

**Universität  
Rostock**



Traditio et Innovatio

Vereinfachte Modellierung der kalt-  
plastischen Umformung als Grundlage  
einer automatisierten Prozessplanung

**Dissertation**

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

**vorgelegt von**

M.Sc. Pascal Froitzheim, geboren am 08.12.1989 in Köln

aus Rostock

Rostock, 2024



Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz.

**Gutachter:**

Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Technische Fakultät, Department Maschinenbau (MB)

Lehrstuhl für Fertigungstechnologie

**Datum der Einreichung:** 22.03.2024

**Datum der Verteidigung:** 18.10.2024

### Vorwort

Diese vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Umformtechnisches Fügen und Formgeben“ am Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) in Rostock entstanden.

Ich möchte dieses Vorwort gerne nutzen, um allen beteiligten und indirekt beteiligten Personen meinen Dank auszudrücken.

Ich bedanke mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge, Institutsleiter des Fraunhofer IGP und Leiter des Lehrstuhls Fertigungstechnik der Universität Rostock, für das kontinuierlich in mich gesetzte Vertrauen und für die Übernahme des Hauptreferats.

Die Vielzahl der Forschungsergebnisse sind im Rahmen eines TBI-Verbundvorhabens TBI-V-1-178-VBW-062 gemeinsam mit den Projektpartnern Ostseestahl GmbH & Co. KG aus Stralsund sowie dem Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität Rostock entstanden. In diesem Zuge möchte ich mich insbesondere bei Dr. Thomas Kühmstedt, Technischer Leiter der Fa. Ostseestahl, sowie Harry Schellhorn für das Vertrauen in den neuen Lösungsansatz und die angeregten Diskussionen bedanken. Selbiger Dank gilt auch Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Woernle, der mich bereits seit meinem Studium gefördert und auch in dieser Thematik stets konstruktiv zur Seite gestanden hat.

Bedanken möchte ich mich zudem bei allen beteiligten Kolleg:innen des Instituts, insbesondere meinem ehemaligen Vorgesetzten Prof. Dr.-Ing. Norman Fuchs, sowie allen wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich während der gesamten Bearbeitungszeit inhaltlich und praktisch auf vielfältige Weise unterstützt haben.

Ein großer Dank gilt insbesondere Yanitsa Eisenberg und all meinen guten Freunden, deren Aufzählung hier den Rahmen sprengen würde, die mich in der langen Zeit stets motiviert und mir auch in anstrengenden Phasen neue Energie zur Fortführung des Vorhabens gegeben haben.

Meinen größten Dank möchte ich an meine liebe Familie richten, insbesondere meine Eltern, die mir nicht nur das Maschinenbaustudium in Rostock ermöglicht haben, sondern auch in jeder erdenklichen Situation an meiner Seite stehen. Vielen lieben Dank dafür!

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>IX</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>X</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	2
1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2. Stand der Technik .....</b>	<b>6</b>
2.1 Normative Einordnung des Fertigungsverfahrens .....	6
2.2 Verfahrensbeschreibung .....	7
2.3 Prognosemodelle für die Blechumformung .....	9
2.3.1 Analytische Berechnungsansätze zur Umformprognose .....	9
2.3.2 Numerische Nachbildung der kaltplastischen Umformung mittels FEM .....	12
2.3.3 Empirische Modellansätze der Umformprognose .....	16
2.4 Entwicklungsdefizite .....	21
<b>3. Lösungsansatz zur vereinfachten Modellierung der kaltplastischen Umformung .....</b>	<b>23</b>
<b>4. Theoretische Grundlagen zur Prognose der kaltplastischen Umformung .....</b>	<b>27</b>
4.1 Werkstofftechnische Grundlagen .....	27
4.1.1 Aufbau von Metallen .....	27
4.1.2 Fließverhalten von Werkstoffen .....	30
4.2 Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung .....	34
4.3 Finite Element Methode .....	40
4.4 Statistische Versuchsplanung .....	43
4.5 Parameterprädiktion mithilfe eines künstlichen neuronalen Netzes .....	46
<b>5. Charakterisierung der kaltplastischen Umformung .....</b>	<b>50</b>
5.1 Charakterisierung des Probenmaterials .....	50
5.1.1 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	50
5.1.2 Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit .....	52
5.2 Experimentelle Untersuchung der kaltplastischen Umformung .....	54
5.2.1 Entwicklung eines experimentellen Prüfaufbaus zur Nachbildung der kaltplastischen Umformung.....	54

---

5.2.2	Durchführung eines teilfaktoriellen Versuchskomplexes .....	57
5.2.3	Charakteristische Merkmale der kaltplastischen Umformung .....	59
5.3	Numerische Untersuchung der kaltplastischen Umformung.....	62
5.3.1	Aufbau und Validierung eines numerischen Simulationsmodells zur Untersuchung der kaltplastischen Umformung .....	62
5.3.2	Durchführung eines numerischen Untersuchungskomplexes .....	69
5.3.3	Numerische Charakterisierung der kaltplastischen Verfestigung .....	71
5.4	Auswertung der Charakterisierungsversuche.....	74
5.4.1	Experimenteller Versuchskomplex.....	75
5.4.2	Numerischer Versuchskomplex .....	77
5.5	Zusammenfassung der Charakterisierung der kaltplastischen Umformung .....	80
<b>6.</b>	<b>Aufbau und Parametrierung des geometrischen Ersatzmodells .....</b>	<b>81</b>
6.1	Modellaufbau.....	81
6.2	Definition und Training eines künstlichen neuronalen Netzes .....	87
6.3	Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung .....	93
6.4	Schnittstelle zur Einbindung der optischen Vermessung.....	95
6.5	Iteratives Lösungsverfahren zur Ermittlung von Modellabweichungen.....	98
<b>7.</b>	<b>Experimentelle Erprobung des geometrischen Ersatzmodells für mehrstufige Umformaufgaben .....</b>	<b>103</b>
7.1	Definition der Validierungsversuche .....	103
7.2	Verifikation des geometrischen Ersatzmodells für praxisnahe Umformaufgaben .....	109
7.3	Kompensation von Modellabweichungen zur Optimierung der Modellgenauigkeit .....	113
7.4	Untersuchung des Berechnungsaufwandes.....	117
7.5	Fazit der experimentellen Erprobung .....	120
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>125</b>
	<b>Anhangsverzeichnis.....</b>	<b>133</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anwendung von mehrachsigen gekrümmten Grobblechen für den Schiffbau [1].....	1
Abbildung 2:	1) Krananlage und hydraulische Presse zur kaltplastischen Umformung von Grobblechen [2], 2) schematische Darstellung der Umformung durch Drei-Punkt-Biegen, 3) Lichtspaltmethode während des Umformprozesses .....	2
Abbildung 3:	Schematische Darstellung eines Steuerungskonzeptes zur automatisiert durchgeführten Umformung [3].....	3
Abbildung 4:	Normative Einordnung des Fertigungsverfahrens nach [9] .....	6
Abbildung 5:	Links: Momentenverlauf bei Drei-Punkt-Belastung eines Balken nach [10]; Rechts: Spannungsverlauf und resultierende teilplastische Biegung nach [11].....	8
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Gesenkbiegens [14].....	10
Abbildung 7:	Abschätzung der elastischen Rückfederung durch das Superpositionsprinzip [15].....	11
Abbildung 8:	Ansatz zur Abschätzung der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung [16].....	12
Abbildung 9:	Gegenüberstellung verschiedener Modellierungsansätze für das niederhalterlose Umformen von Grobblechen [24].....	14
Abbildung 10:	Schematische Darstellung des Modellaufbaus beim freien Biegen von halb-ellipsenförmigen Bauteilen [25] .....	15
Abbildung 11:	Modellaufbau einer vereinfachten Biegesimulation (links), Kennlinie des belasteten Biege winkels in Relation zum Stempelweg zur adaptiven Steuerung (rechts) [32].....	17
Abbildung 12:	Idealisierte Darstellung der thermischen Biegeeigen spannung über globale Biegemomente [37] .....	19
Abbildung 13:	Lokale Verformung beim Line-Heating in Relation zur Prozessgeschwindigkeit [40].....	20

Abbildung 14:	Definition der Modellgrößen des geometrischen Ersatzmodells .....	24
Abbildung 15:	Schematischer Ablauf zur Entwicklung eines vereinfachten Prognosemodells für die kaltplastische Blechumformung .....	25
Abbildung 16:	Gittertypen der Elementarzellen von metallischen Werkstoffen [46] .....	28
Abbildung 17:	Gleitsysteme des krz- und kfz-Gitters [43] .....	28
Abbildung 18:	Schematische Darstellung einer Umformung durch Versetzungsbewegung [44].....	29
Abbildung 19:	Spannungs-Dehnungsverlauf eines duktilen Werkstoffs mit ausgeprägter Streckgrenze [44].....	31
Abbildung 20:	Volumenkonstanz (links), Fließzylinder nach von Mises und Tresca (rechts) [11].....	32
Abbildung 21:	Schematische Übersicht der Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung auf das Umformergebnis .....	34
Abbildung 22:	Einordnung der Elementtypen nach der Dimension der Ansatzfunktion [20].....	40
Abbildung 23:	Graphische Darstellung eines vollfaktoriellen Versuchsplans bei drei Faktoren mit je zwei Stufen [64].....	43
Abbildung 24:	Biologisches Modell einer menschlichen Gehirnzelle [70].....	47
Abbildung 25:	Ermittlung von Fließkurven für die numerische Simulation .....	52
Abbildung 26:	Bestimmung der gemittelten Rautiefe <b>RZ</b> des Probenmaterials.....	53
Abbildung 27:	Experimenteller Prüfaufbau zur Nachbildung der kaltplastischen Untersuchung.....	55
Abbildung 28:	Bestimmung des prüfaufbauspezifischen Verformungsverhaltens.....	56
Abbildung 29:	Charakteristische Maschinenkraft-Schwertverschiebungskurve beim freien Biegen.....	59
Abbildung 30:	Dreidimensionale Punktwolke aus der optischen Vermessung.....	61
Abbildung 31:	Schematischer Aufbau des numerischen Simulationsmodells nach [84].....	63

Abbildung 32: Ablauf zur Simulation eines mehrstufigen Umformprozesses mit Berücksichtigung der elastischen Rückfederung .....	65
Abbildung 33: Validierung der Prozesskurven für die Umformung eines Probenblechs aus S460N .....	66
Abbildung 34: Validierung der Blechkontur für die Umformung eines Probenblechs aus S460N .....	67
Abbildung 35: Validierung der Prozesskurven für die Umformung eines Probenblechs aus S235JR.....	68
Abbildung 36: Validierung der Blechkontur für die Umformung eines Probenblechs aus S235JR .....	69
Abbildung 37: Kraft-Schwertverschiebungskurve aus der numerischen Untersuchung eines mehrstufigen Umformprozesses.....	72
Abbildung 38: Vergleich der Blechkontur bei der numerischen Untersuchung eines mehrstufigen Umformprozesses .....	73
Abbildung 39: Schema zur automatisierten Auswertung der experimentellen und numerischen Charakterisierungsversuche .....	74
Abbildung 40: Analyse der lokalen Durchbiegung $t$ in Relation zur den experimentell untersuchten Einflussfaktoren.....	75
Abbildung 41: Analyse der Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ und $\alpha_2$ in Relation zu den experimentell untersuchten Einflussfaktoren.....	76
Abbildung 42: Analyse der lokalen Durchbiegung $t$ in Relation zu den numerisch untersuchten Einflussfaktoren.....	77
Abbildung 43: Analyse der Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ und $\alpha_2$ in Relation zu den numerisch untersuchten Einflussfaktoren .....	78
Abbildung 44: Vergleich absoluten Effekte bei der experimentellen und numerischen Ermittlung der geometrischen Modellparameter .....	79
Abbildung 45: Schematische Darstellung der Definition des Datenformats .....	82
Abbildung 46: Mathematische Beschreibung der lokalen Durchbiegung $t$ als Hyperbel .....	83

Abbildung 47:	Schematisches Ablaufdiagramm zur Durchführung eines einzelnen Umformschritts.....	85
Abbildung 48:	Definition der Eingangs- und Ausgangsgrößen des künstlichen neuronalen Netzes.....	88
Abbildung 49:	Abbildung der Charakterisierungsversuche durch das künstliche neuronale Netz.....	90
Abbildung 50:	Umformprognose eines Charakterisierungsversuches auf Basis des geometrischen Ersatzmodells und des künstlichen neuronalen Netzes..	91
Abbildung 51:	Generierung einer Prozesskurve zur Abschätzung der Modellparameter in Abhängigkeit der Schwertverschiebung .....	92
Abbildung 52:	Ansatz zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung am Beispiel der lokalen Durchbiegung $t$ .....	93
Abbildung 53:	Selektion einer einzelnen Linie aus der optischen Vermessung .....	95
Abbildung 54:	Zwischenschritte zur Einbindung der optischen Vermessung in das geometrische Ersatzmodell.....	96
Abbildung 55:	Lösungskriterium des iterativen Lösungsverfahrens .....	98
Abbildung 56:	Ablauf des iterativen Lösungsverfahrens .....	99
Abbildung 57:	Verlauf des Integrals der Abweichung der Blechdurchbiegung in Relation der Iterationsschritte .....	101
Abbildung 58:	Korrektur der Umformprognose durch Anpassung der Schwertverschiebung.....	102
Abbildung 59:	Definition von Umformszenarien eines mehrstufigen Umformprozesses.....	103
Abbildung 60:	Prüfaufbau zur Durchführung der Erprobungsversuche.....	107
Abbildung 61:	Geometrisches Auswertungskriterium der Erprobungsversuche .....	109
Abbildung 62:	Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen.....	110
Abbildung 63:	Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium B mit direkt anschließenden Umformbereichen .....	111

---

Abbildung 64: Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium C mit überlappenden Umformbereichen .....	112
Abbildung 65: Kompensierte Prognose bei Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen.....	114
Abbildung 66: Kompensierte Prognose bei Umformszenarium B mit direkt anschließenden Umformbereichen .....	115
Abbildung 67: Kompensierte Prognose bei Umformszenarium C mit überlappenden Umformbereichen .....	116
Abbildung 68: Berechnungsaufwand in Relation zur Netzfeinheit.....	119

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mechanischen Eigenschaften des Probenmaterials .....	51
Tabelle 2:	Versuchsplan zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit.....	53
Tabelle 3:	Parameterraum des experimentellen Versuchskomplexes .....	57
Tabelle 4:	Wegpunktdefinition der Prüfmaschine .....	58
Tabelle 5:	Parameterraum des numerischen Versuchskomplexes .....	70
Tabelle 6:	Versuchsplan der experimentellen Erprobungsversuche .....	104
Tabelle 7:	Versuchsplanung für Umformszenarium A.....	105
Tabelle 8:	Versuchsplanung für Umformszenarium B.....	106
Tabelle 9:	Versuchsplanung für Umformszenarium C .....	106
Tabelle 10:	Versuchsplan zur Untersuchung des Berechnungsaufwandes .....	117
Tabelle 11:	Konfiguration der charakteristischen Umformaufgabe .....	118
Tabelle 12:	Aufschlüsselung der Parameterkombinationen der experimentellen Charakterisierungsversuche .....	134
Tabelle 13:	Aufschlüsselung der Parameterkombinationen der numerischen Charakterisierungsversuche .....	141
Tabelle 14:	Aufschlüsselung der ermittelten Modellparameter in Relation zu den experimentell untersuchten Parameterkombinationen .....	146
Tabelle 15:	Aufschlüsselung der ermittelten Modellparameter in Relation zu den numerisch untersuchten Parameterkombinationen.....	150

**Abkürzungen**

FEA	Finite Element Analyse
FEM	Finite Element Methode
hdp	hexagonal-dichtestgepackt
kfz	kubisch-flächenzentriert
krz	kubisch-raumzentriert
MR	Multiple Regression
PLS	Partial Least Squares

## Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	%	Bruchdehnung
$a_j$	[-]	Schwellenwertfunktion
$b$	mm	Backenabstand
$B$	mm	Breite eines prismatischen Körpers
$b_{Blech}$	mm	Breite des Blechs
$b_s$	mm	Breite des Umformschwertes
$c_{(1,2)}$	N/mm	Ersatzsteifigkeit der Auflagebacken
$c_i$	[-]	Modellkonstanten
$D$	kg/s	Dämpfungsmatrix
$d_{(1,2)}$	kg/s	Dämpfungskonstante an den Auflagebacken
$\dot{e}_{Lc}$	1/s	Dehngeschwindigkeit über die parallele Länge
$E$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul
$F(t)$	N	Äußere Belastung in Relation zum Zeitpunkt
$F_{b,e}$	N	Prozesskraft zum Erreichen eines vollständig umgeformten Querschnitts
$H$	mm	Höhe eines prismatischen Körpers
$I$	mm <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment
$I$	mm <sup>2</sup>	Integral der Abweichung über die Blechbreite
$I_0$	mm <sup>2</sup>	Integral der Abweichung über die Blechbreite zu Beginn des Iterationsverfahrens
$I_p$	mm <sup>2</sup>	Integral der Abweichung über die Blechbreite beim p-ten Iterationsschritt
$j$	[-]	Nummerierung des Neurons
$K$	N/m	Steifigkeitsmatrix
$k$	1/mm	Linearer Faktor des quadratischen Funktionsansatzes
$K_{\alpha(1,2)}$	[-]	Skalierungsfaktor der Aufbiegungswinkel
$K_0$	[-]	Ursprungskordinatensystem
$k_{\Delta s}$	[-]	Faktor zur Verringerung des Differenzbetrages der Schwertverschiebung
$k_F$	N/mm <sup>2</sup>	Fließspannung im einachsigen Zugversuch
$k_f$	N/mm <sup>2</sup>	Fließgrenze nach Fließkriterium
$k_I$	[-]	Faktor zum Abbruch des Iterationsverfahrens
$K_t$	[-]	Skalierungsfaktor der lokalen Durchbiegung
$L$	mm	Länge eines prismatischen Körpers

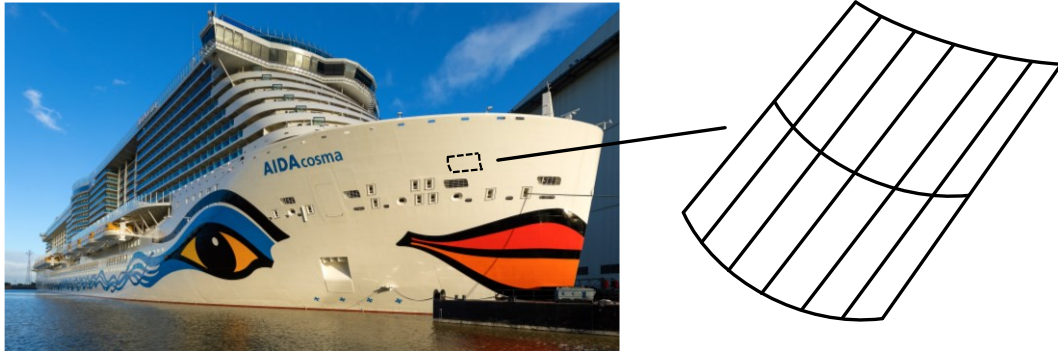
Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$l_G$	mm	Blechlänge beim Gesenkbiegen
$L_{ist}$	mm	Verlauf der prognostizierten Blechkontur in z-Koordinaten
$l_N$	mm	Messstrecke der Rauigkeitsmessung
$l_r$	mm	Einzelmessstrecke der Rauigkeitsmessung
$L_{soll}$	mm	Verlauf der realen Blechkontur in z-Koordinaten
$l_t$	mm	Taststrecke der Rauigkeitsmessung
$M$	kg	Massenmatrix
$m$	1/mm	Steigung des linearen Funktionsansatzes
$M_B$	Nm	Biegemoment
$n$	[-]	Umformschritt
$N$	[-]	Gesamtanzahl der Umformschritte
$n_E$	[-]	Anzahl der Eingänge an einem Neuron
$n_f$	[-]	Anzahl der Faktoren bei vollfaktorieller Versuchsplanung
$n_l$	[-]	Anzahl der Stufen bei vollfaktorieller Versuchsplanung
$N_{mess}$	[-]	Anzahl der optischen Messungen
$n_r$	[-]	Versuchsanzahl
$net_j$	[-]	Nettoeingabewert
$o_i$	[-]	Eingabesignale am Neuron
$p$	[-]	Iterationsschritt des iterativen Lösungsverfahrens
$p_f$	[-]	Anzahl der Faktoren bei D-optimaler Versuchsplanung
$\acute{p}$	[-]	Anzahl der Wechselwirkungen bei D-optimaler Versuchsplanung
$P_{(1,2)}$	mm	Auflagepunkte
$R_{eH}$	N/mm <sup>2</sup>	obere Streckgrenze
$R_{eL}$	N/mm <sup>2</sup>	untere Streckgrenze
$R_f$	mm	Biegeradius nach Rückfederung
$R_i$	mm	Biegeradius vor Rückfederung
$R_M$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit
$r_{SP(1,2)}$	mm	Radius der Kontaktfläche an den Auflagebacken
$r_{sw}$	mm	Radius der Kontaktfläche am Umformschwert
$R_z$	µm	Rautiefe
$R^2$	[-]	Modellgüte
$s$	mm	Schwertverschiebung
$S_{(1,2)}$	mm	elastische Verschiebung der Auflagebacken in Folge der Maschinensteifigkeit

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$s_3$	mm	Sollwert der Schwertverschiebung in der Simulation
$s_{ist}$	mm	Schwertverschiebung in Relation zum vorverformten Blech
$s_{p,n}$	mm	Korrektur der Schwertverschiebung
$s_{soll}$	mm	Sollwert der Schwertverschiebung
$t$	mm	Tiefe der spezifischen Biegelinie
$t_{Blech}$	mm	Blechdicke
$t_E$	mm	Eindringtiefe des Schwertes in das Blech, entspricht dem tiefsten Punkt der Schwertverschiebung
$t_{eff}$	mm	effektive lokale Durchbiegung unter Berücksichtigung der Vorverformung
$t_{ist}$	mm	Vorverformung des Blechs in Relation zur lokalen Durchbiegung
$t_{komp,n}$	mm	Skalierung der lokalen Durchbiegung zur Kompensation von Modellabweichungen
$T_m$	[-]	Transformationsmatrix einer Elementardrehung
$V$	mm <sup>3</sup>	Volumen des Blechs
$V_0$	mm <sup>3</sup>	Blechvolumen vor der Umformung
$V_1$	mm <sup>3</sup>	Blechvolumen nach der Umformung
$w$	mm	Gesenkweite
$w_{ij}$	[-]	Gewichtungsfaktor
$WP_{Ende}$	mm	Endwegpunkt der Prüfmaschine
$WP_{Start}$	mm	Startwegpunkt der Prüfmaschine
$WP_{Stütz}$	mm	Stützwegpunkt der Prüfmaschine
$x(t)$	s	Knotenpunktverschiebung in Relation zum Zeitpunkt
$x_E$	mm	Koordinaten des Eingriffspunktes in x-Richtung
$x_{global}$	mm	x-Koordinate des Knoten im globalen Koordinatensystem
$x_i$	[-]	Faktoren
$x_{knot}$	mm	x-Koordinate des Knoten im Blech-Koordinatensystem
$Y$	[-]	Zielgröße
$y_E$	mm	Koordinaten des Eingriffspunktes in x-Richtung
$y_{global}$	mm	y-Koordinate des Knoten im globalen Koordinatensystem
$y_{knot}$	mm	y-Koordinate des Knoten im Blech-Koordinatensystem
$z_{global}$	mm	z-Koordinate des Knoten im globalen Koordinatensystem
$z_{Messung,min}$	mm	Minimaler Wert der z-Koordinate der gemessenen Blechkontur
$z_{Prognose,min}$	mm	Minimaler Wert der z-Koordinate der prognostizierten Blechkontur

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha_{(1,2)}$	°	spezifische Aufbiegungswinkel
$\alpha_{(1,2)eff}$	°	effektive Aufbiegungswinkel unter Berücksichtigung der Vorverformung
$\alpha_{(1,2)komp}$	°	Skalierung der Aufbiegungswinkel zur Kompensation von Modellabweichungen
$\delta\alpha_{(1,2)}$	%	prozentuale Modellabweichung der Aufbiegungswinkel
$\delta_L$	%	prozentuale Abweichung der Durchbiegung
$\delta_t$	%	prozentuale Modellabweichung der lokalen Durchbiegung
$\Delta s_0$	mm	Startbedingung des Differenzbetrages der Schwertverschiebung
$\Delta s_P$	mm	Differenzbetrag der Schwertverschiebung
$\epsilon$	%	Dehnung beim einachsigen Zugversuch
$\epsilon_{abw}$	[-]	Modellabweichung
$\Theta_j$	[-]	Schwellwert des Neurons
$\mu$	[-]	Coulomb'scher Reibkoeffizient
$\sigma_{(1,2,3)}$	N/mm <sup>2</sup>	Hauptnormalspannung
$\sigma_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	maximale Hauptnormalspannung
$\sigma_{min}$	N/mm <sup>2</sup>	minimale Hauptnormalspannung
$\sigma_V$	N/mm <sup>2</sup>	Vergleichsspannung nach Mises
$\varphi$	%	Umformgrad

## 1. Einleitung

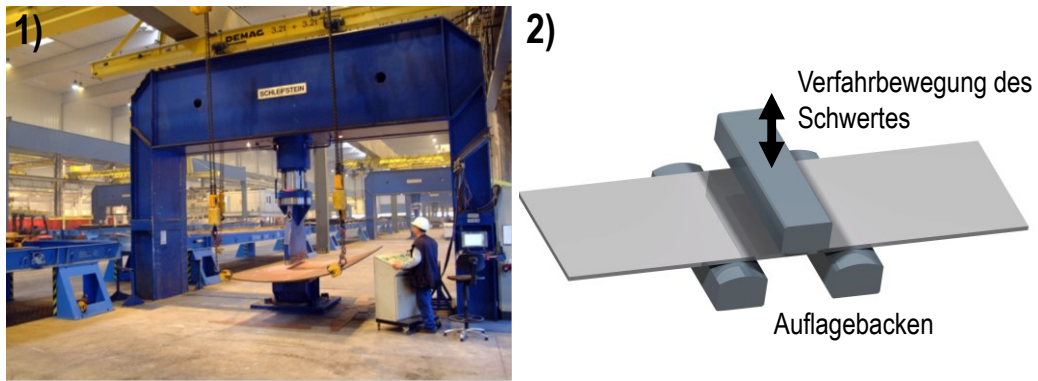
Mehrachsig gekrümmte Grobbleche mit großen Abmessungen und großen Blechdicken finden in vielen ingenieurtechnischen Branchen ihre Anwendung. Hierbei wird neben dem Stahl- und Fassadenbau sowie dem maritimen Sektor besonders dem Schiffbau bei der Herstellung der Außenhülle von großen Schiffen (bspw. Kreuzfahrt- oder Containerschiffe) ein hoher Stellenwert beigemessen (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1: Anwendung von mehrachsig gekrümmten Grobblechen für den Schiffbau [1]**

Anhand der äußeren Form der Bug- und Hecksektion eines großen Kreuzfahrtschiffes lässt sich erkennen, dass zum einen diese Sektionen aufgrund ihrer großen Abmessungen aus einzelnen Blechen zusammengesetzt werden müssen und zum anderen jedes individuelle Blech eine spezifische Sollkontur besitzt, die je nach Schiffstyp nur ein einziges Mal benötigt wird. Während des Baus eines Schiffes werden diese Bleche in der Regel nicht an den Werften selbst produziert, sondern von einem Zulieferer bezogen, der sich auf die dreidimensionale Umformung von Blechen mit sehr geringer Losgröße spezialisiert hat.

Basierend auf der geringen Losgröße der einzelnen Sollkonturen werden diese Grobbleche in einem kaltplastischen Umformprozess durch freies Biegen hergestellt, das auf einer rein manuellen Steuerung der hydraulischen Presse und Krananlage durch erfahrene Anlagenbediener basiert (siehe Abbildung 2, 1). Es handelt sich hierbei um einen mehrstufigen Umformprozess, bei dem die Kontur des Blechs durch eine Vielzahl von einzelnen aufeinanderfolgenden Umformschritten erreicht wird. Je Umformschritt wird das an drei bis vier Kettenzügen angeschlagene Blech oberhalb des Werkzeutischs durch manuelles Verfahren der Krananlage positioniert. Die jeweiligen Eingriffspunkte auf dem Blech werden rein subjektiv durch den Umformer festgelegt, der seine Umformstrategie anhand von Korkschaablonen mit der Kontur der relevanten Spanten (sog. Spantlinien) und seines Erfahrungsschatzes festlegt.



**Abbildung 2:** 1) Krananlage und hydraulische Presse zur kaltplastischen Umformung von Grobblechen [2], 2) schematische Darstellung der Umformung durch Drei-Punkt-Biegen

Nach Positionierung des Blechs am definierten Eingriffspunkt und Ablage auf den Auflagebacken wird das Blech durch Verfahren des Schwertes umgeformt (siehe Abbildung 2, 2). Hierbei wird neben der Wahl des Eingriffspunktes auch die Zustellung der Schwertverschiebung rein nach Erfahrung des Anlagenbedieners festgelegt. Zur Kontrolle des Umformprozesses und Anpassung der Umformstrategie verwendet der Anlagenbediener eine Lichtspaltmethode mithilfe von Korkschaablonen an den relevanten Spantlinien. Anhand des Lichtspaltes zwischen Korkschaablone und Blech können so die noch weiter umzuformenden Bereiche sowie die schon zufriedenstellend umgeformten Bereiche detektiert werden und die nachfolgende Umformstrategie anhand des Lichtspaltes abgeleitet werden. Der Umformprozess wird beendet, sobald die Prüfungen des Lichtspaltes an allen Spantlinien nach Einschätzung des Anlagenbedieners zufriedenstellend ausfallen.

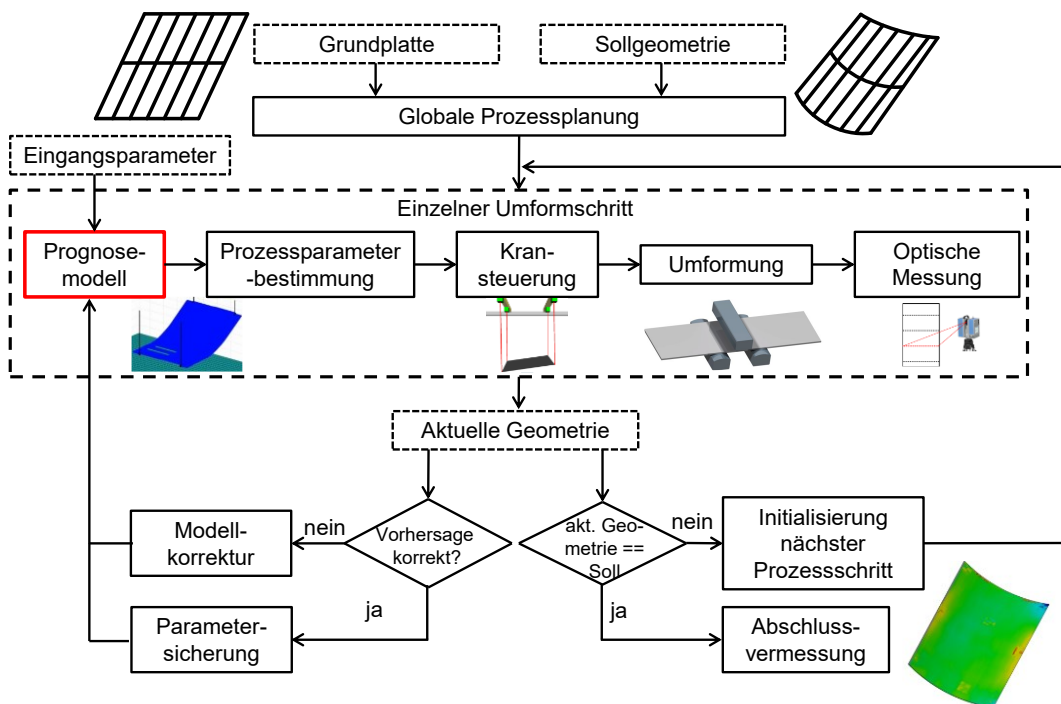
## 1.1 Problemstellung

Aus der derzeitigen Praxis zur Herstellung von mehrfach gekrümmten Grobblechen ergeben sich aus fertigungstechnischer und wirtschaftlicher Sicht daher drei wesentliche Problemstellungen:

1. Die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der subjektiv festgelegten Umformstrategie wird signifikant durch den Erfahrungsschatz des Anlagenbedieners beeinflusst. Dieser Erfahrungsschatz kann nach Verlassen des Anlagenbedieners aus dem Unternehmen nicht archiviert werden, sondern muss von dem Nachfolger zeitintensiv aufgebaut werden.
2. Die Lichtspaltmethode als einziges Kriterium der Qualitätskontrolle genügt nicht mehr den Ansprüchen der Kunden hinsichtlich eines zeitgemäßen und nachverfolgbaren Qualitätsmanagements.

- Die Handhabung des Blechs oberhalb des Werkzeugschischs durch die manuelle Kransteuerung verursacht unerwünschte Lastpendelschwingungen, deren notwendiges Abklingen zu einer Verlängerung der Prozessdauer führt.

Aus diesem Grund wird eine signifikante Reduktion der humanbedingten Einflüsse hinsichtlich Effizienz und Maßhaltigkeit des Umformprozesses durch Automatisierung der hydraulischen Presse und Krananlage angestrebt. Im Rahmen der Prozessautomatisierung wird daher ein Steuerungskonzept zur automatisiert durchgeführten Umformung entwickelt (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Steuerungskonzeptes zur automatisiert durchgeführten Umformung [3]**

Hierbei wird die subjektive Umformstrategie des Anlagenbedieners durch eine objektive Prozessplanung ersetzt, die für jeden Umformschritt den optimalen Eingriffspunkt auf dem Blech und Eindringtiefe des Schwertes bestimmt. Die Handhabung des Blechs mithilfe der Krananlage erfolgt durch eine intelligente Kransteuerung, mit der die Lastpendelbewegungen reduziert werden können [4, 5].

Die subjektive Lichtspaltmethode wird durch ein optisches Messverfahren basierend auf einer 3D-Lasermesstechnik ersetzt. Das Steuerungskonzept wird zudem auf zwei geschlossenen Regelkreisen aufgebaut, durch die zum einen die Genauigkeit der Umformprognose als auch das Erreichen der Sollgeometrie überwacht werden können. Nachdem

das Erreichen der Sollkontur überprüft und bestätigt wurde, wird das Umformergebnis im Rahmen der optischen Endvermessung erfasst und archiviert. [6]

Für die automatisierte Prozessplanung und intelligente Kransteuerung ist es zwingend erforderlich, dass die Kontur des Blechs für die gesamte Prozessabfolge hinreichend genau beschrieben werden kann. Im Verlauf des Umformprozesses kommt es hierbei zwangsläufig zur Änderung der Blechgeometrie, sodass das Umformverhalten des Blechs nach jedem Umformschritt in Folge des Werkzeugeingriffs prognostiziert werden muss. Die Prognose der Umformung mittels eines geeigneten Modells stellt somit eine wesentliche Problemstellung bei der übergreifenden Automatisierung des Gesamtprozesses dar.

## **1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit**

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein effizientes Berechnungsmodell zur Prognose der kaltplastischen Blechumformung durch freies Biegen entwickelt, das in eine industrielle Prozesssteuerung integriert werden kann. Entsprechend des dargestellten Steuerungskonzeptes ergeben sich hinsichtlich des Prognosemodells nachfolgende wesentliche Anforderungen:

### **Prognosegenauigkeit:**

Das Umformverhalten des Blechs infolge des Werkzeugeingriffs muss durch das Modell mit zufriedenstellender Genauigkeit vorhergesagt werden. Hierbei sind industriell relevante Blechkonfigurationen mit unterschiedlichsten Blechdicken, Blechabmessungen, Werkstoffarten und -festigkeiten, etc. abzudecken.

### **Kompensation von Modellabweichungen:**

Aufgrund von chargen- und zuliefererspezifischen Schwankungen der Materialeigenschaften sind Abweichungen zwischen prognostiziertem und realem Umformverhalten möglich. Daher ist ein Modell zur Kompensation vorzusehen, mit der die Modellabweichung basierend auf der optischen Vermessung ermittelt und bei nachfolgenden Umformschritten berücksichtigt werden kann. Die detektierten Modellabweichungen können archiviert werden und zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Modellgüte als selbstlernendes System verwendet werden.

### **Rechenzeit:**

Das Prognosemodell wird in die Pressensteuerung integriert, daher müssen die notwendigen Berechnungen im Zeitraum eines Umformschritts abgeschlossen sein.

Um die festgelegten Zielstellungen zu erreichen, ist die Arbeit folgend aufgebaut:

In der Analyse des Stands der Technik erfolgt zunächst eine normative Einordnung und grundlegende Beschreibung des Umformverfahrens, sodass darauf aufbauend bestehende Prognosemodelle für die Umformung von Grobblechen behandelt werden können. Hierzu werden neben analytischen Berechnungsansätzen und der numerischen Simulation mithilfe der Finite Element Methode (FEM) auch auf Versuchsdaten basierende Modellansätze vorgestellt. Aus der Analyse des Stands der Technik kann im Anschluss das Entwicklungsdefizit formuliert werden.

Aufbauend auf der Analyse des Stands der Technik wird der Lösungsansatz eines effektiven Berechnungsmodells zur Prognose der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen vorgestellt und der Ablauf zur Entwicklung und Validierung des Ansatzes vorgestellt.

Die zur Modellentwicklung notwendigen theoretischen Grundlagen werden aufgearbeitet. Hierbei wird das Augenmerk auf die werkstofftechnischen Mechanismen und die relevanten Einflussfaktoren bei der kaltplastischen Umformung gelegt, sowie die wesentlichen Merkmale der numerischen Simulation durch FEM dargestellt. Zur Reduktion des Versuchsumfangs wird eine statistische Versuchsplanung verwendet, deren Funktionsweise ebenfalls erläutert wird. Die experimentell und numerisch ermittelten Modellparameter müssen durch ein geeignetes mathematisches Modell in Form eines künstlichen neuronalen Netzes approximiert werden.

Es werden Vorbetrachtungen zur Charakterisierung des Umformverhaltens anhand von experimentellen und numerischen Untersuchungen vorgestellt. Anhand einer Sensitivitätsanalyse kann der quantitative Einfluss der Einflussfaktoren für das freie Biegen von Grobblechen bestimmt werden.

Basierend auf dem charakteristischen Umformverhalten wird der vorgestellte Lösungsansatz durch eine allgemeingültige mathematische Beschreibung formuliert sowie ein künstliches neuronales Netz aufgebaut und mithilfe von Versuchsdaten trainiert.

Zur experimentellen Validierung des Modellansatzes wird ein weiterer experimenteller Versuchskomplex durchgeführt und hinsichtlich der Modellgüte des Prognosemodells ausgewertet.

## 2. Stand der Technik

### 2.1 Normative Einordnung des Fertigungsverfahrens

Als Einführung in den Stand der Technik erfolgt zunächst die normative Einordnung des betrachteten Fertigungsverfahrens. Nach [7] können alle Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen unterteilt werden, wobei das hier betrachtete Verfahren der Hauptgruppe des Umformens nach [8] zugeordnet wird. Die Hauptgruppe des Umformens wird wiederum in zugehörige Gruppen unterteilt, die der hauptsächlichen Beanspruchung des Werkstücks beim Prozess entsprechen. Neben dem Schub-, Druck-, Zug-, sowie Zugdruckumformen ist daher ebenfalls das Biegeumformen nach [9] vorhanden. In der nachfolgenden Abbildung 4 ist eine Übersicht verschiedener Verfahren zum Biegeumformen sowie die Einordnung des betrachteten Fertigungsverfahrens aufgeführt.

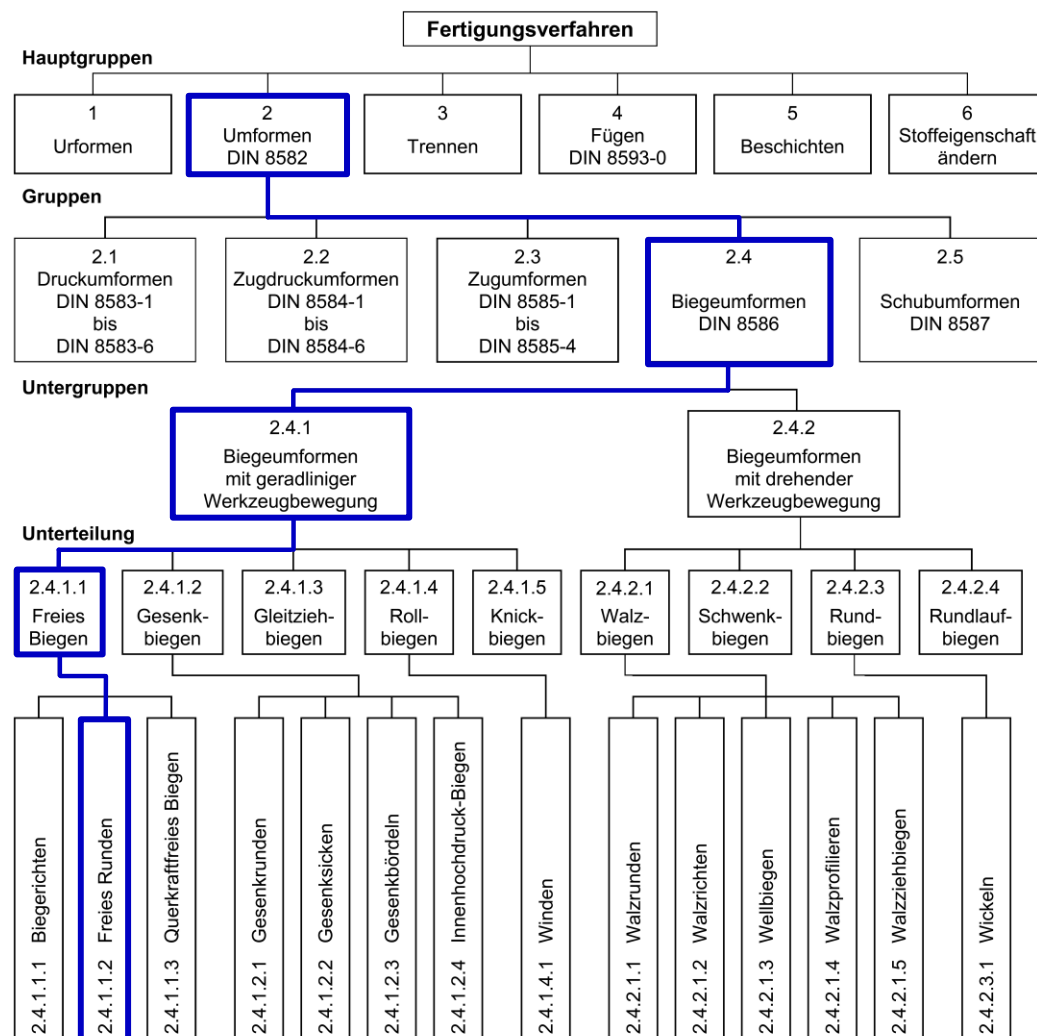


Abbildung 4: Normative Einordnung des Fertigungsverfahrens nach [9]

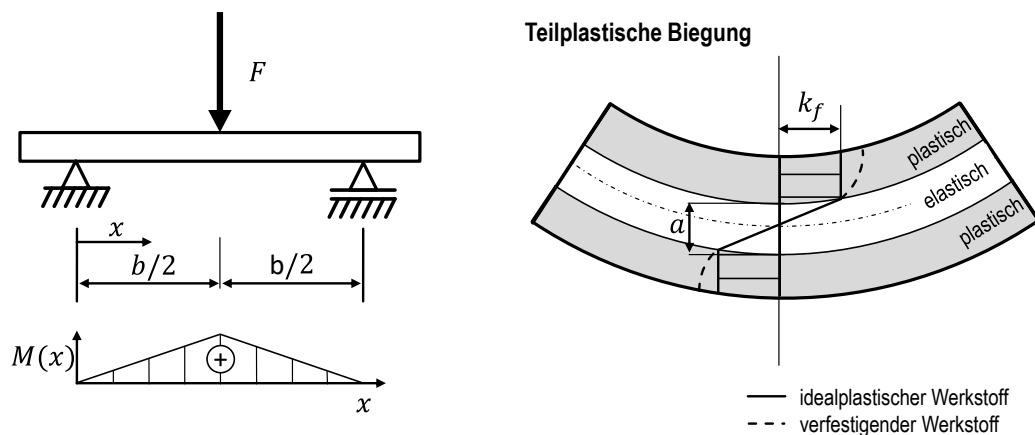
Die Gruppe des Biegeumformens wird entsprechend der Werkzeugbewegung in zwei Untergruppen, dem Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung und dem Biegeumformen mit drehender Werkzeugbewegung, unterteilt. Zur Gruppe des Biegeumformens mit drehender Werkzeugbewegung gehören unterschiedliche Walzverfahren, wie bspw. das Walzbiegen, Schwenkbiegen oder Rundbiegen, an. [9] Durch Verwendung eines Hydraulikzylinders zum Aufbringen der Prozesskraft findet an der betrachteten Produktionsanlage hingegen eine rein geradlinige Werkzeugbewegung statt, sodass das Verfahren dieser Untergruppe zugeordnet werden kann.

Innerhalb der Untergruppe wird entsprechend der Lagerung des Werkstücks und der Werkzeuggeometrie, also somit der charakteristischen Beanspruchung des Werkstücks, unterschieden. Da die bei dem betrachteten Umformprozess eingesetzte Werkzeuggeometrie nicht zur direkten Formgebung des Werkstücks, wie bspw. beim Biegen mit Gesenk, fungiert, wird dieser dem freien Biegen zugeordnet. Da zudem das Werkstücks während des Prozesses durch den Kran gelagert wird und durch die eingesetzten Federpakete an den Laschpunkten keine direkten Prozesskräfte durch die Lagerung aufgebracht werden, handelt es sich bei dem betrachteten Umformprozess nach normativer Zuordnung um das freie Biegen durch freies Runden.

## 2.2 Verfahrensbeschreibung

Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Verfahren der kaltplastischen Umformung von Grobblechen basiert auf einem industriell erprobten Prozessablauf mithilfe einer hydraulischen Umformpresse. Als Umformwerkzeuge werden ein Schwert mit abgerundeter Kontaktfläche als Oberwerkzeug sowie ein starrer Werkzeugschisch mit Unterwerkzeug eingesetzt. Das Schwert ist an einem Hydraulikzylinder montiert und kann zum Aufbringen der Prozesskraft definiert vertikal verfahren werden. Damit zwischen Ober- und Unterwerkzeug hohe Prozesskräfte (bis zu rund 5 MN) bei gleichzeitiger geringer elastischer Deformation der Presse übertragen können, ist die Presse als geschlossener Rahmen ausgeführt, wobei der untere Teil des Rahmens in den Boden der Fertigungshalle eingelassen ist. Auf dem Werkzeugschisch können verschiedene Unterwerkzeuge montiert werden und ermöglichen so einen variablen Einsatz der Presse für verschiedene Umformverfahren. Beim freien Biegen werden Auflagerbacken in T-Nuten auf dem Werkzeugschisch mit definiertem Abstand aufgelegt und fixiert. Durch die Wahl des Abstandes zwischen den Auflagerbacken ergibt sich so für den Anlagenbediener die Möglichkeit, gezielt auf den Beanspruchungszustand und das resultierende Umformergebnis Einfluss zu nehmen. Beim Um-

formprozess wird nun das Blech mithilfe des Krans auf den Auflagerbacken aufgelegt und das Umformschwert entsprechend der Vorgaben des Anlagenbedieners zugestellt. Durch die vertikale Zustellung des Umformschwerts und der punktuellen Lagerung des Blechs wird ein Belastungszustand aufgebracht, die idealisiert als Drei-Punkt-Biegung angenommen werden kann. Aus der technischen Mechanik ist bekannt, dass sich für die Drei-Punkt-Biegung bei symmetrischer Krafteinleitung zwischen den Auflagerpunkten ein definierter Biegemomentenverlauf einstellen kann [10]. Der Biegemomentenverlauf eines Balkens mit konstanten Querschnitts ist in der nachfolgenden Abbildung 5 (links) schematisch dargestellt.



**Abbildung 5: Links: Momentenverlauf bei Drei-Punkt-Belastung eines Balkens nach [10]; Rechts: Spannungsverlauf und resultierende teilplastische Biegung nach [11]**

Hierbei stellt sich ein Maximum des resultierenden Biegemomentes am Krafteinleitungspunkt ein, das zu den beiden Auflagerpunkten symmetrisch ausläuft. Das Biegemoment bildet eine Beanspruchung innerhalb des Blechs aus, die die gewünschte teilplastische Biegung hervorruft (siehe Abbildung 5, rechts). Entsprechend des Abstands vom Krafteinleitungspunkt bildet sich im Blechquerschnitt ein Biegenormalspannungsverlauf in Abhängigkeit des Faserrandabstandes aus. Grundsätzlich wird hierbei der Bereich der inneren Randfaser gestaucht, während der Bereich der äußeren Randfaser gelängt wird [12]. Sobald die anliegende Spannung den Betrag der materialspezifischen Fließspannung  $k_F$  überschreitet, beginnt das Material in diesem Bereich plastisch und irreversibel zu fließen. Bereiche unterhalb der Fließspannung werden hingegen nur elastisch verformt. Der Normalspannungsverlauf unterscheidet sich zusätzlich im plastisch umgeformten Bereich für idealplastische und verfestigende Werkstoffe, sodass eine hohe Abhängigkeit des Umformergebnis von den werkstofflichen Eigenschaften besteht [11]. Bei Entlasten des Werkzeuges wird in den rein elastisch verformten Bereichen der Ausgangszustand angestrebt,

sodass dadurch ein Eigenspannungszustand entsteht, der die Gesamtverformung des Blechs reduziert. Dieses Phänomen wird ebenfalls als elastische Rückfederung bezeichnet.

Nach elastischer Rückfederung und Verfahren des Umformschwertes in den Ausgangszustand ist ein einzelner Umformschritt abgeschlossen. Zur Formgebung eines gesamten Blechs größerer Abmessungen sind wie beschrieben mehrere aufeinanderfolgende Umformschritte notwendig, in denen die Positionen der Eingriffspunkte sowie die Zustellung des Umformschwertes bis zum Erreichen der Wunschgeometrie variiert werden.

### **2.3 Prognosemodelle für die Blechumformung**

Im Bereich der Blechumformung bestehen eine Vielzahl von Ansätzen zur Prognose des Umformverhaltens. Alle Ansätze haben gemein, das Umformverhalten für eine industrielle Anwendung vorherzusagen und notwendige Prozessparameter und Maschinenstellgrößen abzuleiten. Hierzu können analytische Berechnungsansätze auf Basis der Festigkeitslehre aus der Technischen Mechanik, komplexere Methoden mithilfe numerischer Lösungsverfahren oder empirisch-basierte Berechnungsansätze, basierend auf Versuchsdaten, verwendet werden.

#### **2.3.1 Analytische Berechnungsansätze zur Umformprognose**

Eine Möglichkeit zur Prognose von Umformprozessen stellen analytische Berechnungsansätze dar, die bereits für verschiedene Umformverfahren durch Biegen mit geradliniger Werkzeugbewegung existieren. Neben dem freien Biegen, bei dem das Blech auf den beiden Auflagepunkten aufliegt und durch Verfahren des Stempels umgeformt wird, kann auch mittels Gesenk umgeformt werden. Beim Gesenkbiegen liegt das Blech auf einem Gesenk auf und wird nach dem freien Biegen zusätzlich in ein Gesenk eingedrückt [13]. In der nachfolgenden Abbildung 6 sind die Werkzeugkonfiguration beim Gesenkbiegen sowie der mit dem freien Biegen vergleichbare Biegemomentenverlauf schematisch dargestellt.

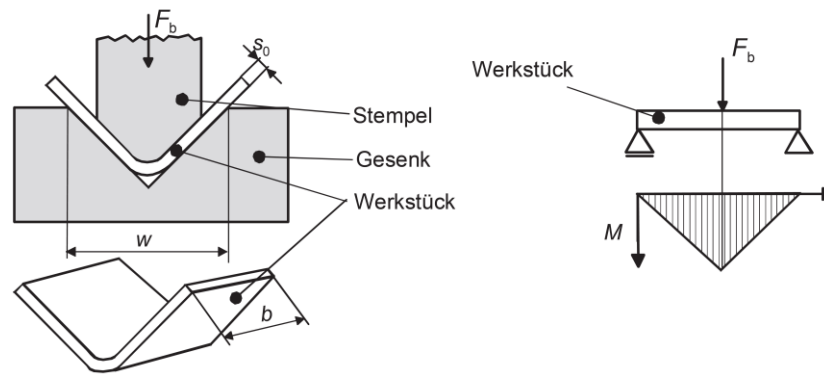


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Gesenkbiegens [14]

Beim Biegen mit Gesenk kann die notwendige Prozesskraft  $F_{b,e}$  zum Erreichen eines vollständig umgeformten Querschnitts und Kompensation der elastischen Rückfederung mithilfe der elementaren Biegetheorie berechnet werden. Der Grundansatz ist hierbei, dass mithilfe des Umformwerkzeuges eine so hohe Biegenormalspannung eingebracht wird, dass an den äußeren Randfasern die materialspezifische Fließspannung überschritten wird. [14]

$$F_{b,e} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_F \cdot l_G \cdot t_{Blech}^2}{w}$$

$k_F$	Fließspannung	$l_G$	Blehtiefe
$w$	Gesenkweite	$t_{Blech}$	Blehdicke

Formel 1: Berechnung der Prozesskraft beim Gesenkbiegen [14]

Dieser Ansatz wird hauptsächlich bei der Serienfertigung mit gleichbleibenden Umformaufgaben und Werkstoffen angewandt. Aufgrund von chargen- und lieferantenspezifischen Schwankungen können die Materialeigenschaften jedoch auch in der Serienfertigung variieren, sodass bei aktuell verfügbaren CNC gesteuerten Maschinen der Rückfederungswinkel gemessen wird und durch Nachdrücken eine mögliche elastische Rückfederung kompensiert wird [12].

Für das freie Biegen ergibt sich hingegen die Besonderheit, dass das Blech nicht im Gesenk anliegt und so kein nachträglicher Prägevorgang möglich ist. Daher muss die elastische Rückfederung zur Prognose der Gesamtverformung berücksichtigt werden. Ein möglicher Ansatz basiert auf dem Superpositionsprinzip, bei dem das anliegende Biegemoment  $M_B$  in einen plastischen und elastischen Anteil unterteilt wird (siehe Abbildung 7)

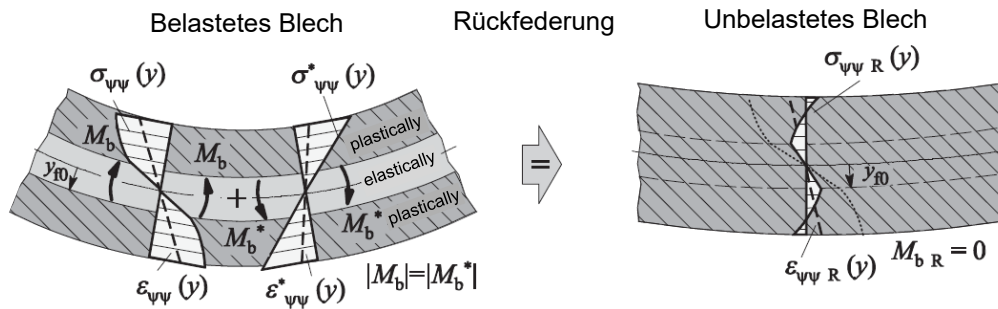


Abbildung 7: Abschätzung der elastischen Rückfederung durch das Superpositionsprinzip [15]

In [16] wird dieser Ansatz für das Drei-Punkt-Biegen in Kombination mit einer analytischen Beschreibung des elasto-plastischen Materialverhaltens angewandt. Hierbei kann der Biegeradius nach der Rückfederung  $R_f$  durch nachfolgende Beziehung abgeschätzt werden:

$$\frac{1}{R_f} = \frac{1}{R_i} - \frac{M_B}{EI}$$

- |       |                               |       |                        |
|-------|-------------------------------|-------|------------------------|
| $R_f$ | Biegeradius nach Rückfederung | $M_B$ | Biegemoment            |
| $R_i$ | Biegeradius vor Rückfederung  | $E$   | E-Modul                |
|       |                               | $I$   | Flächenträgheitsmoment |

**Formel 2: Berechnung der Rückfederung des Biegeradius beim freien Biegen [16]**

Zur vereinfachten Prognose der plastischen Verformung wurde eine analytische Beschreibung unter Annahme eines ebenen Spannungszustands, dem Fließkriterium nach von Mises sowie eines linearen Momentenverlaufes bei idealisierten punktuellen Reaktionskräften verwendet. Das dazu notwendige elasto-plastische Materialverhalten wurde über eine parametrierbare Fließkurve innerhalb des Modells berücksichtigt. In der nachfolgenden Abbildung 8 sind die Kraft-Verschiebungskurven der experimentellen Validierungsversuche abgebildet.

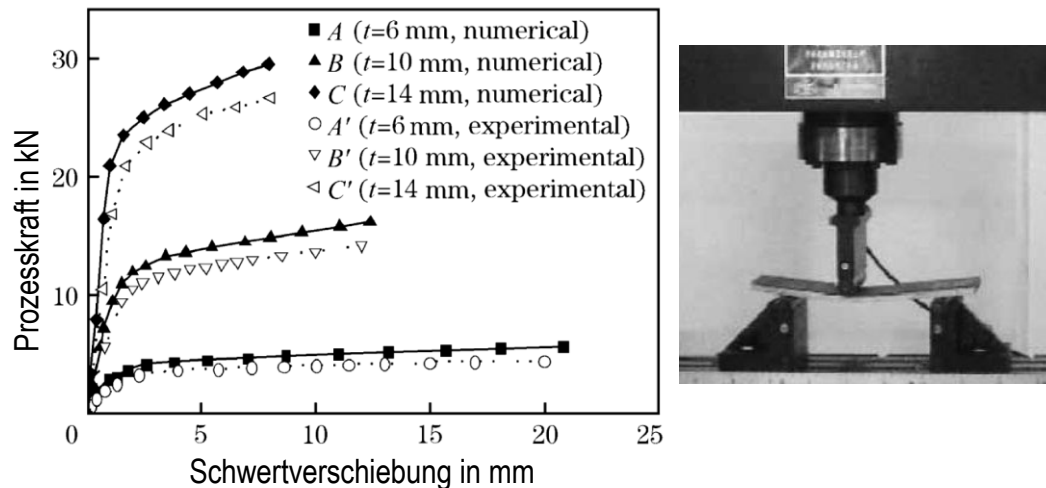


Abbildung 8: Ansatz zur Abschätzung der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung [16]

Entsprechend Abbildung 8 kann durch das beschriebene Modell die Prozesskraft bei einer geringen Blechdicke von  $t = 6 \text{ mm}$  gut prognostiziert werden. Bei höheren Blechdicken treten jedoch Abweichungen zwischen den simulierten und experimentell bestimmten Kraft-Verschiebungskurven auf.

Ein ähnlicher Ansatz wurde ebenfalls in [17] und [18] für das freie Biegen von Blechen mit Dicken  $< 5 \text{ mm}$  untersucht, wobei hierbei unterschiedliche geometrische Ansatzfunktionen zur Beschreibung des Umformverhaltens aufgestellt wurden. Bei der experimentellen Validierung wurde ebenfalls ersichtlich, dass die analytischen Ersatzmodelle aufgrund externer Störquellen und Prozessschwankungen keine zufriedenstellenden Prognoseergebnisse zur Abschätzung der elastischen Rückfederung lieferten.

Mithilfe analytischer Prognosemodelle und idealisierten Randbedingungen kann die Blechumformung beim Drei-Punkt-Biegen tendenziell prognostiziert werden. Jedoch zeigen die Ergebnisse zum einen, dass die Modellgenauigkeit bei größeren Blechdicken sinkt, und zum anderen die Modellierungsansätze nur für punktuelle Auflagerreaktionen mit geringem Kontaktoberflächenradius gültig sind.

### 2.3.2 Numerische Nachbildung der kaltplastischen Umformung mittels FEM

Neben analytischen Berechnungsansätzen zur Prognose der kaltplastischen Umformung bestehen ebenfalls Modellansätze basierend auf der numerischen Simulation mittels Finite Element Methode. Besonders in der Serienfertigung stellt die numerische Simulation eine wirtschaftliche Möglichkeit zur Entwicklung und Erprobung von neuartigen umformtechni-

schen Aufgabenstellungen dar [19]. Ein wesentlicher Bestandteil beim Aufbau von Simulationsmodellen beinhaltet die geeignete Diskretisierung des Werkstücks mithilfe geeigneter Elementformulierungen, wobei in der Umformsimulation hauptsächlich Schalen- und Volumenelemente eingesetzt werden. [20]

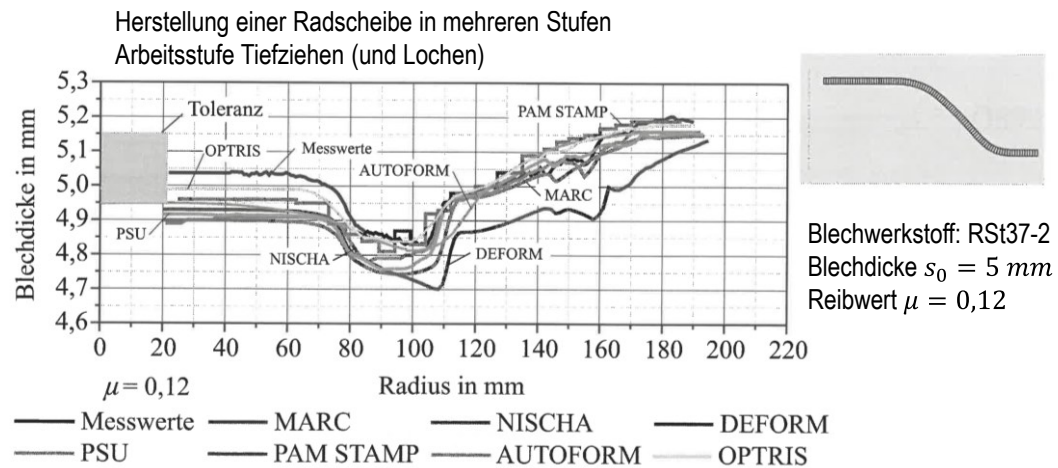
Dabei eignen sich Volumenelemente besonders für die Massivumformung mit hohen Umformgraden und großen Dicken des Ausgangswerkstoffs, da hierbei mehrachsige Spannungszustände über die gesamte Dicke abgebildet werden können. Die erforderliche hohe Modellgenauigkeit kann hierbei durch eine hohe Elementanzahl erreicht werden, jedoch steigt der dazu notwendige Rechenaufwand proportional an. [21] Eine Alternative ist daher der Einsatz von Schalenelementen, die zwar nur ebene Spannungszustände abbilden können, aber einen deutlich geringeren Rechenaufwand erfordern. Die aktuelle Entwicklung geht zudem zu kombinierten Schalenelementen, mit denen ebenfalls vereinfacht mehrachsige Spannungszustände über die Dicke abgebildet werden können. [22]

Da bei der numerischen Simulation mittels FEM somit eine direkte Abhängigkeit zwischen der angewandten Modellierungsstrategie und der erzielbaren Modellgenauigkeit besteht, werden in der folgenden Analyse ebenfalls die eingesetzten Modellierungsstrategien berücksichtigt.

Zur Charakterisierung der elastischen Rückfederung beim Tiefziehen unter Berücksichtigung des dehnungsabhängigen Elastizitätsmoduls und kinematischer Verfestigung konnte in [23] ein Simulationsmodell aufgebaut werden. Aufgrund der Spannungszustände im Blech beim Tiefziehen und der geringen Blechdicken von 1 mm wurde hierbei eine Diskretisierung des Blechs mithilfe von Schalenelementen und der Werkzeuge als Starrkörper mit Volumenelementen realisiert. Mithilfe des Simulationsmodells konnten der Einfluss des Werkstoffs und der Reibung auf das Rückfederungsverhalten beim Tiefziehen hinreichend genau dargestellt werden.

Das Tiefziehen wird nicht nur im Dünnblechbereich angewandt, sondern kann auch für die Umformung von rotationssymmetrischen Bauteilen mit größeren Blechdicken eingesetzt werden. In [24] wurde insbesondere das niederhaltelose Tiefziehen von Grobblechen mit Dicken bis 8 mm untersucht und zur Ermittlung der resultierenden Bauteileigenschaften in Relation zu Prozessparametern und geometrischen Abmessungen der Umformwerkzeuge umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden auch verschiedene Simulationsumgebungen mit unterschiedlichen numerischen Modellierungsansätzen untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für die Prognose der

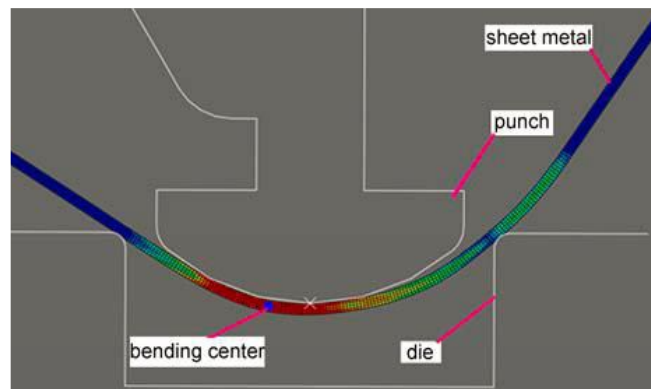
Prozessparameter und Werkstoffeigenschaften nach der Umformung bewertet. In der nachfolgenden Abbildung 9 sind die geometrischen Ergebnisse aus dem numerischen Untersuchungskomplex dargestellt.



**Abbildung 9: Gegenüberstellung verschiedener Modellierungsansätze für das niederhalterlose Umformen von Grobblechen [24]**

Zur Bewertung der Modellierungsansätze wurde der Verlauf der Blechdicke in Relation zum Radius des rotationssymmetrischen Bauteils ausgewertet und den experimentell ermittelten Messwerten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass besonders die Simulation mit DEFORM, die auf Scheibenelementen mit isoparametrischen Ansatz basiert, geringe Abweichungen von der experimentellen Blechdicke erzielt wurden. Die anderen Modellierungsansätze mit Schalen- und Volumenelementen zeigten hier eine bessere Eignung zur Prognose der Bauteileigenschaften und lagen innerhalb des definierten Toleranzbereichs.

Zur Herstellung von halbellipsenförmigen Bauteilen wird vergleichbar zum beschriebenen Verfahren ein mehrstufiges Umformverfahren basierend auf dem freien Biegen angewandt. In [25] und [26] wird daher ein numerisches Simulationsmodell auf Basis der Software Abaqus entwickelt, mit dem die Werkzeuggeometrie hinsichtlich der elastischen Rückfederung sowie zur Ableitung einer effizienten Prozesssteuerung erprobt werden kann (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Schematische Darstellung des Modellaufbaus beim freien Biegen von halbellipsenförmigen Bauteilen [25]**

Im Rahmen der Modellentwicklung wird der Umformvorgang hierbei in eine explizite Berechnung des Umformvorgangs sowie impliziter Berechnung der Rückfederung aufgeteilt. Die Kontaktoberfläche der Werkzeuge wird als starres Netz diskretisiert und ein konstanter Reibungskoeffizient von  $\mu = 0,12$  verwendet. Das elastisch-plastische Materialverhalten des eingesetzten Stahls (Strenx® 900) kann über eine experimentell bestimmte Fließkurve innerhalb des Simulationsmodells eingebunden werden. Zur geeigneten Elementformulierung des Blechs wird eine Diskretisierung durch Schalenelemente verwendet. Eine weitere Modellvereinfachung kann zudem mithilfe einer zweidimensionalen Darstellung durch Nutzung der Symmetrieeigenschaften erreicht werden. [25]

Auf Basis des entwickelten Simulationsmodells konnte die Stempelgeometrie des Umformwerkzeuges mithilfe eines closed-loop Algorithmus in [26] optimiert werden. Durch Verwendung der FEM wurden die für den iterativen Prozess des closed-loop Verfahrens notwendigen Umformungen und Rückfederung simuliert und dadurch die Kosten für umfangreiche Experimente erheblich reduziert.

Neben der Simulation des quasi-statischen Biegeprozesses kann ein ähnlicher Ansatz des Modellaufbaus auch zur numerischen Untersuchung der Kaltverfestigung bei zyklischer Biegebelastung in [27] angewandt werden. Hierzu wird ein Simulationsmodell basierend auf Schalenelementen zur Diskretisierung des Blechs entwickelt, mit dem die Faktoren des hinterlegten Verfestigungsmodell nach [28] auf Basis des experimentell ermittelten Verfestigungsverhaltens bei zyklischer Biegebelastung optimiert werden. Eine Vereinfachung des Simulationsmodells kann ebenfalls durch Nutzung der Symmetriebedingungen sowie Vereinfachung der Kontaktflächen des Biegewerkzeuges erreicht werden.

Ein weiteres Umformverfahren von Grobblechen stellt das Recken mithilfe Reckstempel und Reckmatrize zur Verminderung der Blechdicke dar, wodurch Verfestigungsmechanismen aktiviert und das Umformvermögen von Blechen gezielt gesteigert werden können [29]. In [30] wurde das Recken mithilfe eines numerischen Simulationsmodells mit der Software Simufact nachgebildet. Aufgrund der notwendigen hohen Druckspannungen beim Recken wurden hierbei Volumenelemente zur Diskretisierung des Blechs eingesetzt und anhand einer Konvergenzstudie parametrisiert. Im Rahmen der experimentellen Validierung konnte jedoch aufgrund von Messungenauigkeiten der Sensoren an der eingesetzten Umformpresse und Abweichungen der Materialeigenschaften nur eine bedingte Übereinstimmung mit der Simulation und somit kein eindeutiger Nachweis zur Eignung des Modellierungsansatzes erreicht werden. Bei der Entwicklung von Simulationsmodellen zur kaltplastischen Umformung sollte daher immer auf eine ausreichende Genauigkeit und Vergleichbarkeit bei den experimentellen Validierungsversuchen geachtet werden.

Anhand der dargestellten Modellansätze eignet sich die numerische Simulation durch FEM zur Nachbildung der kaltplastischen Umformung durch Drei-Punkt-Biegen. Jedoch besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der eingesetzten Modellierungsstrategie und der Genauigkeit der Umformprognose. Zum Erreichen einer hohen Prognosegenauigkeit wird neben passenden Materialkennwerten zudem auch ein sehr hoher Berechnungsaufwand benötigt [31]. Für die Serienproduktion von umgeformten Bauteilen kann daher mithilfe der numerischen Simulation der Umformprozess im Vergleich zu experimentellen Versuchen wirtschaftlich und hinreichend genau erprobt werden.

Bei der Prognose der kaltplastischen Blechumformung durch freies Biegen besteht hingegen das Problem, dass zur Nachbildung der einzelnen Umformschritte für die iterative Prozessplanung ein so hoher Berechnungsaufwand benötigt wird, dass eine direkte Einbindung in die Steuerungsumgebung zu einer erheblichen Verzögerung des Umformprozesses führen kann.

### **2.3.3 Empirische Modellansätze der Umformprognose**

Da die numerische Simulation aufgrund des Berechnungsaufwandes zur direkten Integration in eine automatisierte Prozesssteuerung für die Umformprognose bei kleinen Losgrößen nur bedingt geeignet ist, bestehen im Stand der Technik empirisch basierte Modellansätze zur vereinfachten Umformprognose und Prozesssteuerung.



ten der linearen Regression führen. Des Weiteren wird der vorgestellte Ansatz nur für die Umformung von dünnen Blechen kleiner  $1,52\text{ mm}$  erprobt, sodass dessen Eignung für größere Blechdicken nachgewiesen werden müsste.

Zur Verbesserung der Prognosegenauigkeit des analytischen Ansatzes beim freien Biegen aus [18] wurde in [33] ein erweiterter Ansatz entwickelt, der ein zusätzliches Modul zum maschinellen Lernen (Update-Modul) beinhaltet. Hierbei werden reale Messdaten der elastischen Rückfederung analysiert und die ermittelte Abweichung innerhalb des Moduls zum maschinellen Lernen verarbeitet. Zur Erprobung des Ansatzes wurde ein experimenteller Datensatz in zwei Untermengen unterteilt, ein Teil zum Anlernen des Update-Moduls und der andere Teil zur Untersuchung der Prognosegenauigkeit eingesetzt. Das Update-Modul basiert hierbei auf einem linearen Regressionsmodell, mit dem die Abweichung der Prognose des analytischen Modells von dem realen Umformverhalten abgeschätzt wird. Durch die Rückführung von empirisch ermittelten Daten konnte die Prognosegenauigkeit bereits mit 200 Versuchspunkten derart verbessert werden, dass für die übrigen 725 Versuchspunkte eine zufriedenstellende prozentuale Abweichung von 1,25% erreicht wurde. [33]

Der vorgestellte theoretische Ansatz zeigt, dass mithilfe von empirischen Daten und der Rückführung des realen Umformverhaltens tendenziell eine Verbesserung der Prognosegenauigkeit möglich ist, jedoch hierzu ein geeignetes Berechnungsmodell zur Abschätzung des Umformverhaltens notwendig ist.

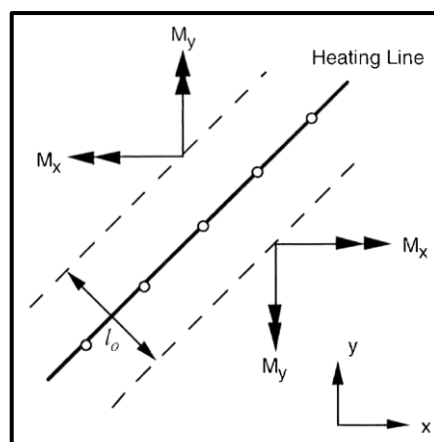
Ein weiteres Verfahren zur freien dreidimensionalen Umformung von Grobblechen stellt das Flammrichten oder auch das sog. Line-Heating dar. Obwohl es sich hierbei um ein rein thermisch basiertes Umformverfahren handelt, können wesentliche Erkenntnisse aus dem Automatisierungsprozess des rein manuell gesteuerten Umformprozesses auf das freie Biegen adaptiert werden. Zur Umformung durch Line-Heating wird das Blech mithilfe eines Autogenbrenners entlang eines definierten Pfades erhitzt. In Abhängig der Verfahrensgeschwindigkeit und der Intensität des Autogenbrenners wird eine thermische Eigenspannung entlang der Wärmeeingriffszone eingebracht.

Diese Eigenspannung wird bei Abkühlen plastisch abgebaut und führt somit zur gewünschten Verformung des Blechs entlang des definierten Pfades. [34] Es handelt sich daher wie bei der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen um ein linienförmiges Umformverfahren. Im Rahmen der Automatisierung des Umformprozesses wurden unterschiedliche

Ansätze zur Prozessplanung und automatisierten Definition der Pfade und Verfahrensgeschwindigkeit des Autogenbrenners entwickelt [35–37].

Nachdem die ersten Ansätze der numerischen Simulation aufgrund einer zu komplexen Modellierung der thermischen Spannungsinduktion für die Prognose des Umformverhaltens nicht praxistauglich sind, wird in [38] ein vereinfachter Modellierungsansatz der Umformsimulation entwickelt.

Zur Reduktion der Modellkomplexität wird das Integral der eingebrachten thermischen Biegespannung über die gesamte Wärmeeinflusszone als globale Biegemomente abgebildet (siehe Abbildung 12).

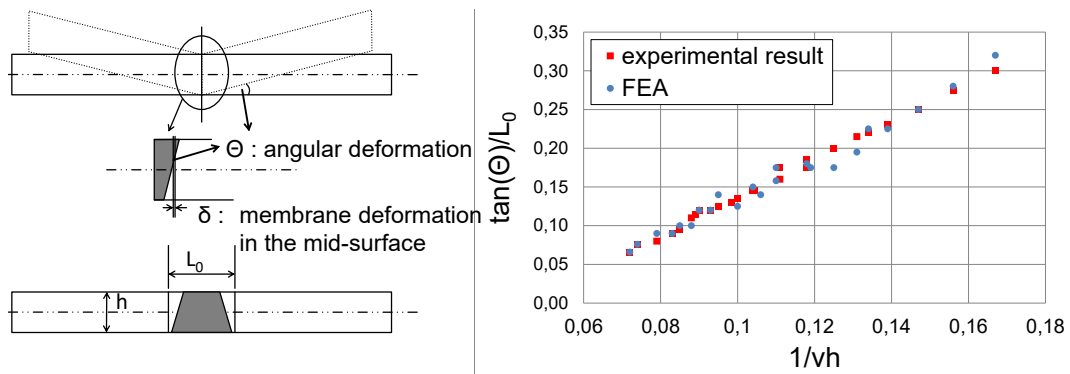


**Abbildung 12: Idealierte Darstellung der thermischen Biegeeigenspannung über globale Biegemomente [37]**

Die Modellierung des Blechs wird hierbei durch Verwendung einer rein elastischen Elementformulierung zusätzlich vereinfacht. Bei der eingesetzten Kirchhoff'schen Plattentheorie handelt es sich um eine schubstarre Platte, die daher nur idealisierte Biegenormalspannungen abbilden kann [39]. Durch die rein elastische Formulierung kann somit zum einen der Berechnungsaufwand reduziert werden und zum anderen muss das plastische Fließverhalten des Werkstoffs nicht berücksichtigt werden. Mithilfe des Lösungsansatzes kann das Line-Heating als Grundlage der Prozessplanung vor Beginn der Umformaufgabe simuliert werden.

Jedoch fallen bei komplexeren Umformaufgaben mehrere aufeinanderfolgende Prozessschritte an, sodass aufgrund des Berechnungsaufwandes der numerischen Simulation die Umformprognose erheblich verzögert. Zur Reduktion des Berechnungsaufwandes wird daher in [40] ein alternativer rechenzeitoptimierter Ansatz zur Abschätzung der lokalen Verformung und Bestimmung der Verfahrensgeschwindigkeit des Autogenbrenners entwickelt.

Der Ansatz zur Abschätzung der lokalen Verformung beim Line-Heating in Relation zur Prozessgeschwindigkeit ist in Abbildung 13 aufgeführt.



**Abbildung 13: Lokale Verformung beim Line-Heating in Relation zur Prozessgeschwindigkeit [40]**

Zur Darstellung des Verformungsverhaltens beim Line-Heating wird innerhalb des Modells die Annahme getroffen, dass das Blech durch den Abbau der thermischen Eigenspannung winkelförmig verformt wird. Im Rahmen von experimentellen Versuchen und FEM-Simulationen (FEA) konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Prozessgeschwindigkeit und der winkelförmigen Umformung ermittelt werden (siehe Abbildung 13 - rechts). Hierbei dient der Koeffizient aus dem Tangens des Verformungswinkel  $\theta$  und der Breite der Wärmeinflusszone  $L_0$  als geometrisches Maß der plastischen Verformung. Durch den Kehrwert aus Verfahrensgeschwindigkeit des Autogenbrenners  $v$  und Blechdicke  $h$  wird die spezifische Prozessgeschwindigkeit abgebildet.

Aufgrund des dargestellten linearen Zusammenhangs kann somit die notwendige Verfahrensgeschwindigkeit des Autogenbrenners für einen definierten Verformungswinkel  $\theta$  abgeschätzt werden. Über den Modellansatz zur Beschreibung der lokalen Verformung in Relation zur Prozessgeschwindigkeit konnten zufriedenstellende Umformergebnisse erzielt werden. [40]

Mithilfe der Modellansätze basierend auf empirisch bestimmten Versuchsdaten kann für die dargestellten Anwendungsbeispiele eine effiziente Umformprognose erreicht werden, die aufgrund des geringen Berechnungsaufwandes in industrielle Steuerungsumgebungen zur Prozessautomatisierung eingesetzt werden können. Die Prognosegenauigkeit kann im Fall der adaptiven Steuerung des Gesenkbiegens durch Rückführung des realen Umformverhaltens für die Serienfertigung kontinuierlich optimiert werden.

## 2.4 Entwicklungsdefizite

Anhand der beschriebenen Lösungsansätze zur Prognose von Umformprozessen können für die Entwicklung eines Prognosemodells für die kaltplastische Umformung von Grobblechen durch freies Biegen folgende Entwicklungsdefizite formuliert werden:

- Die analytische Abschätzung der Prozesskraft und der plastischen Verformung ist aufgrund des geringen Berechnungsaufwandes zur Einbindung in eine echtzeitfähige Steuerung geeignet. Die dargestellten Modelle besitzen ihre Gültigkeit jedoch nur für den Bereich zwischen zwei punktuellen Auflagern. Bei der kaltplastischen Umformung von Grobblechen stellt der gültige Umformbereich zwischen den Auflagepunkten nur einen geringen Anteil der Gesamtbreite dar, sodass bei der Prognose der Rückfederung die Gewichtskraft der anschließenden Bereiche berücksichtigt werden muss.
- Die dargestellten Ergebnisse zur analytischen Prognose der Prozesskraft zeigen, dass die Prognosegenauigkeit mit zunehmender Blechdicke sinkt. In Schiffbau und Fassadenbau werden anhand der gezeigten Anwendungsbeispiele in [41] vorwiegend Blechdicken  $t > 10 \text{ mm}$  eingesetzt, sodass die mögliche Modellgenauigkeit der vorgestellten Prognosemodelle bei mehreren Umformschritten aufgrund der Fehlerfortpflanzung für eine industrielle Anwendung unzureichend ist.
- Mithilfe von numerischen Simulationsmodellen kann die kaltplastische Umformung durch freies Biegen mit hoher Genauigkeit nachgebildet werden. Allerdings ist der erhebliche Aufwand zur Modellerstellung nur in der Serienfertigung bei gleichbleibenden Umformaufgaben mit geringen chargen- und lieferantenspezifischen Materialschwankungen wirtschaftlich vertretbar.
- Aufgrund der notwendigen Modellkomplexität der numerischen Simulationsmodelle sind die aus dem Stand der Technik und aus Voruntersuchungen bekannten Rechenzeiten eines einzelnen Umformschritts nicht für eine echtzeitnahe Steuerung geeignet. Durch Modellreduktion kann zwar die erforderliche Rechenzeit reduziert werden, allerdings wird dadurch die Modellgüte reduziert, sodass auch in diesem Fall die erreichte Prognosegenauigkeit für eine industrielle Anwendung unzureichend ist.

- Der empirisch basierte Modellansatz zur Umformprognose des Gesenkbiegens ermöglicht eine Abschätzung des Aufbiegewinkels zwischen den Auflagepunkten in Relation zur Werkzeugkonfiguration und Prozessparametern. Aufgrund der großen Spannweite industriell relevanter Blechkonfiguration beim freien Biegen ist der lineare Ansatz der multiplen Regression nicht für eine Prognose des Aufbiegewinkels geeignet.
- Die Entwicklungen aus der Automatisierung des Line-Heatings zeigen die Möglichkeit zur empirischen Modellentwicklung aus numerisch und experimentell ermittelten Versuchsdaten. Die dargestellte Linearität aus Prozessparametern und Umformergebnis kann jedoch nicht für die kaltplastische Umformung durch freies Biegen adaptiert werden.

Auf Grundlage der dargestellten Entwicklungsdefizite zeigt sich die Notwendigkeit zur Entwicklung eines Modellansatzes, mit dem die kaltplastische Umformung durch freies Biegen vereinfacht prognostiziert werden kann. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher der aus dem Stand der Technik abgeleitete Lösungsansatz vorgestellt und erläutert.

### 3. Lösungsansatz zur vereinfachten Modellierung der kaltplastischen Umformung

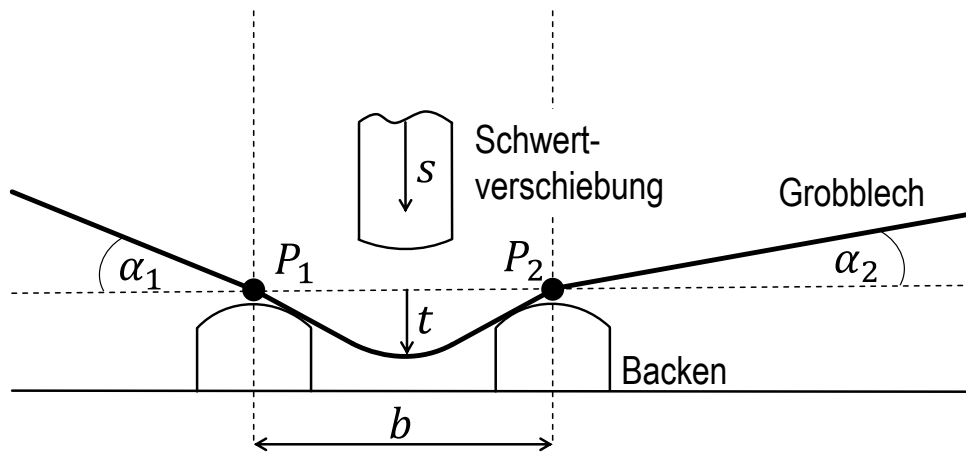
In Anlehnung an den Stand der Technik wird zur vereinfachten Modellierung der kaltplastischen Umformung ein Lösungsansatz basierend auf einem geometrischen Ersatzmodell entwickelt. Hierzu werden zunächst geometrische Größen definiert, mit denen das charakteristische Umformverhalten des Blechs vereinfacht beschrieben werden kann.

Zur Reduktion der Modellkomplexität wird das dreidimensionale Umformverhalten des Blechs zunächst in eine Abfolge zweidimensionaler Schnitte unterteilt. Diese Vereinfachung orientiert sich an der bisherigen industriellen Praxis, bei der die Schablonen zur Lichtspaltprüfung als zweidimensionaler Schnitt der Sollkontur eingesetzt werden. Entsprechend dieser Definition wird das Blech in Relation zur Blechlänge und Länge des Umformwerkzeugs in einzelne Abschnitte unterteilt, wobei die Umformung eines Blechabschnitts als ein einzelner zweidimensionaler Schnitt idealisiert dargestellt werden kann.

Im Zuge einer Analyse der Grobblechumformung durch freies Biegen können zwei wesentliche Merkmale des charakteristischen zweidimensionalen Umformverhaltens bei Durchführung eines einzelnen Umformschritts identifiziert werden:

1. Zwischen den beiden Auflagepunkten wird das Blech durch die Verschiebung des Schwertes plastisch umgeformt. Hierbei bildet sich in Abhängigkeit der Schwertverschiebung des Schwertes, des Backenabstandes und der Blechkonfiguration eine spezifische Biegelinie aus. Dieser Vorgang wird im Folgenden als lokale Umformung bezeichnet.
2. Die Lagerung des Blechs mithilfe der Krananlage führt zu einem ungehinderten Aufbiegen an den beiden Auflagepunkten. Dieser Vorgang wird als globale Umformung bezeichnet.

Zur Nachbildung des charakteristischen zweidimensionalen Umformverhaltens mithilfe eines Ersatzmodells ist in der nachfolgenden Abbildung 14 die Definition der geometrischen Modellgrößen schematisch dargestellt.

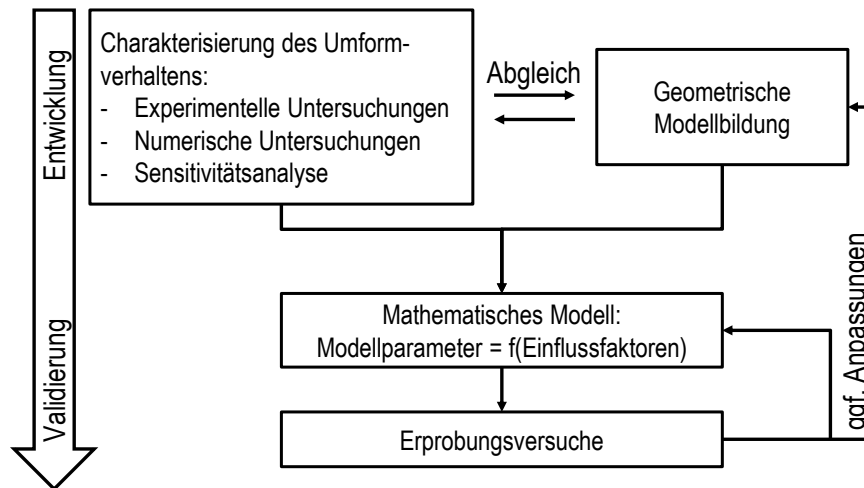


**Abbildung 14: Definition der Modellgrößen des geometrischen Ersatzmodells**

Entsprechend der Definition der Modellgrößen werden die Bereiche der lokalen und globalen Umformung an den Auflagepunkten  $P_1$  und  $P_2$  unterteilt. Der Abstand der Auflagepunkte  $b$  beschreibt somit den idealisierten Abstand zwischen den Umformbacken. Die lokale Umformung infolge der Schwertverschiebung  $s$  wird mithilfe der Tiefe der spezifischen Biegelinie  $t$  zwischen den beiden Auflagepunkten abgebildet. Im Zuge der Modellentwicklung wird eine geeignete mathematische Formulierung der Biegelinie in Abhängigkeit der Tiefe  $t$  und des Backenabstandes  $B$  hinsichtlich optimaler Abbildung des realen Umformverhaltens ermittelt.

Die globale Umformung durch Aufbiegen der angeschlossenen Bereiche wird durch zwei spezifische Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  nachgebildet. Der Drehpunkt der Aufbiegung liegt in den Auflagepunkten  $P_1$  und  $P_2$ , sodass über die gesamte Blechbreite keine Unstetigkeiten auftreten können.

Zur vollständigen Abbildung des Umformverhaltens müssen die eingeführten Modellparameter durch ein geeignetes mathematisches Modell für spezifische Umformaufgaben prognostiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher neben dem Aufbau des geometrischen Modells auch eine Entwicklung einer mathematischen Formulierung der geometrischen Modellparameter in Relation der für die Umformaufgabe relevanten Einflussfaktoren entwickelt. Der Ablauf zur Entwicklung eines vereinfachten Prognosemodells für die kaltplastische Blechumformung ist in der nachfolgenden Abbildung 15 schematisch dargestellt.



**Abbildung 15: Schematischer Ablauf zur Entwicklung eines vereinfachten Prognosemodells für die kaltplastische Blechumformung**

Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen können die quantitativen Einflüsse relevanter Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung bestimmt und das Umformverhalten beim freien Biegen charakterisiert werden. Hierzu wird ein Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung eines industriell relevanten Parameterraums der Einflussfaktoren aufgebaut und ein Versuchskomplex basierend auf der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Entsprechend der Analyse des Stands der Technik wird neben der experimentellen Untersuchung auch eine numerische Untersuchung von Blechkonfigurationen verwendet, deren experimentelle Prüfung einen zu hohen materiellen und personellen Aufwand darstellen würde. Daher wird ein geeignetes numerisches Simulationsmodell entwickelt und anhand der experimentellen Charakterisierungsversuche validiert. Mithilfe des validierten Simulationsmodells kann basierend auf der statistischen Versuchsplanung ein erweiterter numerischer Untersuchungskomplex durchgeführt werden. Die anschließende Sensitivitätsanalyse dient der quantitativen Bewertung des Einflusses der untersuchten Einflussfaktoren in Relation zu den definierten Modellgrößen. Darauf aufbauend kann das Prognosemodell mithilfe eines geometrischen Modellansatzes entwickelt und anhand der Charakterisierungsergebnisse abgeglichen werden. Neben der mathematischen Formulierung des geometrischen Ersatzmodells werden Methoden zur Detektion und Kompensation von Modellabweichungen auf Basis der optischen Vermessung entwickelt. Zusätzlich wird eine Methodik entwickelt, mit der die kaltplastische Verfestigung des Werkstoffs bei der Prognose des mehrstufigen Umformverfahrens idealisiert abgebildet werden kann.

Der aus den experimentellen und numerischen Charakterisierungsversuchen ermittelte Kennwertkatalog der Modellgrößen in Relation zu der jeweiligen Parameterkombination der Einflussfaktoren bildet nun die Grundlage zur Ableitung eines mathematischen Modells. Mithilfe des mathematischen Modells sollen die Modellgrößen für jede beliebige Kombination innerhalb des untersuchten Parameterraums abgeschätzt werden können. Aus diesem Zweck wird ein Ansatz basierend auf einem künstlichen neuronalen Netz verfolgt, das mithilfe des Kennwertkataloges trainiert werden kann.

Zur Validierung des vereinfachten Prognosemodells basierend auf dem geometrischen Ersatzmodell sowie dem mathematischen Modell zur Abschätzung der Modellgrößen wird ein experimenteller Versuchskomplex angeschlossen. Innerhalb der Validierungsversuche wird das vereinfachte Prognosemodell anhand von mehrstufigen Umformversuchen für unterschiedliche Blechkonfigurationen des industriell relevanten Parameterraums erprobt. Zur Berücksichtigung von chargenspezifischen Schwankungen entstammen die in diesem Versuchskomplex verwendeten Probenbleche derselben Charge aus den experimentellen Charakterisierungsversuchen. Neben der Prognosegenauigkeit wird ebenfalls das Verfahren zur Identifikation und Kompensation von Modellabweichungen erprobt.

Als Ergebnis des dargestellten Ablaufes kann die somit Eignung des entwickelten und validierten Prognosemodells für die industrielle Anwendung im Rahmen der Prozessautomatisierung sichergestellt werden.

## 4. Theoretische Grundlagen zur Prognose der kaltplastischen Umformung

Im folgenden Kapitel werden nun die notwendigen theoretischen Grundlagen zur Entwicklung eines Prognosemodells für die kaltplastische Umformung diskutiert. Neben den werkstofftechnischen Grundlagen und einer literaturbasierten Analyse der relevanten Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung werden auch die wesentlichen Grundlagen zur numerischen Simulation mittels FEM sowie der statistischen Versuchsplanung zur Reduktion der Probenanzahl von umfangreichen Versuchskomplexen erläutert. Abschließend wird ein Verfahren zur mathematischen Beschreibung der Modellgrößen in Relation zu den Einflussfaktoren mittels künstlicher neuronaler Netze vorgestellt.

### 4.1 Werkstofftechnische Grundlagen

Die kaltplastische Umformung von Grobblechen wird maßgeblich durch Mechanismen innerhalb der werkstofftechnischen Struktur metallischer Werkstoffe beeinflusst, daher wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die werkstofftechnischen Grundlagen der Umformung gezeigt.

#### 4.1.1 Aufbau von Metallen

Nach dem Bohr'schen Atommodell besteht jedes Atom aus einem Atomkern und einer Atomhülle. Der Atomkern besteht aus einer unterschiedlichen Anzahl Protonen und Neutronen und die Atomhülle eines ungeladenen Atoms besteht aus einer gleichen Anzahl an Elektronen, wie Protonen im Atomkern vorhanden sind [42]. Damit die Atome auf einem definierten Abstand verweilen, werden sie durch die Coulomb'sche Kraft zwischen den Elektronenhüllen abgestoßen und gleichzeitig durch entgegenwirkende Bindungskräfte zusammengehalten werden. Als relevante Bindungsarten seien die Elektronenpaarbindung, Ionenbindung, Metallbindung sowie die Restvalenzbindung zu nennen.[43]

Die Atome innerhalb eines metallischen Werkstoffs sind in einem regelmäßigen kristallinen Gitter angeordnet [44]. Die kleinste wiederkehrende Einheit in diesem Metallgitter wird Elementarzelle genannt. Bei metallischen Werkstoffen treten als Gittertypen hauptsächlich die kubisch-flächenzentrierte (kfz), kubisch-raumzentrierte (krz) sowie hexagonal-dichtestgepackte (hdp) Elementarzellen auf (siehe Abbildung 16).

Innerhalb eines Kristalls werden die Bereiche mit einheitlicher Gitterorientierung als Korn bezeichnet. Ein metallischer Werkstoff ist aus vielen Körnern mit unterschiedlichen Gitterorientierungen zusammengesetzt [45].

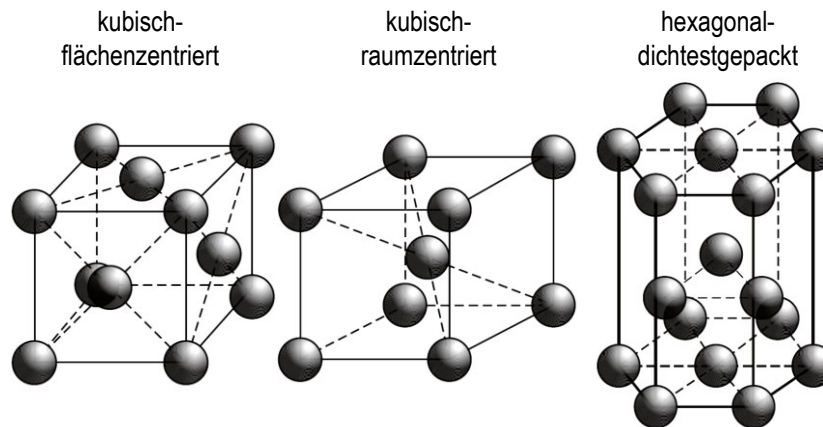


Abbildung 16: Gittertypen der Elementarzellen von metallischen Werkstoffen [46]

In Folge einer Belastung, bspw. durch Eindringen eines Umformwerkzeugs, liegt innerhalb des Gitters eine Schubspannung an, die zunächst zu einer elastischen, also reversiblen Verschiebung des Gitters führt. Bei Überschreiten der spezifischen Schubspannung werden die bestehenden Bindungen zwischen den Atomen gelöst und neue Verbindungen mit den Nachbaratomen eingegangen. Dieser Vorgang der plastischen Verformung wird auch als Versetzungsgleiten bezeichnet. In einem fehlerfrei angeordneten Idealkristall verläuft das Versetzungsgleiten entlang einer Gleitebene mit zugehöriger Gleitrichtung, auch Gleitsystem genannt. Die Gleitebenen und Richtungen ergeben sich aus den dichtest gepackten Ebenen und Richtungen in einer Elementarzelle. Die Gleitsysteme des kubisch-raumzentrierten und kubisch-flächenzentrierten Gitters sind in der nachfolgenden Abbildung 17 schematisch dargestellt. [43]

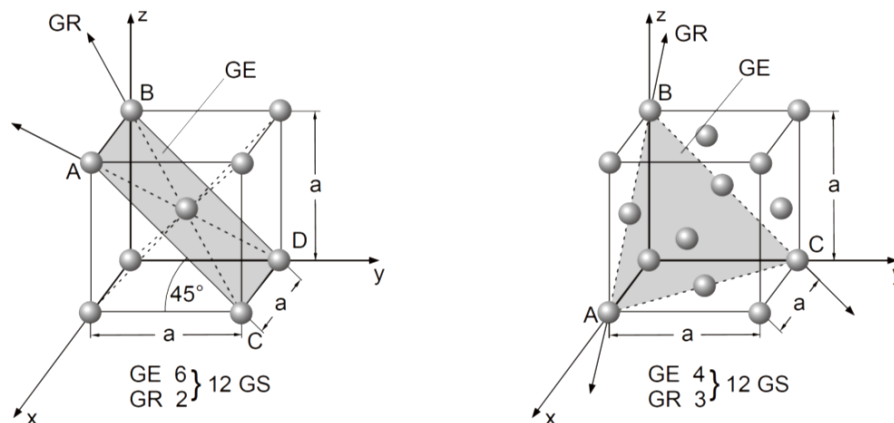


Abbildung 17: Gleitsysteme des krz- und kfz-Gitters [43]

In der Realität weicht die reale Gitterstruktur jedoch von dem idealen Gittermodell ab, indem die regelmäßige Gitterstruktur durch Baufehler unterbrochen wird. Die Gitterfehler werden hinsichtlich ihrer Dimension unterschieden [47]:

Punktfehler (nulldimensional):	Leerstellen, Zwischengitteratome, Farbzentren, Fremdatome
Linienfehler (eindimensional):	Versetzungen (stufenförmig, schraubenförmig)
Flächenfehler (zweidimensional):	Korngrenzen, Zwillingsgrenzen, Stapelfehler, Antiphasengrenzen
Räumliche Fehler (dreidimensional)	Ausscheidungen, Lunker, Risse, Einschlüsse

Für die kaltplastische Umformung sind hierbei die besonders die Linienfehler von Bedeutung. Bei Versetzungen handelt es sich um linienförmige Anordnungen von Leerstellen, die sowohl stufenförmig oder schraubenförmig innerhalb des Kristallgitters angeordnet sein können und beim Wachsen der Kristalle aus der Schmelze entstehen. Die Versetzungslinien können sich sowohl zwischen den Korngrenzen als auch als abgeschlossene Linie innerhalb des Gitters ausbilden. Bei Anlegen einer Schubspannung begünstigen die Versetzungen das Umformverhalten, da die Bindungen bereits durch die Versetzung gestreckt/gestaucht sind und somit eine geringere Schubspannung notwendig ist, um die Bindungen aufzulösen. Das Gleiten entlang des Gitters erfolgt durch Bewegung der Versetzung (siehe Abbildung 18). [43]

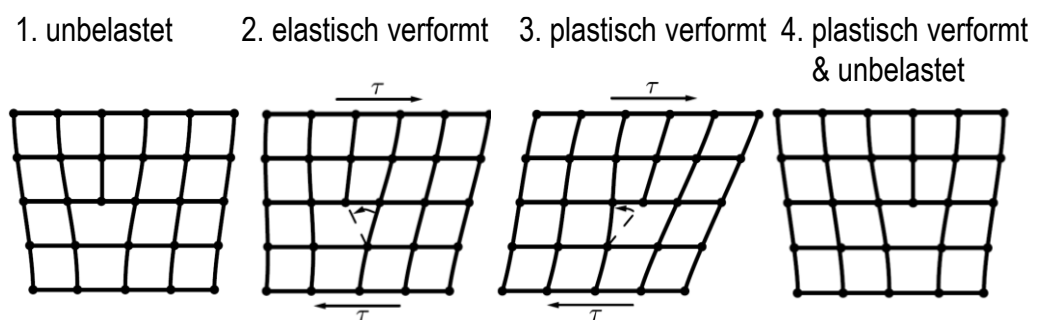


Abbildung 18: Schematische Darstellung einer Umformung durch Versetzungsbewegung [44]

Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, werden die Bindungen zwischen den Atomen bei Anlegen der Schubspannung zunächst elastisch gestreckt, bis die bereits vorbelasteten Bindungskräfte überschritten werden und die Bindungspartner gewechselt werden. Unter

Belastung des Gitters wird die Versetzungsbewegung so lange fortgesetzt, bis sie die Korngrenze erreicht hat oder durch ein Hindernis zum Stoppen kommt. [44]

Die notwendige Schubspannung zur Initiierung der Versetzungsbewegung eines Werkstoffs ist jedoch nicht konstant, sondern wird durch spezifische Verfestigungsmechanismen beeinflusst. Diese Verfestigungsmechanismen erhöhen den Widerstand einer Versetzungsbewegung und –erzeugung und bewirken so eine Festigkeitssteigerung.

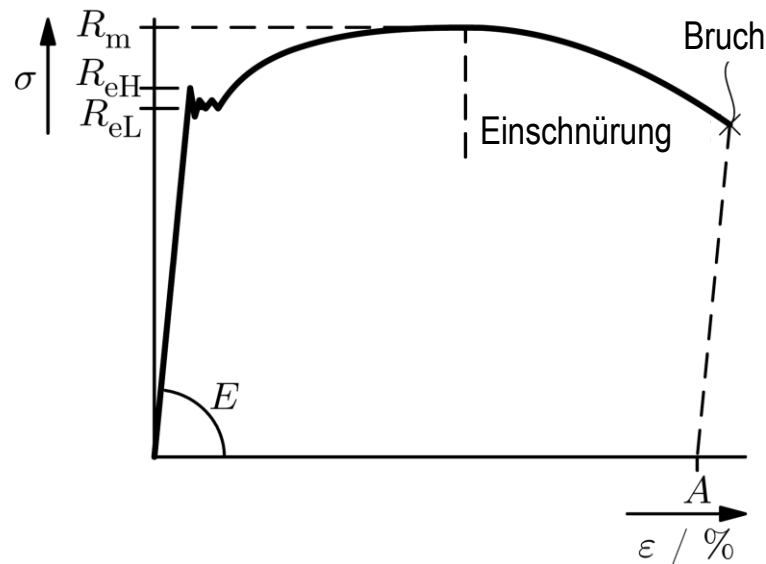
Die wesentlichen Verfestigungsmechanismen lauten nach [43]:

- Mischkristallverfestigung
- Versetzungsverfestigung
- Korngrenzenverfestigung
- Teilchenverfestigung

Während die Mischkristall-, Teilchen- und Korngrenzenverfestigung durch die werkstoffliche Zusammensetzung, den Urformprozess aus der Schmelze oder eine fertigungstechnische Wärmebehandlung hervorgerufen werden, ist die Versetzungsverfestigung bei der kaltplastischen Umformung rein von dem Umformgrad abhängig. Da die Gitterausrichtung der einzelnen Körner unterschiedlich ist, wird die Versetzungsbewegung bei der Umformung an den Korngrenzen aufgehalten. Mit zunehmendem Umformgrad wird die Versetzungsbewegung durch zuvor verschobene Versetzungen behindert. Es ist daher eine höhere Schubspannung notwendig, um die Versetzungsbewegung fortzusetzen. Der Mechanismus der Versetzungsverfestigung bewirkt somit eine Zunahme der Festigkeit bei der kaltplastischen Umformung mit höherem Umformgrad und wird daher auch als Kaltverfestigung bezeichnet.[43]

#### **4.1.2 Fließverhalten von Werkstoffen**

Der beschriebene Aufbau der Metalle beeinflusst das werkstoffspezifische Fließverhalten, das für die Prognose der kaltplastischen Umformung charakterisiert werden muss. Zur Charakterisierung des Fließverhaltens werden mechanischen Kenngrößen verwendet, die für jeden Werkstoff mithilfe von normierten Prüfverfahren ermittelt werden können [44]. In der nachfolgenden Abbildung 19 ist daher ein charakteristischer Spannungs-Dehnungsverlauf eines duktilen Werkstoffs mit ausgeprägter Streckgrenze als Ergebnis eines einachsigen dehnungsgeregelten Zugversuchs abgebildet.



**Abbildung 19: Spannungs-Dehnungsverlauf eines duktilen Werkstoffs mit ausgeprägter Streckgrenze [44]**

Entsprechend des Spannungs-Dehnungsverlaufs wird die Zugprobe bei einachsiger Belastung zunächst rein elastisch verformt, bei Erreichen der oberen Streckgrenze  $R_{eH}$  wird das Fließen des Materials initiiert und die nachfolgenden Umformungen sind irreversibel. Mit weiterer Zunahme der Dehnung steigt zunächst auch die Spannung innerhalb der Probe aufgrund der beschriebenen Mechanismen der kaltplastischen Verfestigung weiter an. Bei Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$  ist die maximal ertragbare Beanspruchung des Werkstoffs erreicht und die atomaren Bindungen können nicht mehr aufrecht gehalten werden. Die daraus resultierende Einschnürung bewirkt einen Abfall der auf die Ausgangsfläche bezogenen Normalspannung und führt bei weiterer Dehnung mit Erreichen der Bruchdehnung  $A$  zum Versagen der Zugprobe.

Bei der industriellen Anwendung der kaltplastischen Umformung besteht daher stets die Anforderung, die Streckgrenze  $R_{eH}$ , bei duktilen Werkstoffen mit ausgeprägter Streckgrenze, bzw. die Fließspannung  $k_F$ , bei Werkstoffen mit kontinuierlichem Übergang zwischen elastischen und plastischen Bereich, zum Erreichen einer plastischen Umformung zu überschreiten. Mit Kenntnis der mechanischen Kenngrößen besteht somit eine vereinfachte Möglichkeit, ein Fließkriterium für den idealisierten einachsigen Belastungsfall zu definieren.

Bei kaltplastischen Umformprozessen wird das Blech jedoch in der Regel nicht nur einachsig beansprucht, sondern es liegt eine Überlagerung von unterschiedlichen Beanspruchungsrichtungen, sodass der Eintritt des Fließens von einer Kombination aus allen Span-

nungen zusammenhängt und die Fließbedingung dementsprechend angepasst werden muss. [48]

Aus dem Grund wird zunächst die Randbedingung des inkompressiblen Werkstoffverhaltens eingeführt, sodass durch die die Umformung keine Volumenänderung des Blechs hervorgerufen werden kann [11]:

$$V_0 = V = V_1 = \text{const}$$

$V$	Volumen des Blechs	$V_0$	Volumen vor der Umformung
		$V_1$	Volumen nach der Umformung

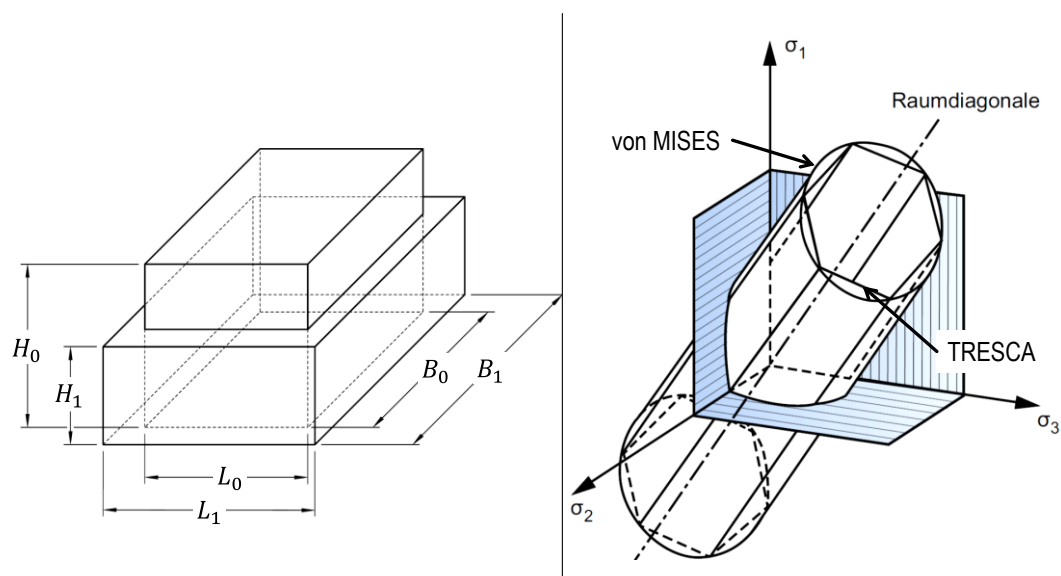
**Formel 3: Definition der Volumenkonstanz [11]**

Dies bedeutet, dass für einen prismatischen Körper mit der Breite  $B$ , Höhe  $H$  und Länge  $L$  (siehe Abbildung 20, links) die Summe der jeweiligen Umformgrade  $\varphi_i$  NULL sein muss [11]:

$$\ln \frac{B_1}{B_0} + \ln \frac{H_1}{H_0} + \ln \frac{L_1}{L_0} = \varphi_b + \varphi_h + \varphi_l = 0$$

**Formel 4: Summe der Umformgrade unter Annahme der Volumenkonstanz [11]**

Basierend auf der Annahme der Volumenkonstanz bestehen nun verschiedenste Ansätze zur Ableitung der Fließbedingung bei der Überlagerung der drei Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$ . Im Folgenden werden die bekanntesten Ansätze nach *Tresca* und von *Mises* erläutert, die in der nachfolgenden Abbildung 20 (rechts) als Fließzylinder schematisch dargestellt sind.



**Abbildung 20: Volumenkonstanz (links), Fließzylinder nach von Mises und Tresca (rechts) [11]**

Der Ansatz einer Fließbedingung nach *Tresca* stellt eine quantitative Bewertung der Hauptnormalspannungen ohne Berücksichtigung der Beanspruchungsrichtung dar. In diesem Fall wird Fließbedingung erreicht, wenn die Differenz der maximalen Hauptnormalspannung  $\sigma_{max}$  und der minimalen Hauptnormalspannung  $\sigma_{min}$  die Fließgrenze  $k_f$  überschreitet [11]:

$$k_f = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$k_f$	Fließgrenze	$\sigma_{max}$	maximale Hauptnormalspannung
		$\sigma_{min}$	minimale Hauptnormalspannung

**Formel 5: Fließbedingung nach Tresca [11]**

Aus dieser Bedingung leitet sich ein Fließzylinder mit einem Heptagon als Grundfläche aus und ermöglicht durch graphische Darstellung eine schnelle Visualisierung umformtechnischer Problemstellungen. Dazu werden die innerhalb des Blechs ausgebildeten Hauptnormalspannungen in das werkstoffspezifische Diagramm als Punkt eingetragen. Anhand der Lage des Punktes kann überprüft werden, ob das Fließkriterium für den Anwendungsfall erreicht wird. Hierbei stellt der Fließzylinder den Übergang zwischen einer rein elastischen und plastischen Umformung dar, sodass alle durch den Zylinder eingeschlossenen Punkte nur rein elastisch verformt werden. Da dieser Ansatz nicht die Richtungen der Hauptnormalspannungen berücksichtigt und an den Eckpunkten Unstetigkeiten auftreten, ist in der Umformtechnik die Fließbedingung nach *von Mises* ebenfalls stark etabliert.

Innerhalb dieses Ansatzes wird die Fließbedingung auf Basis der Vergleichsspannung nach *von Mises* abgeschätzt [11]:

$$\sigma_v = k_f = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

$\sigma_v$	Vergleichsspannung	$\sigma_1$	erste Hauptnormalspannung
$k_f$	Fließgrenze	$\sigma_2$	zweite Hauptnormalspannung
		$\sigma_3$	dritte Hauptnormalspannung

**Formel 6: Fließbedingung nach v. Mises [11]**

Entsprechend dieser Formulierung beginnt das Fließen des Werkstoffs, sobald der Betrag der Vergleichsspannung in Relation zu drei Hauptnormalspannungen die werkstoffspezifische Fließgrenze überschreitet. Im Gegensatz zur Fließbedingung nach *Tresca* wird bei diesem Ansatz ein Fließkegel mit kreisförmiger Grundfläche ausgebildet, der zudem keine

Instabilitäten aufweist. Die Wahl der geeigneten Fließbedingung bei mehrachsiger Beanspruchung obliegt stets der konkreten umformtechnischen Fragestellung, wobei der Ansatz nach *Tresca* besonders für konservative Prognosen geeignet ist.

## 4.2 Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung

Zur Untersuchung und Charakterisierung der kaltplastischen Umformung ist es erforderlich, die wesentlichen Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung auf Basis der Literatur zu identifizieren. Eine Übersicht der aus der Literatur bekannten Einflussfaktoren ist anhand eines Ishikawa-Diagramms in der nachfolgenden Abbildung 21 schematisch dargestellt.

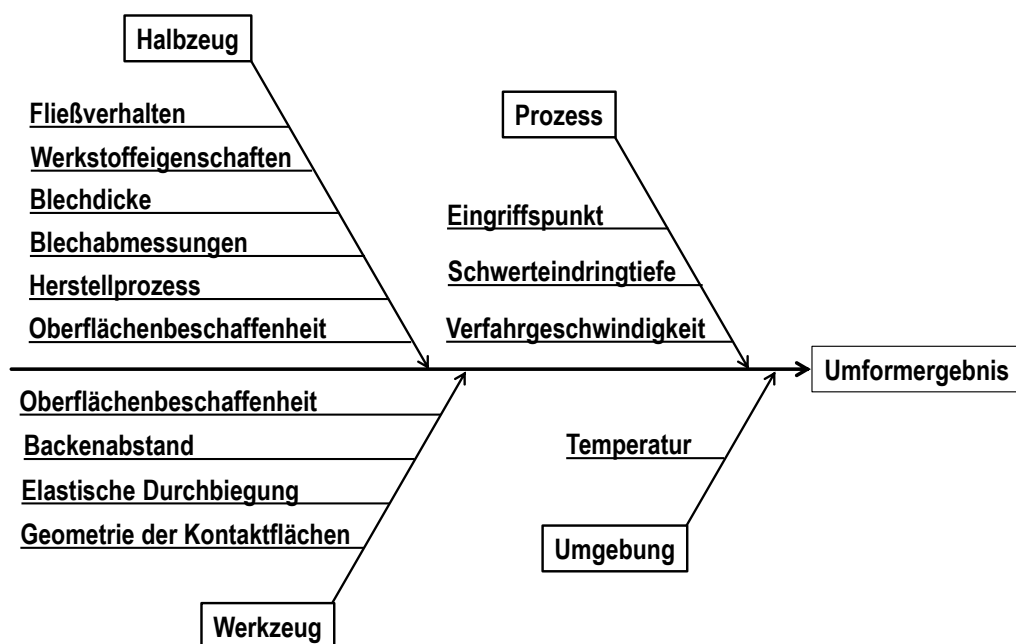


Abbildung 21: Schematische Übersicht der Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung auf das Umformergebnis

Im Folgenden werden die dargestellten Einflussfaktoren einzeln vorgestellt und hinsichtlich der Relevanz für die industrielle Anwendung des freien Biegens diskutiert.

### 1. Werkstoffspezifische Eigenschaften und Fließverhalten

Einen wesentlichen Einfluss auf das Umformverhalten haben die werkstoffspezifischen Eigenschaften und das Fließverhalten. Als relevante Größe wird hierbei die Fließspannung  $k_f$  identifiziert. Zum Erreichen einer plastischen Umformung beim freien Biegen muss die Fließspannung innerhalb des Blechs durch die Schwertverschiebung eingebrachte BiegeNormalspannung überschritten werden. Je größer die Fließspannung ausfällt,

desto größer muss auch die Biegenormalspannung zum Erreichen einer plastischen Umformung sein. [49, 50]

Dies bedeutet, dass bei konstanter Schwertverschiebung ein geringeres Umformverhalten für höherfeste Werkstoffen mit hoher Fließspannung zu erwarten ist als für weiche Werkstoffe mit geringer Fließspannung. Neben den werkstoffspezifischen Eigenschaften hat auch das Fließverhalten eine Bedeutung für das Umformverhalten beim freien Biegen. Bei sehr duktilen Werkstoffen bildet sich eine flachere Fließkurve mit geringer kaltplastischer Verfestigung als bei höherfesten Werkstoffen aus [51]. Da beim freien Biegen aufgrund der Schwertverschiebung eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Umformverhalten und dem werkstoffspezifischen Fließverhalten besteht, müssen im Rahmen einer werkstofflichen Charakterisierung neben den mechanischen Kennwerten ebenfalls das Fließverhalten charakterisiert werden. Aufgrund der Vielzahl von eingesetzten Werkstoffen mit unterschiedlichen Festigkeiten bei der industriellen Anwendung des freien Biegens, ist daher ein breites werkstoffliches Spektrum zur Quantifizierung des Einflusses zu untersuchen.

## **2. Walzrichtung des vorgelagerten Herstellprozesses**

Die beschriebenen werkstoffspezifischen Eigenschaften und das Fließverhalten werden neben der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffs, dem Urformprozess aus der Schmelze sowie zusätzlicher Wärmebehandlungen auch durch den vorgelagerten Herstellprozess verändert. Dies begründet sich daraus, dass die zur kaltplastischen Umformung eingesetzten Bleche zu Beginn des Herstellprozesses als ein gegossener Volumenkörper, der sog. Bramme, vorliegen [52]. Durch Schmiede – und Walzprozesse im warmen sowie kalten Zustand können die Grobbleche aus der Bramme umgeformt werden. Neben der Änderung der Gestalt werden infolge des Herstellprozesses mechanische Eigenspannungen längs zur Walzrichtung induziert [53]. Daraus resultiert, dass vor Beginn der Umformung das Blech längs zur Walzrichtung bereits andere mechanische Kenngrößen und ein anderes Fließverhalten aufweist, als quer zur Walzrichtung [32]. Daher muss der Einfluss des vorgelagerten Herstellprozesses im Rahmen der Charakterisierung der kaltplastischen Umformung zwingend berücksichtigt werden. Dies betrifft sowohl die werkstoffliche Charakterisierung zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Probenmaterials als auch die Charakterisierung des Umformverhaltens.

### 3. Temperatur

Die Temperatur hat entsprechend der Literatur einen entscheidenden Einfluss auf das Umformverhalten von Werkstoffen. Durch Erhöhung der Umformtemperatur über RT werden die atomaren Bindungen innerhalb der kristallinen Struktur zum Schwingen ange-regt. Dies führt zu einer Abnahme der Festigkeit und Härte, aber bewirkt ein besseres Formänderungsvermögen. Beim Absenken der Umformtemperatur unter RT werden die atomaren Bewegungen gehemmt und das Umformvermögen nimmt ab, die Festigkeit und Härte des Werkstoffs hingegen nehmen zu. [54]

Bei der industriellen Anwendung durch freies Biegen wird die Umformtemperatur nicht aktiv beeinflusst, sondern wird einzig durch die Umgebungstemperatur in der Fertigungshalle verändert. Daraus ergibt sich ein Temperaturbereich von 10 °C bis 30 °C. Da aus [55] für eine Vielzahl von Werkstoffen bekannt ist, dass das Werkstoffverhalten erst bei deutlich größeren Abweichungen von der RT signifikant beeinträchtigt wird, wird der Einfluss der Temperatur auf das Umformverhalten für diesen Anwendungsfall vernachlässigt.

### 4. Oberflächenbeschaffenheit

Ein weiterer Einfluss auf das Umformverhalten stellt die Oberflächenbeschaffenheit des Blechs dar. Bei der kaltplastischen Umformung wird die zum Fließen notwendige Beanspruchung durch den direkten Eingriff von Umformwerkzeugen hergestellt. Hierbei bilden sich Kontaktflächen zwischen Umformwerkzeug und Blech aus, worüber die notwendige Prozesskraft eingeleitet werden kann. Neben der Verfahrbewegung des Umformwerkzeugs wird die Höhe der eingeleiteten Prozesskraft im Wesentlichen von den Reibverhältnissen in der Kontaktfläche beeinflusst. Bei sehr rauen Oberflächen mit hoher Rautiefe stellen sich während des Umformvorganges sowohl plastische als auch elastische Einebnungseffekte auf Mikroebene ein. In Folge des Umformprozesses kommt es zudem zu Relativverschiebungen zwischen Blech und Umformwerkzeug tangential zur Werkzeugoberfläche. Die beschriebene Rauigkeit bewirkt hierbei eine Behinderung der Gleitbewegung zwischen Blech und Werkzeug, die zur Dissipation der kinetischen Energie und Reduktion der eingeleiteten Prozesskraft führt. Des Weiteren wird durch die Reibkraft entgegengesetzt zur Gleitrichtung die elastische Rückfederung des Blechs beeinflusst. [56]

Für kaltplastische Umformverfahren mit großen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Blech, bspw. beim Tiefziehen von Autokarosseriebauteilen, wird deshalb der Oberflächen-

beschaffenheit ein großer Stellenwert zugeschrieben und deshalb die Reibverhältnisse durch additive Schmierstoffe aktiv gesteuert. [12]

Bei der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen wird die Oberflächenbeschaffenheit durch anwendungsspezifische Faktoren wie Rostschutz, Schweißignung oder nachgelagerte Beschichtungsverfahren beeinflusst. Eine direkte Anapassung der Oberflächenbeschaffenheit zur Optimierung des Umformprozesses findet hingegen nicht statt.

Im Rahmen der Charakterisierung des Umformverhaltens ist daher die Oberflächenbeschaffenheit zwingend zu berücksichtigen und der Einfluss für industriell relevante Oberflächenzustände zu identifizieren.

## 5. Geometrische Abmessungen des Blechs

Die geometrischen Abmessungen des Blechs haben bei der kaltplastischen Umformung einen signifikanten Einfluss auf das Umformverhalten. Als geometrische Abmessungen seien die Blechdicke, Blechbreite quer zum Umformwerkzeug und Blechlänge längs zum Umformwerkzeug zu nennen. Entsprechend des im Stand der Technik vorgestellten analytischen Modells zur Abschätzung der Prozesskraft beim Gesenkbiegen nach Formel 1 wird die Höhe der Biegenormalspannung maßgeblich durch die Blechdicke beeinflusst (vgl. Kapitel 2.3.1). Eine Zunahme der Blechdicke bewirkt bei konstanter Schwertverschiebung einen proportionalen Anstieg der Biegenormalspannung innerhalb des Blechs. Dadurch resultiert eine Verschiebung des Übergangspunktes zwischen elastischem und plastischem Bereich in Richtung der neutralen Faser (vgl. Abbildung 7). Durch Vergrößerung des Bereiches der plastischen Umformung und Reduktion des elastisch umgeformten Bereiches wird das Umformergebnis nach Rückfederung maximiert. Demensprechend hat die Blechdicke nicht nur einen Einfluss auf das Umformverhalten, sondern auch auf die Wirkmechanismen der Rückfederung.[57]

Die Blechbreite hat ebenfalls einen Einfluss auf das Umformverhalten beim freien Biegen von Blechen mit großen Abmessungen. Aufgrund der Handhabung des Blechs mithilfe der Krananlage liegt das Blech nur auf den beiden Auflagepunkten auf und wird durch das Umformschwert eingeklemmt. Bei Vergrößerung der Blechbreite und konstant gehaltenem Backenabstand nimmt die Gewichtskraft infolge des Eigengewichtes zu. Bei den Lagerungsbedingungen einer Drei-Punkt-Biegung wird somit die eingebrachte Biegenormalspannung durch die zusätzliche Gewichtskraft in Form eines entgegen gerichteten Biegemomentes reduziert. [58]

Die Überlagerung von gewichtskraftinduzierten Biegemomenten tritt sowohl bei der Blechbreite als auch bei der Blechlänge längs zum Umformwerkzeug auf. Im Rahmen des Lösungsansatzes eines vereinfachten Berechnungsmodells wird jedoch ein zweidimensionaler Modellaufbau vorgesehen. Daher wird der Einfluss der Blechlänge für die Charakterisierung des Umformverhaltens vernachlässigt.

Aufgrund der beschriebenen Wirkmechanismen bei der Drei-Punkt-Biegung ist daher der Einfluss der Blechdicke und der Blechbreite im Rahmen der Charakterisierungsversuche zu untersuchen.

Die kaltplastische Umformung durch freies Biegen beinhaltet eine große Variation von unterschiedlichen Blechdicken und -breiten, sodass im Rahmen der Versuchsplanung ein großer Parameterraum zur Abbildung der industriellen Anwendung vorzusehen ist.

## **6. Horizontaler Versatz des Eingriffspunktes**

Aus dem beschriebenen Phänomen der gewichtskraftinduzierten Biegemomente infolge des Eigengewichts kann ein weiterer Einflussfaktor der kaltplastischen Umformung von Blechen mit großen Abmessungen durch Drei-Punkt-Biegen abgeleitet werden. Zur Umformung von dreidimensional gekrümmten Grobblechen werden die Eingriffspunkte zum Erreichen der Sollkontur auf dem Blech verteilt. Dementsprechend wird der Eingriffspunkt nicht immer zentrisch zur Blechbreite gesetzt, sondern es bildet sich je Prozessschritt ein horizontaler Versatz zwischen Blechmitte und Eingriffspunkt aus. Der horizontale Versatz bewirkt, dass eine asynchrone Verteilung der gewichtskraftinduzierten Biegemomente entsteht, die das Umformverhalten beeinflussen kann. Aus diesem Grund ist der horizontale Versatz des Eingriffspunktes in Relation zur Blechmitte im Rahmen der Charakterisierung des Umformverhaltens zu berücksichtigen.

## **7. Geometrische Abmessungen des Umformwerkzeugs**

Neben den geometrischen Abmessungen des Blechs haben ebenfalls die geometrischen Abmessungen des Umformwerkzeugs einen Einfluss auf das Umformverhalten. Die charakteristischen Größen sind hierbei der Abstand zwischen den unteren Auflagebacken sowie der Radius der Auflagebacken und des Umformschwertes.

Die zum Biegen notwendige Biegenormalspannung wird entsprechend Formel 1 nach [14] durch den Abstand zwischen den unteren Auflagepunkten charakterisiert. Hierbei bewirkt die Vergrößerung des Abstandes zwischen den unteren Auflagepunkten bei konstant

gehaltener Schwertverschiebung eine Reduktion des Biegemomentes und damit der eingebrachten Biegenormalspannung.

Die Radien der Auflagepunkte und des Umformschwertes beeinflussen die Größe der Kontaktflächen zwischen Umformwerkzeug und Blech. Bei Vergrößerung des Radius wird ebenfalls die Auflagerfläche und damit die Kontaktfläche vergrößert, sodass die oben genannten Einflüsse der Kontaktreibung erheblich verstärkt werden. Im Rahmen der industriellen Anwendung des freien Biegens werden jedoch die Radien konstant gehalten, da sie für die breite Variation an unterschiedlichen Umformaufgaben optimiert wurden. Für die Charakterisierung des Umformverhaltens ist daher nur der Abstand zwischen den Auflagepunkten zu berücksichtigen.

## **8. Schwertverschiebung**

Die Verschiebung des Umformschwertes stellt einen wesentlichen Bestandteil des Umformprozesses dar, da das zur Umformung notwendige Biegemoment durch Eindringen des Schwertes in das Blech hervorgerufen wird. Durch Zunahme der Schwertverschiebung werden das Biegemoment und damit die Biegenormalspannung vergrößert. [19]

Im Rahmen der industriellen Anwendung des freien Biegens wird die Schwertverschiebung zudem als wesentliche Stellgröße des Umformprozesses eingesetzt, da dies im Gegensatz zu einem kraftgeregelten Prozess aus steuerungs- und regelungstechnischer Sicht zu einer erhöhten Prozessstabilität führt. Für die Versuchsplanung der Charakterisierungsversuche ist daher die Schwertverschiebung als relevante Einflussgröße zu berücksichtigen und aufgrund des großen Stellenwertes für die Prozesssteuerung fein aufzuschlüsseln.

## **9. Verfahrensgeschwindigkeit des Umformschwertes**

Neben der Verschiebung des Werkzeuges stellt auch die Umformgeschwindigkeit bei Umformverfahren einen wesentlichen Einflussfaktor auf das Umformverhalten dar. Nach mechanischer Beanspruchung des Werkstoffs können Erholungseffekte auf mikrostruktureller Ebene einen Abbau der induzierten Eigenspannungen bewirken. Gerade bei zunehmender Umformgeschwindigkeit verringert sich das Umformvermögen, da die zur Erholung notwendige Zeit nicht gegeben ist. Neben der Umformgeschwindigkeit sind diese Erholungseffekte auch von der Umformtemperatur abhängig und vorrangig bei der Warmumformung von Bedeutung. [48]

Um den Einfluss der Umformgeschwindigkeit auch für die Anwendung des freien Biegens von Grobblechen vernachlässigen können, wird daher die Verfahrensgeschwindigkeit des

Umformschwertes innerhalb der experimentellen Charakterisierung des Umformverhaltens berücksichtigt.

Auf Basis der aus der Literatur abgeleiteten Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung können im Rahmen der Versuchsplanung der experimentellen und numerischen Versuchskomplexe geeignete Parameterräume aufgespannt werden. Die Definition der Stufen der einzelnen Faktoren sollte hierbei entsprechend der Relevanz für die industrielle Anwendung erfolgen.

### 4.3 Finite Element Methode

Zur numerischen Untersuchung der kaltplastischen Umformung mithilfe der Finite Element Methode wird im nachfolgenden Abschnitt ein kurzer Überblick über die wesentlichen Merkmale der Umformsimulation geschaffen. Für einen detaillierteren Einblick in die numerische Simulation mittels FEM wird daher auf die bestehende Grundlagenliteratur bspw. in [59], [20] und [60] verwiesen.

Die numerische Simulation mittels FEM basiert auf einer Diskretisierung von einzelnen Körpern oder zusammengesetzten Strukturen, bspw. als Umformwerkzeuge und Bauteil, in eine Vielzahl von einzelnen Elementen. Für die einzelnen Elemente wird je nach Dimension der Freiheitsgrade eine idealisierte Ansatzfunktion angenommen, die eine Verschiebung des Elementes in den Knotenpunkten erlaubt. [48]

Eine Übersicht der gängigen Elementtypen mit Zuordnung der Dimension der Freiheitsgrade ist in der nachfolgenden Abbildung 22 schematisch dargestellt.

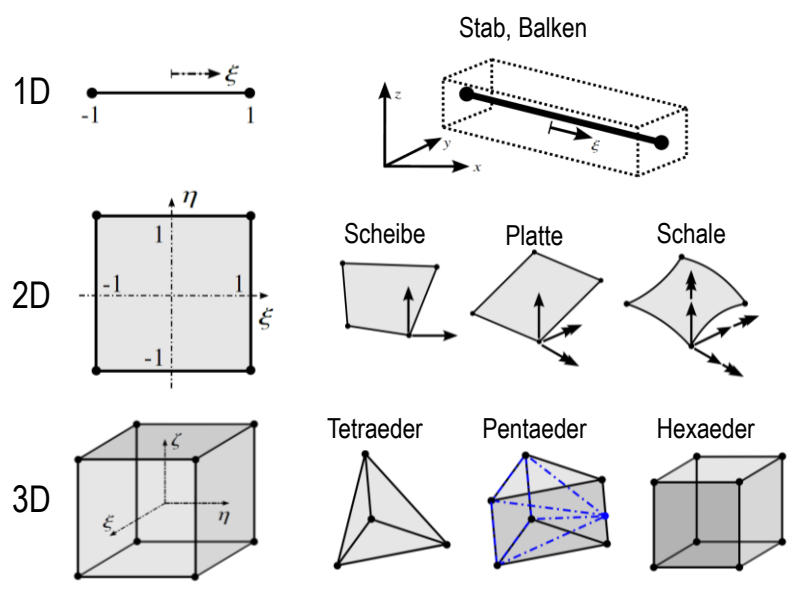


Abbildung 22: Einordnung der Elementtypen nach der Dimension der Ansatzfunktion [20]

Eindimensionale Elemente wie bspw. Stäbe oder Balken werden durch die einfachsten Ansatzfunktionen beschrieben und besitzen nur einen einzelnen Freiheitsgrad. Zur Steigerung der Komplexität bestehen Elemente mit zweidimensionalen Ansatzfunktionen. Zu nennen sind die Scheiben-, Platten- und Schalelemente. Die Scheibenelemente können an den Knotenpunkten nur Kräfte in der Ebene aufnehmen. Bei der Platte können an den Knotenpunkten Kräfte und Momente senkrecht zur Plattenoberfläche abgetragen werden. Die Schale stellt das komplexeste Element mit einer zweidimensionalen Ansatzfunktion dar, da es an vier den Knotenpunkten alle translatorischen und rotatorischen Belastungen aufnehmen kann. Hierbei kann zudem zwischen schubstarrten und schubweichen Schalelementen unterschieden werden. Dreidimensionale Elemente, wie bspw. dem Tetraeder, Pentaeder oder Hexaeder, stellen die komplexesten Diskretisierungselemente dar und können entsprechend der Dimension der Ansatzfunktion Verschiebungen des Elementes in alle drei Richtungen abbilden. Die Wahl des passenden Elementtyps obliegt stets dem konkreten Anwendungsfall und stellt meistens einen Kompromiss zwischen notwendiger Modellgenauigkeit und erforderlichen Berechnungsaufwand in Abhängigkeit der Netzfeinheit dar. [61]

Nach Diskretisierung der Körper in eine Vielzahl von Elementen bekannter Ansatzfunktionen der Verschiebung werden die dynamischen Gleichungen an den jeweiligen Knotenpunkten aufgestellt:

$$M \cdot \ddot{x}(t) + D \cdot \dot{x}(t) + K \cdot x(t) = F(t)$$

$M$     Massenmatrix     $x(t)$     Knotenpunktverschiebung

$D$     Dämpfungsmatrix     $F(t)$     Äußere Belastungen

$K$     Steifigkeitsmatrix

**Formel 7:    Differentialgleichung des dynamischen Gleichgewichts [60]**

Zur Nachbildung des dynamischen Gleichgewichts an den Knotenpunkten wird ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen in Relation zu dem Vektor der Knotenpunktverschiebungen  $x(t)$  sowie dessen ersten beiden zeitlichen Ableitungen  $\dot{x}(t)$  und  $\ddot{x}(t)$  eingesetzt. Die Trägheitseigenschaften werden hierbei durch die Massenmatrix  $M$ , die geschwindigkeitsproportionalen Dämpfungseigenschaften durch die Dämpfungsmatrix  $D$  und die Steifigkeitseigenschaften durch die Steifigkeitsmatrix  $K$  charakterisiert. Das Gleichgewicht zwischen inneren Beanspruchungen und äußerer Belastungen an den

Knotenpunkten wird durch den Vektor der an den Knotenpunkten angreifenden externen Kräfte und Momente  $F(t)$  abgebildet. [60]

Neben einer rein elastischen Verschiebung in Abhängigkeit der Steifigkeitsmatrix besteht durch den Einsatz von elastisch-plastischen Werkstoffmodellen die Möglichkeit zur Simulation von plastischen Umformprozessen. Hierbei wird das werkstoffspezifischen Verformungs- und Verfestigungsverhalten mithilfe von experimentell ermittelten Fließkurven und mechanischen Kenngrößen abgebildet [62].

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben hat die Reibung einen wesentlichen Einfluss auf den Umformprozess, sodass die Entwicklung von passenden Reibmodellen für die numerische Simulation, bspw. in [63], umfangreicher Schwerpunkt in der Forschungslandschaft darstellt und daher hier nicht weiter behandelt wird. Zur Einbindung von Reibmodellen innerhalb der Simulation werden die aufgrund der Reibung induzierten Reibkräfte in den Knotenpunkten eingeleitet und können somit innerhalb des Gleichungssystems berücksichtigt werden. Zu nennen seien hier das *Coulomb'sche* Reibmodell, das Reibzahlmodell, das Reibfaktormodell oder das Reibgesetz nach *Shaw*. [19]

Unter Annahme von zusätzlichen Randbedingungen, bspw. zur Lagerung von Knotenpunkten, Kontaktbedingungen oder Einschränkung von Bewegungsrichtungen, sowie passenden Anfangsbedingungen kann das nichtlineare Gleichungssystem durch numerische Lösungsverfahren gelöst werden. Hierbei wird zwischen expliziten und impliziten Lösungsverfahren unterschieden. Bei einer expliziten Lösung wird das Gleichungssystem ausgehend von einer Anfangsbedingung zu Beginn der Simulation durch zeitliche Integration mit konstanter Zeitschrittweite aufgelöst und kontinuierlich zu jedem Zeitschritt ausgewertet. Bei einer impliziten Lösung wird das Gleichungssystem hingegen zu einem in der Zukunft liegenden Zeitpunkt ausgewertet, an dem die Zustandsgrößen noch unbekannt sind. Dies erfolgt durch iterative Lösungsverfahren und kann je nach Anwendungsfall einen erheblichen Rechenvorteil bringen, da weniger Rechenschritte im Vergleich zu einer expliziten Auflösung notwendig sind. [61]

Als Ergebnis der numerischen Umformsimulation mittels FEM können neben den Knotenpunktverschiebungen zur geometrischen Analyse des Umformverhaltens auch Prozessparameter wie bspw. Prozesskraft-Schwerverschiebungskurven ausgewertet werden.

#### 4.4 Statistische Versuchsplanung

Das Ziel von experimentellen und numerischen Untersuchungen innerhalb der Charakterisierung der kaltplastischen Umformung ist die Analyse der für die industrielle Anwendung des feien Biegens relevanter Einflussfaktoren. Zu diesem Zweck ist eine Versuchsplanung zur Definition von repräsentativen Parameterkombinationen notwendig, anhand derer der quantitative Einfluss der Einflussfaktoren auf das Umformverhalten bei gleichzeitiger Reduktion des Probenumfangs eindeutig quantifiziert werden kann. In diesem Abschnitt wird daher ein kurzer Überblick über die statistische Versuchsplanung basierend auf linearen Modellansätzen geschaffen.

Grundlage der statistischen Versuchsplanung ist ein systemtheoretischer Ansatz, bei dem das zu untersuchende Gebilde, in diesem Fall die kaltplastische Umformung durch freies Biegen, als System mit eindeutigen Systemgrenzen definiert wird. Das System reagiert hierbei auf die Systemeingänge, die idealerweise als Einflussgrößen definiert sind, sowie Ausgangsgrößen, die auch als Ergebnisgrößen oder Qualitätsmerkmale bezeichnet werden können. Das System kann neben den Eingangsgrößen auch durch Störgrößen überlagert werden, die die Güte der Ausgangsgrößen beeinflussen. [64]

Zur Charakterisierung des Systemverhaltens, bspw. in Form einer Sensitivitätsanalyse, ist es nun notwendig, die Ausgangsgrößen für relevante Parameterausprägungen der Einflussfaktoren basierend auf einem Versuchsplan zu untersuchen. Die einfachste Form der Versuchsplanung stellt hierbei die vollfaktorielle Versuchsplanung dar, die in der nachfolgenden Abbildung 23 für das Beispiel von drei Einflussfaktoren mit je zwei Stufen graphisch dargestellt ist.

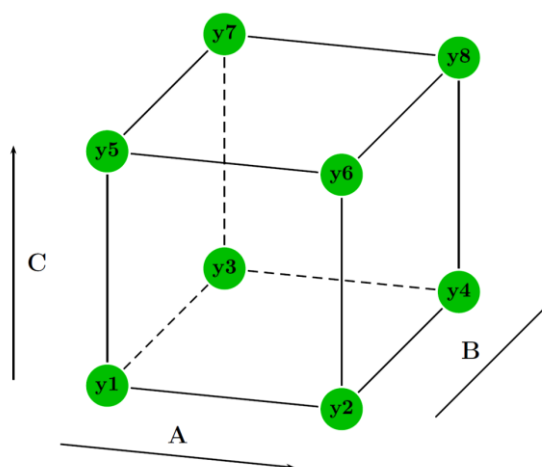


Abbildung 23: Graphische Darstellung eines vollfaktoriellen Versuchsplans bei drei Faktoren mit je zwei Stufen [64]

Bei einer vollfaktoriellen Versuchsplanung werden alle Stufen der Faktoren untereinander kombiniert, sodass sich eine Gesamtanzahl der Einzelversuche ergibt:

$$n_r = n_l^{n_f}$$

$$n_r \quad \text{Versuchszahl} \quad n_l \quad \text{Anzahl Stufen}$$

$$n_f \quad \text{Anzahl der Faktoren}$$

**Formel 8: Versuchszahl bei einer vollfaktoriellen Versuchsplanung [64]**

Die vollfaktorielle Versuchsplanung ermöglicht es, ein System sehr exakt zu charakterisieren, jedoch erfordert es besonders bei einer großen Anzahl an Einflussfaktoren eine exponentielle Zunahme der Versuchszahl. Dies stellt gerade bei großen zu untersuchenden Parameterräumen einen hohen wirtschaftlichen Aufwand dar, der durch idealisierte mathematische Ansätze innerhalb einer statistischen Versuchsplanung reduziert werden kann. Ein möglicher Ansatz ist hierbei die D-optimale Versuchsplanung, bei der die Anzahl der Versuche rein auf einem linearen mathematischen Modell basiert und neben den direkten Abhängigkeiten ebenfalls Wechselwirkungen abbilden kann. Die minimale Versuchszahl berechnet sich entsprechend:

$$n_r = p_f + \acute{p} + 1 \quad \text{mit} \quad \acute{p} = p_f \cdot \frac{p_f - 1}{2}$$

$$n_r \quad \text{Versuchszahl} \quad p_f \quad \text{Anzahl der Faktoren}$$

$$\acute{p} \quad \text{Anzahl der Wechselwirkungen}$$

**Formel 9: Versuchszahl bei einer D-Optimalen Versuchsplanung mit Wechselwirkung [65]**

Die ermittelte Versuchszahl beschreibt das absolute Minimum des Versuchsumfangs und berücksichtigt keinerlei Störgrößen. Aus diesem Grund sollte die statistische Sicherheit durch Hinzufügen von Zusatzversuchen und Wiederholungen je Einzelversuch gestützt werden. Die Identifikation der repräsentativen Parameterkombinationen erfolgt basierend auf den Parameterkombinationen eines vollfaktoriellen Versuchsplans. Hierbei wird eine optimale Verteilung der Parameterausprägung innerhalb des Parameterraums bei gleichzeitiger Maximierung der Determinante  $Det(X^T X)$  sowie Minimierung der Korrelationen und Vertrauensbereiche angestrebt. [65]

Zur statistischen Versuchsplanung werden daher meist gesonderte Softwareumgebungen, wie bspw. *Visual-XSel* der Fa. *CRGRAPH (GbR)*, eingesetzt, mit denen die Identifikation der repräsentativen Parameterkombinationen gesondert durchgeführt werden kann.

Zur Beschreibung des Systemverhaltens werden zunächst die Ausgangsgrößen des Systems für die aus der Versuchsplanung stammenden Parameterkombinationen der Eingangsgrößen, bspw. durch Durchführung eines Versuchskomplexes, bestimmt.

Grundlage zur Beschreibung des Systemverhaltens bildet nun ein mathematisches Modell, das exemplarisch für einen linearen Modellansatz von drei Einflussfaktoren mit Wechselwirkungen lautet:

$$Y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_{12}x_1x_2 + c_{13}x_1x_3 + c_{23}x_2x_3 + \epsilon_{abw}$$

$Y$	Zielgröße	$x_i$	Faktoren
$c_i$	Modellkonstanten	$\epsilon_{abw}$	Modellabweichung

**Formel 10: Lineares Modell zur Beschreibung des Systemverhaltens [64]**

Die Parameteridentifikation der Modellkonstanten  $c_i$  sowie der Modellabweichung  $\epsilon_{abw}$  kann mithilfe von Näherungsverfahren wie der Multiplen Regression (MR) oder Partial Least Squares (PLS) durchgeführt werden [64]. Auf eine genauere Beschreibung der Näherungsverfahren wird innerhalb dieses Abschnitts verzichtet und auf die referenzierte Literatur verwiesen.

Anhand der identifizierten Parameter des linearen Modells können die wesentlichen quantitativen Einflüsse der Einflussfaktoren charakterisiert werden. Dies bedeutet, dass die Höhe des Koeffizienten eines Einflussfaktors ebenfalls auch dem quantitativen Einfluss auf die Zielgröße entspricht. Dieser Zusammenhang ist jedoch nur innerhalb der definierten Systemgrenzen gültig und daher bei der Festlegung der Stufen der Einflussfaktoren innerhalb der Definition des zu untersuchenden Parameterraums zwingend zu berücksichtigen.

Basierend auf der statistischen Versuchsplanung und dem Einsatz von vereinfachten mathematischen Modellen ist es nun möglich, die Sensitivität der Einflussfaktoren bei der kaltplastischen Umformung bei gleichzeitiger Minimierung des Versuchsaufwandes hinreichend genau zu analysieren.

#### 4.5 Parameterprädiktion mithilfe eines künstlichen neuronalen Netzes

Innerhalb eines Modells zur vereinfachten Prognose der kaltplastischen Umformung ist es notwendig, die geometrischen Modellparameter in Relation zu den zuvor identifizierten Einflussfaktoren für jeden Umformschritt zu bestimmen. Wie bereits in [64] beschrieben, ist die multiple Regression generell dazu geeignet, die Ergebnisgrößen eines charakterisierten System für beliebige Eingangsgrößen eines abgeschlossenen Parameterraums abzuschätzen. Hierbei ergibt sich die Einschränkung, dass die identifizierten Parameter der mathematischen Regressionsmodelle nur für den definierten Parameterraum gültig sind. Bei exponentiellen Abhängigkeiten zwischen Ergebnis- und Eingangsgrößen werden aufgrund der guten Abbildungsmöglichkeit kubische Modellansätze eingesetzt, die bei Erweiterung der Eingangsgrößen außerhalb des definierten zu erheblichen Instabilitäten führen kann. [66]

Da bei der industriellen Anwendung der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen eine Vielzahl von unterschiedlichen Umformaufgaben und Sollgeometrien durch die automatisierte Prozesssteuerung umgesetzt werden müssen, sind vereinzelte Extrapolationen der Eingangsgrößen außerhalb des Parameterraums möglich. Die Komplexität des mathematischen Modellansatzes zur Abschätzung der Modellparameter muss daher ausreichend genug sein, dass auch bei geringfügigen Extrapolationen der Eingangsgrößen stabile Prognosen möglich sind.

Aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen, wie bspw. dem Vollstanznieten [67], der Blechumformung [68] oder dem feien Biegen [69] ist die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen zur Abschätzung von Ergebnisgrößen bekannt. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls der Einsatz eines künstlichen neuronalen Netzes erprobt, dessen theoretische Grundlagen im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden.

Der Aufbau eines künstlichen neuronalen Netzes basiert wie bei vielen ingenieurspezifischen Lösungsansätzen der Bionik auf der Übertragung eines biologischen Lösungsansatzes auf ein technisches Problem. Das biologische Vorbild zur Bestimmung von Ausgangsgrößen eines Systems in Relation zu Eingangsgrößen stellt bei den künstlichen neuronalen Netzen das menschliche Gehirn selbst dar. Aus diesem Grund ist in der nachfolgenden Abbildung 24 das biologische Modell einer menschlichen Gehirnzelle abgebildet.

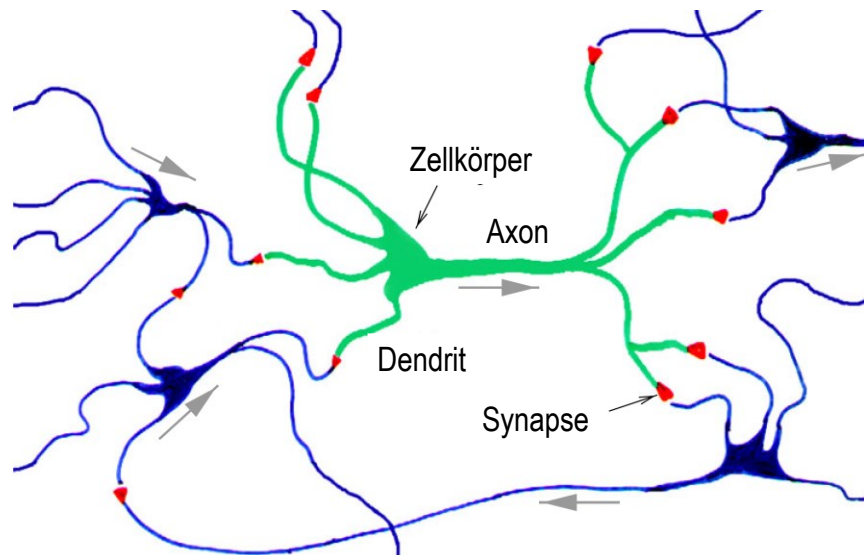


Abbildung 24: Biologisches Modell einer menschlichen Gehirnzelle [70]

Das menschliche Gehirn besteht aus einer großen Anzahl einzelner Gehirnzellen, den Neuronen. Hierbei besitzt jedes einzelne Neuron neben dem eigentlichen Zellkörper auch ein Axon. Das Axon kann über die Dendriten lokale Verbindungen zu den vorgelagerten Neuronen herstellen und über die Synapsen an die nachgelagerten Neuronen weitergeben. Bei einem Entscheidungsprozess bspw. Erfassung von optischen oder taktilen Reizen, liegt ein Impuls an den Dendriten in Form einer kleinen elektrischen Spannungsspitze an, sodass das Neuron die Funktion eines elektrischen Speichers vergleichbar mit einem elektrischen Kondensator übernimmt. Die Weitergabe des Impulses erfolgt über die Synapsen, die einen kleinen Spalt zwischen dem Axon und dem nachgelagerten Neuron besitzen und mit einer ionisierbaren Flüssigkeit, den sog. Neurotransmittern, gefüllt ist. Die Leitfähigkeit einer Synapse hängt neben der physischen Ausbildung auch von zusätzlichen Faktoren, wie bspw. der Konzentrationsfähigkeit, ab. Sobald der elektrische Impuls innerhalb des Neurons einen Schwellwert überschreitet, wird dieser an die nachfolgenden Neuronen weitergegeben, in denen derselbe Aktivierungsprozess durchgeführt wird. Durch die Vernetzung der einzelnen Neuronen zu einem Netz können so komplexe Entscheidungsprozesse getroffen werden und die Reize in Form von elektrischen Impulsen verarbeitet werden. Hierbei besteht die Besonderheit, dass im Laufe des Lebens der Aufbau der Neuronen und ihre Verbindungen nicht konstant bleiben, sondern die Form und Struktur basierend auf Erfahrungen kontinuierlich adaptiv anpasst wird. [70]

Um diesen biologischen Aufbau in eine technische und objektive Form zu überführen werden die Gehirnzellen als künstliche Neuronen mathematisch abgebildet.

Ein künstliches Neuron  $j$  ist definiert als eine Summenfunktion zur Bestimmung eines Nettoeingabewertes von gewichteten Eingangssignalen:

$$net_j = \sum_{i=1}^{n_E} w_{ij} \cdot o_i$$

$j$	Neuron	$n_E$	Anzahl der Eingänge
$net_j$	Nettoeingabewert	$o_i$	Eingabesignale
		$w_{ij}$	Gewichtungsfaktor

**Formel 11: Summenfunktion eines künstlichen Neurons [71]**

Durch den Nettoeingabewert  $net_j$  werden alle Eingänge am Neuron gebündelt, wobei mithilfe der Gewichtungsfaktoren  $w_{ij}$  eine individuelle Gewichtung jedes einzelnen Eingangs möglich ist. Die Entscheidung zur Weitergabe des Impulses an das nachfolgende Neuron erfolgt mithilfe von Schwellenfunktionen  $a_j(net_j)$ .

Der einfachste Fall dieser Schwellenfunktion auf Basis eines sprunghaften Schaltungsverhaltens lautet:

$$a_j(net_j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } net_j > \Theta_j \\ 0 & \end{cases}$$

$a_j(net_j)$	Schwellenfunktion	$\Theta_j$	Schwellwert
--------------	-------------------	------------	-------------

**Formel 12: Einfachste Form einer Schwellenfunktion [71]**

Bei einem sprunghaften Schaltungsverhalten wird das jeweilige Neuron geschaltet, sobald der spezifische Schwellenwert überschritten wird.

Die Vernetzung der einzelnen Neuronen zu einem künstlichen neuronalen Netz erfolgt nun entsprechend einer für den Anwendungsfall optimalen Netztopologie und besteht aus der Eingabeschicht mit den Eingangsgrößen als Eingang, einer verdeckten Schicht und der Ausgabeschicht zur Berechnung der Ausgangsgrößen. Je nach gewünschter Komplexität des zu beschreibenden Systems können in der verdeckten Schicht eine beliebige Anzahl von Neuronen hintereinander verschaltet werden. [71]

Zur vollständigen Funktion des künstlichen neuronalen Netzes ist es notwendig, dass entsprechend der definierten Netztopologie die Parameter für die einzelnen Gewichtungsfaktoren und Schwellenwerte für jedes einzelne künstliche Neuron im Rahmen eines Trainings identifiziert werden müssen. Zum Training des künstlichen neuronalen Netzes

werden Trainingsdaten verwendet, die analog zu dem bereits vorgestellten Verfahren der multiplen Regression aus einer repräsentativen Auswahl von Ausgangsgrößen in Relation zu den Eingangsgrößen des Systems bestehen. Bei den gängigen Trainingsmethoden, z. Bsp. *Levenberg-Marquardt*, *Quasi-Newton*, *Scaled Conjugate Gradient*, oder *Backpropagation*, werden basierend auf iterativen Lösungsverfahren die optimalen Modellparameter zur besten Nachbildung der Trainingsdaten bestimmt. [72]

Demensprechend haben neben der Topologie des Netzaufbaus, auch die Güte und Verteilung der Trainingsdaten einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit des künstlichen neuronalen Netzes. Zur Auswahl von repräsentativen Parameterkombinationen ist daher auf eine optimale Verteilung der einzelnen Parameterausprägungen zu achten, um eine gleichmäßig verteilte Gewichtung innerhalb des Parameterraums zu gewährleisten.

Aufbauend auf den vorgestellten theoretischen Grundlagen zu künstlichen neuronalen Netzen kann im weiteren Verlauf dieser Arbeit ihre Eignung zur Abschätzung der geometrischen Modellparameter erprobt werden. Aufgrund der hohen Relevanz der zum Training eingesetzten Datensätze hinsichtlich der erreichbaren Modellgenauigkeit es jedoch erforderlich, die industrielle Anwendung der kaltplastischen Umformung im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse im nachfolgenden Kapitel zu charakterisieren.

## 5. Charakterisierung der kaltplastischen Umformung

Wesentlicher Bestandteil der nachfolgenden Charakterisierung der kaltplastischen Umformung ist die gezielte Untersuchung relevanter Einflussfaktoren der Grobblechumformung hinsichtlich ihres quantitativen Einflusses auf das Umformverhalten. Aus diesem Grund wird zunächst das Probenmaterial hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sowie der Oberflächenbeschaffenheit charakterisiert. Basierend auf einem experimentellen und einem numerischen Untersuchungskomplex können die charakteristischen Einflussgrößen beim freien Biegen definiert werden und bilden somit die Grundlage für die nachfolgenden Abschnitte zur Entwicklung und Erprobung des vereinfachten Prognosemodells.

### 5.1 Charakterisierung des Probenmaterials

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Probenmaterial zur Charakterisierung des Umformverhaltens und Erprobung des vereinfachten Prognosemodells wurde zum Erreichen der höchstmöglichen Genauigkeit und Reduktion von chargenspezifischen Einflüssen zeitgleich von demselben Lieferanten bezogen.

#### 5.1.1 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Probenmaterials zur Ableitung der werkstofftechnischen Kenngrößen basiert auf einem normierten quasistatischen Zugversuch nach [73]. Dieses Vorgehen beruht auf der Annahme, dass bei einer idealisierten Drei-Punkt-Biegung hauptsächliche Biegenormalspannungen innerhalb des Blechs vorliegen, die über den einen ein-achsigen Zugversuch abgebildet werden können [10]. Zur Berücksichtigung einer möglichst großen Spannweite der zu untersuchenden Werkstoffe werden drei unterschiedliche Stahltypen untersucht. Es handelt sich hierbei um warmgewalzte unlegierte Baustähle des Typs S235JR, S355JR nach [74] und S460N nach [75], die aufgrund ihrer Schweißeignung besonders im Stahl- und Schiffbau eingesetzt werden. Die Proben werden hierzu entsprechend des in Kapitel 4.2 beschriebenen Einflusses der Walzrichtung quer und längs zur Walzrichtung aus 10 mm dicken Grobblechen entnommen. Als Probengeometrie werden normierte Flachzugproben der Form E mit den Abmessungen 10 mm x 33 mm x 90 mm in Referenz zu [76] vorgesehen.

Die Zugversuche werden nach [73] an einer kalibrierten Prüfmaschine des Typs Z400E der Fa. ZwickRoell GmbH & Co. KG mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit über die parallele Länge von  $\dot{\epsilon}_{LC} = 0,0067 \frac{1}{s}$  durchgeführt. Die Versuchsmatrix sowie die charakteristi-

schen mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Zur vollständigen Übersicht der Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen wird zusätzlich auf den Anhang verwiesen.

Tabelle 1: Mechanischen Eigenschaften des Probenmaterials

Probennummer	Werkstoff	Walzrichtung	Anzahl	Zugfestigkeit $R_m$ in $\frac{N}{mm^2}$	Fließspannung $k_F$ in $\frac{N}{mm^2}$
1	S 235 JR	quer	7	430	290,5
2	S 235 JR	längs	7	432	296,9
3	S 355 JR	quer	7	548	404,6
4	S 355 JR	längs	7	547	416,8
5	S 460 N	quer	7	610	491,2
6	S 460 N	längs	7	610	491,8

Der in der Literatur beschriebene Einfluss der Walzrichtung kann ebenfalls anhand der Fließspannung  $k_F$  identifiziert werden. Die Proben mit Entnahme längs zur Walzrichtung weisen eine geringfügig höhere Fließspannung als quer zur Walzrichtung auf. Dies lässt sich aus dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Einfluss des Herstellprozesses begründen, der bei den hier untersuchten Blechdicken einen geringeren Einfluss hat als in der Literatur für Dünnbleche beschrieben. Daher ist davon auszugehen, dass im Herstellprozess der Grobbleche ein geringerer Bearbeitungsaufwand notwendig ist und dementsprechend auch eine geringere Verfestigung des Werkstoffs in Walzrichtung erreicht wird. Die Zugfestigkeit ist hingegen unabhängig von der Walzrichtung und entspricht den laut Normierung vorgeschriebenen Mindestanforderungen.

Für die nachfolgenden numerischen Untersuchungen mittels FEM werden zusätzlich Fließkurven zur Beschreibung des werkstoffspezifischen Fließverhaltens eingesetzt. Die auf den Ausgangsquerschnitt bezogenen Spannungs-Dehnungskurven werden daher hinsichtlich der wahren Spannung und wahren Dehnung umgewandelt und mithilfe eines Extrapolationsansatzes für höhere Umformgrade extrapoliert. Zur Extrapolation wird ein exponentieller Ansatz nach Hockett-Sherby verwendet, da durch den Ansatz eine gute Abbildung des experimentell ermittelten Fließverhaltens bis zum Probenversagen erreicht werden kann [77]. Die mithilfe der Extrapolation ermittelten Fließkurven sind in der nachfolgenden Abbildung 25 dargestellt.

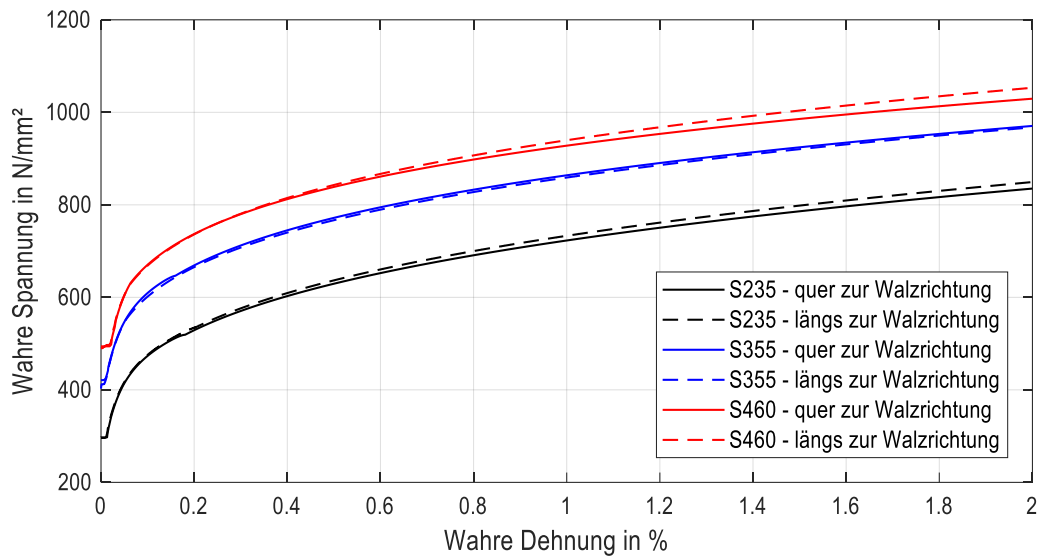


Abbildung 25: Ermittlung von Fließkurven für die numerische Simulation

Entsprechend der abgebildeten Verläufe ist auch bei dem resultierenden Fließverhalten ein Einfluss der Walzrichtung zu erkennen, wobei die Fließkurven der Proben längs zur Walzrichtung leicht höher ausfallen als quer zur Walzrichtung.

Die extrapolierten Fließkurven können im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Erstellung der für die numerische Simulation notwendigen Materialkarten eingesetzt werden.

### 5.1.2 Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit

Neben den mechanischen Eigenschaften stellt die Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit ein wesentliches Merkmal der Charakterisierung des Probenmaterials dar. Dies begründet sich aus dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Einflusses der Reibverhältnisse in den Kontaktflächen. Eine direkte Ermittlung des Haftreibungskoeffizienten  $\mu$  zwischen Umformwerkzeug und Blech, bspw. zur Parametrierung eines Coulomb'schen Reibmodells, ist nur über einen komplexen Versuchsaufbau wie den Streifenziehversuch möglich und wird daher hauptsächlich für die Ermittlung von Kennwerten für die Serienfertigung eingesetzt [78]. Da bei der Umformung von Grobblechen mit kleinen Losgrößen erhebliche Schwankungen der Oberflächenbeschaffenheiten zu erwarten sind, wird im Rahmen dieser Arbeit eine vereinfachte Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit über geometrische Kenngrößen nach [79] durchgeführt. Zur Messung der gemittelten Rautiefe  $R_z$  als Kenngröße der Rauigkeit wird ein Tastschnittverfahren mithilfe des Rauheitsmessgerätes HOMMEL-ETAMIC W10 der Fa. PCE Deutschland GmbH nach [80] eingesetzt.

Der Versuchsplan zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit ist in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Versuchsplan zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit

Kategorie	Ausprägung		
	Gestrahlt	Primer- beschichtung	Verzundert
Oberflächenzustände	Gestrahlt	Primer- beschichtung	Verzundert
Anzahl Konfigurationen	7	7	9
Probenanzahl je Konfiguration	4		
Messpunkte je Blech	6		
Einzelmessstrecke $l_r$	8 mm		
Messstrecke $l_N$	40 mm		
Taststrecke $l_t$	48 mm		

Entsprechend der industriellen Relevanz werden innerhalb des Versuchskomplexes drei unterschiedliche Oberflächenzustände untersucht. Die Anzahl der jeweiligen Konfigurationen basiert hierbei auf einer statistischen Versuchsplanung, auf die im nachfolgenden Abschnitt genauer eingegangen wird. In der nachfolgenden Abbildung 26 sind die Ergebnisse der gemittelten Rautiefe  $R_z$  aufgeführt.

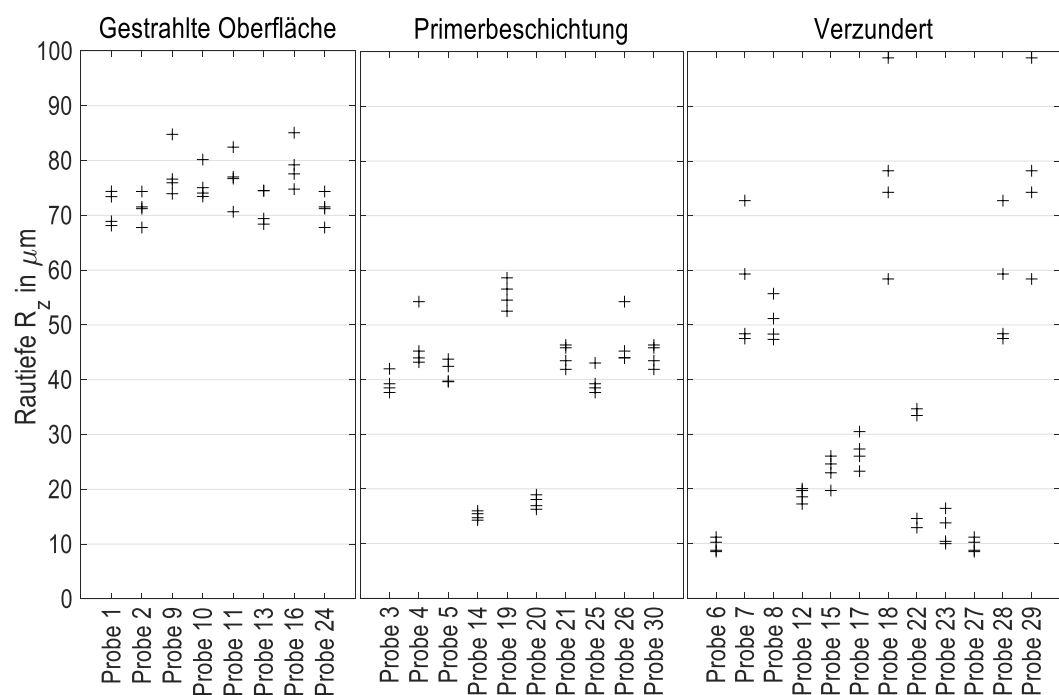


Abbildung 26: Bestimmung der gemittelten Rautiefe  $R_z$  des Probenmaterials

Die Einzelergebnisse der gemittelten Rautiefe  $R_z$  zeigen, dass beim vorhandenen Probenmaterial erhebliche Streuungen in der Oberflächenbeschaffenheit vorhanden sind. Hierbei weist die gestrahlte Oberfläche die geringste Streubreite von ca.  $20 \mu\text{m}$  auf, während bei der verzünderten Oberfläche eine Streubreite von ca.  $90 \mu\text{m}$  zu erkennen ist. Hierbei ist die Streuung sowohl von der Blechkonfiguration als auch von der Messposition auf dem Blech abhängig.

Als Fazit der Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit ist daher eine direkte quantitative Beschreibung der gemittelten Rautiefe  $R_z$  innerhalb der Modellentwicklung aufgrund der großen Streuung der Einzelmessungen als nicht zielführend anzusehen. Dennoch ist zu untersuchen, ob die unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten einen Einfluss auf Einebnungseffekte an den Auflagerpunkten sowie auf die beim freien Biegen erwartbaren geringen Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug haben. Daher wird die Oberflächenbeschaffenheit im weiteren Verlauf dieser Arbeit als kategorischer Faktor berücksichtigt.

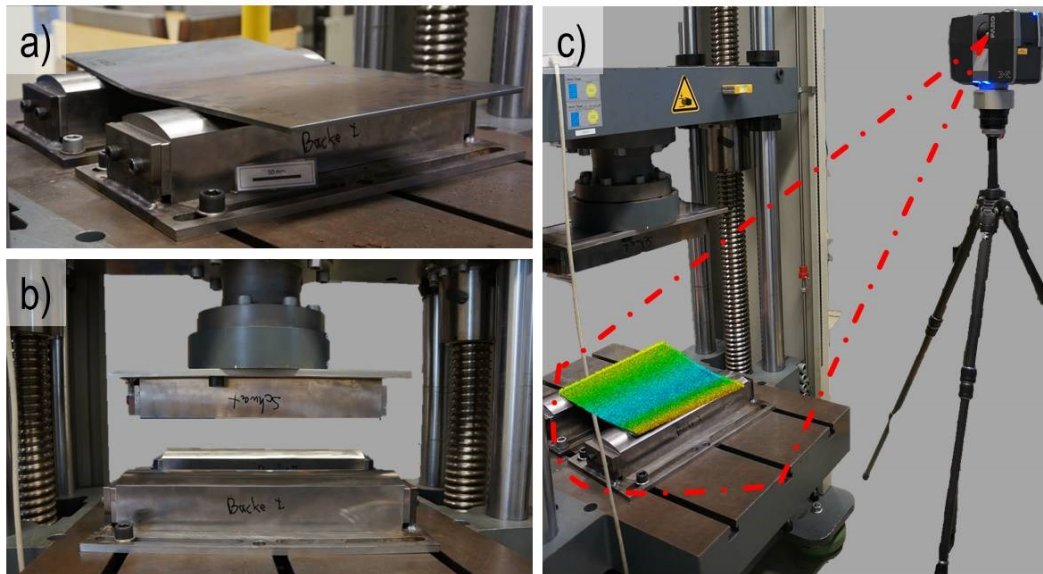
## **5.2 Experimentelle Untersuchung der kaltplastischen Umformung**

Als Basis der Charakterisierung des Umformverhaltens bei der kaltplastischen Umformung dient ein experimenteller Versuchskomplex mithilfe eines skalierten Versuchsaufbaus. Durch Verwendung eines skalierten Prüfaufbaus wird sichergestellt, dass alle für die industrielle Anwendung relevanten Einflussfaktoren physikalisch abgebildet werden können. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt ein experimenteller Prüfaufbau aufgebaut und ein industriell relevanter Parameterraum mithilfe der statistischen Versuchsplanung untersucht. Die experimentellen Untersuchungen bilden somit sowohl die Grundlage für eine Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren als auch die Validierung des numerischen Simulationsmodells für eine beliebige Erweiterung des Parameterraums.

### **5.2.1 Entwicklung eines experimentellen Prüfaufbaus zur Nachbildung der kaltplastischen Umformung**

Zur praxisnahen Nachbildung der industriellen Anwendung wird ein Prüfaufbau basierend auf der Prüfmaschine *Z400E* der Fa. *ZwickRoell GmbH & Co. KG* entwickelt. Der Prüfaufbau wird im Vergleich zur industriellen Anwendung hinsichtlich der Länge der Werkzeuge auf  $400 \text{ mm}$  skaliert. Die Skalierung des Prüfaufbaus begründet sich aus der in Kapitel 3 getroffenen Vereinfachung wobei der vom Werkzeug belastete Umformbereich als ein

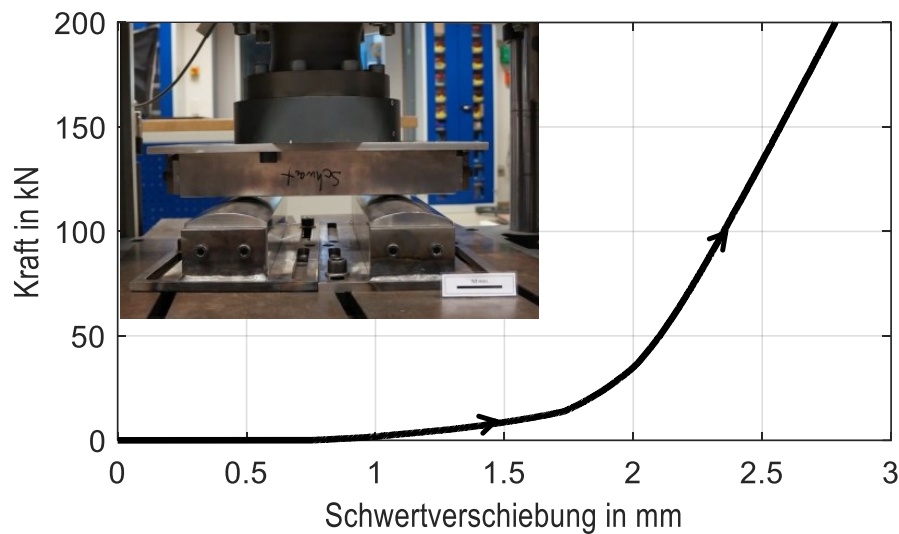
einzelner zweidimensionaler Schnitt idealisiert dargestellt wird. Sofern während der Prüfung sichergestellt wird, dass das Blech über seine gesamte Länge durch das Umformwerkzeug belastet wird, kann somit der Einfluss der Werkzeuglänge vernachlässigt werden. Die für das freie Biegen notwendigen Auflagebacken und das Umformschwert entsprechen hinsichtlich Geometrie, Werkstoff und Oberflächenbeschaffenheit der in der Praxis eingesetzten Werkzeuge. Der experimentelle Prüfaufbau zur Nachbildung der kaltplastischen Umformung ist in Abbildung 27 dargestellt.



**Abbildung 27: Experimenteller Prüfaufbau zur Nachbildung der kaltplastischen Untersuchung**

Zur Montage der Werkzeuge an der Prüfmaschine wird in [81] eine zusätzliche Adapterkonstruktion vorgesehen, mit denen eine freie Justierung der Auflagebacken auf dem Spannfeld zur optimalen parallelen Ausrichtung sowie dem Einstellen unterschiedlicher Backenabstände möglich ist (siehe Abbildung 27, a). Die zur Umformung notwendige Prozesskraft wird durch ein definiertes Verfahren der Prüfmaschinentraverse mit angegeschlossenem Umformschwert aufgebracht. Die Aufzeichnung der Prozesskraft und Ermittlung von Kraft-Verschiebungskurven basiert auf einer Kraftmessdose, die zwischen Prüfmaschinentraverse und Umformschwert angeordnet ist (siehe Abbildung 27, b). Da neben den Prozesskurven hauptsächlich das Umformverhalten beim freien Biegen analysiert wird, kann die Geometrie der Probenbleche mithilfe eines 3D-Laserscanners des Typs *FARO Focus3D X 130* der Fa. *FARO Europe GmbH & Co. KG* optisch erfasst werden (siehe Abbildung 27, c). Als Ergebnis der optischen Vermessung liegt die Kontur des Probenbleches als dreidimensionale Punktwolke für nachgelagerte Auswertungen vor.

Da im Zuge der experimentellen Untersuchungen ebenfalls ein Abgleich mit der numerischen Modellierung des skalierten Prüfaufbaus vorgesehen ist, wird zusätzlich das prüfaufbauspezifische Verformungsverhalten untersucht. Das prüfaufbauspezifische Verformungsverhalten wird dadurch hervorgerufen, dass durch Aufbringen der Prüfkraft neben dem Probenblech ebenfalls die Prüfmaschine sowie Werkzeuge belastet und elastisch verformt werden. Zur Bestimmung des prüfaufbauspezifischen Verformungsverhaltens wird das Schwert zur direkten Krafteinleitung in die Auflagebacken horizontal gedreht und der gesamte Prüfaufbau durch Verfahren der Prüfmaschinentraverse belastet (siehe Abbildung 28).



**Abbildung 28: Bestimmung des prüfaufbauspezifischen Verformungsverhaltens**

Aus der Darstellung der aufbrachten Kraft in Relation zur Schwertverschiebung wird ersichtlich, dass in der ersten Belastungsphase Einebnungseffekte auftreten, die bspw. durch Setzungen in den Kontaktflächen zwischen den einzelnen Komponenten hervorgerufen werden können. Der Einebnungsphase schließt ein linearer Verlauf der Kraft in Relation zur Schwertverschiebung an. Das somit ermittelte prüfaufbauspezifische Verformungsverhalten kann im weiteren Verlauf innerhalb der numerischen Modellierung mittels FEM berücksichtigt werden.

Durch den vorgestellten experimentellen Prüfaufbau wird sichergestellt, dass die Grobblechumformung durch freies Biegen praxisnah nachgebildet werden kann und die wesentlichen Prozessparameter wie Kraft-Verschiebungskurven sowie der Blechkontur erfasst und aufgezeichnet werden.

### 5.2.2 Durchführung eines teilfaktoriellen Versuchskomplexes

Basierend auf dem experimentellen Prüfaufbau und den in Abschnitt 4.2 aus der Literatur hergeleiteten Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung wird im nachfolgenden Abschnitt ein Parameterraum zur Durchführung eines teilfaktoriellen Versuchskomplexes aufgespannt. Die Definition der einzelnen Stufen der Faktoren orientiert sich hierbei hinsichtlich ihrer Relevanz für die industrielle Anwendung und prüftechnischen Realisierbarkeit. Der Parameterraum des experimentellen Versuchskomplexes ist in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Parameterraum des experimentellen Versuchskomplexes

Einflussfaktor		Stufen				
Halbzeug	Werkstoff	S235JR		S355JR		S460N
	Blechdicke	5 mm		8 mm		10 mm
	Blechbreite	300 mm		500 mm		700 mm
	Blechlänge	300 mm				
	Walzrichtung	Blechbreite quer zur Walzrichtung			Blechbreite längs zur Walzrichtung	
	Oberflächenbeschaffenheit	Gestrahlt		Primerbeschichtung		Verzundert
Werkzeug	Backenabstand	252 mm				
Prozess	Schwertverschiebung	2 mm	3 mm	5,5 mm	7 mm	10 mm
	horizontaler Versatz des Eingriffspunktes	$-0,05 \cdot b$		0		$0,08 \cdot b$
	Anzahl des Drückens	1		2		3
	Verfahrgeschwindigkeit	$60 \frac{mm}{min}$			$180 \frac{mm}{min}$	

Basierend auf dem aufgespannten Parameterraum industriell relevanter Einflussfaktoren kann mithilfe der statistischen Versuchsplanung ein teilfaktorieller Versuchsplan in Visual-Xsel erstellt werden. Hierzu wird ein lineares mathematisches Modell des Typs D-Optimal

aufgestellt, aus dem 18 unterschiedliche Parameterkombinationen resultieren. Zur Stützung des mathematischen Modells wurden zusätzlich fünf weitere Parameterkombinationen hinzugefügt. Zur Detektion von Ausreißern werden je Parameterkombination drei Wiederholungen vorgesehen, wobei sich die Probenanzahl für jede Parameterkombination aus zwei Proben je Walzrichtung zusammensetzen. Als Basisversuchsplan bestehen somit 46 unterschiedliche Parameterkombinationen mit je einer Wiederholung, die im Rahmen des experimentellen Versuchskomplexes untersucht werden. Der Basisversuchsplan mit Zuordnung der jeweiligen Parameterausprägungen ist im Anhang dieser Arbeit tabellarisch aufgeführt.

Zur Durchführung des Versuchskomplexes ist es notwendig, die Verschiebung des Umformschwertes durch definiertes Verfahren der Prüfmaschinentraverse zu gewährleisten. Im Rahmen der Prüfmaschineneinrichtung wird daher zunächst der Kraftnullpunkt des Prüfaufbaus bestimmt. Hierzu wird analog zur Konfiguration bei der Ermittlung des prüfmaschinenspezifischen Verformungsverhaltens die Traversenposition bestimmt, ab der mit zunehmendem Maschinenweg ein Kraftanstieg zu erkennen ist. Die nachfolgende Definition des Maschinenweges wird im Verlauf der Prüfung relativ zu dem ermittelten Kraftnullpunkt dargestellt.

Zur Umsetzung der definierten Schwertverschiebung  $s$  durch die Prüfmaschine wird ein Prüfprogramm mit drei Wegpunkten definiert (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4: Wegpunktdefinition der Prüfmaschine**

Wegpunkt	Definition
Startpunkt $WP_{Start}$ in $mm$	$WP_{Start} = t_{Blech} + 20$
Stützpunkt $WP_{Stütz}$ in $mm$	$WP_{Stütz} = t_{Blech} - s$
Endpunkt $WP_{Ende}$ in $mm$	$WP_{Ende} = t_{Blech} + 20$

Zur Erfassung der tatsächlichen Blechdicke  $t_{Blech}$  wird vor Beginn der Umformung eine manuelle Messung mithilfe einer kalibrierten Bügelmessschraube des Typs *Micromar 40 EWR* der Fa. *Mahr GmbH* durchgeführt und der Messwert zur Wegpunktdefinition berücksichtigt. Das gleichförmige Verfahren der Maschinentraverse zwischen den Wegpunkten erfolgt mit der im Versuchsplan spezifizierten Verfahrensgeschwindigkeit.

Aufbauend auf der Wegpunktdefinition können die experimentellen Charakterisierungsversuche entsprechend des definierten Versuchsplans durchgeführt werden. Hierbei wird neben den Kraft-Schwertverschiebungskurven auch die geometrische Form des Blechs vor und nach der Umformung optisch vermessen.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wird festgestellt, dass bei allen Probenblechen mit einer definierten Schwertverschiebung von 2 mm nur eine rein elastische Umformung stattgefunden hat. Dies kann sowohl durch die Kraft-Verschiebungskurve sowie der optischen Vermessung bestätigt werden. Zur Erweiterung des Parameterraums werden daher die betreffenden Parameterkombinationen erneut mit einer Schwertverschiebung von 12,5 mm umgeformt, sodass mit Abschluss des experimentellen Versuchskomplexes insgesamt 120 Einzelversuchsergebnisse zur weiteren Auswertung vorhanden sind.

### 5.2.3 Charakteristische Merkmale der kaltplastischen Umformung

Anhand der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung können charakteristische Merkmale der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen abgeleitet werden. Dies trifft sowohl auf den Verlauf der Kraft-Schwertverschiebungskurve als auch auf die Ergebnisse aus der optischen Vermessung zu. In der nachfolgenden Abbildung 29 ist der charakteristische Verlauf der Maschinenkraft in Relation zur Schwertverschiebung anhand einer repräsentativen Parameterkombination aufgeführt.

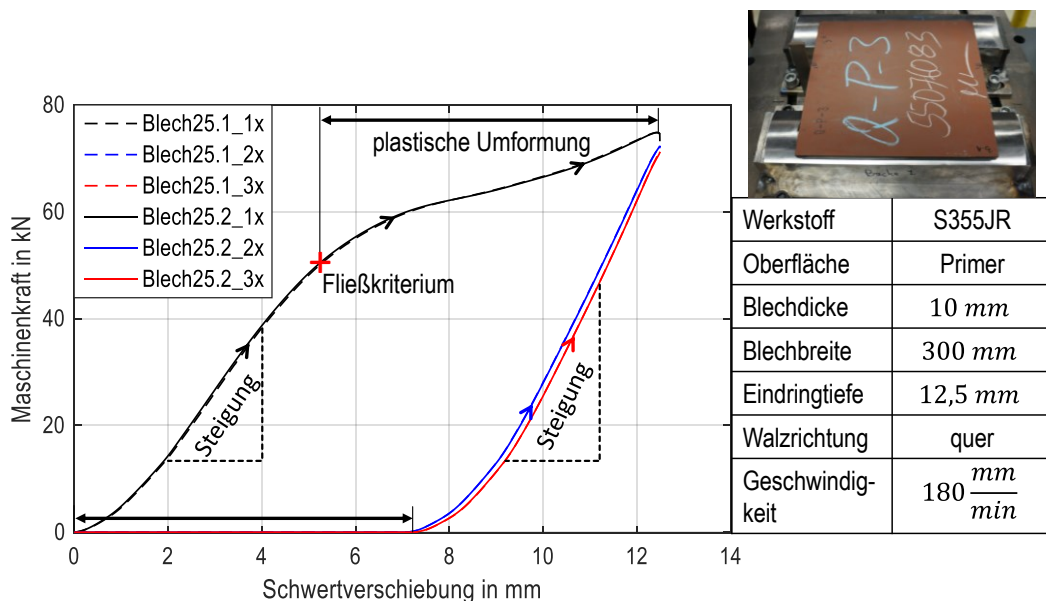


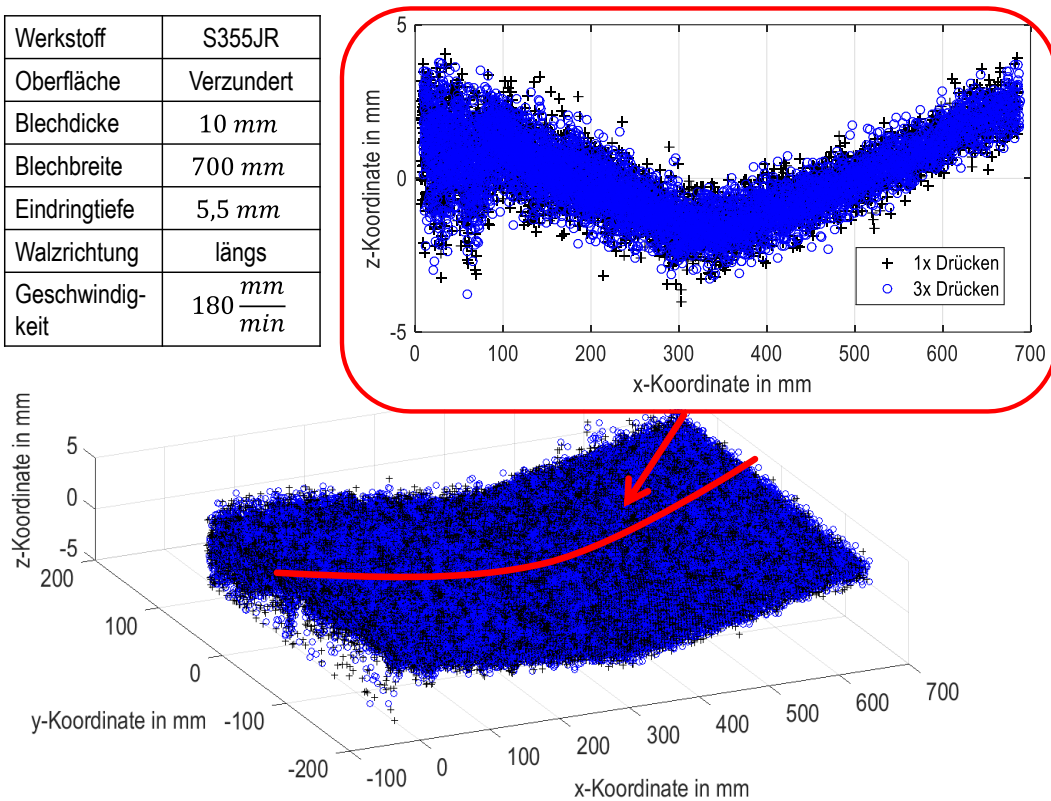
Abbildung 29: Charakteristische Maschinenkraft-Schwertverschiebungskurve beim freien Biegen

Zu Beginn der Umformung ist eine kontinuierliche Zunahme des Anstiegs der Prozesskurve (schwarze Kurve) zu identifizieren, deren Ursache aus Einebnungseffekte zwischen Blech und Werkzeugen zurückgeführt werden kann. Im weiteren Verlauf steigt die Maschinenkraft linear mit Zunahme der Schwertverschiebung an. Es handelt sich hierbei um eine rein elastische reversible Verformung, die bei Entlastung vollständig zurückgebildet wird. Sobald das spezifische Fließkriterium überschritten wurde, wird das Fließen des Werkstoffs initiiert und der Anstieg der Prozesskurve wird verringert. Der Betrag der Schwertverschiebung ab dem Erreichen des Fließkriteriums bis zur definierten Eindringtiefe verbleibt nach der Rückfederung als plastische Umformung. Dies ist ebenfalls anhand der Prozesskurve beim zweiten Umformschritt zu erkennen, bei der eine Zunahme der Kraft erst mit Überschreiten der vorherigen plastischen Umformung eintritt.

Ein weiteres Phänomen ist die bereits in der Literatur erwähnte kaltplastische Verfestigung. Bei erneuter Zustellung des Umformschwertes an demselben Kraftereinleitungspunkt wird das vorherige Fließkriterium auf den letzten Punkt der Prozesskurve verschoben (blaue und rote Kurve). Dementsprechend kann auch bei mehrmaliger Umformung an derselben Eingriffsposition und mit gleicher Schwertverschiebung keine zusätzliche plastische Umformung erzielt werden. Des Weiteren kann bei einem wiederholten Drücken eine Zunahme des Kurvenanstiegs identifiziert werden. Daraus lässt sich schließen, dass durch die geometrische Veränderung und der kaltplastischen Verfestigung infolge des vorherigen Umformschritts eine Versteifung des Probenblechs stattgefunden hat, die auch über die Prozesskurven wahrgenommen werden kann.

Dieses Phänomen kann auch über die optische Vermessung nachgewiesen werden. In der nachfolgenden Abbildung 30 ist die Punktwolke aus einer optischen Vermessung bei einer alternativen Parameterkombination mit mehrmaligem Eindringen aufgeführt.

Werkstoff	S355JR
Oberfläche	Verzundert
Blechdicke	10 mm
Blechbreite	700 mm
Eindringtiefe	5,5 mm
Walzrichtung	längs
Geschwindigkeit	180 $\frac{mm}{min}$



**Abbildung 30: Dreidimensionale Punktwolke aus der optischen Vermessung**

Aus dem zweidimensionalen Schnitt durch die Punktwolke (rot dargestellt) kann die Übereinstimmung der Punktwolken des ersten Umformschritts (+) und des dritten Umformschritts (o) eindeutig nachgewiesen werden. Demensprechend kann die Anzahl des Eindrückens bereits in dieser Phase der Auswertung als Einflussfaktor der kaltplastischen Umformung vernachlässigt werden.

Anhand der dargestellten dreidimensionalen Punktwolke kann außerdem ein charakteristisches Messbild der optischen Vermessung mittels Laserscanner zur Erfassung des Umformverhaltens analysiert werden. Hinsichtlich der Messgüte der optischen Vermessung lässt sich ein signifikantes Messrauschen mit einer Streubreite von durchschnittlich 2 mm bei der dargestellten verzunderten Oberflächenbeschaffenheit identifizieren. Zusätzlich treten im unteren Wertebereich der x-Koordinaten erhebliche vertikale Ausreißer auf, die aus der Reflektion der vorderen Blechkante stammen können.

Für eine Auswertung des charakteristischen Umformverhaltens hinsichtlich geometrischer Modellgrößen ist es daher zwingend notwendig, die optischen Messdaten durch geeignete mathematische Verfahren zu verarbeiten. Eine Kompensation des Messrauschens kann unter Annahme einer stochastischen Normalverteilung durch Glättungsverfahren wie bspw. gleitenden Mittelwerten, kubischen Splines oder Polynomansätzen erfolgen. Die Mess-

punkte im unteren Wertebereich der x-Koordinate werden für eine Auswertung der geometrischen Messgrößen vernachlässigt.

Durch den experimentellen Prüfaufbau konnten die physikalischen Wirkmechanismen der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen praxisnah abgebildet werden. Hierzu wurde ein industriell relevanter Parameterraum aufgespannt und ein teilfaktorieller Versuchsplan untersucht. Im Nachgang konnten bereits charakteristische Merkmale bezüglich der Prozesskurven sowie optischen Vermessung ermittelt werden.

### **5.3 Numerische Untersuchung der kaltplastischen Umformung**

Neben dem experimentellen Prüfaufbau dient die numerische Simulation als weiteres Verfahren zur Charakterisierung der kaltplastischen Umformung. Dies begründet sich daher, dass durch die Skalierung des experimentellen Prüfaufbaus keine vollständige Berücksichtigung des industriell relevanten Parameterraums möglich ist. Des Weiteren kann durch die numerische Simulation neben der Erweiterung und Verfeinerung des untersuchten Parameterraums auch der personelle und materielle Aufwand erheblich reduziert werden. Dadurch wird zudem sichergestellt, dass das Prognosemodell auch bei möglichen Anpassungen des Parameterraums nachträglich angepasst werden kann. Im Rahmen der numerischen Untersuchung wird daher zunächst ein FEM-Modell aufgebaut und anhand der zuvor durchgeführten experimentellen Versuche validiert. Durch die Validierung kann sichergestellt werden, dass die wesentlichen physikalischen Wirkmechanismen durch das numerische Simulationsmodell zufriedenstellend abgebildet werden können. Innerhalb eines numerischen Versuchskomplexes basierend auf einem Versuchsplans mit Berücksichtigung von Wechselwirkungen kann für die kaltplastische Umformung für den erweiterten Parameterraum untersucht werden.

#### **5.3.1 Aufbau und Validierung eines numerischen Simulationsmodells zur Untersuchung der kaltplastischen Umformung**

Der Aufbau des FEM-Modells basiert auf der numerischen Simulationsumgebung *LS-DYNA* der Fa. *Dynamore GmbH*, die besonders in der Automobilbranche zur Crashesimulation und zur Nachbildung von verschiedensten Fertigungs- und Umformprozessen eingesetzt wird. Im nachfolgenden Abschnitt wird nur ein kurzer Überblick über die Entwicklung des Simulationsmodells geschaffen.

Für eine detailliertere Übersicht der Modellierung wird auf die bereits veröffentlichten Beiträge innerhalb eines Anwenderforums [82] und [83] verwiesen.

Im Zuge des Modellaufbaus besteht die Problemstellung die wesentlichen physikalischen Effekte beim freien Biegen durch eine geeignete numerische Modellierung abzubilden. Dies betrifft sowohl die Formulierung der Werkzeuge als auch eine Abbildung des elasto-plastische Verformungsverhaltens des Blechs, das zudem die bereits beschriebenen Effekte der elastischen Rückfederung nach Entlastung der Werkzeuge berücksichtigen muss. Für eine effiziente Untersuchung von großen Versuchsplänen ist es zudem notwendig, dass der Modellaufbau entsprechend der jeweiligen Parameterkombination automatisiert erfolgen kann. In der nachfolgenden Abbildung 31 sind der Aufbau sowie die geometrischen Randbedingungen des Simulationsmodells schematisch dargestellt.

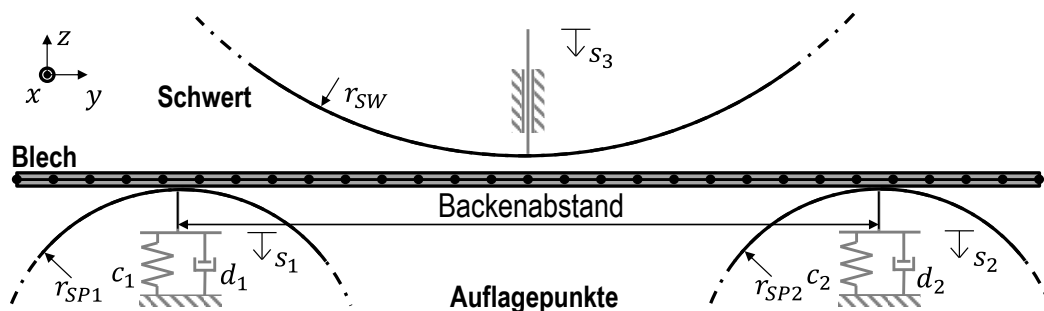


Abbildung 31: Schematischer Aufbau des numerischen Simulationsmodells nach [84]

Innerhalb des Simulationsmodells werden die Auflagepunkte als starre Körper in Form von Kegeln mit dem Radius  $r_{SP1}$  und  $r_{SP2}$  modelliert, wobei die Kegelmittelpunkte entsprechend des definierten Backenabstandes verschoben werden. Das in Kapitel 5.2.1 ermittelte prüfaufbauspezifische Verformungsverhalten wird über gesonderte Feder-Dämpfer-Elemente berücksichtigt, die zwischen dem festen Grund und den starren Körpern eingesetzt werden. Das Umformschwert mit dem Radius  $r_{SW}$  wird ebenfalls als starrer Körper mit einem translatorischen Freiheitsgrad modelliert, wobei die vertikale Verschiebung als Weg-Zeitkurve innerhalb der Simulation vorgegeben werden kann. Hinsichtlich der Vernetzung der Kontaktoberfläche wird innerhalb des Simulationsmodells eine analytische Formulierung angewandt, da das etablierte Verfahren zur Vernetzung der Umformwerkzeuge basierend auf festen Knotenpunkten aufgrund von Relativverschiebungen zwischen Blech und Werkzeug stets Ungenauigkeiten in der Kontaktfindung durch Durchdringungen verursacht. Bei der analytischen Formulierung werden die Kontaktpunkte auf der Werkzeugge-

ometrie für jeden Berechnungsschritt in Abhängigkeit von den Knotenpunkten des Blechs berechnet und somit die Ungenauigkeiten in der Kontaktfindung vermieden. Die Reibungsverhältnisse in den Kontaktflächen können mithilfe des Coulomb'schen Reibungskoeffizienten parametrisiert werden.

Zur Abbildung des werkstoffspezifischen Fließverhaltens des Blechs innerhalb des Simulationsmodells werden linear plastische Materialkarten basierend auf den in Kapitel 5.1.1 ermittelten Fließkurven für die drei untersuchten Werkstoffe erstellt.

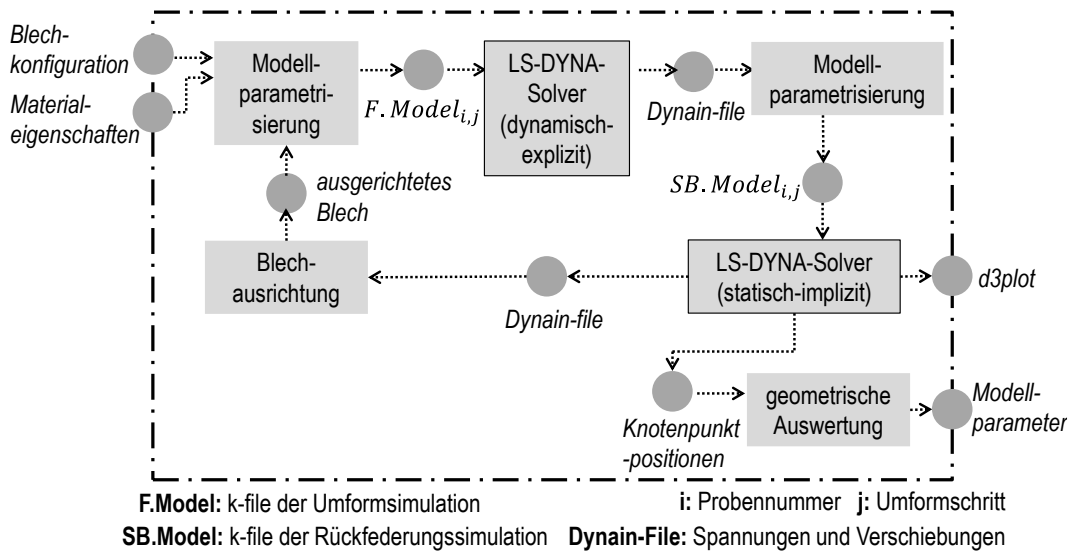
Im Rahmen einer Voruntersuchung wird die geeignete Elementformulierung des Blechs untersucht. Dies ist notwendig, da eine Diskretisierung mithilfe von Volumenelementen einerseits eine hohe Modellgenauigkeit liefert, andererseits jedoch sehr rechenintensiv ist und dementsprechend lange Berechnungszeiten verursacht. Für dünne Blechdicken in Kombination mit geringen Umformgraden liefern vollintegrierte Schalenelemente eine ausreichend hohe Modellgenauigkeit bei vergleichbar geringen Berechnungszeiten und haben sich daher etabliert. [85]

Als Ergebnis der Voruntersuchung sind die vollintegrierten Schalenelemente zur Diskretisierung des Blechs für den spezifischen Anwendungsfall geeignet und können durch eine Konvergenzstudie hinsichtlich Elementkantenlänge und Anzahl der Integrationspunkte parametrisiert werden.

Da in der Simulation keine Gravitationseffekte berücksichtigt werden, sind zur Lagerung des Blechs keine zusätzlichen Randbedingungen notwendig.

Eine Lagerung des Blechs erfolgt daher einzig durch die Auflagepunkte und zeitweiser Klemmung durch das Umformschwert.

Für die numerische Abbildung der Rückfederungseffekte bei Entlasten des Werkzeugs wird die Simulation des Umformprozesses in eine explizite Umformsimulation und eine implizite Berechnung der elastischen Rückfederung aufgeteilt. Zur automatischen Modellparametrisierung und Simulation aufeinanderfolgender Umformschritte sowie dem Datenaustausch zwischen den beiden Simulationsmodellen wird eine übergeordnete Programmroutine entwickelt, deren Ablauf in der nachfolgenden Abbildung 32 schematisch dargestellt ist.

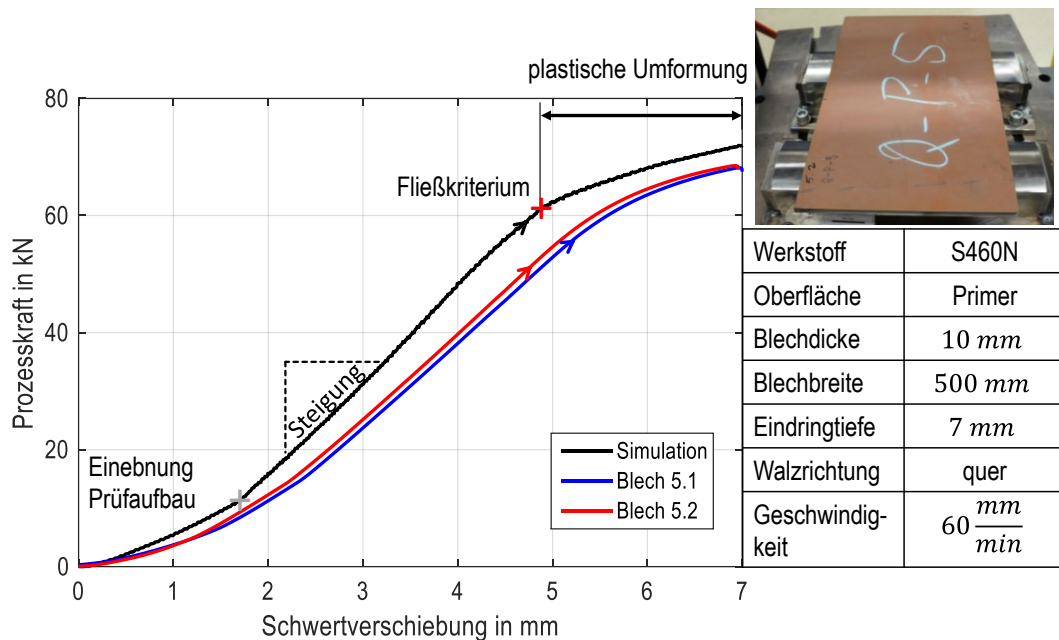


**Abbildung 32: Ablauf zur Simulation eines mehrstufigen Umformprozesses mit Berücksichtigung der elastischen Rückfederung**

Mit Definition der Blechkonfiguration entsprechend der zu untersuchenden Parameterkombination sowie der Materialeigenschaften kann das Modell der Umformsimulation parametrisiert werden. Durch Aufruf des expliziten LS-DYNA Solvers wird die dynamische Umformsimulation initiiert. Das Ergebnisfile mit Angabe der Spannungen und Verschiebungen je Knotenpunkt wird zur nachfolgenden Parametrierung des Simulationsmodells zur impliziten Berechnung der elastischen Rückfederung eingebunden. Bei der Simulation eines mehrstufigen Umformprozesses wird das Ergebnisfile nach der elastischen Rückfederung zur Parametrierung des nachfolgenden Umformschrittes weiterverwendet und das Blech neu ausgerichtet. Das Konzept der automatisierten Programmroutine konnte mithilfe von *MATLAB* der Fa. *MathWorks Inc.* realisiert und erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Nach Aufbau und Implementierung des numerischen Simulationsmodells wird die Modellgüte hinsichtlich Abbildung der physikalischen Wirkmechanismen beim freien Biegen anhand Nachbildung der experimentellen Charakterisierungsversuche aus Kapitel 5.2 validiert. Die Validierung erfolgt hierbei zur Berücksichtigung der gesamten werkstofflichen Spanne an den beiden Werkstoffgüten S235JR und S460N. Zur Abbildung der Kontaktreibung wurde aufgrund des beschriebenen Aufwandes zur experimentellen Charakterisierung ein konstanter Coulomb'scher Reibkoeffizient  $\mu = 0,2$  aus der Literatur angenommen [86]. Neben den Prozesskurven in Form der Maschinenkraft-Schwertverschiebungskurve wird ebenfalls die Blechkontur auf Basis der optischen Vermessung validiert.

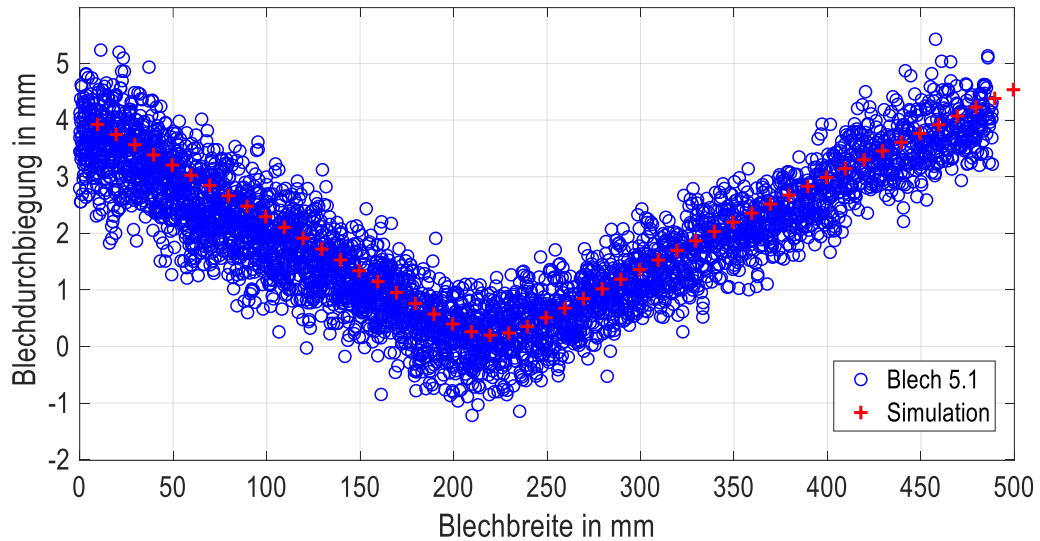
In der nachfolgenden Abbildung 33 sind der simulierte und die experimentell ermittelten Verläufe der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung für die Umformung eines Probenblechs aus S460N aufgeführt.



**Abbildung 33: Validierung der Prozesskurven für die Umformung eines Probenblechs aus S460N**

Entsprechend der Gegenüberstellung der Prozesskurvenverläufe können in Analogie zu Kapitel 5.2.3 wesentliche charakteristische Merkmale identifiziert werden. Die Setzungsphase zu Beginn der Umformung, die auch von dem prüfaufbauspezifischen Verformungsverhalten beeinflusst wird, kann durch die numerische Simulation abgebildet werden. Im Anschluss folgt eine lineare Zunahme der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung, die eine rein elastische Verformung des Blechs bewirkt. Mit Überschreiten des spezifischen Fließkriteriums ist das charakteristische Abfallen der Prozesskurve zu erkennen. Sowohl der Übergang zwischen Setzungsphase zu linear-elastischer Verformung als auch der Übergang zwischen linear-elastischer Verformung zu plastischer Umformung werden aufgrund numerischer Effekte im Simulationsmodell als sprunghafte Änderungen des Anstiegs der Prozesskurve abgebildet. Quantitativ betrachtet wird die Prozesskraft innerhalb der Simulation leicht überschätzt, sodass mit Erreichen der definierten Schwertverschiebung von 7 mm eine absolute Abweichung von 4 kN vorhanden ist.

Zur Validierung des Simulationsmodells bezüglich einer Ermittlung der umgeformten Blechkontur werden die Messpunkte aus der optischen Vermessung mit der Simulation gegenübergestellt (siehe Abbildung 34).



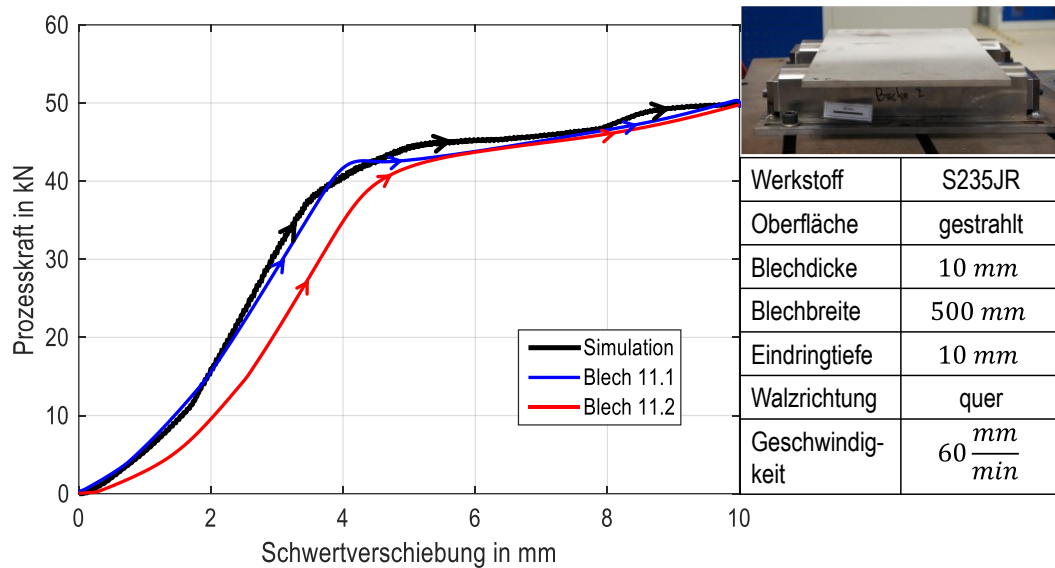
**Abbildung 34: Validierung der Blechkontur für die Umformung eines Probenblechs aus S460N**

Zur besseren Visualisierung wird die simulierte Blechkontur mithilfe eines best-fit-Verfahrens an der Punktwolke der optischen Vermessung translatorisch und rotatorisch ausgerichtet. Der Verlauf der simulierten Blehdurchbiegung in Relation zur Blechbreite (+) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Punktwolke der optischen Vermessung (o). Die Punkte der simulierten Blechkontur liegen über die gesamte Blechbreite innerhalb der Streuung der optischen Vermessung, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die absoluten Abweichungen zwischen Simulation und Experiment unterhalb der Messgenauigkeit des optischen Messverfahrens liegen.

Für die Nachbildung der Umformung eines Probenblechs kann daher eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und experimentellen Prüfaufbau hinsichtlich der Prozesskurven und geometrischen Analyse der Blechkontur identifiziert werden.

Für die Validierung des Simulationsmodells für die Umformung von Blechen aus S235JR wurde eine weitere Parameterkombination der experimentellen Charakterisierungsversuche nachgebildet.

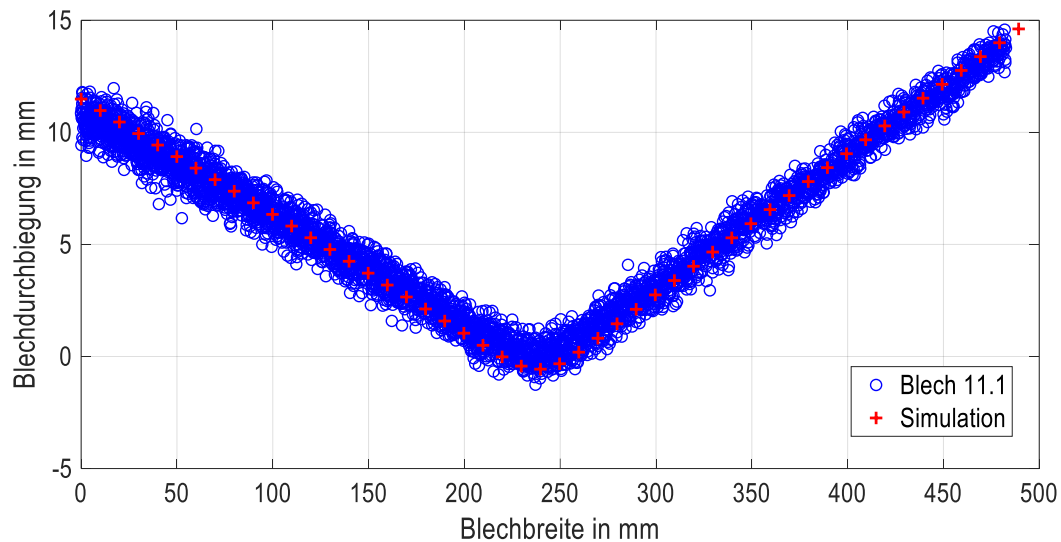
In der nachfolgenden Abbildung 35 ist eine Gegenüberstellung der simulierten und der experimentell ermittelten Verläufe der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung für ein gestrahltes Probenblech aufgeführt.



**Abbildung 35: Validierung der Prozesskurven für die Umformung eines Probenblechs aus S235JR**

Aufgrund der geringeren Fließspannung des S235JR wird im Gegensatz zum S460N ein deutlich flacherer Verlauf der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung ermittelt. Hierbei werden die charakteristischen Merkmale wie Setzungsphase, Phase der linear elastischen Verformung sowie Abknicken der Prozesskurve bei Erreichen des Fließkriteriums vollständig durch die Simulation abgebildet. Jedoch ist das Einlaufen in die plastische Umformung bei den experimentellen Versuchen deutlich ausgeprägter als bei der Simulation. Die quantitative Abweichung der Prozesskraft liegt im Rahmen der Streuung der Einzelversuche und liegt bei Erreichen der definierten Schwertverschiebung von 10 mm auf demselben Niveau.

Neben dem Abgleich der Prozesskurven wird ebenfalls die Gegenüberstellung der Blechkontur aus der optischen Vermessung mit dem Simulationsergebnis durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 36 sind daher die Messpunkte des Laserscanners mit der simulierten Blechkontur für die Umformung eines Probenblechs aus S235JR aufgeführt. In Analogie zur vorherigen Darstellung wird die Blechkontur der Simulation über ein best-fit-Verfahren anhand der Punktwolke der optischen Vermessung translatorisch und rotatorisch ausgerichtet.



**Abbildung 36: Validierung der Blechkontur für die Umformung eines Probenblechs aus S235JR**

Die simulierten Punkte der Blechdurchbiegung (+) in Relation zur Blechbreite zeigen für die Umformung des Probenblechs aus S235JR eine sehr gute Übereinstimmung mit der Punktwolke der optischen Vermessung (o) und liegen entlang der gesamten Blechbreite innerhalb der Streubreite der optischen Vermessung, sodass analog zu Abbildung 34 der Modellfehler kleiner als die Messgenauigkeit des optischen Messverfahrens ist.

Als Ergebnis der Entwicklung des numerischen Simulationsmodells können praxisnahe kaltplastische Umformaufgaben durch freies Biegen nachgebildet werden. Mithilfe des Simulationsmodells können die Prozesskurve des Umformprozesses sowie die Blechkontur nach der Umformung unter Berücksichtigung des industriell relevanten Parameter-raums prognostiziert werden. Die Modellgüte des Simulationsmodells konnte anhand für die unteren und oberen werkstofflichen Festigkeitsgrenzen validiert werden. Die vereinfachte Annahme einer konstanten Kontaktflächenreibung basierend auf einem Literaturwert kann entsprechend der erzielten Modellgüte als ausreichend bewertet werden.

Mithilfe des numerischen Simulationsmodells ist es nun möglich, die kaltplastische Umformung für einen erweiterten Parameterraum zu charakterisieren und den personellen und materiellen Einsatz im Vergleich zu einem rein experimentellen Versuchskomplex zu minimieren.

### **5.3.2 Durchführung eines numerischen Untersuchungskomplexes**

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen wird innerhalb des numerischen Untersuchungskomplexes eine größere Anzahl unterschiedlicher Parameterkombinationen

untersucht, mit denen der Parameterraum zur Charakterisierung der kaltplastischen Umformung erweitert und verfeinert werden kann. Hierzu wird ein neuer Parameterraum für den numerischen Versuchskomplex definiert, der in der nachfolgenden Tabelle 5 aufgelistet ist.

Tabelle 5: Parameterraum des numerischen Versuchskomplexes

Einflussfaktor		Stufen					
Halbzeug	Werkstoff	S235JR		S355JR		S460N	
	Blechdicke	5 mm	8 mm	10 mm	15 mm	20 mm	
	Blecbreite	500 mm		700 mm		1000 mm	
	Blechlänge	300 mm					
	Walzrichtung	Blecbreite quer zur Walzrichtung			Blecbreite längs zur Walzrichtung		
	Reibkoeffizient	0,1			0,2		
Werkzeug	Backenabstand	252 mm		272 mm		292 mm	
Prozess	Schwertverschiebung	3 mm	5,5 mm	7 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm
	horizontaler Versatz des Eingriffspunktes	0		$0,05 \cdot b$		$0,1 \cdot b$	
	Verfahrensgeschwindigkeit	$60 \frac{mm}{min}$		$120 \frac{mm}{min}$		$180 \frac{mm}{min}$	

Aufgrund der prüftechnischen Beschränkungen werden im Vergleich zum experimentellen Versuchskomplex die Faktoren der Blechdicke, Blecbreite und des Backenabstandes signifikant erweitert. Der Faktor der Walzrichtung wird aufgrund des geringen Unterschiedes der extrapolierten Fließkurven je Walzrichtung (vgl. Kapitel 5.1.1) über eine gemittelte Fließkurve berücksichtigt. Die einzelnen Stufen der Schwertverschiebung und des horizontalen Versatzes werden mit geringeren Abständen ausgeprägt. Dabei wird der horizontale Versatz in Relation zur Blecbreite nur in positiver Richtung untersucht, da aufgrund der Symmetriebedingungen die Ergebnisse in der Nachauswertung invertiert werden können.

Zur Ermittlung der repräsentativen Parameterkombinationen wird eine statistische Versuchsplanung mithilfe von *Visual-XSel* basierend auf einem mathematischen Modell mit Berücksichtigung von Wechselwirkungen des Typs D-Optimal aufgestellt. Als Ergebnis der statistischen Versuchsplanung können 150 Basis-Versuche mit drei Zusatzversuchen identifiziert werden. Im Gegensatz zur Streuung der Versuchsergebnisse bei experimentellen Untersuchungen sind innerhalb des numerischen Versuchskomplexes keine zusätzlichen Wiederholungen notwendig, sodass insgesamt 153 Parameterkombinationen simuliert werden können. Der detaillierte Versuchsplan mit Auflistung der einzelnen Parameterkombinationen ist analog zum experimentellen Versuchskomplex im Anhang dieser Arbeit aufgeführt.

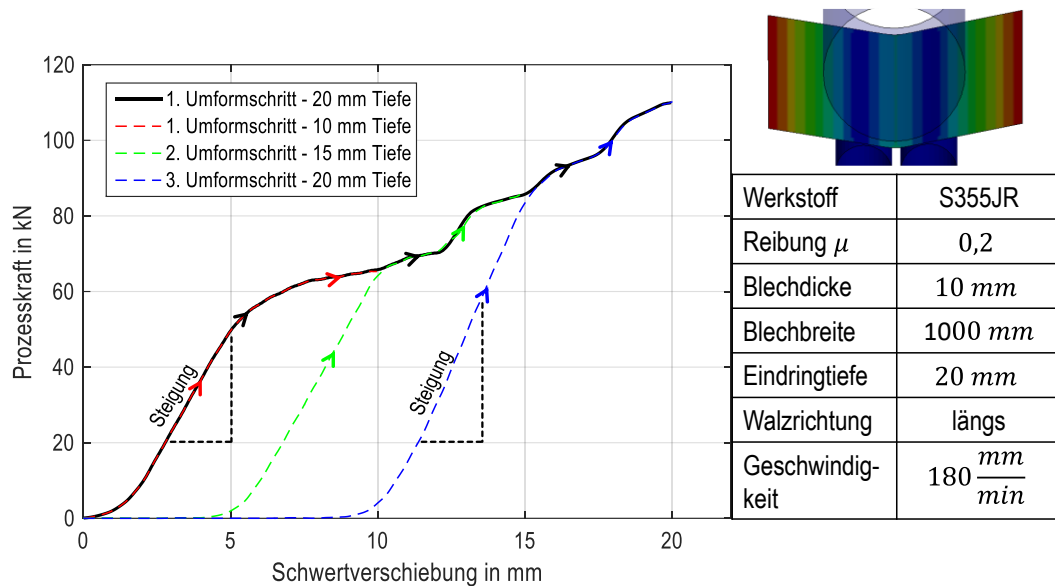
Zur Versuchsdurchführung in Form der Modellparametrierung, Berechnungsaufwurf und Kompensation der elastischen Rückfederung kann die übergeordnete Programmroutine verwendet werden.

### **5.3.3 Numerische Charakterisierung der kaltplastischen Verfestigung**

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung konnten charakteristische Merkmale der kaltplastischen Umformung identifiziert werden (vgl. 5.2.3). Hierbei wurde ersichtlich, dass die Anzahl des Eindrückens keinen Einfluss auf das Umformverhalten hat, da aufgrund der kaltplastischen Verfestigung auch bei mehrmaligen Eindrücken mit gleichbleibender Schwertverschiebung keine weitere Umformung erzielt wird. Die numerische Simulation bietet nun die Möglichkeit, die kaltplastische Verfestigung beim Umformen durch freies Biegen bei einem mehrstufigen Umformprozess unter konstant gehaltenen Randbedingungen zu untersuchen und weitere charakteristische Merkmale der kaltplastischen Umformung zu identifizieren.

Aus diesem Grund wird ein mehrstufiger Umformprozess mit schrittweiser Erhöhung der Schwertverschiebung simuliert. Entsprechend des vorgestellten Ablaufs der numerischen Simulation werden im Rahmen der Modellparametrierung die Ergebnisse des vorherigen Umformschritts in Form der Knotenpunktverschiebungen und –spannungen als Startbedingung eingebunden. Als Referenz des mehrstufigen Umformprozesses dient die Simulation eines einzigen Umformschritts mit der Schwertverschiebung des letzten Umformschritts des mehrstufigen Umformprozesses.

In der nachfolgenden Abbildung 37 sind die Verläufe der Kraft-Schwertverschiebungskurve aus der Simulation des mehrstufigen Umformprozesses sowie der Untersuchung eines einzelnen Umformschritts aufgeführt.



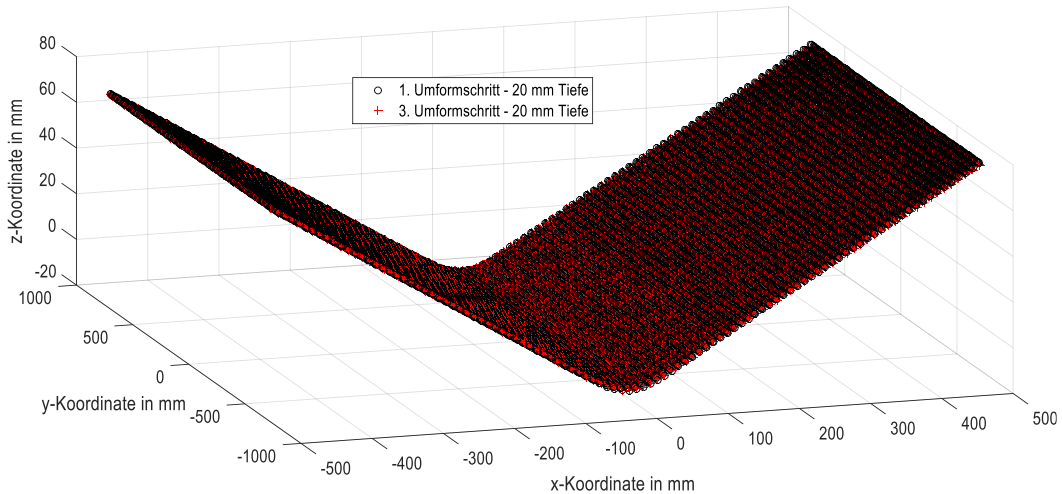
**Abbildung 37: Kraft-Schwertverschiebungskurve aus der numerischen Untersuchung eines mehrstufigen Umformprozesses**

Der Verlauf der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung aus der Simulation eines einzigen Umformschritts mit einer Schwertverschiebung von 20 mm zeigt die charakteristischen Merkmale der Setzungsphase, der linear-elastischen Verformung sowie dem Abknicken bei Überschreiten des Fließkriteriums (schwarze Kurve). Bis zum Erreichen der maximalen Schwertverschiebung bildet sich ein kontinuierlicher steigender Verlauf der Prozesskraft aus.

Die Prozesskurve des ersten Umformschritts bei einem mehrstufigen Umformprozess (rot gestrichelt) liegt bis zum Erreichen der Schwertverschiebung von 10 mm genau auf der Kurve des Referenzversuchs. Bei dem zweiten Umformschritt steigt die Kurve (grün gestrichelt) rein elastisch und überschreitet erst am letzten Punkt auf der Prozesskurve des vorherigen Umformschritts das notwendige Fließkriterium zur plastischen Umformung, das durch die kaltplastische Verfestigung nach oben verschoben wurde.

Analog zu der experimentellen Untersuchung ist aus dem Vergleich der Prozesskurven des ersten Umformschritts zum dritten Umformschritt eine Zunahme des Kurvenanstiegs im linear-elastischen Bereich zu identifizieren. Dementsprechend kann die Versteifung des Blechs durch Änderung der Blechkontur sowie kaltplastischen Verfestigung ebenfalls durch

die numerische Simulation abgebildet werden. Neben dem Vergleich der Prozesskurven des mehrstufigen Umformprozesses sind in der nachfolgenden Abbildung 38 die zugehörigen Blechkonturen in Form der dreidimensionalen Punktwolken aufgeführt.



**Abbildung 38: Vergleich der Blechkontur bei der numerischen Untersuchung eines mehrstufigen Umformprozesses**

Aus der Darstellung der Blechkontur wird ersichtlich, dass die Punktwolke aus der Simulation eines mehrstufigen Umformprozesses (+) mit der Schwertverschiebung des letzten Umformschritts von 20 mm genau mit der Punktwolke eines einzigen Umformschritts (o) übereinstimmt.

Als Fazit der numerischen Untersuchung der kaltplastischen Verfestigung können zwei weitere wesentliche Merkmale einer charakteristischen Prozesskurve identifiziert werden:

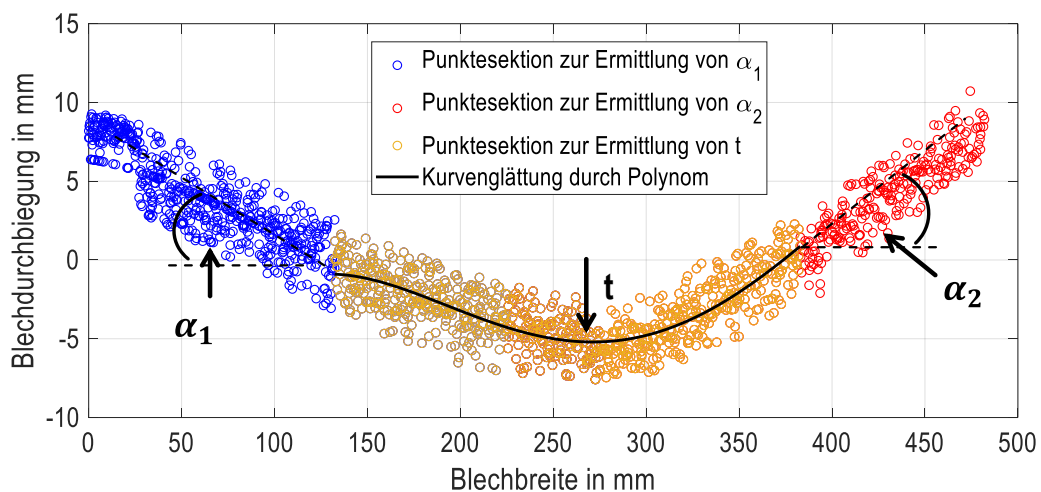
1. Die kaltplastische Verfestigung bewirkt eine Zunahme des Fließkriteriums, das bei nachfolgenden Umformschritten erst überschritten werden muss, um eine zusätzliche plastische Umformung zu initiieren.
2. Der Verlauf der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung ist für den gesamten Umformprozess einer spezifischen Blechkonfiguration (Werkstoff, Dicke, Beschichtung, Eingriffspunkt, etc.) konstant. Die irreversible plastische Umformung ist dabei nur von der Schwertverschiebung und nicht von der Anzahl der Prozessschritte abhängig.

Die aus der experimentellen und numerischen Untersuchung identifizierten Merkmale einer charakteristischen Prozesskurve ermöglichen eine vereinfachte Berücksichtigung der

kaltplastischen Verfestigung, die im Rahmen der Modellentwicklung in Kapitel 6.3 näher erläutert wird.

#### 5.4 Auswertung der Charakterisierungsversuche

Wesentliches Ziel der Charakterisierung der kaltplastischen Umformung ist die Untersuchung der relevanten Einflussfaktoren der Grobblechumformung hinsichtlich ihres quantitativen Einflusses auf das Umformverhalten. Zur einheitlichen Darstellung innerhalb dieser Arbeit und Nutzung der Charakterisierungsversuche zum Training eines künstlichen neuronalen Netzes wird das Umformverhalten anhand der in Kapitel 3 definierten geometrische Modellparameter ausgewertet. Aufgrund des Umfangs an experimentellen und numerischen Versuchsergebnissen wird daher zunächst eine Methodik zur Auswertung und automatisierten Ermittlung der definierten geometrischen Modellparameter entwickelt. Das Schema zur automatisierten Auswertung ist in Abbildung 39 exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 39: Schema zur automatisierten Auswertung der experimentellen und numerischen Charakterisierungsversuche**

Die innerhalb der Versuche gemessene oder simulierte Punktwolke der Blechkontur wird zunächst entsprechend des Abstandes der Auflagepunkte ausgerichtet und verschoben, sodass das Blech waagrecht auf den Auflagepunkten aufliegt. Die identifizierten Auflagepunkte werden zur Selektierung der Punktwolke genutzt und die beiden Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  aus der Steigung einer linearen Regression der entsprechende Punktesektion abgeleitet. Die lokale Durchbiegung  $t$  kann mithilfe einer Kurvenglättung über ein Polynom vierten Grades bestimmt werden. Zur Kompensation von Ausreißern wird das Blech in eine definierte Anzahl von Scheiben in Längsrichtung unterteilt und die geometrischen Modellparameter für jede einzelne Scheibe ermittelt. Die automatisierte Auswertung

stellt sicher, dass die experimentellen und numerischen Versuche entsprechend eines definierten Auswertungskriteriums analysiert werden und ein manueller Einfluss bei der Auswertung vermieden wird.

### 5.4.1 Experimenteller Versuchskomplex

Zur Auswertung des experimentellen Versuchskomplexes wird eine Auswertung der ermittelten geometrischen Modellparameter in Relation zu den versuchsspezifischen Parameterkombinationen mithilfe einer multiplen Regression in *Visual-XSeI* basierend auf einem kubischen Modellansatz durchgeführt. Zur Verbesserung der Modellgenauigkeit werden zur Beschreibung des Werkstoffs die in Kapitel 5.1.1 ermittelten werkstoffspezifischen Fließspannung  $k_F$  sowie exakte gemessene Blechdicke eingesetzt. Mithilfe des mathematischen Modellansatzes konnte eine Modellgüte von  $R^2 = 0,956$  erzielt werden, sodass die Ergebnisse der multiplen Regression als aussagekräftig eingestuft werden können. In der nachfolgenden Abbildung 40 ist die Analyse der lokalen Durchbiegung in Relation zu den Einflussfaktoren dargestellt, wobei die Einflussfaktoren in abfallender Reihenfolge von links nach rechts aufgelistet sind.

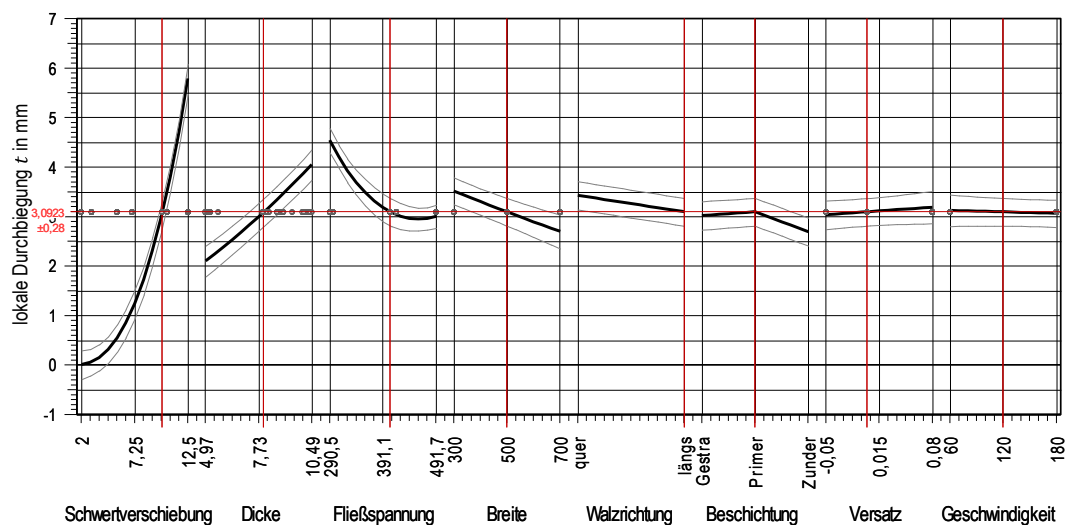
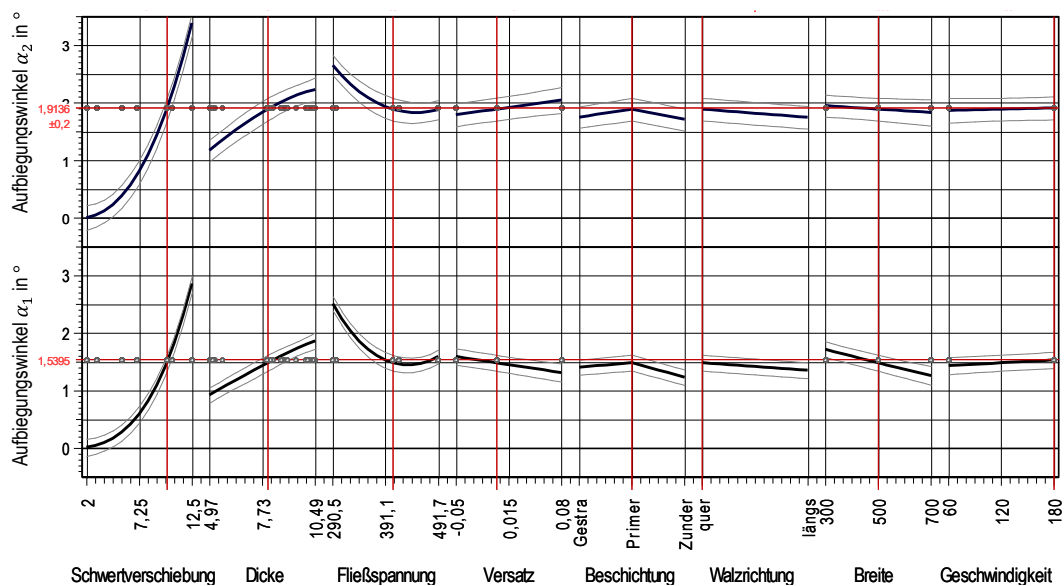


Abbildung 40: Analyse der lokalen Durchbiegung  $t$  in Relation zur den experimentell untersuchten Einflussfaktoren

Entsprechend der dargestellten Ergebnisse hat die Schwertverschiebung den größten Einfluss auf die lokale Durchbiegung, die exponentiell mit Anstieg der Schwertverschiebung zunimmt. Mit Vergrößerung der Blechdicke wird ebenfalls die lokale Durchbiegung maximiert. Als drittgrößter Einfluss kann die Fließspannung identifiziert werden, die eine Minimierung der lokalen Durchbiegung bei einer höheren Fließspannung verursacht. Das gleiche Verhalten ist auch bei Zunahme der Blechbreite erkennbar. Bei Blechen, die quer

zur Walzrichtung belastet werden, tritt eine höhere lokale Durchbiegung auf, als längs zur Walzrichtung. Die Beschichtung hat hingegen nur einen geringen Einfluss auf die lokale Durchbiegung, wobei die geringste lokale Durchbiegung bei verzünderten Blechoberflächen erreicht wird. Der Einfluss des horizontalen Versatzes und der Umformgeschwindigkeit kann für den untersuchten Parameterraum vernachlässigt werden, da erkennbare Tendenzen unterhalb der Streubreite des Modells liegen.

Zusätzlich zu dem Einfluss der Faktoren auf die lokale Durchbiegung  $t$  ist in der nachfolgenden Abbildung 41 eine Analyse der Aufbiegungswinkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  in Relation zu den Einflussfaktoren dargestellt.



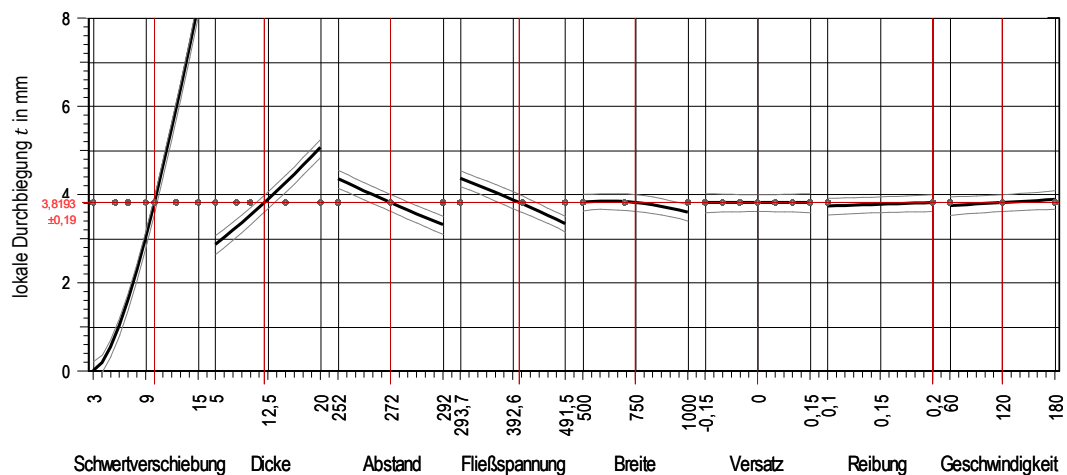
**Abbildung 41: Analyse der Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  in Relation zu den experimentell untersuchten Einflussfaktoren**

Hierbei liegen bei den Einflussfaktoren der Schwertverschiebung, Dicke, Fließspannung sowie Beschichtung dasselbe Verhalten wie bei der lokalen Durchbiegung vor. Jedoch kann für den horizontalen Eingriffspunktes ein alternierender Einfluss auf die Aufbiegungswinkel identifiziert werden. Mit zunehmendem Versatz (von links nach rechts) wird der linke Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  kleiner, während der rechte Aufbiegungswinkel  $\alpha_2$  größer wird. Es ist daher ein asymmetrisches Verhalten der Aufbiegungswinkel in Abhängigkeit des horizontalen Versatzes des Eingriffspunktes zu erkennen. Die Walzrichtung und die Blechbreite haben im Gegensatz zur lokalen Durchbiegung einen geringeren Einfluss auf die Aufbiegungswinkel. Der Einfluss der Umformgeschwindigkeit kann auch bei den Aufbiegungswinkeln aufgrund der geringen Tendenz in Relation zur Streubreite des Modells vernachlässigt werden.

### 5.4.2 Numerischer Versuchskomplex

Analog zu den experimentellen Untersuchungen wird für den numerischen Untersuchungskomplex eine Auswertung basierend auf einer multiplen Regression der ermittelten Modellparameter in Relation zu den spezifizierten Parameterkombinationen des statistischen Versuchsplans durchgeführt. Das zur multiplen Regression notwendige mathematische Modell basiert ebenfalls auf einem kubischen Ansatz und kann die Versuchsdaten mit  $R^2 = 0,973$  als Maß der Modellgenauigkeit abbilden. Die Ergebnisse der multiplen Regression sind daher als aussagekräftig einzustufen.

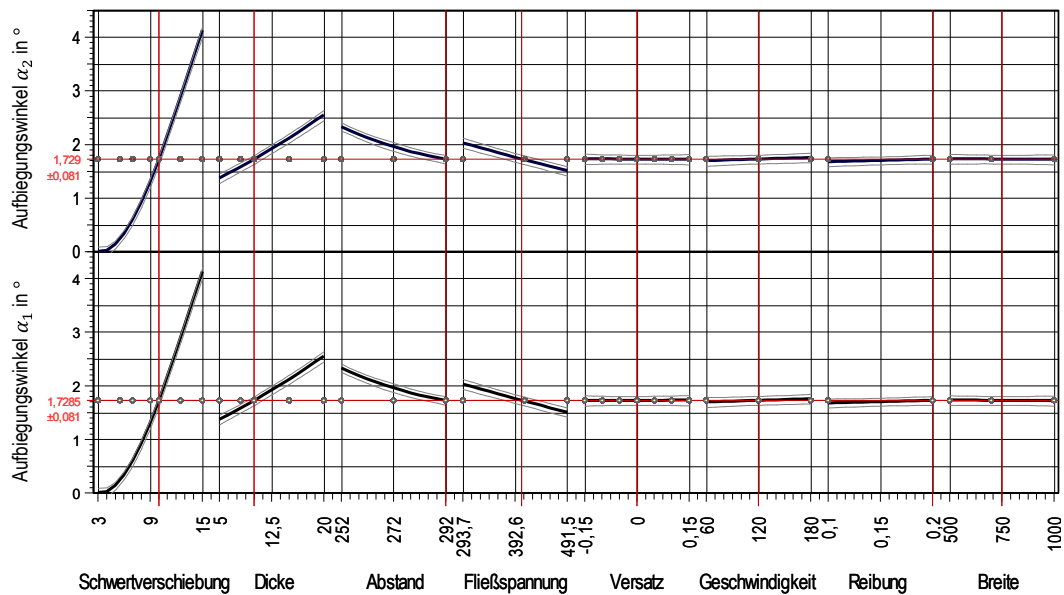
Zur Analyse der lokalen Durchbiegung in Abhängigkeit der numerisch untersuchten Einflussfaktoren ist in der nachfolgenden Abbildung 42 das Ergebnis des Regressionsmodells für die Variation der Einflussparameter innerhalb des Parameterraums dargestellt.



**Abbildung 42: Analyse der lokalen Durchbiegung  $t$  in Relation zu den numerisch untersuchten Einflussfaktoren**

Bei der numerischen Untersuchung verhalten sich der Einfluss der Schwertverschiebung, der Blechdicke, der Fließspannung sowie der Blechdicke ähnlich wie bei der zuvor betrachteten Analyse des experimentellen Versuchskomplexes. Der zusätzlich untersuchte Faktor des Abstandes der Auflagepunkte bewirkt eine Reduktion der lokalen Durchbiegung mit zunehmendem Abstand. Für den horizontalen Versatz, der Reibung sowie der Geschwindigkeit kann kein signifikanter Einfluss auf die lokalen Durchbiegung identifiziert werden, da die dargestellten Änderungen unterhalb der Streubreite des mathematischen Modells liegen.

In der nachfolgenden Abbildung 43 ist die Analyse der Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  in Relation zu den numerisch untersuchten Einflussfaktoren dargestellt.



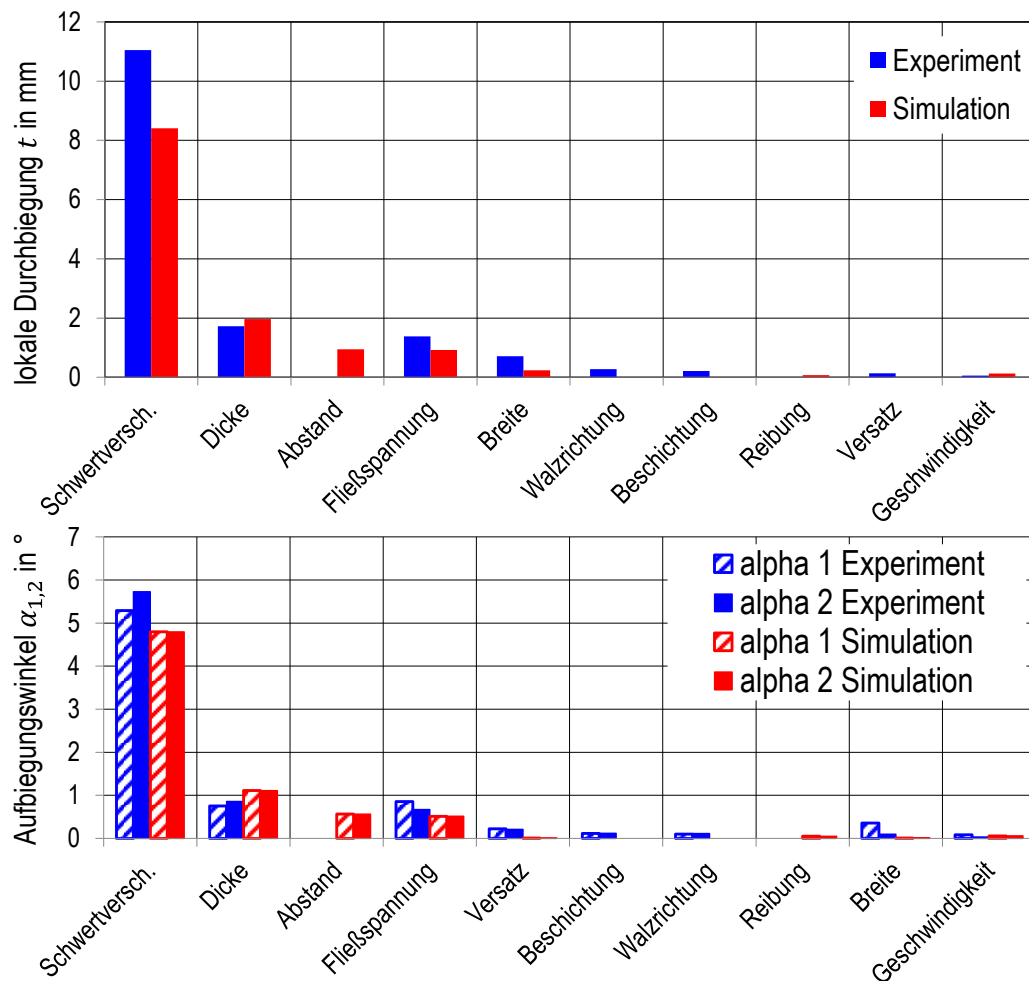
**Abbildung 43: Analyse der Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  in Relation zu den numerisch untersuchten Einflussfaktoren**

Analog zur lokalen Durchbiegung werden die Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  durch die Schwertverschiebung, die Blechdicke sowie die Fließspannung vergleichbar zu den bereits diskutierten experimentellen Versuchsergebnissen beeinflusst. Eine Zunahme des Backenabstandes bewirkt neben der Reduktion der lokalen Durchbiegung ebenfalls eine Reduktion der Aufbiegungswinkel.

Die Parameterkombination bezüglich des horizontalen Versatzes, der Geschwindigkeit, der Reibung sowie der Blechbreite sind hingegen ohne signifikanten Einfluss auf die Aufbiegungswinkel, da auftretende Veränderungen deutlich unterhalb der Streubreite des mathematischen Modells liegen.

Anhand der aufgeführten Analyseergebnisse der lokalen Durchbiegung und der Aufbiegungswinkel in Relation zu den untersuchten Einflussfaktoren wird ersichtlich, dass zwischen der experimentellen und numerischen Ermittlung ein geringfügig abweichendes Umformverhalten zu erkennen ist. Aus diesem Grund wird eine Gegenüberstellung der absoluten Effekte der Einflussfaktoren bei experimenteller und numerischer Ermittlung durchgeführt. Der absolute Effekt eines Einflussfaktors gibt an, inwieweit der Modellparameter durch Veränderung des Faktors zwischen der kleinsten und größten Stufe verändert werden kann und ist daher ein weiteres Maß zur quantitativen Analyse von Einflussfaktoren.

In der nachfolgenden Abbildung 44 ist ein daher Vergleich der absoluten Effekte der Einflussfaktoren auf die Modellparameter bei experimenteller und numerischer Untersuchung dargestellt.



**Abbildung 44: Vergleich absoluten Effekte bei der experimentellen und numerischen Ermittlung der geometrischen Modellparameter**

Aus dem Vergleich der absoluten Effekte der Einflussfaktoren auf die lokale Durchbiegung wird ersichtlich, dass die Faktoren aus der numerischen und experimentellen Ermittlung bei absteigender Sortierung ihres quantitativen Einflusses in selber Reihenfolge eingeordnet werden. Bei dem Vergleich der absoluten Effekte auf die Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  ist jedoch eine geringfügige Abweichung in der Reihenfolge zwischen den Untersuchungskomplexen erkennbar. Die absoluten Effekte des horizontalen Versatzes sowie der Probenbreite können bei der experimentellen Untersuchung detektiert werden. Eine mögliche Ursache kann auf die Vernachlässigung von Gravitationseffekten bei der numerischen Modellierung zurückgeführt werden, da bei einem horizontalen Versatz des Blechs in Folge der Massenverteilung unterschiedliche Momente an den Auflagepunkten anliegen, die das

in Abbildung 41 beschriebene entgegengesetzte Verhalten der Aufbiegungswinkel verursachen können. Aufgrund des geringen absoluten Effektes des horizontalen Versatzes auf die Aufbiegungswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  und der mehrheitlich zufriedenstellenden numerischen Abbildung der Einflussfaktoren im Vergleich mit dem experimentellen Versuchskomplex ist jedoch eine Anpassung des numerischen Simulationsmodells als nicht zielführend anzusehen.

## 5.5 Zusammenfassung der Charakterisierung der kaltplastischen Umformung

Im Rahmen der experimentellen und numerischen Untersuchungen können wesentliche charakteristische Merkmale der kaltplastischen Umformung identifiziert werden, die als Basis für die nachfolgende Modellentwicklung dienen. Entsprechend der Analyse einer charakteristischen Prozesskurve können die Phasen der Setzung in den Kontaktflächen, der rein elastischen und reversiblen Verformung sowie der plastischen Umformung mit Überschreiten des spezifischen Fließkriteriums spezifiziert werden. Hierbei sind das Fließverhalten sowie die kaltplastische Verfestigung nur von der Blechkonfiguration (Dicke, Werkstoff, Breite, Beschichtung, horizontaler Versatz, etc.) abhängig, sodass eine Abfolge der Prozessschritte nicht berücksichtigt werden muss.

Basierend auf der Auswertung des Umformverhaltens bei der experimentellen und numerischen Untersuchung können die aus der Literatur bekannten Einflussfaktoren hinsichtlich des quantitativen Einflusses sowie des absoluten Effektes analysiert werden. Die Sensitivitätsanalyse wird anhand der definierten geometrischen Modellparameter durchgeführt und bestätigt damit die Annahme, dass die wesentlichen Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung anhand der Modellparameter abgebildet werden können. Der Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse zeigt, dass eine rein experimentelle Untersuchung aufgrund des eingeschränkten Parameterraums bzw. eine rein numerische Untersuchung aufgrund der idealisierten Randbedingungen innerhalb des Modells nicht dazu ausreicht, das Umformverhalten der kaltplastischen Umformung vollständig zu charakterisieren. Bei der Entwicklung eines Prognosemodells sind daher sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungsergebnisse zu verwenden, die bereits als umfangreiche Sammlung von Modellgrößen in Abhängigkeit der jeweiligen Parameterkombination vorliegen. Basierend auf den in den Untersuchungen identifizierten Charakteristika kann im Anschluss ein vereinfachtes Berechnungsmodell zur Prognose der kaltplastischen Umformung entwickelt werden.

## 6. Aufbau und Parametrierung des geometrischen Ersatzmodells

Innerhalb des nachfolgenden Abschnitts wird ein geometrisches Ersatzmodell zur Prognose der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen aufgebaut und durch Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzes parametrierung. Hierbei werden die wesentlichen Erkenntnisse aus der Charakterisierung des Umformverhaltens innerhalb des Modellaufbaus sowie einer Methode zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung einbezogen. Zur Erfassung und Kompensation von Modellfehlern wird zusätzlich ein Verfahren zur Einbindung einer dreidimensionalen Punktwolke aus einer optischen Vermessung der Blechkontur entwickelt. Die Erfassung der realen Blechkontur ermöglicht zudem die automatisierte Ermittlung eines prozentualen Modellfehlers, der durch ein iteratives Lösungsverfahren bestimmt werden kann.

### 6.1 Modellaufbau

Für den Aufbau eines geometrischen Ersatzmodells werden zunächst ein einheitliches Koordinatensystem sowie ein Datenformat für die softwaretechnische Realisierung festgelegt. Dies ist notwendig, um auch bei mehreren Umformschritten eine eindeutige und berechnungsoptimierte Beschreibung des Blechs zu ermöglichen. Zudem ist hinsichtlich einer steuerungstechnischen Implementierung die notwendige Prozessstabilität sowie -flexibilität für verschiedenste Blechkonturen innerhalb einer industriellen Anwendung zu gewährleisten.

Die Definition des Datenformats orientiert sich simultan zu dem in Kapitel 3 vorgestellten Lösungsansatz an dem Vorgehen der Umformer, ein dreidimensionales Blech in eine endliche Anzahl von zweidimensionalen Schnitten aufzuteilen. Dies ermöglicht dem Anlagenbediener den Umformprozess einer komplexen dreidimensionalen Blechkontur durch die einfache Verwendung von zweidimensionalen Korkschaablonen ganzheitlich zu überwachen und zu steuern.

Entsprechend des zweidimensionalen Modellansatzes wird zu Beginn der Umformung das ebene Blech in eine definierte Anzahl an Schnitten in Längsrichtung unterteilt und mit Angabe der Position in Längsrichtung dargestellt. Als globales Koordinatensystem  $K_0$  wird ein Rechtssystem mit Ursprung in der vorderen linken Ecke des Blechs definiert. Die x-Achse zeigt in die Blechbreitenrichtung und die y-Achse in die Blechlängsrichtung, sodass die z-Achse senkrecht nach oben zeigt. Die Ausrichtung sowie der Ursprung des

globalen Koordinatensystems bleiben über den gesamten Umformprozess konstant. Die Ausrichtung des globalen Koordinatensystems sowie der Aufbau des Datenformats ist in der nachfolgenden Abbildung 45 schematisch dargestellt.

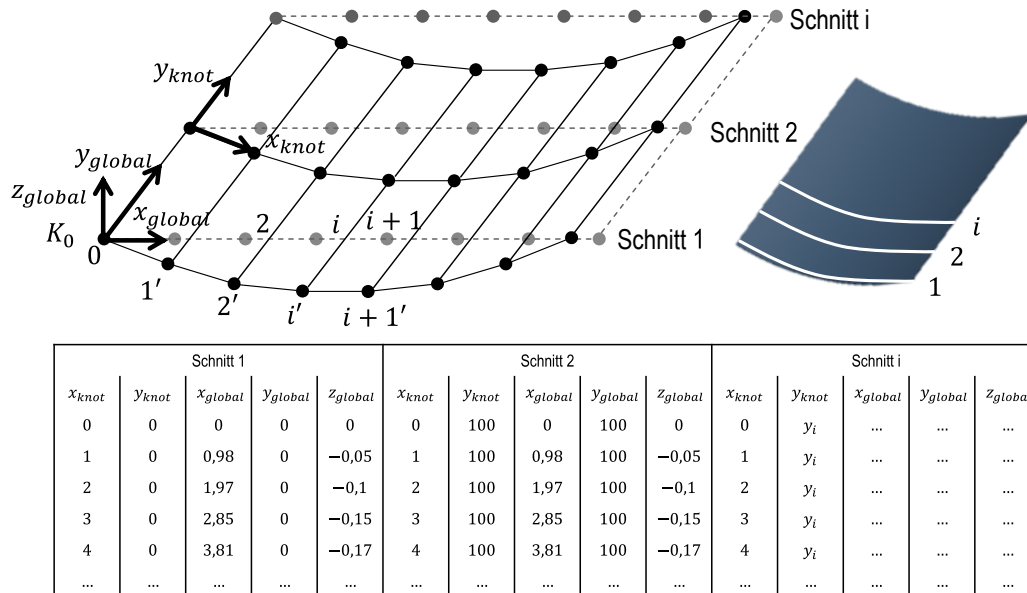


Abbildung 45: Schematische Darstellung der Definition des Datenformats

Neben dem ortsfesten globalen Koordinatensystem wird zudem ein ebenes knotenpunkt-basiertes Koordinatensystem definiert. Es handelt sich hierbei um ein festes Raster, das auf das ebene Blech projiziert wird. Das Raster mit einem definierten Punktabstand verhält sich während der Umformung nicht ortsfest, sondern ist vergleichbar mit einem numerischen Simulationsmodell an die Oberfläche des Blechs gebunden. Für jeden Knotenpunkt wird neben der Position innerhalb des Rasters auch die Lage bezüglich des ortsfesten globalen Koordinatensystems erfasst. Durch Durchführung eines Umformschritts wird die Lage des Knotenpunktes bezüglich des globalen Koordinatensystems verändert, jedoch nicht die Position auf der Oberfläche des Blechs. Somit ist es möglich, einen definierten Eingriffspunkt auf dem Blech zu definieren, ohne die Lage des Punktes in Relation zum globalen Koordinatensystem zu kennen.

Vor Beginn der Umformung wird die Kontur des ebenen Blechs in das Datenformat als zweidimensionale Matrix überführt und im Laufe des Umformprozesses kontinuierlich angepasst.

Aufbauend auf dem vorgestellten Datenformat sowie dem globalen Koordinatensystem kann das geometrische Ersatzmodell unter Verwendung der in Kapitel 3 eingeführten Modellgrößen definiert werden. Hierzu ist es notwendig, eine mathematisch eindeutige

Beschreibung der lokalen Durchbiegung und der Blechaufbiegung infolge eines einzelnen Umformschritts zu entwickeln.

Entsprechend der Definition der lokalen Durchbiegung werden die Knotenpunkte, die zwischen den beiden Auflagepunkten liegen, plastisch umgeformt und dabei in vertikaler Richtung verschoben. Die Verschiebungskurve ist dabei von der Entfernung zum Auflagepunkt abhängig und entspricht am tiefsten Punkt der lokalen Durchbiegung  $t$ . Zur mathematischen Beschreibung der Verschiebungskurve zwischen den Auflagepunkten wird basierend auf einem Abgleich des Umformungsverhaltens bei den experimentellen und numerischen Versuchsdaten ein Hyperbelansatz verwendet.

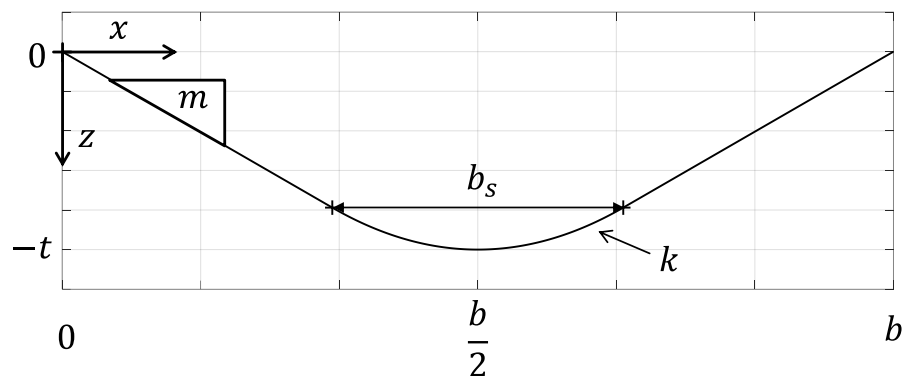


Abbildung 46: Mathematische Beschreibung der lokalen Durchbiegung  $t$  als Hyperbel

Die Funktion der lokalen Durchbiegung  $z(x)$  wird zwischen den beiden Auflagepunkten mit dem Abstand  $b$  definiert. Der Übergang des linearen zum quadratischen Ansatz orientiert sich an der Breite des Umformschwertes  $b_s$ , da das Umformschwert bei hohen Schwertverschiebungen mit der vollständigen kreisförmigen Kontaktfläche auf dem Blech aufliegt. Der lineare Faktor des quadratischen Funktionsansatzes  $k$  sowie der lineare Faktor des linearen Funktionsansatzes  $m$  werden so festgelegt, dass an den Übergangspunkten keine Unstetigkeiten vorhanden sind. Hierzu wird ein iteratives Lösungsverfahren verwendet, das die Faktoren  $m$  und  $k$  unter Einhaltung der lokalen Durchbiegung  $t$  iterativ annähert, sodass keine Unstetigkeitsstellen an den Grenzen der einzelnen Gültigkeitsbereiche auftreten können.

Die Definition der Einzelfunktionen mit Angabe der Gültigkeitsbereiche ist in Formel 13 aufgeführt.

$$z(x) = \left\{ \begin{array}{ll} -m x & \text{für } x < \frac{b - b_s}{2} \\ k \left( \frac{b}{2} - x \right)^2 - t & \text{für } \frac{b - b_s}{2} < x \leq \frac{b}{2} \\ k \left( x - \frac{b}{2} \right)^2 - t & \text{für } \frac{b}{2} < x \leq \frac{b + b_s}{2} \\ m \left( x - \frac{b + b_s}{2} \right) - t + \frac{k b_s}{2} & \text{für } x \geq \frac{b + b_s}{2} \end{array} \right.$$

**Formel 13: Lokale Durchbiegung in Relation zur Abschnittsbreite**

Durch die mathematische Definition der Verschiebungskurve  $z(x)$  in Relation zur Abschnittsbreite zwischen den Auflagepunkten kann die lokale Durchbiegung eindeutig beschrieben werden. Die Verschiebungskurve wird für jeden Umformschritt entsprechend der Modellgröße der lokalen Durchbiegung  $t$  bestimmt und für eine einfache Subtraktion der Knotenpunkte relativ zur z-Richtung des globalen Koordinatensystems verwendet. Der vollständige Ablauf zur Durchführung eines Umformschritts wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts vorgestellt.

Zusätzlich zur lokalen Durchbiegung mithilfe der Verschiebungskurve  $z(x)$  wird die Aufbiegung der nicht im Eingriff befindlichen Bereiche durch Verwendung einer Elementardrehung mit den Aufbiegungswinkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  nachgebildet. Entsprechend der Definition des globalen Koordinatensystems handelt es sich um eine Drehung der um die y-Achse, sodass nach [87] die entsprechende Transformationsmatrix der Elementardrehung definiert ist als:

$$T_m = \begin{bmatrix} \cos \alpha_m & \sin \alpha_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_m & \cos \alpha_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{mit } m = 1,2$$

$T_m$  Transformationsmatrix                       $\alpha$  Aufbiegungswinkel

**Formel 14: Transformationsmatrix**

Ein beliebiger Knotenpunkt  $P_i$  in Relation zum globalen Koordinatensystem kann durch Verwendung der Transformationsmatrix  $T_m$  und Anwendung einer Matrizenmultiplikation in Anlehnung an [88] rotiert werden:

$${}^{n+1}_i P = {}^{n+1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = T_m {}^n \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{mit } m = 1,2$$

**Formel 15: Rotation eines einzelnen Knotenpunktes**

Da die Knotenpunkte bezüglich des globalen Koordinatensystems ausgerichtet sind und die Elementardrehung mit Ursprung in dem jeweiligen Auflagepunkt durchgeführt wird, muss vor Rotation die betreffende Punktsektion in den Drehpunkt der Elementardrehung virtuell verschoben werden. Die Selektion sowie die Vorausrichtung der Sektionen zur Durchführung eines einzelnen Umformschritts sind innerhalb eines Ablaufdiagramm in der nachfolgenden Abbildung 47 schematisch aufgeführt.

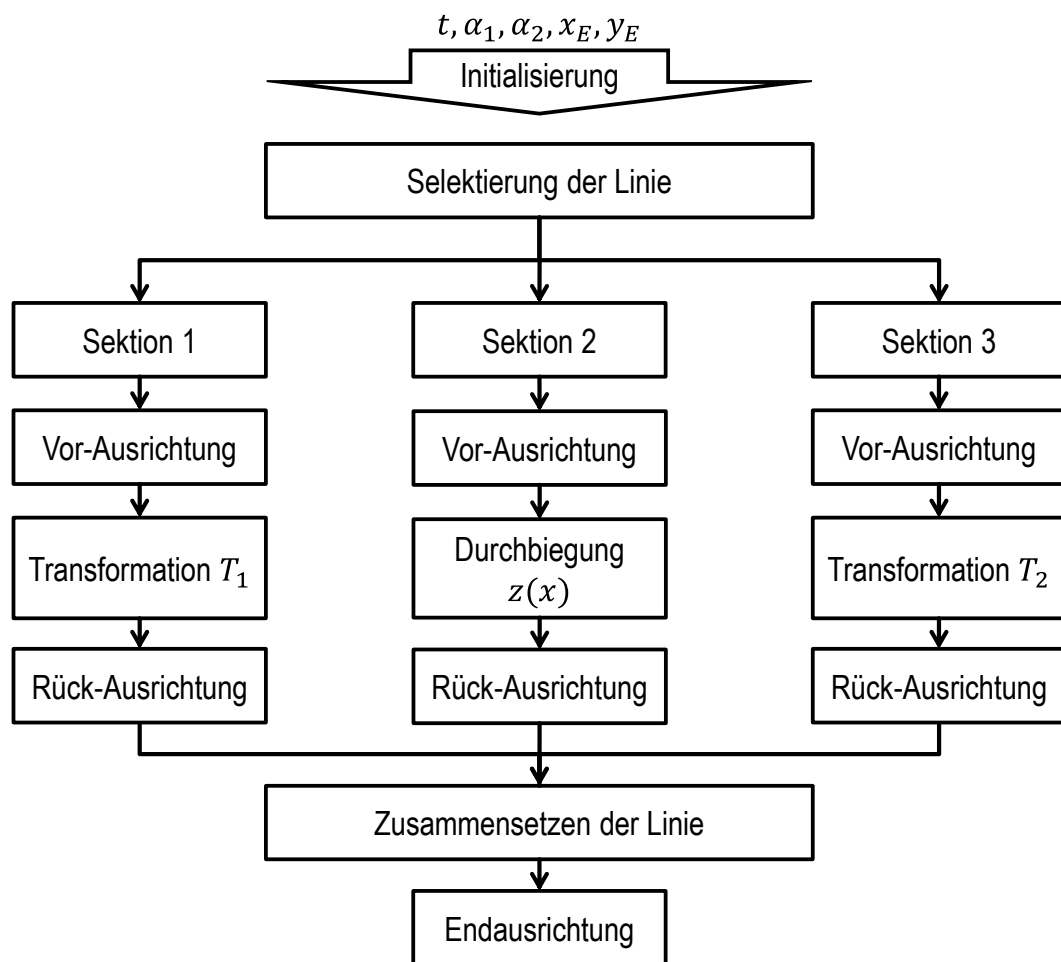


Abbildung 47: Schematisches Ablaufdiagramm zur Durchführung eines einzelnen Umformschritts

Zur Initialisierung eines Umformschritts sind neben den geometrischen Modellparametern  $t$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  auch die Koordinaten des Eingriffspunktes auf dem Blech  $x_E$  und  $y_E$  in Relation zu dem Rasterkoordinatensystem definiert.

Basierend auf der Länge des Umformabschnitts und der Koordinate des Eingriffspunktes in Längensrichtung  $y_E$  werden die entsprechenden Linien der zweidimensionalen Schnitte selektiert. Unter Angabe des Backenabstandes sowie der Koordinate des Eingriffspunktes in Breitenrichtung  $x_E$  können die jeweiligen Bereiche der linken Aufbiegung, lokalen Durchbiegung sowie rechten Aufbiegung selektiert werden. Für jede der drei Sektionen wird eine gesonderte Abfolge mathematischer Operatoren durchgeführt. Innerhalb der Vorausrichtung der Sektion 1 werden alle Knotenpunkte bezüglich Ihrer Ausrichtung zum globalen Koordinatensystem mit Ursprung in den Auflagepunkt verschoben sowie alle Koordinaten bezüglich der x-Achse invertiert. In der Vorausrichtung der Sektion 2 werden alle Knotenpunkte so verschoben und gedreht, dass eine horizontale Ausrichtung der Knotenpunkte in beiden Auflagepunkten sichergestellt ist. Dadurch wird berücksichtigt, dass bei der Umformung das Blech immer horizontal auf den Auflagebacken aufliegt und die Schwertverschiebung senkrecht dazu eingebracht wird. Die Vorausrichtung der Sektion führt analog zur Vorausrichtung der Sektion 1 einen Koordinatenursprung im Drehpunkt der Elementardrehung herbei.

Im Anschluss können die in Elementardrehung der Sektionen 1 und 3 sowie der Durchbiegung der Sektion 2 in Abhängigkeit der Verschiebungskurve  $z(x)$  durchgeführt werden. Bei Sektion 2 wird bei allen Knotenpunkten der Betrag der Verschiebungskurve  $z(x)$  von den Koordinaten bezüglich des globalen Koordinatensystems abgezogen. Hierbei wird in Referenz zum zweidimensionalen Aufbau des Modells die Knotenpunktkoordinaten nur bezüglich der x-Achse und der z-Achse verändert. Alle y-Werte bleiben konstant und werden bei den Operationen durchgeschliffen.

Vor Zusammensetzen der Sektionen zu einer durchgängigen Linie werden alle vorherigen Operationen zur Vorausrichtung invertiert durchgeführt. Im Rahmen des Zusammensetzens werden die einzelnen Sektionen so verschoben, dass ausgehend von dem Ursprung des globalen Koordinatensystems aus den zusammengesetzten Sektionen ein kontinuierlicher Verlauf ohne Unstetigkeitsstellen ausgebildet wird.

Durch die Durchführung der Operationen der Transformation und Anwendung der Verschiebungskurve wird die Ausrichtung des Blechs verändert. Zur besseren Vergleichbar-

keit bei der Bestimmung von Modellabweichungen sowie einer späteren Prozessplanung wird im Anschluss eine einheitliche Ausrichtung des Blechs durchgeführt, sodass der erste und der letzte Knotenpunkt des Blechs in Breitenrichtung auf der x-y-Ebene des globalen Koordinatensystems liegen (vgl. Abbildung 45).

Das aufgebaute geometrische Ersatzmodell wird zur vereinfachten Erprobung innerhalb der programmiertechnischen Entwicklungsumgebung *MATLAB* der Fa. *MathWorks GmbH* implementiert, da innerhalb von *MATLAB* die notwendigen Matrizenoperatoren sowie das Handling von großen mehrdimensionalen Datenstrukturen anwendungsorientiert umgesetzt werden können [89].

Der Aufbau des geometrischen Ersatzmodells ermöglicht die geometrische Formänderung der Blechkontur für eine beliebige Anzahl von Umformschritten in Abhängigkeit der Modellparameter  $t$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  sowie des Eingriffspunktes. Die Prozessstabilität wird dabei durch das definierte Datenformat für beliebige Blechabmessungen und Anzahl von durchgeführten Prozessschritten gewährleistet.

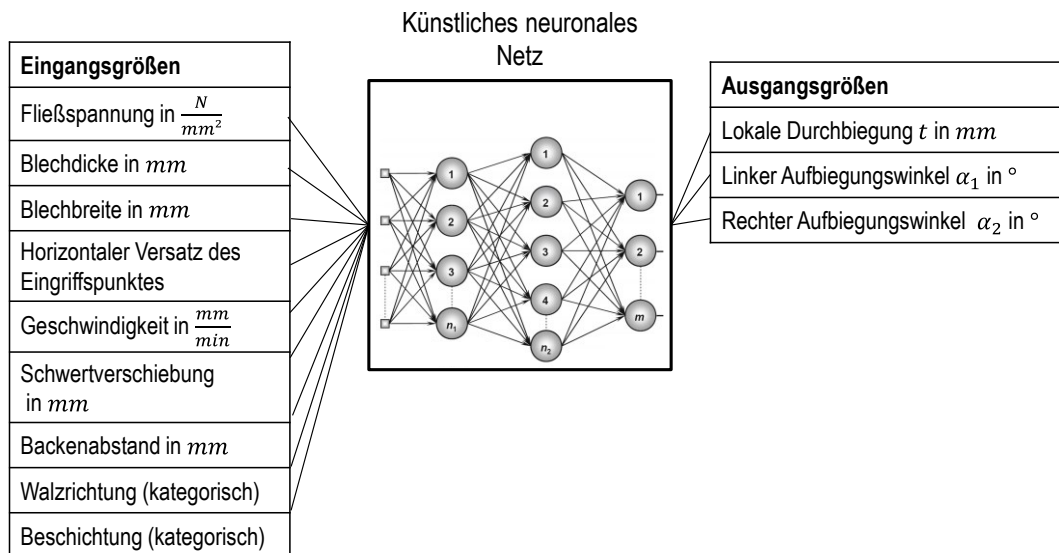
## 6.2 Definition und Training eines künstlichen neuronalen Netzes

Neben dem Aufbau des geometrischen Ersatzmodells zur Abbildung der geometrischen Formänderung der Blechkontur besteht die Notwendigkeit, die Modellparameter entsprechend der Blechkonfiguration abzuschätzen. Aus den Untersuchungen zur Charakterisierung der kaltplastischen Umformung konnten die quantitativen Effekte der Einflussfaktoren auf die geometrischen Modellgrößen identifiziert werden. Dementsprechend wird ein mathematisches Modell benötigt, mit dem die geometrischen Modellgrößen in Abhängigkeit der Ausprägung der Einflussfaktoren abgeschätzt werden kann. Neben einer hohen Modellgenauigkeit besteht für die Einbindung in eine Prozesssteuerung zudem die Notwendigkeit, dass das mathematische Modell auch zur vereinzelt Extrapolation von Faktorausprägungen geeignet ist. Dies begründet sich daraus, dass bei einer industriellen Anwendung des freien Biegens aufgrund der sehr kleinen Losgrößen eine sehr große Streubreite an unterschiedlichsten Ausprägungen des Parameterraums zu erwarten sind, die nicht alle im Rahmen eines Trainings berücksichtigt werden können.

Im ersten Zuge der Entwicklung eines mathematischen Modells zur Abschätzung der geometrischen Modellparameter wird daher ein multipler Regressionsansatz durch Verwendung der innerhalb der Auswertung der Charakterisierungsversuche erstellten kubi-

schen Regressionsmodelle genutzt. Die Regressionsmodelle der Charakterisierungsversuche ermöglichen aufgrund der hohen Modellgüte eine schnelle Abschätzung der Modellgrößen, jedoch führt die eingeschränkte Flexibilität aufgrund fest parametrierter Faktoren zu einer erheblichen Instabilität bei Extrapolation einzelner Faktorausprägungen des Parameterraums, die eine Verwendung innerhalb einer Prozesssteuerung ausschließen. Zur Erweiterung der Komplexität des mathematischen Modells und daraus abgeleiteten Möglichkeit zur Extrapolation einzelner Faktorausprägungen wird daher ein künstliches neuronales Netz verwendet, deren Definition und Training in dem nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

Der Aufbau des künstlichen neuronalen Netzes basiert entsprechend der theoretischen Grundlagen in Kapitel 4.5 auf der Definition der Eingangs- sowie Ausgangsgrößen, die in der nachfolgenden Abbildung 48 aufgeführt sind.



**Abbildung 48: Definition der Eingangs- und Ausgangsgrößen des künstlichen neuronalen Netzes**

In Referenz zu den Ergebnissen aus Charakterisierung der kaltplastischen Umformung werden die Einflussfaktoren der Fließspannung, Blechdicke, Blechbreite, Horizontaler Versatz des Eingriffspunktes, Umformgeschwindigkeit, Verschiebung des Umformschwertes sowie der Abstand der Auflagebacken als absolute Werte eingebunden. Die Beschichtung wird aufgrund der Streubreite der gemessenen Rauigkeiten als normierter Faktor berücksichtigt, wobei 1 einer gestrahlten Oberfläche, 2 einer mit Primer beschichteten Oberfläche und der Wert 3 einer verzünderten Oberfläche entspricht. Bei der Walzrichtung wird ebenfalls ein normierter Faktor eingesetzt, bei dem 1 eine Blechentnahme längs und 2 eine Blechentnahme quer zur Walzrichtung darstellt.

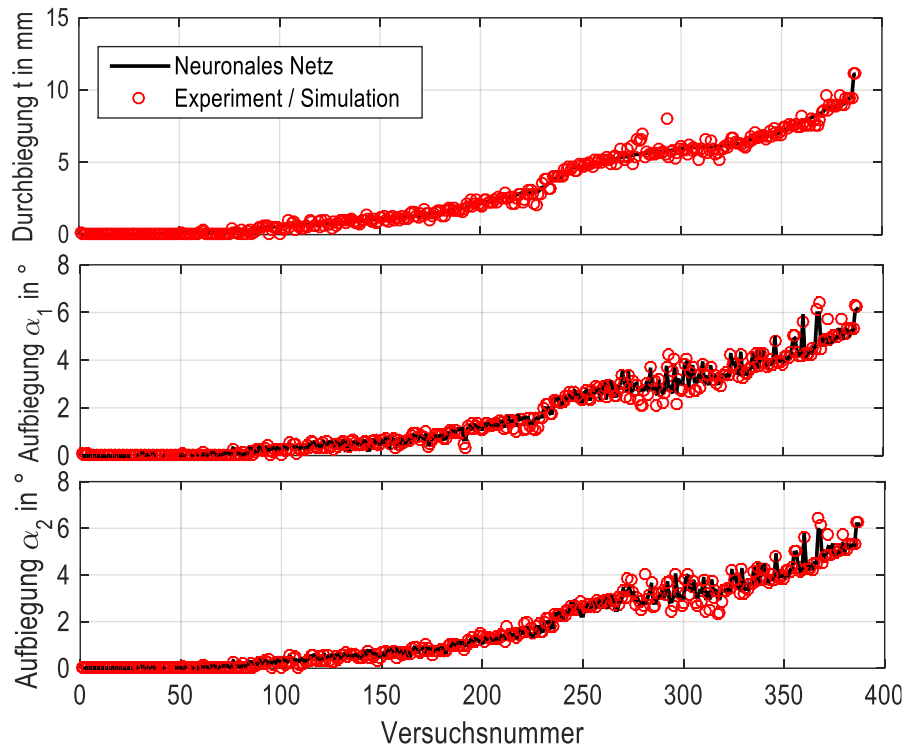
Als Ausgangsgrößen werden die drei Modellgrößen des geometrischen Ersatzmodells  $t$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  definiert. Zwischen den Eingang- und Ausgangsschichten wird aufgrund der guten Konvergenzeigenschaften ein zehnschichtiger Aufbau vorgesehen.

Im Rahmen der Charakterisierungsversuche werden die geometrischen Modellgrößen bereits in Relation der Einflussfaktoren ausgewertet, sodass für die experimentellen und numerischen Komplexe bereits Auflistungen der Modellgrößen in Relation zu der jeweiligen Parameterkombination des Parameterraums vorhanden sind. Der Vergleich der experimentellen und numerischen Untersuchung hinsichtlich der absoluten Effekte hat gezeigt, dass zu einer Modellbildung sowohl die experimentellen als auch die numerischen Ergebnisse eingebunden werden sollten, daher werden beiden untersuchten Parameterräume innerhalb eines gemeinsamen Parameterraums vereint. Als Ergebnis kann eine Auflistung von 387 Samples der Modellgrößen in Relation der neun definierten Eingangsgrößen erstellt werden, die zum Training eines künstlichen neuronalen Netzes genutzt werden können.

Zum Aufbau und Training des künstlichen neuronalen Netzes wird die *Neural Fitting Toolbox* in *MATLAB* eingesetzt, damit die ermittelten Gewichtungsfunktionen direkt zur Nutzung innerhalb des geometrischen Ersatzmodells exportiert werden können. Zur Ermittlung der Gewichtungsfunktionen wird der gesamte Datenumfang zu 70% zum Training mithilfe der Levenberg-Marquardt Methode, 15% zur Validierung und 15% zum abschließenden Testen aufgeteilt.

Als Ergebnis des Trainings wird eine Modellgenauigkeit des künstlichen neuronalen Netzes mit  $R^2 = 0,9956$  erreicht, sodass die Trainingsdaten mit einer sehr hohen Genauigkeit nachgebildet werden können. Die hohe Modellgenauigkeit kann darauf zurückgeführt werden, dass die Parameterkombinationen durch die statistische Versuchsplanung vorgegeben werden und eine somit eine gleichmäßige Verteilung der einzelnen Parameterkombinationen innerhalb des Parameterraums vorliegt.

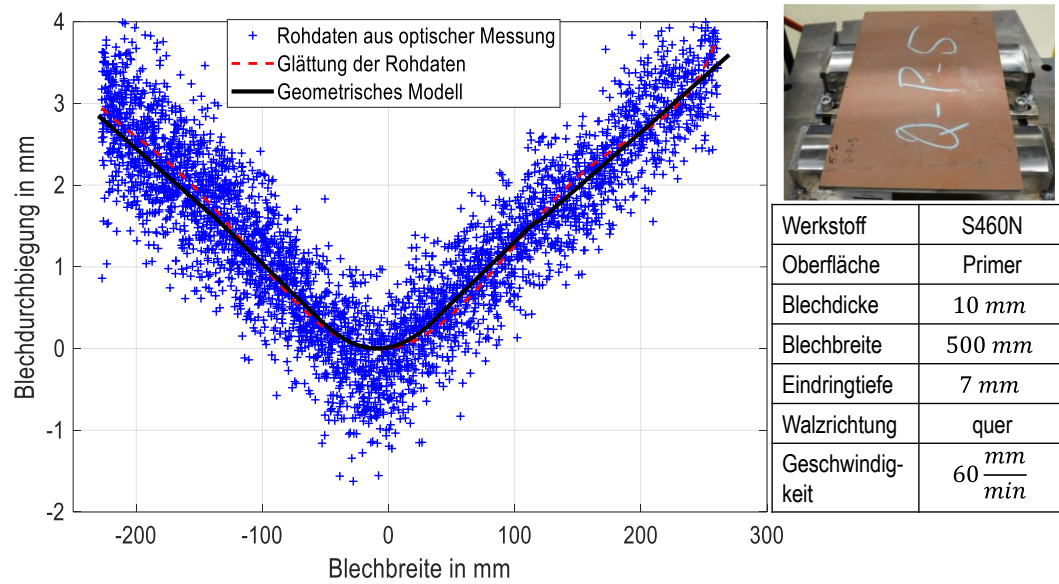
Für eine Bewertung des mathematischen Modells zur Abschätzung der Modellparameter ist in der nachfolgenden Abbildung 49 die Nachbildung der experimentellen und numerischen Versuchsergebnisse dargestellt. Zur besseren Visualisierung wird zusätzlich eine Sortierung der Versuche in aufsteigender Reihenfolge der prognostizierten lokalen Durchbiegung  $t$  durch das künstliche neuronale Netz angewandt.



**Abbildung 49: Abbildung der Charakterisierungsversuche durch das künstliche neuronale Netz**

Aus der Gegenüberstellung der prognostizierten Modellgrößen durch das künstliche neuronale Netz (schwarze Linie) mit den experimentellen und numerischen Versuchsergebnissen (o) in Relation zu der Versuchsnummer ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen. Vereinzelt Ausreißer der experimentellen und numerischen Versuchsergebnisse werden durch das künstliche neuronale Netzwerk identifiziert und nicht gewichtet. Daraus lässt sich schließen, dass der vorhandene Umfang an Daten zum Training ausreichend ist und somit die notwendige Stabilität des Modells gewährleistet ist. Daher ist das trainierte künstliche neuronale Netz als mathematisches Modell zur Abschätzung der Modellparameter geeignet.

Im Anschluss werden daher die Gewichtungsmatrizen des künstlichen neuronalen Netzes exportiert und zu Verwendung innerhalb des geometrischen Ersatzmodells eingebunden. Durch das geometrische Ersatzmodell kann somit das Umformverhalten für spezifische Blechkonfigurationen definiert prognostiziert werden. Die Funktionsweise des geometrischen Ersatzmodells in Kombination mit dem künstlichen neuronalen Netz ist in der nachfolgenden Abbildung 50 anhand der Prognose einer exemplarischen Blechkonfiguration aus den experimentellen Charakterisierungsversuchen aufgeführt.

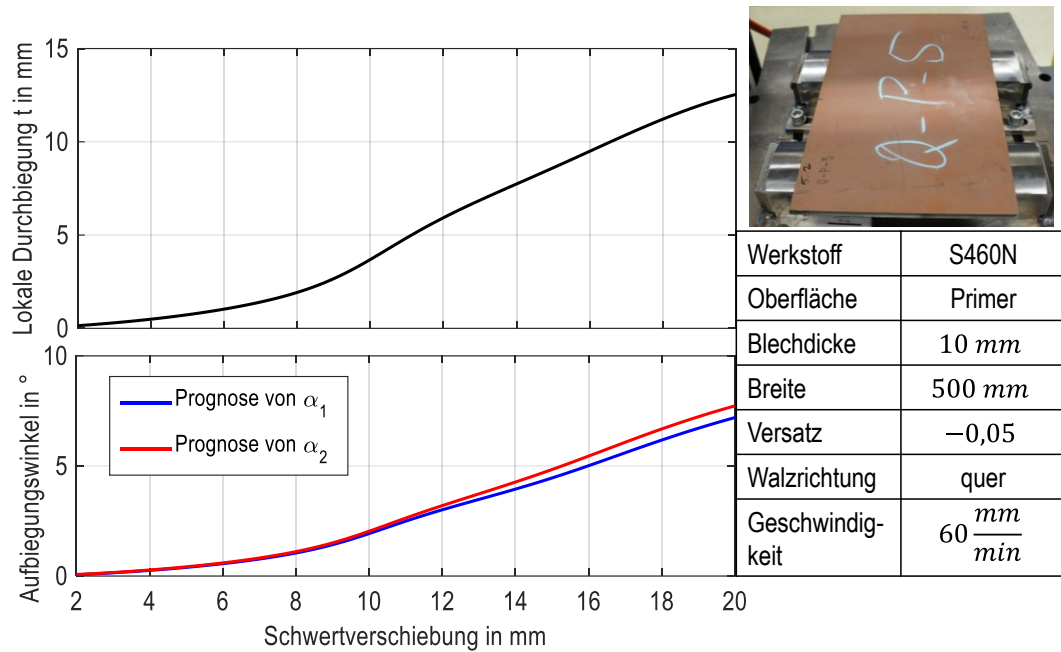


**Abbildung 50: Umformprognose eines Charakterisierungsversuches auf Basis des geometrischen Ersatzmodells und des künstlichen neuronalen Netzes**

Die Blechdurchbiegung in Relation der Blechbreite wird analog zu den vorherigen Darstellungen als zweidimensionaler Schnitt visualisiert. Die Rohdaten der optischen Vermessung (+) werden aufgrund der bereits erwähnten Streuung der Messdaten mithilfe eines kubischen Splines geglättet (rot gestrichelte Linie). Die Prognose des geometrischen Ersatzmodells (schwarze Linie) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem optisch gemessenen Umformverhalten der Platte. Es treten nur minimale Abweichung zwischen der Kurvenglättung und dem prognostizierten Verlauf des Umformverhaltens auf, die auf mögliche Unebenheiten des unverformten Blechs zurückgeführt werden können, da sie nur in den äußeren Sektionen auftreten, in denen kein direkter Eingriff durch das Werkzeug auftritt. Daher kann die Gültigkeit des künstlichen neuronalen Netzwerkes für die Nachbildung der Charakterisierungsversuche in Kombination mit dem geometrischen Ersatzmodells nachgewiesen werden.

Die Möglichkeit des künstlichen neuronalen Netzwerkes ist hierbei nicht nur auf die punktuelle Prognose der Modellparameter für einzelne Werte der Schwertverschiebung beschränkt. Im Rahmen der experimentellen Charakterisierungsversuche kann die charakteristische Form der spezifischen Prozesskurve hinsichtlich der Prozesskraft in Relation zur Schwertverschiebung identifiziert werden (vgl. Abbildung 29). Durch wiederholte Berechnung des künstlichen neuronalen Netzes bei schrittweiser Erhöhung der Schwertverschiebung kann eine rein geometrisch basierte Prozesskurve generiert werden. Die Generie-

Die Prozesskurve für den zuvor vorgestellten Charakterisierungsversuch ist in der nachfolgenden Abbildung 51 aufgeführt.



**Abbildung 51: Generierung einer Prozesskurve zur Abschätzung der Modellparameter in Abhängigkeit der Schwertverschiebung**

Die dargestellte Prozesskurve der Modellparameter in Relation zur Schwertverschiebung berücksichtigt ebenfalls die charakteristischen Merkmale einer charakteristischen Prozesskurve bezüglich der plastischen Umformung. Ab einer Schwertverschiebung von 2 mm wird erst das Fließkriterium überschritten und die plastische Umformung initiiert. Das spezifische Abknicken der Kraft-Schwertverschiebungskurve wird bei der rein geometrischen Prozesskurve durch eine Zunahme der jeweiligen Modellgrößen-Schwertverschiebungskurve abgebildet.

Basierend auf den geometrischen Prozesskurven des künstlichen neuronalen Netzes kann beispielsweise die notwendige Schwertverschiebung bei Vorgabe einer lokalen Durchbiegung  $t$  ermittelt werden. Dies ist besonders im Rahmen einer automatisierten Prozesssteuerung von Bedeutung, da innerhalb der Prozessplanung die notwendigen Stellgrößen des Prozesses (insb. Schwertverschiebung, Eingriffspunkte, etc.) zum schrittweisen Erreichen einer Sollkontur berechnet werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Abbildung der kaltplastischen Verfestigung dar, deren Modellansatz im nachfolgenden Abschnitt genauer erläutert wird.

### 6.3 Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung

Im Rahmen der numerischen Charakterisierungsuntersuchungen (vgl. Kapitel 5.3) wird identifiziert, dass die kaltplastische Verfestigung eine Zunahme des spezifischen Fließkriteriums bewirkt, die auf Basis einer einzigen Prozesskurve ermittelt werden kann. Zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung innerhalb des geometrischen Ersatzmodells wird daher ebenfalls ein Ansatz basierend auf der geometrischen Prozesskurve entwickelt.

Bei der Generierung der Prozesskurven für größere Schwertverschiebungen zeigt sich jedoch, dass durch das künstliche neuronale Netz nicht plausible Verläufe der Modellparameter in Relation der Schwertverschiebung prognostiziert werden. Die ursprüngliche Prognose des künstlichen neuronalen Netzes ist in Abbildung 52 am Beispiel der lokalen Durchbiegung  $t$  dargestellt.

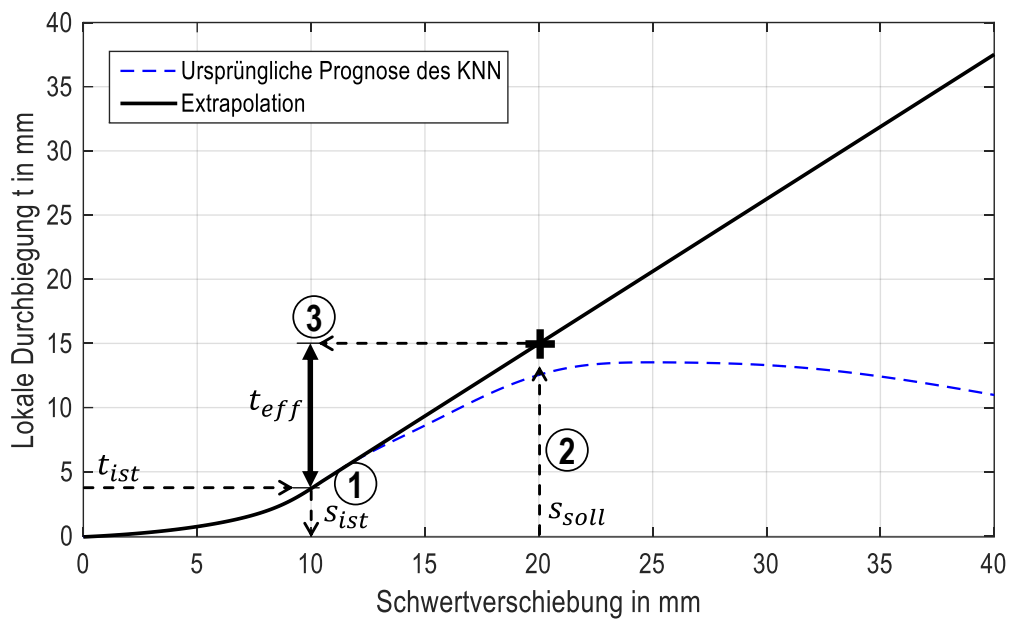


Abbildung 52: Ansatz zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung am Beispiel der lokalen Durchbiegung  $t$

Entsprechend des Verlaufes der lokalen Durchbiegung (blau gestrichelt) ist erkennbar, dass die plastische Umformung bei größeren Schwertverschiebungen abflacht. Dies begründet sich daraus, dass innerhalb des Trainings nur maximale Schwertverschiebungen von 20 mm berücksichtigt werden. Zur Korrektur der Prozesskurve wird daher eine lineare Extrapolation eingesetzt, die ab dem Punkt des maximalen Anstiegs die ursprüngliche Prognose ersetzt (schwarze Linie). Diese Annahme basiert auf dem charakteristischen Verlauf der Prozesskraft-Schwertverschiebungskurve, die nach dem Erreichen des Fließ-

kriteriums abflacht und eine konstante Zunahme der plastischen Umformung in Relation zur Schwertverschiebung ausbildet. Durch die Extrapolation der geometrischen Prozesskurve können die Modellparameter somit auch für größere Schwertverschiebungen abgeschätzt werden.

Der Ansatz zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung beruht darauf, dass unabhängig von der Prozessschrittanzahl eine einzige geometrische Prozesskurve ausgebildet wird. Dies bedeutet, dass mit zunehmenden Umformgrad auch höhere Schwertverschiebungen notwendig sind, um eine weitere plastische Umformung zu erreichen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die Vorverformung im Blech in Relation zur lokalen Durchbiegung  $t$  vor Durchführung des Umformschritts zu identifizieren. Die Vorverformung wird dazu am nachfolgenden Eingriffspunkt durch eine eigene Funktion ausgelesen. Hierbei ist zu beachten, dass das Blech zuvor horizontal an den Auflagebacken ausgerichtet wird. Basierend auf der Vorverformung des Blechs  $t_{ist}$  kann die aktuelle Position auf der Fließkurve mit der zugehörigen Schwertverschiebung  $s_{ist}$  identifiziert werden (siehe Abbildung 52, 1). Die beiden Modellparameter der vorgebogenen Aufbiegung  $\alpha_{1ist}$  und  $\alpha_{2ist}$  werden durch Einsetzen der Schwertverschiebung  $s_{ist}$  in die extrapolierten Aufbiegungswinkel-Schwertverschiebungskurven abgeleitet. Im Anschluss können die Modellparameter basierend auf den extrapolierten geometrischen Prozesskurven für die Schwertverschiebung  $s_{soll}$  ermittelt werden (siehe Abbildung 52, 2). Die effektive lokale Durchbiegung  $t_{eff}$  des nachfolgenden Umformschritts ist entsprechend der Darstellung in Abbildung 52 eine Differenz aus der Prognose bei der Soll-Schwertverschiebung  $s_{soll}$  und der bereits vorhanden lokalen Durchbiegung  $t_{ist}$  (siehe Abbildung 52, 3). Die Berechnung der effektiven Aufbiegungswinkel  $\alpha_{1eff}$  und  $\alpha_{2eff}$  erfolgt simultan dazu über die extrapolierten geometrischen Prozesskurven der Aufbiegung.

Durch dieses Verfahren können somit die effektiven geometrischen Modellparameter in Relation zur Schwertverschiebung unter Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung bei einem mehrstufigen Umformprozess ermittelt werden. Durch Extrapolation der geometrischen Prozesskurven besteht eine Grundlage zur Abschätzung der geometrischen Modellparameter auch für höhere Schwertverschiebungen, die aufgrund des linearen Ansatzes keine Prozessinstabilitäten wie bspw. bei einem kubischen Modellansatz hervorrufen können. Neben der Ermittlung der effektiven Durchbiegung kann diese Methode auch alternativ zur Korrektur der Schwert bei Vorgabe der effektiven Modellparameter eines mehrstufigen Umformprozesses genutzt werden. Dies betrifft vor allem die automatisierte

Prozessplanung, bei der die Schwertverschiebung in Relation der Sollwerte der geometrischen Modellparameter für einen einzelnen Umformschritt vorgegeben werden muss, um eine die geforderte Sollkontur des Blechs zu erreichen.

#### 6.4 Schnittstelle zur Einbindung der optischen Vermessung

Die Automatisierung der Umformpresse und der Krananlage beinhaltet den Einsatz von dreidimensionalen Laserscannern zur Erfassung der realen Blechkontur mithilfe der optischen Vermessung. Durch die Verwendung der optischen Vermessung im Rahmen der experimentellen Charakterisierungsversuche konnte aufgrund des Messrauschens und der Kantenproblematik die Notwendigkeit zur Entwicklung eines Verfahrens zur Bearbeitung der optisch erfassten Punktwolken herausgestellt werden. Zu diesem Zweck wird innerhalb dieses Abschnitts eine Schnittstelle zur Einbindung der optischen Vermessung in das geometrische Ersatzmodell vorgestellt.

Basierend auf der Punktwolke der optischen Vermessung wird analog zur Definition des Datenformats in Abschnitt 6.1 eine vereinfachte dreidimensionale Auswertung der Messdaten basierend auf mehreren aufeinanderfolgenden zweidimensionalen Schnitten vorgesehen. Zu diesem Zweck wird zunächst die Selektion von zweidimensionalen Punktwolken aus der dreidimensionalen Punktwolke durchgeführt (siehe Abbildung 53)

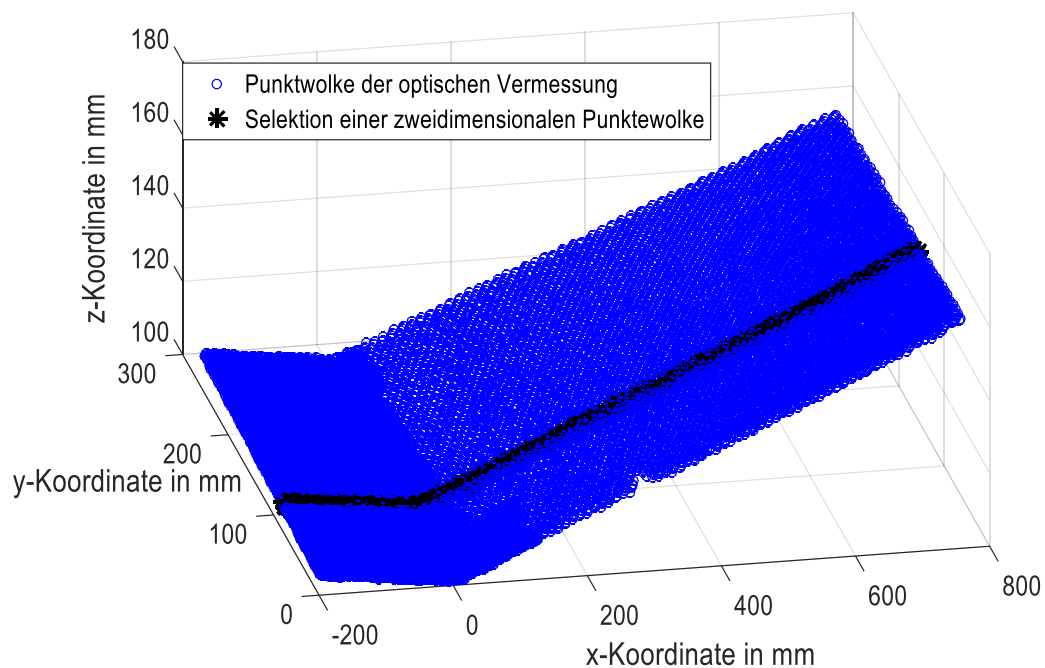


Abbildung 53: Selektion einer einzelnen Linie aus der optischen Vermessung

Zur Selektierung einer zweidimensionalen Punktwolke wird zunächst die dreidimensionale Punktwolke so verschoben, dass die vordere Blechkante im Ursprung des globalen Koordinatensystems anliegt. Im Anschluss wird die dreidimensionale Punktwolke in eine definierte Anzahl von Streifen unterteilt und die y-Koordinaten des Streifens über die gesamte Streifenbreite gemittelt. Als Ergebnis liegt nun eine einzelne zweidimensionale Punktwolke je gemittelter y-Koordinate vor.

Die beschriebenen Merkmale der optischen Vermessung verursachen neben einer Streuung der Messpunkte zudem eine Inkonsistenz bezüglich der Blechbreite. Innerhalb des geometrischen Ersatzmodells ist das Datenformat so definiert, dass zwar die Lage der Knotenpunkte zum globalen Koordinatensystem verändert wird, jedoch der Betrag des Knotenpunktabstandes innerhalb des Netzes konstant bleibt. Dementsprechend ist die abgewinkelte Breite, also die Summe des Abstandes der einzelnen Punkte zueinander, über die gesamte Umformung konstant. Bei der optischen Vermessung können je nach Ausrichtung des Blechs und Auftreffwinkel des Laserscanners je Messung unterschiedliche Werte für die abgewinkelte Blechbreite auftreten. Aus diesem Grund müssen die Messdaten auf die abgewinkelte Blechbreite des idealisierten geometrischen Ersatzmodells gefittet werden. Die Zwischenschritte zur Einbindung der optischen Vermessung in das geometrische Ersatzmodell sind in der nachfolgenden Abbildung 54 aufgeführt.

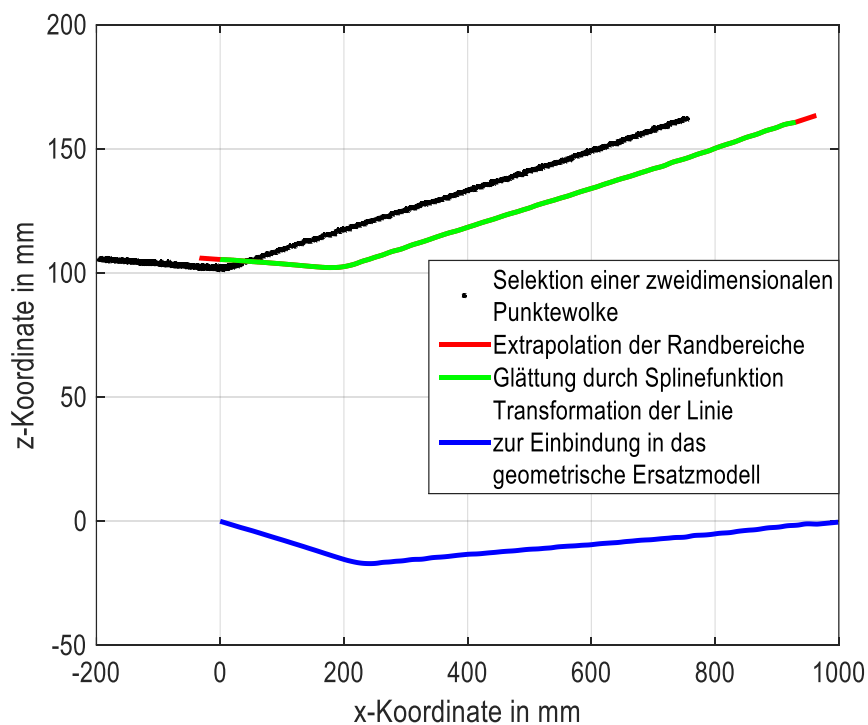


Abbildung 54: Zwischenschritte zur Einbindung der optischen Vermessung in das geometrische Ersatzmodell

Aufbauend auf der selektierten zweidimensionalen Punktwolke (\*) wird zunächst eine Kompensation von Messausreißern mittels gleitenden Mittelwertes durchgeführt. Mithilfe der vorbereinigten Punkte wird im Anschluss eine Glättung auf Basis von kubischen Splines angewandt (grüne Linie). Dies begründet sich daraus, dass zur Vermeidung von Instabilitäten für jede x-Koordinate nur eine einzige y-Koordinate vorhanden sein darf. Zudem kann so die Punktdichte frei parametrierbar und an die Auflösung des geometrischen Ersatzmodells angepasst werden.

Um eine Konsistenz hinsichtlich der abgewickelten Breite zu gewährleisten, wird basierend auf dem geometrischen Ersatzmodell eine Ergänzung der Randbereiche durch eine lineare Extrapolation eingesetzt (rote Linie). Hierbei ist ein linearer Ansatz zur Extrapolation möglich, da die Randbereiche aufgrund der Klammern zum Anschlagen des Blechs an den Kettenzügen der Krananlage nicht umgeformt werden können.

Basierend auf der geglätteten und extrapolierten Linie kann im Anschluss die Einbindung in das geometrische Modell erfolgen. Zu diesem Zweck wird ausgehend von dem festen Knotenpunktraster des geometrischen Modells eine Zuordnung zu den Messwerten der geglätteten Linie hergestellt und in das Datenformat des geometrischen Ersatzmodells überführt.

Dieser Vorgang wird für alle zweidimensionalen Schnitte wiederholt und eine über die gesamte Länge der Punktwolke gemittelte Referenzlinie erzeugt. Die gemittelte und in das Datenformat des geometrischen Ersatzmodells überführte Referenzlinie kann zur Einbindung der optischen Vermessung verwendet werden.

Eine mögliche Anwendung ist hierbei die fortlaufende Korrektur der Prognose, indem die betreffenden Linien des geometrischen Ersatzmodells durch die realen Messdaten der Blechkontur ersetzt werden. Somit kann auch bei erheblichen Abweichungen des prognostizierten von dem realen Umformverhalten eine Kompensation von Modellfehlern und daraus resultierende Prozessstabilität erreicht werden.

Ein weiterer Anwendungsfall ist der Einsatz der erfassten realen Blechkontur zur Ermittlung einer prozentualen Modellabweichung, die in dem nachfolgenden Abschnitt vorgestellt wird.

## 6.5 Iteratives Lösungsverfahren zur Ermittlung von Modellabweichungen

Aufgrund der chargenspezifischen Schwankungen der werkstofflichen Eigenschaften sowie induzierter Eigenspannungen aus dem vorgelagerten Herstellprozess können innerhalb des Anlagenbetriebes Abweichungen zwischen dem prognostizierten und dem tatsächlichen Umformverhalten auftreten. Zur Kompensation der Modellfehler für nachfolgende Umformschritte ist daher ein Lösungsverfahren notwendig, mit dem die prozentuale Abweichung der Modellgrößen in Relation zum tatsächlichen Umformverhalten bestimmt werden kann. Hierbei ergibt sich die Besonderheit, dass zwischen den einzelnen Messzeitpunkten der optischen Vermessungen mehrere Umformschritte liegen, sodass die prozentuale Abweichung nicht durch Differenzenverfahren der Messdaten zweier aufeinanderfolgenden Prozessschritte ermittelt werden kann, sondern ein iteratives Lösungsverfahren durch Verwendung des Prognosemodells und dem künstlichen neuronalen Netz notwendig ist.

Zur Durchführung eines iterativen Lösungsverfahrens zur Bestimmung der prozentualen Modellabweichung der Modellparameter  $\delta_t$ ,  $\delta\alpha_1$  und  $\delta\alpha_2$  ist zunächst die Definition eines Lösungskriteriums notwendig, anhand dessen die Übereinstimmung zwischen der prognostizierten und der optisch erfassten Blechkontur beschrieben werden kann. Das Lösungskriterium des iterativen Lösungsverfahrens ist in der nachfolgenden Abbildung 55 abgebildet.

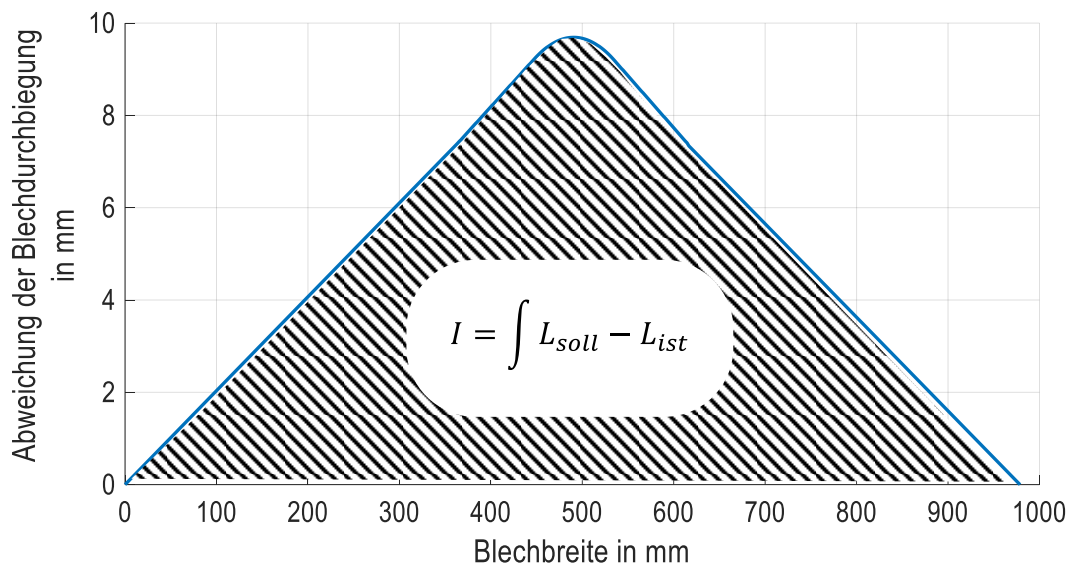


Abbildung 55: Lösungskriterium des iterativen Lösungsverfahrens

Entsprechend Abbildung 55 wird die Abweichung der Blechdurchbiegung zwischen der erfassten Blechkontur  $L_{soll}$  und der prognostizierten Blechkontur  $L_{ist}$  durch Subtraktion der z-Koordinaten entlang der Blechbreite  $B$  beschrieben. Die durch den Graphen eingeschlossene Fläche kann über das Integral der Abweichung  $I$  über die Blechbreite  $b_{Blech}$  als eindimensionale Größe beschrieben werden:

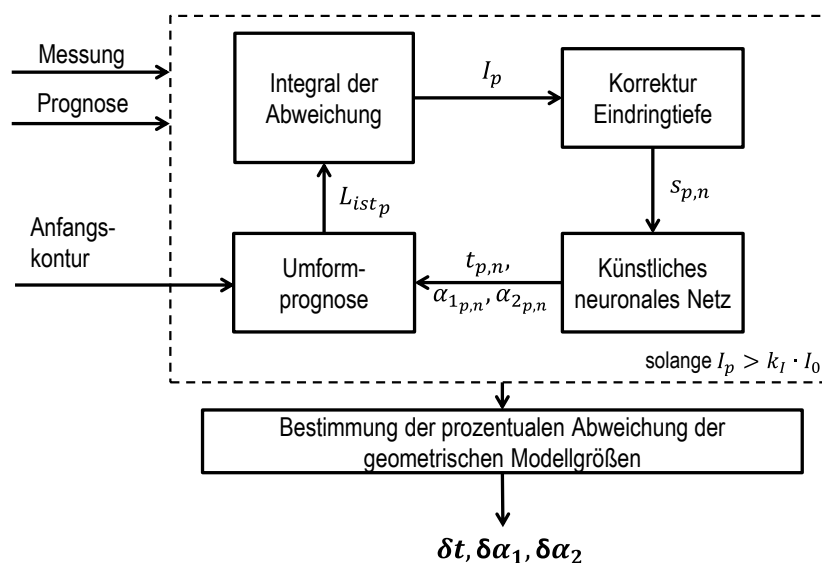
$$I = \int_0^{b_{Blech}} (L_{soll} - L_{ist}) dx$$

**Formel 16: Integral der Abweichung der Blechdurchbiegung**

Entsprechend dieser Definition konvergiert das Integral bei einer Übereinstimmung zwischen der Prognose und der optisch erfassten Blechkontur gegen NULL. Zudem kann anhand des Vorzeichens des Integrals dargestellt werden, ob eine Über- oder Unterschätzung des Umformverhaltens durch das geometrische Ersatzmodell prognostiziert wurde.

Als Zielgröße des Lösungsverfahrens wird die Schwertverschiebung festgelegt. Dies begründet sich zum daraus, dass zum einen durch Auflösung einer einzelnen Zielgröße die Komplexität des iterativen Lösungsverfahrens und damit der Berechnungsaufwand erheblich reduziert werden kann und zum anderen zur Bestimmung der prozentualen Abweichungen der einzelnen Modellgrößen noch zwei zusätzliche Lösungskriterien notwendig wären.

Der Ablauf des iterativen Lösungsverfahrens ist in der nachfolgenden Abbildung 56 schematisch dargestellt.



**Abbildung 56: Ablauf des iterativen Lösungsverfahrens**

Zu Beginn des iterativen Lösungsverfahrens werden zunächst die gemessene und prognostizierte Blechkontur zum Messzeitpunkt, sowie die Anfangskontur des vorherigen Messzeitpunktes eingebunden. Vor Beginn des ersten Iterationsablaufs wird der Startwert des Integrals  $I_0$  bestimmt, anhand dessen das Abbruchkriterium des Lösungsverfahrens beschrieben werden kann.

Die Korrektur der Schwerverschiebung  $s_{p,n}$  beim Iterationsschritt  $p$  für den Umformschritt  $n$  wird durch Addition bzw. Subtraktion des Differenzbetrages  $\Delta s_p$  in Abhängigkeit des Vorzeichens des Integrals  $I_p$  festgelegt:

$$s_{p,n} = \begin{cases} s_{0,n} + \Delta s_p & \text{für } p = 1 \\ s_{p-1,n} + \Delta s_p & \text{für } I_p < 0 \\ s_{p-1,n} - \Delta s_p & \text{für } I_p > 0 \end{cases}$$

**Formel 17: Korrektur der Schwerverschiebung**

Bei dem ersten Iterationsschritt  $p = 1$  wird die Schwerverschiebung  $s_{0,n}$  aus der Prozessplanung entsprechend der ursprünglichen Prognose  $L_{ist}$  bezogen. Mithilfe der korrigierten Schwerverschiebung und der bekannten Parameterkombination der Einflussfaktoren können die korrigierten geometrischen Modellparameter  $t_{p,n}, \alpha_{1p,n}$  und  $\alpha_{2p,n}$  für jeden Umformschritt  $n$  durch das künstliche neuronale Netz abgeschätzt und die korrigierte Prognose der Blechkontur  $L_{ist,p}$  nach der Gesamtanzahl an Umformschritten  $N$  ermittelt werden. Darauf aufbauend wird die Abweichung der korrigierten Prognose des nachfolgenden Iterationsschrittes  $p + 1$  bestimmt.

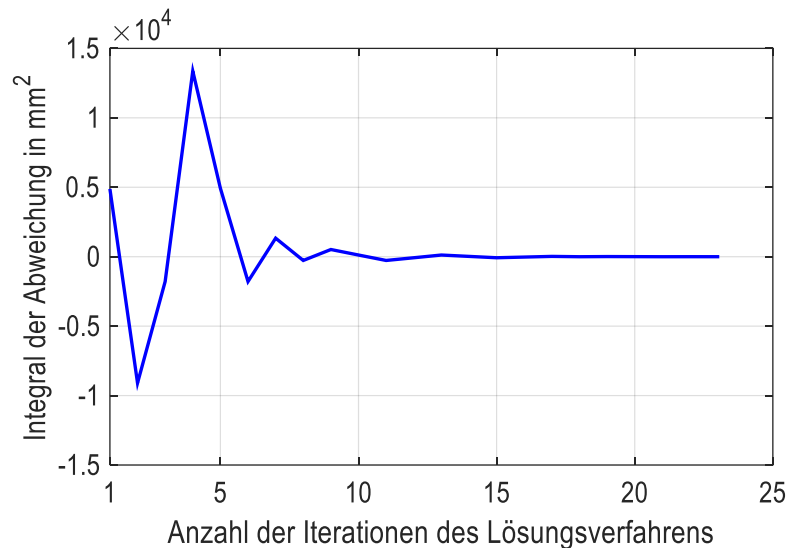
Um eine Konvergenz des Lösungsverfahrens auf Basis der korrigierten Schwerverschiebung zu erzielen, wird der Differenzbetrag  $\Delta s$  kontinuierlich verändert. Im Gegensatz zu bekannten numerischen Lösungsverfahren wird hierbei eine Verringerung des Differenzbetrages der Schwerverschiebung in Abhängigkeit des konstanten Faktors  $k_{\Delta s}$  bei Vorzeichenwechsel des Integrals  $I_p$  festgelegt:

$$\Delta s_p = \begin{cases} \Delta s_0 & \text{für } p = 1 \\ \Delta s_{p-1} & \text{für } \frac{I_p}{I_{p-1}} > 0 \\ k_{\Delta s} \cdot \Delta s_{p-1} & \text{für } \frac{I_p}{I_{p-1}} < 0 \end{cases} \quad \text{mit } 0 < k_{\Delta s} < 1$$

**Formel 18: Differenzbetrag der Schwerverschiebung**

Dies begründet sich daraus, dass das künstliche neuronale Netz nur für geringfügige Extrapolationen der Schwerverschiebung außerhalb des untersuchten Parameterraums plau-

sible Werte liefert. Bei negativen Schwertverschiebungen wird der Parameterraum so weit verlassen, dass keine Konvergenz des Lösungsverfahrens mehr erreicht werden kann. Dementsprechend ist das Lösungsverfahren durch eine geeignete Startbedingung des Differenzbetrages  $\Delta s_0$  sowie einen geeigneten Faktor  $k_{\Delta s}$  zu parametrieren. Der Verlauf des Integrals der Abweichung bei einer geeigneten Parametrierung ist in der nachfolgenden Abbildung 57 aufgeführt.



**Abbildung 57: Verlauf des Integrals der Abweichung der Blechdurchbiegung in Relation der Iterationsschritte**

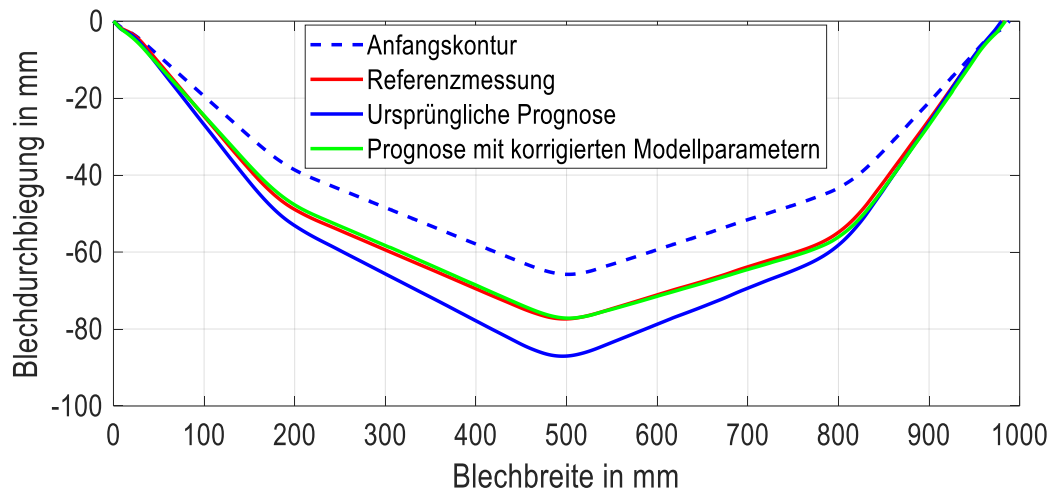
Entsprechend des dargestellten Verlaufes konvergiert das Integral der Abweichung der Blechdurchbiegung mit zunehmender Iterationsanzahl gegen NULL. Das Iterationsverfahren wird erst abgebrochen, nachdem das Kriterium des Lösungsverfahrens

$$I_p < k_I \cdot I_0 \quad \text{mit} \quad 0 < k_I < 1$$

**Formel 19: Abbruchkriterium des Lösungsverfahrens**

erreicht wurde. Zu diesem Zweck ist zusätzlich der Faktor  $k_I$  entsprechend einer zufriedenstellenden Genauigkeit des Lösungsverfahrens sowie unter Berücksichtigung der notwendigen Iterationsanzahl zu parametrieren. Zusätzlich wird ein Abbruchkriterium des iterativen Lösungsverfahrens durch Begrenzung der maximal möglichen Iterationen implementiert.

Die Funktionalität des iterativen Lösungsverfahrens zur Korrektur der Prognose durch Anpassung der Schwertverschiebung ist in der nachfolgenden Abbildung 58 exemplarisch für die Durchführung von zwei aufeinanderfolgenden Umformschritten dargestellt.



**Abbildung 58: Korrektur der Umformprognose durch Anpassung der Schwertverschiebung**

Aufbauend auf dem Verlauf der Blechdurchbiegung in Abhängigkeit der Blechbreite bei der Referenzmessung (rote Linie), der ursprünglichen Prognose (blaue Linie) sowie der Anfangskontur (blau gestrichelt) kann mithilfe des iterativen Lösungsverfahrens eine Prognose mit korrigierten Modellparametern (grüne Linie) ermittelt werden. Das Lösungskriterium basierend auf dem Integral der Abweichung der Blechdurchbiegung ermöglicht, dass der Verlauf der korrigierten Prognose der Referenzmessung mit zufriedenstellender Genauigkeit angenähert wird.

Nach Abschluss des iterativen Lösungsverfahrens kann die prozentuale Abweichung der geometrischen Modellparameter  $\delta t$ ,  $\delta \alpha_1$  und  $\delta \alpha_2$  bestimmt werden:

$$\delta t = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{t_{p,n} - t_{0,n}}{t_{0,n}} \quad \text{und} \quad \delta \alpha_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{\alpha_{i,p,n} - \alpha_{i,0,n}}{\alpha_{i,0,n}} \quad \text{mit } i = 1 \dots 2$$

**Formel 20: Bestimmung der prozentualen Abweichung der geometrischen Modellparameter**

Die prozentuale Abweichung der geometrischen Modellparameter wird hierbei in Relation zu den Modellparametern  $t_{0,n}$ ,  $\alpha_{1,0,n}$  und  $\alpha_{2,0,n}$  der ursprünglichen Prognose der Blechkontur  $L_{ist}$  dargestellt und über die Anzahl der Umformschritte  $N$  gemittelt.

Die prozentuale Abweichung der geometrischen Modellparameter kann zum einen zur Überwachung der Prognosegenauigkeit des geometrischen Ersatzmodells und zum anderen zur direkten Kompensation von Modellfehlern während des Umformprozesses eingesetzt werden.

## 7. Experimentelle Erprobung des geometrischen Ersatzmodells für mehrstufige Umformaufgaben

Nach Aufbau und Parametrierung wird im nachfolgenden Abschnitt das geometrische Ersatzmodell im Rahmen eines weiteren experimentellen Versuchskomplexes erprobt. Aus diesem Grund werden zunächst die Versuche für mehrstufige anwendungsnahe Umformaufgaben definiert und durchgeführt. Basierend auf den Versuchsergebnissen kann die Prognosegenauigkeit ermittelt und das geometrische Ersatzmodell verifiziert werden. Zusätzlich wird die Möglichkeit zur Kompensation von Modellfehlern durch Rückführung der optischen Vermessung erprobt. Im Anschluss wird der Berechnungsaufwand anhand der notwendigen Rechenzeit untersucht, um die Einbindung des geometrischen Ersatzmodells in eine industrielle Steuerungsumgebung gewährleisten zu können.

### 7.1 Definition der Validierungsversuche

Zur Durchführung von Validierungsversuchen werden zunächst drei unterschiedliche Szenarien hinsichtlich der Abfolge von Umformschritten eines mehrstufigen Umformprozesses definiert, die in der nachfolgenden Abbildung 59 schematisch dargestellt sind.

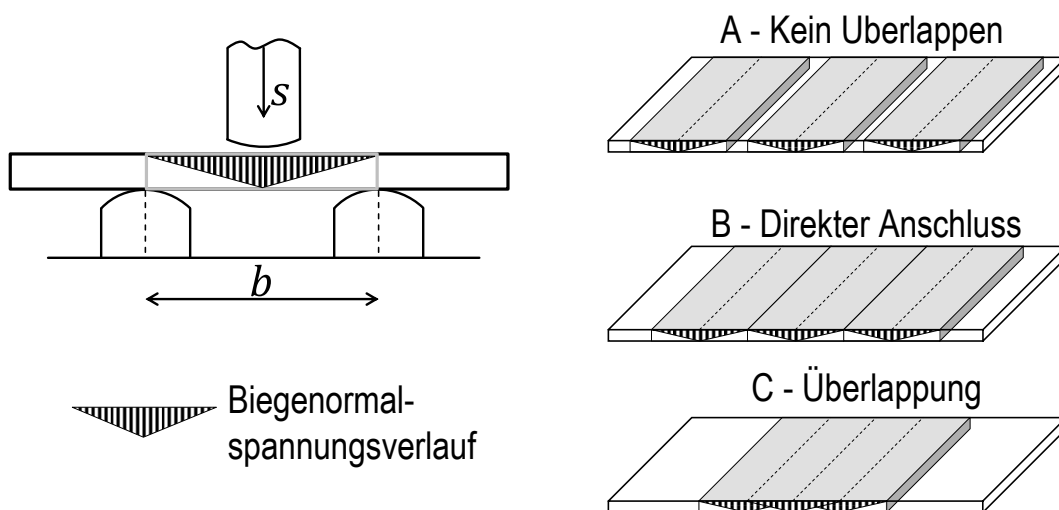


Abbildung 59: Definition von Umformszenarien eines mehrstufigen Umformprozesses

Je Szenarium werden die Probebleche an nebeneinander angeordneten Umformbereichen mit schrittweiser Erhöhung der Schwertverschiebung umgeformt. Hierbei unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich der eingebrachten Biegemomentspannung zueinander. Bei Szenarium A sind die Umformbereiche so angeordnet, dass kein Überlappen der einzelnen Umformbereiche vorhanden ist. Im Gegensatz ist bei Szenarium B die Position der drei Umformbereiche so gewählt, dass ein direkter Anschluss vorhanden ist. Bei Szenarium C

werden die Umformbereiche überlappend angeordnet, sodass im Bereich der Überlappung die eingebrachte Biegenormalspannung der einzelnen Umformschritte überlagert wird. Durch dieses Szenarium soll untersucht werden, ob trotz des sequenziellen Aufbaus des geometrischen Ersatzmodells eine zufriedenstellende Prognose bei einem mehrstufigen Umformprozess möglich ist.

Im Rahmen der Erprobungsversuche werden neben unterschiedlichen Umformszenarien zudem die charakterisierten Einflussfaktoren der kaltplastischen Umformung wie Werkstoff, Blechdicke, Walzrichtung und Oberflächenbeschaffenheit variiert. Die Verteilung der Parameterausprägungen stellt sicher, dass charakteristische Merkmale der Modellerprobung den Einflussfaktoren bzw. den Umformszenarien zugeordnet werden können.

In der nachfolgenden Tabelle 6 ist daher der Versuchsplan der experimentellen Erprobungsversuche mit den Parameterausprägungen der charakteristischen Einflussfaktoren aufgeführt.

**Tabelle 6: Versuchsplan der experimentellen Erprobungsversuche**

<b>Versuchsbezeichnung</b>	<b>Blechbezeichnung</b>	<b>Eingriffspunkte</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Blechdicke</b>	<b>Walzrichtung</b>	<b>Oberfläche</b>
X1.1	V1	A1	2	S 235 JR	10	Quer	Primer
X1.2	V4	B1	4	S 355 JR	10	Längs	Gestrahlt
X1.3	V5	C1	4	S 460 N	10	Quer	Primer
X1.4	V9	A2	4	S 355 JR	5	Quer	Primer
X1.5	V12	B2	4	S 460 N	5	Längs	Primer

Zur Vermeidung von chargen- oder lieferantenspezifischen Schwankungen der Materialeigenschaften stammt das verwendete Probenmaterial wie schon beschrieben aus derselben Charge wie die zur Parametrierung des geometrischen Ersatzmodells eingesetzten Probenbleche aus Kapitel 4. Zusätzlich werden die Abmessungen der Probenbleche auf  $1000\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  vereinheitlicht, sowie der Abstand zwischen den Auflagebacken auf  $252\text{ mm}$  fixiert. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Umformschwertes wird zudem auf  $180\frac{\text{mm}}{\text{min}}$  festgelegt.

Da für jedes Umformszenarium unterschiedliche Parameterausprägungen der Einflussfaktoren vorhanden sind, wird für jeden Versuch eine individuelle Abfolge der Eingriffspunkte

sowie individueller schrittweiser Erhöhung der Schwertverschiebung festgelegt. Dadurch kann zum einen eine ausreichend hohe plastische Umformung je Umformschritt sichergestellt werden, und zum anderen wird auch das Modell zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung hinreichend genau erprobt.

In der nachfolgenden Tabelle 7 ist die Versuchsplanung für die nicht überlappenden Umformbereiche aus dem Umformszenarium A aufgelistet.

**Tabelle 7: Versuchsplanung für Umformszenarium A**

#	A1		A2	
	Eingriffspunkt in mm	Schwertverschiebung in mm	Eingriffspunkt in mm	Schwertverschiebung in mm
1	814	10	814	8
2	500	10	500	8
3	186	10	186	8
4	814	13	814	11
5	500	13	500	11
6	186	13	186	11
7	814	16	814	16
8	500	16	500	16
9	186	16	186	16

Wie anhand Tabelle 7 zu erkennen ist, werden insgesamt neun Prozessschritte an drei Umformbereichen durchgeführt, wobei je drei Eingriffspunkte einen konstanten Wert der Schwertverschiebung aufweisen. Hierbei wird bei A1 eine schrittweise Erhöhung der Schwertverschiebung um 3 mm und bei A2 eine schrittweise Erhöhung um 5 mm vorgesehen.

In der nachfolgenden Tabelle 8 ist die Versuchsplanung für die Versuche des Umformszenariums B aufgeführt.

Tabelle 8: Versuchsplanung für Umformszenarium B

#	B1		B2	
	Eingriffspunkt in mm	Schwertverschiebung in mm	Eingriffspunkt in mm	Schwertverschiebung in mm
1	248	10	814	10
2	500	10	562	10
3	752	10	310	10
4	248	12	814	13
5	500	12	562	13
6	752	12	310	13
7	248	17	814	17
8	500	17	562	17
9	752	17	310	17

Entsprechend der in Tabelle 8 dargestellten Versuchsplanung wird im Rahmen des Umformszenarium B die Abfolge der drei nebeneinander angeordneten Eingriffspunkte variiert. Bei B1 wird das Blech von links nach rechts geführt, während bei B2 zunächst mit dem hinteren Umformbereich begonnen wird.

In der nachfolgenden Tabelle 9 ist die Versuchsplanung zur Untersuchung des Umformszenarium C aufgelistet.

Tabelle 9: Versuchsplanung für Umformszenarium C

#	C1	
	Eingriffspunkt in mm	Schwertverschiebung in mm
1	216,5	11
2	405,5	11
3	594,5	11
4	783,5	11
5	216,5	14
6	405,5	14

#	C1	
	Eingriffspunkt in mm	Schwertverschiebung in mm
7	594,5	14
8	783,5	14
9	216,5	19
10	405,5	19
11	594,5	19
12	783,5	19

Durch die in Tabelle 9 dargestellten Eingriffspunkte weisen die Umformbereiche einen Überlappungsbereich in Höhe von 25 % in Relation zur ursprünglichen Breite auf. Somit können insgesamt vier Umformbereiche nebeneinander angeordnet werden. Analog zu den beiden anderen Umformszenarien wird ebenfalls die Schwertverschiebung je Umformabschnitt schrittweise erhöht.

Basierend auf der Versuchsplanung kann im Anschluss ein geeigneter Prüfaufbau zur Durchführung der Validierungsversuche aufgebaut werden. Der Prüfaufbau basiert wie die in Kapitel 5 vorgestellten experimentellen Charakterisierungsversuche auf der kalibrierten Prüfmaschine Z400E der Fa. ZwickRoell GmbH & Co. KG und ist in der nachfolgenden Abbildung 60 dargestellt.

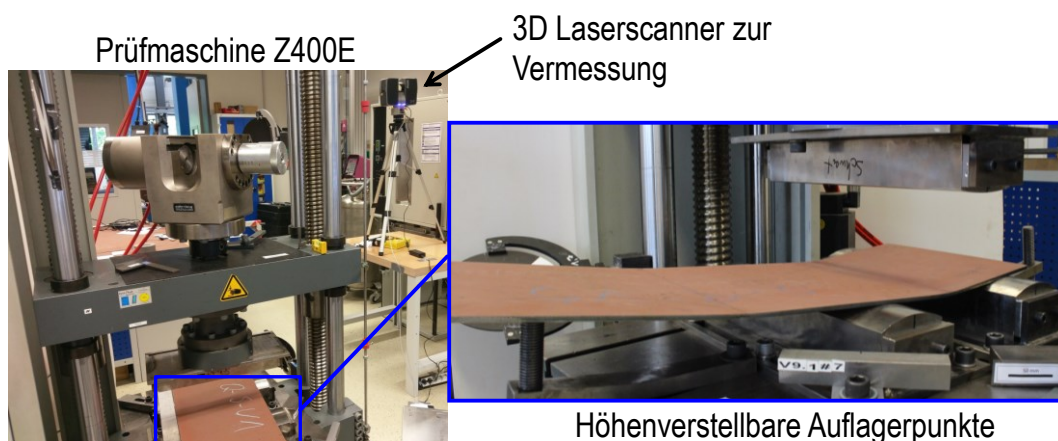


Abbildung 60: Prüfaufbau zur Durchführung der Erprobungsversuche

Vor Durchführung der Versuche wird die Prüfmaschine analog zu der in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Methodik eingerichtet und der Maschinennullpunkt ermittelt. Die Ansteuerung

der Prüfmaschine erfolgt ebenfalls über vorgegebene Wegpunkte, wobei die Blechdicken mithilfe der Bügelmessschraube *Micromar 40 EWR* der Fa. *Mahr GmbH* erfasst werden.

Aufgrund der größeren Breite der Probenbleche von 1000 mm werden zusätzliche höhenverstellbare Auflagepunkte am Spannfeld der Prüfmaschine montiert und vor jedem Umformschritt so justiert, dass das Blech horizontal auf den beiden Auflagebacken aufliegt.

Neben der Aufzeichnung der Prozesskraft-Schwertverschiebungskurve mithilfe der prüfmaschineneigenen Kraftmessdose wird ebenfalls die geometrische Änderung der Blechkontur mithilfe eines optischen Messverfahrens bestimmt. Aus diesem Grund werden zwei 3D-Laserscanner des Typs *FARO Focus3D X 130* der Fa. *FARO Europe GmbH & Co. KG* zur simultanen optischen Messung eingesetzt. Hierbei sind die beiden Laserscanner so angeordnet, dass die jeweils eine Seite des Blechs durch einen Laserscanner ohne Abschattung durch das Umformschwert erfasst werden kann. Dies hat zum einen den Vorteil, dass das Blech ohne störende Datenlücken vermessen werden kann und zum anderen, dass die Traverse nach jedem Umformschritt nicht zeitintensiv verfahren werden muss, um den Sichtbereich des Laserscanners zu vergrößern. Die Transformation der beiden dreidimensionalen Punktwolken zueinander erfolgt mittels im Prüflabor verteilter Referenzmarken, sodass eine einzige dreidimensionale Punktwolke ermittelt wird, aus der die Punktwolke des Probenblechs ausgeschnitten werden kann.

Neben der optischen Vermessung mittels 3D-Laserscanner wird die Prüfung durch eine fotografische Dokumentation begleitet, die eine zusätzliche Nachverfolgbarkeit des mehrstufigen Umformprozesses ermöglicht.

Basierend auf dem angepassten Prüfaufbau können die experimentellen Versuche zur Untersuchung der drei definierten Umformszenarien durchgeführt werden sowie das geometrische Ersatzmodell erprobt und verifiziert werden.

## 7.2 Verifikation des geometrischen Ersatzmodells für praxisnahe Umformaufgaben

Zur Erprobung und Verifikation des entwickelten Modellansatzes müssen die experimentell untersuchten Umformszenarien mithilfe des geometrischen Ersatzmodells nachgebildet werden. Im Rahmen der Initialisierung der Umformprognose werden daher die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften aus der experimentellen Charakterisierung des Probenmaterials aus Kapitel 5.1.1 übernommen. Aufgrund des großen Einflusses der Blechdicke auf die geometrischen Modellgrößen wird zusätzlich die tatsächlich gemessene Blechdicke des experimentell untersuchten Probenblechs innerhalb des Prognosemodells berücksichtigt. Zusätzlich werden die Koordinaten der Eingriffspunkte zur Einbindung innerhalb des künstlichen neuronalen Netzes als horizontaler Versatz in Relation zur Blechbreite dargestellt.

Im Anschluss können die definierten Umformszenarien mithilfe des geometrischen Ersatzmodells nachgebildet werden und die Umformprognose mit dem realen Umformverhalten verglichen werden.

Aufgrund der großen Anzahl an Versuchsdaten wird im Folgenden ein geometrisches Auswertungskriterium definiert, mit dem die Modellgüte des geometrischen Ersatzmodells vereinfacht dargestellt werden kann. In der nachfolgenden Abbildung 61 ist die Gegenüberstellung einer prognostizierten und gemessenen Blechkontur als zweidimensionaler Schnitt exemplarisch dargestellt.

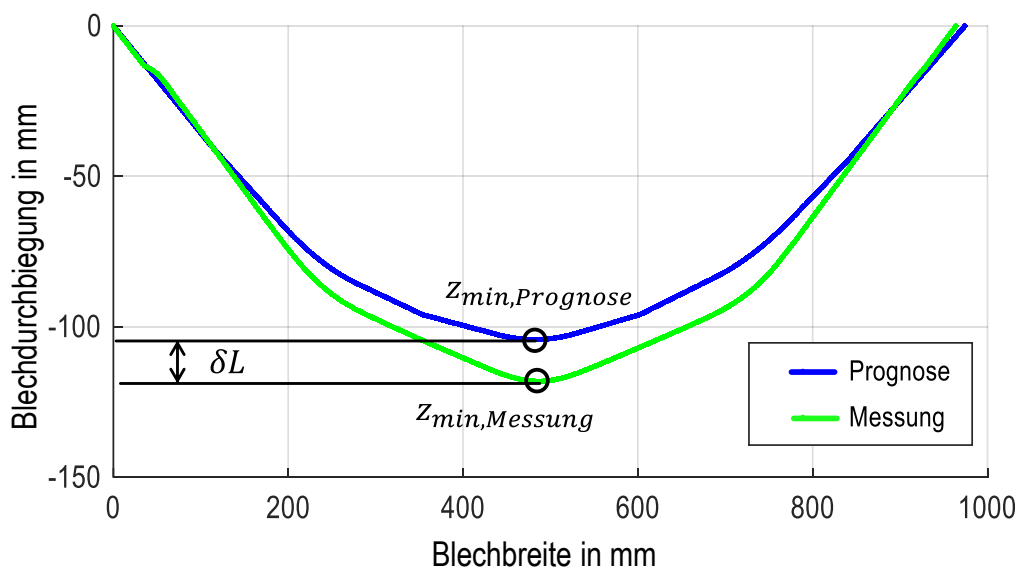


Abbildung 61: Geometrisches Auswertungskriterium der Erprobungsversuche

Zur Ableitung eines einzelnen geometrischen Auswertekriteriums wird die prozentuale Abweichung der Durchbiegung  $\delta L$  eingeführt. Entsprechend der Darstellung in Abbildung 61 werden für die prognostizierte Blechkontur (blaue Linie) und der gemessenen Blechkontur (grüne Linie) die Punkte des minimalsten Wertes in z-Richtung des Modells ermittelt. Aus den beiden Punkten kann die prozentuale Abweichung der Durchbiegung berechnet werden, nach:

$$\delta L = \frac{z_{Prognose,min} - z_{Messung,min}}{z_{Messung,min}} \cdot 100\%$$

$z_{Prognose,min}$  Minimaler Wert der z-Koordinate der prognostizierten Blechkontur

$z_{Messung,min}$  Minimaler Wert der z-Koordinate der gemessenen Blechkontur

**Formel 21 Berechnung der prozentualen Abweichung der Durchbiegung**

Anhand des Auswertungskriteriums kann die Abweichung zwischen dem gemessenen und prognostizierten Umformverhalten für jedes Umformszenarium sowie jedem Umformschritt vereinfacht dargestellt werden. Dies ermöglicht somit eine vereinfachte Auswertung der Erprobungsversuche zur Validierung des geometrischen Ersatzmodells.

In der nachfolgenden Abbildung 62 ist die prozentuale Abweichung der Durchbiegung über die Anzahl der durchgeführten Umformschritte für das Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen dargestellt.

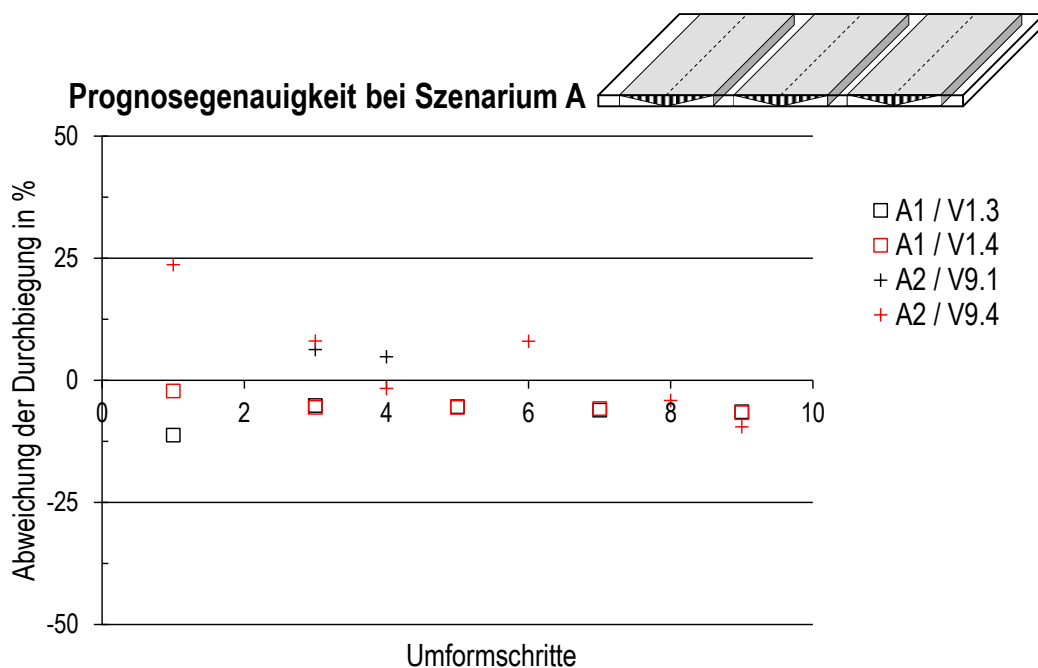


Abbildung 62: Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass eine maximale prozentuale Abweichung von  $\delta L_{max} = 24\%$  beim ersten Umformschritt auftritt. Die Modellabweichung aus Versuch A1 nähern einen konstanten Wert an, sodass für den gesamten Versuchskomplex eine durchschnittliche prozentuale Abweichung von  $\overline{\delta L}_{A1} = -6,00\%$  ermittelt werden kann. Bei Versuch A2 kann kein charakteristischer Verlauf der Abweichung der Durchbiegung in Relation zur Anzahl der Umformschritte abgeleitet werden. Für die gemittelte prozentuale Abweichung kann  $\overline{\delta L}_{A2} = 12,01\%$  bestimmt werden. Die Ergebnisse der Wiederholungen innerhalb eines Versuches weisen zudem eine sehr geringe Streuung auf.

In der nachfolgenden Abbildung 63 sind die Versuchsergebnisse der prozentualen Abweichung für das Umformszenarium B mit direkt anschließenden Umformbereichen dargestellt.

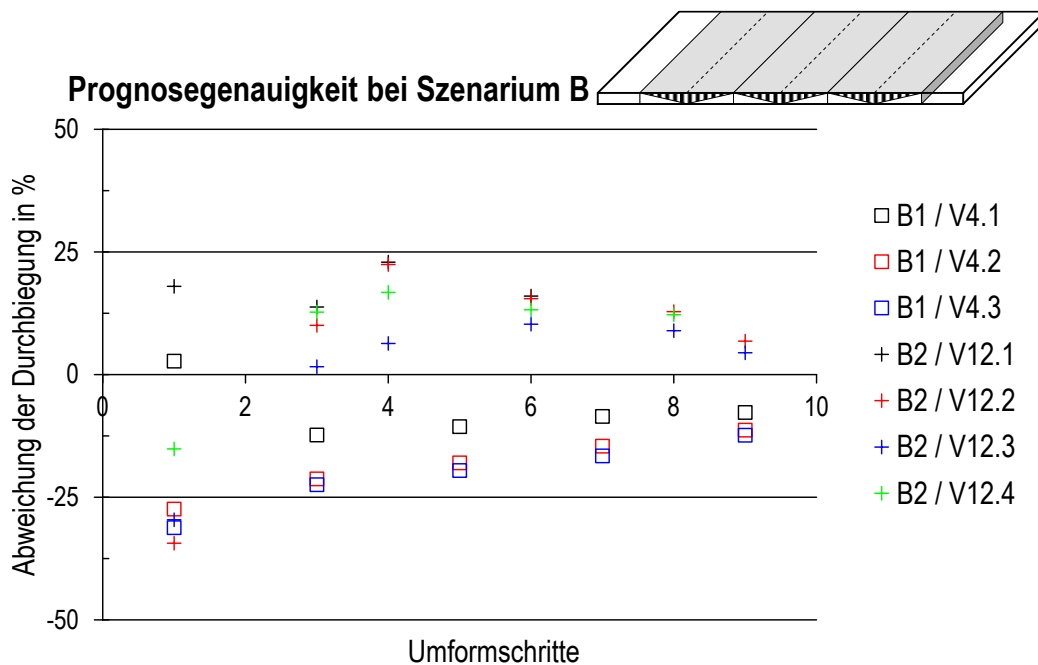


Abbildung 63: Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium B mit direkt anschließenden Umformbereichen

Aus der Abbildung wird eine maximale prozentuale Abweichung des Umformszenariums von  $\delta L_{max} = 34\%$  ersichtlich. Je Versuchsserie können gemittelte Werte der prozentualen Abweichung von  $\overline{\delta L}_{B1} = -15,41\%$  und  $\overline{\delta L}_{B2} = 10,33\%$  erreicht werden. Hierbei fällt ähnlich zu Umformszenarium A auf, dass zwischen den einzelnen Versuchsserien unterschiedliche Vorzeichen der gemittelten prozentualen Abweichungen auftreten. Bei Versuch B1 wird das reale Umformverhalten eher unterschätzt und bei Versuch B2 überschätzt. Zusätzlich ist erkennbar, dass zwischen den einzelnen Wiederholungen eines Versuches erhebliche Streuungen vorhanden sind, die sich signifikant auf die Prognose-

genauigkeit auswirken. Bei der dargestellten Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium B kann zudem keine eindeutige Abhängigkeit zwischen der prozentualen Abweichung und der Anzahl der Umformschritte festgestellt werden.

Zur Auswertung der Prognosegenauigkeit bei überlappenden Umformbereichen sind in der nachfolgenden Abbildung 64 die Ergebnisse der prozentualen Abweichung für Umformszenarium C aufgeführt.

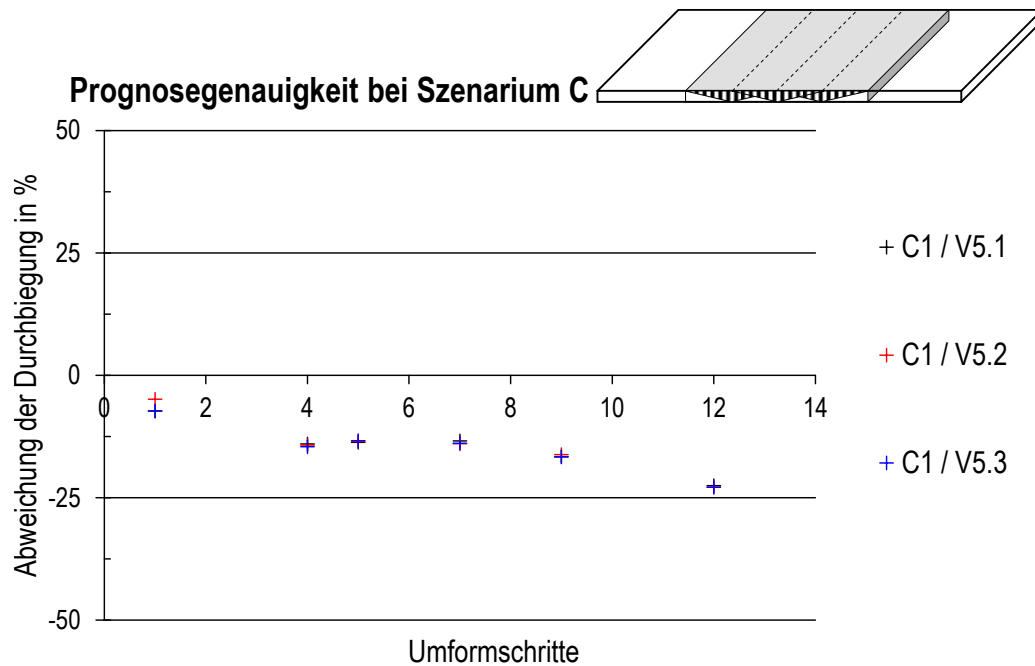


Abbildung 64: Prognosegenauigkeit bei Umformszenarium C mit überlappenden Umformbereichen

Anhand der dargestellten Ergebnisse wird ersichtlich, dass eine maximale Abweichung von  $\delta L_{max} = 24\%$  erreicht wird. Im Gegensatz zu den vorherigen Umformszenarien tritt die maximale Abweichung jedoch nicht zu Beginn des Umformprozesses auf, sondern erst bei dem letzten Umformschritt. Für den gesamten Versuchskomplex kann eine gemittelte prozentuale Abweichung von  $\overline{\delta L_{C1}} = -15,54\%$  ermittelt werden. Die Streuung innerhalb des Versuchskomplexes ist vernachlässigbar gering.

Als Fazit der experimentellen Erprobungsversuche können wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Modellgüte des Prognosemodells bei unterschiedlichen Umformszenarien identifiziert werden. Bei nicht überlappenden und direkt anschließenden Umformbereichen ist kein charakteristischer Verlauf der prozentualen Abweichung in Abhängigkeit der Umformschrittzahl erkennbar. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche streuen mit Zunahme der Umformschritte um einen konstanten Mittelwert, sodass die notwendige Stabilität des Prognosemodells gegeben ist. Bei überlappenden Umformbereichen ist hingegen bei

steigender Anzahl der Umformschritte von einer Zunahme der Abweichung auszugehen, sodass dies zu möglichen Instabilitäten führen kann.

Zusätzlich lässt sich erkennen, dass bei geringen Blechdicken positive Modellabweichungen und bei großen Blechdicken negative Modellabweichungen auftreten. Die Modellabweichungen werden zusätzlich durch erhebliche Streuungen innerhalb eines einzelnen Versuchs möglich, deren Ursachen nicht eindeutig charakterisiert werden können.

### 7.3 Kompensation von Modellabweichungen zur Optimierung der Modellgenauigkeit

Aufgrund der dargestellten Ergebnisse hinsichtlich Modellgenauigkeit des geometrischen Ersatzmodells wird die Notwendigkeit zur echtzeitfähigen Kompensation der Modellabweichungen innerhalb eines anwendungsnahen Umformprozesses mit überlappenden Umformbereichen deutlich. Zu diesem Zweck wird neben der Bestimmung der Modellgenauigkeit des Prognosemodells ebenfalls das in Kapitel 6.5 vorgestellte Modell zur iterativen Bestimmung der Modelparameterabweichung anhand der experimentellen Versuchsergebnisse erprobt.

Zur Einbindung der iterativ bestimmten prozentualen Abweichung der geometrischen Modellparameter  $\delta t$ ,  $\delta\alpha_1$  und  $\delta\alpha_2$  innerhalb der Umformprognose wird ein Ansatz basierend auf einer faktoriellen Skalierung verwendet. Die aus dem künstlichen neuronalen Netz stammenden geometrischen Modellparameter  $t$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  je Umformschritt  $n$  werden mithilfe der spezifischen Faktoren  $K_{t,n}$ ,  $K_{\alpha_1,n}$  und  $K_{\alpha_2,n}$  skaliert:

$$t_{komp,n} = K_{t,n} \cdot t_n \quad \text{und} \quad \alpha_{i,komp,n} = K_{\alpha_i,n} \cdot \alpha_{i,n} \quad \text{mit } i = 1 \dots 2$$

**Formel 22: Skalierung der geometrischen Modellparameter zur Kompensation von Modellabweichungen**

Da die spezifischen Faktoren  $K_{t,n}$ ,  $K_{\alpha_1,n}$  und  $K_{\alpha_2,n}$  nicht vom jeweiligen Umformschritt  $n$  sondern von der Anzahl der optischen Messungen  $N_{mess}$  abhängig sind, werden diese nach jeder durchgeführten Messung  $j$  und nachfolgender iterativer Bestimmung der Modellparameterabweichung als Mittelwert über alle Messungen bestimmt:

$$K_{t,n} = \frac{1}{N_{mess}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{mess}} 1 - \delta t_j \quad \text{und} \quad K_{\alpha_i,n} = \frac{1}{N_{mess}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{mess}} 1 - \delta\alpha_{i,j} \quad \text{mit } i = 1 \dots 2$$

**Formel 23: Bestimmung der spezifischen Faktoren zur Skalierung der geometrischen Modellparameter**

Die Mittelung über alle Messungen wird eingesetzt, da somit die zuvor identifizierten Streuungen der Einzelwerte kompensiert werden können und somit der Einfluss von möglichen Ausreißern minimiert wird. Neben der Skalierung der geometrischen Modellparameter mithilfe der spezifischen Faktoren wird zusätzlich zu jedem Messzeitpunkt die prognostizierte durch die reale Blechkontur aus der optischen Vermessung ersetzt.

Im Folgenden werden nun die experimentellen Versuche erneut mithilfe des geometrischen Ersatzmodells nachgebildet und der Ansatz zur Kompensation der Modellabweichung basierend auf dem iterativen Lösungsverfahren zur Bestimmung der Modellparameterabweichungen aus Kapitel 6.5 eingebunden.

In der nachfolgenden Abbildung 65 ist die prozentuale Abweichung der Durchbiegung aus der kompensierten Prognose bei Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen dargestellt.

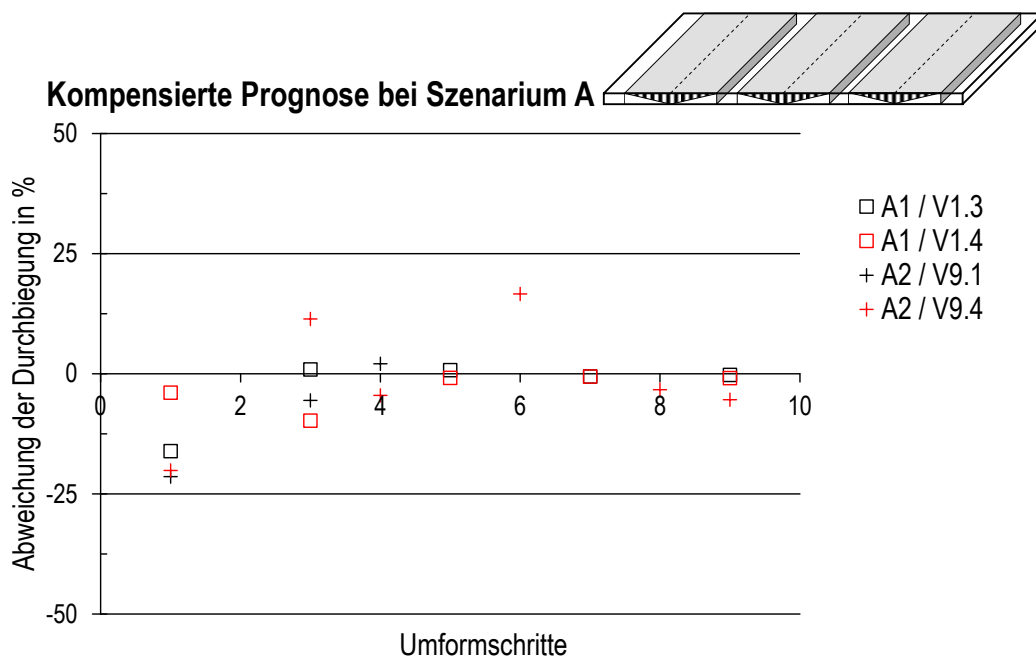


Abbildung 65: Kompensierte Prognose bei Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen

Aus dem Verlauf der Abweichung der Durchbiegung wird ersichtlich, dass die Modellabweichung mit zunehmender Anzahl an Umformschritten reduziert werden kann. Diese Reduktion der Modellabweichung lässt sich zudem an der über alle Umformschritte gemittelten Abweichung der Durchbiegung feststellen. So wird die gemittelte Abweichung für den Versuch A1 mit  $\overline{\delta L}_{A1} = -6,00\%$  durch Einbindung der optischen Vermessung auf

$\overline{\delta L}_{A1, komp} = 3,13\%$  reduziert. Ähnliches kann auch innerhalb des Versuchs A2 mit  $\overline{\delta L}_{A2} = 12,01\%$  auf  $\overline{\delta L}_{A2, komp} = 3,36\%$  festgestellt werden.

Neben Umformszenarium A mit nicht überlappenden Umformbereichen ist in Abbildung 66 die prozentuale Abweichung bei der kompensierten Prognose des Umformszenarium B mit direkt anschließenden Umformbereichen dargestellt.

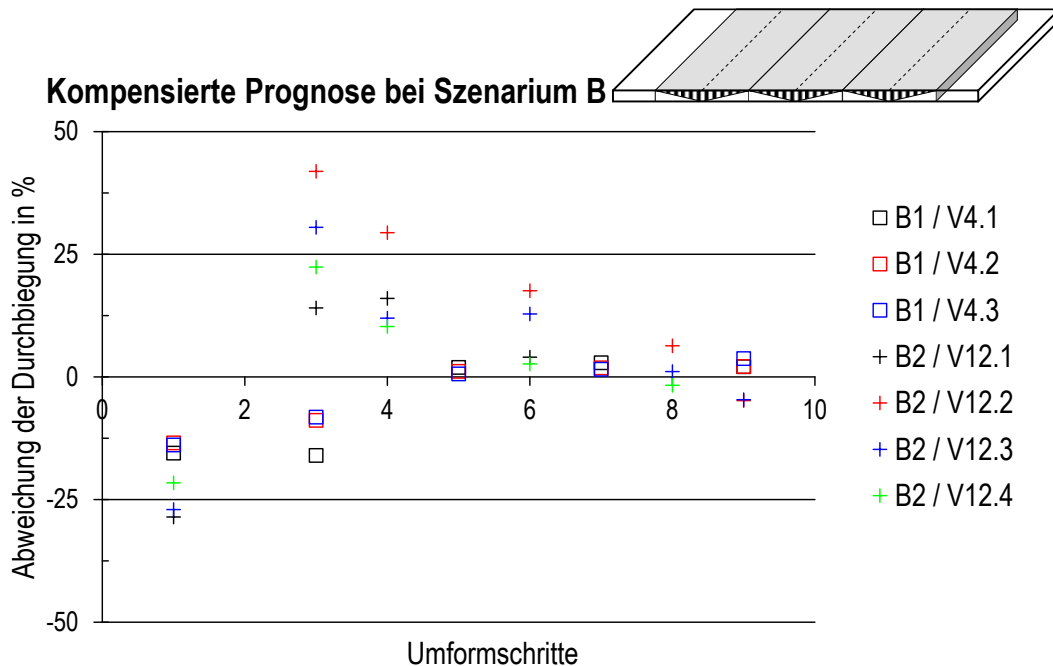


Abbildung 66: Kompensierte Prognose bei Umformszenarium B mit direkt anschließenden Umformbereichen

Analog zu Umformszenarium A kann ebenfalls für Versuch B1 die gemittelte prozentuale Abweichung  $\overline{\delta L}_{B1} = -15,41\%$  auf  $\overline{\delta L}_{B1, komp} = 3,87\%$  signifikant reduziert werden. Bei Versuch B2 wird die gemittelte Abweichung  $\overline{\delta L}_{B2} = 10,33\%$  hingegen auf  $\overline{\delta L}_{B2, komp} = 16,4\%$  maximiert. Dies begründet sich aus einem Vorzeichenwechsel der Modellabweichung im Verlauf des Umformprozesses. Während beim ersten Umformschritt noch eine negative Modellabweichung vorhanden ist, treten bei den nachfolgenden Umformschritten nur noch positive Modellabweichungen auf (vgl. Abbildung 63). Durch die direkte Rückführung der Modellabweichung innerhalb der Prognose wird daher die Abweichung beim dritten Umformschritt zunächst vergrößert und die über den gesamten Versuch gemittelte Modellabweichung maximiert. Der Verlauf der Modellabweichung bei Versuch A2 weist jedoch für alle Einzelversuche eine kontinuierliche Minimierung der Modellabweichung mit zunehmender Anzahl an Umformschritten auf, sodass auch in diesem Fall von einer Optimierung der Prognosegenauigkeit ausgegangen werden kann.

In der nachfolgenden Abbildung 67 sind die Ergebnisse der Modellabweichung für die kompensierte Prognose bei Umformszenarium C mit überlappenden Umformbereichen aufgeführt.

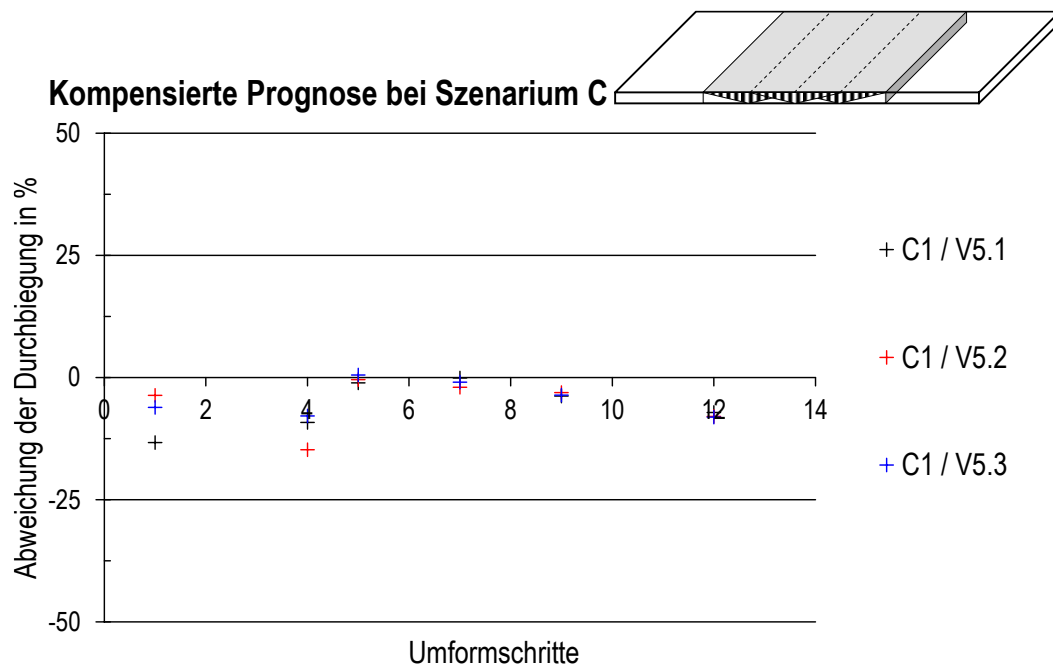


Abbildung 67: Kompensierte Prognose bei Umformszenarium C mit überlappenden Umformbereichen

Im Vergleich zur unkompensierten Prognose (vgl. Abbildung 64) kann eine wesentliche Verbesserung der Prognosegenauigkeit erzielt werden. Die über alle Umformschritte gemittelte Abweichung der Durchbiegung kann von  $\overline{\delta L_{C1}} = -15,54\%$  auf  $\overline{\delta L_{C1, komp}} = -5,16\%$  signifikant reduziert werden. Neben der Reduktion der gemittelten Abweichung der Durchbiegung kann zudem der Verlauf der Abweichung in Abhängigkeit der Anzahl der Umformschritte maßgeblich verändert werden. Während bei der unkompensierten Prognose eine Maximierung der Modellabweichung mit steigender Anzahl der Umformschritte und somit die Gefahr von Instabilitäten festgestellt wurden, kann durch den Ansatz der Kompensation ein oszillierend konvergierendes Verhalten gegen NULL erreicht werden.

Als Ergebnis der Erprobung des Modellansatzes zur Kompensation von Modellabweichungen kann die wesentliche Eignung innerhalb der Umformprognose nachgewiesen werden. Durch die Rückführung der iterativ bestimmten Modellparameterabweichung und Skalierung der Modellparameter kann für alle Umformszenarien eine Reduktion von Modellabweichungen auf  $\overline{\delta L_{komp}} \approx 5\%$  erreicht werden. Im Hinblick auf die industrielle Anwendung der kaltplastischen Umformung kann besonders bei Umformszenarien mit überlappenden Umformbereichen die notwendige Stabilität der Umformprognose sicherge-

stellt werden. Für die erfolgreiche Einbindung der Umformprognose in eine industrielle Steuerungsumgebung wird daher der Einsatz des Modells zur Kompensation von Modellabweichungen aufgrund der ermittelten Streuungen empfohlen.

### 7.4 Untersuchung des Berechnungsaufwandes

Neben der Prognosegenauigkeit des geometrischen Ersatzmodells und Kompensation von chargenspezifischen Schwankungen der Materialeigenschaften stellt der erforderliche Berechnungsaufwand ein wesentliches Kriterium zur Einbindung innerhalb einer industriellen Steuerungsumgebung dar. Die maximal zulässige Rechenzeit zur Nachbildung eines einzelnen Umformschritts wird hierbei durch den Prozess selbst beschränkt und obliegt der Vorgabe, dass durch die Umformprognose keine signifikante Verzögerung des Prozessablaufs bestehend aus Handhabung und Ausrichtung des Blechs sowie Verfahrbewegung des Umformschwertes der hydraulischen Presse verursacht werden darf (vgl. Abbildung 3). Als Richtwert wird daher eine maximale Rechenzeit im einstelligen Sekundenbereich definiert.

Um die Vorgaben an die Rechenzeit einhalten zu können, wird daher ein weiterer Versuchskomplex zur Untersuchung des Berechnungsaufwandes unter Berücksichtigung der für die Rechenzeit relevanten Faktoren durchgeführt. Der Versuchsplan zur Untersuchung des Berechnungsaufwandes ist in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 10: Versuchsplan zur Untersuchung des Berechnungsaufwandes

Kategorie	Ausprägung				
Punkte in Breitenrichtung	100	500	1000	5000	10000
Ebenen in Längenrichtung	100	500	1000	5000	10000
Spezifikation Rechenleistung	Xeon E5-2630 v3 @ 2.4 GHz		Intel I7 2700K @ 3.5GHz		Intel I7 870 @ 2.9GHz

Ähnlich wie bei einer numerischen Simulation ist die Netzdichte, bzw. die Punktfinheit ein wesentliches Kriterium für den notwendigen Berechnungsaufwand, da entsprechend des in Kapitel 6.1 vorgestellten Ablaufs die jeweiligen Punkte einer Ebene selektiert, verschoben und transformiert werden müssen. Je feiner die Auflösung und damit je höher die Punktdichte, desto größer ist der Aufwand der mathematischen Operationen zur geometrischen Veränderung einer einzelnen zweidimensionalen Schnittebene. Die dreidimensionale

Erweiterung des Modellansatzes durch den Einsatz mehrerer aufeinander folgender zwei-dimensionaler Schnittebenen wird innerhalb der programmiertechnischen Realisierung durch eine übergeordnete Schleifenstruktur gelöst. Dementsprechend hat die Anzahl der Schnittebenen ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf den Berechnungsaufwand und wird innerhalb des Versuchskomplexes untersucht. Da der Berechnungsaufwand neben der Punktdichte und Anzahl an Schnittebenen maßgeblich von der hardwareseitigen Umsetzung abhängt, wird ebenfalls die Rechenleistung anhand von drei repräsentativen Spezifikationen untersucht. Es sei hierbei ausdrücklich erwähnt, dass es sich hierbei um eine rein qualitative Analyse des Berechnungsaufwandes handelt, um eine grobe Abschätzung hinsichtlich Bewertung der industriellen Tauglichkeit des Berechnungsmodells vornehmen zu können. Neben der hardwareseitigen Umsetzung können Steigerungen der Performance zudem durch rechenzeitorientierte Programmierung realisiert werden. Dies wird in diesem Kontext jedoch nicht behandelt.

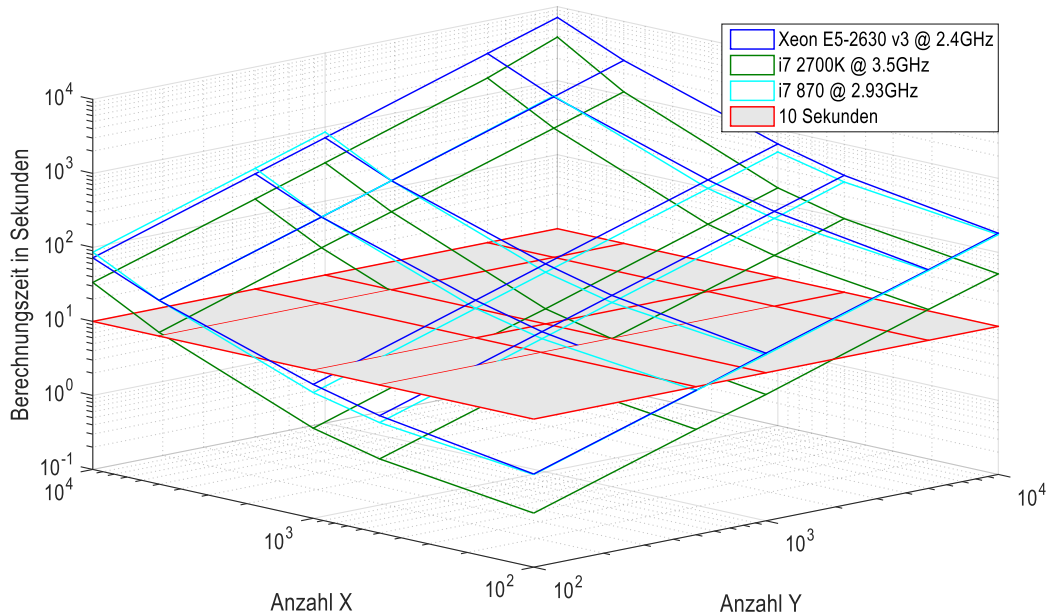
Im folgenden Abschnitt wird nun der Versuchskomplex anhand einer charakteristischen Umformaufgabe durchgeführt. Die Konfiguration der charakteristischen Umformaufgabe orientiert sich hinsichtlich der Parameterausprägung an der industriellen Anwendung der kaltplastischen Blechumformung durch freies Biegen und ist in der nachfolgenden Tabelle 11 aufgelistet.

**Tabelle 11: Konfiguration der charakteristischen Umformaufgabe**

<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>	<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Werkstoff	S 355 JR	Werkzeuglänge	1500 mm
Beschichtung	Primer	Backenabstand	252 mm
Blechlänge	4000 mm	Schwerteindringtiefe	10 mm
Blechbreite	2000 mm	Eingriffspunkt in Breitenrichtung	1000 mm
Blechdicke	10 mm	Eingriffspunkt in Längsrichtung	2000 mm
Walzrichtung	längs	Verfahrgeschwindigkeit	180 $\frac{mm}{min}$

Basierend auf der definierten Versuchsmatrix und Konfiguration der charakteristischen Umformaufgabe kann der Berechnungsaufwand mit Hilfe einer vollfaktoriellen Parametervariation untersucht werden. Als notwendige Berechnungszeit wird der reine Berech-

nungsaufwand zur Umformprognose abzüglich Programminitialisierung und Ergebnistransfer ausgewertet. Die Ergebnisse des Untersuchungskomplexes sind in der nachfolgenden Abbildung 68 aufgeführt.



**Abbildung 68: Berechnungsaufwand in Relation zur Netzfeinheit**

Die Anzahl der Punkte in Breitenrichtung (Anzahl X) und Anzahl der Schnittebenen in Längenrichtung (Anzahl Y) sowie die Berechnungszeit sind aufgrund der besseren Visualisierung logarithmisch dargestellt. Anhand der zusätzlich eingeführten Schnittebene bei einer Berechnungszeit von zehn Sekunden können die Versuchsergebnisse hinsichtlich der Anforderungen an eine industrielle Integration ausgewertet werden. Für alle drei eingesetzten Prozessoren kann eine Zunahme der Berechnungszeit mit Maximierung der Netzfeinheit identifiziert werden. Je höher der Prozessor getaktet ist, desto geringer fällt die erforderliche Rechenzeit aus. Die Anzahl der Punkte in Breitenrichtung weist im Vergleich zur Anzahl der Schnittebenen eine geringere Steigung hinsichtlich einer Zunahme der Berechnungszeit auf. Dies führt dazu, dass durch eine geringere Anzahl an Schnittebenen die Punktdichte unter gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen an die industrielle Integration erhöht werden kann. Demensprechend ist das geometrische Modell tendenziell dazu geeignet, die Anforderungen an die Rechenzeit hinsichtlich zu erfüllen. Im Rahmen der industriellen Integration ist daher ein Optimum aus Netzfeinheit und Berechnungsaufwand für gegebene Prozessorspezifikationen zu wählen.

## 7.5 Fazit der experimentellen Erprobung

Im Rahmen der experimentellen Erprobung des geometrischen Ersatzmodells wurden drei unterschiedliche Umformszenarien definiert, mit denen die Prognosegenauigkeit im Hinblick auf den Einsatz in einer industriellen Anwendung untersucht werden kann. Hierbei berücksichtigen die gewählten Umformszenarien den Einfluss des Eingriffspunktes, da neben nicht überlappenden und direkt anschließenden Umformbereichen auch überlappende Umformbereiche untersucht werden. Neben den unterschiedlich gewählten Umformbereichen wurde bei der Versuchsplanung zudem die Erprobung des Modellansatzes zur Abbildung der kaltplastischen Verfestigung bei zunehmender Prozessschrittanzahl realisiert. Aufbauend auf der Versuchsplanung konnte die Prognosegenauigkeit des geometrischen Ersatzmodells anhand eines charakteristischen Kennwertes ausgewertet werden, der die prozentuale Abweichung zwischen der prognostizierten und ermittelten maximalen Durchbiegung des Versuchsblechs darstellt. Nach Auswertung der Versuchsergebnisse hinsichtlich des Auswertungskriteriums können als Fazit der Validierungsversuche zwei wesentliche Schlussfolgerungen formuliert werden.

Zum einen ist die Genauigkeit des vereinfachten Ersatzmodells nicht von dem untersuchten Umformszenarium abhängig. Je nach eingesetztem Werkstoff sowie der Inhomogenität innerhalb des Blechs können Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlichem Umformverhalten auftreten, die jedoch innerhalb der Validierungsversuche einen maximalen Wert von  $\delta L = 34 \%$  nicht überschritten haben.

Zum anderen ist bei den Versuchsreihen der nicht überlappenden und direkt anschließenden Umformbereiche kein Einfluss der Prozessschrittanzahl auf die Prognosegenauigkeit zu detektieren. Einzig bei der Versuchsreihe mit überlappenden Umformbereichen ist eine Verschlechterung der Prognosegenauigkeit mit zunehmender Prozessschrittanzahl zu identifizieren. Demnach ist die Kausalität des Modellansatzes zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung innerhalb des geometrischen Ersatzmodells gegeben.

Die beiden wesentlichen Schlussfolgerungen aus den Validierungsversuchen zeigen, dass eine reine Verwendung des geometrischen Ersatzmodells ohne Rückführung der optischen Vermessung zu hohen Abweichungen zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Umformverhalten führt und deren Einsatz in einer industriellen Anwendung aufgrund möglicher Instabilitäten kritisch zu bewerten ist. Aus diesem Grund wurde zudem die Möglichkeit zur Kompensation von Modellabweichungen anhand der optischen Vermessung untersucht.

Die Kompensation von Modellabweichungen wird zum einen durch die Korrektur der Prognose durch die optisch erfasste Blechkontur und zum anderen durch eine Skalierung der aus dem künstlichen neuronalen Netz vorhergesagten geometrischen Modellparameter erreicht. Die Skalierung der geometrischen Modellparameter erfolgt durch Verwendung des Modells zur iterativen Bestimmung der Modellparameterabweichung aus Kapitel 6.5

Durch Verwendung des Ansatzes zur Kompensation von Modellabweichungen kann die prozentuale Abweichung zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Umformverhalten bei den durchgeführten Validierungsversuchen signifikant reduziert werden. Hierbei wird bei den Versuchsreihen der nicht überlappenden und direkten anschließenden Umformbereiche eine Reduktion der prozentualen Abweichung von  $\delta L < 5 \%$  mit zunehmender Prozessschrittanzahl erreicht. Auch bei der Versuchsreihe mit überlappenden Umformbereichen kann die zuvor identifizierte Verschlechterung der Prognosegenauigkeit mit zunehmender Prozessschrittanzahl verbessert werden, sodass ein oszillierender Verlauf der prozentualen Abweichung gegen NULL bei zunehmender Prozessschrittanzahl erreicht wird. Als Fazit der Untersuchung zur Kompensation von Modellabweichungen kann ein Einsatz des geometrischen Ersatzmodells innerhalb einer industriellen Anwendung aufgrund des Erreichens der notwendigen Stabilität und Prognosegenauigkeit nachgewiesen werden.

Da neben der Genauigkeit und Stabilität des Prognosemodells ebenfalls der zur Berechnung notwendige Berechnungsaufwand für die industrielle Anwendung besonders bei einer echtzeitfähigen Steuerung von Relevanz ist, wurde zudem der Berechnungsaufwand untersucht. Hierbei wurden neben den für die Rechenzeit relevanten Parameter der Punktdichte einer Ebene sowie Anzahl der Ebenen ebenfalls unterschiedliche Prozessoren untersucht. Es zeigt sich, dass für alle untersuchten Prozessoren eine ausreichende Punktdichte des geometrischen Ersatzmodells unter Einhaltung des Grenzwertes der industriellen Anwendung ( $t < 10 \text{ s}$ ) gewährleistet werden kann.

Als Fazit der durchgeführten experimentellen Erprobungsversuche kann daher die Eignung des geometrischen Ersatzmodells für die industrielle Anwendung der kaltplastischen Umformung durch freies Biegen hinsichtlich Prognosegenauigkeit, Modellstabilität durch Kompensation von Modellabweichungen und notwendiger Rechenzeit nachgewiesen werden.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Anlagenkonzept zur Automatisierung der kaltplastischen Umformung von Grobblechen für die maritime Industrie durch freies Biegen erforderte die Entwicklung eines Prognosemodells zur kontinuierlichen Vorhersage des Umformverhaltens des Blechs während des Umformprozesses. Hierbei bestanden aufgrund der Einbindung des Prognosemodells in eine industrielle Steuerungsumgebung besondere Anforderungen bezüglich der Prognosegenauigkeit, Kompensation von Modellabweichungen sowie des notwendigen Berechnungsaufwandes.

Im Rahmen einer Analyse des Standes der Technik konnten bestehende analytische, numerische und empirisch basierte Modellansätze zur Prognose der kaltplastischen Umformung aufgearbeitet und die wesentlichen Entwicklungsdefizite identifiziert werden. Hierbei sind analytische und numerische Modellansätze tendenziell geeignet, die Umformung mit hoher Genauigkeit vorherzusagen, jedoch eignen sie sich nur für größere Serien, da sie ein konstantes Materialverhalten erfordern und die Anforderungen an die Rechenzeit bei einer Fertigung von Einzelstücken nicht erfüllt werden. Die empirisch basierten Modellansätze des Gesenkbiegens und Line-Heatings sind zwar nicht auf die Anwendung durch freies Biegen adaptierbar, bilden jedoch die Grundlage zur Entwicklung eines Lösungsansatzes auf Basis eines geometrischen Ersatzmodells.

Basierend auf geometrischen Modellgrößen konnte das charakteristische Umformverhalten beim feien Biegen für einen industriell relevanten Parameterraum dargestellt werden. Zu diesem Zweck wurde neben einem skalierten experimentellen Versuchsaufbau unter Laborbedingungen ebenfalls ein parametrierbares numerisches Simulationsmodell entwickelt. Für die Charakterisierung des Umformverhaltens und Identifikation der relevanten Einflussfaktoren des industriell relevanten Parameterraums konnten somit die Ergebnisse von experimentellen und numerischen Versuchskomplexen ausgewertet werden. Hierbei wurden die Verschiebung des Schwertes, die Blechdicke, der Backenabstand und die werkstoffspezifische Fließspannung als maßgebliche Einflussfaktoren auf das Umformverhalten identifiziert.

Im Rahmen des Modellaufbaus konnte neben der mathematischen Beschreibung des geometrischen Ersatzmodells auch ein künstliches neuronales Netz zur Bestimmung der geometrischen Modellparameter in Relation zur Blechkonfiguration innerhalb des untersuchten Parameterraums aufgebaut und trainiert werden. Der Einsatz des künstlichen

neuronalen Netzes bildet zudem die Grundlage für einen neuen Lösungsansatz zur Berücksichtigung der kaltplastischen Verfestigung, mit dem die Änderung des werkstoffspezifischen Fließverhaltens bei Zunahme des Umformgrades anhand einer idealisierten Prozesskurve abgebildet werden kann. Zusätzlich werden ein Modell zur Einbindung der optischen Vermessung sowie ein iteratives Verfahren zur Bestimmung der Modellabweichung entwickelt, mit denen die Rückführung des tatsächlichen Umformverhaltens auf Basis der optischen Vermessung innerhalb eines mehrstufigen Umformprozesses ermöglicht werden kann.

Zur Validierung des entwickelten geometrischen Ersatzmodells werden drei Umformszenarien für die industrielle Anwendung definiert und im Rahmen eines weiteren experimentellen Versuchskomplexes untersucht. Als Fazit der experimentellen Validierung kann die Eignung des geometrischen Ersatzmodells hinsichtlich der in der Zielstellung formulierten Anforderungen an die Prognosegenauigkeit, Kompensation von Modellabweichungen sowie der Einhaltung einer industriell vertretbaren Rechenzeit nachgewiesen werden. Hierbei zeigt sich, dass die höchste Modellgenauigkeit erreicht werden kann, wenn die Modellparameter des neuronalen Netzes mit der rückgeführten prozentualen Modellabweichung skaliert werden und die Umformbereiche bei dem mehrstufigen Prozess nicht überlappen (Umformszenarium A und B). Dies kann im Rahmen einer automatisierten Prozessplanung durch angepasste Wahl der Eingriffspunkte sichergestellt werden. Des Weiteren kann die Stabilität des Prognosemodells bei Schwankungen der Werkstoffeigenschaften sowie Inhomogenität im Blech durch die Einbindung der optischen Vermessung gewährleistet werden, die für einen industriellen Einsatz zwingend erforderlich ist.

Im Ausblick bildet die Entwicklung des geometrischen Ersatzmodells eine wesentliche Grundlage für nachfolgende Forschungsarbeiten im Bereich der Automatisierung der kaltplastischen Umformung von Grobblechen durch freies Biegen.

Die rechenzeitoptimierte Prognose der Umformung bietet die Möglichkeit zur Nachbildung des gesamten Umformprozesses und Ableitung von Modellen der automatisierten Prozessplanung. Diese Modelle der automatisierten Prozessplanung sind zur Bestimmung der Prozessabfolge, insbesondere der Eingriffspunkte und Schwertverschiebung, in Relation einer beliebigen Sollgeometrie notwendig und bilden somit die Schnittstelle zwischen einem manuell und einem automatisiert durchgeführten Umformprozess.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst die Vereinfachung eines zweidimensionalen Umformverhaltens entlang der Werkzeuglänge getroffen. Die nachfolgenden Forschungs-

arbeiten sollten daher die Berücksichtigung der Querkontraktion bei einem dreidimensionalen Umformverhaltens beinhalten. Dies betrifft zudem die Adaption auf andere Umformverfahren. z.B. Recken oder Walzrunden, da zur Herstellung von mehrachsig gekrümmten Grobblechen die Überlagerung von verschiedensten Umformverfahren notwendig ist und im Zuge einer gesamtheitlichen Prozessautomatisierung berücksichtigt werden muss.

Der in dieser Arbeit aufgeführte Ansatz der Kompensation von Modellabweichungen basiert auf einer Korrektur der Modellparameter je Umformaufgabe. Das dargestellte Anlagenkonzept ermöglicht die Aufzeichnung von Prozess- und Geometriedaten, die zur kontinuierlichen Verbesserung der Prognosegenauigkeit des künstlichen neuronalen Netzes genutzt werden können. Hierzu sind Modelle notwendig, die eine intelligente Sortierung der Prozess- und Geometriedaten unter Berücksichtigung von Ausreißern ermöglichen und zudem einen automatischen Lernvorgang des künstlichen neuronalen Netzes anstoßen.

Die kontinuierliche Verbesserung des künstlichen neuronalen Netzes und der somit verstärkte Einsatz der künstlichen Intelligenz bietet zudem die Möglichkeit bereits während des Umformprozesses auf Schwankungen innerhalb der Prozesskette reagieren zu können. Dies betrifft beispielsweise die Identifikation der eigenspannungsinduzierten Inhomogenität, die einen wesentlichen Einfluss auf den nachgelagerten Schweißprozess hat, aber auch die Bestimmung und Nachverfolgbarkeit von Materialkennwerten im Rahmen von Industrie 4.0.

## Literaturverzeichnis

- [1] MEYER WERFT GMBH & CO. KG. *AIDAcosma startet Emsüberführung* [online], 2021 [Zugriff am: 4. Februar 2023]. Verfügbar unter: [https://www.meyerwerft.de/de/presse/presse\\_detail/aidacosma\\_startet\\_emsueberfuehrung.jsp](https://www.meyerwerft.de/de/presse/presse_detail/aidacosma_startet_emsueberfuehrung.jsp)
- [2] BINNENSCHIFFFAHRT. *Ostseestaal und Formstaal bündeln Kapazitäten* [online], 2018 [Zugriff am: 4. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://binnenschiffahrt-online.de/2018/02/featured/1490/ostseestaal-und-formstaal-buendeln-kapazitaeten/>
- [3] FROITZHEIM, P., M. STOLTMANN, N. FUCHS, C. WOERNLE und W. FLÜGGE. Prediction of metal sheet forming based on a geometrical model approach. *International Journal of Material Forming*, 2019.
- [4] STOLTMANN, M., P. FROITZHEIM, N. FUCHS und C. WOERNLE. Flatness-Based Feedforward Control of a Crane Manipulator with Four Load Chains. In: B. CORVES, P. WENGER und M. HÜSING, Hg. *EuCoMeS 2018. Proceedings of the 7th European Conference on Mechanism Science*. Cham, Switzerland: Springer, 2019, S. 61-68. ISBN 3319980203.
- [5] STOLTMANN, M., P. FROITZHEIM, N. FUCHS und C. WOERNLE. Feedforward control of a crane manipulator. In: T.L. IMSD, Hg. *The 5th Joint International Conference on Multibody System Dynamics*. Lisboa, Portugal, 2018.
- [6] HANDREG, T., P. FROITZHEIM, N. FUCHS, W. FLÜGGE, M. STOLTMANN und C. WOERNLE. Concept of an automated framework for sheet metal cold forming. In: T. SCHÜPPSTUHL, K. TRACHT und J. ROßMANN, Hg. *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, 2019, S. 117-127. ISBN 3662593165.
- [7] *DIN 8580:2022-12, Fertigungsverfahren\_ - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [8] *DIN 8582:2003-09, Fertigungsverfahren Umformen\_ - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [9] *DIN 8586: Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag.
- [10] RICHARD, H.A. und M. SANDER. *Technische Mechanik. Festigkeitslehre. Lehrbuch mit Praxisbeispielen, Klausuraufgaben und Lösungen*. Studium. 2., erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008.

- [11] HOFFMANN, H., R. NEUGEBAUER und G. SPUR. *Handbuch Umformen*. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2012.
- [12] DIETRICH, J. *Praxis der Umformtechnik. Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*. 12., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [13] LANGE, K. *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Zweite, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 1990.
- [14] KUGLER, H. *Umformtechnik. Umformen metallischer Konstruktionswerkstoffe*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2009.
- [15] REISSNER, J., M. MÜLLER-DUYSING, E. DANNENMANN und J. LADWIG. Biegen. In: K. LANGE, Hg. *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Zweite, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 1990, S. 243-310. ISBN 978-3-662-10687-7.
- [16] ZHANG, Z. A Refined Model of Three-roller Elastoplastic Asymmetrical Pre-bending of Plate. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, (Bd. 21, 3).
- [17] VIN, L.J. de, A.H. STREPPPEL, U.P. SINGH und H. KALS. A process model for air bending [online]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, **57**(1-2), 48-54. *Journal of Materials Processing Technology*. Verfügbar unter: doi:10.1016/0924-0136(95)02043-8
- [18] VORKOV, V., R. AERENS, D. VANDEPITTE und J.R. DUFLOU. Analytical Prediction of Large Radius Bending by Circular Approximation [online]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, **140**(12). ISSN 1087-1357. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4041496
- [19] DOEGE, E. und B.-A. BEHRENS. *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. VDI-Buch. 3., überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, Oktober 2018.
- [20] WAGNER, M. *Lineare und nichtlineare FEM. Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [21] SCHMIED, C. und T. ERHART. Updated Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA. In: DYNAMORE GMBH, Hg. *LS-DYNA Forum*. Stuttgart: DYNAMORE GmbH, 2018, S. 234. ISBN 978-3-9816215-5-6.

- [22] SCHILLING, M., T. WILLMANN und M. BISCHOFF. 3D-Shell Elements for Improved Prediction Quality in Sheet Metal Forming Simulations. In: *16th LS-DYNA Forum2022*, S. 119-120.
- [23] SCHMIDT-JÜRGENSEN, R. *Untersuchungen zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen beim Tiefziehen*: Hannover : Universität, 2002.
- [24] SÜßE, D. *Dickblechumformung rotationssymmetrischer Teile*. Dissertation. Dresden, 2005.
- [25] FU, Z., J. MO, P. GONG, W. ZHANG, Z. LI und K. HUANG. Mould correction for sheet-metal multi-step incremental air-bending forming based on close-loop control and FEM simulation [online]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2009, **51**(9-10), 732-740. ISSN 00207403. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijmecsci.2009.08.006
- [26] FU, Z., J. MO und W. ZHANG. Study on multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal with springback model and FEM simulation [online]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **45**(5-6), 448-458. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-009-1982-2
- [27] ZHAO, K.M. und J.K. LEE. Finite element analysis of the three-point bending of sheet metals [online]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **122**(1), 6-11. *Journal of Materials Processing Technology*. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0924-0136(01)01064-0
- [28] LEMAITRE, J. und J.-L. CHABOCHE. Plasticity. In: J. LEMAITRE und J.-L. CHABOCHE, Hg. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, S. 161-252. ISBN 9781139167970.
- [29] HENKER, W. *Technologische Verfahren. Fertigungsverfahren im Maschinenbau, Hauptgruppe Umformen, Systematik und Begriffe*. FZW-Information 22. 22. Karl-Marx-Stadt: Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaues, 1975.
- [30] HOEPKE, J. *Entwicklung eines Finite-Elemente-Modells zur Vorhersage von Grobblechumformungen*. Masterarbeit. Rostock, 2. Nov. 2015.
- [31] HATZENBICHLER, T., O. HARRER und B. BUCHMAYR. Entwicklungsstand und Nutzen der FEM-Simulation von Massivumformprozessen. *BHM*, 2006, **151**(11), 469-474.
- [32] MÜLLER-DUYSING, M. *Die Berechnung und adaptive Steuerung des Drei-Punkt-Biegens*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.

- [33] VORKOV, V., A.T. GARCÍA, G.C. RODRIGUES und J.R. DUFLOU. Data-driven prediction of air bending [online]. *Procedia Manufacturing*, 2019, **29**, 177-184. ISSN 23519789. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.promfg.2019.02.124
- [34] ISHIYAMA, M. Advanced Line-Heating Process for Hull-Steel Assembly. *Journal of Ship Production*, 2000, (Vol. 16, No. 2), 121-132.
- [35] JANG, C.D. und S.C. MOON. An Algorithm to Determine Heating Lines for Plate Forming by Line Heating Method. *Journal of Ship Production*, 1998, (Vol. 14, No. 4), 238-245.
- [36] NAM JONG-HO, J.G. SHIN und C.H. RYU. A Comprehensive Line-Heating Algorithm for Automatic Formation. *Journal of Ship Production*, 2004, (Vol. 20, No. 2), 69-78.
- [37] SHIN, J.G., Y.-G. KIM und NAM JONG-HO. An Integrated Approach to Determine Optimal Process Information of Large-Scale Line-Heating Process With Deformation Simulation. *Journal of Ship Production*, 2004, (Vol. 20, No. 4), 211-220.
- [38] SEO, S.I., Y.H. YANG und C.D. JANG. Development of a New Finite-Element Method to Analyze Deformation of Plate due to Line heating. *Journal of Ship Production*, 2001, (Vol. 17, No. 1), 1-7.
- [39] BRAESS, D. *Finite Elemente. Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie*. Springer-Lehrbuch Masterclass. 52013. Auflage. Heidelberg: Springer, 2013.
- [40] SHIN, J.G., C.H. RYU, J.h. LEE und W.D. KIM. User-Friendly, Advanced Line Heating Automation for Accurate Plate Forming. *Journal of Ship Production*, 2003, **Vol. 19**(No. 1), 8-15.
- [41] MOELLER, E. *Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Auswahl, Eigenschaften, Anwendung*: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2013.
- [42] HERING, E. *Physik für Ingenieure*. Lehrbuch. 12. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [43] ROOS, E. *Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Springer-Lehrbuch. 5. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2015.
- [44] RÖSLER, J. und M. BÄKER. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Mit 34 Aufgaben mit Lösungen*. Studium. 3., durchges. und korr. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [45] ILSCHNER, B. und R.F. SINGER. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. Springer-Lehrbuch. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

- [46] BARGEL, H.-J. und G. SCHULZE, Hg. *Werkstoffkunde*. Springer-Lehrbuch. 12., bearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [47] HORNBOGEN, E. *Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. Springer-Lehrbuch. 8. Auflage. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [48] 2. AUFL., N.i.v.A.I.S., Hg. *Umformtechnik. Grundlagen*. Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- [49] WILL, J., D. ROOS, RIEDEL und JÖRG. *Robustheitsbewertung in der stochastischen Strukturmechanik*, Mai 2003.
- [50] SEIDEL, W.W. und F. HAHN. *Werkstofftechnik. Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung : mit zahlreichen Tabellen, Beispielen, Übungen und Testaufgaben*. Lernbücher der Technik. 11., aktualisierte Auflage, 2018.
- [51] DOEGE, E., H. MEYER-NOLKEMPER und I. SAEED. *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. Mit Fließkurven für 73 Werkstoffe und einer grundlegenden Einführung*. München: Hanser, 1986.
- [52] BÜHRING-POLACZEK, A., W. MICHAELI und G. SPUR. *Handbuch Urformen*. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. [vollst. überarb. Neuaufl.]. München: Hanser, 2014.
- [53] WOLFSTIEG, U. und E. MACHERAUCH. Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen [online]. *Chemie Ingenieur Technik - CIT*, 1973, **45**(11), 760-770. ISSN 0009-286X. Verfügbar unter: doi:10.1002/cite.330451103
- [54] KLOCKE, F. und W. KÖNIG. *Fertigungsverfahren 4. Umformen*. VDI-Buch. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [55] BLECK, W., A. FREHN, J. OHLERT, H.-M. SONNE und G. STEINBECK. Einfluss von Temperatur und Vorverformung auf das plastische Werkstoffverhalten von modernen Karosseriestählen [online]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2004, **35**(8), 495-504. ISSN 0933-5137. Verfügbar unter: doi:10.1002/mawe.200400766
- [56] RAABE, D. *Einfluß der Rauheit metallischer Oberflächen auf Reibung und Rückfederung*. Düsseldorf, März 2004.
- [57] BIRKERT, A.R., S. HAAGE und M. STRAUB. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen*. SpringerLink. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [58] SIEGERT, K., Hg. *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg, 2015.

- [59] FRÖHLICH, P. *FEM-Anwendungspraxis. Einstieg in die Finite Elemente Analyse ; zweisprachige Ausgabe Deutsch/Englisch*. Studium Technik. Wiesbaden: Vieweg, 2005.
- [60] KLEIN, B. *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Lehrbuch. 10., verbesserte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [61] WAGNER, M. *LINEARE UND NICHTLINEARE FEM. Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit Is-dyna*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2019.
- [62] STEINHEIMER, R. *Werkstoffmodellierung für die Umformtechnik*. Siegen, 2005.
- [63] HORWATITSCH, D. *Entwicklung eines Reibmodells für hohe Temperaturen und hohe Umformgrade*. Dissertation--Kassel Univ., 2012. Berichte zur Metallformgebung. Band 3. Kassel: Kassel University Press, 2013.
- [64] SIEBERTZ, K. *Statistische Versuchsplanung : Design of Experiments (DoE)*. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [65] CURT RONNIGER. *Taschenbuch der statistischen Qualitäts-und Zuverlässigkeitsmethoden. Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis*. Starnberg, 2012.
- [66] BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE und R. WEIBER. *Multivariate Analysemethoden*. 14. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Gabler, 2016.
- [67] THOMS, V. und J. KALICH. *Prozeßvorhersage beim Stanznieten mit neuronalen Netzen. Ergebnisse eines Vorhabens der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)*. EFB-Forschungsbericht. Nr. 179. Hannover: EFB, 2002.
- [68] VISWANATHAN, V., B. KINSEY und J. CAO. Experimental Implementation of Neural Network Springback Control for Sheet Metal Forming [online]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2003, **125**(2), 141. ISSN 00944289. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.1555652
- [69] FORCELLESE, A., F. GABRIELLI und R. RUFFINI. Effect of the training set size on springback control by neural network in an air bending process [online]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **80-81**, 493-500. Journal of Materials Processing Technology. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0924-0136(98)00122-8
- [70] ERTEL, W. *Grundkurs künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung*: Morgan Kaufmann, 2016.
- [71] BACKHAUS, K. *Fortgeschrittene multivariante Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*: Gabler, 2015.

- [72] GROSAN, C. und A. ABRAHAM. *Intelligent systems. A modern approach*. Intelligent systems reference library. v. 17. New York: Springer, 2011.
- [73] DIN EN ISO 6892-1: *Metallische Werkstoffe - Zugversuch-Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Berlin: Beuth Verlag, Februar 2017.
- [74] DIN EN 10025-2: *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle*. Berlin: Beuth Verlag, April 2005.
- [75] DIN EN 10025-3: *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle*. Berlin: Beuth Verlag, April 2011.
- [76] DIN 50125: *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [77] HOCKETT, J.E. und O.D. SHERBY. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **1975**.
- [78] VDA 230-213: *Prüfverfahren für die Produktklassen Prelube, Prelube 2, Hotmelt, Spot lubricant*, Juli 2018.
- [79] DIN EN ISO 4288 : 1996: *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [80] DIN EN ISO 4287:2010-07: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [81] HAYN, M. *Entwicklung und Durchführung einer Prüfmethode zur Charakterisierung der Kaltplastischen Blechumformung*. Bachelorarbeit. Rostock, 7. Nov. 2016.
- [82] FUCHS, N., P. FROITZHEIM, W. FLÜGGE und C. WOERNLE. Characterization of the metal sheet forming by free bending with LS-DYNA. In: DYNAMORE GMBH, Hg. *LS-DYNA Forum*. Stuttgart: DYNAmore GmbH, 2018, S. 124-125. ISBN 978-3-9816215-5-6.
- [83] FROITZHEIM, P., N. FUCHS, W. FLÜGGE und C. WOERNLE. *Characterization of metal sheet forming by free bending with LS-DYNA* [online], 2018. Verfügbar unter: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/2018-ls-dyna-forum/papers-2018/dienstag-16.-oktober/process-rolling-and-bending/charakterisierung-der-grobblechumformung-beim-freien-biegen-mit-hilfe-von-ls-dyna>

- [84] FLOREK, L. *Aufbau und Validierung eines Simulationsmodells zur Nachbildung der kaltplastischen Blechumformung*. Masterarbeit. Rostock, 8. Jan. 2018.
- [85] BEN AYED, L., C. ROBERT, A. DELAMÉZIÈRE, M. NOUARI und J.L. BATOZ. *Simplified numerical approach for incremental sheet metal forming process*, 2014.
- [86] VDI-RICHTLINIE 2230 Blatt 1: *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen-Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Berlin: Beuth, November 2015.
- [87] WOERNLE, C. *Mehrkörpersysteme. Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper*. Heidelberg: Springer, 2011.
- [88] PAPULA, L. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2* [online]. ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium, 2007. Verfügbar unter: <https://find.ub.uni-rostock.de/id{colon}562217258>
- [89] WHITE, R.E. *Elements of matrix modeling and computing with MATLAB*. Boca Raton [u.a.]: Chapman Hall/CRC, 2007.

**Anhangsverzeichnis**

Anhang 1:	Versuchsplan der experimentellen Charakterisierungsversuche .....	134
Anhang 2:	Versuchsplan der numerischen Charakterisierungsversuche .....	141
Anhang 3:	Versuchsergebnisse der experimentellen Charakterisierungsversuche	146
Anhang 4:	Versuchsergebnisse der numerischen Charakterisierungsversuche.....	150

## Anhang 1: Versuchsplan der experimentellen Charakterisierungsversuche

Tabelle 12: Aufschlüsselung der Parameterkombinationen der experimentellen Charakterisierungsversuche

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechdicke [mm]	Blechbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
1	1	491,2	10	500	3	0,08	180	3	Quer	Gestrahlt
1	2	491,75	10	500	3	0,08	180	3	Quer	Gestrahlt
1	3	491,2	10	500	3	0,08	180	3	Längs	Gestrahlt
1	4	491,75	10	500	3	0,08	180	3	Längs	Gestrahlt
2	1	404,625	8	300	2	0	60	3	Quer	Gestrahlt
2	2	416,8	8	300	2	0	60	3	Quer	Gestrahlt
2	3	404,625	8	300	2	0	60	3	Längs	Gestrahlt
2	4	416,8	8	300	2	0	60	3	Längs	Gestrahlt
3	1	416,8	10	300	1	0,08	180	2	Quer	Primer
3	2	404,625	10	300	1	0,08	180	2	Quer	Primer
3	3	416,8	10	300	1	0,08	180	2	Längs	Primer
3	4	404,625	10	300	1	0,08	180	2	Längs	Primer
4	1	290,5	5	700	1	-0,05	60	5,5	Quer	Primer
4	2	290,5	5	700	1	-0,05	60	5,5	Quer	Primer
4	3	296,86	5	700	1	-0,05	60	5,5	Längs	Primer
4	4	296,86	5	700	1	-0,05	60	5,5	Längs	Primer

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechedicke [mm]	Blechbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
5	1	491,75	10	500	2	-0,05	60	7	Quer	Primer
5	2	491,75	10	500	2	-0,05	60	7	Quer	Primer
5	3	491,2	10	500	2	-0,05	60	7	Längs	Primer
5	4	491,2	10	500	2	-0,05	60	7	Längs	Primer
6	1	290,5	5	500	2	0,08	180	3	Quer	Zunder
6	2	296,86	5	500	2	0,08	180	3	Quer	Zunder
6	3	296,86	5	500	2	0,08	180	3	Längs	Zunder
6	4	290,5	5	500	2	0,08	180	3	Längs	Zunder
7	1	491,2	8	500	2	0	60	2	Quer	Zunder
7	2	491,75	8	500	2	0	60	2	Quer	Zunder
7	3	491,2	8	500	2	0	60	2	Längs	Zunder
7	4	491,75	8	500	2	0	60	2	Längs	Zunder
8	1	491,75	8	700	2	0,08	180	10	Quer	Primer
8	2	491,75	8	700	2	0,08	180	10	Quer	Primer
8	3	491,2	8	700	2	0,08	180	10	Längs	Primer
8	4	491,2	8	700	2	0,08	180	10	Längs	Primer
9	1	491,75	5	300	2	-0,05	180	7	Quer	Gestrahlt
9	2	491,2	5	300	2	-0,05	180	7	Quer	Gestrahlt
9	3	491,75	5	300	2	-0,05	180	7	Längs	Gestrahlt
9	4	491,2	5	300	2	-0,05	180	7	Längs	Gestrahlt

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechedicke [mm]	Blecbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
10	1	296,86	5	700	2	0,08	60	2	Quer	Gestrahlt
10	2	290,5	5	700	2	0,08	60	2	Quer	Gestrahlt
10	3	290,5	5	700	2	0,08	60	2	Längs	Gestrahlt
10	4	296,86	5	700	2	0,08	60	2	Längs	Gestrahlt
11	1	290,5	10	500	1	0	60	10	Quer	Gestrahlt
11	2	296,86	10	500	1	0	60	10	Quer	Gestrahlt
11	3	296,86	10	500	1	0	60	10	Längs	Gestrahlt
11	4	290,5	10	500	1	0	60	10	Längs	Gestrahlt
12	1	491,75	5	700	1	0	180	10	Quer	Zunder
12	2	491,2	5	700	1	0	180	10	Quer	Zunder
12	3	491,2	5	700	1	0	180	10	Längs	Zunder
12	4	491,75	5	700	1	0	180	10	Längs	Zunder
13	1	416,8	8	500	3	-0,05	180	5,5	Quer	Gestrahlt
13	2	404,625	8	500	3	-0,05	180	5,5	Quer	Gestrahlt
13	3	416,8	8	500	3	-0,05	180	5,5	Längs	Gestrahlt
13	4	404,625	8	500	3	-0,05	180	5,5	Längs	Gestrahlt
14	1	296,86	10	300	2	-0,05	180	10	Quer	Primer
14	2	290,5	10	300	2	-0,05	180	10	Quer	Primer
14	3	296,86	10	300	2	-0,05	180	10	Längs	Primer
14	4	290,5	10	300	2	-0,05	180	10	Längs	Primer

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechedicke [mm]	Blecbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
15	1	416,8	10	300	3	-0,05	60	2	Quer	Zunder
15	2	404,625	10	300	3	-0,05	60	2	Quer	Zunder
15	3	404,625	10	300	3	-0,05	60	2	Längs	Zunder
15	4	416,8	10	300	3	-0,05	60	2	Längs	Zunder
16	1	296,86	8	700	1	0	180	7	Quer	Gestrahlt
16	2	290,5	8	700	1	0	180	7	Quer	Gestrahlt
16	3	296,86	8	700	1	0	180	7	Längs	Gestrahlt
16	4	290,5	8	700	1	0	180	7	Längs	Gestrahlt
17	1	404,625	10	700	3	0	180	5,5	Quer	Zunder
17	2	416,8	10	700	3	0	180	5,5	Quer	Zunder
17	3	416,8	10	700	3	0	180	5,5	Längs	Zunder
17	4	404,625	10	700	3	0	180	5,5	Längs	Zunder
18	1	491,75	8	700	1	-0,05	60	3	Quer	Zunder
18	2	491,75	8	700	1	-0,05	60	3	Quer	Zunder
18	3	491,2	8	700	1	-0,05	60	3	Längs	Zunder
18	4	491,2	8	700	1	-0,05	60	3	Längs	Zunder
19	1	296,86	8	300	3	-0,05	180	10	Quer	Primer
19	2	296,86	8	300	3	-0,05	180	10	Quer	Primer
19	3	290,5	8	300	3	-0,05	180	10	Längs	Primer
19	4	290,5	8	300	3	-0,05	180	10	Längs	Primer

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechedicke [mm]	Blecbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
20	1	491,75	5	300	3	0	60	5,5	Quer	Primer
20	2	491,75	5	300	3	0	60	5,5	Quer	Primer
20	3	491,2	5	300	3	0	60	5,5	Längs	Primer
20	4	491,2	5	300	3	0	60	5,5	Längs	Primer
21	1	416,8	5	500	1	0	180	2	Quer	Primer
21	2	416,8	5	500	1	0	180	2	Quer	Primer
21	3	404,625	5	500	1	0	180	2	Längs	Primer
21	4	404,625	5	500	1	0	180	2	Längs	Primer
22	1	404,625	5	500	1	0,08	60	10	Quer	Zunder
22	2	404,625	5	500	1	0,08	60	10	Quer	Zunder
22	3	416,8	5	500	1	0,08	60	10	Längs	Zunder
22	4	416,8	5	500	1	0,08	60	10	Längs	Zunder
23	1	290,5	8	300	3	0,08	60	7	Quer	Zunder
23	2	296,86	8	300	3	0,08	60	7	Quer	Zunder
23	3	290,5	8	300	3	0,08	60	7	Längs	Zunder
23	4	296,86	8	300	3	0,08	60	7	Längs	Zunder
24	1	404,625	8	300	3	0	60	12,5	Quer	Gestrahlt
24	2	416,8	8	300	3	0	60	12,5	Quer	Gestrahlt
24	3	404,625	8	300	3	0	60	12,5	Längs	Gestrahlt
24	4	416,8	8	300	3	0	60	12,5	Längs	Gestrahlt

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blehdicke [mm]	Blechbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
25	1	416,8	10	300	3	0,08	180	12,5	Quer	Primer
25	2	404,625	10	300	3	0,08	180	12,5	Quer	Primer
25	3	416,8	10	300	3	0,08	180	12,5	Längs	Primer
25	4	404,265	10	300	3	0,08	180	12,5	Längs	Primer
26	1	290,5	5	700	3	-0,05	60	12,5	Quer	Primer
26	2	290,5	5	700	3	-0,05	60	12,5	Quer	Primer
26	3	296,86	5	700	3	-0,05	60	12,5	Längs	Primer
26	4	296,86	5	700	3	-0,05	60	12,5	Längs	Primer
27	1	290,5	5	500	3	0,08	180	12,5	Quer	Zunder
27	2	296,86	5	500	3	0,08	180	12,5	Quer	Zunder
27	3	296,86	5	500	3	0,08	180	12,5	Längs	Zunder
27	4	290,5	5	500	3	0,08	180	12,5	Längs	Zunder
28	1	491,2	8	500	3	0	60	12,5	Quer	Zunder
28	2	491,75	8	500	3	0	60	12,5	Quer	Zunder
28	3	491,2	8	500	3	0	60	12,5	Längs	Zunder
28	4	491,75	8	500	3	0	60	12,5	Längs	Zunder
29	1	491,75	8	700	3	-0,05	60	12,5	Quer	Zunder
29	2	491,75	8	700	3	-0,05	60	12,5	Quer	Zunder
29	3	491,2	8	700	3	-0,05	60	12,5	Längs	Zunder
29	4	491,2	8	700	3	-0,05	60	12,5	Längs	Zunder

Probe	Blech	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blehdicke [mm]	Blecbreite [mm]	Anzahl	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Walzrichtung	Beschichtung
30	1	491,75	5	500	3	0	180	12,5	Quer	Primer
30	2	491,75	5	500	3	0	180	12,5	Quer	Primer
30	3	491,2	5	500	3	0	180	12,5	Längs	Primer
30	4	491,2	5	500	3	0	180	12,5	Längs	Primer

## Anhang 2: Versuchsplan der numerischen Charakterisierungsversuche

Tabelle 13: Aufschlüsselung der Parameterkombinationen der numerischen Charakterisierungsversuche

Nr.	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechdicke [mm]	Blechbreite [mm]	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwertversch. [mm]	Reibung	Werkzeugbreite [mm]
1	491,48	5	500	0	60	9	0,1	252
2	410,71	10	500	0	120	3	0,2	252
3	293,68	15	500	0	60	5,5	0,2	292
4	491,48	10	500	0,15	60	3	0,1	252
5	410,71	20	500	0,05	120	5,5	0,2	252
6	293,68	5	1000	0,05	120	7	0,2	272
7	491,48	20	700	0,1	180	10	0,1	272
8	410,71	15	700	0,05	120	3	0,2	292
9	410,71	10	1000	0,15	60	3	0,1	272
10	491,48	5	1000	0,15	180	10	0,1	292
11	491,48	10	500	0	60	5,5	0,2	252
12	293,68	5	700	0,15	180	15	0,2	272
13	293,68	5	1000	0	60	10	0,2	292
14	491,48	10	1000	0,05	180	3	0,2	252
15	293,68	5	1000	0,15	180	10	0,2	252
16	293,68	8	500	0,15	120	5,5	0,2	252
17	410,71	10	500	0,05	60	5,5	0,2	272
18	491,48	20	1000	0,1	180	12,5	0,2	272
19	293,68	8	700	0,05	180	12,5	0,1	292
20	491,48	20	500	0,05	60	10	0,2	292
21	491,48	5	1000	0,05	60	12,5	0,1	292
22	410,71	20	700	0,15	120	3	0,1	272
23	491,48	8	700	0,1	120	7	0,1	272
24	293,68	8	1000	0,1	180	10	0,2	252
25	410,71	10	700	0	180	12,5	0,2	292
26	410,71	8	700	0,05	60	3	0,1	292
27	410,71	15	500	0,1	60	12,5	0,1	292
28	491,48	5	1000	0,15	60	15	0,2	252
29	410,71	8	500	0,1	120	15	0,2	252
30	410,71	15	1000	0	120	7	0,1	292
31	410,71	20	700	0,05	120	12,5	0,1	272
32	293,68	15	500	0,15	60	7	0,2	272
33	491,48	5	500	0,15	60	10	0,2	292

Nr.	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechdicke [mm]	Blecbreite [mm]	Horizontal- ler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Rei- bung	Werk- zeug- breite [mm]
34	293,68	15	1000	0	60	12,5	0,1	252
35	410,71	5	500	0,05	120	15	0,2	292
36	410,71	15	700	0,1	180	5,5	0,2	252
37	410,71	8	500	0,05	120	7	0,1	272
38	293,68	8	500	0,05	60	3	0,2	292
39	491,48	15	700	0,05	180	3	0,1	292
40	491,48	8	1000	0,1	120	3	0,2	292
41	410,71	20	700	0	180	12,5	0,1	292
42	293,68	10	1000	0,05	180	7	0,1	292
43	491,48	10	700	0,15	60	7	0,2	292
44	293,68	15	700	0	180	10	0,2	272
45	491,48	20	1000	0	60	12,5	0,2	252
46	293,68	5	500	0,1	180	15	0,2	272
47	293,68	10	1000	0,15	120	15	0,1	252
48	410,71	20	1000	0,05	120	3	0,1	292
49	293,68	5	1000	0,1	120	3	0,2	252
50	293,68	8	1000	0,1	60	5,5	0,1	272
51	491,48	15	500	0	60	5,5	0,1	272
52	491,48	10	500	0,1	120	7	0,2	292
53	293,68	8	700	0,1	120	5,5	0,2	292
54	410,71	8	500	0,15	60	3	0,1	252
55	410,71	20	500	0,1	60	5,5	0,1	292
56	293,68	15	700	0,1	120	7	0,1	292
57	293,68	8	1000	0,15	180	12,5	0,2	272
58	293,68	5	700	0,05	120	7	0,1	292
59	410,71	10	700	0,05	180	15	0,1	272
60	491,48	10	500	0	120	15	0,1	292
61	293,68	15	700	0,05	180	5,5	0,2	292
62	491,48	15	1000	0,15	120	5,5	0,1	292
63	491,48	15	1000	0,1	180	7	0,2	292
64	293,68	20	700	0,15	180	7	0,1	292
65	491,48	20	500	0	120	15	0,1	292
66	293,68	20	500	0,15	120	7	0,2	272
67	491,48	8	700	0,05	60	15	0,1	272
68	293,68	8	1000	0	60	3	0,1	252
69	293,68	5	500	0,1	60	15	0,1	252

Nr.	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechdicke [mm]	Blechbreite [mm]	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwertversch. [mm]	Reibung	Werkzeugbreite [mm]
70	491,48	10	500	0,05	120	10	0,2	272
71	293,68	20	700	0,15	60	15	0,2	292
72	293,68	5	500	0,15	180	3	0,2	292
73	491,48	5	700	0	60	3	0,2	292
74	410,71	10	700	0,15	60	10	0,1	252
75	410,71	20	700	0,1	60	7	0,2	272
76	410,71	5	700	0	120	10	0,1	272
77	491,48	5	700	0,05	60	5,5	0,1	272
78	491,48	8	1000	0	120	5,5	0,1	252
79	410,71	10	1000	0,1	180	5,5	0,2	272
80	293,68	15	500	0,15	60	15	0,1	292
81	293,68	20	1000	0,05	180	7	0,1	272
82	491,48	15	1000	0,05	180	15	0,2	272
83	410,71	10	1000	0,15	60	3	0,2	252
84	410,71	15	1000	0,05	120	7	0,1	252
85	410,71	10	1000	0,05	120	10	0,2	272
86	293,68	20	1000	0	60	15	0,2	272
87	293,68	15	500	0,05	60	12,5	0,1	272
88	293,68	20	500	0,15	180	15	0,1	252
89	293,68	15	700	0	120	12,5	0,2	292
90	491,48	10	700	0,05	180	5,5	0,1	272
91	293,68	5	500	0,1	180	5,5	0,2	252
92	491,48	5	1000	0,1	180	12,5	0,1	252
93	293,68	15	1000	0,1	120	12,5	0,1	272
94	410,71	15	500	0,15	180	10	0,2	272
95	293,68	10	500	0,1	120	5,5	0,1	292
96	491,48	15	700	0,1	60	7	0,2	252
97	410,71	8	1000	0	180	5,5	0,2	272
98	293,68	10	700	0,15	180	3	0,2	272
99	410,71	8	1000	0,1	60	15	0,2	292
100	293,68	20	700	0	120	10	0,2	252
101	410,71	8	1000	0,05	180	15	0,1	292
102	410,71	15	500	0	120	12,5	0,2	272
103	491,48	20	1000	0,1	120	10	0,1	252
104	293,68	10	500	0,1	60	15	0,1	272
105	491,48	8	500	0	120	3	0,1	252

Nr.	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechdicke [mm]	Blechbreite [mm]	Horizontal- ler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwert- versch. [mm]	Rei- bung	Werk- zeug- breite [mm]
106	410,71	20	1000	0,15	60	7	0,1	272
107	491,48	8	700	0,15	120	15	0,1	292
108	410,71	20	500	0,15	180	3	0,1	272
109	491,48	5	1000	0	180	3	0,2	292
110	491,48	20	1000	0	120	10	0,1	272
111	410,71	5	500	0,15	120	12,5	0,2	252
112	491,48	10	1000	0,1	120	7	0,1	292
113	293,68	10	700	0,1	120	12,5	0,2	272
114	293,68	15	700	0	60	12,5	0,2	252
115	410,71	8	500	0,05	180	7	0,1	252
116	410,71	5	1000	0,1	60	10	0,1	272
117	410,71	15	1000	0	180	10	0,1	252
118	491,48	20	1000	0,05	120	5,5	0,2	252
119	491,48	15	700	0,15	180	15	0,1	252
120	491,48	20	1000	0	180	7	0,1	292
121	491,48	15	500	0,1	180	5,5	0,2	252
122	293,68	8	1000	0,15	180	3	0,1	272
123	491,48	5	700	0,1	60	10	0,2	292
124	293,68	20	700	0,1	180	7	0,2	252
125	410,71	5	1000	0	120	15	0,1	252
126	491,48	20	700	0	60	12,5	0,2	252
127	491,48	10	500	0,15	180	5,5	0,2	272
128	491,48	15	700	0	120	3	0,2	272
129	410,71	10	500	0	60	10	0,1	252
130	410,71	10	700	0,1	60	7	0,1	252
131	410,71	8	500	0	60	5,5	0,1	272
132	410,71	8	500	0,05	60	15	0,2	272
133	293,68	5	700	0	180	5,5	0,1	252
134	410,71	5	500	0,15	180	15	0,1	252
135	491,48	8	500	0,1	180	12,5	0,2	292
136	491,48	8	700	0,15	120	7	0,2	252
137	491,48	15	500	0,15	120	12,5	0,1	272
138	491,48	5	700	0	180	10	0,2	292
139	293,68	20	1000	0,05	120	10	0,1	252
140	293,68	5	500	0,05	180	3	0,1	272
141	410,71	8	700	0,05	60	12,5	0,2	252

Nr.	Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Blechdicke [mm]	Blechbreite [mm]	Horizontaler Versatz	Geschwindigkeit [mm/min]	Schwertversch. [mm]	Reibung	Werkzeugbreite [mm]
142	293,68	10	700	0,05	120	12,5	0,2	292
143	491,48	15	700	0	120	10	0,1	252
144	410,71	20	1000	0,05	180	12,5	0,2	252
145	410,71	5	700	0,05	60	3	0,2	252
146	410,71	10	500	0,1	180	12,5	0,1	292
147	293,68	5	500	0,15	60	5,5	0,1	272
148	491,48	8	500	0	60	15	0,2	292
149	410,71	8	700	0	180	10	0,1	272
150	293,68	20	700	0,1	60	10	0,1	252
151	410,71	10	1000	0,15	120	7	0,2	292
152	491,48	5	500	0	60	9	0,1	252
153	491,48	5	500	0	60	9	0,1	252

## Anhang 3: Versuchsergebnisse der experimentellen Charakterisierungsversuche

Tabelle 14: Aufschlüsselung der ermittelten Modellparameter in Relation zu den experimentell untersuchten Parameterkombinationen

Probe	Blech	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
1	1	0,3721	0,0250	0,0376
1	2	0,1825	0,1079	0,0031
1	3	0,2375	0,1333	0,1465
1	4	0,0922	0,0164	0,0413
2	1	0,1683	0,0952	0,0010
2	2	0,0577	0,0010	0,0010
2	3	0,1149	0,0538	0,0010
2	4	0,0567	0,0275	0,0010
3	1	0,0010	0,0010	0,0010
3	2	0,0010	0,0010	0,0010
3	3	0,0010	0,0010	0,0010
3	4	0,0700	0,0458	0,0448
4	1	0,3771	0,1087	0,0563
4	2	0,5883	0,2629	0,1541
4	3	0,0010	0,0010	0,0010
4	4	0,0010	0,0010	0,0010
5	1	1,5657	0,8665	0,7355
5	2	1,4705	0,8714	0,7327
5	3	1,6461	0,8619	0,7657
5	4	1,6439	0,8640	0,7609
6	1	0,0010	0,0010	0,0010
6	2	0,0010	0,0010	0,0010
6	3	0,0839	0,0747	0,0193
6	4	0,0010	0,0010	0,0010
7	1	0,0496	0,0210	0,0264
7	2	0,0074	0,0247	0,0010
7	3	0,1559	0,0113	0,0018
7	4	0,0010	0,0010	0,0010
8	1	2,1502	1,0838	1,8194
8	2	2,0638	1,1616	1,9211
8	3	2,2720	1,0541	1,8997
8	4	2,3840	1,1069	1,9714
9	1	0,6806	0,3806	0,3186

Probe	Blech	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
9	2	0,8600	0,4523	0,4225
9	3	0,6696	0,3691	0,2446
9	4	0,8500	0,5314	0,3519
10	1	0,0289	0,0100	0,0010
10	2	0,3048	0,1654	0,2164
10	3	0,0691	0,0010	0,0139
10	4	0,0622	0,0166	0,0010
11	1	5,4166	2,5178	3,0023
11	2	4,8100	2,3466	2,6835
11	3	4,8710	2,4097	2,8653
11	4	5,3342	2,5046	2,9202
12	1	0,8741	0,4647	0,6477
12	2	1,3527	0,4443	0,7158
12	3	1,0618	0,4979	0,4378
12	4	1,0262	0,3450	0,4240
13	1	0,3637	0,2169	0,2196
13	2	0,6493	0,4073	0,3499
13	3	0,2187	0,1052	0,0767
13	4	0,5341	0,2694	0,2202
14	1	5,5731	3,0288	2,3430
14	2	5,7661	3,4389	2,4453
14	3	5,6842	3,2623	2,3842
14	4	5,6857	3,3788	2,5146
15	1	0,0010	0,0010	0,0010
15	2	0,2838	0,2330	0,1213
15	3	0,1853	0,1556	0,0823
15	4	0,0010	0,0010	0,0010
16	1	2,1486	1,1467	1,5071
16	2	2,1677	1,1433	1,4949
16	3	2,0493	1,0672	1,3619
16	4	2,1573	1,0330	1,3490
17	1	1,3024	0,5486	0,6837
17	2	1,0125	0,3988	0,6470
17	3	1,0147	0,4812	0,6620
17	4	1,2156	0,4463	0,6900
18	1	0,0010	0,0010	0,0010
18	2	0,0010	0,0010	0,0010

Probe	Blech	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
18	3	0,0264	0,0093	0,0269
18	4	0,0269	0,0325	0,0010
19	1	8,0158	4,2115	3,7418
19	2	5,3345	2,8932	2,4273
19	3	5,5692	3,1502	2,5933
19	4	5,6475	3,1126	2,6778
20	1	0,5946	0,3247	0,3037
20	2	0,4820	0,2096	0,2023
20	3	0,6385	0,2243	0,3612
20	4	0,6615	0,4073	0,2496
21	1	0,0010	0,0010	0,0010
21	2	0,0010	0,0010	0,0010
21	3	0,0010	0,0010	0,0010
21	4	0,0010	0,0010	0,0010
22	1	1,7356	0,3239	0,9894
22	2	1,5294	0,4960	0,8141
22	3	1,5001	0,3517	0,8501
22	4	1,4288	0,5013	0,7641
23	1	3,0951	1,1109	1,5177
23	2	2,4770	1,1150	1,1690
23	3	3,0557	1,2522	1,7079
23	4	2,9411	1,1906	1,7902
24	1	6,0864	2,7753	2,7692
24	2	6,0453	2,7291	2,7732
24	3	5,9394	2,7247	2,6650
24	4	5,9261	2,7191	2,6852
25	1	6,5095	2,1163	2,5219
25	2	6,6010	2,1128	2,6763
25	3	6,5650	2,3324	2,8445
25	4	6,9989	2,7381	4,0340
26	1	6,3558	3,3123	3,2265
26	2	6,1768	3,2540	3,2140
26	3	6,4826	3,1894	3,0573
26	4	6,5766	3,3435	3,2311
27	1	5,6760	2,1966	3,3015
27	2	5,5461	2,1289	3,1858
27	3	5,3057	2,1774	3,5136

Probe	Blech	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
27	4	5,7692	3,5339	2,6802
28	1	5,8886	2,7594	3,1871
28	2	5,5165	2,6958	3,1733
28	3	5,7000	2,6379	3,1259
28	4	5,7800	2,5563	3,1242
29	1	6,1366	3,1611	3,2380
29	2	5,3586	2,4069	3,7668
29	3	5,1955	2,4553	3,8401
29	4	9,0149	4,9129	4,8899
30	1	4,9732	2,3318	2,7053
30	2	4,7943	2,3681	2,6291
30	3	5,1656	2,4239	2,7894
30	4	5,2024	2,4813	2,8454

## Anhang 4: Versuchsergebnisse der numerischen Charakterisierungsversuche

Tabelle 15: Aufschlüsselung der ermittelten Modellparameter in Relation zu den numerisch untersuchten Parameterkombinationen

Nr.	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
1	1,6826	0,9755	0,9790
2	0,0009	0,0008	0,0007
3	1,2780	0,7169	0,7188
4	0,0010	0,0010	0,0010
5	1,2882	0,7340	0,7313
6	0,8974	0,5093	0,5126
7	4,4752	2,5290	2,5214
8	0,0009	0,0001	0,0009
9	0,0029	0,0016	0,0008
10	0,9731	0,5897	0,5859
11	0,7270	0,4262	0,4284
12	7,4736	4,1893	4,1790
13	2,4099	1,3595	1,3601
14	0,0010	0,0010	0,0010
15	4,0498	2,2604	2,2629
16	1,2129	0,6833	0,6733
17	0,5700	0,3320	0,3281
18	5,8606	3,7312	3,7301
19	5,6788	3,1899	3,1879
20	4,0003	2,2567	2,2430
21	2,4797	1,4549	1,4542
22	0,0007	0,0007	0,0001
23	0,9319	0,5583	0,5516
24	5,1925	2,9231	2,9180
25	5,3448	3,0204	3,0233
26	0,0016	0,0003	0,0016
27	6,0548	3,4225	3,3876
28	5,8260	4,0489	4,0434
29	9,4210	5,3229	5,3091
30	1,7938	1,0305	1,0308
31	6,8515	3,8685	3,8654
32	2,7654	1,5535	1,5256
33	0,9697	0,5818	0,5636

Nr.	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
34	7,4023	4,7998	4,8003
35	4,8423	2,7285	2,7240
36	1,3118	0,7499	0,7501
37	1,1543	0,6653	0,6619
38	0,0010	0,0003	0,0008
39	0,0007	0,0001	0,0008
40	0,0019	0,0009	0,0009
41	6,1857	3,4947	3,4972
42	1,8642	1,0535	1,0559
43	0,9633	0,5770	0,5649
44	5,3171	2,9794	2,9808
45	6,7863	4,1332	4,1339
46	7,4650	4,1825	4,1722
47	7,5543	6,1214	6,4130
48	0,0005	0,0005	0,0001
49	0,0007	0,0002	0,0007
50	0,8081	0,4627	0,4625
51	0,8364	0,4870	0,4896
52	0,9619	0,5707	0,5595
53	0,4940	0,2834	0,2815
54	0,0010	0,0004	0,0006
55	0,8909	0,5154	0,5038
56	2,3800	1,3438	1,3386
57	5,5647	3,7016	3,6994
58	0,4804	0,2792	0,2707
59	8,5595	4,8447	4,8421
60	7,1355	4,0300	4,0358
61	1,2734	0,7221	0,7219
62	0,5962	0,3612	0,3582
63	1,5743	0,9251	0,9224
64	2,5006	1,4109	1,4051
65	8,0273	4,5165	4,5209
66	2,8200	1,5847	1,5634
67	7,6282	4,3199	4,3178
68	0,0009	0,0005	0,0003
69	9,0066	5,0688	5,0619
70	3,8242	2,1669	2,1567

Nr.	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
71	8,9908	5,0848	5,0656
72	0,0010	0,0010	0,0010
73	0,0019	0,0016	0,0012
74	4,8671	2,7411	2,7297
75	2,2274	1,2681	1,2619
76	1,9739	1,1295	1,1317
77	0,0169	0,0128	0,0133
78	0,4337	0,2650	0,2652
79	0,5681	0,3373	0,3320
80	8,8882	5,0190	4,9695
81	2,8180	1,5840	1,5844
82	7,5837	5,0287	5,0580
83	0,0016	0,0005	0,0009
84	2,5828	1,4643	1,4625
85	4,0648	2,3044	2,3019
86	8,2511	5,6286	5,6042
87	7,5818	4,2454	4,2331
88	11,1152	6,2764	6,2398
89	6,7230	3,7933	3,7952
90	0,4378	0,2653	0,2664
91	0,4254	0,2475	0,2353
92	4,6822	2,6768	2,6686
93	6,3572	4,2301	4,2530
94	4,6562	2,6295	2,5945
95	0,8153	0,4622	0,4556
96	2,3794	1,3557	1,3504
97	0,2928	0,1764	0,1765
98	0,0008	0,0001	0,0008
99	5,9545	3,8183	3,8145
100	5,9714	3,3398	3,3408
101	6,7054	3,8160	3,8151
102	6,8661	3,8449	3,8493
103	4,9858	2,8234	2,8178
104	9,4654	5,3311	5,3088
105	0,0010	0,0008	0,0007
106	2,2284	1,2687	1,2677
107	6,4169	3,6468	3,6290

Nr.	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
108	0,0010	0,0010	0,0010
109	0,0009	0,0007	0,0006
110	4,4791	2,5288	2,5292
111	5,1336	2,8795	2,8658
112	0,9593	0,5788	0,5750
113	7,0652	3,9673	3,9603
114	8,5159	4,7931	4,7949
115	1,6899	0,9637	0,9617
116	1,9496	1,1292	1,1314
117	5,3469	3,0093	3,0098
118	1,0721	0,6230	0,6225
119	9,6273	5,7549	5,7390
120	1,7306	1,0005	1,0009
121	1,1088	0,6462	0,6355
122	0,0010	0,0010	0,0010
123	0,9666	0,5840	0,5782
124	3,1675	1,7729	1,7707
125	7,0527	4,2963	4,2973
126	7,3540	4,1299	4,1318
127	0,4364	0,2666	0,2510
128	0,0023	0,0014	0,0010
129	4,8790	2,7287	2,7330
130	2,1401	1,2189	1,2138
131	0,2933	0,1715	0,1725
132	7,9523	4,4820	4,4751
133	0,4252	0,2429	0,2431
134	7,6100	4,2881	4,2764
135	4,4007	2,5062	2,4812
136	1,4349	0,8404	0,8313
137	6,6319	3,7354	3,6918
138	0,9703	0,5819	0,5835
139	5,9763	3,3452	3,3466
140	0,0010	0,0010	0,0010
141	6,7707	3,8117	3,8102
142	6,1656	3,4665	3,4636
143	5,1411	2,8846	2,8867
144	6,7631	4,2792	4,2750

Nr.	Lokale Aufbiegung t [mm]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]	Aufbiegungswinkel $\alpha_1$ [°]
145	0,0016	0,0003	0,0013
146	5,3388	3,0187	2,9892
147	0,1654	0,0974	0,0876
148	6,4367	3,6279	3,6349
149	3,5242	1,9936	1,9955
150	5,9768	3,3469	3,3414
151	1,1781	0,6858	0,6848
152	1,6838	0,9750	0,9790
153	1,6807	0,9750	0,9791