Elemente keine Kanten zueinander aufweisen. Werden diese Elemente kompensiert, so sorgt ein Glättungsalgorithmus für ein kantenfreies Kompensationsergebnis.
- „Einfrieren“ von Blechhalterbereichen: Die Konstruktion der Blechhaltergeometrie erfolgt nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, wie z.B. ein gleichmäßiger Stempelgriff. Aus diesem Grunde soll die Kompensation keinen Einfluss auf den Blechhalter ausüben.
- Einfrieren von Blechhalterbereichen unter vorhandenem Rückfederungsfeld: Es besteht die Möglichkeit, daß sich Bauteilbereiche in Nachformbereichen unter dem Blechhalter befinden. In diesem Fall existiert für diese Bereiche ein Rückfederungsfeld. Gleichzeitig fordert die Randbedingung, den Bereich nicht zu kompensieren, da er sich unter dem Blechhalter befindet. Dies ist ein Widerspruch, der durch den Kompensationsalgorithmus abgefangen werden muß.

## Anwendungsleitlinie der Kompensation

Die erfolgreiche Anwendung der Kompensationssoftware stellt an die Ausgangssimulation einige Anforderungen. Die Werkzeuge müssen hinreichend fein vernetzt sein. Dabei sollte darauf geachtet werden, daß die Elementkantenlängen der Platine mit denen der Werkzeuge an wesentlichen Stellen übereinstimmen.

Vernetzungskriterien:

- Maximale Elementkantenlänge 5 mm: Das Vernetzen der Wirkflächen mit einer kleineren Elementkantenlänge gegenüber einer normalen Tiefziehsimulation begründet sich durch das Überdrücken der CAD-Flächen. Die vernetzten Wirkflächen werden modifiziert und im Anschluss die CAD-Daten auf Basis der Werkzeugnetze verändert. Je mehr Informationspunkte auf die Flächen übertragen werden können, desto genauer ist auch die Abbildung der Rückfederungsinformationen auf die Werkzeuggeometrie. Bei einer Standardvernetzung kommen Elementkantenlängen um 30 mm zum Tragen. Um die CAD-Daten flexibler modifizieren zu können, ist eine Verringerung auf 5 mm gesetzt worden. Dies bedeutet, daß spätestens alle 5 mm ein Stützpunkt die exakte Geometrie beschreibt. Die Rückführung der Netzgeometrie in CAD-Daten ist für das Fräsen der Werkzeuge notwendig.
- Maximale Elementkantenlänge von wenig gekrümmten Bereichen (Blechhalter), wenn sie nicht von der Platine überdeckt werden: 20 mm
- Sekantenabstand: 0.01 mm

Die Elementkantenlänge der Werkzeuge muß in kompensationswichtigen Bereichen der Elementkantenlänge der Platine entsprechen. An jedem Knoten der Platine wird die Information der Rückfederung auf das Werkzeug übertragen. Dementsprechend viele Knoten sollten auch im Werkzeug vorhanden sein. Ein weiteres Kriterium ist der kleinste mögliche Elementkantenwinkel. Werden Elemente mit kleinem Kantenwinkel kompensiert, so drohen sie schnell zu kippen, was zu Unstetigkeiten der Oberflächenbeschreibung führt. Die Folge sind Unstetigkeiten bei den Ziehergebnissen. Es ist daher notwendig, die kompensierten Wirkflächen hinsichtlich ihrer Elemente zu überprüfen.

### 2.3.7. Ziehleistersatzmodell

Um die Rechenzeiten von Tiefziehsimulationen zu verkürzen, sind analytische Ersatzmodelle für Ziehleisten entwickelt worden.

In Abbildung 2.10 ist die Ziehleiste rot dargestellt. Je nach Ausprägung der Leiste entsteht eine Rückhaltekraft beim Einlaufen der Platine [100]. Die Ziehleisten können in der Werkzeugeinarbeit leicht verändert werden. Es wird eine Rückhaltekraft auf die einfließende Platine aufgebracht. Diese kann mit einfachen Mitteln zurückgenommen werden, wenn das Bauteil nicht herstellbar ist. Die Blechrückhaltung verursacht in der umgeformten Platine eine Dehnung. Durch das Plastifizieren des Bleches erfolgt eine gewünschte Verfestigung [63], die einen positiven Effekt bei der Verringerung maßlicher Abweichungen darstellt [55, 1, 58].

Simulationstechnisch sind diese Ziehleisten, wenn sie geometrisch im Werkzeug vorhanden sind, ungünstig. Aufgrund der Adaptivität der Platine erfolgt an der Stelle der

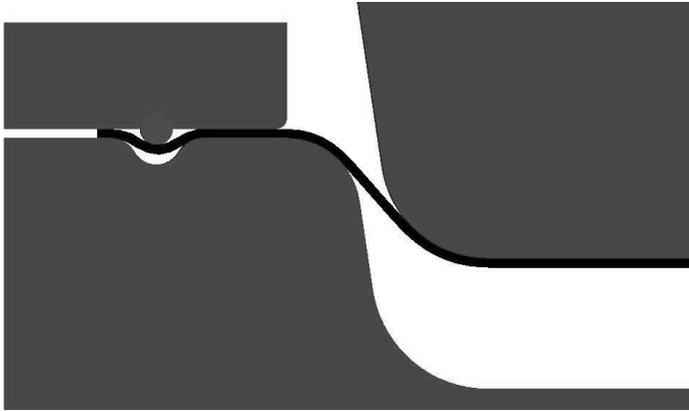


Abbildung 2.10.: Ziehleiste in einem Werkzeug

Ziehleiste eine starke Elementverfeinerung. Diese erhöht den rechnerischen Aufwand für den FEM-Code erheblich. Um die Rechenzeiten zu verringern, haben die Softwareentwickler Ersatzmodelle für Ziehleisten entwickelt. Basis eines jeden Ersatzmodelles ist ein Linienzug, welcher die Ziehleiste darstellt. Dem Linienzug wird eine Rückhaltekraft per Zahlenwert mitgegeben und entsprechend des Zahlenwertes wirkt diese Kraft auf die einfließenden Platinenelemente. Bei der Software INDEED wird beispielsweise eine Rückhaltekraft in Newton pro mm Länge der Ziehleiste definiert. Jeder Knoten, welcher über diese Ziehleiste gezogen wird, erfährt in jedem Zeitschritt diese rückhaltende Kraft entsprechend der Elementkantenlänge. Übliche Werte sind 50, 100 und 200  $N/mm$ .

Für die Verwendung der Ersatzmodelle wird ein Linienzug generiert, welcher die Ziehleiste darstellt. Die Sickenkraft entlang dieser Linie berechnet sich folgendermaßen [90]:

$$F_{PL} = -F_B \cdot f_g \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan \frac{|\vec{V}_{rel}|}{s_c} \cdot \frac{\vec{V}_{rel}}{|\vec{V}_{rel}|}$$

Dabei sind:

- $F_{PL}$  : Knotenlast, die aus den projizierten Linien resultiert
- $F_B$  : Benutzerkraft
- $f_G$  : Gewichtsfaktor des zu belastenden Knotens
- $\vec{V}_{rel}$  : Vektor der Geschwindigkeit des zu belastenden Knotens
- $|\vec{V}_{rel}|$  : Norm von  $\vec{V}_{rel}$
- $s_c$  : Glättungsparameter (siehe Abbildung 2.8 auf Seite 34)

## 2.4. Zusammenfassung Stand der Technik

Zusammenfassend ist durch wissenschaftliche Arbeiten die Grundlage geschaffen worden, Rückfederungen innerhalb eines bestimmten Tolerzbereiches zur Realität berechnen zu können. Die dafür notwendigen Werkstoffmodelle stehen zur Verfügung und die wichtigsten Einflußfaktoren sind bekannt. Vergleiche zwischen Simulation und Praxis zeigen qualitativ gute Übereinstimmungen. Allerdings ist nach Rohleder [88] mit quantitativen Abweichungen von 30% bis 40% bei der Simulation formänderungsbedingter Rückfederungen zu rechnen. So wird empfohlen, bei konventionellen Tiefziehstählen das Fließkriterium nach Hill48 anzuwenden. Bei Simulation höherfester Stähle und Aluminium hingegen ist zu empfehlen, das Fließkriterium nach Barlat & Lian zu verwenden. Einen signifikanten Einfluß bei der Wahl der Werkstoffkennwerte [14] haben der E-Modul und die Streckgrenze sowie die Extrapolation der Fließkurve. Die geringsten Abweichungen wurden unter Verwendung des Extrapolationsgesetzes von Voce erreicht. Nach Schmidt-Jürgensen [89] ist die Verwendung eines dehnungsabhängigen E-Moduls, ebenso wie die Verwendung dehnungsabhängiger  $r$ -Werte weniger empfehlenswert.

Die Wahl der „richtigen“ Werkstoffkenngrößen stellt derzeit noch eine große Herausforderung dar. Werkstoffkenngrößen adäquat zu wählen, ist ein Abwägungsprozess zwischen Meßergebnissen, nachsimulierten Versuchen und simulationstechnisch günstigen Vereinfachungen, bei welchen Informationen über die tatsächlich entstehenden Rückfederungen in die Werkstoffkennwerte einfließen.

## 3. Zielsetzung und Vorgehensweise

### 3.1. Zielsetzung

Bei der Herstellung von Karosseriebauteilen ist das Tiefziehen bei Volumenmodellen in der Automobilindustrie ein wichtiges Fertigungsverfahren. Der Anteil von hoch- und höchstfesten Stählen sowie Aluminium wird im Rahmen der Fahrzeuggewichtsreduzierung und der Erhöhung der Crashesicherheit steigen.

Rückfederungserscheinungen sind prozeßbedingt nicht zu vermeiden. Werden während des Methodenentwicklungsprozesses der Tiefziehwerkzeuge keine kompensierenden Maßnahmen ergriffen, so erfolgt die Optimierung maßlicher Abweichungen in der Werkzeugearbeitung. Diese Vorgehensweise ist zeit- und kostenintensiv, schwer zu kalkulieren. Optimierungen an Werkzeugen während des Produktentstehungsprozesses können bis zu 30% und mehr [20] der eigentlichen Werkzeugkosten ausmachen.

Ziel der Dissertation ist es, auf Basis der FEM ein Konzept vorzustellen, den Aufwand der Einarbeit zu reduzieren, ihn besser zu kalkulieren und mit dem Kompensationsergebnis deutlich zu verbessern. Dazu werden in einem ersten Schritt Bauteilgeometrien virtuell optimiert. Im zweiten Schritt wird während der Konstruktion der Ziehanlage die Rückfederung berechnet. Die sich ergebende maßliche Abweichung dient als Grundlage für eine geometrische Korrekturmaßnahme, um die maßlichen Abweichungen so gering wie möglich ausfallen zu lassen.

### 3.2. Abgrenzung

Der erste Schritt befaßt sich mit der Optimierung der Bauteilgeometrien relativ zueinander. Dabei sind die geometrischen Formen mit einer möglichst hohen Bauteilsteifigkeit zu versehen. Werkstoffeigenschaften werden in diese Betrachtung nicht mit einbezogen. Im zweiten Schritt wird das virtuelle Rückfederungsergebnis auf Basis der FEM-Simulation der Ziehanlage geometrisch relativ zur Sollgeometrie bewertet. Auf Basis des Rückfederungsergebnisses erfolgt eine Ziehanlagenmodifikation, wobei die Güte des Rückfederungsergebnisses direkt in die Modifikationsmaßnahme einfließt.

### 3.3. Vorgehensweise

Die Simulation von Tiefziehvorgängen ist mittlerweile Stand der Technik. Sie dient dazu, Qualität, Herstellbarkeit und Pressenkräfte bei der Planung mit zu berücksichtigen. Die in den letzten Jahren sich stetig verbessernden Ergebnisse bei der Berechnung von Rückfederungen erlauben inzwischen eine zielführende geometrische Korrektur der Tiefziehwerkzeuge. Neue Werkstoffmodelle haben in den letzten Jahren maßgeblich zu einer Steigerung der Genauigkeit bei der Rückfederungsberechnung geführt, allerdings bereitet die Messung und Aufarbeitung der Werkstoffkennwerte noch Probleme.

Die sich nach der Werkzeugentlastung und dem Beschnitt einstellende Rückfederung ist hauptsächlich abhängig von der Geometrie und den freiwerdenden Eigenspannungen nach dem Beschneiden.

Innerhalb dieser Dissertation wird ein Konzept erarbeitet, Bauteilgeometrien hinsichtlich ihrer geometrischen Form bezogen auf die Rückfederungsneigung zu bewerten. Danach werden die durch den Herstellungsprozeß entstehenden Rückfederungen bei der folgenden Methodenauslegung der Werkzeuge berücksichtigt. Dabei wird eine korrekte Berechnung der Rückfederung vorausgesetzt. Mit Hilfe der Prozeßparameter und dem Bestimmen einer Werkzeugkompensationsform soll ein beschnittenes Bauteil möglichst identisch zur gegebenen Sollgeometrie berechnet werden. Die angenommene Lagerung orientiert sich an der Lagerung des Bauteils in der Meßlehre. Mit dieser Lagerung und der beschriebenen Sollgeometrie wird eine energetische Größe berechnet ( $\rho_{rf}$ ).

Bei der Bewertung von Bauteilgeometrien gilt es, die geometrische Steifigkeit zu maximieren. Diese energetische Größe berechnet sich durch die Summe aller an den Knoten herrschenden Verschiebungen, multipliziert mit den jeweiligen Kräften. Im Anschluß daran wird die entstehende Rückfederung mit Hilfe der Ziehanlage berechnet und es gilt die Rückfederungsenergie  $\rho_{rf}$ , also die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie, zu minimieren. Bestimmender Prozeßparameter ist die Kompensationsform der Werkzeugwirkflächen, die zu einer Minimierung der energetischen Größe  $\rho_{rf}$  führt. Die Rechnerkapazitäten sind inzwischen ausreichend, um auch komplexe Wirkflächengeometrien hinreichend schnell zu optimieren. Mit der Automatisierung der Rückfederungsberechnung in Kombination mit Optimierungsprogrammen wird ein adäquates Mittel vorgestellt, Berechnungsressourcen zu nutzen, um den bestmöglichen Prozeß für eine optimale Bauteilgeometrie mit Hilfe der FEM zu berechnen.

# 4. Neue Methoden zur Verringerung der maßlichen Abweichungen

## 4.1. Vorstellung des Gesamtkonzeptes/ Regelkreis der Rückfederung

Der Kreislauf beginnt mit der Zieldefinition einer Bauteilgeometrie. In einer sehr frühen Planungsphase beginnt die Analyse der Bauteilgeometrie seitens der Methodenplanung. An dieser Stelle im Produktentstehungsprozeß (PEP) verursachen Bauteilmodifikationen die geringsten Änderungskosten. Anhand der Erfahrungen vom Rückfederungsverhalten aus vorherigen Fahrzeugprojekten wird die Bauteilgeometrie anhand eines energetischen Ansatzes bewertet. Mehrere Bauteilvarianten werden klassifiziert und unterschiedliche Modifikationen ins Bauteil eingebracht. Für die Entwicklung der Ziehanlage wird die Bauteilgeometrie herangezogen, welche seitens der Simulation das ziehtechnische Optimum darstellt. Sind die Wirkflächen erstellt, erfolgt die Optimierung der Prozeßpa-

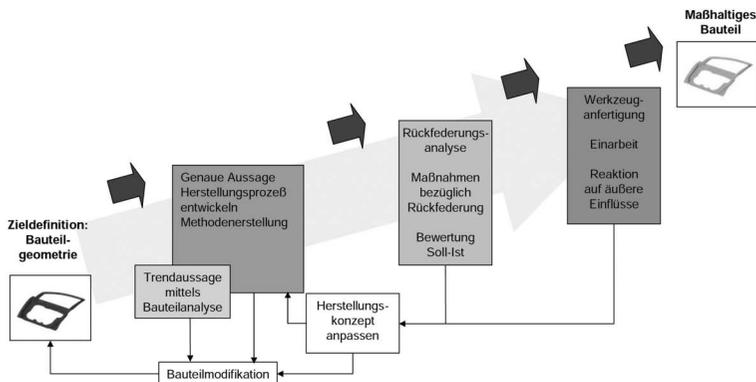


Abbildung 4.1.: Regelkreis der Rückfederung

parameter und die Korrektur der Wirkflächenform, die nach erfolgter Rückfederung dem beschnittenen Ziehteil der Sollgeometrie entspricht. Wenn das Werkzeugkonzept umgesetzt wird und erste Bewertungen der maßlichen Abweichungen vorliegen, werden die Maßnahmen mittels „Reverse Engineering“ [69, 68, 71, 70, 77, 72, 73, 74] überprüft. Das Prinzip dieser ErgebnISRückführung beruht darauf, die Werkzeugwirkflächen zu digitalisieren, um die Ergebnisse aus dem realen Prozess mit denen der berechneten Daten zu vergleichen.

## 4.2. Bauteilgeometriebezogene Bewertung ohne Betrachtung des Fertigungsprozesses

### 4.2.1. Energie-Verschiebungs-Steifigkeitszusammenhang

Der Zwang, Bauteilgeometrien zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozeß zu beeinflussen, beruht auf der Erfahrung, daß die Änderungskosten an einem Bauteil umso geringer sind, je früher Modifikationen einfließen. Untersucht werden soll im folgenden, ob es möglich ist, Modifikationen an einer Bauteilgeometrie hinsichtlich der Rückfederung beurteilen zu können.

Rückfederungen resultieren aus elastischen Deformationen der umgeformten Platine, die durch freiwerdende Eigenspannungen nach der Entlastung der Werkzeuge und dem Beschneiden entstehen. Wirken Kräfte auf eine Geometrie ein, so sind Deformationen von der Steifigkeit der Struktur abhängig. Die Steifigkeit eines Bauteils ist abhängig vom E-Modul des Werkstoffes und der Geometrie, genauer dem Flächenträgheitsmoment.

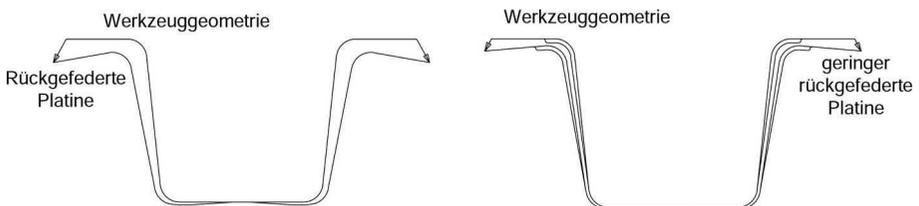


Abbildung 4.2.: Verringerung der Rückfederung durch Erhöhung der Steifigkeit

In Abbildung 4.2 sind im Querschnitt zwei unterschiedliche Profile dargestellt. Die linke Seite stellt ein U-Profil ohne Versteifungssicke dar, rechts sind zusätzliche Versteifungssicken eingebracht. Unter der Annahme, daß durch höhere Flächenträgheitsmo-

mente infolge der Versickungen nach Entlastung der Werkzeuge weniger Eigenspannungen freiwerden, fallen die Rückfederungen im versteiften Bauteil geringer aus (siehe Abbildung 4.2 Seite 43).

Dieser Einfluß von geometrischen Versteifungen wird im Umkehrschluss für die Beurteilung von Bauteilgeometrien herangezogen. Dabei ist das Konzept für die Beurteilung von Bauteilgeometrien so ausgerichtet, daß unterschiedliche Bauteilgeometrien relativ zueinander bewertet werden können. Es werden virtuell Belastungen auf verschiedene Bauteilgeometrien aufgebracht und diejenige, welche aufgrund ihres Flächenträgheitsmoments den größten Verformungswiderstand aufweist, wird als rückfederungsgünstig bewertet.

In Abbildung 4.3 wird die Belastung eingebracht, die einer normierten virtuellen Ver-

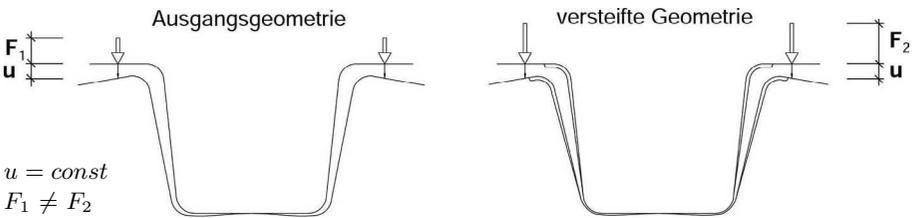


Abbildung 4.3.: U-Profile unter Einheitsbelastungen

rückung von  $1,0 \text{ mm}$  entspricht. Die Geometrie reagiert mit einer Aktionskraft  $F_1$  auf die eingebrachte Deformation  $u = 1,0 \text{ mm}$ . Wird das Profil verstärkt und die identische Zwangsverschiebung aufgebracht, so ist die resultierende Kraft  $F_2$  größer als  $F_1$ . Zur Bewertung wird der innere energetische Zustand, welcher sich aus dem Produkt von Kraft mal Weg [35] ergibt, über das gesamte Bauteil ausgewertet. Bei dem späteren Bewertungskonzept wird derjenige Querschnitt favorisiert, welcher die größte Energiesumme erzielt. Je höher die Energie ist, um so größer ist die Steifigkeit, welche der Rückfederung entgegenwirkt.

Diese Annahme wird an vier unterschiedlichen Querschnitten aufgezeigt und entsprechend der ausgerechneten Energie bewertet. In die Profile sind unterschiedliche Versteifungssicken eingebracht worden, um die Rückfederung zu minimieren. Für den Vergleich wurden von vier unterschiedlichen U-Profilen virtuell Ziehanlagen aufgebaut, um die Ergebnisse der Geometriebewertung mit den Ergebnissen aus dem Ziehen abzugleichen.

Die Profile sind symmetrisch aufgebaut. In Abbildung 4.5 sind die eingebrachten Versteifungssicken dargestellt. Die Schnitte sind entsprechend dem Ergebnis der Rückfederung geordnet. Modell 0 ist das Ausgangsprofil, bei Modell 1 sind drei Versteifungssicken je Seite im Bereich des Einlaufradius eingebracht worden (siehe Abbildung 4.4). Bei Modell

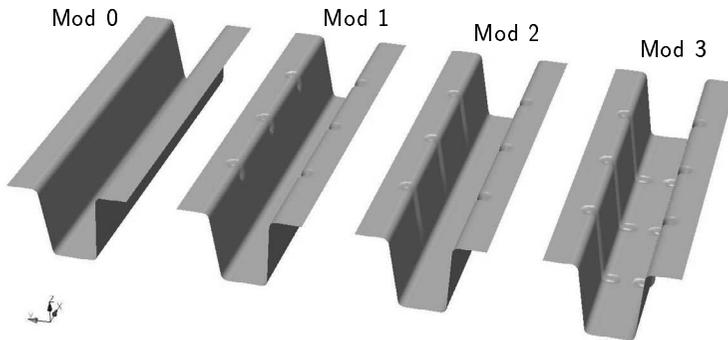


Abbildung 4.4.: U-Profile mit versteifenden Sicken

2 läuft diese Sicke im Bereich der Wand nach unten hin aus. Bei Modell 3 erstreckt sich diese Sicke über die komplette Wand und wird im Boden auf die Ausgangsgeometrie zurückgeführt. Alle in Abbildung 4.5 dargestellten Profile sind  $400\text{ mm}$  lang. Bei den

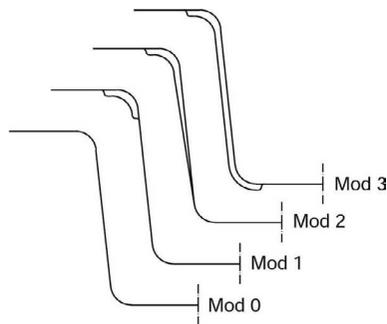


Abbildung 4.5.: 4 Profile mit unterschiedlichen Versteifungen

Varianten Mod 1, 2 und 3 weisen die eingebrachten Versteifungssicken einem Abstand von  $100\text{ mm}$  zum Rand, als auch zur nächsten Sicke auf. Die Profile haben eine Höhe von  $84,3\text{ mm}$ . Der Flansch ist relativ zur Ziehrichtung um  $6^\circ$  geöffnet. Der Sickenquerschnitt ist in Abbildung 4.6 beschrieben.

Die ins Profil eingebrachten Sicken nach Abbildung 4.6 beziehen sich auf die geometrische Mittelschicht über die Bauteildicke. Bei der gewählten Materialstärke von  $1,0\text{ mm}$  ergibt sich stempelseitig ein Geometrieverlauf mit einem Offset von  $0,55\text{ mm}$  nach oben und matrizenseitig ein Offset von  $0,55\text{ mm}$  nach unten. Bei einer Materialstärke

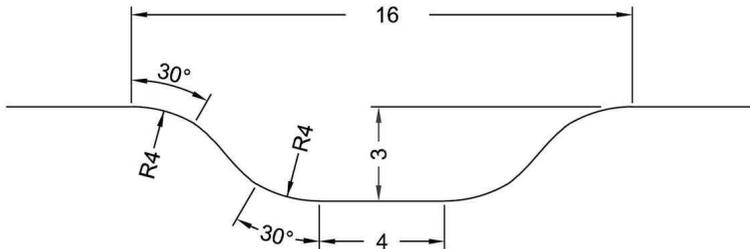


Abbildung 4.6.: Schnitt durch in U-Profil eingebrachte Sicke

von  $1,0\text{ mm}$  wird bei der Erzeugung der Tiefziehwerkzeuge insgesamt ein Offsetdelta von  $0,1\text{ mm}$  aufgebracht

Die Lagerung der Profile sowohl für die Steifigkeitsuntersuchung als auch für die Berechnung der Rückfederung ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Sie ist analog der Lagerung in der Meßlehre vorgenommen worden. Es wurden je Lagerungsort drei Punkte gefesselt, was aus simulationstechnischen Gründen vorgenommen wird.

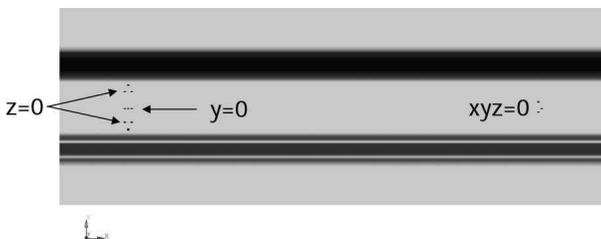


Abbildung 4.7.: Lagerung der U-Profile

Es werden zwei unterschiedliche Lastfälle untersucht. Im Lastfall 1 werden Zwangsverschiebungen auf das Profil im Bereich der Flansche eingeleitet. Im Lastfall 2 werden Verdrehungen auf den Flansch eingeleitet. Die Richtung der einwirkenden Zwangsverdrehung und Zwangsverschiebung ist derart gewählt, daß Rückfederungsverschiebung und Zwangsverschiebung in dieselbe Richtung zeigen.

Bei dieser Methode ist es nicht von Bedeutung, in welche Richtung die aufzubringenden Zwangsbedingungen wirken. Für die Auswertung wird der innere energetische Zustand durch einen linear-elastischen FEM-Solver ausgerechnet. Dieser ist nach Gleichung 2.7 (s. Seite 29) von der Richtung der aufgebracht Zwangsverschiebungen unabhängig. Dabei ist Voraussetzung, daß alle Zwangsbedingungen in die gleiche Richtung wirken. Dieses wird dadurch gewährleistet, daß eine einheitliche Normalenausrichtung in der zu untersuchenden Bauteilgeometrie vorliegt.

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (4.1)$$

Die Bewegungsgleichung ist auf Seite 29 in Gleichung 2.7 beschrieben. Da in diesem Fall eine linear elastische Berechnung durchgeführt wird, kommt nur ein Teil der Bewegungsgleichung zum Einsatz (die Gleichung 4.1 zeigt die Bewegungsgleichung unter Wegfall der Terme, die die Massen- und Federungs-dämpfungsmatrix beschreiben). Wird in der Newton-Eulerschen Bewegungsgleichung  $\mathbf{U}$  negativ (Gleichung 2.7), so resultiert daraus ein negativer Kraftvektor  $\mathbf{R}$ . Die Energie berechnet sich mit  $\sum \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{R}_i$ . Sind  $\mathbf{U}$  und  $\mathbf{R}$  negativ, so hebt sich das Vorzeichen auf.

In Abbildung 4.8 sind die beiden untersuchten Belastungen dargestellt.

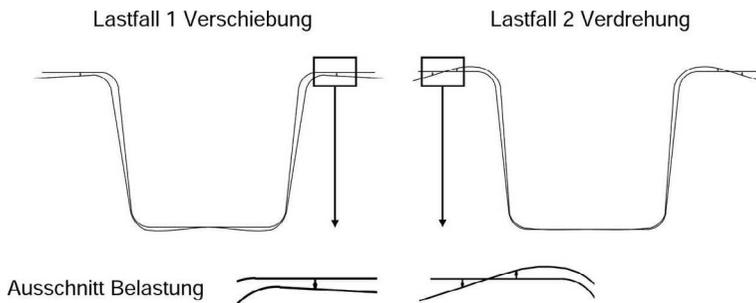


Abbildung 4.8.: Lastfall 1 & 2 der Profile

Im Lastfall 2 wird die Verdrehung durch zwei Verschiebungen, welche in unterschiedliche Richtungen wirken, aufgebracht.

Die Ergebnisse im Einzelnen sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Lastfall 1 Verschiebung				
Energie [ <i>mJ</i> ]	Mod 0	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Belastung linke Seite	398,796	461,174	578,914	593,098
Belastung rechte Seite	398,822	461,257	578,910	593,158
Beidseitige Belastung	755,676	867,510	1100,33	1105,96
Lastfall 2 Verdrehung				
Energie [ <i>mJ</i> ]	Mod 0	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Belastung linke Seite	9054,32	9608,79	10503,0	10836,6
Belastung rechte Seite	9053,83	9609,55	10500,6	10836,8
Beidseitige Belastung	18287,2	19590,5	21299,4	21820,3

Die Belastungen sind auf den linken und den rechten Flansch getrennt aufgebracht worden, um die Symmetrieeigenschaften der Systeme unter Beweis zu stellen. Die berechneten Energien steigen mit der Nummer der gewählten Modellvarianten Mod 0, 1, 2 und 3 in beiden Belastungsfällen an (siehe Abbildung 4.9 und 4.10).

#### Energie [Millijoule]

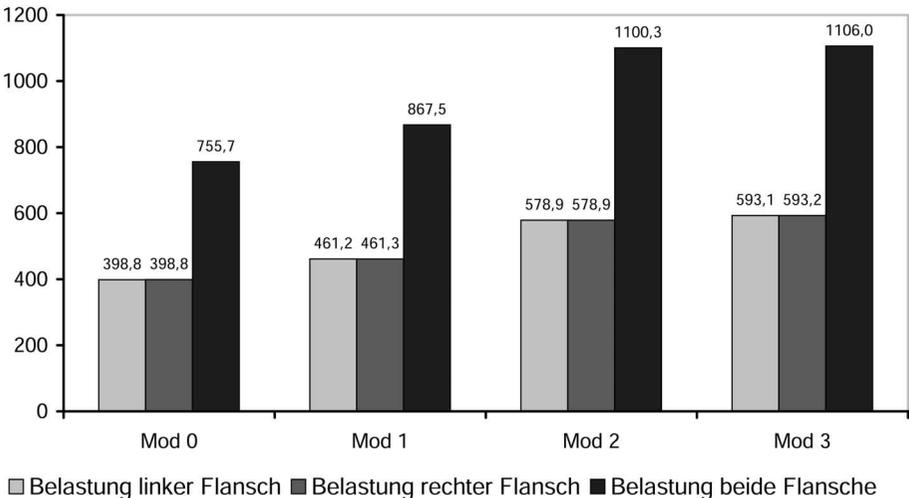


Abbildung 4.9.: Ergebnisse Lastfall 1 (Verschiebung): Energie Mod 0, 1, 2 und 3

Durch die FEM-Berechnung mit normierten Zwangsverschiebungen kann eine Abstufung des „energetischen Widerstands“ der Profile festgestellt werden. Im nachfolgenden

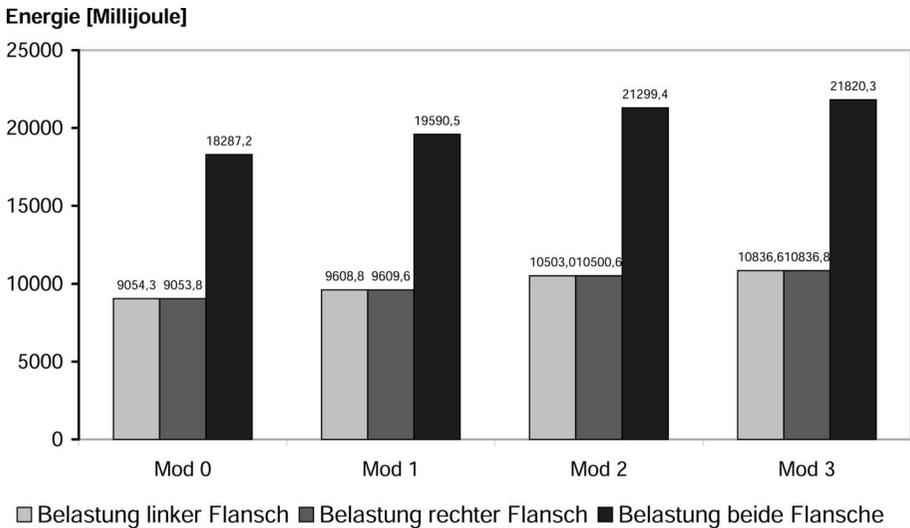


Abbildung 4.10.: Ergebnisse Lastfall 2 (Verdrehung): Energie Mod 0, 1, 2 und 3

Kapitel wird das Ergebnis des Rückfederungsverhaltens mit denen tiefgezogener Profile verglichen.

#### 4.2.2. Vergleich des Rückfederungsverhaltens gezogener U-Profilvarianten

Der Abgleich mit Ergebnissen der tiefgezogenen U-Profil-Varianten erfolgt auf Basis von Umformsimulationen. Für jede Modellvariante wurde eine virtuelle Ziehanlage aufgebaut. Dabei wird mit einem Blechhalter und Ziehleisten mit einer Standardrückhaltung von  $100 \text{ N/mm}$  gerechnet. Die versteifenden Sicken analog der Varianten Mod 1, 2 und 3 werden gezogen. Nach dem Ziehen erfolgt der Beschnitt. Danach wird die Rückfederung berechnet, wobei die Lagerung für die Rückfederungsberechnung analog zu der Lagerung der Bauteilgeometrieberechnung vorgenommen wurde. Als Werkstoff wurde ein HX340LAD benutzt. Bewußt ist ein höherwertiger Stahl ausgewählt worden, um die Rückfederung möglichst hoch ausfallen zu lassen.

Die Ergebnisse der Rückfederung aus den Ziehanlagen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

		Mod 0	Mod 1	Mod 2	Mod 3
$\gamma_{min}$	[mm]	-0,17	-0,17	-0,32	-0,39
$\gamma_{max}$	[mm]	+3,27	+2,52	+2,09	+0,79
Differenz $_{max-min}$	[mm]	3,44	2,69	2,41	1,18
$\bar{\gamma}_Q$	[mm]	1,17	0,96	0,71	0,24

Zur Auswertung der Rückfederung werden Extremalwerte aus der Differenz zwischen Minimum und Maximum betrachtet. Die sich einstellenden Ergebnisse nehmen, wie im vorherigen Kapitel prognostiziert worden ist, ab. Ebenso nimmt die flächennormierte Rückfederung  $\bar{\gamma}_Q$ , welche im Abschnitt 4.3.3 auf Seite 55 beschrieben wird, ab. Das Rückfederungsverhalten konnte durch das Einbringen versteifender Sicken von 1,17 mm auf 0,24 mm reduziert werden. Dies entspricht einer Abnahme um 79,5 % beim Tiefziehen zwischen Mod 0 und Mod 3. Die prognostizierte Veränderung der Rückfederung auf Basis der Bauteilgeometrieuntersuchung liegt bei  $\frac{756}{1106} = 68,3\%$ , was einer Reduzierung von 31,7 % entspricht. Die Differenz bei der Rückfederungsverringerung ist relativ hoch, wobei die Beurteilung der Steifigkeitsverhältnisse eine ausschließlich qualitative Methode darstellt. Sie liefert Trendergebnisse, welche in diesem Beispiel bestätigt werden konnten.

## 4.3. Ziehanlagenbezogene Rückfederungsoptimierung auf Basis einer Ziehanlage

### 4.3.1. Ablauf der Prozeßkette zur Optimierung einer Ziehanlage

Dem Ablauf nach Abbildung 4.1 auf Seite 42 folgend, wird nach Festlegung der Bauteilgeometrie eine Ziehanlage entwickelt. Für diese Ziehanlage werden die optimalen Wirkflächengeometrien berechnet, wobei die Prozeßparameter der Blechhalterkraft [79] und Ziehleisten genutzt werden, um ein beschnittenes Ziehteil zu erhalten, welches die geringste mögliche maßliche Abweichung zur Sollgeometrie aufweist. Für diese Berechnung wird ein externer Optimierungssolver verwendet. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Rückfederungsenergie (siehe Abschnitt 4.3.2 auf Seite 51) unter der Bedingung, daß das Bauteil rißfrei herstellbar ist. Die Variationsparameter sind sowohl in

der Simulation, als auch in der Praxis einfach zu variieren. Die Optimierung erfolgt nach einer Differentialgleichungsentwicklung [94], welche vom Programm (Optimus) selbst vorgenommen wird (Erläuterung der Differentialgleichungsentwicklung nach [94] ist in Anlagen auf Seite 89 im Kapitel A.4 aufgeführt). Ist das Optimum gefunden, erfolgt eine Kompensation (siehe Abschnitt 2.3.6) der Ziehanlage. Danach erfolgt für die kompensierte Wirkflächengeometrie erneut eine Optimierung inklusive anschließender Kompensation. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis das Niveau der Rückfederungsenergie stagniert oder die Wirkflächen derart steil werden, daß keine i.O.-Teile mehr erwartet werden können. Läuft die Optimierungskette ab, wird eine feste Anzahl an Simulationen je Iterationsschleife gestartet. Ist die Anzahl der parallel laufenden Rechnungen beendet, startet das Optimierungsprogramm wieder die feste Anzahl an Simulationen, allerdings mit verändertem Parametersatz. Im Rahmen dieser Arbeit sind immer acht Simulationen gleichzeitig gestartet worden, wobei die Anzahl der Iterationsschleifen variieren konnte. Durch den Optimierungsalgorithmus wird eine optimale Einstellung der Ziehparameter berechnet. Nach [55, 1] ist durch die Erhöhung von Streckziehanteilen eine bessere Abformgenauigkeit, also eine Verringerung maßlicher Abweichungen, zu erzielen. Nach [88] ist das ausschlaggebende Maß für die Größe der formänderungsbedingten Abweichungen der Anteil der elastischen Dehnung an der Gesamtdehnung. Im Konzept der Arbeit wird die Optimierungssoftware das Simulationsprogramm steuern, um ein Ergebnis zu berechnen, welches nach der Rückfederung bestmöglich der Sollgeometrie entspricht.

### 4.3.2. Bewertung von Rückfederung

Um die Ergebnisqualität der Meßwerte zu verbessern, wird ein Spannkonzzept zur Lagerung in der Meßlehre erstellt [81]. Die Bauteile werden an vorgegebenen, im Protokoll vermerkten Punkten vermessen.

Die Modifikation einer Ziehanlage hat unterschiedliche Auswirkungen. Einige Bereiche verbessern sich, während andere Bereiche sich auch verschlechtern können. Die Auswertung der maßlichen Abweichungen wird nach der Durchführung einer Simulation automatisiert gestartet. Dabei wird der orthogonale Abstand zweier Geometrien an jeder Stelle bestimmt und als Farbdarstellung ausgegeben.

In Abbildung 4.11 sind die Ergebnisse zweier Simulationen dargestellt. Beide Ergebnisse stammen aus derselben Ziehanlage, allerdings wurde die Simulation mit unterschiedlichen Prozeßparametern (Ziehleistenrückhaltung und Niederhalterkraft) gefahren. Dementsprechend kommt es zu unterschiedlichen Ergebnissen, da sich der Spannungszustand verändert und sich jeweils ein anderes Gleichgewicht des beschnittenen Ziehteils

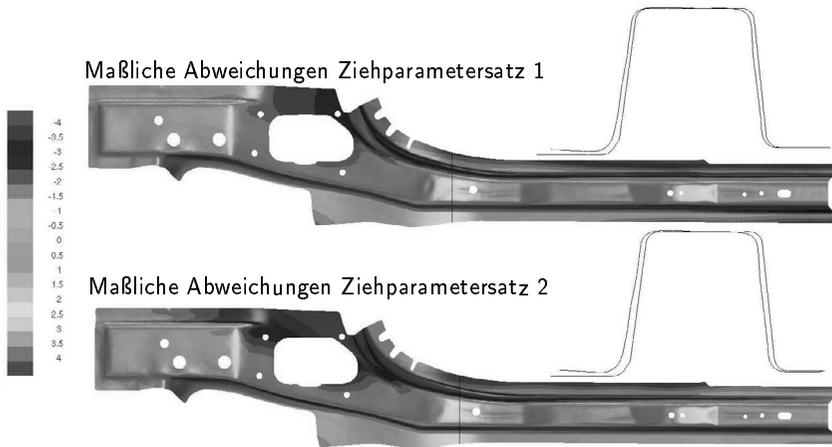


Abbildung 4.11.: Unterschiedliche maßliche Abweichungen

nach Entlastung der Werkzeuge einstellt.

Die Bewertung unterschiedlicher Simulationen hinsichtlich der sich einstellenden maßlichen Abweichungen soll eindeutig sein und muß vollautomatisch ablaufen, was Voraussetzung für die Optimierungssoftware ist. Maßliche Abweichungen können unterschiedliche Vorzeichen besitzen. Ein Bereich kann sich gegenüber der Sollgeometrie anheben oder auch absenken. Eine Optimierung vom Maximum und Minimum in Richtung 0 ist innerhalb dieser Arbeit nicht verfolgt worden, da die Optimierung zweier Größen eine nichttriviale Gewichtungproblematik mit sich bringt [17]. Die Fragestellung, ob es zielführender ist, kleine Abweichungen in großen Gebieten zu kompensieren, oder große Abweichungen in kleinen Gebieten, oder positive Abweichungen günstiger sind als negative, wird nicht geführt. Die Antwort auf diese Fragen liefert die Rückfederungsenergie  $\rho_{r,f}$ , die mittels FEM berechnet wird und sich der Mechanik bedient (siehe Gleichung 4.2 auf Seite 53).

Das beschnittene Bauteil wird analog des späteren Konzeptes der Meßlehre gelagert. Es wird eine energetische Größe ausgerechnet, welche direkt vom rückgefederten Ziehteil abhängt. Beim Errechnen der Rückfederungsenergie wird an den auszuwertenden Punkten eine Zwangsverschiebung von der Ausgangslage zur Sollage aufgebracht. Diese Zwangsverschiebung wirkt auf die Knoten des rückgefederten Bauteils. Die Richtung in einem Knoten wird stets aus dem Mittelwert der umliegenden Dreiecksnormalen bestimmt, welche senkrecht zum Element ausgerichtet sind. Das Produkt aus Kraft und Weg liefert die Energie [50], die innerhalb dieser Dissertation als  $\rho_{r,f}$  bezeichnet wird.

Die Leistung der Verschiebungsarbeit für das aufgestellte System ist 0, da ein stabiler Gleichgewichtszustand vorausgesetzt wird [57]. Es gilt der Energiesatz der Mechanik für diskretisierte Tragwerksmodelle, wobei sich die Kraftgrößenfelder  $\{\mathbf{P}, \mathbf{s}\}$  mit kinematisch kompatibel deformierten Weggrößenfeldern  $\{\mathbf{V}, \mathbf{v}\}$  im Gleichgewicht befinden. [50]:

$$W = W^{(a)} + W^{(i)} = \frac{1}{2}(\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{V} - \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (4.2)$$

Es ist ein Algorithmus entwickelt worden, welcher auf die Knoten der simulierten Bauteilgeometrie eine Zwangsverschiebung in Normalenrichtung aufbringt. Nach dem Aufbringen der Zwangsdeformationen befinden sich die entsprechenden Knoten exakt auf der Sollgeometrie. Der mittels FEM berechnete innere energetische Zustand wird elementweise über das gesamte Bauteil addiert. Dies ergibt eine energetische Gesamtgröße. Diese Gesamtgröße wird in dieser Arbeit als Rückfederungsenergie  $\rho_{r-f}$  definiert. Ist die Energie vom Betrag Null, so sind die entstehenden geometrischen Abweichungen zwangsweise auch Null. Stellt sich bei zwei unterschiedlichen Simulationen ein identisches Rückfederungsbild ein, so bekommt vom energetischen Ansatz diejenige den Vorzug, bei welcher eine geringere Kraft auf die umgeformte Platine aufgebracht werden muß, um sie in Solllage zu zwingen. Aus simulationstechnischen Gründen werden die Zwangsbedingungen nicht auf einen Knoten aufgebracht, sondern es wird ein Zentrum definiert und sämtliche Knoten im Umfeld von 10 mm werden auf ihren entsprechenden Sollzustand zurück gebracht.

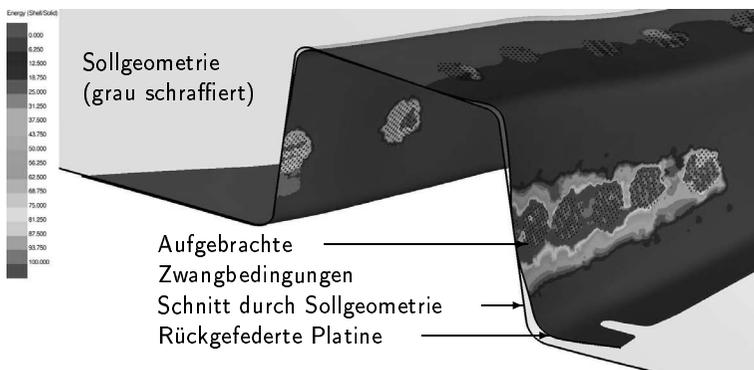


Abbildung 4.12.: Ausschnitt aus einem Profil mit schwarz gekennzeichneten Zwangsbedingungen

In Abbildung 4.12 stellen die schwarzen Punkte die Zwangsbedingungen dar. An diesen Knoten wird die Geometrie auf den Sollzustand zurückgedrückt. Der schwarze Schnitt durch die Geometrie ist ein Schnitt durch die Sollgeometrie. Die Elemente sind ihrer berechneten Energie nach eingefärbt.

Ein weiterer Vorteil der Betrachtungsweise anhand der berechneten Rückfederungsenergie ist es, lokale Orte zu definieren, welche wichtige Funktionen ausüben. Bei Strukturbauteilen sind beispielsweise die das Bauteil verbindenden Flansche von Wichtigkeit. An diesen Stellen werden Zwangsbedingungen definiert. Der Optimierungsalgorithmus ist in der Lage, die Rückfederungsenergie zu minimieren, wodurch auch an den betrachteten Punkten die maßlichen Abweichungen minimiert werden.

Eine weitere sehr wichtige Aussage kann durch das Bestimmen der Rückfederungsenergie gewonnen werden: Wenn sich die Rückfederungsenergie durch den simulativen Aufwand nicht unter ein bestimmtes Niveau senken lässt, so kann die Schlußfolgerung gezogen werden, daß bei der gegebenen Bauteiltrennung mit den berechneten Abweichungen im Karosseriebau zu rechnen ist. Lassen sich die Abweichungen nicht im Karosseriebau ausgleichen, so ist es notwendig, eine andere Bauteilanbindung zu wählen.

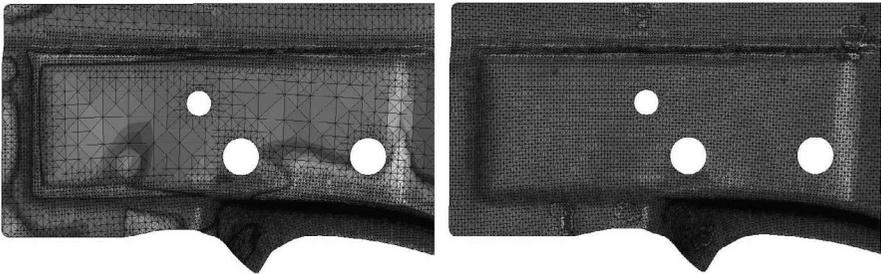


Abbildung 4.13.: Netzkonvertierung zur strukturellen Simulation

FEM-Netze, welche aus einer Umformsimulation stammen, werden in aller Regel während des Tiefziehens verfeinert (siehe Abschnitt 2.3.3, Seite 31). Für strukturelle Fragestellungen sind diese Diskretisierungen in Elemente mit ähnlich langer Elementkantenlänge anzupassen. Deshalb werden alle Elemente, welche eine Elementkantenlänge größer  $5\text{ mm}$  aufweisen, für die strukturelle Simulation geteilt. Die programmierte Routine überprüft alle Elemente und teilt diejenigen, welche über der entsprechenden Schranke liegen, an ihrer langen Seite. Bei diesen Simulationen kommen ausschließlich Dreieckselemente zum Einsatz. Dieser Vorgang erfolgt iterativ, bis keine Elemente mit einer Elementkantenlänge größer  $5\text{ mm}$  mehr vorhanden sind.

Die Berechnung der Energie erfolgt mit der Simulationssoftware NASTRAN. Es wird der Solver 101 für linear-elastische Berechnungen verwendet. Die Schalenelemente werden mit PSHHELL definiert, wobei ein fester E-Modul von  $210000 \text{ N/mm}^2$  [37] zugewiesen wird. Die Elementdicke entspricht der Dicke der Platine aus der Tiefziehsimulation. Die Querkontraktion ist fest mit 0,3 [46] angenommen. Aufgrund des in dieser Arbeit verwendeten Einheitensystems mit *Newton* und *Millimeter* ergibt sich die Energie zu *Millijoule*.

### 4.3.3. Flächennormierte Auswertung maßlicher Abweichungen

Es wird die Größe  $\bar{\gamma}$  zur Bewertung von maßlichen Abweichungen an dieser Stelle vorgestellt. Bei der Berechnung von Abweichungen zwischen zwei Geometrien wird aufgrund der diskreten FEM-Systeme die Abweichung eines Finiten Elements zu einem anderen berechnet. Basis der Berechnung ist der Mittelpunkt des Dreiecks, von welchem die Normale die Richtung anzeigt. Bei den Simulationen auf Basis der Bauteilgeometrie ist es notwendig, die Ergebnisse der Steifigkeitsberechnung mit den Ergebnissen aus dem Tiefziehprozeß zu vergleichen. Es werden Trendaussagen bewertet. Zur Überprüfung ist die flächennormierte Abweichung programmiert worden. Die Finiten-Elemente weisen, je nach den Einstellungen der Adaptivität der Ziehsimulationssoftware, unterschiedliche Flächen auf. Um diesen Einfluß zu eliminieren und um den Aussagetrend einer Ziehanlage in Relation zu anderen beurteilen zu können, wird ein Mittel aller Elemente gebildet. Dazu wird jede Lösung eines Elementes mit seiner Fläche multipliziert und addiert. Bei der Auswertung wird das Ergebnis durch die Gesamtfläche geteilt.

$$\bar{\gamma}_{\text{Q}} = \frac{\sum |\gamma_i| \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (4.3)$$

### 4.3.4. Proportionalität zwischen maßlichen Abweichungen und Rückfederungsenergie

In Abschnitt 4.3.2 wurde die Berechnung der Rückfederungsenergie beschrieben. Der Aufwand, maßliche Abweichungen mittels einer Energie zu bewerten, dient der neutralen Bewertung unterschiedlicher maßlicher Abweichungen. Je geringer die Rückfederungsenergie ist, desto geringer sind die maßlichen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie. Dargestellt wird in Abbildung 4.14 der Zusammenhang zwischen maßlichen Abweichungen und der Rückfederungsenergie, um die Proportionalität zwischen den beiden Größen aufzuzeigen.

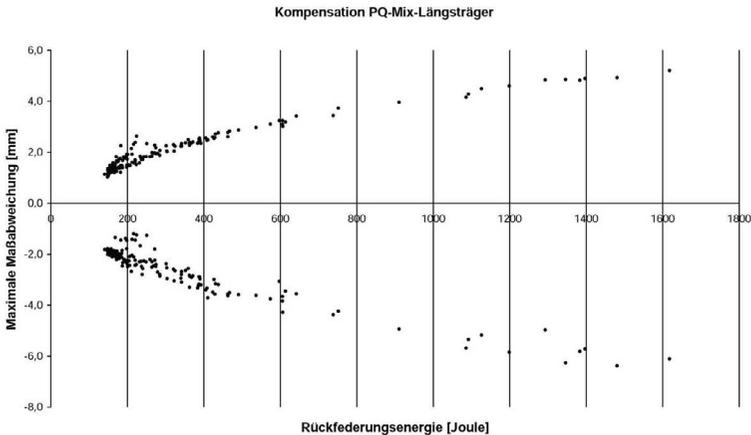


Abbildung 4.14.: Zusammenhang Rückfederungsenergie und maßliche Abweichungen am Beispiel des Längsträgers PQ-Mix bei 160 Simulationen

Das Diagramm zeigt auf der Abzisse die Rückfederungsenergie gemessen in Joule eines vollständigen Bauteils an. Auf der Ordinate sind die zugehörigen Maximal- und Minimalwerte zwischen Soll- und Ist-Geometrie aufgetragen. Es zeigt sich, daß mit fallender Tendenz der Rückfederungsenergie auch die Abweichungen geringer ausfallen.

Bei der Untersuchung am PQ-Mix-Längsträger (siehe Abbildung 4.14) sind 160 Simulationen durchgeführt worden. Das Korrelationsmaß  $\kappa$  zwischen der Rückfederungsenergie und dem Extremwert der Abweichung beträgt 0,95682. Nach [93] kann der Korrelationsfaktor einen Wert 0 bis +1 annehmen. Ist der Betrag 1, liegt Linearität vor, bei 0 ist keine Abhängigkeit zwischen den Ergebnissen festzustellen. Nach [26] zeigen normierte Korrelationskoeffizienten  $> 0,9$  eine nahezu lineare Korrelation zwischen Eingangs- und Antwortgröße. Der Korrelationsfaktor berechnet sich nach folgender Formel:

$$\kappa = \text{corr}(x, y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.4)$$

Bei den gegenübergestellten Größen handelt es sich um die in Abschnitt 4.3.2 vorgestellte Rückfederungsenergie mit der sich einstellenden maßlichen Abweichung. Grundsatz der Betrachtung der maßlichen Abweichungen aufgrund der Rückfederungsenergie ist eine Verbesserung bei fallender Energie. Dieses konnte mit einer Korrelation von 95% gezeigt werden.

### 4.3.5. Vorteil der Energiemethode

Die Vorteile, maßliche Abweichungen mittels einer separat auszurechnenden Rückfederungsenergie zu bewerten, sind nachfolgend aufgeführt:

- Die Berechnung der Rückfederungsenergie  $\rho_{r,f}$  erfolgt für ausgewählte Bereiche. Somit ist die Möglichkeit gegeben, unwichtige Bereiche (z.B. Nachformungen) ausklammern zu können, wodurch die Optimierung mehr Aktionsfreiheit erreicht.
- Maßliche Abweichungen sind mit einem Vorzeichen belegt. Wie sich eine Gewichtung zwischen den beiden Vorzeichen gestaltet, entscheidet sich aufgrund der mechanischen Antwort der Rückfederungsenergie, also analytisch.
- Praxiserfahrungen zeigen unterschiedliche Ergebnisse in der Einarbeitung. So gibt es unterschiedliche Meinungen darüber, ob große Abweichungen in kleinen Bereichen, oder kleine Abweichungen in großen Bereichen einfacher einzustellen sind. Die Methode, maßliche Abweichungen mittels Rückfederungsenergie zu betrachten, löst diese Frage auf Basis der Mechanik.
- Beim Lösen der Steifigkeitsmatrix ziehen Singularitäten die Möglichkeit unterschiedlicher Ergebnisse nach sich (Analogie zum Knickstab). In ähnlicher Weise ist es möglich, unterschiedliche Modalformen eines rückgefederten Ziehteils auszurechnen. Der Ansatz der Rückfederungsenergie bewertet den mechanisch günstigsten energetischen Zustand. Somit wird das Alternieren zwischen zwei Zuständen beim Lösen mit einer Optimierungssoftware ausgeschlossen.

### 4.3.6. Unschärfe bei der Beurteilung von Rückfederungssimulationen

Bei der Bewertung von Rückfederungssimulationen werden unterschiedliche Geometrien einander gegenüber gestellt und numerisch verglichen. Generell stellt die Methode der Finiten Elemente eine Näherung an die klassische mechanische Theorie dar. Je kleiner die Elementierung ist, desto exakter wird die Struktur geometrisch abgebildet und desto exakter kann das Ergebnis mit der analytischen Lösung in Einklang gebracht werden. Allerdings steigt mit der Zunahme der Knoten auch die Anzahl der zu lösenden Gleichungen und der Rundungsfehler beim Lösen der Gleichung erhöht sich.

Das Ergebnis der beschnittenen, rückgefederten Geometrie wird im FEM-Code innerhalb dieser Arbeit nach der Schalentheorie ermittelt. Zur Untersuchung von maßlichen Abweichungen wird jedes Schalenelement in seiner geometrischen Mittellinie betrachtet.

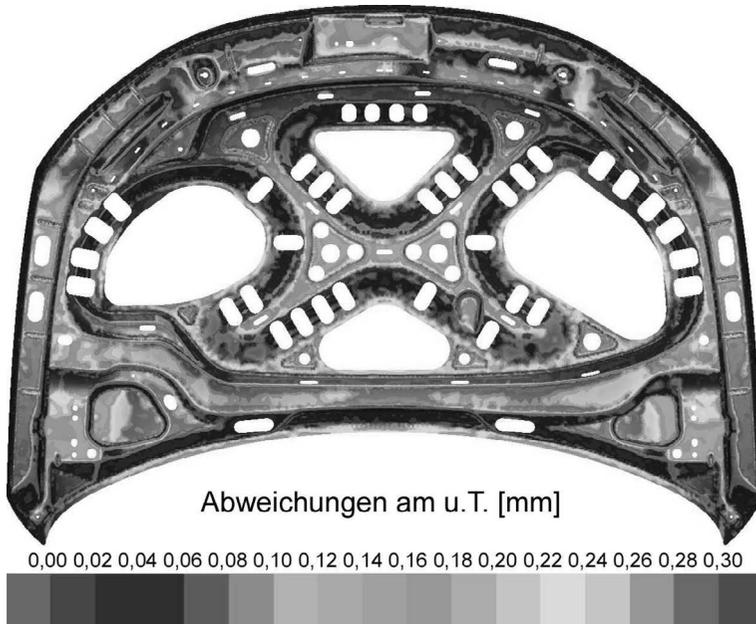


Abbildung 4.15.: Numerische Abweichungen der Rückfederungsauswertung: Abweichungen am unteren Totpunkt Beispiel der Frontklappe innen

Die Sollgeometrie ist ebenfalls eine Geometrie ohne eine Dicke. Sie leitet sich von der CAD-Datenseite ab, wobei sie um die Hälfte vom Ziehspalt offsetiert wird. Der Offset beträgt bei Platinen kleiner gleich  $1,5 \text{ mm}$  Platinendicke  $+ 0,1 \text{ mm}$ . Bei Platinen größer  $1,5 \text{ mm}$  beträgt der Ziehspalt Platinendicke  $+ 0,2 \text{ mm}$ . Somit liegt sie in der geometrischen Mitte zwischen Matrize und Stempel. Bei der Verwendung einer nicht kompensierten Wirkflächengeometrie müßten die maßlichen Abweichungen gleich Null sein, allerdings berechnen sich Abweichungen aufgrund der Diskretisierung. Die Elementkantenlänge vom Werkstück beträgt  $2,5 \text{ mm}$  und bei der Sollgeometrie ist das ausschlaggebende Kriterium die Sekantenabweichung von  $0,01 \text{ mm}$ , bei einer maximalen Elementkantenlänge von  $5,0 \text{ mm}$ .

Bei der Bewertung der maßlichen Abweichungen wird die umgeformte und beschnittene Platine relativ zu einer Sollgeometrie verglichen. Die beschnittene und umgeformte Platine ist Ergebnis einer FEM-Berechnung, die Sollgeometrie ist eine vernetzte Oberfläche. Die Güte bei der Auflösung der Geometrien bestimmt sich bei der Platine durch

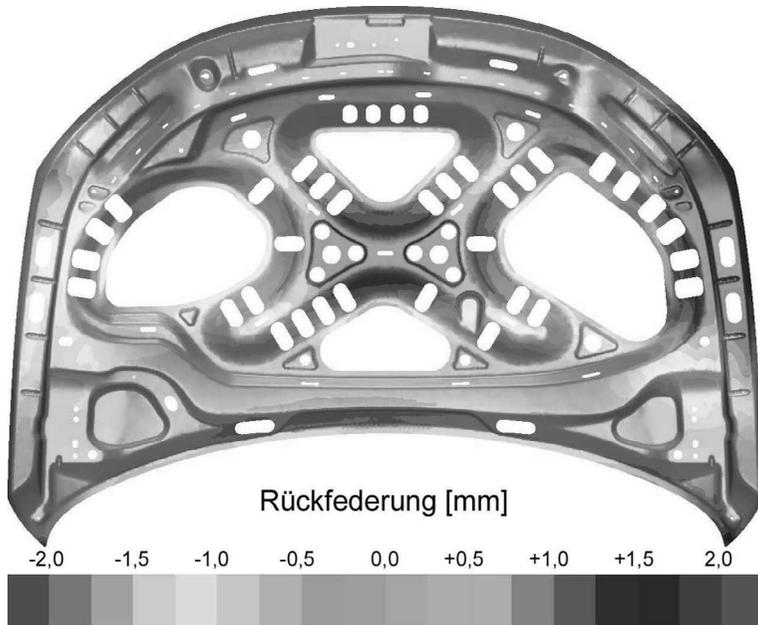


Abbildung 4.16.: Numerische Abweichungen der Rückfederungsauswertung: Rückfederung am Beispiel der Frontklappe innen

die Adaptivität, oder auch Rezoning genannt. Gerechnet wird mit den Kriterien Werkzeugdurchdringung und Abweichung der Elementnormalen bis maximal 10 Grad. Ist eins dieser Kriterien erfüllt, erfolgt eine Verfeinerung bis zu einer minimalen Elementkantenlänge von  $2,5 \text{ mm}$ . Die Sollgeometrie wird vernetzt. Die Kriterien sind ein Sekantenabstand von  $0,01 \text{ mm}$  bei einer maximalen Elementkantenlänge von  $5 \text{ mm}$ .

Aus diesem Grund werden die maßlichen Abweichungen zur Überprüfung der Genauigkeit am u.T. nach dem Tiefziehen berechnet, da sie dort optimal gleich Null sein sollten. Abweichungen, welche bereits am u.T. bestehen, wenn mit nicht kompensierten Wirkflächen gerechnet wird, sind als Diskretisierungsfehler vorhanden und können nicht behoben werden. Es gilt den durch die Diskretisierung, bzw. den nicht exakten Werkzeugschluß, entstandenen Fehler zu identifizieren und in die Betrachtung von Ergebnissen von maßlichen Abweichungen mit einzubeziehen.

Abbildung 4.15 zeigt die ausgewerteten Abweichungen zur Sollgeometrie am u.T. Erwartungsgemäß treten die größten Abweichungen in Radien auf. Die Größe des durch die Diskretisierung entstandenen Fehlers wird in Relation zur berechneten Rückfederung

bewertet. Die Farbskala in Abbildung 4.15 umfaßt den Bereich von 0 bis 0,3 mm und stellt Abweichungen betragsmäßig dar. Die in Abbildung 4.16 dargestellte Rückfederung zeigt Abweichungen mit einer Farbskala von  $\pm 2,0$  mm. Die Werte der Unschärfe liegen bei maximal 0,38 mm, die der Rückfederung betragen  $-3,58$  bis  $+2,19$  mm.

### 4.3.7. Ablauf der Prozeßkette zur Kompensation einer Ziehanlage

Beim Kompensieren von Wirkflächen wird der Gedanke verfolgt, ein Abweichungsfeld auf die Wirkflächen zu addieren, welches die Differenz zur Sollgeometrie nach der Rückfederung verringert. Dieser Vorgang erfolgt iterativ nach folgender Vorgehensweise:

- Voroptimierung zur Vergrößerung des Parameterfensters: Damit die Prozeßparameter einen möglichst großen Aktionsraum besitzen, erfolgt eine Optimierung der Platinenform. Dabei wird die Ausgangsplatinenform derart geändert, daß der Platinenrand beim Erreichen des unteren Totpunktes einen Abstand von circa 10 mm zum Stempelinlauffradius hat.
- Verringerung der Rückfederungsenergie mittels numerischen Optimierungsverfahrens (Differentialgleichungsentwicklung [94, 22], siehe Kapitel A.4 auf Seite 89).
- Kompensation der Wirkflächen im Bauteilbereich. Die erste Kompensation wird auf Basis der Rückfederung durchgeführt.
- Erneute Berechnung mit Optimierung der Ziehparameter und anschließender Kompensation auf Basis der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Geometrie, bis der Zielwert erreicht ist, oder die Änderungen genügend klein werden.

### 4.3.8. Übertragung in methodenplanerische Herstellungskonzepte

Die Übertragung in den Methodenplan erfolgt über die CAD-Daten. Dabei wird die Ausgangsgeometrie der CAD-Daten der Ausgangswerkzeuge und die vernetzten Wirkflächen vor und nach der Kompensation an ein Datenrückführungsprogramm übergeben. Die CAD-Daten werden entsprechend der kompensierten Wirkflächen verändert. Diese veränderten CAD-Daten werden danach an den Methodenplan zurück übergeben. Der simulierte Platineneinzug vom unteren Totpunkt ist mit zu übergeben. Mit seiner Hilfe soll die Prozeßparameteroptimierung an das Werkzeug übergeben werden. Zur Erstellung

des Fräsdatensatzes müssen die Ziehleisten oder Ziehstufen wieder in den Wirkflächen berücksichtigt werden.

## 4.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundwirkungsmechanismen für die Optimierung maßlicher Abweichungen vorgestellt. Die These, daß sich eine Verringerung der Rückfederung einstellt, wenn die Steifigkeit einer Geometrie zunimmt, ist an einem U-Profil aufgestellt worden. Die Klassifizierung der Steifigkeit erfolgt über eine FEM-Berechnung, welche einen energetischen Betrag einer Struktur auf Basis einer normierten Einheitsverschiebung ausrechnet.

Bei der Optimierung der Ziehanlage werden die Wirkflächen durch Kompensation so modifiziert, daß die rückgefederte Platine bestmöglich der Sollgeometrie entspricht. Dazu werden die Prozeßparameter der Herstellungsmethode variiert. Dieser Optimierungsprozeß benötigt eine eindeutige Zielgröße. Es ist die Rückfederungsenergie vorgestellt worden, welche von einer Optimierungssoftware reduziert wird. Je kleiner diese Energie ausfällt, desto geringer sind die maßlichen Abweichungen nach der Rückfederung. Eine Korrelation von 95% konnte zwischen maßlichen Abweichungen und der Rückfederungsenergie aufgezeigt werden. Des weiteren ist eine flächennormierte Abweichung eines Rückfederungsergebnisses vorgestellt worden, um Ziehanlagenvarianten zueinander im Verhältnis ihrer Rückfederungen bewerten zu können.

## 5. Umsetzung der Maßnahmen

Es sind im Hinblick auf ein besseres Ziehergebnis zwei unterschiedliche Vorgehensweisen aufgezeigt worden, maßliche Abweichungen im Planungsprozeß zu beeinflussen. Der erste Schritt optimiert die Bauteilgeometrie und der zweite die Ziehanlage. Beide Vorgehensweisen werden in diesem Kapitel an einem Beispiel demonstriert. Die Optimierung der Bauteilgeometrie erfolgt virtuell durch Simulation. Bei der Optimierung der Ziehanlage erfolgt zuerst eine virtuelle Optimierung mit CAE-Methoden. Auf Basis dieser Ergebnisse kann ein Versuchswerkzeug gebaut werden. Die aus der Praxis resultierenden Ergebnisse werden mit denen aus der Simulation verglichen.

### 5.1. Optimierung einer Bauteilgeometrie

Als Bauteil ist die Frontklappe innen vom Volkswagen EOS ausgewählt worden. Um die Steifigkeit des Bauteils zu verändern, wurden zusätzliche Sicken konstruiert.



Abbildung 5.1.: Frontklappe VW EOS

Nach dem Konzept in Abschnitt 4.2 beschriebenen Konzept werden die drei in Abbildung 5.2 gezeigten unterschiedlichen Geometrien hinsichtlich der zu erwartenden Rückfederungsneigung berechnet und klassifiziert. Für die drei Varianten ist virtuell eine Zie-

hanlage erstellt worden, um die Ergebnisse aus der Bewertung der Bauteilgeometrie mit denen der Ziehanlage hinsichtlich ihres Rückfederungsverhaltens zu vergleichen.

### 5.1.1. Vorstellung des Bauteils

Die Frontklappe besteht aus einem tiefgezogenem Innen- und Außenteil, wobei das Innenteil untersucht wird. Festgelegt ist eine Ausgangsmaterialdicke von  $0,6\text{ mm}$ . Der Werkstoff ist Stahl mit der Bezeichnung DX54D. Die Werkstoffeigenschaften sind in den Anlagen auf Seite 91 beschrieben. Das Bauteil ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

### 5.1.2. Eingebraachte Versteifungssicken

Das Rückfederungsverhalten der Frontklappe innen sorgt für ein Einfallen der Geometrie im mittleren Bereich. Der ursprünglich in diesem Bereich liegende Lagerungspunkt wurde in dieser Untersuchung eliminiert, um das Rückfederungsverhalten möglichst frei von äußeren Einflüssen zu betrachten.

Dazu werden neben der Ausgangsgeometrie zwei weitere modifizierte Geometrien untersucht. Diese Geometriemodifikationen werden sowohl auf Bauteilbasis, als auch auf Ziehanlagenbasis berechnet. In Abbildung 5.2 sind die Geometrien von links nach rechts

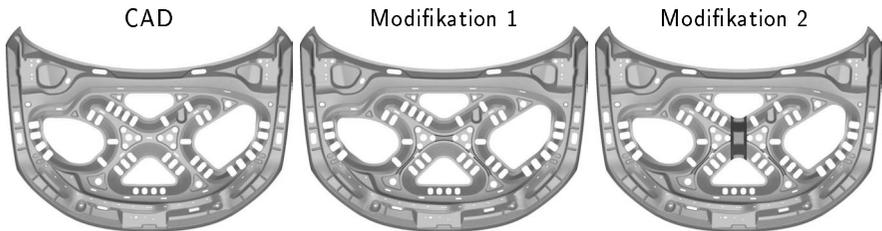


Abbildung 5.2.: Zusätzliche Sicken Frontklappe EOS

wie folgt dargestellt: Ursprungs-CAD-Datensatz, 1. Modifikation, 2. Modifikation. Bei der Modifikation 1 ist die eingebraachte Sicke mit einer Stärke von  $7\text{ mm}$  in Ziehrichtung angeordnet. Die Modifikation 2 enthält ebenfalls die Sicke der Modifikation 1 in Ziehrichtung und eine weitere Sicke entgegen der Ziehrichtung mit einer Stärke von  $30\text{ mm}$ . Die Übergangsbereiche sind verrundet.

### 5.1.3. Rückfederungsverhalten des Referenzbauteils

Als Referenzbauteil dient die Frontklappe innen vom Volkswagen Golf A5. Ausgehend von diesem Rückfederungsverhalten werden die Zwangsbedingungen zur Bewertung der

Bauteilgeometrie auf die Frontklappe innen des Volkswagen EOS übertragen. Es wird davon ausgegangen, daß das Rückfederungsverhalten tendenziell über das gesamte Bauteil ähnlich ist. Das tendenzielle Rückfederungsverhalten beschreibt ein Einfallen im mittleren Bereich. Da es sich um eine linear-elastische Berechnung handelt, werden als Werkstoffkennwerte nur der E-Modul und die Querkontraktion vorgegeben. Unterschiedliche Werkstoffe können dann zueinander untersucht werden, wenn sie unterschiedliche E-Moduli haben.

Die simulierte Fertigungsfolge besteht aus Tiefziehen, Beschneiden und Rückfedern. Das Bauteil hat eine Dicke von  $0,6 \text{ mm}$ . Die Frontklappe innen vom Golf A5 besteht aus dem Stahl DX54D. Die Prozeßparameter sind mit einer Blechhalterlast von  $1000 \text{ kN}$  festgesetzt und umlaufend gibt es eine Ziehleiste mit der Standardrückhaltung von  $100 \text{ N/mm}$ . Abbildung 5.3 zeigt ein für innere Frontklappen typisches Rückfederungs-



Abbildung 5.3.: Rückfederung Referenzbauteil Frontklappe innen VW Golf 5

verhalten. Die Lagerungsbedingungen und Zwangsverschiebungen für die Bewertung des Rückfederungsverhaltens werden so gewählt, daß das entstehende Deformationsbild ähnlich dem der Rückfederung ist.

#### 5.1.4. Bewertung des Rückfederungsverhaltens auf Basis der Bauteilgeometrie

Bei der Bewertung, ob bei unterschiedlichen Geometriemodifikationen die Rückfederung geringer oder größer ausfallen wird, ist das Aufbringen der Belastung wichtig. Es werden die Zwangsverschiebungen  $\vec{u}_{1,2}$  aufgebracht, wie in Kapitel 4 beschrieben. Das durch

die Zwangsverschiebungen aufgebraachte Deformationsbild soll dem Bild der Rückfederung möglichst genau entsprechen. Das FEM-System wird mit dem NASTRAN-Solver 101 gerechnet. Es ist mit einem linear-elastischen Werkstoffgesetz gerechnet worden. Die Blechdicke beträgt  $0,6\text{ mm}$ . Der E-Modul ist mit  $210\,000\text{ N/mm}^2$ , bei einer Querkontraktion von  $0,3$  angenommen. Der Belastungsfall ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Die

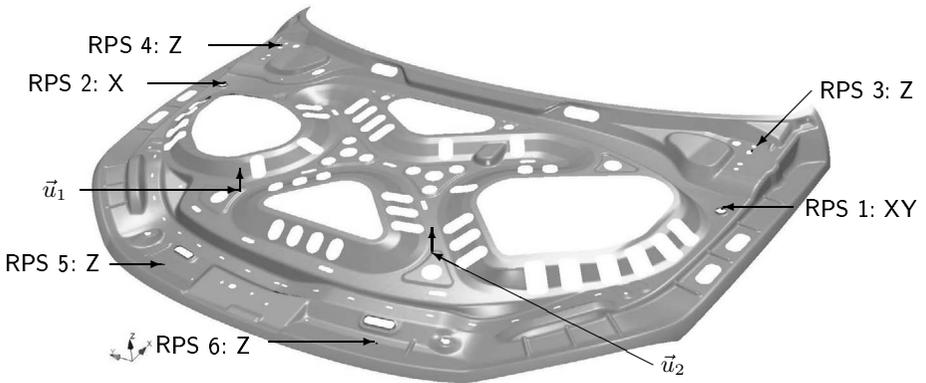


Abbildung 5.4.: Lastfall der Bauteilgeometriebewertung Frontklappe innen VW EOS

aufgebrachten Zwangsverschiebungen sind überhöht dargestellt. Sie sind auf die Knoten aufgebracht und betragen  $1,0\text{ mm}$  in Richtung der gemittelten Normalen. Da es keine Knotennormale gibt, berechnet sie sich aus allen an den Knoten anliegenden Elementen durch Mittelwertbildung. Die Lagerungspunkte, welche Abbildung 5.4 zeigt, sind analog nach dem bei Volkswagen üblichen Referezzpunktesystem (RPS) gewählt worden.

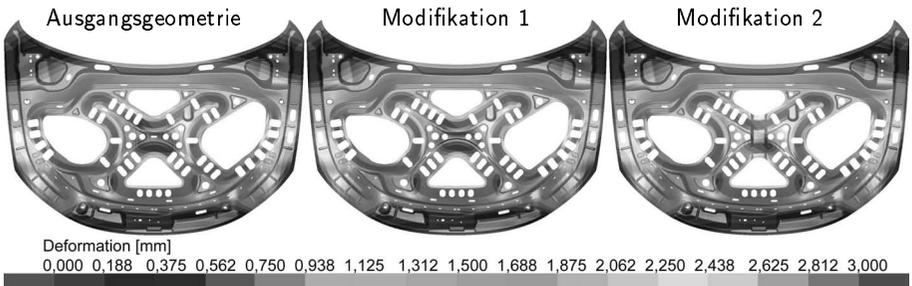


Abbildung 5.5.: Durch Zwangsverschiebungen berechnetes Deformationsbild Frontklappe innen VW EOS

Durch die aufgebrachten Zwangsbedingungen ergibt sich ein Deformationsbild. Dieses ist in Abbildung 5.5 dargestellt. In Kapitel 4.2.1 ist das Konzept zur Bewertung des Energie- und Steifigkeitszusammenhang bereits erläutert worden. Diese Vorgehensweise wird an dieser Stelle für die unterschiedlichen Frontklappenmodifikation des VW Eos angewendet. Dabei sind folgende Ergebnisse erzielt worden:

Bezeichnung	Energie
Ausgangsgeometrie	0,1345 <i>J</i>
Modifikation 1	0,1467 <i>J</i>
Modifikation 2	0,1369 <i>J</i>

Die Ergebnisse vom inneren energetischen Zustand der unterschiedlichen Varianten sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Den Ergebnissen folgend, ergibt sich vom zu prognostizierenden Rückfederungsverhalten folgende Reihenfolge:

- Das günstigste Rückfederungsverhalten erreicht Modifikation 1 mit 0,1467 *J*
- Ein weniger günstiges Rückfederungsverhalten erreicht Modifikation 2 mit 0,1369 *J*
- Das ungünstigste Rückfederungsverhalten zeigt die Ausgangs-Geometrie mit 0,1345 *J*



Abbildung 5.6.: Energetischer Zustand, Frontklappe innen VW EOS

Im folgenden Kapitel wird diese Tendenzaussage des zu erwartenden Rückfederungsverhaltens mit Hilfe von drei virtuell aufgebauten Ziehanlagen überprüft.

## 5.1.5. Rückfederungsverhalten aus dem Tiefziehprozeß

### Simulation des Herstellungskonzeptes der Frontklappe

Die für den Serienprozess entwickelte Ziehanlage ist mit folgenden Prozeßschritten simuliert worden: Tiefziehen, Beschneiden und Rückfederung.

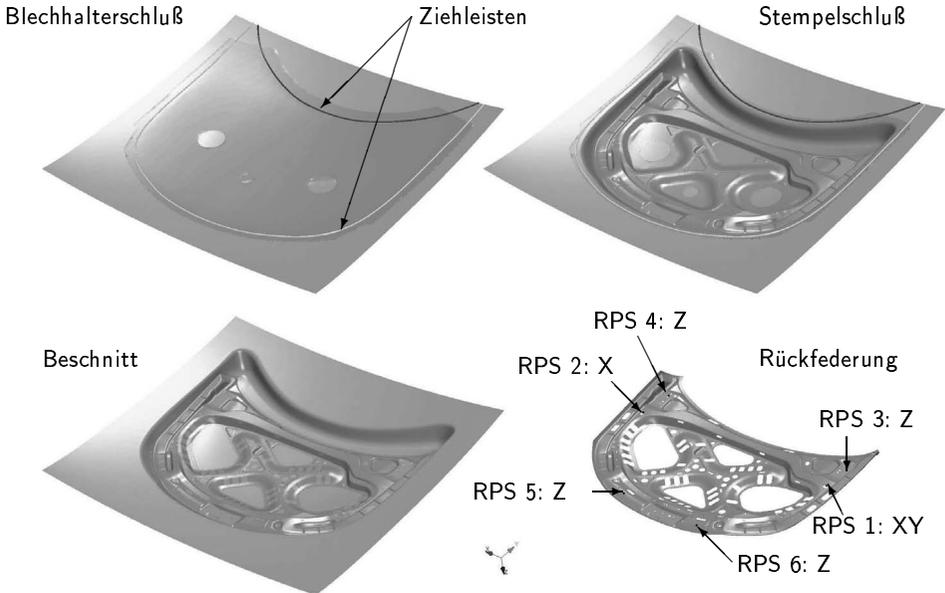


Abbildung 5.7.: Fertigungsfolge Frontklappe innen VW EOS

Ziel ist die Überprüfung der Ergebnisse aus dem Kapitel 5.1.4 von Seite 64. Die virtuell mittels FEM tiefgezogenen und beschnittenen Bauteile sind alle rißfrei herstellbar. Die Ergebnisse der Rückfederung sind nachfolgend aufgelistet:

Bezeichnung	$BDR_{min}$	$BDR_{max}$	$FLD_{max}$
Einheit	[%]	[%]	[%]
Ausgangsgeometrie	-29,24	2,79	87,18
Modifikation 1	-27,49	2,72	94,23
Modifikation 2	-29,65	2,95	96,09

Rückfederung	$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$	$ \overline{\gamma}_R $
Einheit	[mm]	[mm]	[mm]
Ausgangsgeometrie	-2,70	1,44	0,671
Modifikation 1	-2,58	1,34	0,620
Modifikation 2	-2,60	1,42	0,659

Bei den Ergebnissen der Rückfederung der virtuell aufgebauten Ziehanlagen sind Minimum und Maximum der Blechdickenreduzierung und der maximale FLD-Wert aufgelistet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aufzuzeigen. Keine Ziehanlage verursacht Risse während des Tiefziehens.



Abbildung 5.8.: Rückfederung der Ausgangs CAD-Geometrie der Frontklappe innen VW EOS

Die Lagerung nach RPS ist in Abbildung 5.7 unten rechts beschrieben. Da die Wirkflächen nicht kompensiert sind, entspricht in Abbildung 5.8 die Rückfederung den maßlichen Abweichungen.

Charakteristisch für das Rückfederungsverhalten der Frontklappe innen ist wieder das Einfallen im mittleren Bereich, siehe Abbildung 5.8. Wie anhand der roten Einfärbung hervorgehoben, beträgt dort der Wert der Rückfederung mehr als 2 *mm*.

### 5.1.6. Fazit der Bauteilgeometriebewertung

Folgende These, welche an einem Beispielprofil in Kapitel 3 geprüft wurde, konnte virtuell bestätigt werden: Je höher die Energie ist, welche die Bauteilgeometrie den Zwangsdeformationen entgegenzusetzen hat, desto größer ist die Steifigkeit und umso kleiner fallen Rückfederungserscheinungen aus. Die Bewertung auf Basis der Bauteilenergie hat als Ergebnis folgende Reihenfolge hinsichtlich der Rückfederung (geordnet von ungünstig nach günstig): Ausgangsgeometrie mit 134,5 *mJ*, Modifikation 2 mit 136,9 *mJ* und Modifikation 1 mit 146,7 *mJ*.

Dieses Ergebnis ist durch die Ergebnisse der Ziehsimulationen bestätigt worden. Dort stellt sich folgende Reihenfolge ein (ebenso von ungünstig nach günstig): Ausgangsgeometrie mit 0,671 *mm*, danach die Modifikation 2 mit 0,659 *mm* und die Modifikation 1 mit 0,620 *mm* durchschnittlicher, flächennormierter Abweichung. Das ist eine Reduzierung der Rückfederung um 7,6%.

Die Frage, ob eine Reduzierung der Rückfederung von 7,6% den Aufwand der Berechnung rechtfertigt, ist von Fall zu Fall zu klären. Mit einer Verringerung von wenigen Prozenten vom Rückfederungsverhalten ist es jedoch möglich, teilweise erheblichen Aufwand in der Werkzeugeinarbeitung einzusparen. Rückfederung ist prozeßbedingt vorhanden und kann nicht eliminiert, sondern höchstens reduziert werden. Im Fokus der Arbeit steht das Konzept, unterschiedliche Bauteilkonstruktionen hinsichtlich ihrer zu erwartenden Rückfederungen beurteilen zu können. Die Möglichkeit hierzu ist hiermit nachgewiesen.

## 5.2. Optimierung der Ziehanlage

Bei der Entwicklung der Ziehanlage wird diese unter vorheriger Berechnung der Rückfederung kompensiert. Ziel ist eine Wirkflächenmodifikation, bei welcher das rückgefederte, beschnittene Bauteil bestmöglich zur Sollgeometrie paßt. Dazu finden auch die Prozeßparameter zur Beeinflussung der Rückfederung ihre Berücksichtigung. In Kapitel 4.1 ist der Gesamtregelkreislauf der Rückfederung erläutert. Der in Abbildung 5.9 dargestellte Ablauf ist ein Teil des gesamten Regelkreises der Rückfederung, der in Abbildung 4.1 beschrieben ist. Die Optimierung der Prozeßparameter funktioniert automatisch. Es besteht die Möglichkeit, die nachfolgende Kompensation automatisch [24] oder auch manuell ablaufen zu lassen.

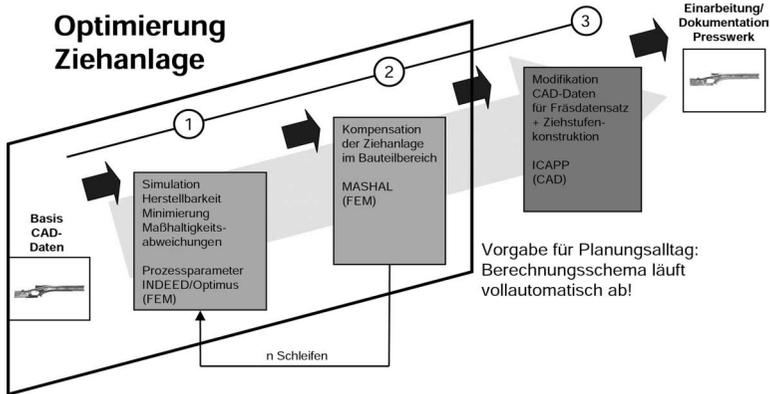


Abbildung 5.9.: Ablauf beim Kompensieren einer Ziehanlage

Das in Abbildung 5.9 dargestellte Schema zur Kompensation der Wirkflächen teilt sich in drei Unterpunkte auf:

1. Die Simulationen werden mit einer Optimierungssoftware durchgeführt, wobei die Prozessparameter unter Berücksichtigung der Herstellbarkeit mit dem Ziel der Minimierung der Rückfederungsenergie angepaßt werden. Die Rückfederungsenergie wird für jede Prozessparameterkombination berechnet. Bei räumlich komplexen Geometriestrukturen kann die Rückfederung des Bauteils unterschiedliche Lösungen annehmen [15]. So ist es möglich, daß Bereiche in unterschiedliche Richtungen umklappen können. Für die Kompensation der Ziehanlage wird das Rückfederungsbild einer Simulation herangezogen. Diese Simulation sollte vom Ergebnis kein statistischer Ausreißer sein, sondern auch unter gewisser Variierung der Prozessparameter zu einer stabilen Lösung führen. Ziel ist es, in mehreren Schritten die Ziehanlage iterativ zu kompensieren, um möglichst stabil zum Ziel zu kommen.
2. Nach dem Berechnen der ersten Rückfederung werden die Wirkflächen kompensiert. Für die kompensierten Wirkflächen werden erneut mit der Optimierungssoftware die optimalen Prozessparameter berechnet. Erneut ist die Minimierung der Rückfederungsenergie mit der Nebenbedingung, die Herstellbarkeit zu gewährleisten, die Zielfunktion. Dieser Prozeß wird so häufig durchlaufen, bis das Niveau

der Rückfederung stagniert, oder die Wände der Ziehanlage zu steil werden, um ein rißfreies Bauteil ziehen zu können.

3. Ist durch die Simulation die optimale Wirkflächegeometrie ermittelt, erfolgt die Erstellung der CAD-Fräsdaten. Die CAD-Flächen der Ausgangsdaten werden umgerechnet, so daß sie den kompensierten Wirkflächen der Simulation entsprechen.

Um den arbeitsrelevanten Anteil des Personals zu minimieren, ist ein automatischer Ablauf der Kette Voraussetzung für diesen Prozeß. Die Rückführung der CAD-Daten erfolgt bei dem vorgestellten Ablauf einmal nach der Berechnung der kompensierten Wirkflächen. Aus diesem Grunde ist die Automatisierung der CAD-Daten-Rückführung nicht zwingend erforderlich. Bei der Einarbeitung ist es notwendig, die berechneten Rückhaltungen, welche durch die Ziehleisten oder Ziehstufen auf die Platine wirken, zu berücksichtigen. Dieses wird über den Abgleich des Einzuges verfolgt. Das Einlaufverhalten der Platine am Praxisteil sollte möglichst weit dem der Simulation entsprechen.

### 5.2.1. Vorstellung des Bauteils

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus der Vorgehensweise von Optimierung, Simulation und Kompensation ist ein Versuchswerkzeug in Auftrag gegeben worden. Es handelt sich um den Längsträger der Plattform PQ-Mix für den Volkswagen Tiguan. Das Bauteil weist eine Dicke von 2,0 mm auf, und es wird aus dem Stahl H260LAD gezogen, die Werkstoffeigenschaften sind in den Anlagen auf Seite 92 dargestellt. Beim Bauteil des Längsträgers der PQ-Mix handelt es sich um ein ziehtechnisch anspruchsvolles Bauteil. Die Komplexität der Rückfederungsbetrachtung bei diesem Längsträger beruht auf mehreren Aspekten:

- Ein geschlossener (siehe Abbildung 5.10, linke Seite des Bauteils) und ein offener Kopf auf gegenüberliegenden Seiten: Der Längsträger hat auf der linken Seite eine Stirnwand und ist auf der rechten Seite offen, was auch als offener Kopf bezeichnet wird. Ein geschlossener Kopf weist eine höhere Steifigkeit auf offener.
- Unterschiedliche Höhenniveaus: Die Höhenniveaus im Bereich des geschlossenen (Niveau 1 in Abbildung 5.10) und des offenen Kopfes (Niveau 2) sind unterschiedlich, was beim Tiefziehen Druckspannungen in bauteilinneren Bereichen hervorruft. Druckspannungen sind ungünstig, da sie grundsätzlich zu höherer Rückfederung führen.

Um das zur Verfügung stehende Prozeßfenster zur Optimierung der Rückfederung so groß wie möglich zu gestalten, ist im Vorwege die Form der Ausgangsplatine optimiert

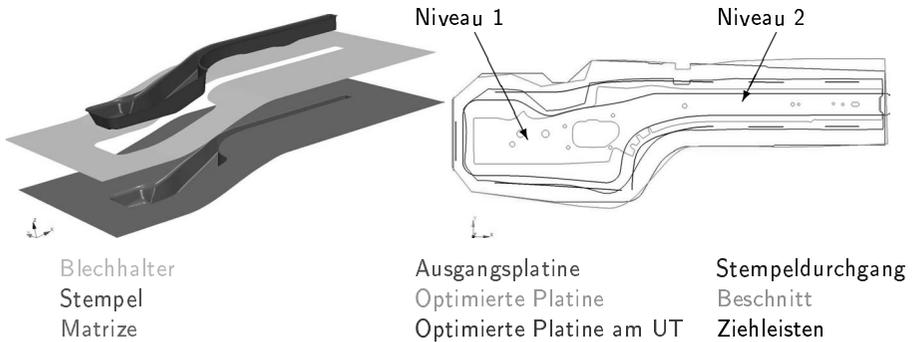


Abbildung 5.10.: Ziehanlage Längsträger PQ-Mix und Platinenoptimierung

worden. Die Ausgangsplatine ist in allen Bereichen individuell in ihrer Randkontur verändert worden, damit die Ziehleisten einen größeren Variationsbereich haben. Die Ziehleistenrückhaltekraft kann nur soweit angehoben werden, bis das Bauteil reißt. Wird der Variationsbereich der Ziehleistenrückhaltung vergrößert, so kann individueller in den unterschiedlichen Bereichen auf die Rückfederung reagiert werden. Die optimierte Platine ist in Abbildung 5.10 mit einer grünen Randkurve dargestellt.

Die Optimierung der Platinenrandkurve erfolgt nach folgenden Randbedingungen:

- Das Einlaufen der Platine über den Stempelradius ist nur am geschlossenen Kopf zulässig (linke Seite). Dementsprechend darf die Platine am geschlossenen Kopf auch aus der Ziehleiste laufen.
- Das Auslaufen der Platine aus den übrigen Ziehleisten ist zu unterbinden.
- Der Platineneinzug am u.T. sollte möglichst nah an der Ziehleiste platziert werden, unter Einhaltung eines Vorhaltemaßes von 10 mm.

### Unschärfe bei der Rückfederungsaussage

Bei der in Abbildung 5.11 dargestellten Unschärfe handelt es sich um den Abweichungsfehler, wie er in Kapitel 4.3.6 auf Seite 57 erklärt ist. Ausgewertet wird die Differenz zwischen der beschnittenen umgeformten Platine vor der Entlastung mit der Sollgeometrie. Die Abweichungen sollten bei einem idealen System gleich Null sein. Tatsächlich entstehen Abweichungen, da die Sollgeometrie ebenfalls eine diskretisierte Geometrie ist. Die Diskretisierung der Sollgeometrie ist sehr viel feiner als die der umgeformten Platine, weshalb sich bereits am u.T. eine Abweichung zwischen der Platine und der Sollgeometrie einstellt. Weiter kommt bei der Offsetbildung ein Delta von 0,1 mm zur

Blechdicke auf den Ziehspalt hinzu. Der Maximalwert der Abweichungen zwischen den beiden Geometrien beträgt  $0,568 \text{ mm}$ .



Abbildung 5.11.: Unschärfe bei der Beurteilung von Rückfederungen am Längsträger PQ-Mix

## 5.2.2. Optimierungsberechnung des Versuchswerkzeugs Längsträger PQ-Mix

Der in Kapitel 5.2 (Seite 69) vorgestellte Berechnungsablauf ist mittels Tiefziehsimulation, energetischer Betrachtung maßlicher Abweichungen und der Kompensation durchgeführt worden. Beim Kompensieren wird das Einfrieren der Blechhalterbereiche über eine Dämpfung umgesetzt, da am u.T. Bereiche der umgeformten, beschnittenen Platine auf dem Blechhalter liegen. Es ist ein Widerspruch, wenn der Blechhalter für die Kompensation als starr angenommen wird und trotzdem in diesen Bereichen ein Abweichungsfeld der Rückfederung vorliegt. Deshalb wurde der Blechhalterbereich nicht eingefroren, sondern mit einer hohen Dämpfung belegt.

Von der Optimierungssoftware werden mehrere Simulationen gleichzeitig gestartet mit dem Ziel, das Ergebnis der maßlichen Abweichungen über die Prozessparameter positiv zu beeinflussen. Dazu sind die zehn in Abbildung 5.12 dargestellten Ziehleisten und die Niederhalterkraft herangezogen worden. Bei der Ziehleistenrückhaltung wurde der Bereich von  $0$  bis  $500 \text{ N/mm}$  vorgegeben. Der Startwert wurde auf  $100 \text{ N/mm}$  festgelegt. Der Wert der Ziehleistenrückhaltung wurde innerhalb einer Ziehleiste als konstant angenommen. Die Blechhalterkraft reichte von  $300$  bis  $1300 \text{ kN}$ . In Abbildung 5.12 sind die Ziehleisten durch rote und grüne Polygonzüge dargestellt. Es sind die Ziehleisten des Bauteildatenstandes verwendet worden, wobei zwei Ziehleisten getrennt wurden. Die

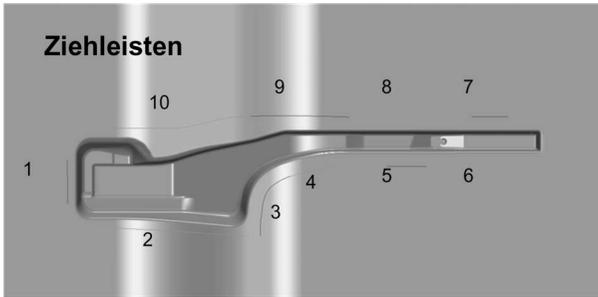


Abbildung 5.12.: Ziehparameter: 10 Ziehleisten und Blechhalterkraft

weitere Unterteilung der Ziehleisten 3, 4 und 9, 10 (siehe Abbildung 5.12) wurde vorgenommen, um in diesen Bereichen das Rückfederungsergebnis individueller zu steuern. Vor den Kompensationen wurde das Ergebnis der Rückfederung über die Prozessparameter optimiert, mit der Zielvorgabe die Rückfederungsenergie unter Einhaltung der Herstellbarkeit (FLC-Kriterium  $< 100\%$ ) zu minimieren.

Es wurden hintereinander Iterationsschleifen mit jeweils acht Simulationen gestartet.

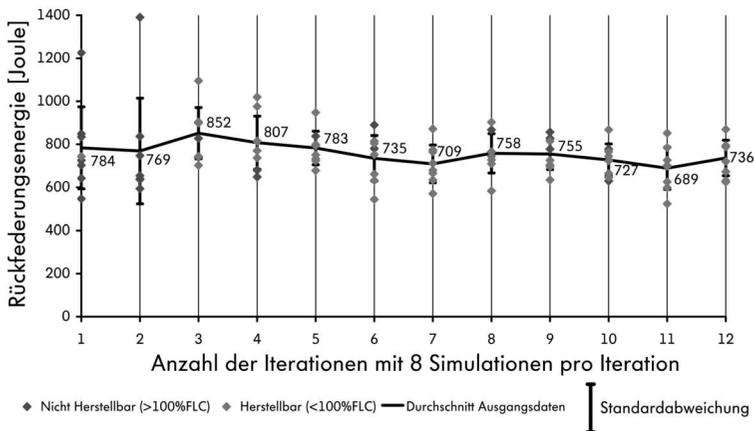


Abbildung 5.13.: Rückfederungsenergie der CAD-Wirkflächen über 12 Iterationen

Bei der ersten Iterationsschleife stellen sich von den acht Simulationen sieben als nicht herstellbar heraus. In der nächsten Iterationsschleife waren alle 8 Simulationen nicht herstellbar. Erst ab der nächsten Iterationsschleife (der dritten) gelang es, überwiegend

herstellbare Ergebnisse zu erhalten und die Rückfederungsenergie zu minimieren. Bei der Optimierung der CAD-Flächen wurden insgesamt 12 Iterationsschleifen (dargestellt als Punkt) gerechnet, was  $8 \cdot 12 = 96$  Simulationen entspricht. Abbildung 5.13 zeigt den Verlauf der Rückfederungsenergie über die Iterationen. Grüne Punkte sind Berechnungen, bei denen in der umgeformten Platine kein Riß entsteht. Rote Punkte stehen für nicht herstellbare Lösungen. Gezeichnet wird in Abbildung 5.13 der Durchschnitt der Rückfederungsenergie der 8 Simulationen einer Iterationsschleife sowie die Standardabweichung.

Auf Basis eines Durchlaufs wurden die Wirkflächen kompensiert. Durch die Optimierungssoftware wurden erneut die günstigsten Prozeßparameter berechnet und die Rückfederungsenergie reduziert. Wichtig bei der ausschlaggebenden Simulation für die Kompensation ist ein Simulationslauf, welcher eine stabile Lösung repräsentiert. Wird eine Simulation mit Prozeßparametern gestartet, welche minimal verschieden voneinander sind, so wird erwartet, daß die Ergebnisse auch nur minimal verschieden zueinander ausfallen.

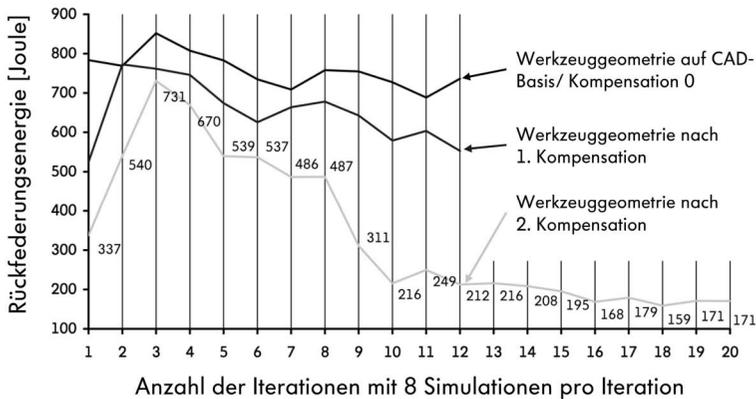
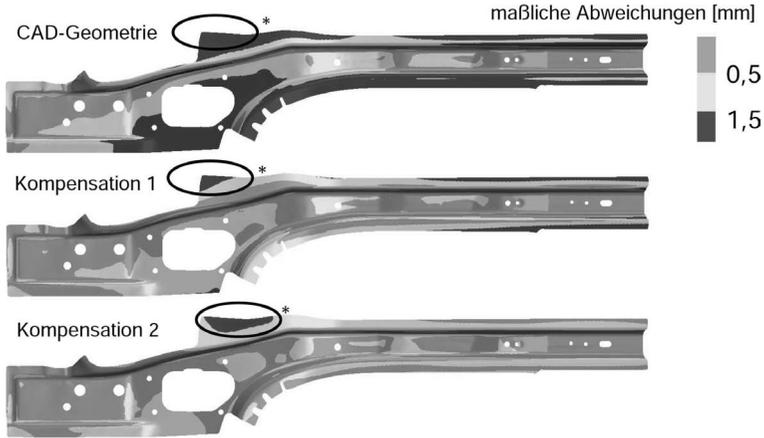


Abbildung 5.14.: Rückfederungsenergie aller Wirkflächenoptimierungen im Durchschnitt

Die Ergebnisse der ersten und zweiten Kompensation und der CAD-Ausgangsgeometrie (bezeichnet als Kompensation 0) sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Die Kompensation 1 startete mit den optimalen Prozeßparametern der CAD-Daten (Kompensation 0). Es wurden einige Iterationen benötigt, damit das Ziehteil herstellbar ist. In den folgenden Iterationen ist der Optimierungsalgorithmus in der Lage, die Rückfederungsenergie zu verringern. Das Optimum wurde mit der zweiten Kompensation ab der 10. Iteration

erreicht. Eine dritte Kompensation wurde durchgeführt, allerdings konnten keine herstellbaren Teile berechnet werden.



\* Nachformbereich, daher nicht optimiert

Abbildung 5.15.: Berechnete maßliche Abweichungen der Ziehanlage auf Basis der CAD-Daten und der ersten und zweiten Kompensation

Die in Abbildung 5.15 dargestellten maßlichen Abweichungen wurden bewertet. Bereiche mit einer Abweichung kleiner  $0,5\text{ mm}$  sind grün eingefärbt, zwischen  $0,5\text{ mm}$  und  $1,5\text{ mm}$  gelb. Abweichungen größer  $1,5\text{ mm}$  sind rot dargestellt. Über die Kompensationsformen lassen sich viele Bereiche von einer ungenügenden maßlichen Abweichung in den kritischen gelben Bereich und auch in den grünen Bereich verbessern. Der mit \* gekennzeichnete Bereich ist als „nicht optimierter Bereich“ anzusehen. Der dort liegende Flansch wird durch eine Folgeoperationsstufe noch verändert, weshalb dieser Bereich für die Optimierungssoftware ausgespart worden ist. Die Simulationen und Kompensationen haben zu einer Modifikation der Wirkflächen geführt. Die Veränderung der Wirkflächen (Kompensation 2) gegenüber dem Ausgangszustand und die erste Rückfederung sind in Abbildung 5.16 dargestellt.

Die Ergebnisse der simulierten Geometrieformen sind zusammengefaßt der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Bei den maßlichen Abweichungen handelt es sich um Minimum- und Maximumwerte.

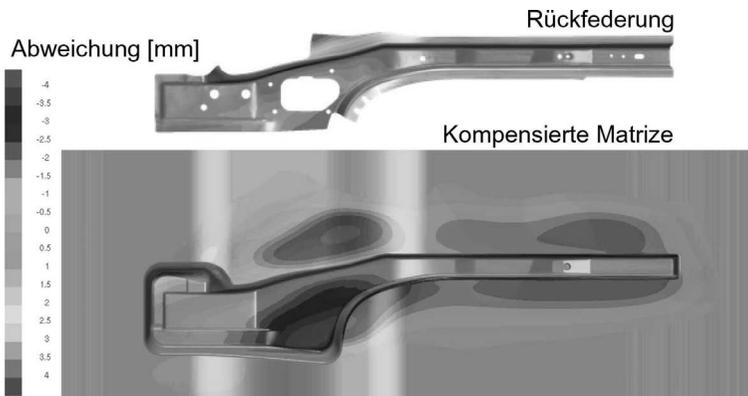


Abbildung 5.16.: Darstellung der Rückfederung und Kompensation beim Längsträger

Beschreibung	maßliche	Abweichungen [mm]
	Minimum	Maximum
CAD-Wirkflächen (Kompensation 0) mit Startkonfiguration	-3.05	+5.47
CAD-Wirkflächen (Kompensation 0) mit optimierten Prozessparametern	-2.78	+4.58
Kompensation 1	-1.74	+2.98
Kompensation 2	-1.87	+1.02

### 5.2.3. Versuchswerkzeug Längsträger PQ-Mix

Auf Basis der durch die Simulation kompensierten Werkzeuggeometrie wurde eine CAD-Daten-Rückführung vorgenommen. Aus den kompensierten Wirkflächen wurde ein CAD-Fräsdatsatz erzeugt. Anschließend wurde ein Versuchswerkzeugsatz (bestehend aus Matrize, Stempel und Blechhalter) gefräst, um die erzielten Ergebnisse aus der Simulation mit realen Ergebnissen zu vergleichen. Im Fokus des Versuchs standen die maßlichen Abweichungen der Versuchsteile auf Basis der Simulationsergebnisse gegenüber denen der Serienbauteile.

Die im Versuch untersuchte Arbeitsfolge erstreckt sich auf das Tiefziehen und den nachfolgenden ersten Beschnitt. Die im Methodenplan vorgesehenen Folgeoperationen wurden nicht betrachtet. Die Folgeoperationen bestehen aus dem Nachformen von zwei Flanschen und dem Anstellen einer Ecke. Diese wurden in der Simulation nicht berücksichtigt, da die wesentlichen maßlichen Abweichungen durch das Tiefziehen der ersten

### Matrize des Versuchswerkzeugsatzes



Abbildung 5.17.: Herstellung von Bauteilen mit kompensiertem Versuchswerkzeug

Operationsfolge festgelegt wurden.

Das Fräsen erfolgte im Werkzeugbau und die Einarbeitung im Preßwerk Wolfsburg. Abbildung 5.17 zeigt die Matrize des Werkzeugsatzes während der Einarbeitung.

In Abbildung 5.18 ist das Beschneiden mittels Laser in der dafür hergestellten Aufnahme abgebildet. Die Beschnittkontur ist mitkompensiert worden, befindet sich somit auf der Werkzeugkontur. Da das Ziehteil rückgefедert ist, wurde die digitale Beschnittkontur nach der Kompensation entsprechend der simulierten Rückfederung verschoben, damit sie möglichst exakt auf der Ziehteilgeometrie liegt. Der Beschnitt erfolgt senkrecht von oben, somit aus Z-Richtung des Werkzeugkoordinatensystems.

### Digitalisierung der Bauteile

Die gelaserten Bauteile wurden frei im Raum mit einem Stereokamerasystem der Firma GOM matrizenseitig digitalisiert (siehe Abbildung 5.19). Es wurde bei allen Bauteilen die Matrizen­seite aufgenommen, ebenso wurde für den Vergleich mit der Sollgeometrie die Matrizen­seite herangezogen. In Abbildung 5.19 ist auf der linken Seite ein Bauteil während der Digitalisierung dargestellt. Erkennbar ist das Stereokamerasystem (obere rechter Bereich) und die auf das Bauteil projizierten Streifen (linke Bauteilseite).

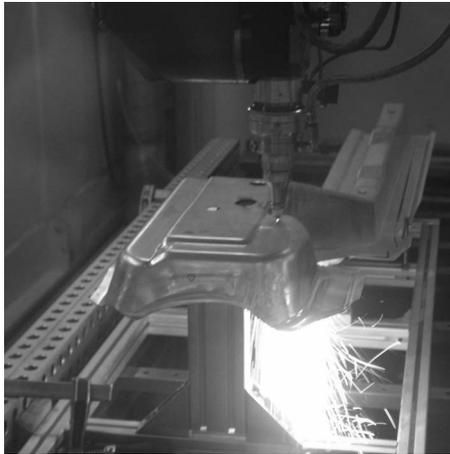


Abbildung 5.18.: Laserbeschneiden der Ziehteile

### **Vorgehensweise beim Praxisabgleich kompensierter Schnittteile**

Um maßliche Abweichungen aufzunehmen, gibt es für die Serienbauteile sogenannte Prüfmittelmerkmalpläne. In diesen Plänen werden die einzelnen Punkte festgelegt, in welchen das jeweilige Bauteil aufzunehmen ist und was zu messen ist. Dabei sehen die Pläne vor, daß das Bauteil in einer bestimmten Bauteilaufnahme gelagert wird. In dieser Aufnahme werden die Bauteile nach einem festen Konzept gespannt gelagert. Da die Folgeoperationen nicht durchgeführt wurden, erfolgt der Vergleich der maßlichen Abweichungen mit einer freien Lagerung im Raum. Dies bedeutet, daß alle Bauteile auf dem Tisch liegend digitalisiert und entsprechend der vorgeschriebenen statisch bestimmten Lagerung später digital übereinander gelegt werden. Diese Vorgehensweise findet ihre Anwendung sowohl für die Versuchsbauteile als auch für die Serienbauteile. Um die Vergleichbarkeit zwischen Versuchs- und Serienbauteilen zu gewährleisten, wurden die Serienbauteile ebenfalls mit derselben digitalen Beschnittkontur vom kompensierten Werkzeug gelasert.

Der Ergebnisvergleich erfolgt an den Punkten aus dem Prüfmittelmerkmalplan, welche schon nach der ersten Operationsfolge bereits auf der späteren Bauteilgeometrie liegen. Das bedeutet, die Punkte der Nachformbereiche werden nicht berücksichtigt. Es ergeben sich 20 Meßpunkte, deren Positionen in Abbildung 5.20 dargestellt sind.



Abbildung 5.19.: Digitalisierung der matrizenseitigen Oberfläche

### Vergleich der Ergebnisse aus dem Versuchswerkzeug und der Serie

Da die Ergebnisse der digitalisierten Oberfläche entsprechend der Sollgeometrie positioniert wurden, befinden sich die digitalisierten Geometrien im Werkzeugkoordinatensystem. Deshalb konnte die automatische Auswerterroutine für alle Ergebnisse verwendet werden, da bei allen auszuwertenden Bauteilen die x, y und z-Koordinaten der einzelnen Punkte konstant sind. Die in Abbildung 5.21 dargestellten Punkte zeigen die maßlichen Abweichungen der Serienbauteile in blauen Graphen und die aus dem Versuchswerkzeug stammenden Ergebnisse in roten Farben. Zusätzlich ist das Simulationsergebnis durch einen grünen Graphen dargestellt.

Es findet eine Verdrehung der Bauteilgeometrie statt, welche durch die Kompensation nicht eliminiert werden konnte. Dies zeigt sich an den Abweichungen der Punkte eins und zwei. Bei dem Serienbauteil gelang es, diese Verdrehung durch Einarbeit sehr gut auszugleichen. Die Punkte drei und vier haben vom Betrag eine vergleichbare maßliche Abweichung, allerdings in unterschiedlicher Richtung, was ebenfalls an der Bauteilverdrehung liegt. Bei den nachfolgenden Meßpunkten konnte, mit Ausnahme von Meßpunkt 17, ein besseres Ergebnis erzielt werden.

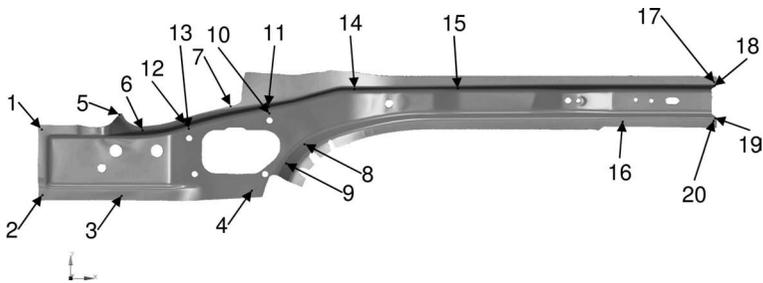


Abbildung 5.20.: Anordnung der 20 Messpunkte

In Abbildung 5.22 sind die maßlichen Abweichungen in *mm* vom kompensierten und vom Serienwerkzeug in Vielfarbandarstellung abgebildet. Zum Vergleich sind die maßlichen Abweichungen der Simulationsergebnisse ebenfalls mit dargestellt.

Die Bewertung der Ergebnisse zwischen Versuchs- und Serienwerkzeug erfolgt nach zwei Methoden: erstens auf Basis der Meßpunkte des Prüfmittelmerkmalplans und zweitens wird die flächennormierte maßliche Abweichung über das gesamte Bauteil bestimmt, wie sie in Abschnitt 4.3.3 auf Seite 55 erklärt ist. Es sind Meßpunkte vorhanden, bei denen das Ergebnis zwischen Serien- und Versuchswerkzeug ein anderes Vorzeichen hat. Deshalb wird zur Bestimmung des Mittelwerts über die Gesamtheit der Meßpunkte nur der Betrag der maßlichen Abweichung heran gezogen.

Die in Abbildung 5.22 dargestellten Ergebnisse sind in tabellarischer Form in den Anlagen in Kapitel A.1 auf Seite 86 einzeln dargestellt.

- Auswertung über die Meßpunkte: Die Summe der maßlichen Abweichungen über die 20 Meßpunkte ergibt beim Serienwerkzeug 36,2 *mm*, was einer durchschnittlichen Abweichung von 1,81 *mm* je Meßpunkt entspricht. Bei dem Versuchswerkzeug ergibt die Summe eine Abweichung von 22,0 *mm*. Dies entspricht im Durchschnitt 1,1 *mm* je Meßpunkt. Die erzielte Verbesserung beim kompensierten Versuchswerkzeug entspricht somit 39,2 %.
- Flächennormierte Auswertung über die gesamte Oberfläche: Der Algorithmus, welcher die maßlichen Abweichungen, wie sie in Abbildung 5.22 dargestellt sind, berechnet, summiert von jedem Finiten Element den Betrag der maßlichen Abweichung, multipliziert mit der jeweiligen Fläche des Elementes. Es wird die Summe dieser Größe durch die Gesamtfläche geteilt, was als Ergebnis die flächennormier-

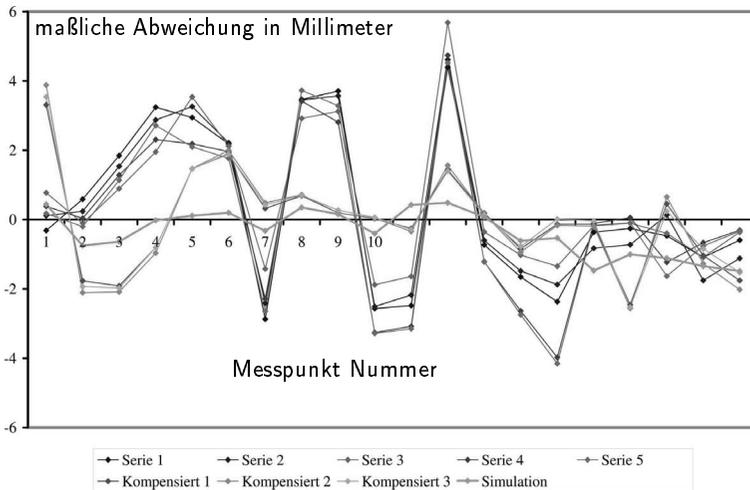


Abbildung 5.21.: Maßliche Abweichung der 20 Messpunkte

te maßliche Abweichung im Durchschnitt bestimmt. Beim Serienwerkzeug ergibt sich eine Abweichung von  $1,47 \text{ mm}$ , beim kompensierten Werkzeug sind es  $0,85 \text{ mm}$  (Berechnung siehe Abschnitt A.1). Im Ergebnis wurde eine Verbesserung der maßlichen Abweichungen um  $42,1 \%$  erreicht.

### 5.3. Zusammenfassung

Es sind zwei Methoden vorgestellt worden, um maßliche Abweichungen im virtuellen Entstehungsprozeß minimieren zu können.

Der ersten Methode liegt die These zugrunde, durch Erhöhung der Bauteilsteifigkeit im späteren Tiefziehprozess eine verringerte Rückfederung zu erhalten. Der Nachweis wurde ausschließlich mit Hilfe der Simulation geführt. Bei den drei untersuchten Bauteilgeometrien der inneren Frontklappe des VW Eos wurde die Ausgangsgeometrie relativ zur modifizierten Geometrie 1 und relativ zur modifizierten Geometrie 2 bewertet. Der These folgend ist die Modifikation 1 die günstigste Bauteilgeometrie, gefolgt von der Modifikation 2. Am schlechtesten ist die Ausgangsgeometrie. Um eine Aussage über das Rückfederungsverhalten tätigen zu können, wurde für jede Bauteilgeometrie virtuell eine Ziehanlage aufgebaut. Die Rückfederungsergebnisse bestätigen die These. Es stellt sich eine durchschnittliche Rückfederung der Ausgangsgeometrie von  $0,671 \text{ mm}$  ein. Bei der Modifikation 1 sind es  $0,62 \text{ mm}$  und bei der Modifikation 2

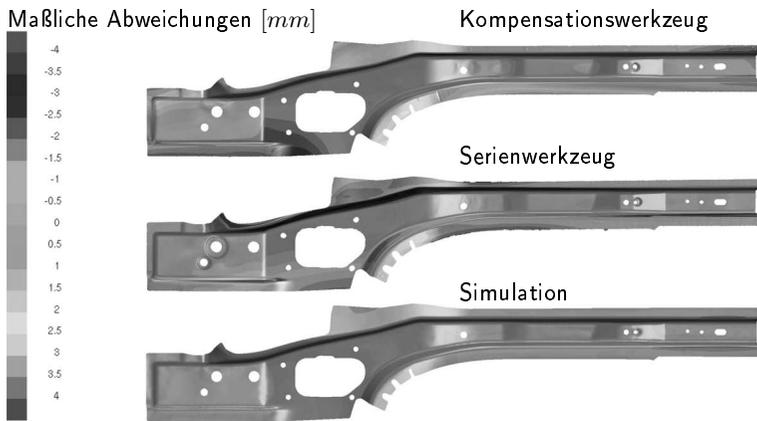


Abbildung 5.22.: Vergleich der maßlichen Abweichung aus Kompensations- und Serienwerkzeug und Simulation

0,659 mm. Die prognostizierte Reihenfolge bei der Rückfederungsneigung wurde richtig bestimmt. Es konnte eine Reduzierung der Rückfederung von 7,6 % erzielt werden. Bei der zweiten Methode werden die maßlichen Abweichungen von einem Optimierungsalgorithmus unter Variation der Blechhalterkraft und der Ziehleistenrückhaltung in Kombination mit einer zweifachen Wirkflächenkompensation verringert. Die Wirkflächen der Werkzeuggeometrie wurden entsprechend der Rückfederung kompensiert, so daß die beschrittene Bauteilgeometrie möglichst geringe maßliche Abweichungen gemessen zur Sollgeometrie aufweist. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde ein Versuchswerkzeug gefräst und die gelaserten Bauteile wurden mit Bauteilen des Serienwerkzeuges verglichen. Die Vorgehensweise bei dem Vergleich bezieht sich ausschließlich auf die erste Operationsfolge mit anschließendem Laserbeschnitt. Die Bauteile sind ohne Aufnahme vermessen worden.

Die maßlichen Abweichungen wurden auf zwei Weisen miteinander verglichen. Die erste Methode bezieht sich auf Meßpunkte, welche aus dem Prüfmittelmerkmalsplan stammen, wobei bei dem kompensierten Versuchswerkzeug eine Reduzierung der maßlichen Abweichungen von 39,2 % erzielt werden konnte. Die zweite Auswertungsmethode bewertet die gesamte Oberfläche der Bauteile und führte zu einer Verbesserung der maßlichen Abweichungen von 42,1 %.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, auf Basis der FEM-Simulation ein Konzept vorzustellen, mit welchem Bauteilgeometrien im ersten Schritt bezüglich ihrer Rückfederung digital optimiert werden können. Im zweiten Schritt wird eine Vorgehensweise bei der Konstruktion der Ziehanlage erarbeitet, die Rückfederungen zu berechnen und als Antwort die Ziehanlage zu verändern, so daß rückfederungsbedingte maßliche Abweichungen so gering wie möglich ausfallen.

Die Vorgehensweise beim ersten Schritt bedient sich der These, durch die Vergrößerung der Bauteilsteifigkeit eine geringere Rückfederung zu erhalten. Die Methode untersucht Bauteilgeometrien in modifizierten Versionen relativ zu einander. Es werden normierte Zwangsverschiebungen auf die Bauteilgeometrievarianten aufgebracht und der Gleichgewichtszustand berechnet. Die durch die Bauteilgeometrie entgegengebrachte Energie wird berechnet und prognostiziert, daß die Bauteilvariante, welche den größten energetischen Widerstand erzeugt, die geringsten Rückfederungen aufweisen wird.

Beim zweiten Schritt, bei der Konstruktion der Ziehanlage, wird ein Konzept erarbeitet, maßliche Abweichungen, ebenfalls mit der Hilfe von Zwangsverschiebungen, in eine energetische Größe umzurechnen. Ziel ist es, die Ziehanlage und den Tiefziehprozeß so zu modifizieren, daß das beschnittene Ziehteil nach seiner Rückfederung möglichst geringe Abweichungen zu seiner Sollgeometrie aufweist. An den Bauteilbereichen, an denen die maßlichen Abweichungen so gering wie möglich ausfallen sollen, werden die Bauteilbereiche durch Zwangsdeformationen auf ihre Sollage zurückgedrückt. Dabei wird das Bauteil nach dem Konzept gelagert, wie es später in der Meßlehre vorgeschrieben ist. Die Berechnung des energetischen Zustandes, welcher durch die Zwangsdeformationen entsteht, liefert eine Ergebnisgröße. Durch den Einsatz eines Optimierungsalgorithmusses wird unter Variation der Blechhalterlast und der Ziehleistenrückhaltung in Kombination mit einer Wirkflächenkompensation die Lösung mit dem geringsten energetischen Widerstand vom rückgefederten und beschnittenen Ziehteil zu seiner Sollgeometrie bestimmt. Bei der Optimierung von Bauteilgeometrievarianten wurde die Frontklappe innen vom VW EOS untersucht. Dabei wurde die Ausgangsgeometrie mit zusätzlichen versteifenden Sicken verändert. Es wurde die These aufgestellt, daß das prognostizierte Rückfederungs-

verhalten der Ausgangsgeometrie am ungünstigsten ausfällt. Besser ist das Ergebnis der Modifikation Nr. 2 und am besten schnitt die Bauteilgeometrie der Modifikation Nr. 1 ab. Für diese drei Bauteilgeometrievarianten wurde eine Ziehanlage aufgebaut und die Rückfederung virtuell berechnet. Die Auswertung ergibt für die Modifikation Nr. 2 eine Verbesserung der Rückfederung von 1,8 %. Bei der Modifikation Nr. 1 konnte eine Verbesserung der Rückfederung von 7,6 % erzielt werden. Es bewahrheitet sich die These, daß sich die Rückfederung mit steigender Bauteilsteifigkeit verringern läßt.

Bei der Optimierung der Ziehanlage stellt sich eine Korrelation von 95 % zwischen der berechneten Rückfederungsenergie und den Maximalwerten der maßlichen Abweichungen ein. Bei der Ausgangskonfiguration lagen die maßlichen Abweichungen bei  $-3,05$  bis  $+5,47$  mm. Durch das Optimierungsverfahren in Kombination mit einer zweifachen Wirkflächenkompensation wurden die maßlichen Abweichungen auf den Bereich von  $-1,87$  bis  $+1,02$  mm reduziert. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde ein Versuchswerkzeug angefertigt. Die mit dem Versuchswerkzeug hergestellten Teile wurden mit Teilen aus der Serienproduktion verglichen. Das geschah auf zwei Weisen; zum einen an den durch den Prüfmittelmerkmalplan festgelegten Meßpunkten und zum anderen über eine flächennormierte maßliche Abweichung der gesamten Bauteilgeometrie. Im ersten Fall läßt sich eine Verbesserung von 39,2 % des Versuchswerkzeugs gegenüber der Serie ausweisen, im zweiten führte die Auswertung über das gesamte Bauteil zu einer Verbesserung von 42,1 %.

Diese Arbeit weist nach, daß durch Modifikation der Ziehanlage spürbare Verringerungen der maßlichen Abweichungen möglich sind. Haupteinflussfaktor ist die Qualität der berechneten Rückfederung. Dabei war festzustellen, daß im Versuch größere maßliche Abweichungen als berechnet auftreten. Erst die weitere Anwendung derartiger Verfahren wird einen Überblick über die Richtigkeit der angenommenen Werkstoffparameter und Berechnungsmodelle ergeben. Weitere Faktoren, wie beispielsweise die Art der Extrapolation der Fließkurve haben einen nicht unwesentlichen Einfluß auf die Güte des Berechnungsergebnisses. Solange es noch keine verlässlichen Verfahren gibt, die einschlägigen Werkstoffparameter im mehrachsigen Spannungszustand unter hoher Dehnung zu messen, hat der Anwender in der Wahl der Parameter bei großen Deformationen weiten Spielraum. Diese Problematik wird sich verschärfen, wenn der Anteil von hoch- und höherfesten Stählen in Zukunft steigen wird. Mit Einsatz dieser Stähle wird sich auch die Rückfederungsneigung erhöhen, weshalb ein funktionierender Mechanismus zur Optimierung der maßlichen Abweichungen bei der virtuellen Planung der Werkzeuge unverzichtbar werden wird. Darüber hinaus sind Optimierungsmethoden in der Lage, Lösungsrichtungen entwurfstechnisch vorherzubestimmen. Ohne Einsatz von Simulationsprogrammen war dies in der Vergangenheit unmöglich.

# A. Anlagen

## A.1. Ergebnisse im Vergleich der maßlichen Abweichungen zwischen Versuch und Serie

Nachfolgend sind die Abweichungen in Tabellenform aufgeführt. Dabei sind Abweichungen der Serienbauteile mit SB. 1, 2, 3, 4, 5 gekennzeichnet. Die Ergebnisse vom kompensierten Werkzeug sind mit Komp 1, 2, 3 bezeichnet. Die Werte der 20 Meßpunkte (MP.) stellen die maßlichen Abweichungen relativ zur Sollgeometrie dar. In der unteren Zeile jeder Tabelle ist ein Durchschnittswert (DS.) angegeben. Die Ergebnisse in den Tabellen sind auf eine Nachkommastelle gerundet in *mm* angegeben, wurden allerdings mit mehr Nachkommastellen berechnet.

Die Messpunkte 1 bis 10 der Serienbauteile:

MP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SB. 1	-0,3	+0,6	+1,8	+3,2	+2,9	+2,2	-2,9	+3,5	+3,7	-2,6
SB. 2	+0,1	+0,2	+1,5	+2,9	+3,3	+2,2	-2,4	+3,4	+3,6	-2,5
SB. 3	+0,8	-0,1	+0,9	+2,0	+3,5	+2,1	-1,4	+2,9	+3,1	-1,9
SB. 4	+0,4	0,0	+1,3	+2,3	+2,2	+2,0	-2,3	+3,4	+2,8	-3,3
SB. 5	+0,2	-0,2	+1,1	+2,7	+2,1	+1,8	-2,6	+3,7	+3,3	-3,3
DS.	+0,2	+0,1	+1,3	+2,6	+2,8	+2,0	-2,3	+3,4	+3,3	-2,7

Die Meßpunkte 11 bis 20 der Serienbauteile:

MP.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SB. 1	-2,5	+4,4	-0,7	-1,7	-2,4	-0,4	-0,3	-0,5	-1,1	-0,6
SB. 2	-2,2	+4,6	-0,6	-1,5	-1,9	-0,8	-0,7	+0,1	-1,8	-1,1
SB. 3	-1,6	+5,7	-0,4	-1,0	-1,3	-0,2	-0,1	-0,4	-1,1	-0,4
SB. 4	-3,1	+4,7	-1,2	-2,6	-4,0	-0,1	+0,1	-1,2	-0,7	-0,3
SB. 5	-3,1	+4,5	-1,2	-2,7	-4,2	-0,2	-0,1	-1,6	-0,8	-0,3
DS.	-2,5	+4,8	-0,8	-1,9	-2,7	-0,3	-0,2	-0,7	-1,1	-0,5

Die Meßpunkte 1 bis 10 der kompensierten Versuchsteile:

MP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Komp 1	+3,3	-1,8	-1,9	-0,8	+1,5	+1,9	+0,3	+0,7	+0,2	0,0
Komp 2	+3,9	-2,1	-2,1	-1,0	+1,5	+2,0	+0,5	+0,7	+0,2	0,0
Komp 3	+3,5	-1,9	-2,0	-0,8	+1,5	+1,9	+0,4	+0,7	+0,3	+0,1
DS.	+3,6	-1,9	-2,0	-0,9	+1,5	+1,9	+0,4	+0,7	+0,2	0,0

Die Meßpunkte 11 bis 20 der kompensierten Versuchsteile:

MP.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Komp 1	-0,3	+1,4	+0,2	-0,8	-0,1	-0,1	-2,5	+0,5	-1,0	-1,8
Komp 2	-0,3	+1,6	+0,2	-0,9	-0,2	-0,2	-2,6	+0,7	-1,3	-2,0
Komp 3	-0,3	+1,4	+0,1	-0,8	0,0	0,0	-2,5	+0,2	-0,8	-1,5
DS.	-0,3	+1,5	+0,2	-0,9	-0,1	-0,1	-2,5	+0,4	-1,1	-1,8

Flächennormierte maßliche Abweichungen beim Serienwerkzeug:

Summe über Oberfläche	Einheit	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5
Abweichung · Fläche	$mm^3$	654089	643710	508218	711465	757217
Oberfläche	$mm^2$	446634	446279	445871	445148	445597
Quotient	$mm$	1,46	1,44	1,14	1,60	1,70

Flächennormierte maßliche Abweichungen beim kompensierten Versuchswerkzeug:

Summe über Oberfläche	Einheit	Komp 1	Komp 2	Komp 3
Abweichung · Fläche	$mm^3$	369374	400309	370756
Oberfläche	$mm^2$	447005	446776	446710
Quotient	$mm$	0,83	0,90	0,83

Bei den Serienbauteilen ergibt sich eine flächennormierte durchschnittliche Abweichung von 1,47  $mm$ , beim kompensierten Versuchswerkzeug von 0,85  $mm$ .

## A.2. Lüdersband

Nach [95] läßt sich die Lüdersdehnung (plastische Dehnung) an Zugversuchsverfestigungskurven mit ausgeprägter Streckgrenze und inhomogenem Verformungsbereich beschreiben (Siehe Abbildung A.1).

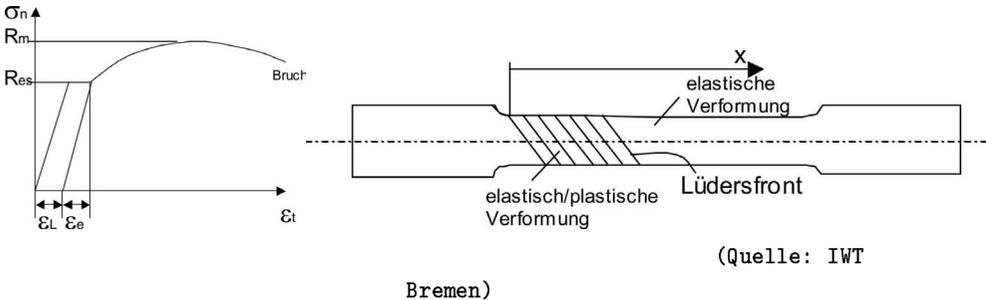


Abbildung A.1.: Das Lüdersband beim Zugversuch

Dabei ist:

- $\epsilon_L$  die Lüdersdehnung (plastische Dehnung)
- $\sigma_n < R_{es}$  bedeutet eine homogene Spannungs- und Dehnungsverteilung über die Probenlänge (Dehnung elastisch)

Querschnittsübergänge sind bevorzugte Ausgangsorte für die plastische Verformung, da hierdurch die Kerbwirkung eine Spannungsüberhöhung eintritt.

## A.3. Verwendete Software

Im Rahmen der Arbeit sind unterschiedliche Softwareprogramme zum Einsatz gekommen, welche im Folgenden in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt sind:

Animator (GNS), Ansa (LASSO), Catia (Dassault), Generator (GNS), INDEED (GNS), LS-Dyna (LSTC), Mashal (INPRO), Medina (T-Systems), NASTRAN (MSC), Optimus (FeDesign), Panelshop (ICAPP).

## A.4. Differentialgleichungsentwicklung von Optimus

Differential Evolution [94]:

### A.4.1. Algorithm Introduction

Reference: R. Storn and K. Price [22]

Differential Evolution is a recent approach for the solution of real-valued multi-dimensional optimization problems. As is typical for stochastic search algorithms, differential evolution does not require the calculation of the sensitivities. In the process of the optimization, differential evolution generates new parameter vectors by adding the weighted difference between a defined number of randomly selected members of previous population to another member. In its basic strategy, this is the difference of two vectors added to a third:

$$v_m^{(k+1)} = x_{r_1}^{(k)} + F \cdot (x_{r_2}^{(k)} - x_{r_3}^{(k)}) \quad (\text{A.1})$$

for  $m = 1 \dots \lambda$  with  $k$  the generation index,  $\lambda$  the population size,  $r_1, r_2, r_3 \in [1, \lambda]$ , randomly chosen and mutually different. The step length is not taken from a fitness selected set of individuals, but rather from a randomly selected individual of the previous population. To increase diversity in the population, crossover is introduced. Here, parts of the previous design vector are inherited by the new design, following a certain probability. This recombination scheme is different than Self-Adaptive recombination. The selection process is similar, if the resulting design has a better fitness value it replaces its parent. But here fitness is tested against the direct predecessor, where as the Self-Adaptive constructs list of fitness of selected set of parents from the whole population compared with new generated offspring.

### A.4.2. Algorithm of Differential Evolution

1. Initialize (usually randomly) a population of vectors (individuals), with population size =  $NP$  (number of points)
2. Evaluate fitness of all initial vectors of population
3. Repeat:  $i$  from 1 to  $NP$   
 Select mutually different vectors (usually 3)  $\vec{x}_{r_1}^{(g)}, \vec{x}_{r_2}^{(g)}, \vec{x}_{r_3}^{(g)}$  for reproduction. Build weighted difference vector and add to the third vector  $\vec{v}_i = \vec{x}_{r_3}^{(g)} + F(\vec{x}_{r_1}^{(g)} - \vec{x}_{r_2}^{(g)})$

where  $F$  is the weight factor. Select (randomly) target vector  $\vec{x}_i^{(g)}$  and crossover with  $\vec{v}_i$  to get trial vector.

Repeat  $n$  from 1 to  $D$

$$t_{n,i} = \begin{cases} v_{n,i} & \text{rand} < CR \text{ or } n = \text{rand}(D) + 1 \\ x_{n,i}^{(g)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

where  $CR$  is the crossover rate,  $D$  is the dimension of the vector  $\text{rand}$  generates random number within  $[0, 1)$

$\text{rand}(D)$  generates integer number within  $[0, D - 1)$

Select between the trial vector  $\vec{t}_i$  and target vector  $\vec{x}_i^{(g)}$ , the fitter one survive to the next generation.

$$\vec{x}_i^{(g+1)} = \begin{cases} \vec{v}_i & f(\vec{v}_i) < f(\vec{x}_i^g) \\ \vec{x}_i^g & \text{otherwise} \end{cases}$$

4. Check termination condition (time, iteration, number, fitness), stop if it is satisfied, otherwise go back to step 3.

### A.4.3. Parameter Choosing

The control parameters are:

- Population Size: The population size defines the number of design that are evaluated during each iteration (generation). The number must be  $> 7$ , otherwise the algorithm gets trapped in an endless loop. The population size depends on the number of design variables. A larger population increases the probability of global convergence, at the cost of more design evaluations.
- Initial stepwidth: The initial step width must be chosen such that the design parameter may vary as wide as possible (upper bound - lower bound). On the other hand, the step width should be small enough that not too many designs receive a penalty due to violation of the bounds and constraints at the beginning of the optimization. A good choice is always half the allowed variation. For example, for a normalized value of the interval  $[0, 1)$ :  
 $1 = (\text{upper bound} - \text{lower bound})$ ,  $0,5 = (\text{upper bound} - \text{lower bound})/2$
- Weighting factor: Applying weighted differences of the variables of randomly selected designs from the previous generation creates a new vector of design variables. Good values are between  $0,5$  and  $1,0$ . A low value (e.g.  $0,5$ ) slows down the optimization process, but provides a higher probability of global convergence. A large value ( $1,0$ ) speeds up the algorithm, but lowers the probability of finding the global optimum.

- Inverse crossover probability: In the evolution process, several variables (genes) might be taken from predecessors without adjustment. If the inverse crossover probability is low, good designs survive longer. This increases the risk of getting trapped in local optima. The inverse crossover probability should be chosen between 0,0 and 1,0. Experience has shown that 0,7-0,85 is a good setting.
- Average stopping stepwidth: The variation of the design variables is used as the stopping criterion for the differential evolution. It is assumed that a small variation of all design variables can not produce a large variation in the quality. The stopping step width must be set normalized, based on the lower and upper bounds on the design variables. The variable range is normalized to  $1 = (\text{upper bound} - \text{lower bound})$ .
- Maximum number of iterations: The optimization is stopped after a maximum number of iterations. The number of function evaluations is:  $nf = \text{number of iterations} * \text{population size}$ . If this number is set very low, the optimization might not have found an optimum when stopped. If it is chosen too high, the optimization will stop with the step width stop criterion. Less than 10 iterations are not recommended.

## A.5. Verwendete Werkstoffe

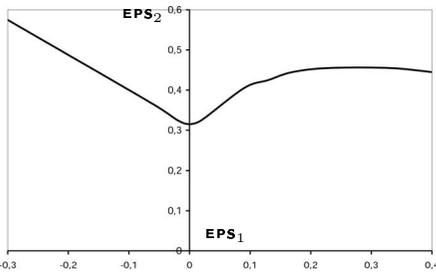
Die spezifischen Werkstoffeigenschaften, welche für die Simulationen verwendet wurden, sind in diesem Abschnitt dargestellt.

### A.5.1. Tiefziehstahl DX54D

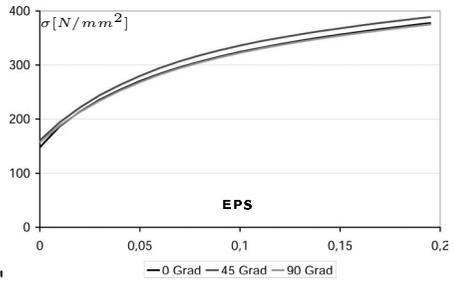
Querkontraktion: 0,3

Verfestigungsmodell: Hill-Modell mit konstanter kinematischer Verfestigung

Winkel [Grad]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	RP <sub>0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	AG [%]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	R-Wert [-]	A <sub>80</sub> [mm <sup>2</sup> ]	n [-]
0,0	174000	153,0	23,0	315,0	1,82	44,5	0,228
45,0	175000	161,0	22,0	325,0	1,34	42,5	0,217
90,0	177000	157,0	24,0	313,0	2,12	43,5	0,225



Grenzformänderungskurve DX54D



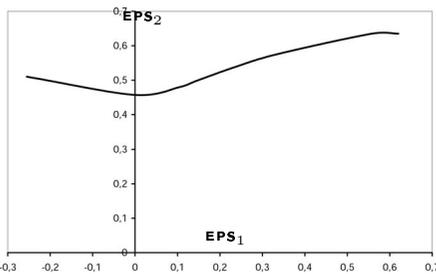
Fließkurven DX54D

### A.5.2. Tiefziehstahl H260LAD

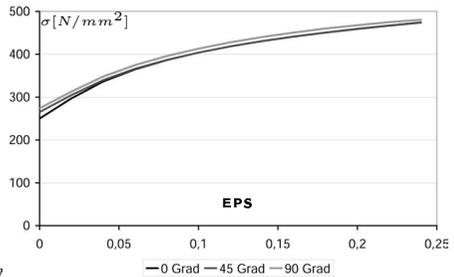
Querkontraktion: 0,3

Verfestigungsmodell: Hill-Modell mit konstanter kinematischer Verfestigung

Winkel [Grad]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	RP <sub>0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	AG [%]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	R-Wert [-]	A <sub>80</sub> [mm <sup>2</sup> ]	n [-]
0,0	210000	250,0	19,4	250,0	0,76	37,0	0,188
45,0	210000	265,0	20,4	265,0	1,00	36,0	0,186
90,0	210000	274,0	19,6	274,0	0,98	33,0	0,184



Grenzformänderungskurve HX260LAD



Fließkurven HX260LAD

## A.6. Programmierarbeit

### A.6.1. Geradengleichung

Zum Einsatz kommt die allgemeine mathematische Beschreibung einer Geraden [52]:

$$\mathbf{G} = \vec{a}_1 + r \cdot \vec{b}_1 = \vec{P}_1 + r \cdot (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) = \begin{pmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} P_{2x} - P_{1x} \\ P_{2y} - P_{1y} \\ P_{2z} - P_{1z} \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Die Formulierung für Geraden kommt beim Abstandsberechnungsalgorithmus zum Einsatz. Es wird der Abstand eines Punktes entlang der Geraden zu einer die Gerade schneidenden Ebene berechnet.

### A.6.2. Winkel zwischen zwei Geraden

Der Schnittwinkel  $\alpha$  zweier nach A.2 beschriebener Geraden berechnet sich [61]:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{b}_1 \cdot \vec{b}_2}{|\vec{b}_1| \cdot |\vec{b}_2|} \quad (\text{A.3})$$

Mit  $\alpha = \sphericalangle(\vec{b}_1, \vec{b}_2) = \sphericalangle(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$

Der Winkel zwischen zwei Geraden wird beim Vergleichen von zwei Geometrien berechnet. Ausgegeben werden maßliche Abweichungen in Grad.

### A.6.3. Ebenengleichung

Eine durch die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  definierte Ebene wird durch folgende Gleichung beschrieben [52, 39]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \vec{a} + s \cdot \vec{b} + t \cdot \vec{c} = \vec{P}_1 + s \cdot (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) + t \cdot (\vec{P}_3 - \vec{P}_1) \\ &= \begin{pmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} P_{2x} - P_{1x} \\ P_{2y} - P_{1y} \\ P_{2z} - P_{1z} \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} P_{3x} - P_{1x} \\ P_{3y} - P_{1y} \\ P_{3z} - P_{1z} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Die Ebenengleichung läßt sich anwenden, da jedes Finite Element als Dreieck zerlegt werden kann. Die drei Knoten des Dreiecks stellen jeweils die drei Punkte für die Ebenengleichung dar. Zur Prüfung, ob ein auf eine Ebene projizierter Punkt innerhalb der Ebene oder außerhalb liegt, werden folgende Bedingungen betrachtet:  $0 \geq s \leq 1$ ;  $0 \geq t \leq 1$ ;  $0 \geq s + t \leq 1$ .

Sind alle Bedingungen erfüllt, so befindet sich der projizierte Punkt innerhalb des aus den drei Punkten aufgespannten Dreiecks.

### A.6.4. Elementflächenberechnung

Nach [52, 62] berechnet sich die von den zwei Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  aufgespannte Fläche des Parallelogramms, wie in Gleichung A.5 definiert.

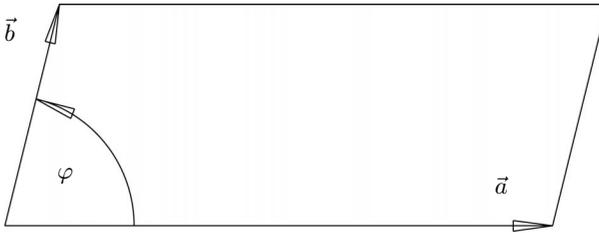


Abbildung A.2.: Elementfläche

$$2 \cdot A = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin \varphi = |\vec{a} \times \vec{b}| \quad (\text{A.5})$$

Die Elementfläche eines Dreiecks wird mit  $A$  bezeichnet. In Gleichung A.5 wird der Flächeninhalt eines Parallelogramms ausgerechnet, welcher exakt doppelt so groß ist wie der des Dreiecks.

### A.6.5. Normalenberechnung

Der Abstandsberechnungsalgorithmus bestimmt von jedem auszurechnenden Element die Elementnormale. Dazu dient das Kreuzprodukt von  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  aus der Ebenengleichung A.5:  $\vec{b} \times \vec{c}$ . Dabei handelt es sich um einen Vektor, welcher im Ursprung des Koordinatensystems liegt. Durch Addition wird er in den Elementmittelpunkt des Dreiecks verschoben.

### A.6.6. Abstandsberechnung

Es gilt  $\mathbf{G} = \mathbf{E}$ . Es ergibt sich ein lösbares Gleichungssystem. Werden aus den Gleichungen A.5 und A.2  $r$ ,  $s$  und  $t$  bestimmt und eingesetzt, so ergibt sich als Ergebnis ein Punkt. Dieser Punkt liegt auf der Geraden  $\mathbf{G}$  und der Ebene  $\mathbf{E}$ . Da die Gerade normiert ist (der Abstand zwischen  $P_1$  und  $P_2$  beträgt 1 mm), ist  $r$  der Abstand in mm.

## A.6.7. Autopositionierung

Zur Auswertung maßlicher Abweichungen wird die Platine von einem 3D-Volumenkörper in eine Schale ohne Elementdicke gewandelt. Die Autopositionierung bezeichnet die Positionierung der Sollgeometrie gegenüber einer rückgefederten Platine. Die erste Lagebedingung der Rückfederungssimulation zeigt die Stelle an, welche übereinandergebracht werden soll. Die Bewegungsrichtung ergibt sich aus der Steuerdatei, sie ist identisch zur Ziehrichtung. Ausgehend vom Referenzknoten der rückgefederten Geometrie wird die Geradengleichung in Ziehrichtung aufgestellt (A.2). Für jedes Element der Sollgeometrie wird das Gleichungssystem aufgestellt und gelöst. Dasjenige Element, welches eine Lösung bietet, bei der der Projektionspunkt innerhalb des Dreiecks liegt (siehe Ebenengleichung A.5), liefert den Verschiebungsvektor.

## A.7. Optimierungskette

Um die maßlichen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie zu minimieren, ist unter Einsatz einer Optimierungssoftware eine Prozeßkette aufgebaut worden, welche Simulationen startet und auswertet. Der prinzipielle Ablauf ist im Folgenden dargestellt.

### A.7.1. Datensatzinhalt

Ein Datensatz besteht aus folgenden Dateien:

- Steuerdatei (.dat)
- Platine (.t51)
- Werkzeuge (.t52)
- Ziehleisten, Beschnittkonturen und Beschnitttrichtung (.t53)
- Rückfederungslagerungsbedingungen (.rf)
- Auswerteprotokoll für Blechdickenreduzierungen (.ses)
- Auswerteprotokoll für Grenzformänderungsdehnungen (.ses)
- Auswerteprotokoll für maßliche Abweichungen (.ses)
- Werkstoffbeschreibung (.mbl)
- Berechnungsprotokoll für die Rückfederungsenergie (.rf)
- Sollgeometrie (.t52)
- Auswerteprotokoll für die Rückfederungsenergie (.ses)

## A.7.2. Ablauf Simulationskette

Ablaufkette eines Optimierungsschrittes:

- Kopieren der Daten ins Simulationsverzeichnis
- Jobdatei der Tiefziehsimulation erstellen
- Job an Großrechner abschicken
- Wartefunktion starten, bis Simulation zurückgeschrieben ist
- FLC-Werte für Platine berechnen
- FLC auswerten, Bestimmung des Maximalwertes, vordefinierte Punkte auswerten
- FLC-Ergebnisse an Optimierungssoftware übergeben
- Rückfederungssimulation inklusive Jobdatei erzeugen
- Rückfederungssimulation an Großrechner abschicken
- Wartefunktion starten, bis Rückfederungssimulation zurückgeschrieben ist
- Auswertung der Rückfederung (separat erläutert)
- Rückgefederte Platine extrahieren (als Volumenmodell)
- Rückgefederte Platine als Geometrie auf Schalenmitte zusammenziehen
- Daten zur Berechnung der Rückfederungsenergie erzeugen (separat erläutert)
- Jobdatei für Rückfederungsenergie erstellen
- Rückfederungsenergie datei an Großrechner schicken
- Wartefunktion starten, bis Simulation zurückgeschrieben ist
- Rückfederungsenergie über gesamtes Bauteil bestimmen
- Ergebnis Rückfederungsenergie an Optimierungssoftware übergeben
- Maßliche Abweichungen auswerten (Min., Max., vorgegebene Punkte)
- Ergebnisse der maßlichen Abweichungen an Optimierungssoftware übergeben
- nicht benötigte Daten löschen
- Daten packen

### A.7.3. Auswertung der Rückfederung

Die maßlichen Abweichungen werden durch ein Skript ausgewertet. Da unterschiedliche Herangehensweisen zu Differenzen in den Ergebnissen geführt haben, ist eine vereinheitlichte Auswerteroutine installiert worden. Dabei muß eine Rückfederungssimulation und eine Sollgeometrie vorliegen. Die Sollgeometrie ist beschrieben als Oberfläche mit Dicke = Null

- Platine aus der Rückfederungssimulation als Volumenmodell extrahieren
- Auswertungsverzeichnis erstellen
- Sollgeometrie gegenüber rückgefederter Platine positionieren
- Rückgefederte Platine in Oberfläche wandeln (Mittelschicht)
- Abstandsberechnung von rückgefederter Platine gegenüber Sollgeometrie

### A.7.4. Eingangsdatenerstellung zur Berechnung der Rückfederungsenergie

Automatisiert wird die Rückfederungsenergie bestimmt und als Bewertungskriterium herangezogen. Das Vorgehen zum Erzeugen der Eingangsdaten ist an dieser Stelle erläutert:

- Rückgefederte Platine von Volumenmodell auf Mittelschicht reduzieren
- Sollgeometrie positionieren
- Netzkonvertierung für strukturmechanische Untersuchung (Elementteilung)
- Normalenausrichtung für neu entstandene Elemente
- Berechnen der Zwangsbedingungen der 2D Punkte
- Einbindung aller Punkte im Umkreis von 10 *mm* eines 2D-Punktes
- Berechnen der Zwangsbedingungen der 3D Punkte
- Einbindung aller Punkte im Umkreis von 10 *mm* eines 3D-Punktes
- Herausschreiben der Eingangsdatensatzes

Die Unterscheidung von 2D und 3D Punkten ist wie folgt: Bei einem 2D-Punkt werden dem auszuwertenden Punkt nur die Koordinaten *x* und *y* mitgegeben. Die *z* Koordinate, welche gleichzeitig die Ziehrichtung ist, wird nicht mit übergeben. Dieses erfolgt, da am unteren Totpunkt der Simulation ausgewertet wird. Der Algorithmus bestimmt sich selbst den Punkt, welcher der gegebenen *xy*-Ebene am nächsten ist. Diese Methode funktioniert nicht zuverlässig, wenn in Wänden ein Punkt auf einer bestimmten Höhe ausgewertet werden soll. In diesem Fall kann eine 3D Position angewendet werden. Dabei sollte die Simulation so aufgebaut werden, daß die angegebene *z*-Koordinate nach dem Ziehen erreicht wird.

# Literaturverzeichnis

- [1] BRÄUNLICH, HANS; LAILACH, A.: *Verbesserung der Blechteilqualität durch Streckziehen*. BLECH ROHRE PROFILE 40, NR. 6, S. 481-483, 1993  
ISSN: 0006-4688
- [2] DOEGE, ECKART ET. AL.: *Einfluß elastischer Kennwerte auf die Eigenschaften von Blechformteilen*, ARTIKEL MAT.- WISS. U. WERKSTOFFTECH. 33: 2002
- [3] DOEGE, ECKART; SCHMIDT-JÜRGENSEN, Rуне; SPRINGUB, BIANCA : *Ermittlung optimaler Simulationsparameter für die Rückfederungsvorhersage*, UTF SCIENCE, SEITE 38, 2002
- [4] EVERTZ, THOMAS: *Werkstoffverhalten unter zügiger elastischer Beanspruchung*, SALZGITTER AG, 2002
- [5] GEIGER, M.: *Information zur Auswertemethode, AK Nakazima*, LFT, UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG, 2006
- [6] GENG, LUMIN; WAGONER, R.H.: *Springback Analysis with a Modified Hardening Model*, DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING, THE OHIO STATE UNIVERSITY, SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2000
- [7] GENG, LUMIN ET. AL.: *Springback Compensation for Ultra High Strength Stamping*, CAE METAL FORMING, GENERAL MOTORS, SAE INTERNATIONAL, 2003
- [8] GENG, LUMIN, OETJENS, THOMAS; SA, CHUNG-YEH: *Springback Prediction with LS-Dyna and Die Face Compensation of Aluminium Hood Inner*, CAE METAL FORMING, GENERAL MOTORS, SAE INTERNATIONAL 2003
- [9] HWANG, CHANGWON; HÄUSSINGER, CHRISTIAN: *Optische Ermittlung der Fließkurve/ Anisotropie*, LEHRSTUHL FÜR UMFORMTECHNIK UND GIESSEREIWESEN, UTG, 2003

- [10] JAKUMEIT, J.; HERDY, M.; NITSCHKE, M.: *Parameter Optimization of the Sheet Metal Forming Process Using an Iterative Parallel Kringsing Algorithm*, INDUSTRIAL APPLICATIONS, 2005
- [11] KRASOWSKY, ANDRIY ET. AL.: *Spring-back simulation based on characterization of sheet metals under revers plastic strains*, FRAUNHOFER INSTITUTE FOR MECHANICS OF MATERIALS, 2003
- [12] KULP, STEFFEN ET. AL.: *Parametric Die Compensation*, INTERNATIONAL DEEP DRAWING RESEARCH GROUP (IDDRG), EXTENDED ABSTRACT, 2006
- [13] MERKLEIN, M.: *Ermittlung von Werkstoffkenngrößen am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*, FAU ERLANGEN-NÜRNBERG, 2005
- [14] NEUGEBAUER, REIMUND ET. AL.: *Systematische, erweiterte Kennwertermittlung*, TAGUNGSBAND DER 13. SÄCHSISCHEN FACHTAGUNG UMFORMTECHNIK SFU, 2006
- [15] NEUGEBAUER, REIMUND; LEIB, U.; BRÄUNLICH, HANS: *Influence on Materials Flow in Deep Drawing Using Individual Controllable Draw Pins and Smooth Blankholder Design*, FRAUNHOFER-INSTITUTE FOR MACHINE TOOLS AND FORMING TECHNOLOGY, SAE 1997  
ISSN 0096-736X
- [16] ROLL, KARL: *Stand der Umformsimulation - notwendige Weiterentwicklungen bei der Realisierung der digitalen Prozeßkette Blechteilefertigung*, MEFORM 2008
- [17] ROOS, DIRK; BUCHER, CHRISTIAN: *Methoden der stochastischen Optimierung*, INSTITUT FÜR STRUKTURMECHANIK, BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, WEIMARER OPTIMIERUNGS- UND STOCHASTIKTAGE, 2004
- [18] SCHMOECKEL, D; PRIER, M: *Optimierung der Oberflächen von Tiefziehblechen*, TRIBOLOGIE + SCHMIERUNGSTECHNIK, 45. JAHRGANG, 1998  
ISSN 0724-3472
- [19] SCHMOECKEL, D; GEISSLER, N.: *Arbeitsgenauigkeit schnellaufender Pressen*, BLECH ROHRE PROFILE, 7/8 1998

- [20] STALMANN, ALBRECHT; WEIGERT, PHILIPP: *Werkzeugtechnik der Zukunft - Anforderungen und Möglichkeiten*, TAGUNGSBAND EFB-KOLLOQUIUM 2009, BAD-BOLL  
ISBN 978-3-86776-326-4
- [21] STENGER, H.: *Bedeutung des Formänderungsvermögens für die Umformung*, BÄNDER BLECHE INSTITUTSMITTEILUNG NR 27, TU-CLAUSTHAL, 2002
- [22] STORN, R.; PRICE, K.: *Minimizing the real functions of ICEC'96 contest by Differential Evolution*, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, NAGOYA, JAPAN, 1996
- [23] TAWIL, M.: *Einsatz von Backpropagation-Netzen zur Abbildung des Rückfederungsverhaltens bei der Feinblechumformung*, INSTITUT FÜR MASCHINENWESEN, TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL 2002  
ISSN 0947-2274
- [24] VERHOEVEN, HUBERT; WEIGERT, PHILIPP: *Über neue methodenplanerische Anforderungen bei der Maßhaltigkeitsoptimierung*, 4. CHEMNITZER KAROSSE-RIEKOLLOQUIUM, CARBODYCOLLOQUIUM, 2005  
ISBN 3-937524-33-9
- [25] PIJLMAN, HERMEN H. ET. AL.: *The Implementation Of The Vegter Yield Criterion And A Physocally Based Hardening Rule In Finite Elements*, IACM CONFERENCE, 1998
- [26] WILL, JOHANNES; MÖLLER, J.-ST.; BAUER, E.: *Robustheitsbewertungen des Fahrkomfortverhaltens an Gesamtfahrzeugmodellen mittels stochastischer Analyse*, WEIMARER OPTIMIERUNGS- UND STOCHASTIKTAGE, 2004
- [27] WOLF, HARRY; KLUGE, SIEGFRIED; EBERHARDT, GERD: *Reduzierung der Rückfederung wenig gekrümmter Flächen*, ZEITSCHRIFT: BÄNDER BLECHE ROHRE, SEITEN 53-57, 5-1991
- [28] WOLF, HARRY; KLUGE, SIEGFRIED; KARDOS, KARL: *Anwendung eines theoretischen Rückfederungsmodells zur Herstellung maßgenauer Karosserieteile*, ZEITSCHRIFT: BÄNDER BLECHE ROHRE, 6-1997
- [29] ZHENG, QICHAO; GU, RANDY J.; SONG, JIANGTAO: *Finite Element Method in Assessing Springback of Stamped Parts - A DKT Shell Modell*, SAE WORLD CONGRESS DETROIT, APRIL 11-14, 2005

- [30] EUROPÄISCHE FÖRSCHUNGSGEMEINSCHAFT BLECH (EFB): *Systematische Untersuchungen zur Verbesserung der Rückfederungsberechnung bei der Methodenüberprüfung mittels numerischer Simulation*, EFB-FORSCHUNGSBERICHT NR. 227, 2004
- [31] INNOVATIONSGESELLSCHAFT FÜR FORTGESCHRITTENE PRODUKTIONSSYSTEME IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE MBH (INPRO); PETZOLDT, MARTIN: *Kompensation der Rückfederung*, VIRTUELLES PROTOTYPING (VPT), PROJEKT VPP-12, INPRO, 2004
- [32] INNOVATIONSGESELLSCHAFT FÜR FORTGESCHRITTENE PRODUKTIONSSYSTEME IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE MBH (INPRO); KRASKA, MARTIN: *Materialabgleich*, MEILENSTEINBERICHT M1 ABGLEICHPROGRAMM, VIRTUELLES PROTOTYPING (VPT), PROJEKT VPP-13, INPRO 2004
- [33] INNOVATIONSGESELLSCHAFT FÜR FORTGESCHRITTENE PRODUKTIONSSYSTEME IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE MBH (INPRO); DOIG, MARIA ET. AL.: *Virtuelle Werkstoffprüfung - Kristallplastizität*, MEILENSTEINBERICHT M2, REALISIERUNG ABGLEICHPROGRAMM, VIRTUELLES PROTOTYPING (VPT), PROJEKT VPP-16, INPRO 2004
- [34] INNOVATIONSGESELLSCHAFT FÜR FORTGESCHRITTENE PRODUKTIONSSYSTEME IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE MBH (INPRO); KRASKA, MARTIN; KROSE, K.: *Materialmodell*, KOMPENSATION DER RÜCKFEDERUNG - DEMONSTRATOR, VIRTUELLES PROTOTYPING (VPT), PROJEKT VPT-10 MEILENSTEIN 3.1, 2006
- [35] BALKE, HERBERT: *Einführung in die Technische Mechanik, Kinetik*, SPRINGER VERLAG, 2005  
ISBN-10 3-540-26552-X
- [36] BATHE, KLAUS-JÜRGEN: *Finite-Elemente-Methoden*, 13. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 1990
- [37] BÖGE, ALFRED: *Formeln und Tabellen zur Technischen Mechanik*, 20. ÜBERARBEITETE AUFLAGE, VIEWEG VERLAG, 2006  
ISBN-10 3-8348-0130-5
- [38] BÖGE, ALFRED: *Vieweg Handbuch Maschinenbau, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, VIEWEG VERLAG, 2007  
ISBN 978-3-8348-0110-4

- [39] CZICHOS, HORST; HENNECKE, MANFRED: *Hütte, Das Ingenieurwissen*, AKADEMISCHER VEREIN HÜTTE E.V., BERLIN, 33. AKTUALISIERTE AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2008  
ISBN 978-3-540-71851-2
- [40] DAHL, WINFRIED; KOPP, REINER; PAWELSKI, OSKARY: *Umformtechnik Plastomechanik und Werkstoffkunde*, SPRINGER VERLAG, 1993
- [41] DOEGE, ECKART; BEHRENS, ARNO: *Handbuch Umformtechnik, Grundlagen, Technologien, Maschinen*, SPRINGER VERLAG, 2006
- [42] GOTTSTEIN, GÜNTER: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*, 3. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2007  
ISBN 978-3-540-71104-9
- [43] GROSS, DIETMAR; SCHNELL, WERNER; WRIGGERS, PETER: *Technische Mechanik, Band 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*, 5. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG 2004  
ISBN-3 540-22099-2
- [44] GROTE, KARK-HEINRICH; FELDHUSEN, JÖRG: *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*, 21. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2005  
ISBN 3-540-22142-5
- [45] HORNBOGEN, ERHARD; WARLIMONT, HANS: *Metalle, Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*, 5. NEU BEARBEITETE AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2006  
ISBM 10 3-540-34010-6
- [46] HABERHAUER, HORST; BODENSTEIN, FERDINAND: *Maschinenelemente, Gestaltung, Berechnung, Anwendung*, 14. BEARBEITETE AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2007  
ISBN-10 3-540-34463-2
- [47] HIRSCH, ANDREAS: *Werkzeugmaschinen, Grundlagen*, VIEWEG VERLAG, 2000  
ISBN 3-528-04950-2
- [48] ISSLER, LOTHAR; RUOSS, HANS; HÄFELE, PETER: *Festigkeitslehre- Grundlagen*, 2. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2006  
ISBN-10 3-540-40705-7

- [49] KLOCKE, FRITZ; KÖNIG, WILFRIED: *Fertigungsverfahren 4, Umformen*, 5. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2006  
ISBN 978-3-540-23650-4
- [50] KRÄTZIG, WILFRIED ET. AL.: *Tragwerke 2*, 2. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2004  
ISBN 3-540-57226-0
- [51] LANGE, KURT: *Umformechntik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*, SPRINGER VERLAG 1993
- [52] MERZINGER, GERHARD; WIRTH, THOMAS: *Repetitorium der höheren Mathematik*, 2. AUFLAGE, BINOMI VERLAG 1993
- [53] MEYWERK, MARTIN: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*, SPRINGER VERLAG, 2007  
ISBN 978-3-540-49866-7
- [54] MÜLLER, GÜNTER; GROTH, CLEMENS: *FEM für Praktiker - Band 1. Die Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS*, EXPERT VERLAG, 1999
- [55] NEUGEBAUER, REIMUND: *Hydro-Umformung*, SPRINGER VERLAG, 2007  
ISBN-10 3-540-21171-3
- [56] NIEMANN, GUSTAV; WINTER, HANS; HÖHN, BERND-ROBERT: *Maschinenelemente Band 1*, 4. BEARBEITETE AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2005  
ISBN 3-540-25125-1
- [57] PETERSEN, CHRISTIAN: *Stahlbau, Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*, 3. ÜBERTARBEITETE AUFLAGE, VIEWEG VERLAG, 1997  
ISBN 3-528-28837-X
- [58] SCHULER GMBH: *Handbuch der Umformtechnik*, FIRMA SCHULER, SPRINGER VERLAG, 1998  
ISBN 3-540-61099-5
- [59] STARK, RUDOLF: *Festigkeitslehre, Aufgaben und Lösungen*, SPRINGER VERLAG, 2006  
ISBN-10 3-211-29699-9

- [60] STELZMANN, ULRICH; GROTH, CLEMENS; MÜLLER, GÜNTER: *FEM für Praktiker - Band 2: Strukturodynamik*, 2. AUFLAGE, EXPERT VERLAG, 2001  
ISBN 3-8169-1817-4
- [61] TESCHL, GERALD; TESCHL, SUSANNE: *Mathematik für Informatiker, Band 1: Diskrete Mathematik und Lineare Algebra*, 2. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2007  
ISBN 978-3-540-70824-7
- [62] ULBRICH, HEINZ; WEIDEMANN, HANS-JÜRGEN; PFEIFFER, FRIEDERICH: *Technische Mechanik, in Formeln, Aufgaben und Lösungen*, 1. AUFLAGE, TEUBNER VERLAG, 2006  
ISBN-10 3-8351-0095-5
- [63] WECK, MANFRED; BRECHER, CHRISTIAN: *Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, 6. NEU BEARBEITETE AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2005  
ISBN-10 3-540-22504-8
- [64] WIEDEMANN, JOHANNES: *Leichtbau, Elemente und Konstruktion*, 3. AUFLAGE, SPRINGER VERLAG, 2007  
ISBN-10 3-540-33656-7
- [65] WISSMANN, JOHANNES; SARNES, KLAUS-DIETER: *Finite Elemente in der Strukturmechanik*, SPRINGER VERLAG, 2005  
ISBN-10 3-540-61836-8
- [66] DÖSCHNER, MARTIN: *Ermittlung und Berechnung der Rückfederung von Karosserieteilen*, DIPLOMARBEIT, HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT DRESDEN (FH), 2003
- [67] GAETZSCHMANN, CHRISTIAN: *Stempelkraftermittlung bei Gesenkbiegen und Hohlprägen von Strukturbauteilen*, DIPLOMARBEIT, OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG, 2007
- [68] HELMECKE, STEPHAN: *Möglichkeiten und Wege zur frühzeitigen und umfassenden digitalen Absicherung des Fertigungsprozesses in der Machbarkeitsanalyse der Preßwerkplanung am Beispiel Frontklappe innen*, DIPLOMARBEIT, HOCHSCHULE ANHALT (FH), HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN, KÖTHEN, 2005

- [69] KITTNER, KAI: *Abgleich zwischen Simulation und Praxis bei der Umformung von Karosseriebauteilen*, DIPLOMARBEIT, TU CHEMNITZ, 2004
- [70] KLASEN, RONNY: *Vergleichende Untersuchungen zwischen Simulation und Praxis unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Simulationsprogramme*, DIPLOMARBEIT, HOCHSCHULE WISMAR, FACHHOCHSCHULE FÜR TECHNIK, WIRTSCHAFT UND GESTALTUNG, 2000
- [71] KUNZE, ALEXANDER: *Entwicklung einer standardisierten Vorgehensweise für den Benchmark der FEM-Simulation in der Blechumformung*, DIPLOMARBEIT, HOCHSCHULE WISMAR, 2006
- [72] LIU, QI: *Untersuchungen zur Genauigkeit der Umformsimulation am Beispiel "Verstärkung Seitencrash"*, DIPLOMARBEIT, HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT DRESDEN (FH), 2004
- [73] MAIER, THOMAS: *Untersuchungen zur Genauigkeit der Versagensvorhersage der Blechumformsimulation*, DIPLOMARBEIT, TU-MÜNCHEN, 2005
- [74] MENZEL, RENE: *Untersuchung zum Einfluß der plastischen Vordehnung auf die elastische Rückfederung von Tiefziehblechen*, DIPLOMARBEIT, UNIVERSITÄT HANNOVER, 2000
- [75] PEINEMANN, FLORIAN: *Planungsfortschritt- und Kennzahlen-Monitoring innerhalb der Preßwerksplanung der Volkswagen AG*, DIPLOMARBEIT, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, 2005
- [76] SADEK, TIM: *Methodenentwicklung zur Rückfederungskompensation von Karosseriepressteilen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode*, DIPLOMARBEIT, RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM, 2004
- [77] SCHMIDT, ALEXANDER: *Untersuchung des Rückfederungsverhaltens von Karosserieblechteilen*, DIPLOMARBEIT, FACHHOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG/WOLFENBÜTTEL, 2004
- [78] TICHY, CHRISTOPH: *Beeinflussung des Formgebungsvermögens durch Vorverformung*, DIPLOMARBEIT, FRIEDERICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT, ERLANGEN-NÜRNBERG, 2004
- [79] WEHE, CHRISOH: *Optimierung einer CAD-Ziehanlage mit Hilfe von Modellierungs- und Simulationswerkzeugen*, DIPLOMARBEIT, HOCHSCHULE ZITTAU/ GÖRLTIZ, 2001

- [80] WANG, BO: *Entwicklung einer Methode zur Kompensation der Rückfederung beim Tiefziehen*, DIPLOMARBEIT, INTITUT FÜR UMFORMTECHNIK UND UMFORMMASCHINEN, UNIVERSITÄT HANNOVER, 2004
- [81] WICHERS, DIANE: *Neues Konzept für die Integration von produktspezifischen Qualitätsplanungsdaten im Karosseriebau*, DIPLOMARBEIT, FH BRAUNSCHWEIG, WOLFENBÜTTEL, 2006
- [82] BREUER, DIRK: *Bestimmung des Formänderungsvermögens bei der Kaltmassivumformung*, RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN (RWTHAACHEN), SHAKER VERLAG, DR.-ING. DISSERTATION 2007
- [83] GRAHERT, R: *Die Reibungsverhältnisse im Flaschbereich beim Tiefziehen rechteckiger Teile*, DISSERTATION UNIVERSITÄT HANNOVER, FORTSCHRITTSBERICHTE, VDI, REIHE 2, BETRIEBSTECHNIK, NR. 105, DR.-ING. DISSERTATION, DÜSSELDORF, 1985
- [84] HÜTTE, HOLGER: *Untersuchungen zum Rückfederungsverhalten hochfester Stahlblechwerkstoffe beim Tiefziehen*, UNIVERSITÄT HANNOVER, DR.-ING. DISSERTATION, 2001
- [85] KÖSTERS, ROLF: *Simulationsgestützte Ermittlung von Prozeßparametern für die Blechumformung*, FORTSCHRITTS-BERICHTE VDI, REIHE 2: FERTIGUNGSTECHNIK, NR. 548, VDI VERLAG, DR.-ING. DISSERTATION, 2000 ISBN 3-18-354802
- [86] KRASOVSKYY, ANDRIY: *Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumformung durch weiterentwickelte Werkstoffmodelle*, UNIVERSITÄT KARLSRUHE, DR.-ING. DISSERTATION, 2005
- [87] MUCK, UWE: *Entwicklung eines Verfahrens zur Messung von Rückfederungskräften an Karosseriebauteilen*, TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ, DR.-ING. DISSERTATION, 1997
- [88] ROHLEDER, MARTIN: *Simulation rückfederungs bedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozeß von Blechformteilen*, SHAKER VERLAG, DR.-ING.

- DISSERTATION, 2002  
ISBN 3-8265-9977-2
- [89] SCHMIDT-JÜRGENSEN, RUNE: *Untersuchungen zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen beim Tiefziehen*, UNIVERSITÄT HANNOVER, DR.-ING. DISSERTATION, 2003  
ISBN 3-18-363002-8
- [90] INNOVATIONSGESELLSCHAFT FÜR FORTGESCHRITTENE PRODUKTIONSSYSTEME IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE MBH (INPRO): *Handbuch INDEED*, VERSION 7.3.2, 2001
- [91] GESELLSCHAFT FÜR NUMERISCHE SIMULATION (GNS MBH): *Reference Manual, INDEED 8.0*, BRAUNSCHWEIG, 2007
- [92] INNOVATIONSGESELLSCHAFT FÜR FORTGESCHRITTENE PRODUKTIONSSYSTEME IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE MBH (INPRO): *Handbuch MASHAL v3.0*, VIRTUELLES PROTOTYPING, 2005
- [93] FE-DESIGN MBH: *Handbuch der Software Optimus*, VERSION 5.12, 2006
- [94] NOESIS: *Optimus Theoretical Background*, NOESIS SOLUTIONS, INTERLEUVENLAAN 68, B-3001 LEUVEN, BELGIUM, OKTOBER 2007
- [95] IWT STIFTUNG INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK: *Werkstofftechnik*, SKRIPT DER LEHRVERANSTALTUNG, 2007  
[HTTP://WWW.IWT-BREMEN.DE/WT/WT/VORLESUNGEN/](http://www.iwt-bremen.de/wt/wt/vorlesungen/)
- [96] UNIVERSITÄT KASSEL: *Skript Metall-Prüfungs-Verfahren*, 2006  
[HTTP://WWW.UNI-KASSEL.DE/FB15/IFW/QUALITAET/](http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/)
- [97] A.E. ZIELKE, R. SHARBABAKI, G. SCHUH, A. KAMPKER, P.V. SCHMIDT, T. SCHAAR, J. HARRE, S. GOTTSCHALK, TOMORROW'S AUTOMOTIVE PRODUCTION, MCKINSEY & COMPANY, 2005  
[HTTP://AUTOMOTIVE.MCKINSEY.COM](http://automotive.mckinsey.com)
- [98] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): *DIN EN 10002-1, Deutsche Norm, Metallische Werkstoffe, Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*, DEUTSCHE FASSUNG EN 10002-1, 2001
- [99] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): *DIN EN 10268, Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen*, 2006

- [100] VOLKSWAGEN AG: *Wulst Ziehverfahren, Ziehrand Pressenteil, BeMi-Norm K 40 02, 39V 1250*, 2006
- [101] VOLKSWAGEN AG: *Prüf- und Dokumentationrichtlinie für die mechanischen Kennwerte von Feinblechen aus Stahl*, RICHTLINIE UNTER LEITUNG DES STAHLINSTITUTS VDEH, ENTSTANDEN AUS DEM GEMEINSCHAFTSPROJEKT 'ERARBEITUNG WERKSTOFF- UND VERARBEITUNGSGERECHTER KENNWERTE FÜR FEINBLECH AUS NORMAL- UND HÖHERFESTEN SOWIE NICHTTROTENDEN STÄHLEN', STAND 31.07.2004, REVISION VOM 31.01.2003
- [102] NEUGEBAUER, REIMUND: *2nd international Conference on Accuracy Technology: 13. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, SFU 2006*, 1. AUFLAGE, FRAUNHOFER-INSTITUT WERKZEUGMASCHINEN UND UMFORMTECHNIK, VERLAG: THOMAS HEBERLEIN, 2006  
ISBN 3-937524-45-2

# Index

- Abbildungsverzeichnis, 9
- Abkürzungsverzeichnis, 12
- Abstandsberechnung, 94
- Aufdickungskriterium, 31
- Autopositionierung, 95
  
- Bauteilsteifigkeit, 43
  
- Corus-Vetger, 24
  
- Differentialgleichungsentwicklung, 60
- DIN EN 10002, 21
- Distorsionsverfestigung, 26
  
- E-Modul, 16, 21, 55
- Ebenengleichung, 93
- Eigenspannung, 23
- Elementierung, 57
- Elementnormale, 94
- Energie, 51, 53
- explizite Integration, 30
  
- Faltenbildung, 23
- Finite-Elemente-Methode, 28
- Fließkurve, 21
- Fließkurvenextrapolation, 27
- Fließgrenze, 16
- Formquotient-Kriterium, 31
- Frontklappe VW EOS, 63
  
- Geradengleichung, 93
- Glättung
  - Reibung, 33
  - Ziehleistersersatzmodell, 39
- Glättungskriterium, 31
- Gleichmaßdehnung, 16
- Gosh, 27
  
- Hill48, 24
- Hill90, 24
- Hinterschnitt
  - Kompensation, 35
- hochfester Stahl, 21
- Hocket-Sherby, 27
  
- implizite Integration, 30
- Inhaltsverzeichnis, 7
- Integrationsmethode, 29
- Isotrope Verfestigung, 26
  
- Kinematische Verfestigung, 26
- Kompensation, 35
  - Anwendungsleitlinie, 36
- Kontakt, 32
  - Lagrangesche Multiplikatoren, 32
  - Penaltyverfahren, 32
  - schräge Randbedingungen, 32
- Korrelation, 56
- Krümmungskriterium, 31

Kurzzeichenverzeichnis, 10

Lüdersband, 88

Lagrangesche Multiplikatoren, 32

Linear Continuation, 27

Literaturverzeichnis, 109

Ludwik, 27

NASTRAN, 55

Newmark-Verfahren, 30

Normalenberechnung, 94

Offset, 45

Optimierung

    Ziehanlage, 50

Penalty-Verfahren, 32

PEP, 42

Produktentstehungsprozeß, 42

Projizierte Linien, 37

Prototypenwerkzeug, 18

PuD-S, 20

Querkontraktion, 55

Rückfederung, 15

    Beeinflussung, 17

    Energie, 51–54

    flächennormiert, 55

    Frontklappe, 63

    Regelkreis, 42

    Ursachen, 16

Rückfederungsenergie, 51

Reibung, 32

    Glättungsfaktor, 33

Reverse Engineering, 43

Rezoning, 31

schräge Randbedingungen, 32

Stoffmodell, 22

Swift, 27

Tribologie, 32

Umformsimulation, 28

Unschärfe, 57

unterer Totpunkt, 60

Verfestigungsexponent, 16

Verfestigungsmodelle, 26

Vergrößerungskriterium, 31

Voce, 27

von Mises

    Fließkriterium, 23

Werkstoffgüte, 21

Werkstoffkennwerte

    Aufnahme, 20

Werkstoffverfestigung, 26

Werkzeugdurchdringungskriterium, 31

Werkzeugkompensation, 35

Werkzeugkontakt, 32

Werkzeugwirkflächen, 29

    Kompensation, 35

Winkel zwischen zwei Geraden, 93

Wirkflächen

    Kompensation, 69

Zentrale-Differenzen-Methode, 30

Ziehleisten, 37



# Lebenslauf

## Persönliche Daten

---

Name: Philipp Weigert  
Geburtsdatum: 13.11.1973  
Geburtsort: Hamburg  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Ausbildung

---

08/1980 - 07/1984 Grundschule Röthmoorweg, Hamburg  
08/1984 - 06/1993 Abitur, Gymnasium Bondenwald, Hamburg  
10/1993 - 01/1995 Zivildienst, Albertinen-Haus; Medizinisch-Geriatriische Klinik, Neuropsychologische Abteilung, Hamburg  
10/1995 - 10/2001 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Hamburg-Harburg  
09/1999 - 10/2000 Auslandsstudium an der *Universidad Politecnica de Valencia*, Spanien

## Berufserfahrung

---

02/2002 - 09/2004 Gesellschaft für numerische Simulation (GNS), Ingenieur für technische Berechnung von Umformprozessen und PKW-Crash-Verhalten  
09/2002 - 03/2004 Volkswagen AG, Abteilung PP-F1, Unterstützung der Produktionsplanung bei der Simulation von Tiefziehenanlagen  
10/2004 - 09/2007 Volkswagen AG, Abteilung P1K/T, Doktorandengruppe der Marke Volkswagen, Wolfsburg  
seit 10/2007 Volkswagen AG, Abteilung PKW/I1, Werkzeugbau Wolfsburg, Innovation und Technologie