



Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen  
der Technischen Universität München

## Methoden zur Automatisierung der inkrementellen Blechumformung

**Daniel Scherer**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

**Prüfer der Dissertation:**

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 10.09.2013 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.05.2014  
angenommen.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann gilt mein besonderer Dank für sein entgegengebrachtes Vertrauen und für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und bei Dr. Roland Golle für die fachlichen Ratschläge und seine Unterstützung bei der Bearbeitung meiner Dissertation.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Ing. Gunther Reinhart für die Tätigkeit als Korreferent.

Allen ehemaligen Kollegen danke ich für den tollen Zusammenhalt, das stets motivierende und kollegiale Arbeitsklima am Lehrstuhl und die Unterstützung bei der Umsetzung dieses Forschungsvorhabens.

Meinen zahlreichen Studenten gilt ebenso mein Dank. Die vielen Semester- und Diplomarbeiten halfen mir sehr, dieses alte aber relativ unerforschte Fertigungsverfahren von den unterschiedlichsten Seiten zu beleuchten und trugen enorm zum Verständnis des Kraftformerverfahrens bei.

Mein höchster Dank gebührt meiner Familie und im Besonderen meiner Ehefrau Katrin. Ihr uneingeschränkter Rückhalt, ihre Geduld und ihre unermüdliche Motivation und Ermutigung haben entscheidend zur Fertigstellung der vorliegenden Dissertation beigetragen.

Ihr ist diese Arbeit gewidmet.

## Resümee

Die inkrementellen Verfahren eröffnen im Bereich der Umformtechnik im Hinblick auf individuelle Produkte und flexible Fertigungskonzepte zukunftsweisende Alternativen. Gerade das in dieser Arbeit behandelte Kraftformerverfahren bietet durch seine beiden Verfahrensvarianten Strecken und Stauchen zahlreiche, aber bisher ungenutzte Potentiale. Einer verbreiteten industriellen Nutzung steht der hohe manuelle Fertigungsanteil im Wege.

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Methoden zur Automatisierung der inkrementellen Blechumformung mit einem Eckold Kraftformer untersucht. Der erste Schritt zur Automatisierung gelang durch eine robotergestützte Bauteilführung und die damit verbundene reproduzierbare Fertigung von Versuchsbauteilen. Darauf basierend wurden verschiedenste Methoden zur Entwicklung der benötigten Fertigungsstrategien untersucht.

Für die Verfahren Strecken und Stauchen konnten mit Hilfe der FEM-Simulation Modelle für das Kraftformerverfahren erstellt werden, die den gesamten Fertigungsprozess realitätsnah abbilden. Die FEM-Simulation stellt für dieses Verfahren aufgrund des hohen Rechenaufwands und der fehlenden Flexibilität bei der Modellerstellung keine zielführende Methode dar um Fertigungsstrategien für die inkrementelle Blechumformung abzuleiten.

Im zweiten Lösungsansatz wurde, basierend auf einer sehr großen Anzahl an Versuchsdaten, die einzelne Umformoperation mit mathematischen Mitteln beschrieben und die berechneten Fertigungsparameter auf die folgenden Umformschritte übertragen. Für den Streckprozess konnte ein mathematischer Zusammenhang ermittelt und daraus Fertigungsstrategien abgeleitet werden. Beim Stauchprozess haben die Wechselwirkungen einen zu großen Einfluss auf das Umformergebnis und verfälschen die Ergebnisse einer mathematischen Modellierung zu stark um daraus verwertbare Fertigungsstrategien abzuleiten.

Durch die Einführung der Schlagdichte  $\rho_s$  konnte eine industriell anwendbare Lösung entwickelt werden. Im Gegensatz zur Betrachtung des Umformwinkels werden dabei auch Wechselwirkungen zwischen mehreren Umformoperationen berücksichtigt.

## Executive Summary

The incremental sheet metal forming manufacturing process has high potentials regarding the production of individualized sheet metal products and flexible production concepts. The Eckold Kraftformer process, which is the focus of this dissertation, has many unused potentials due to the two manufacturing principles of material stretching and shrinking. To become the process of choice for industrial purposes it is important to maximize the degree of automation and to minimize labor costs.

The scope of this project was to evaluate different methods to automate the incremental sheet metal forming process done by an Eckold Kraftformer. The first important step was to integrate an industrial robot for all of the handling processes. Thereby it was possible to guarantee a reproducible manufacturing process, which was necessary for the analysis of this process using the different scientific analytical methods to find the optimal manufacturing strategy for the incremental sheet metal forming process.

For the two manufacturing principles of stretching and shrinking, it was possible to develop FEM simulation models, which include the production process from beginning to end. But due to the high computing time and the lack of flexibility in the modeling process, this method was not practicable to derive manufacturing strategies for the incremental sheet metal forming process done by an Eckold Kraftformer.

An alternative method concentrates on a single forming operation. Based on a vast amount of experimental data, the single operation was defined using mathematical methods. The identified manufacturing parameters for this operation were adapted to each successive forming step. For the stretching process, the interrelations between the different manufacturing parameters were mathematically determined and manufacturing strategies were derived. For the shrinking process it did not yield the desired results due to strong interactions between the manufacturing parameters and therefore it was not possible to derive optimal strategies.

An applicable solution for industrial purposes was developed by the creating of a new parameter called impact density  $\rho_s$ . In contrast to the other methods the interactions between manufacturing parameters were considered. With the use of the impact density it was possible to identify the interrelations between the different manufacturing parameters fast and efficiently. Thereby manufacturing strategies for the incremental sheet metal forming process can be derived.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>2</b>
2.1	Trend in der Umformtechnik.....	2
2.2	Inkrementelle Blechumformung .....	3
2.3	Das Kraftformerverfahren.....	6
2.4	Manuelle Bauteilfertigung.....	12
2.5	Fertigungszelle Kraftformer - Roboter .....	13
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung, Zielsetzung und Lösungsansätze .....</b>	<b>17</b>
3.1	Aufgabenstellung .....	17
3.2	Zielsetzung.....	17
3.3	Lösungsansätze .....	17
3.4	Vorgehensweise .....	18
<b>4</b>	<b>Grundlagen und Vorversuche.....</b>	<b>19</b>
4.1	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung.....	19
4.2	Vorversuche zur Ermittlung der Kraftverläufe .....	27
4.3	Ermittlung der mechanischen Kennwerte der Versuchswerkstoffe .....	34
4.4	Tribologieuntersuchungen.....	35
4.5	Fertigungsrandbedingungen .....	40
<b>5</b>	<b>FEM – Simulation des Kraftformerverfahrens .....</b>	<b>42</b>
5.1	Zielsetzung.....	42
5.2	Aufbau des Simulationsmodells .....	42
5.3	Winkelfehler bei Mehrfachumformungen.....	48
5.4	Ansätze zur Modellierung der Vorschubbewegung .....	53
5.5	Geradebiegen des Winkels .....	62
5.6	Letzte Entwicklungsstufe des Simulationsmodells .....	64
5.7	Anpassung der Eingangsparameter des Simulationsmodells .....	66
5.8	Verifikation und Zusammenfassung .....	73

---

<b>6</b>	<b>Analyse des erreichbaren Umformwinkels .....</b>	<b>78</b>
6.1	Definition des Umformwinkels .....	78
6.2	Lösungsansatz .....	79
6.3	Versuchsreihe 1 .....	80
6.4	Versuchsreihe 2 .....	86
6.5	Versuchsreihe 3 .....	91
6.6	Versuchsreihe 4 .....	96
6.7	Versuchsreihe 4.2 .....	101
6.8	Fertigungsgenauigkeit .....	103
6.9	Vergleich der Modelle .....	104
6.10	Einflussparameter auf die Schlagkraft beim Strecken .....	106
6.11	Versuche mit Stauchen .....	110
6.12	Verifikation der ermittelten Fertigungsstrategien .....	123
6.13	Zusammenfassung Umformwinkel .....	128
<b>7</b>	<b>Analyse der Schlagdichte .....</b>	<b>129</b>
7.1	Definition der Schlagdichte .....	130
7.2	Zusammenhang Schlagdichte und Radius .....	132
7.3	Ableitung einer Fertigungsstrategie .....	138
7.4	Iterative Optimierung der Fertigungsstrategie .....	141
7.5	Zusammenfassung der Schlagdichte .....	144
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>145</b>
<b>9</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>148</b>
9.1	Abbildungsverzeichnis .....	148
9.2	Tabellenverzeichnis .....	152
9.3	Literaturverzeichnis .....	154

## Verzeichnis der Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
$\alpha$	°	Umformwinkel
a	mm	Schlagabstand / Vorschub
Z / z	mm	Zustellung
s		Schlagtiefe
S		Summe aus Zustellung und Schlagtiefe
n		Anzahl der Umformoperationen
$\rho_s$		Schlagdichte
$F_R$	[°]	Reibkraft
$F_N$	N	Normalkraft
$\mu$		Reibkoeffizient
$F_{MAX}$	N	Maximale Zustellkraft
R / r	mm	Bauteilradius
l	mm	Bauteillänge
h, Schenkel_h	mm	vertikale Schenkellänge
b, Schenkel_b	mm	horizontale Schenkellänge
d / t	mm	Blechdicke
T	pC/N	Ladungsempfindlichkeit
E	GPa	Elastizitätsmodul
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
$R_M$	MPa	Zugfestigkeit
$A_{80}$	%	Bruchdehnung
$A_E$	%	Einschnürdehnung
$A_g$	%	Gleichmaßdehnung
$r_{0^\circ}$		Anisotropiewert in 0° zur Walzrichtung
$r_m$		gemittelter Anisotropiewert





# 1 Einleitung

Die zunehmende Marktsegmentierung und der Trend zu individuellen, an die Wünsche jedes einzelnen Kunden angepassten Produkte macht es für die Hersteller technischer Konsumgüter immer schwieriger, ihre Investitionskosten über hohe Stückzahlen zu amortisieren. Die Erweiterung der Produktpalette um bisher nicht besetzte Nischenfabrikate bringt kürzere Produktlebenszyklen, höhere Produktvarianz und die Nachfrage nach mehr Produktindividualität mit sich.

Daher steigt die Nachfrage nach neuen Produktionskonzepten, die möglichst variantenreich und maßgeschneidert für jeden Kunden sein müssen. Allerdings fordert der Markt, dass diese Kleinserien und individuellen Produkte bei gleicher Qualität und zu möglichst vergleichbaren Preisen wie standardisierte Massenprodukte angeboten werden. Der Bedarf an schnell adaptierbaren, flexiblen und dennoch kostengünstigen Fertigungsverfahren wird daher immer größer.

Vor allem der Bereich Umformtechnik begegnet hier großen Herausforderungen. Die Fertigungsverfahren im Bereich Umformtechnik erfordern meist hohe Investitionskosten für produktspezifische Werkzeuge und Anlagen und sind nur bei großen Stückzahlen wirtschaftlich einzusetzen.

Speziell kleine und mittelständische Unternehmen, die in der Regel Auftragnehmer für Kleinserien wie Prototypen, individuelle Produktvariationen, Ersatzteilbeschaffung usw. sind, müssen ihren Fertigungsprozess stetig bezüglich der Fertigungskosten optimieren, um gegenüber einer manuellen Teilefertigung in Niedriglohnländern konkurrenzfähig zu bleiben.

In diesem Bereich bietet der Einsatz inkrementeller Umformverfahren sehr große, aber bisher ungenutzte Potentiale und könnte sich als zielführende Alternative erweisen. Aufgrund der geringen Investitionskosten und der Verwendung von Universalwerkzeugen sind sie hinsichtlich Flexibilität kaum zu überbieten.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Trend in der Umformtechnik

In zahlreichen Forschungsarbeiten werden Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Optimierung umformtechnischer Prozesse und der kostenoptimalen Fertigung kleiner Stückzahlen untersucht. Der wichtigste Ansatzpunkt ist meist die Reduzierung der Werkzeugkosten, die zu hohen geometriespezifischen Investitionskosten führen.

Konventionelle Umformwerkzeuge werden in der Regel durch spanende Nachbearbeitung von Gussrohlingen hergestellt. Diese Fertigungskette ist kosten- und zeitintensiv. Der Aufwand für die Werkzeugherstellung kann durch den Einsatz von Kunstharzen oder Holz als Fertigungswerkstoff anstelle von metallischen Gusswerkstoffen zwar reduziert werden, der prinzipielle Ablauf wird hierdurch jedoch nicht verändert [REIM99], [KOPP95].

An verschiedenen Forschungsstellen wird das hydromechanische Umformen untersucht, bei dem in speziellen Pressen eine starre metallische Werkzeughälfte durch ein druckbeaufschlagtes Wirkmedium ersetzt wird. Hierdurch können Werkzeugkosten um etwa 30% reduziert werden, eine wirtschaftliche Produktion individualisierter Güter ermöglicht dies allerdings noch nicht. Zusätzlich ist für die Anlagen aufgrund der Versorgung und Regelung des Wirkfluids ein deutlich höherer Investitionsaufwand nötig. Damit erscheint dieses Verfahren für die Fertigung von kleineren Losgrößen bisher als ungeeignet [DICK97], [FU95], [NAKA94], [OLSS96], [REIC96], [GOLL00].

Die Erweiterung des Geometriespektrums eines Umformwerkzeuges wird durch die Entwicklung flexibler Werkzeuge verfolgt [HARD93]. Die Stempelkontur kann durch verstellbare Stifte aufgebaut werden. Neben den hohen Verstellzeiten der Stifte ist die Möglichkeit der Umsetzung von Geometriedetails beschränkt, da sie von der Auflösung der Matrix abhängt [DOEG95], [DOEG97], [KLEI91]. Vergleichbare Begrenzungen (eingeschränkte Geometrieabbildung, hoher Zeitaufwand) sind auch bei einem schichtweisen Werkzeugaufbau durch verklebte laserbeschnittene Bleche zu nennen [GEIG99], [KLEI98], [NAKA97]. Beim Einsatz von Standardformelementen [DOEG97] liegen ebenfalls Einschränkungen in der Geometrievielfalt vor, da ein beliebiges Zusammenstellen aufgrund der Schnittstellenproblematik am Übergang zum Nachbarelement nicht möglich ist. Zusammenfassend lassen die hohen Investitions-, Herstell- und Lagerhaltungskosten der Werkzeuge die herkömmlichen Verfahren für individuelle Kleinserien unrentabel erscheinen.

Der Einsatz inkrementeller Umformverfahren könnte sich in diesem Segment als zielführende Alternative erweisen. Aufgrund der geringen Anlagenkosten und der Verwendung von Universalwerkzeugen sind sie hinsichtlich Flexibilität kaum zu überbieten.

## **2.2 Inkrementelle Blechumformung**

Die herkömmlichen Verfahren der Blechverarbeitung basieren meist auf dem konventionellen Ansatz der Verwendung geometrieabbildender und einem einzigen Bauteil zugeordneter Werkzeuge. Die Werkzeug- und Anlagenkosten sind auf die Produktion hoher Stückzahlen angewiesen. Vor allem in der Fertigung individueller Bauteile und Kleinserien bieten die Verfahren der inkrementellen Blechumformung (IBU) enorme Potentiale. Als innovativste Alternative im Bereich der Umformtechnik nutzen die inkrementellen Verfahren universelle und geometrieunabhängige Standardwerkzeuge.

Grundlage für die werkzeuggesteuerte inkrementelle Blechumformung ist in vielen Fällen das Amino-Verfahren (Namensbezeichnung nach der Herstellerfirma: Amino Kooperation, Erfinder dieses Verfahrens ist S. Matsubara). Hierbei formt bzw. drückt ein sphärisches Formwerkzeug die gewünschten Blechkontur NC-gesteuert entlang diskreter Bahnen in eine fixierte Blechplatte. Die Umformbahn wird durch die Relativbewegung von Formwerkzeug und Werkstück in horizontaler Ebene und vertikaler Richtung erzeugt. So entsteht nach und nach in inkrementellen Schritten (von oben nach unten) ein Bauteil. Neben dem abgerundeten Umformwerkzeug kommt ein Gegenhalter (support tool/Patrize) zum Einsatz, woraus die Bezeichnung two point incremental forming (TPIF) resultiert. Hierbei handelt es sich derzeit um die einzige industriell eingesetzte und kommerziell verfügbare Anwendung einer IBU-Maschine.

Dieses Verfahren wird aktuell an der RWTH Aachen anhand einer Amino DLNC-RB untersucht. Vor allem S. Junk befasst sich in seiner Dissertation [JUNK03] umfassend mit der IBU an CNC-Werkzeugmaschinen. Basierend auf der Amino DLNC-RB erarbeitet er Verfahrensgrenzen, Umformstrategien und legte die Grundlage für weiterführende Untersuchungen. In Anlehnung an das Amino-Verfahren untersuchen zahlreiche weitere Institute mit ähnlichen Versuchsaufbauten den inkrementellen Umformprozess.

Am IUL (Institut für Umformtechnik und Leichtbau) der Universität Dortmund wird das Amino-Verfahren mittels einer konventionellen 3-Achs-CNC-Maschine dargestellt. S. Jadhav und später R. Shankar führten die Grundlagenuntersuchungen durch. Jadhav erläutert in [JADH04] die grundsätzlichen Einflussfaktoren, diverse Abstützmöglichkeiten (support tool) und unterschiedliche Bahnstrategien. Während der Formgebung bewegen sich der Tisch, auf

dem das Blech fest eingespannt ist, und der CNC-gesteuerte Stempel so, dass nacheinander die einzelnen Höhenlinien der Bauteilkontur abgefahren werden und sich daraus die Geometrie des Bauteils ergibt. Je nach Geometrie ist als Gegenwerkzeug nur ein einfacher Gegenhalter oder eine einfach herzustellende Kunststoffmatrize notwendig. Da die Formänderung bei diesem Verfahren ausschließlich aus der Blechdicke realisiert wird, ergeben sich Beschränkungen in den maximal möglichen Neigungswinkeln. Gleichzeitig ist eine teilweise beachtliche Maßabweichung durch Rückfederung des Bleches zu beobachten, wodurch das Verfahren nach dem derzeitigen Stand nur mit Einschränkungen bzw. nur für bestimmte Geometrien ohne Hinterschneidungen industriell eingesetzt werden kann [HIRT01], [HIRT02].

Der Einsatz eines 5-achsigen Industrieroboters zur Formwerkzeugführung ermöglicht, im Gegensatz zum klassischen Amino-Verfahren, durch die zusätzlichen Freiheitsgrade die Fertigung von Hinterschnitten (also nach innengewandten Formen) [LAMM04], [LAMM05]. L. Lamminen zeigt dies an der Universität Helsinki. Ihre Untersuchungen sind ebenfalls grundlegend. Behandelt werden vor allem Design-Regeln und Umformgrenzen. Im daraus hervorgehenden Projekt ProSheet werden erstmalig flexible Methoden zur Herstellung von Prototypen und Kleinserien [LAMM08] diskutiert.

Verzichtet man auf das support tool wird das TPIF zum SPIF (single point incremental forming). J. Duflou entwickelte dieses Umformverfahren an der Katholischen Universität Leuven [DUFL05]. Ebenfalls CNC gesteuert rotiert das Formwerkzeug zusätzlich um die eigene Achse. Durch den Wegfall des Gegenhalters wird das Bauteil im Gegensatz zum Amino-Verfahren von unten nach oben geformt. Bauteilqualität und Form der Werkstücke liegen im gleichen Rahmen wie beim Amino-Verfahren.

An der Universität Cambridge benutzt Prof. Allwood für seine Forschung keine herkömmliche CNC-Maschine, sondern konstruierte eine eigens auf das SPIF ausgelegte 3-Achs-Portal-Vorrichtung [ALLW05]. Daraus resultierend können höhere Umformkräfte aufgebracht und gezielt die auftretenden Kräfte und Momente gemessen werden. Allwood befasst sich mit Deformationsmechanismen und Variation der angewandten Werkstoffe.

Eine Weiterentwicklung des Amino-Verfahrens stellt das Verbundprojekt Roboforming der Ruhruniversität Bochum dar [ZHAN07]. Es nutzt das TPIF, wobei sowohl Werkzeug- als auch Gegenhalterführung von je einem Industrieroboter realisiert werden, d.h. auch der Gegenhalter ist völlig frei in seiner Bewegung. Aktuell können so Regelgeometrien hergestellt werden, allerdings ist das mittelfristige Ziel die Herstellung von Freiformflächen.

Das Roboshaping-Prinzip des Fraunhofer Instituts Stuttgart formt im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren das Bauteil hämmernd um. Ein Industrieroboter führt das oszillierende Werkzeug entlang geschlossener Bahnen über das eingespannte Werkstück, somit wird die Bauteilgeometrie Bahn für Bahn in das Blech gehämmert. Als Grundlage dienen CAD-Daten. Abhängig von Stempelamplitude, Schlagfrequenz, Masse und Geometrie des Hammerwerkzeugs werden derzeit prototypische Umformteile wie Karosseriebleche oder Edelstahlwaschbecken hergestellt. Die Konstruktion der Pilotanlage beschreibt Schäfer in seiner Dissertation [SCHÄ06], [SCHÄ07].

Neben den werkzeugbasierten Verfahren existieren im Bereich der inkrementellen Blechumformverfahren die sog. strahlbasierten Verfahren [LAMM04]. Das Umformwerkzeug wird meist durch einen Kugelstrahl oder Wasserstrahl ersetzt. Ähnlich dem Beschießen oder artverwandten Bearbeitungsmechanismen wird bei diesen Verfahren das Werkstück durch die punktuelle bzw. inkrementelle Impulsübertragung des jeweiligen Wirkmediums in die gewünschte Zielgeometrie umgeformt. Bei der ein- und zweiseitigen Kugelstrahlumformung erfolgt die Formgebung durch gezielte Einbringung von Normalspannungen in Bleche [DROS99], [KOPP96]. Ein Vorteil liegt in der hohen Kaltverfestigung der Bauteile. Die realisierbare Formänderung ist jedoch sehr gering. Ähnliche Nachteile weist auch der Einsatz der Lasertechnologie zur Blechumformung auf. Zusätzlich können durch den Wärmeeintrag des Laserstrahls die Bauteileigenschaften in unerwünschter Weise beeinträchtigt werden [ARNE92], [GEIG94], [HENN97], [HAAS98].

Das Kraftformerverfahren der Firma Eckold unterscheidet sich von den bisher beschriebenen inkrementellen Blechverarbeitungsverfahren, die zum großen Teil auf dem in den 80er Jahren entwickelten Amino-Verfahren aufbauen, vor allem durch das Verfahrensprinzip Stauchen. Es ermöglicht dem Anwender das Blech lokal zu verdicken und so die Oberfläche zu verkleinern. Obwohl es eines der ältesten IBU-Verfahren ist, wird an der Erforschung des Kraftformerverfahrens erst seit etwa 2001 gearbeitet. Forschungsarbeiten und Fachliteratur außerhalb der Lehrstuhl-tätigkeiten sind nicht bekannt.

## 2.3 Das Kraftformerverfahren

### 2.3.1 Die Entstehung

Blechwerkstoffe durch Einwirkung von Kräften inkrementell, also durch eine Vielzahl von Umformschritten mit jeweils nur relativ kleiner lokaler Umformung, in eine gewünschte Form zu bringen ist seit langem bekannt. Bereits in der Antike wurde das Umformverfahren „Treiben“ zur Herstellung von Kupferschalen, Töpfen, Rüstungen usw. verwendet. Dabei wird das Blech durch gezielte Schläge und damit durch Einbringung von Druckspannungen in die gewünschte Form gebracht. [LIET85], [GUT86]

In den 30er Jahren des 19ten Jahrhunderts wurde basierend auf dem Verfahren Treiben von Walter Eckold der Kraftformer mit den Verfahrensvarianten Strecken und Stauchen entwickelt. Ursprünglich wurde das Verfahren vor allem in der Flugzeug- und Eisenbahnfertigung verwendet. Schnell fanden sich allerdings zahlreiche weitere Anwendungen in unterschiedlichsten Bereichen der Blechverarbeitung. Der Kraftformer stellt bis heute, in seiner Grundfunktion unverändert, eine einzigartige, kostengünstige Maschine zur spanlosen Kaltumformung von Blechen und Profilen dar. [ECKO01]

Beim Kraftformerverfahren wird nur eine relativ kleine, kostengünstige mechanische Presse und ein Satz geometrieunabhängiger Universalwerkzeuge benötigt. Die vertikale Bewegung des Pressenstößels wird über Hebel in eine blechparallele Bewegung der Werkzeugbacken umgewandelt. Durch die aufgebrachte Kraft wird das Blech zwischen den Werkzeugbacken eingeklemmt, deren Bewegung zu einer lokalen Streckung bzw. Stauchung führt. Durch eine geschickte Kombination von Schlägen mit Streckungen und Stauchungen kann nahezu jede beliebige Formgestaltung des Blechs erreicht werden.

Einer Integration in eine industrielle Fertigung von Konsumgütern steht nach dem Stand der Technik der hohe manuelle Aufwand für die Erzeugung einer geforderten Bauteilform entgegen. Die manuelle Fertigung und die damit verbundenen hohen Lohn- und Lohnnebenkosten, die erhebliche Fertigungsdauer sowie die eingeschränkte Reproduzierbarkeit stellen unter den heutigen industriellen Vorgaben aber nur in Einzelfällen eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung dar und sprechen gegen einen breiten industriellen Einsatz. [HALM70, KAPO73, NN70, NN75]

Eine Bedeutung hat das Verfahren nur noch in Nischenbereichen in denen Bauteile in geringer Stückzahl unter geringerem Kostendruck gefertigt werden. Beispiele hierfür sind der Flugzeug-, Eisenbahn- oder Prototypenbau, das Kunsthandwerk und die Leuchtmittelindustrie sowie der Bereich der Restaurierung alter Fahrzeuge [NN75, BZDO88].

Ein wirtschaftlich und technisch sinnvoller Einsatz des Kraftformerverfahrens für individuelle Konsumgüter im Kleinserienbereich erfordert eine Erhöhung des Automatisierungsgrads, eine Minimierung des manuellen Fertigungsanteils und die damit verbundene erhebliche Senkung der Lohnstückkosten. Eine Automatisierung würde dieses Verfahren erneut für industrielle Anwendungen qualifizieren.

### 2.3.2 Einsatzgebiete und verfügbare Maschinen

Mit den derzeit am Markt verfügbaren Maschinen lassen sich Tiefziehbleche ( $R_m \sim 400 \text{ N/mm}^2$ ) bis 6,0 mm, rostfreie Stähle ( $R_m \sim 600 \text{ N/mm}^2$ ) bis 4,0 mm und Aluminium-, Kupfer- und Magnesiumlegierungen ( $R_m \sim 250 \text{ N/mm}^2$ ) bis 8,0 mm Dicke verarbeiten (Abbildung 2.1).

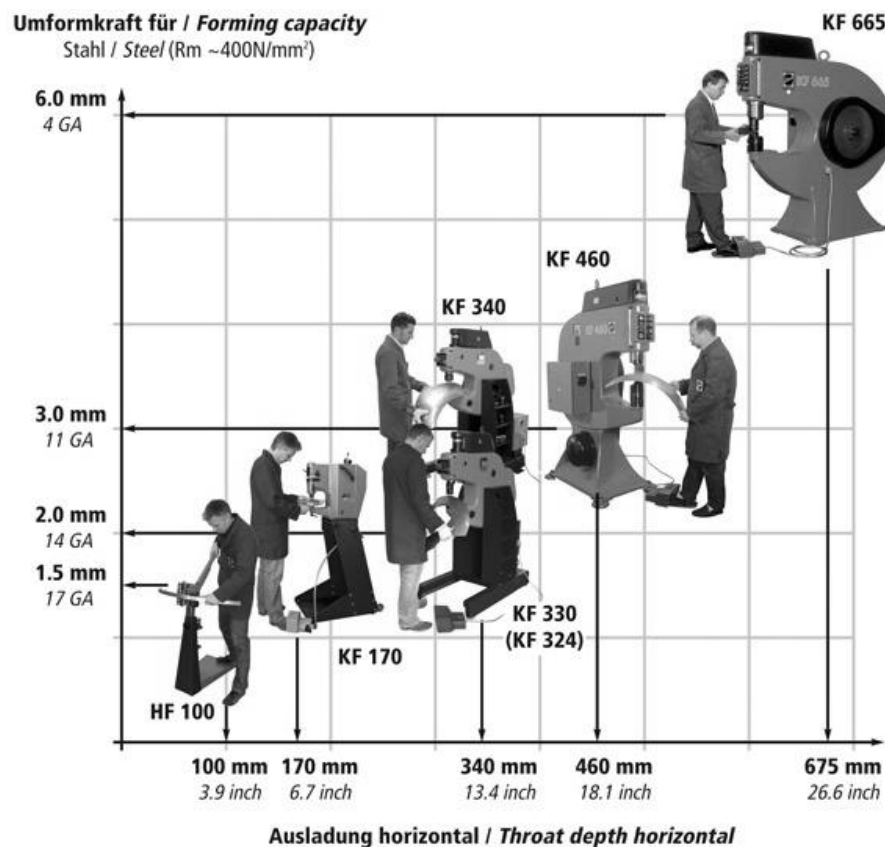


Abbildung 2.1: Varianten des Eckold Kraftformers [Quelle: Eckold]

Je nach Ausführung wird der Eckold Kraftformer heutzutage vor allem für die Umformung von L-, U- und Z-Profilen in Bereichen der Leuchtmittelindustrie, dem Flugzeug- und Helikopterbau sowie in der Eisenbahnbauindustrie verwendet. Bei der Fertigung komplexer 3D-Geometrien findet er nur selten für Nachrichtarbeiten bzw. der Einzelteillfertigung von Designelementen und bei der Restauration von Oldtimern eine Anwendung.

### 2.3.3 KF 330 Piccolo

Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen wird der Eckold Kraftformer KF 330 PICCOLO verwendet. Dabei handelt es sich um eine der beiden kleinsten motorgetriebenen Maschinen der Kraftformer-Reihe.

Die zweckmäßige C-Form und die weite Ausladung der Maschine eignen sich sehr gut für die Umformung von hohlkörperartigen und sperrigen Bauteilen. Tiefziehstähle ( $R_m \sim 400 \text{ N/mm}^2$ ) können bis maximal 2,0 mm, rostfreie Stähle ( $R_m \sim 600 \text{ N/mm}^2$ ) bis max. 1,5 mm, Aluminium-, Kupfer- und Magnesiumlegierungen ( $R_m \sim 250 \text{ N/mm}^2$ ) bis max. 2,5 mm bearbeitet werden. Das Spektrum der derzeit im Fahrzeug- und Karosseriebau verwendeten Bleche ist damit weitgehend abgedeckt.

Abbildung 2.2 zeigt die Baugruppen des KF 330. Das C-förmige Gehäuse (1) besteht aus Sphäroguss. Es enthält den elektromechanischen Antrieb und ist schwenkbar montiert. In den Stößel und die Werkzeugaufnahme (5) auf dem schlanken, unteren Horn werden die Umformwerkzeuge eingesetzt, die durch die Vertikalbewegung des Stößels im Dauerhub (ca. 400 Schläge pro Minute) das Werkstück bearbeiten.

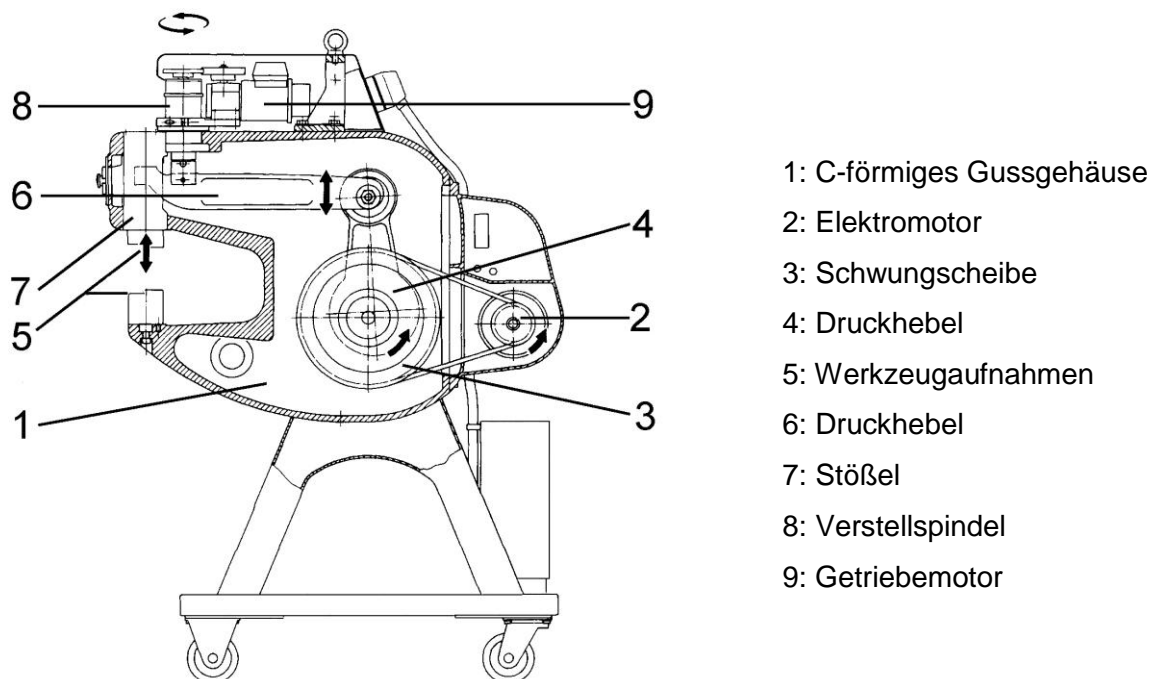


Abbildung 2.2: Baugruppen Eckold Kraftformer KF 330 [Quelle: Eckold]

Der Elektromotor (2) treibt über Keilriemen die Schwungscheibe (3) an. Die Vertikalbewegung des exzentrisch gelagerten Pleuels (4) wird durch den Druckhebel (6) auf



den Stößel (7) übertragen. Über die Verstellspindel (8) wird die Zustellung als Abstand zwischen den Werkzeugeinsätzen eingestellt. Damit werden unterschiedliche Werkzeughöhen ausgeglichen, der Arbeitsdruck der Werkzeuge reguliert und das Einführen und Herausnehmen der Werkstücke ermöglicht. Der Arbeitshub von 8 mm ändert sich dadurch nicht. Beim Kraftformer KF 330 wird die Verstellspindel (8) durch einen Getriebemotor (9) bewegt, der über den Fußschalter gesteuert wird. Der Verstellbereich beträgt ca. 30 mm. Das C-Gestell des Kraftformers kann um  $15^\circ$  geneigt werden und ist serienmäßig auf einem Fahrgestell montiert (Abbildung 2.3). Am *utg* wurde dies durch eine Stahlpalette ersetzt. Der verfügbare Arbeitsraum beträgt 340 mm horizontal und 245 mm vertikal.

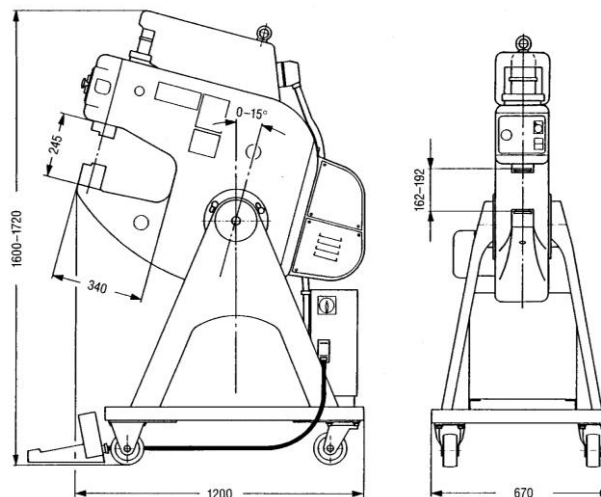


Abbildung 2.3: Abmessungen Eckold Kraftformer [Quelle: Eckold]

#### 2.3.4 Modifikationen am Eckold Kraftformer

Die Schlagfrequenz des KF 330 beträgt in etwa 7 Hz und ist für eine Fertigung im Dauerhubbetrieb ausgelegt. Zur genaueren Analyse eines ausgelösten Schlages war es erforderlich, den Kraftformer auf einen Einzelhubbetrieb umzurüsten.

Dazu wurde ein Servomotor oberhalb des Stößels angebracht, durch den die Stößelposition in vertikaler Richtung variiert werden kann. Die gewünschte Schlagkraft bzw. Zustellung wird über eine Referenzierung eingestellt, bei der der Stößel zuerst in die Nulllage zurückgefahren und dann in die gewünschte Zustellung gebracht wird. Nach der Referenzierung vergrößert der Servomotor den Abstand zwischen den Werkzeugbacken um ca. 2 mm. Der Blechwerkstoff kann nun im Dauerhubbetrieb zwischen den Werkzeugen

positioniert werden, ohne dass eine Umformung stattfindet. Die Umformung selbst findet im Bereich  $15^\circ$  vor und nach dem unteren Umkehrpunkt statt. Der Servomotor nutzt demnach die verbleibenden  $330^\circ$  der Stößelbewegung, um nach dem Auslösen eines Schlages den Abstand um die angesprochenen ca. 2 mm wieder zu verringern und die Umformung mit referenzierter Zustellung durchzuführen.

### 2.3.5 Werkzeuge

Durch den Einsatz geometrieunabhängiger Standardwerkzeuge können Bauteile mit nahezu beliebiger Geometrie aus unterschiedlichsten Materialien auf ein und derselben Maschine hergestellt werden. Die Eckold Werkzeugpalette bietet Werkzeugeinsätze zum Stauchen, Strecken, Wölben, Glätten, Spannen, Richten, Bördeln, Schweifen, Ausschneiden, Lochstanzen und Abkanten von Blechen (Abbildung 2.4, Abbildung 2.5 ).

Sie sind unabhängig von Werkstoff und Werkstück verwendbar. Mit dem gleichen Werkzeug können L-Profile und Bleche geformt und Falten entfernt werden.



Abbildung 2.4: Werkzeugpalette für den Eckold Kraftformer [Quelle: Eckold]

Vereinfacht gesehen wird der Blechwerkstoff mit allen Werkzeugen auf unterschiedliche Art und Weise entweder gestreckt oder gestaucht. Die weiteren Versuche beschränken sich auf die speziellen Werkzeugeinsätze zum Strecken (FWR 603 S) und Stauchen (FWA 602 S).

Das Verfahren Treiben in Verbindung mit Strecken und Stauchen ist inzwischen in die Normen DIN8585-2 und DIN8585-3 eingegangen.

### 2.3.6 Das Wirkprinzip der Werkzeugeinsätze

Die C-Gestell-Pressen führt ausschließlich vertikale Bewegungen mit konstanter Schlagfrequenz aus. Die Schlagkraft kann durch Veränderung der Zustellung des oszillierenden oberen Werkzeuteiles zum festen unteren Teil variiert werden.

Beim Strecken bzw. Stauchen wird die Vertikalbewegung des Kraftformers mittels der in den Werkzeugen integrierten Hebel in eine blechparallele Bewegung umgewandelt. Diese erzeugt, zusammen mit der durch die vertikale Bewegung eingebrachten Normalkraft, einen Spannungszustand an der Schlagstelle. Beim Strecken (Abbildung 2.6) handelt es sich hierbei um einen Zugspannungszustand, der zu einer lokalen Streckung / Ausdünnung des Materials führt. Beim Stauchen (Abbildung 2.7) hingegen wird mit Hilfe eines veränderten Werkzeugeinsatzes ein lokaler Druckspannungszustand erzeugt, welcher zu einer örtlichen Stauchung / Verdickung des Materials führt.



Abbildung 2.5: Verfahrensvarianten [Quelle: Eckold]

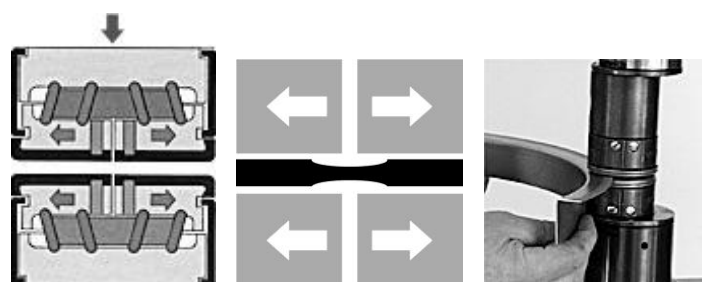


Abbildung 2.6: Verfahrensprinzip Strecken



Abbildung 2.7: Verfahrensprinzip Stauchen

### 2.3.7 Aufbau der Versuchswerkzeuge

Abbildung 2.8 verdeutlicht den Aufbau der Umformwerkzeuge. Sowohl Ober- als auch Unterwerkzeug sind in zwei Werkzeugbacken unterteilt. Diese Werkzeugbacken sind durch Stifte auf einer Führungsplatte befestigt, die wiederum durch je zwei schräg angeordnete Stahlhebel positioniert und durch ein Gehäuse fixiert werden. Die Stahlhebel sind in Gummi vulkanisiert, der zur Positionierung und gefederten Rückstellung nach jeder Umformoperation benötigt wird. Die Führungsplatte ist durch zwei Schrauben auf den Werkzeugträger befestigt. Die beiden Werkzeugträger haben unterschiedliche Höhen und können je nach Anwendung als Ober- oder Unterwerkzeug eingebaut werden. Die Stauchwerkzeuge unterscheiden sich zu den Streckwerkzeugen lediglich durch die Anordnung der Stahlhebel, einer Fase an den Werkzeugeinsätze (zur Vermeidung einer Faltenbildung) und durch eine Gummilippe zwischen den Werkzeugbacken. Die Gummilippe dient zur Regulierung des Abstandes zwischen den Stauchbacken.

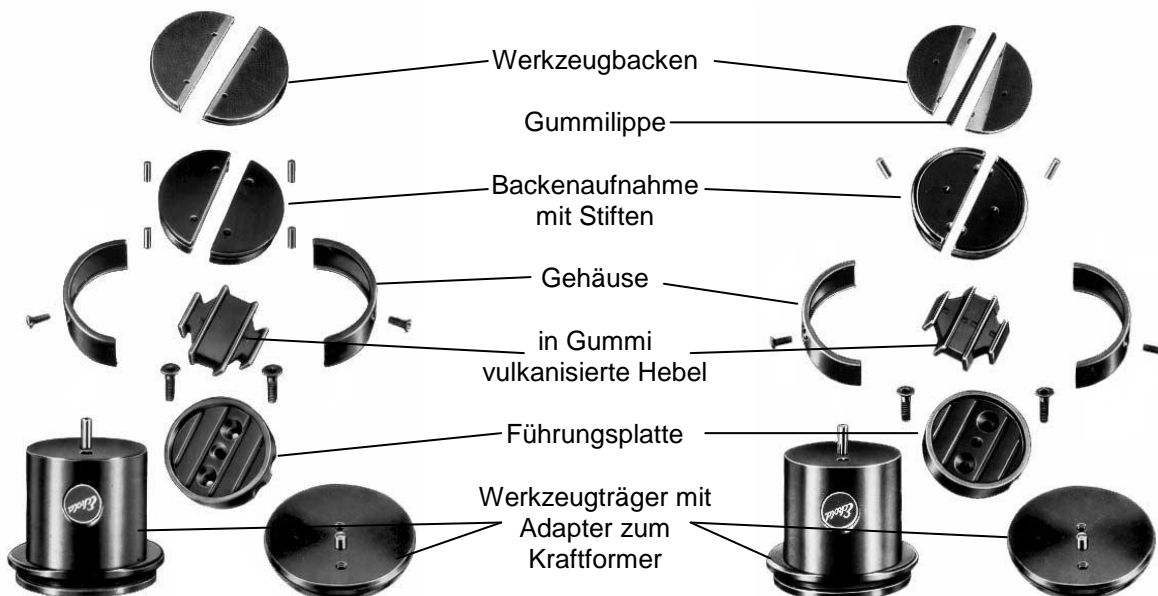


Abbildung 2.8: Aufbau der Umformwerkzeuge (l. Strecken, r. Stauchen) [Q.: Eckold]

## 2.4 Manuelle Bauteilfertigung

Grundlage der Untersuchung bildet die handwerkliche Fertigung mit rein manueller Bauteilführung. Hierbei führt ein Werker das Bauteil erfahrungsgeleitet durch den Eckold Kraftformer. Die benötigte Schlagkraft wird ebenso erfahrungsgeleitet eingestellt und während des Prozesses kontinuierlich angepasst.

Zur Annäherung an die Zielgeometrie muss das Werkstück fortwährend mit einem Modell oder einer Schablone verglichen und die Fertigungsstrategie dementsprechend angepasst

werden. Die Fertigungsqualität hängt sehr stark vom Geschick und der Erfahrung des Handwerkers ab. Zum einen reicht eine auf dem Erfahrungsschatz der Werker und dem Ausprobieren basierende Fertigung nicht aus um die Qualitätsansprüche im Bereich der Kleinserienfertigung zu erfüllen und um wirtschaftlich und qualitativ hochwertig zu produzieren. Zum anderen ist gerade die Wissenschaft auf eine reproduzierbare Fertigung von Versuchsbauteilen angewiesen. Dies bedeutet, dass aus mehreren Versuchen bei gleichen Parametern auch das gleiche Ergebnis resultieren muss. Eine Teilautomatisierung bzw. eine robotergestützte Bauteilführung ist daher für industrielle Anwendungen als auch für wissenschaftliche Untersuchungen zwingend erforderlich. Am *utg* wurde dazu eine Fertigungszelle mit einem KUKA Industrieroboter (Fa. KUKA, Gersthofen) aufgebaut.

## **2.5 Fertigungszelle Kraftformer - Roboter**

Der erste Schritt in Richtung Automatisierung erfolgt über eine vollständig robotergestützte Bauteilführung. Um den Prozess in der Fertigungszelle Kraftformer-Roboter abzufahren, wird der Industrieroboter über ein Teach-In-Verfahren mit einer aus dem Erfahrungswissen bzw. aus einer Datenbank bekannten Fertigungsstrategie programmiert. Hierbei werden die Bauteilpositionierung mit Hilfe des Roboters, die Umformkraft des Kraftformers, die Position sowie die Anzahl der Umformoperationen genau vorgegeben. Die automatisierte Bauteilführung und die damit verbundene wiederholgenaue Fertigung der Versuchsbauteile bilden die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen am Kraftformer. Zur Verifikation der Simulationsergebnisse ist eine reproduzierbare Fertigung und vollkommen synchrone Ansteuerung des Kraftformers sowie des zur Bauteilführung eingesetzten KUKA Industrieroboters unabdingbar. Die Eckpunkte bilden hierbei die präzise Bauteilbereitstellung und Aufnahme, die vollautomatisierte Planung der Bauteilbewegung, die Steuerung des Kraftformers, die vollständige Synchronisierung der beiden Prozesse und somit eine Steuerung des gesamten Fertigungsablaufs.

### **2.5.1 KUKA KR30-3 Industrieroboter**

Erste Versuche eine automatische Bauteilführung mit Hilfe eines XY-Tisches der Firma Lenze umzusetzen, lieferten keine verwertbaren Ergebnisse. Bei der Bearbeitung von Hubfolgen erzeugen die konstanten Hübe des Kraftformers starke Schwingungen in der Fertigungsanlage und führten zu nicht akzeptablen Positionierungsungenauigkeiten. Eine reproduzierbare Bauteilfertigung konnte mit diesem Versuchsaufbau nicht realisiert werden.

Im Hinblick auf künftige Forschungsprojekte und die damit verbundene Fertigung von 3D-Geometrien wurde der XY-Tisch durch einen 6-Achs-Industrieroboter ersetzt. Dieser bietet

neben einer erheblich besseren Positionierungsgenauigkeit auch die Möglichkeit, den Versuch vollständig (inklusive der Werkstückaufnahme und -ablage) zu automatisieren.

Es kommt ein Industrieroboter der Firma KUKA Typ KR-30-3 mit einer maximalen Traglast von 30 kg, einer maximalen Geschwindigkeit von 2 m/s und mit einer Positionierungsgenauigkeit von  $\pm 0,15$  mm bei voller Traglast zum Einsatz. Der Roboter ist mit einem pneumatisch betriebenen Zwei-Backen-Greifer der Firma Schunk ausgerüstet.

Außer den für die Positionsbestimmung notwendigen Rotationssensoren in jeder Achse verfügt der Roboter über keinerlei zusätzliche Sensorik und kann nur orts- bzw. geschwindigkeits-, jedoch nicht kraftgesteuert bewegt werden.

### **2.5.2 Arbeitsraum des Roboters**

In die Software integriert ist eine Arbeitsraumüberwachung, die es erlaubt, Gebiete in der Reichweite des Roboters im kartesischen und Achskoordinatensystem zu sperren, beziehungsweise explizit freizugeben. Der Arbeitsraum des Roboters ist auf die eingezäunte Fertigungszelle beschränkt. Zusätzlich sind die Werkbank, der Kraftformer und der Bereich der Steuerrechner im Arbeitsraum des Roboters blockiert. Die in der KUKA Steuerung implementierte und zur sicheren Verwendung des Roboters empfohlene Arbeitsraumüberwachung ist aktiv und wird zu keinem Zeitpunkt überbrückt oder umgangen. Hinsichtlich der Arbeitssicherheit wird eine gefahrlose Verwendung der Fertigungszelle gewährleistet.

### **2.5.3 Ansteuerung des Kraftformers**

Als Kraftformer steht das Modell Eckold KR 330 Piccolo zur Verfügung. Dieser KR 330 Piccolo wurde mit einem Lenze Antriebsregler (Typ 93xx) ausgestattet, der die Steuerung der wichtigsten Funktionen des Kraftformers über einen CAN-Bus angeschlossenes Bedienpanel (Typ Lenze H315) ermöglicht. Dies ersetzt den für die manuelle Zustellung notwendigen Fußschalter. Die Verbindung zwischen dem CAN-Bus und einer externen seriellen Schnittstelle wurde über ein Feldbusmodul der Fa. Lenze realisiert. Dadurch können Befehle direkt an den Antriebsregler geschickt werden.

Der Befehlssatz für diese Schnittstelle wurde im Rahmen einer interdisziplinären Diplomarbeit geschaffen. Sie wurde gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Rechnertechnik und Rechnerorganisation / Parallelrechnerarchitektur von Prof. Dr. Arndt Bode der Fakultät für Informatik betreut. Die für die geforderten Einstellungen notwendigen Befehle sowie deren Parametrierungsvorschriften wurden über einen Reverse-Engineering-Prozess ermittelt.

#### **2.5.4 Ansteuerung des Roboters**

Der KR-30-3 ist mit der KUKA-Software KR C2 (KUKA Robot Control) Version 5.2 Edition 2005 ausgestattet und konnte durch das von KUKA neu freigegebene prototypische Technologiepaket *KUKA Ethernet.KRL.XML (Version 0.9)* erweitert werden. Es ermöglicht den Empfang von XML-Strings mit der KUKA-Steuerung per Ethernet-Verbindung. Selbst erstellte Programme dürfen lediglich aus einem einzigen Thread bestehen, da Multithreading in der Echtzeitumgebung nicht zur Verfügung steht. Zur Programmierung gibt es auf dem Roboter einen einfachen ASCII-Editor.

#### **2.5.5 Versuchsmakro**

Zur Sicherstellung einer synchron ablaufenden Bauteilfertigung ist es von Vorteil, den Prozess über nur einen Steuerrechner zu kontrollieren. Der Fertigungsprozess kann somit durch einfache Statusabfragen und daraus resultierenden Freigaben für Folgeprozesse gesteuert werden. Die Definition der Fertigungsstrategie erfolgt daher in einer Art Versuchsmakro, das dem Benutzer die Eingabe gewünschter Prozessparameter ermöglicht.

Folgende Versuchsparameter sind durch die Versuchssteuerungssoftware einstellbar:

##### **Zustellung des Kraftformers**

Die Zustellung des Kraftformers entspricht dem Abstand zwischen dem starren Unterwerkzeug und dem über das Schwungrad angetriebenen Oberwerkzeug. Da sich die Prozesskräfte aus der Zustellung, der Werkstückdicke und der Werkzeugkinematik ergeben, ist es nicht nötig, den Kraftformer auf eine gewünschte Kraft zu referenzieren.

##### **Anzahl der Hube**

Im Gegensatz zum manuellen Verfahren werden nach der Automatisierung Werkstücke nicht mehr durch eine Dauerhubfolge verformt, sondern durch explizit ausgelöste und klar definierte Hubfolgen. Bei neutraler Zustellung erfolgt am Werkstück keinerlei Umformung. Beim Auslösen einer Hubfolge wird die Zustellung kurzzeitig verändert. Es muss für jede Umformoperation die Schlagtiefe sowie die Anzahl auszulösenden Einzelhube festgelegt werden.

##### **Position des Werkstücks**

Zur Positionierung müssen alle sechs Freiheitsgrade (X-, Y-, Z-Position, RX-, RY-, RZ-Rotation, also die Rotation um die X-, Y- bzw. Z-Achse) voneinander unabhängig gesetzt werden.

### Anforderungen an die Bediensoftware

Eine Versuchsdefinition besteht dabei aus einer linearen Abfolge von Kraftformer- und Roboterbefehlen, die nacheinander abgearbeitet werden. Die Reihenfolge der Befehle ist dabei – im Rahmen des physikalisch Sinnvollen – beliebig. Versuchsdefinitionen können geladen, gespeichert und editiert werden. Um den Versuchsablauf optimal zu unterstützen, gibt es ein Makro, in dem folgender Ablauf abgebildet wird: Werkstück aufnehmen - Werkstück im Kraftformer positionieren - Hubfolge auslösen - Werkstück nachführen - Werkstück ablegen

### 2.5.6 Funktionsprüfung

Zur Überprüfung der Funktionalität wurden Winkel aus dem Tiefziehstahl DC04 nach einem vorgegebenen Makro wiederholt gebogen und die Reproduzierbarkeit anhand der Flächenabweichung gemessen. Die Abweichungsanalyse ergab eine Wiederholgenauigkeit von etwa 0,2 mm (Abbildung 2.9).

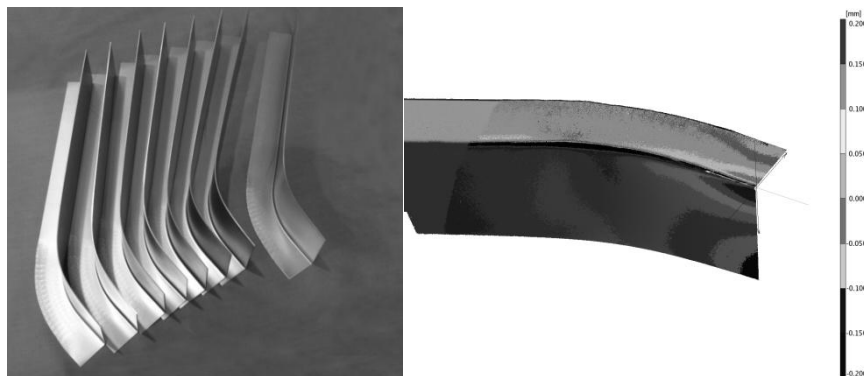


Abbildung 2.9: Automatisiert gefertigte Winkel, geometrische Abweichung



### **3 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Lösungsansätze**

#### **3.1 Aufgabenstellung**

Im Hinblick auf die zunehmende Nachfrage nach individuellen Produkten (Kapitel 1) liefert das seit Jahrzehnten in der Kleinserienfertigung bewährte Kraftformerverfahren optimale Voraussetzungen für eine industrielle Produktion individueller Kleinserien. Die Forderung nach hoher Flexibilität bei niedrigem Investitionsaufwand erfüllt das Fertigungsverfahren in vollem Umfang. Es ermöglicht die Herstellung beliebiger 2D- und 3D-Geometrien mit geometrieunabhängigen Universalwerkzeugen. Die Fertigung erfolgt heutzutage allerdings rein handwerklich und ist stark von der Geschicklichkeit und Erfahrung des Werkers geprägt. Eine reproduzierbare Fertigung qualitativ hochwertiger Bauteile ist im Moment kaum bzw. nur mit enormen Kosten und hohem manuellen Aufwand möglich. Das Anwendungsfeld des Kraftformers beschränkt sich daher vor allem auf Einzelteile und nur in Ausnahmen auf Kleinserien. Einem industriellen und wirtschaftlich sinnvollen Einsatz stehen zum jetzigen Zeitpunkt vor allem der beträchtliche manuelle Fertigungsanteil und die daraus resultierenden hohen Lohnstückkosten im Wege.

#### **3.2 Zielsetzung**

Die Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen im Bereich der inkrementellen Umformtechnik zielen auf die vollständige Automatisierung des Kraftformerverfahrens zur Produktion individueller Blechbauteile.

Ziel dieser Arbeit ist die wissenschaftliche Untersuchung der Fertigungsparameter des Kraftformerverfahrens, die Ableitung von Fertigungsstrategien für die Verfahrensvarianten Strecken und Stauchen und die Fertigung individuell gekrümmter L-Profile.

#### **3.3 Lösungsansätze**

Die Automatisierung eines Fertigungsprozesses basiert auf einer exakten Zusammenstellung aller Fertigungsparameter und der genauen Abfolge der einzelnen Fertigungsschritte. Eine im Voraus berechnete Fertigungsstrategie bzw. -abfolge sollte auf ihre Machbarkeit überprüft, nach Fehlern analysiert und gegebenenfalls angepasst werden, um einen reibungslosen und erfolgversprechenden Fertigungsablauf zu garantieren.

##### **FEM-Simulation**

Mit Hilfe des Simulationsprogramms PamStamp 2G wird für das Kraftformerverfahren ein Simulationsmodell erstellt, das den gesamten Fertigungsprozesses abbildet. Der Prozess

kann dadurch bereits vor der realen Testphase beurteilt, das Materialverhalten abgeschätzt und Fertigungsparameter angepasst werden.

### Versuchsdatenbasierte Fertigung – Konzentration auf den Umformwinkel

Einen alternativen Lösungsansatz eröffnen die Techniken bzw. Methoden des Data Minings. Basierend auf einer sehr großen Anzahl an Versuchsdaten wird der Fertigungsprozess mit Hilfe mathematischer Methoden genauer analysiert und beschrieben. Dazu werden alle wichtigen Fertigungsparameter auf ihren Einfluss bezüglich des Umformergebnisses analysiert und durch eine Regressionsanalyse Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Parametern identifiziert. Ziel ist es, für den Umformprozess Zusammenhänge zwischen den Fertigungsparametern und dem bei einem Schlag erzeugten Umformwinkel zu finden. Durch eine Aneinanderreihung der Umformwinkel entsteht die benötigte Fertigungsstrategie.

### Schlagdichte

Ein zweiter versuchsdatenbasierter Ansatz ist die Analyse der Zusammenhänge zwischen einer Schlagdichte und dem zu erzeugenden Radius. Die Schlagdichte wird durch die Anzahl der ausgeführten Umformoperationen auf einer bestimmten Länge definiert. Im Gegensatz zur Betrachtung des Umformwinkels werden auch Wechselwirkungen zwischen zwei sehr nahe aneinander liegenden Umformoperationen betrachtet.

## 3.4 Vorgehensweise

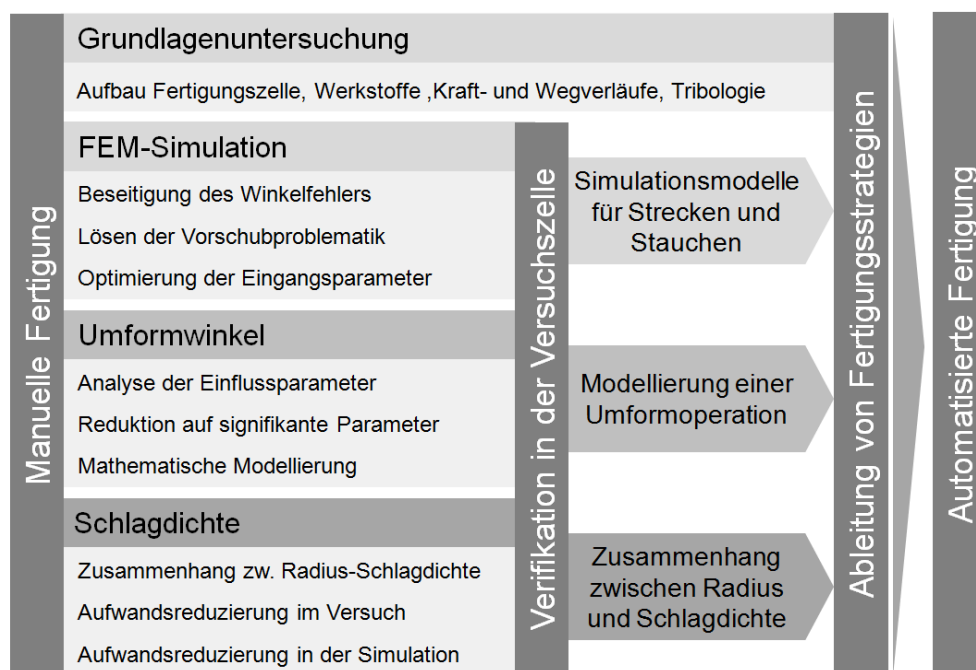


Abbildung 3.1: Versuchsplan

## 4 Grundlagen und Vorversuche

### 4.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Um den stetig steigenden Produktanforderungen hinsichtlich Qualität, Genauigkeit und Individualität gerecht zu werden, steigt im gleich Maße die Komplexität der benötigten Produktions- und Fertigungssysteme. Um der daraus resultierenden hohen Anzahl an Fertigungsparametern, Randbedingungen, Wechselwirkungen und sonstigen äußeren Einflüssen begegnen zu können, nimmt die Bedeutung systematischer Abbildungen und deren Auswertung mit Hilfe statistischer Methoden, wie der statistische Versuchsplanung (Design of Experiments - DoE), immer weiter zu.

Häufig werden bei Optimierungsprozessen die Wechselwirkungen zwischen Einflussparametern vernachlässigt und nur einzelne Parameter isoliert betrachtet (One-factor-at-a-time Methode). Liegen starke Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen vor, so liegt das damit gewonnene lokale weit vom globalen Optimum entfernt (Abbildung 4.1). Ein globale Betrachtung des Problems ist ohne die Anwendung statischer Methoden nicht zielführend. [ROEP05]

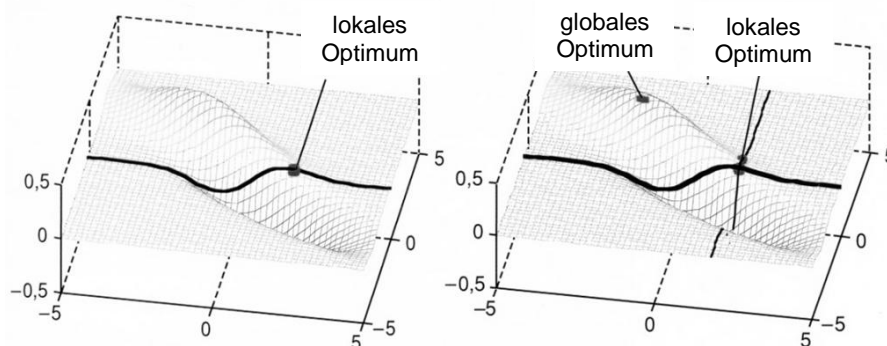


Abbildung 4.1: Lokales und globales Optimum [ROEP05]

Die statistische Versuchsplanung zielt darauf ab, einen definierten Versuchsraum mit einer überschaubaren Anzahl an ausgewählten Experimenten möglichst gut zu beschreiben.

Einflüsse und Wechselwirkungen können nachgewiesen und die Zusammenhänge zwischen den Parametern beschrieben werden. Nach mehreren Iterationsschritten kann das globale Optimum eingestellt werden. Die Vorgehensweise muss hierbei an die jeweilige Problemstellung angepasst werden.

Führt man die oben genannte One-factor-at-a-time-Methode schrittweise für alle Parameter durch, so erhält man Ergebnisse, die über den gesamten Versuchsraum verteilt sind. Da hierbei nicht nur ein Parameter variiert wird, spricht man von der vollständigen Rastermessung. Dazu werden alle möglichen Kombinationen der Eingangsgrößen mit einer festen Schrittweite eingestellt. Die Rastermessung ermöglicht eine vollständige Erfassung des Versuchsraumes inklusive Wechselwirkungen. Da der Versuchsraum mit einem gleichmäßigen Netz von Messungen überzogen ist, kann in dieser Rasterung auch das globale Maximum gefunden werden. [HAFN02]

Für eine systematische Versuchsdurchführung sind Versuchspläne essentiell. Sie legen fest welcher Parameter beim jeweiligen Versuch zu variieren ist, um den Versuchsraum möglichst genau abzubilden.

#### 4.1.1 Vollfaktorieller Versuchsplan

Werden alle möglichen Parameter (Faktoren) miteinander kombiniert und in einem Versuchsplan dargestellt, spricht man von einem vollfaktoriellen Versuchsplan (engl. full factorial design). Bei Verwendung von zwei Einstellungen (Stufen) für jeden Faktor ergibt sich einen  $2^p$ -Faktorenversuchsplan (Abbildung 4.2).

$n \backslash p$	A	B	C	D	E
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1

Abbildung 4.2: Vollfaktorieller  $2^p$ -Versuchsplan

Die Faktoren selbst werden mit A, B, C, ..., ihre Anzahl mit  $p$ , bezeichnet. Die Anzahl der notwendigen Versuche wird mit  $n$  angegeben. In der Literatur sind diese Bezeichnungen nicht immer durchgängig, so wird auch für die Anzahl der Faktoren die Variable  $n$  verwendet. Die Zahlen -1 und 1 stellen die beiden Stufen des jeweiligen Faktors dar. Die farbigen

Hinterlegungen kennzeichnen die notwendigen Versuche für die vorliegende Anzahl an Faktoren. Mit den beiden Stufen  $-1$  und  $1$  lassen sich die Grenzen des  $p$ -dimensionalen Versuchsraumes abbilden. Dazwischen wird lineares Verhalten angenommen. Deshalb spricht man auch von einem Versuchsplan 1. Ordnung. Um nichtlineare Abhängigkeiten feststellen zu können, benötigt man mindestens ein quadratisches Modell mit einem  $3^p$ -Faktorenversuchsplan. [RONN08]

Allgemein berechnet sich die Anzahl an notwendigen Versuchen  $n$  zu:

$$n = S^p \quad (\text{Formel 4.1})$$

$S$  stellt die Anzahl an Stufen, die jeder Faktor annehmen kann, dar.

Die Anzahl der erforderlichen Versuche steigt exponentiell mit der Anzahl der Faktoren. Der Versuchsraum wird mit einem gleichmäßigen Netz überzogen. Relevante Bereiche werden daher meist zu ungenau betrachtet und müssen durch weitere Versuche nachgeschärft werden.

#### 4.1.2 Teilfaktorieller Versuchsplan

Bei teilfaktoriellen Versuchsplänen werden die Faktoren der letzten Spalte durch das Produkt der vorherigen gebildet. Es ergeben sich dadurch Versuchspläne mit  $n = S^{p-q}$  Versuchen. Bei gleicher Anzahl der Faktoren und Stufen werden somit bei einem  $S^{p-1}$ -Versuchsplan nur noch halb so viele Versuche wie bei einem vollfaktoriellen benötigt. [RONN08]

Der in Abbildung 4.3 dargestellte Versuchsplan ist ein vollfaktorieller Versuchsplan für drei Faktoren (vgl. Abbildung 4.2), bei dem die Stufen des vierten Faktors durch Multiplikation der Spalten A, B und C erzeugt werden.

$n \backslash p$	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1

Abbildung 4.3: Teilfaktorieller  $2^{4-1}$ -Versuchsplan

Nach diesem Schema können nun auch weitere Faktoren hinzugefügt werden. Abbildung 4.4 gibt einen Überblick über den notwendigen Versuchsaufwand, bezogen auf die Anzahl der Faktoren  $p$  und der gewünschten Auflösung, die in römischen Ziffern dargestellt wird.

$n \backslash p$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	$2^2$ vollst.	$2^{3-1}$ III									
8		$2^3$ vollst.	$2^{4-1}$ IV	$2^{5-2}$ III	$2^{6-3}$ III	$2^{7-4}$ III					
16			$2^4$ vollst.	$2^{5-1}$ V	$2^{6-2}$ IV	$2^{7-3}$ IV	$2^{8-4}$ IV	$2^{9-5}$ III	$2^{10-6}$ III	$2^{11-7}$ III	$2^{12-8}$ III
32				$2^5$ vollst.	$2^{6-1}$ VI	$2^{7-2}$ IV	$2^{8-3}$ IV	$2^{9-4}$ IV	$2^{10-5}$ IV	$2^{11-6}$ IV	$2^{12-7}$ IV
64					$2^6$ vollst.	$2^{7-1}$ VII	$2^{8-2}$ V	$2^{9-3}$ IV	$2^{10-4}$ IV	$2^{11-5}$ IV	$2^{12-6}$ IV
128						$2^7$ vollst.	$2^{8-1}$ VIII	$2^{9-2}$ VI	$2^{10-3}$ V	$2^{11-4}$ V	$2^{12-5}$ IV

	Vollständige Pläne -> alle Wechselwirkungen
V+	Fraktionelle Pläne -> alle 2fach Wechselwirkungen bestimmbar, Auflösung $\geq V$
IV	Fraktionelle Pläne -> 2fach Wechselw. vermengt, Haupteff. vermengt mit 3fach WW
III	Fraktionelle Pläne -> 2fach Wechselw. vermengt, Haupteff. vermengt mit 2fach WW !

Abbildung 4.4: Übersicht Versuchsaufwand [RONN08]

Natürlich kann mit dieser Methode der Versuchsaufwand nicht reduziert werden ohne Informationen gegenüber der vollfaktoriellen Versuchsplanung zu verlieren. Wie in Abbildung 4.4 beschrieben sind nicht mehr alle Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren zu unterscheiden. Wechselwirkungen herrschen vor, wenn sich bei Veränderung eines Faktors sowohl die Zielgröße als auch ein weiterer Faktor verändern. Wird bei einem Reibversuch beispielsweise die Normalkraft erhöht, so erhöht sich dadurch die Temperatur. Es gibt eine Wirkung der Normalkraft auf die Temperatur. Ändert sich dabei auch die Zielgröße, z.B. die Zugkraft, so spricht man von einer Wechselwirkung. Um diese auszuschließen, muss dafür gesorgt werden, dass die Temperatur unabhängig von der Kraft konstant bleibt. [RONN08]

Bei  $2^{4-1}$ -Versuchsplänen sind bereits zweifache Wechselwirkungen vermengt. Da die Spaltenprodukte von AB und CD, AC und BD, sowie AD und BC jeweils gleich sind (Abbildung 4.3), lassen sich Wechselwirkungen dieser Faktorenpaare nicht mehr eindeutig zuordnen. Dreifache Wechselwirkungen, also die Produkte von drei Faktoren, vermengen sich sogar mit den Haupteffekten. Sie kommen jedoch nahezu nie vor. Versuchspläne mit einer Auflösung von fünf oder höher gelten im Allgemeinen als unkritisch in der Auswertung. [RONN08]

### 4.1.3 Taguchi Methode

Der Begriff Design of Experiments (DoE) wird meist mit dem japanischen Wirtschaftswissenschaftler Genichi Taguchi (geb. 1924) in Zusammenhang gebracht. Die von ihm ab Ende der 1940er Jahre entwickelte Taguchi-Methode zielt darauf ab, Qualitätsverluste zu minimieren und die Produkte sowie Herstellungsprozesse gegenüber Störeinflüssen robuster zu gestalten. Dazu entwickelte er ein völlig neues Verständnis von Qualität. Die Toleranz eines Bauteiles wird nicht als Herstellungsgrenzwert gesehen, sondern als „Verlustfunktion“. Somit ergibt sich der Verlust  $L(y)$  nicht aus einer Stufenfunktion (Abbildung 4.5) sondern jede Abweichung vom Zielwert  $m$  verursacht einen gewissen Verlust, der mit der quadratischen Verlustfunktion dargestellt wird (Abbildung 4.6). [FUNK05]

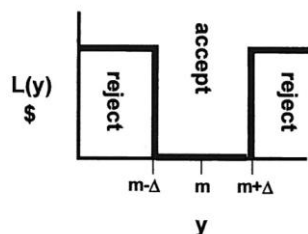


Abbildung 4.5: Klassische bestanden/nicht bestanden Stufenfunktion [FUNK05]

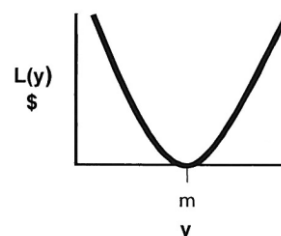


Abbildung 4.6: Quadratische Verlustfunktion nach Taguchi [FUNK05]

Die Verlustfunktion lässt sich mathematisch als Produkt des Verlustkoeffizienten  $k$  und dem Quadrat der Abweichung  $(y-m)$  vom Zielwert  $m$  darstellen. [KLEI04]

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (\text{Formel 4.2})$$

Das Ziel der Optimierung ist die Verringerung der Streuung um den Zielwert. Dieses Ziel darf jedoch nicht durch die Forderung engerer Toleranzen, sondern kann sinnvoll nur durch die Schaffung robuster Systeme erreicht werden. Zahlreiche Optimierungswerkzeuge wie die Taguchi Methode (Robust Engineering), Robust Design, SPC (Statistic Process Control), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) und viele ähnliche Ansätze verfolgen dieses Ziel.

Robuste Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass das Ergebnis durch diverse Störeinflüsse, wie z.B. Umgebungsbedingungen oder Materialeigenschaften, wenig beeinflusst wird. [KROT90]

Bei einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße  $x$  und der Ausgangsgröße  $y$  ist ein robustes Design nutzbar (Abbildung 4.7). Im Bereich von  $x_0$  haben geringe Streuungen der Eingangsgröße bereits eine beachtliche Streuung der Ausgangsgröße zur Folge. Im Bereich von  $x_1$  hingegen wirken sich Abweichungen nur vergleichsweise gering auf die Ausgangsgröße aus. Dieser Parameter ist somit im Bereich von  $x_0$  wesentlich robuster als im Bereich  $x_1$ . [KROT90]

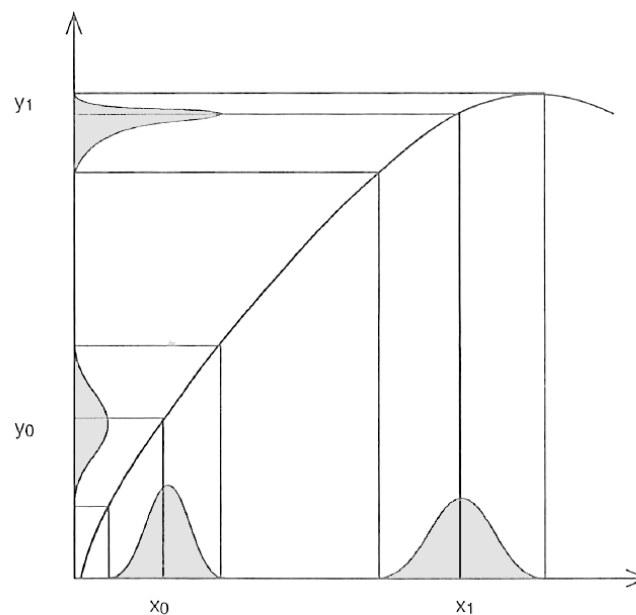


Abbildung 4.7: Robustes Design [KROT90]

Taguchi definiert Robustheit als den Zustand, in dem die Technologie, das Produkt oder die Prozessleistung ihre minimalste Empfindlichkeit gegenüber Faktoren hat, die eine Veränderung verursachen (entweder in der Fertigung oder in der Anwendungsumgebung), und die geringsten Fertigungskosten erzielt. [TAGU00]

Nach Taguchi kann diese Robustheit mit dem Signal-Rausch-Verhältnis (englisch: signal-to-noise-ratio, Abk. S/N-Verhältnis) gemessen werden.

$$S/N = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (\text{Formel 4.3})$$



Das S/N-Verhältnis berücksichtigt den Mittelwert der Zielgröße  $Y$  und ist somit auch von ihm abhängig. Ist jedoch nur die Standardabweichung  $s$  von Interesse, wird das sogenannte Robustheitsmaß verwendet. [RONN08]

$$\text{Robustheit} = 10 \log \left( \frac{1}{s^2} \right) \quad (\text{Formel 4.4})$$

Messbare Störgrößen können zusätzlich als äußeres Feld im Versuchsplan berücksichtigt werden, womit deren Einflüsse getrennt analysiert werden können.

Zur Auswertung und Optimierung werden drei Schritte benötigt:

Zunächst werden die Faktoren bestimmt, die einen großen Einfluss auf den Zielwert haben. Das sind diejenigen mit den größten S/N-Verhältnissen (Abbildung 4.8).



Abbildung 4.8: Faktoren suchen [RONN08]

Als nächstes werden die Faktoren auf die Werte eingestellt, die jeweils das größte S/N-Verhältnis erzielten (Abbildung 4.9).

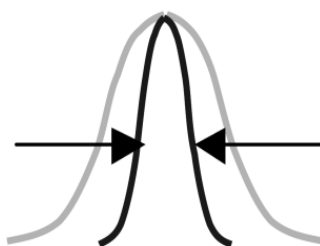


Abbildung 4.9: Faktoren einstellen [RONN08]

Schließlich wird der Mittelwert der Verteilung mit den restlichen Faktoren auf den Zielwert verschoben (Abbildung 4.10).

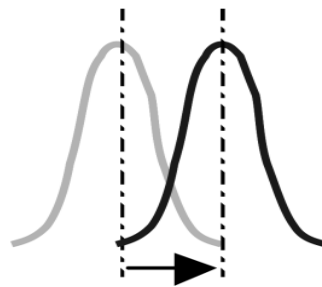


Abbildung 4.10: Zielwert einstellen [RONN08]

Diese Vorgehensweise ergibt sich daraus, dass es in der Regel einfacher ist, den Mittelwert zu variieren, als die Streuung zu verringern. [RONN08]

In Kapitel 6 wird der Umformwinkel als Zielwert definiert und die Streuung der Versuchsdaten analysiert.

#### 4.1.4 Regressionsanalyse

Die folgenden Kennwerte sind zu berücksichtigen. Sie werden in der Literatur sehr detailliert beschrieben und sind im Folgenden nur kurz erläutert:

##### Korrelationskoeffizient $R$

Wie bei der Regression üblich, interessiert zunächst der Korrelationskoeffizient  $R$  oder das Bestimmtheitsmaß  $B = R^2$ . Je näher dieses an dem Wert 1 liegt, desto besser wird das Merkmal  $y$  durch die Merkmale  $x$  beschrieben. Je kleiner  $B$  ist, desto mehr streuen die Werte oder es gibt keinen Zusammenhang zu  $y$ .  $B$  besagt, wie viel Prozent der Streuung durch das Modell erklärt werden können. [RONN08]

##### Adjustiertes Bestimmtheitsmaß $R^2_{adj}$

Neben dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  findet man häufig auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{adj}$ , bei dem die entsprechenden Freiheitsgrade mitberücksichtigt werden. Für große Stichprobenumfänge sind beide annähernd gleich. Je kleiner der Stichprobenumfang wird, desto größer ist die Abweichung.  $R^2$  überschätzt bei kleiner Anzahl von Freiheitsgraden den Anteil erklärter Streuung mitunter erheblich. Große Unterschiede zwischen  $R^2$  und  $R^2_{adj}$  deuten auf unnötige Terme im Modell hin. [RONN08]

##### Vorhersagemaß des Modells $Q^2$

Die Vorhersagekraft eines Modells bezüglich nicht gemessener Punkte beschreibt das  $Q^2$ -Maß. Die Berechnung erfolgt durch zeilenweises Weglassen von Messpunkten. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  steigt grundsätzlich bei Hinzunahme von Koeffizienten in das Modell,

da sich diese dann zunehmend besser an die Messpunkte anpassen.  $R^2$  (Bestimmtheitsmaß) ist nicht geeignet, um zu erkennen, ob das Modell zum Over-Fit neigt, also zu viel oder zu schlecht modelliert. Ein zu kleines  $Q^2$  bedeutet, dass sich das Modell bei neuen Versuchen ändern wird. Wenn der Zähler größer ist als der Nenner, kann  $Q^2$  auch negativ werden. [RONN08]

### ***p-Value***

Zur Bestimmung der Signifikanz eines Faktors wird häufig der sogenannte *p-Value* eingesetzt. Dabei wird zunächst die Hypothese aufgestellt, dass der Koeffizient des betrachteten Faktors aus der multiplen Regression  $b=0$  ist. Der *p-Value* ist dann die Wahrscheinlichkeit, diese Hypothese irrtümlich abzulehnen. [RONN08]

## **4.2 Vorversuche zur Ermittlung der Kraftverläufe**

### **4.2.1 Kraftmessung**

Die Umform- bzw. Schlagkraft kann am Kraftformer nicht direkt eingestellt werden. Der einstellbare Fertigungsparameter ist die Zustellung, also der Abstand zwischen den oberen und unteren Werkzeugeinsätzen. Durch die Hubbewegung wird eine Normalkraft  $F_n$  aufgebracht, fließt durch das Streckwerkzeug und erzeugt durch die schrägstehenden Lamellen eine zusätzlich Kraft in horizontaler Richtung. Diese Kraft erzeugt die Umformung im Blech. Sie kann ebenfalls nicht direkt gemessen oder eingestellt werden und ergibt sich aus dem Zusammenspiel mehrerer Einflussgrößen wie der Zustellung, den Reibwerten, den Werkstoffkennwerten und sonstigen Umwelteinflüssen. Diese Einflussgrößen werden im Kapitel 6 weiter erläutert.

Die am Werkzeug entstehende Normalkraft  $F_n$  hingegen kann gemessen werden. Dazu ist unterhalb der unteren Werkzeugaufnahme eine 200 kN Kraftmessdose der Firma Kistler im Krafthauptschluss angebracht. Eine Kalibrierung der vorgespannten Kraftmessdose erfolgte auf einer Zug-Drück-Prüfmaschine der Firma Zwick-Roell. Abbildung 4.11 zeigt den Vergleich zwischen der vorgespannten Kraftmessdose und dem Kraftsignal der Prüfmaschine. Mit der ermittelten Empfindlichkeit von -3,91 pC/N und einem Messbereich von 2,00E+4 sind Kräfte bis 200kN messbar.

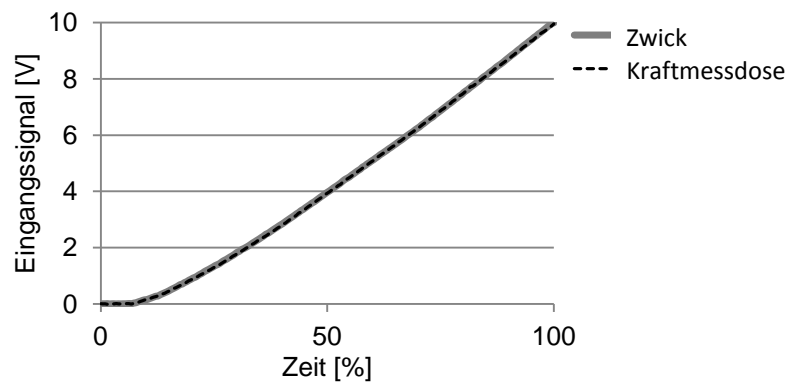


Abbildung 4.11 Kalibrierung Kraftmessdose

In Abbildung 4.12 zeigt einen typischen Kraftverlauf, allerdings ist für die Umformung lediglich das Maximum ausschlaggebend (Abbildung 4.13). Bei einer Abtastrate von 500 Hz wird alle 138 ms ein Kraftmaximum gemessen.

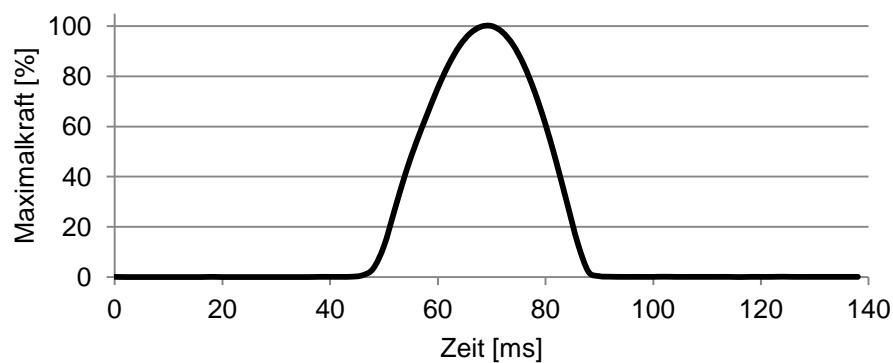


Abbildung 4.12: Typischer Kraftverlauf

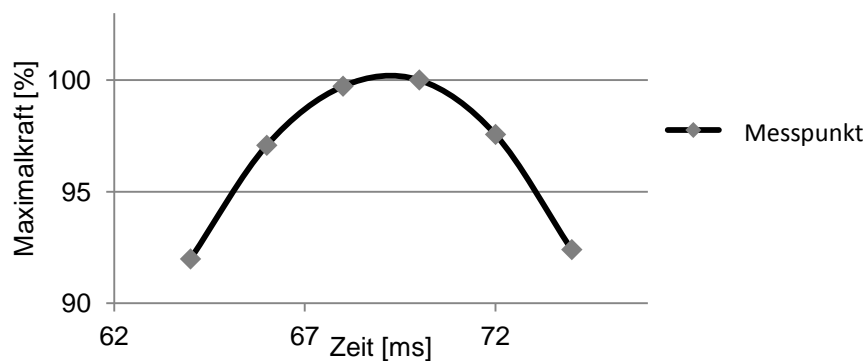


Abbildung 4.13: Typisches Kraftmaximum

#### 4.2.2 Einfluss der Zustellung

Die Zustellung beschreibt den Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Werkzeugeinsatz. Je größer sie ist, desto kleiner ist der Spalt zwischen den Werkzeugen. Die Kraft resultiert aus dem Druck, den der obere Werkzeugeinsatz auf den unteren ausübt, daher steigt sie mit der Zustellung an. Eine Erhöhung der Zustellung von 22,5 mm auf 23,5 mm bewirkt bereits eine Verdoppelung der Kraft (Abbildung 4.14).

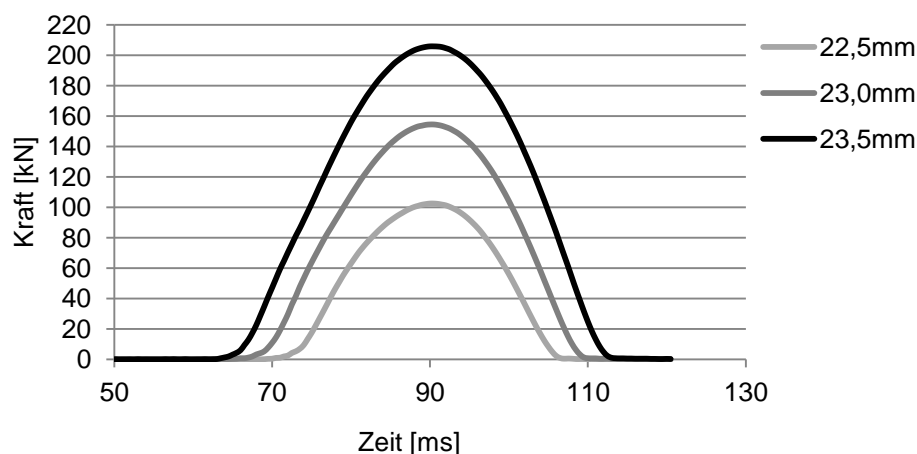


Abbildung 4.14: Einfluss der Zustellung

Werden lediglich die Kraftmaxima den drei gemessenen Kurven betrachtet, so liegen die Werte auf einer Geraden mit der Steigung 103,32 kN/mm (Abbildung 4.15).

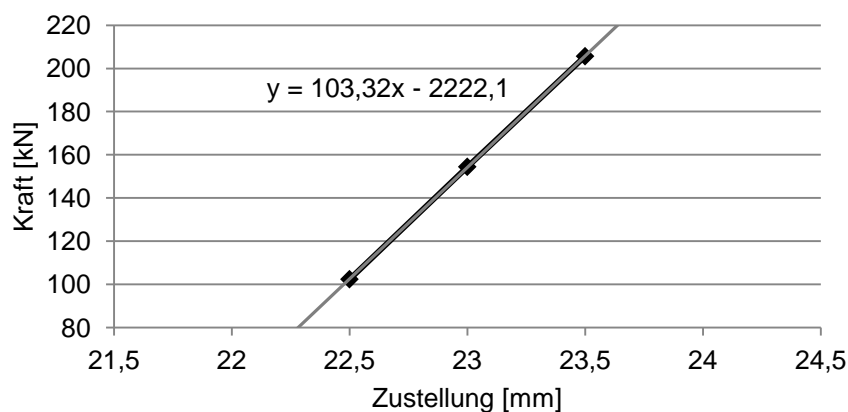


Abbildung 4.15: Vergleich Kraftmaxima

Im Bereich zwischen 22,5 mm und 23,5 mm kann ein linearer Zusammenhang zwischen Zustellung und Kraft angenommen werden:

$$\text{Kraft [kN]} = m * \text{Zustellung [mm]} - t \quad (\text{Formel 4.5})$$

Für das verwendete Streckwerkzeug und den Versuchswerkstoff gilt:

$$m = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}; t = 2222,1 \text{ kN} \quad (\text{Formel 4.6})$$

Die Geradensteigung  $m$  und die Verschiebung  $t$  sind charakteristische Größen für die verwendete Maschine-Werkzeug-Werkstoff-Kombination und somit für jede Kombination neu zu bestimmen. In weiteren Versuchen soll geklärt werden, ob die Blechdicke ebenfalls in einen funktionalen Zusammenhang mit der Kraft gebracht werden kann. So könnte die Kraft in Abhängigkeit von Zustellung und Blechdicke bei sonst konstanten Bedingungen berechnet werden. Weiterhin ist ein Gültigkeitsbereich anzugeben, da das Werkzeug bei zu geringer Zustellung das Werkstück nicht mehr berührt und bei zu großer Zustellung zu hohe Kräfte auftreten, die zu ungleichmäßigen Umformungen und unnötig hohem Verschleiß führen.

#### 4.2.3 Einfluss der Blechdicke und des Werkstoffes

Jedes Versuchsblech wird mit der Zustellung 22,5 mm und 23,0 mm verformt. Größere Zustellungen werden nicht berücksichtigt, da die Maximalkräfte den eingestellten Messbereich bis 220 kN überschreiten. Die Versuchsbleche sind L-Profile (37,5 mm x 60 mm x 500 mm) aus DC04 (1,00 mm und 1,20 mm) und AlMg5 (1,51 mm).

Abbildung 4.16 zeigt einen Anstieg der Kraft mit zunehmender Blechdicke. Der Verlauf der Kraft bleibt unverändert. Werden die Kraftmaxima bezogen auf die Zustellung (Abbildung 4.17) verglichen, so lässt sich eine Verschiebung in y-Richtung vermuten. Bestünde hierfür ein linearer Zusammenhang, würde die Maximalkraft mit der Blechdicke linear ansteigen.

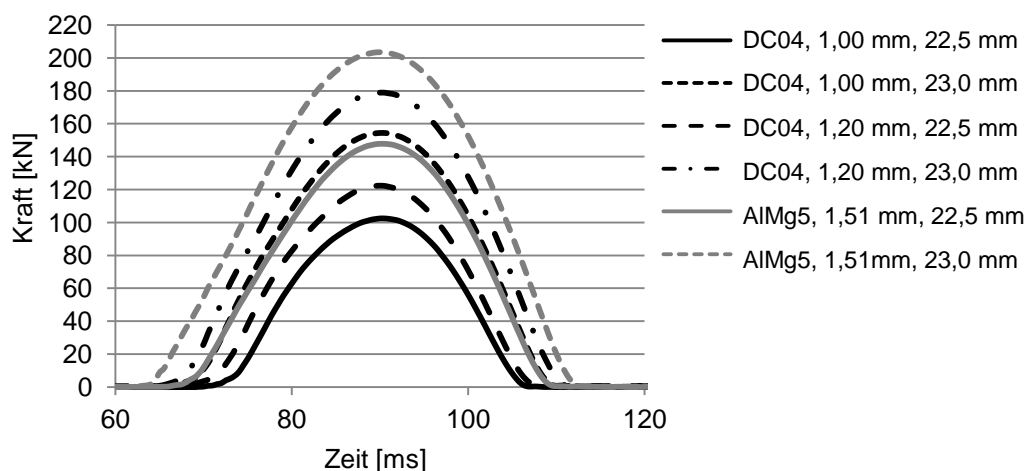


Abbildung 4.16: Einfluss von Blechdicke und Material

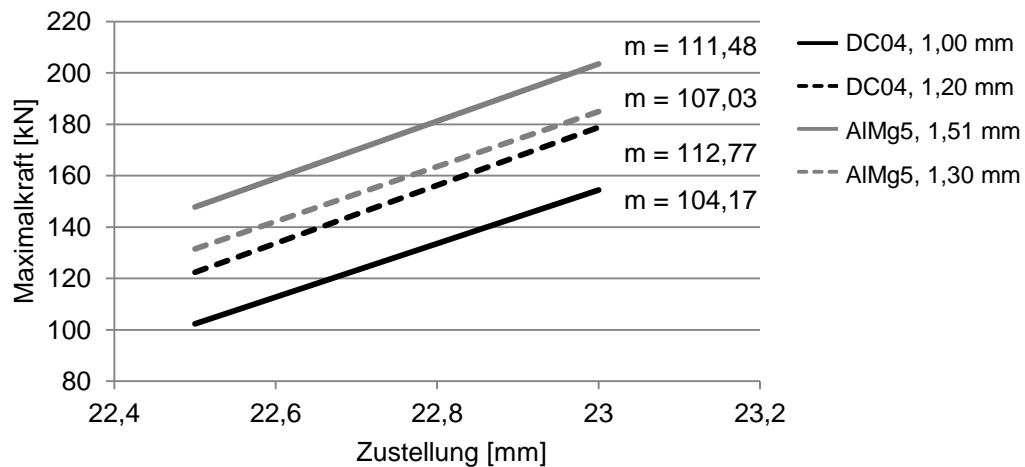


Abbildung 4.17: Vergleich Kraftmaxima

In Abbildung 4.18 wird die Zunahme der Maximalkraft in Abhängigkeit der Blechdicke dargestellt. Die angenäherten Steigungen der Geraden für die beiden Werkstoffe unterscheiden sich deutlich voneinander. Dieser Zusammenhang muss daher für jeden neuen Versuchswerkstoff und bei Veränderung der Probenabmessungen erneut bestimmt werden. Eine allgemein gültiger Zusammenhang kann nicht abgeleitet werden.

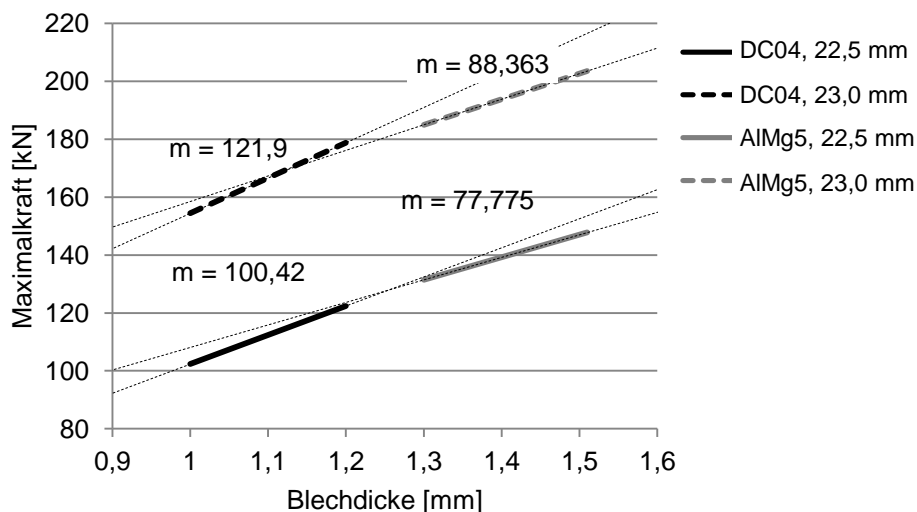


Abbildung 4.18: Vergleich Kraftmaxima und Dicke

#### 4.2.4 Zusammenhang zwischen Schlagtiefe und Zustellung

Abbildung 4.19 verdeutlicht den direkten Zusammenhang zwischen Schlagtiefe und Zustellung. Die Schlagtiefe ist das Maß für den Hub, um den sich der Stößel bei einem ausgelösten Schlag bewegt. Abbildung 4.19 zeigt, dass die resultierende Kraft direkt von der Summe aus Zustellung und Schlagtiefe abhängt, ist diese gleich erhält man auch den gleichen Kraftverlauf.

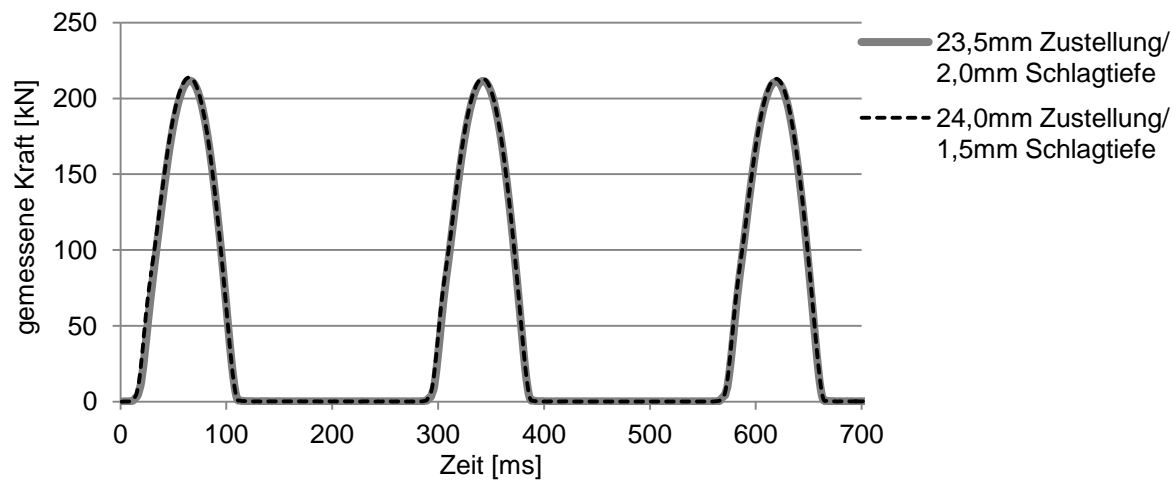


Abbildung 4.19: Beziehung Schlagtiefe und Zustellung

#### 4.2.5 Funktionale Zusammenhänge

Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.2 werden funktionale Zusammenhänge ermittelt. Für die Blechdicke von 1 mm wird die Maximalkraft  $F_{\max}$  [kN] in Abhängigkeit der Zustellung  $z$  [mm] folgendermaßen beschreiben:

$$F_{\max}(z) = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot z - 2222,1 \text{ kN} \quad (\text{Formel 4.7})$$

Variiert man nun die Blechdicke, so kann man mit der Annahme eines linearen Zusammenhangs aus Kapitel 4.2.3 die Kraft in Abhängigkeit der Blechdicke  $d$  [mm] folgendermaßen beschreiben:

$$F_{\max}(d) = m \cdot d + t \quad (\text{Formel 4.8})$$

Die Steigung  $m$  wird durch Mittelung der beiden Steigungen für die Zustellungen 22,5 mm und 23,0 mm für den Werkstoff DC04 bestimmt (vgl. Abbildung 4.18).

$$m = \frac{121,90 + 100,42}{2} \frac{\text{kN}}{\text{mm}} = 111,16 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad (\text{Formel 4.9})$$

Die Verschiebung  $t$  erhält man durch einsetzen eines Geradenpunktes  $P$  (1 mm; 102,35 kN):

$$\begin{aligned} 102,35 \text{ kN} &= 111,16 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot 1 \text{ mm} + t \rightarrow t = -8,81 \text{ kN} \\ \rightarrow F_{\max}(d) &= 111,16 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot d - 8,81 \text{ kN} \end{aligned} \quad (\text{Formel 4.10})$$

Die beiden Geraden aus Abbildung 4.18 schneiden sich dann im Punkt mit den Parametern  $d = 1 \text{ mm}$ ,  $z = 22,5 \text{ mm}$  und  $F_{\max} = 102,35 \text{ kN}$ , da dieser Messpunkt in beiden Versuchen



verwendet wurde. Diese beiden Geraden spannen somit eine Ebene auf, die den Zusammenhang zwischen Maximalkraft, Blechdicke und Zustellung bei dem Material DC04 und einer Schlagtiefe von 2 mm beschreibt. Nach Kapitel 4.2.4, wird S als Summe aus Zustellung und Schlagtiefe angeben:

$$S = \text{Zustellung } (z) + \text{Schlagtiefe } (s) \rightarrow z = S - s \quad (\text{Formel 4.11})$$

Da bei den Versuchen immer die Schlagtiefe  $s = 2 \text{ mm}$  eingestellt war, wird nun in Formel 4.11 eingesetzt:

$$F_{\max}(S) = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot (S - 2 \text{ mm}) - 2222,1 \text{ kN} \quad (\text{Formel 4.12})$$

Diese Gerade ist gleich einer Geraden mit der gleichen Nullstelle und Steigung:

$$F_{\max}(S_0) = 0 \rightarrow S_0 = \frac{2222,1 \text{ kN}}{103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}} + 2 \text{ mm} = 23,51 \text{ mm} \quad (\text{Formel 4.13})$$

$$0 = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot S_0 - t$$

Wird  $S_0$  eingesetzt, so ergibt sich:

$$0 = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot 23,51 \text{ mm} - t \rightarrow t = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot 23,51 \text{ mm} = 2428,74 \quad (\text{Formel 4.14})$$

Somit gilt:

$$F_{\max}(S) = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot S - 2428,74 \text{ kN} \quad (\text{Formel 4.15})$$

Die Ebene, die durch die Geraden (2) und (3) aufgespannt wird, berechnet sich wie folgt:

$$F_{\max}(S, d) = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot S + 111,16 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot d + t \quad (\text{Formel 4.16})$$

$t$  ergibt sich durch einsetzen von  $P$  ( $d = 1 \text{ mm}$ ;  $z = 22,5 \text{ mm}$ ,  $s = 2 \text{ mm}$ ,  $F_{\max} = 102,35 \text{ kN}$ ) mit  $S = z + s$ :

$$t = F_{\max} - 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot (z + s) - 111,16 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot d = -2540,15 \text{ kN} \quad (\text{Formel 4.17})$$

Somit gilt:

$$F_{\max}(z, s, d) = 103,32 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot (z + s) + 111,16 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \cdot d - 2540,15 \text{ kN} \quad (\text{Formel 4.18})$$

Mit dieser Gleichung kann die Maximalkraft in Abhängigkeit von Zustellung, Schlagtiefe und Blechdicke für den Werkstoff DC04 in Verbindung mit dem aktuell verwendeten Streckwerkzeug bestimmt werden. Der Verschleißzustand des Werkzeugs ist allerdings nicht exakt bestimmbar. Die gefundenen Zusammenhänge sind daher nur für die durchgeführte Versuchsreihe gültig und nicht auf andere Werkstoffe - Werkzeug Paarungen übertragbar.

### 4.3 Ermittlung der mechanischen Kennwerte der Versuchswerkstoffe

Die mechanischen Werkstoffkennwerte wurden gemäß DIN 10002-1 und DIN 485-2 ermittelt und sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Die Untersuchungen wurden auf einer Universalprüfmaschine vom Typ 1484 der Fa. Zwick, Ulm, in 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Eingangsgrößen für die in Kapitel 5 durchgeführte FEM-Simulation.

Werkstoff	d [mm]	E [GPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> /R <sub>m</sub> [%]	A <sub>g</sub> [%]	A <sub>80</sub> [%]	n-Wert [-]
AlMg5 - 0°	0,8	72	147	275	53,48	21,63	23,93	0,26
AlMg5 - 90°	0,8	73	148	284	52,14	19,08	20,30	0,26
AlMg5 - 0°	1,0	70	136	242	55,97	20,21	24,33	0,24
AlMg5 - 90°	1,0	67	135	240	56,17	20,26	24,87	0,23
AlMg5 - 0°	1,5	68	172	284	60,75	20,84	26,17	0,23
AlMg5 - 90°	1,5	69	194	299	64,90	19,47	25,20	0,22
DX54 - 0°	1,0	197	176	303	58,04	21,91	39,90	0,21
DX54 - 90°	1,0	199	175	313	55,91	23,06	44,40	0,21
DC04 - 0°	0,8	222	180	308	58,46	24,56	43,17	0,21
DC04 - 90°	0,8	225	194	315	61,52	23,15	40,73	0,22
DC04 - 0°	1,0	204	149	291	51,15	24,90	45,93	0,22
DC04 - 90°	1,0	215	154	287	53,67	22,79	44,63	0,22
DC04 - 0°	1,5	209	150	285	52,73	24,66	45,13	0,24
DC04 - 90°	1,5	204	149	286	52,24	25,06	46,63	0,24

Tabelle 4.1: Mechanische Kennwerte

Die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  beschreibt die auf den Ausgangsquerschnitt bezogene Zugkraft, die einer Dehnung von 0,2 % zugeordnet ist. Die Zugfestigkeit  $R_m$  ist die auf den Ausgangsquerschnitt maximal übertragbare Kraft.

Das Streckgrenzverhältnis  $R_{p0,2} / R_m$  deutet an, wie weit ein Werkstoff plastisch verformt werden kann. Geringe Streckgrenzverhältniswerte weisen in der Umformtechnik auf Werkstoffe mit größerem Formänderungsvermögen hin.

Die Gleichmaßdehnung  $A_g$  beschreibt die auf die Anfangsmesslänge bezogene plastische Dehnung bei Zugfestigkeit. Die Bruchdehnung  $A_{80}$  ergibt sich durch die Anfangsmesslänge bezogen auf die Längenänderung nach dem Bruch der Zugprobe.

Der Verfestigungsexponent (n-Wert) ist ein Maß für die Erhöhung der Fließspannung mit zunehmender Umformung. Hohe n-Werte kennzeichnen Werkstoffe, die nach einer Formänderung stark verfestigen und dabei eine gleichmäßige Formänderungsverteilung aufweisen. Der im Zugversuch ermittelte n-Wert ist abhängig vom Umformgrad, so dass ein Mittelwert aus den in einem definierten Dehnungsbereich aufgenommenen Messungen errechnet wurde. In Ermangelung einer standardisierten Prüfvorschrift wurde der Messbereich zwischen 5 und 15 % Dehnung gewählt.

#### **4.4 Tribologieuntersuchungen**

Einer der größten Einflussfaktoren auf das Umformergebnis ist die Reibung zwischen den Werkzeugeinsätzen und dem Blechwerkstoff. Wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben, wird die Normalkraft durch die im Werkzeug integrierten Hebel in eine vertikale Haltekraft und in die horizontal wirkende Umformkraft aufgeteilt. Je höher der Reibkoeffizient zwischen Werkzeug und Blechwerkstoff ist, desto höher ist die resultierende Umformkraft. Der Reibkoeffizient ist dabei stark vom Verschleißzustand der Werkzeugbackenoberfläche sowie deren Verschmutzungsgrad abhängig.

Zur Analyse der Werkzeugeinsätze werden in Anlehnung an den Streifenzugversuch die Kraftformer-Werkzeuge in einem Zentrierschraubstock mit einer definierten Kraft eingespannt und ein Blech zwischen den Backen herausgezogen. Aus den gemessenen Kräften werden die Reibwerte für unterschiedliche Werkzeug-Werkstoff Paarungen ermittelt und in die FE-Simulation übernommen.

Die Werkzeuge werden mit einer definierten Zustellung von 23,5 mm und dem Werkstoff DC04 mit der Dicke 1mm verschlissen. Die Versuche zur Ermittlung der Reibwerte werden mit 0, 1.000, 5.000, 10.000, 20.000 und 50.000 Schlägen bzw. Umformoperationen durchgeführt. Es kommen 4 Sätze des Werkzeugtyps FWR 60s zum Einsatz. Der entstehende Metallabrieb muss nach etwa 100 Schlägen aus den Wirkflächen der Werkzeuge geblasen oder abgebürstet werden.

#### 4.4.1 Versuchsaufbau und Reibwertermittlung

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.20 in einem vereinfachten CAD Modell dargestellt. Der Blechstreifen des Versuchswerkstoffs wird zwischen die beiden Werkzeugbacken in einem Zentrierschraubstock eingespannt. Die Normalkraft  $F_N$  wird über eine Kraftmessdose aufgezeichnet. Die zum Herausziehen benötigte Kraft entspricht der Reibkraft und wird von der Zug-Druck-Prüfmaschine direkt gemessen.

Der Gleitreibungskoeffizient wird mit dem Coulumb'schen Gleitreibungsgesetz berechnet:

$$F_R = \mu * F_N \quad (\text{Formel 4.19})$$

$F_R$  = Reibkraft;  $\mu$  = Gleitreibungskoeffizient;  $F_N$  = Normalkraft

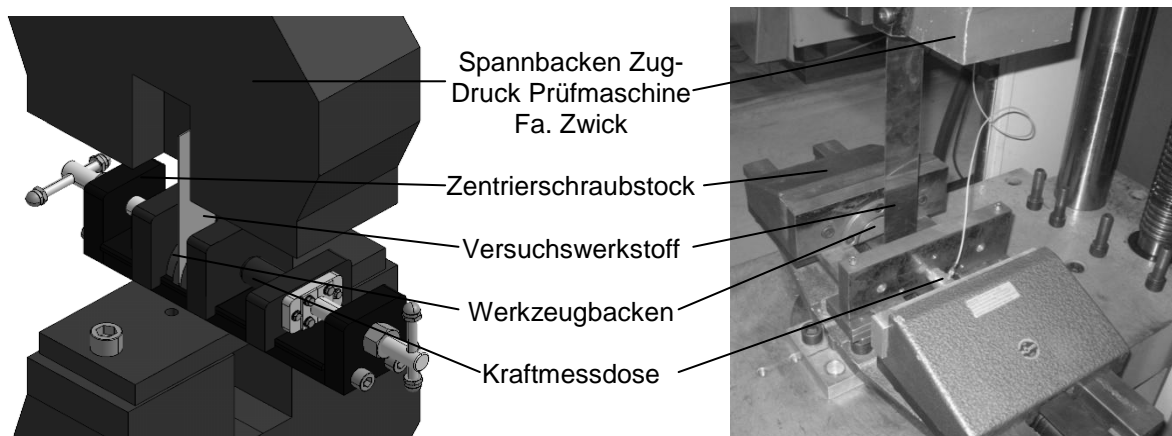


Abbildung 4.20: CAD-Modell und realer Aufbau zur Reibwertermittlung

Mit der im Schraubstock angebrachten Kraftmessdose können mit einer Empfindlichkeit von -3,91 pC/N und einem Messbereich von 1,00 E+3 Kräfte bis 1 kN gemessen werden. Die Kraft der Zug-Druck-Prüfmaschine wird direkt aufgezeichnet. Die beiden Kraftsignale werden mit Hilfe der Software LabVIEW simultan aufgezeichnet und direkt ausgewertet. Bei jeder Messung werden in etwa 100 Kräftepaare mit dem zugehörigen Reibwerte abgespeichert.

Als Versuchswerkstoffe werden Bleche aus Aluminium (AlMg5), Stahl (DC04), Edelstahl (1.4006 (X12Cr13)), Kupfer und Messing verwendet. Die Legierung der Kupfer- und Messingbleche ist nicht bekannt. Um Abweichungen in den Messungen zu minimieren, werden die Versuche mehrfach durchgeführt und der Mittelwert gebildet.

#### 4.4.2 Auswertung der Reibwerte nach dem Werkzeugverschleiß

Durch den sich einstellenden Verschleiß der Werkzeuge werden die Reibwerten in Abhängigkeit der Schlaganzahl aufgezeigt. In Abbildung 4.21 ist eine Vergleich unterschiedlicher Versuchswerkstoffe aufgetragen. Mit zunehmendem Verschleiß verringert sich der Reibwert der Werkzeugoberflächen.

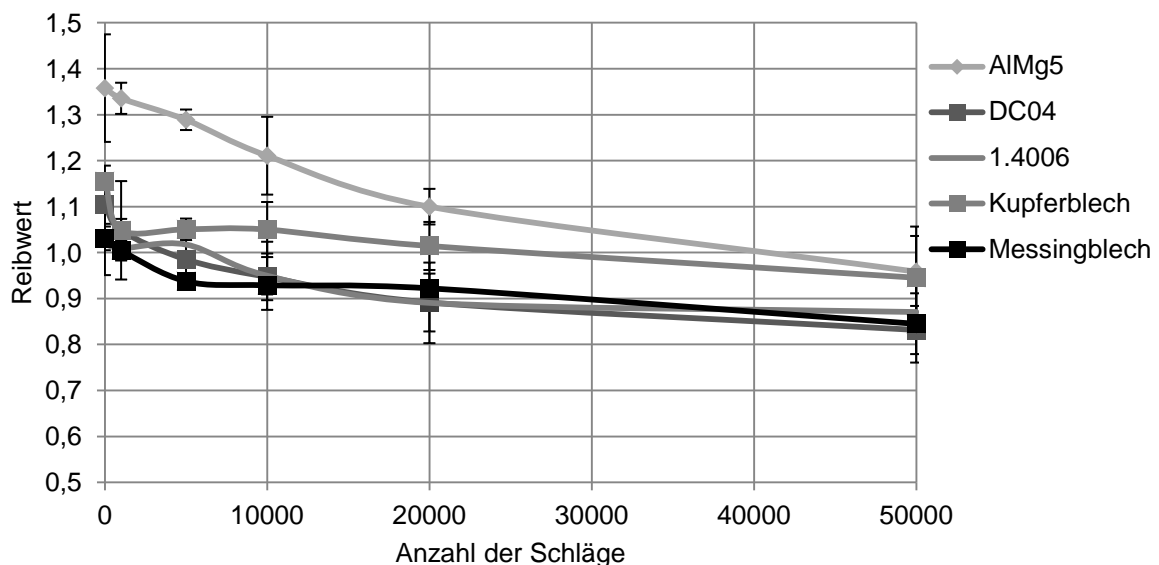


Abbildung 4.21: Abnahme des Reibwertes bei steigender Schlaganzahl

Im neuwertigen Lieferzustand bewegen sich die Reibwerte zwischen 1,1 bis 1,4. Wie erwartet sind materialbedingte Unterschiede deutlich zu erkennen. Je weicher ein Werkstoff ist, desto besser kann die geriffelte Wirkfläche in die Oberfläche eingreifen.

#### 4.4.3 Vermessung der Werkzeugoberfläche

Parallel zu den Reibwertuntersuchungen wird der Verschleiß der Werkzeuge mit Hilfe des 3D-Oberflächenmesssystem ATOS der Fa. GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik) gemessen. Hierzu werden die Wirkflächen im neuen Zustand und nach 50000 Schlägen gescannt, übereinandergelegt und die Abweichungen in Falschfarben dargestellt. Der Verschleiß der Werkzeuge lässt damit nachweisen (Abbildung 4.22).

Die Erhebungen auf der Oberfläche sind nach 50000 Schlägen, im Vergleich zu einem Neuwerkzeug, um bis zu 0,22 mm abgetragen und in den Zwischenräumen hat sich bis zu 0,25 mm Material angesammelt. Da die Werkzeuge während der Verschleißuntersuchungen regelmäßig gereinigt wurden, ist diese Materialanhäufung kein Abrieb sondern eine Verformung der Oberfläche und mit einem Plattdrücken der geriffelten Struktur zu erklären.

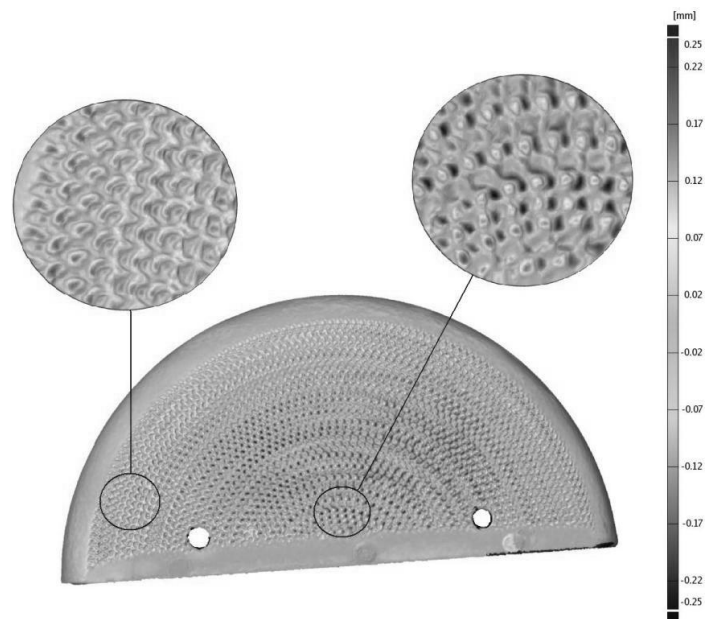


Abbildung 4.22: ATOS Aufnahme

#### 4.4.4 Auswirkung auf die Umformeigenschaften

Eine weitere Alternative den Verschleiß der Werkzeuge nachzuweisen, ist die direkte Vermessung des Umformergebnisses. Hierzu werden L-Profile aus dem Stahlwerkstoff DC04 mit Materialstärke von 1 mm umgeformt. Die Umformung erzeugt eine Biegung des L-Profils an der Umformstelle. Der Grad der Umformung kann über die Vermessung des entstehenden Umformwinkels  $\alpha$  (Abbildung 4.23) bestimmt werden. In Abbildung 4.24 ist der erzeugbare Umformwinkel in Abhängigkeit von der Schlaganzahl aufgetragen.

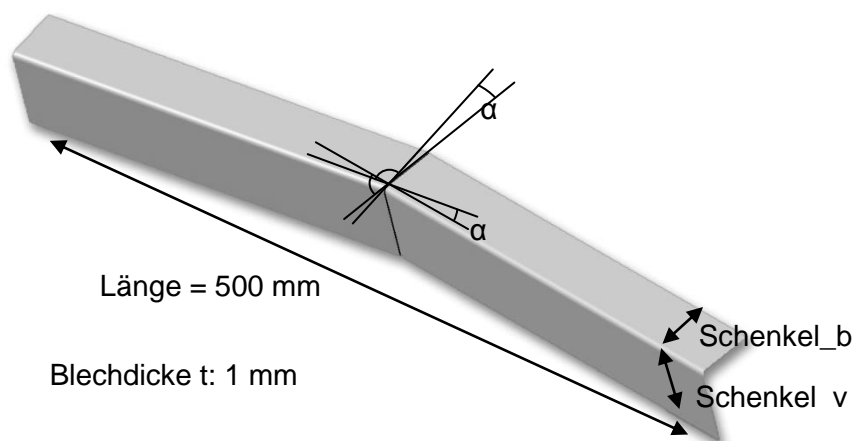


Abbildung 4.23: Verwendetes Versuchswerkstück

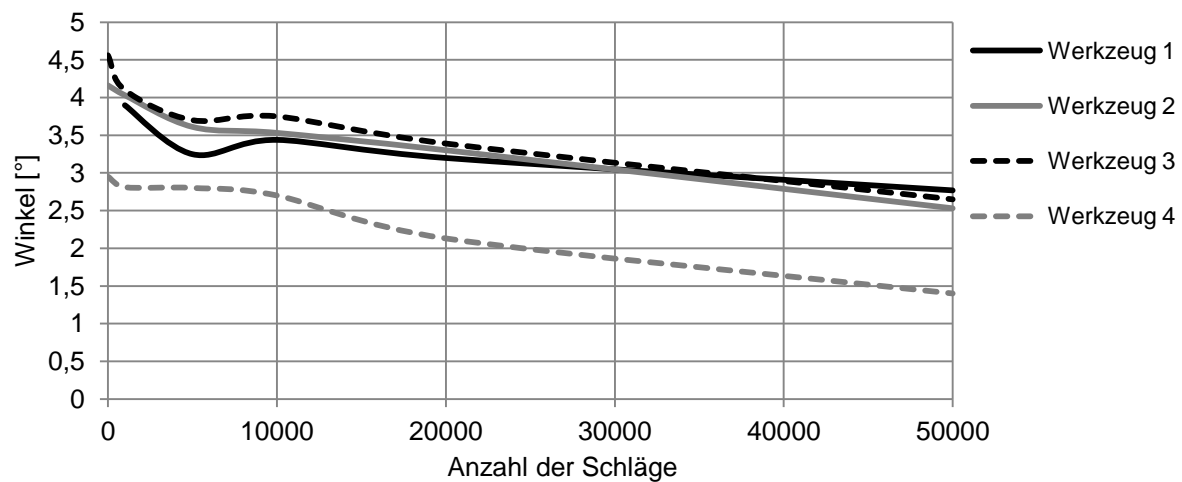


Abbildung 4.24: Winkeländerung am L- Profil

Erwartungsgemäß nimmt der Umformwinkel mit zunehmender Schlagzahl bzw. mit zunehmendem Werkzeugverschleiß ab. Fehler bei der Vermessung der Bauteile konnten durch eine mehrmalige Fertigung und Vermessung der Bauteile ausgeschlossen werden.

Basierend auf der Annahme, dass ein neues Werkzeug den maximalen Umformwirkungsgrad besitzt, ergibt sich das in Abbildung 4.25 zu sehende Diagramm, das die Änderung dieses Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Schlaganzahl darstellt.

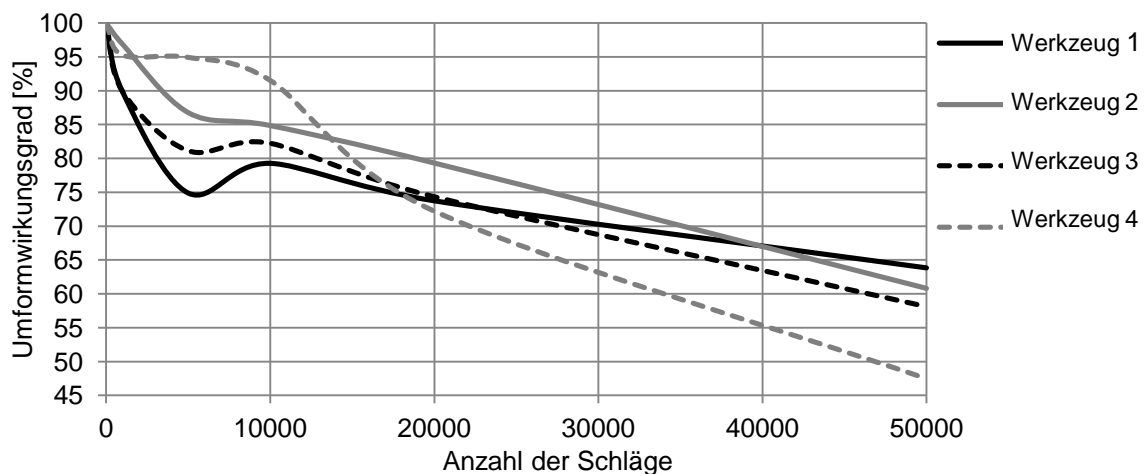


Abbildung 4.25: Änderung des Umformwirkungsgrades

Nach 50.000 Schlägen weisen die Werkzeuge nur noch etwa 60% ihres ursprünglichen Umformwirkungsgrades auf. Bezogen auf die sehr lange Lebens- und Nutzungsdauer dieser Werkzeuge stellt die betrachtete Schlaganzahl wahrscheinlich nur einen Bruchteil der tatsächlichen Nutzung dar, verdeutlicht allerdings anschaulich, dass dieser Einfluss nicht

unterschätzt werden darf. Bei höheren Schlagzahlen ist eine weitere Verminderung des Umformvermögens und die Annäherung an einen Grenzwert zu erwarten. In der manuellen Fertigung begegnet man diesem Problem durch mehrfaches Bearbeiten der gleichen Stelle, was zu deutlich längeren Fertigungszeiten führt.

Werden werkzeugabhängige Fertigungsparameter, Randbedingungen und Eingangsgrößen als Grundlage für Simulationen oder mathematische Modelle verwendet, muss der Werkzeugzustand klar bestimmt sein. Ist das nicht der Fall, beschreibt man nur eine Momentaufnahme einer aktuell verwendeten Kraftformer-Werkzeug-Werkstoff-Kombination.

#### **4.5 Fertigungsrandbedingungen**

Einen wichtigen Aspekt bei den Untersuchungen bilden die nicht beeinflussbaren Fertigungsrandbedingungen:

##### **Verschleiß**

Die Oberfläche der Werkzeugbacken besteht aus gehärtetem Werkzeugstahl die gezackte Oberfläche wird durch Rändeln bzw. Fräsen erzeugt. Wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben, werden die Spitzen nach längerem Einsatz abgerundet. Bereits nach 50.000 Schlägen ist der Umformwirkungsgrad der Werkzeuge um 25-50% gesunken.

##### **Versuchswerkstoff**

Einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Fertigung hat der Versuchswerkstoff. Leichte Chargenschwankungen des Bleches haben auf eine Umformoperation nur einen geringen Einfluss. Die entstehende Abweichung summiert sich auf Grund der hohen Zahl an Umformoperationen allerdings sehr schnell auf und resultiert in erheblichen geometrischen Abweichungen.

##### **Verschmutzung der Werkzeugbacken**

Die Reibung zwischen Werkzeugbacken und Blech ist einer der wichtigsten Einflussparameter auf den Fertigungsprozess. Während der Fertigung sammeln sich Ablagerungen, Flitter, Zinkabrieb und Stahlstaub in den gezackten Backenoberflächen. Die Werkzeuge sollten daher regelmäßig gereinigt werden. Vor allem bei der Verarbeitung weicher Werkstoffe wie Aluminium oder Kupfer und bei zinkbeschichteten Stahlplatten hat die Verschmutzung der Werkzeuge einen großen Einfluss auf das Umformvermögen der Werkzeugbacken.



**Werkzeugtemperatur**

Die Werkzeugtemperatur ist ein weiterer und meist vernachlässigter Einflussparameter. Erwärmt sich das Werkzeug bzw. weicht der Gummiwerkstoff durch mehrfaches Strecken und Stauchen im Laufe der Fertigung auf und ändert seine mechanischen Eigenschaften. Das Fertigungsergebnis zu Beginn der Fertigung kann demnach nach mehreren Schlägen variieren.

**Umgebungstemperatur**

Neben der bereits beschriebenen Werkzeugtemperatur, hat auch die Umgebungstemperatur einen Einfluss. Die Lager in den Werkzeugen verursachen aufgrund ihres gummiartigen Werkstoffes hohe Schwankungen in den Umformkräften. Die in die Werkzeuge integrierten Hebel sind in einen Gummiwerkstoff vulkanisiert. Je nach Temperatur ändern sich dessen Viskosität und somit die mechanischen Eigenschaften des Gummiwerkstoffes. Daher werden bei gleicher Zustellung andere Klemm- und Umformkräfte erzeugt bzw. übertragen.

## **5 FEM – Simulation des Kraftformerverfahrens**

### **5.1 Zielsetzung**

Zur Automatisierung eines Prozesses muss im Vorfeld eine Fertigungsstrategie ermittelt werden. Diese berechnete Strategie bzw. Abfolge sollte vor dem ersten Produktionslauf auf die Machbarkeit überprüft, nach Fehlern analysiert und gegebenenfalls angepasst werden. Um das Kraftformerverfahren zu automatisieren muss daher eine zum Prozess parallel laufende, beziehungsweise ihm vorausgehende FEM-Simulation berechnet werden, die den gesamten Fertigungsprozess abbildet. Der Prozess kann dadurch bereits vor der realen Testphase beurteilt, das Materialverhalten abgeschätzt und die Fertigungsparameter angepasst werden. Das Ziel ist daher der Aufbau eines Simulationsmodells für das Kraftformerverfahren, das sowohl den Streck- als auch den Stauchprozess realitätsnah abbildet.

Das wesentliche Problem der Modellgenerierung bei inkrementellen Prozessen ist die hohe Zahl an Formgebungsoperationen und die stets neu zu bewertende Ausgangssituation, die sich nach jeder erfolgten Formgebung einstellt. Im Bereich der Umformung ändern sich durch jeden Hub die Materialdicke, die Spannungszustände und die Bauteilgeometrie des gesamten Bauteils. Die einfache Simulation eines Hubes und die Übertragung des Ergebnisses auf andere Bauteilbereiche oder das Parallelisieren der Berechnung sind daher nicht möglich.

### **5.2 Aufbau des Simulationsmodells**

#### **5.2.1 Simulationsprogramm PamStamp 2G**

Zur Simulation inkrementeller Umformprozesse gibt es auf dem Markt bislang kein explizites Simulationsprogramm, weshalb mehrere für die konventionelle Blechumformung konzipierte Programme betrachtet werden. Nach einer Vergleichsstudie zwischen Abaqus (Dassault Systèmes, Velizy-Villacoublay, Frankreich), PamStamp 2G (ESI Group, Paris, Frankreich) und AutoForm (AutoForm Engineering, Wilen bei Wollerau, Schweiz) fiel die Wahl aufgrund einfacherer Handhabung, praktikablerer Anpassung des Simulationsmodells, kürzerer Rechenzeiten und der schnelleren Auswertung der Ergebnisse auf PamStamp 2G.

Das Simulationsprogramm wurde in erster Linie für die Umformsimulation metallischer Werkstoffe entwickelt. Auch komplexe, mehrstufige Umformprozesse können dargestellt werden. In der Software sind drei Module integriert: DIEMAKER, mit dem eine Ziehanlage konstruiert werden kann, QUIKSTAMP zur Überprüfung des Umformvorgangs und

AUTOSTAMP, das zur Prozessbeurteilung und zur Qualitäts- und Toleranzkontrolle herangezogen wird. Für die Simulation der inkrementellen Umformung wird letzteres verwendet.

### 5.2.2 Interpretation der Umformoperation

Ausgangspunkt der Simulation des inkrementellen Umformverfahrens ist die Vereinfachung und Beschreibung des Umformprozesses. Zur Vereinfachung des Modells genügt die Betrachtung der Bewegungen und Reibverhältnisse der Werkzeugbacken. Die Verformung des C-Gestells des Kraftformers, die Kraftumlenkung im Werkzeug und die damit verbundene elastische Verformung der Gummielemente im Werkzeug werden vernachlässigt.

Der Werkzeugeinsatz lässt sich in Ober- und Unterwerkzeug mit jeweils zwei Werkzeugbacken unterteilen. Die oberen beiden Werkzeugbacken verfahren in die negative Z-Richtung nach unten, wobei die beiden unteren Backen in der Z-Richtung gesperrt sind. Beim Zusammentreffen der oberen und unteren Werkzeuge wird das Blech eingeklemmt und mit den Werkzeugbacken auseinander gezogen. Beim Stauchen bewegen sich die Backen zur Mitte des Werkzeugs und drücken das Blech zusammen. Abbildung 5.1 verdeutlicht die Kinematik der Werkzeugbacken beim Streckvorgang.

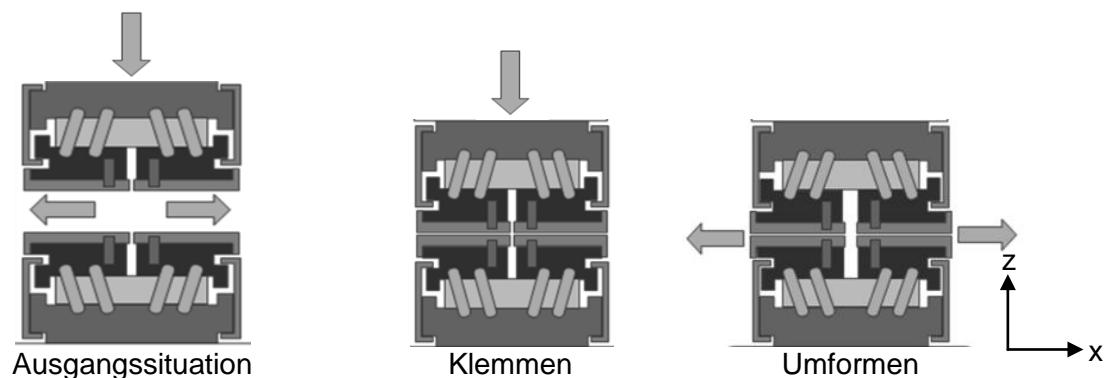


Abbildung 5.1: Kinematik der Werkzeugbacken beim Strecken

### 5.2.3 Strecken und Stauchen

Die Verfahren Strecken und Stauchen unterscheiden sich in der Realität vor allem durch eine geänderte Geometrie der Werkzeugbacken (siehe Kapitel 2.3.5). Die leichte Verdrehung der vier Werkzeugbacken im Stauchwerkzeug soll in der Fertigung eine Faltenbildung bei größeren Umformgraden verhindern. Dieser Effekt ist allerdings sehr gering, so dass die Fa. Eckold in der nächsten Werkzeuggeneration gänzlich darauf verzichtet. Da sich die Wirkflächen der Werkzeuge kaum unterscheiden, wird die Schrägstellung im Simulationsmodell vernachlässigt. Die Fertigungsverfahren unterscheiden sich demnach nur noch in den Kraft- und Bewegungskurven bzw. -richtungen und lassen eine Übertragung des Simulationsmodells zu. Alle auftretenden Probleme werden im Simulationsmodell für das Verfahren Strecken gelöst und im Anschluss auf das Verfahren Stauchen übertragen.

### 5.2.4 Vernetzen der Bauteile

Die Erstellung eines Simulationsmodell in PamStamp 2G erfolgt in drei Programm-Stufen:

- Preprozessing (CAD-Modelle vernetzen; Prozessparameter festlegen)
- Solving (Gleichungssystem aufstellen und lösen)
- Postprozessing (Ergebnisse darstellen; Ergebnisse interpretieren)

Im Preprozessing werden die einzelnen Werkzeugbacken mit CATIA V5 konstruiert, in PamStamp 2G als .igs Datei importiert und durch das Modul DeltaMESH vernetzt. Das umzuformende L-Profil kann entweder im CAD konstruiert und dann importiert oder direkt in PamStamp 2G erstellt werden (siehe Abbildung 5.2). Die Vernetzung erfolgt analog zu den Werkzeugbacken mit DeltaMESH.

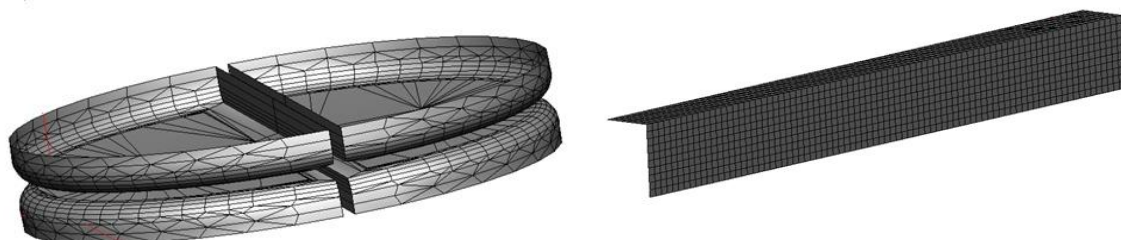


Abbildung 5.2: Vernetzung der Werkzeuge und des Werkstückes

Die Diskretisierung hängt von der jeweiligen Form des zu untersuchenden Elements bzw. Objektes ab. Scharfe Kanten, Bögen oder Rundungen werden vom Programm im Vergleich zu geraden Oberflächen mit einem feineren Netz abgedeckt. Die Elementanzahl erhöht die Genauigkeit des Simulationsmodells, hat aber einen negativen Einfluss auf die Rechenzeit.

### 5.2.5 Definition der Werkzeuge

Bei der Objektdefinition unterscheidet PamStamp 2G grundsätzlich zwischen drei verschiedenen Element-Kategorien / Objekttypen:

- Volumenelemente (3 FHG pro Knoten; translatorisch)
- Schalenelemente (6 FHG pro Knoten; translatorisch und rotatorisch)
- Stabelemente (1 FHG pro Knoten; translatorisch)

Die einzelnen Objekte bzw. Objekttypen werden mit typspezifischen Attributen versehen. Die Attribute dienen zur Festlegung von z.B. Prozess- und Umformparametern, Randbedingungen und Bauteileigenschaften. Durch Auswahl des Objekttyps werden gleichzeitig die Anzahl der gültigen Attribute vorgegeben und können über einen Attribut-Baum festgelegt werden.

Die Werkzeugbacken werden mit dem Objekttyp „surface tool“ als Schalenelemente definiert und ihnen wird das Attribut „*rigid body*“ (Starrkörperdefinition) zugewiesen. Es beschreibt nicht verformbare Elemente, bei denen die sechs Freiheitsgrade (drei translatorische, drei rotatorische) der zugehörigen Knoten gesperrt sind und als der Festkörperdefinition wird der vom Programm vorgeschlagene Typ „automatic“ gewählt und das Attribut „*contact*“ als Kontaktdefinition hinzugefügt. Hierdurch wird die Reibung zwischen Werkzeug (Backen 1-4) und Blechwinkel festgelegt (Abbildung 5.3). Mit dem Kontakttyp „automatic“ kann eine Durchdringung von Knoten des Objekts Platine (Slave) mit den Elementflächen der Werkzeugobjekte (Master) verhindert werden. Die Kontaktdefinition zur Platine erfolgt bei den Werkzeugobjekten und nicht im Attribut-Baum der Platine.

Zur Definition der Werkzeugbackenkinematik wird das Attribut „*cartesian kinematic*“ angeführt und damit Freiheitsgrade ausgewählter Elemente bezüglich des jeweiligen Schwerpunktes gesperrt, freigegeben oder mit vorher bestimmten Geschwindigkeiten beaufschlagt. Jedes ausgewählte Element und jeder spezielle Knoten wird je nach Anforderung in X-, Y- und Z-Richtung translatorisch und rotatorisch definiert.

Das Programm unterscheidet vier Geschwindigkeitsarten:

- Definition einer eingprägten Geschwindigkeit (imposed velocity)
- Definition einer Anfangsgeschwindigkeit (initial velocity)
- Aktivierung einer Geschwindigkeit (lock & velocity)
- Definition eines Vorschubes (imposed displacement)

Die „Rotations-Freiheitsgrade“ der Werkzeugbacken und die Freiheitsgrade in Y-Richtung werden gesperrt und auf „lock“ gesetzt. Die X-Richtung wird mit dem Befehl „imposed

velocity“ definiert und der gewünschte Geschwindigkeitsverlauf implementiert. Für die unteren Werkzeugbacken wird der Wegverlauf invertiert. Die Backen 3 und 4 werden noch zusätzlich in Z-Richtung blockiert (Abbildung 5.3).

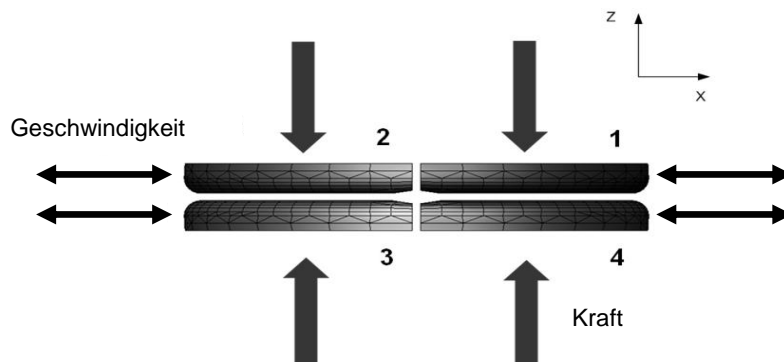


Abbildung 5.3: Kinematische und kinet. Beschreibung der Werkzeugbacken

Mit Hilfe eines Wegsensors wurden die Wegverläufe der Werkzeugbacken für eine Zustellung von 21,7 ermittelt und um den Wegverlauf für beliebige Zustellungen zu erhalten durch Skalierung approximiert (Abbildung 5.4.).

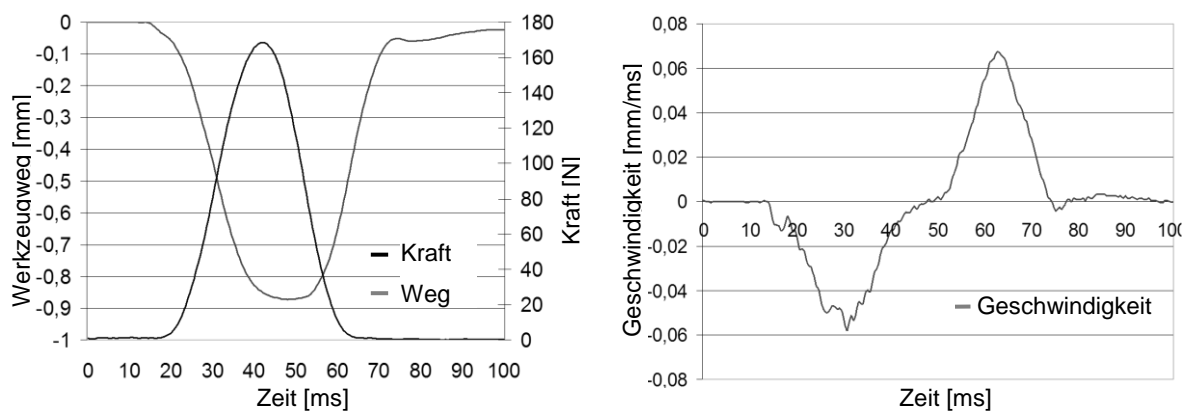


Abbildung 5.4: Weg-, Kraftverlauf der Werkzeuge über der Zeit

Dem Objekt Werkzeugbacke wird bzgl. des Schwerpunktes ein Kraftverlauf zugewiesen und daher mit dem Attribut „loading“ definiert. Der Kraftverlauf wird als Kraft-Zeit-Funktion, als konstante Kraft oder als Kraft, die zeitabhängig bzw. weggesteuert aktiviert wird, definiert. Der Kraftverlauf beim Kraftformerverfahren wird als Kraft-Zeit-Funktion implementiert und wie beim Wegverlauf in X-Richtung auf die jeweilige Zustellung angepasst (Abbildung 5.4). Der Verlauf der Kraft ist stets von den Werkzeugen zur Platine gerichtet. Die Werkzeugbacken 1 und 2 wirken in negativer und die Backen 3 und 4 in positiver Z-Richtung (Abbildung 5.3).

### 5.2.6 Prozessparameterdefinition

Bei der Prozessdefinition dient das Attribut „Control“ zur Bestimmung des Abbruchkriteriums und der gewünschten Ausgabeinformationen (Outputs) der Simulation. Die Simulation kann durch den Progressionstyp „Time“ und „Stroke of Objekt“ abgebrochen werden. „Stroke of Objekt“ wird bei bekanntem Ablauf der Simulation angewendet, wobei sich die Output-Datei allein auf die Arbeitsbewegung des ausgewählten Werkzeugs bezieht. Bei vorliegendem Umformprozess wird als Kontrollkriterium der Typ „Time“ ausgewählt, da die relevanten Weg-Zeitverläufe bzw. Kraft-Zeitverläufe für die Umformung bekannt sind. Zudem legt der gewählte Progressionstyp die Einheit des Abbruchkriteriums und der Ergebnisausgabe fest. [ESIG07]

In PamStamp 2G wird zwischen zwei Einheitssystemen unterschieden:

Einheitssystem	Länge	Masse	Zeit	Kraft
MM.KG.MS / GPA	mm	kg	ms	kN
MM.T.S / GMa	mm	t	s	N

*Tabelle 5.1: Vergleich der beiden Einheitssysteme [ESIG07]*

Für das Simulationsmodell wird das Einheitssystem GPA verwendet.

Durch das Attribut „Autopositioning“ (Autopositionierung) lässt sich die Anordnung der einzelnen Objekte (vier Werkzeugbacken und Blech) im Makro bestimmen. Die hier definierten Autopositionierungen werden nach dem Start der Berechnung automatisch durchgeführt. Um unnötige Fehler zu vermeiden, wurde die Positionierungsreihenfolge dem Realprozess angepasst.

Die Werkzeugbacken 1 und 2 (Abbildung 5.3) werden auf die horizontale Fläche der Platine entlang der negativen Z-Richtung mit einer Toleranz von 0,001 mm und die beiden unteren Backen 3 und 4 entlang der positiven Z-Richtung mit derselben Toleranz positioniert. Dabei wird die horizontale Blechseite jeweils von der halben Fläche der vier halbkreisförmigen, symmetrischen Werkzeugbackenflächen überlappt.

### 5.2.7 Erstellen des Makros

Das Makro definiert die Prozessschritte des Simulationsmodells. Es besteht bei herkömmlichen Umformprozessen aus den vier Ablaufschritten „Gravity“ (Berücksichtigung des Eigengewichtes), „Holding“ (Schließen des Werkzeuges), „Stamping“ (Definition des eigentlichen Umformvorgangs) und „Springback“ (Rückfederung).

Zur Modellierung des Umformprozesses des Kraftformers wird lediglich der Ablaufschritt „Stamping“ verwendet. Die verwendeten Elemente bzw. Objekte in der Stage „Stamping“ werden im Makro definiert. Zur Definition der kinematischen Zusammenhänge (Hübe) werden die Kraft-Zeit-Kurven (stamping force curve) und die Geschwindigkeit-Zeit-Kurven (stamping velocity curve) eingefügt. Unter „blank“ (Platine) werden die „global parameters“ (globalen Parameter) „thickness“ (Blechdicke), „rolling direction“ (Umformrichtung) und „material“ (Versuchsmaterial) eingegeben.

Die Definition der „friction“ (Reibung) zwischen Werkzeug und Werkstück, den Zeitverläufen, des verwendeten Koordinatensystems (global system) sowie der Grad der adaptiven Verfeinerung (uniform refinement level, maximal refinement level) erfolgt im Feld „common“.

Die Simulation eines einzelnen Hubes ist mit den bisher durchgeführten Einstellungen unproblematisch. Bei der Simulation mehrerer Schläge mit definiertem Abstand ergeben sich allerdings zahlreiche Probleme, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

### 5.3 Winkelfehler bei Mehrfachumformungen

Wird eine Umformoperation ausgeführt, resultiert dies in einer Krümmungsänderung des Blechwinkels an beiden Seiten des Stempels (siehe Abbildung 5.5). Ein Vorschub entlang einer Achse ist nun nicht mehr sinnvoll.

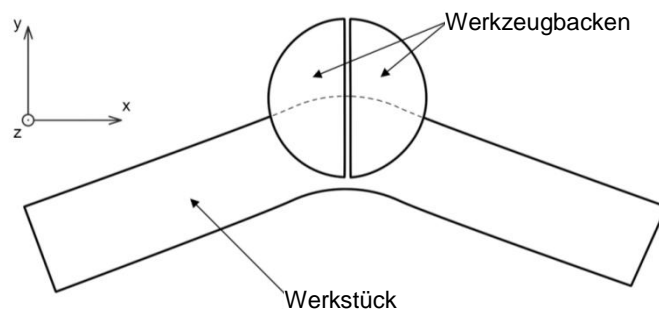


Abbildung 5.5: Positionierung Werkzeug - Werkstück nach einer Umformung

Ein Vorschub in x-Richtung schiebt nun das gekrümmte Blech aus dem optimalen Umformbereich des Kraftformers. Die Überdeckungsfläche zwischen Werkzeug und Werkstück verringert sich und führt dazu, dass sich die Umformwirkung des zweiten Schlages erheblich von der des ersten unterscheidet. Bei mehreren Umformoperationen wird sich dieser Fehler aufsummieren und die Überdeckung zwischen dem Werkstück und der Stempelfläche verringert sich stetig. (siehe Abbildung 5.6).



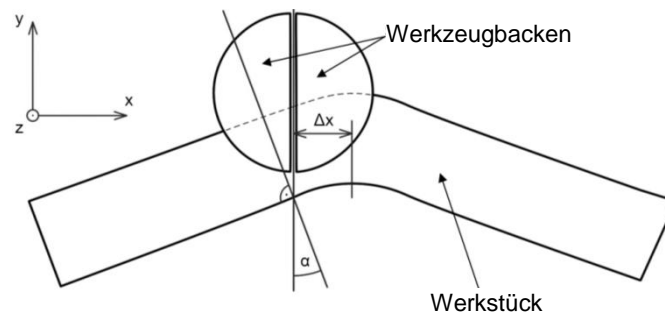


Abbildung 5.6: Positionierung nach dem Vorschub in x-Richtung

Die Einführung einer Vorschubkomponente in y-Richtung steuert dieser Problematik entgegen. Die Verringerung der Stempelfläche mit zunehmendem Vorschub wird damit vermindert. Allerdings verdreht sich der Blechwinkels im Vergleich zu den feststehenden Werkzeugen.

Dadurch verkleinert sich die Stempelfläche ebenso, wenn auch geringer als beim reinen x-Vorschub. Die Veränderung der Streck- beziehungsweise Stauchrichtung durch die entstehende Verdrehung spielt eine weitaus größere Rolle. Die Wirkungsrichtung der Werkzeuge ist um einen Winkel  $\alpha$  verdreht und daher nicht mehr parallel zur Blechlängsrichtung (Abbildung 5.7).

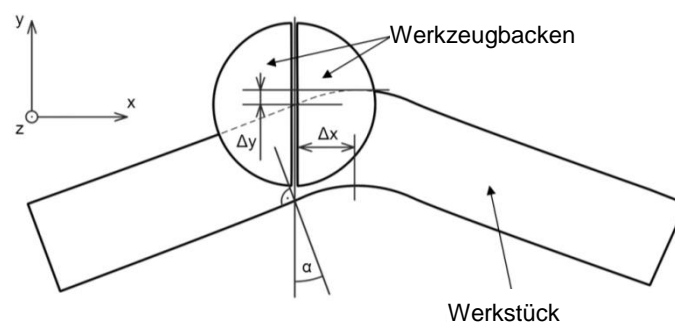


Abbildung 5.7: Herausdrehen des Bleches aus der Stempelfläche

Die Fixierung eines Schenkels ist dabei nicht zielführend, da kein Freiheitsgrad des Blechwinkels während des Schlages eingeschränkt werden darf. Wird die Bewegung der Blechwinkelenden in irgendeiner Weise behindert, so kommt es zu ungewollten Faltenbildungen auf der horizontalen Schenkelfläche (Abbildung 5.8).

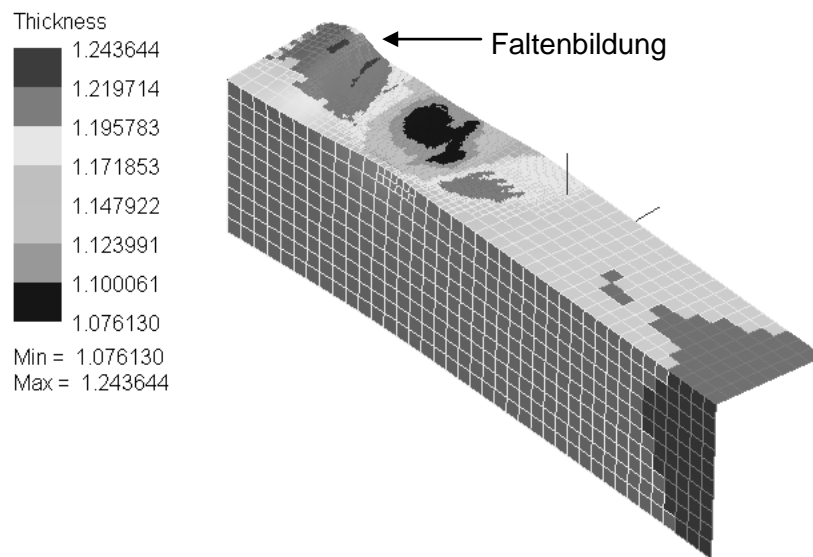


Abbildung 5.8: Faltenbildung nach Fixierung des Schenkels (vier Hübe, Abstand 5mm)

Um das Herausdrehen und den dadurch entstehenden Winkelfehler zu beheben, muss der Blechwinkel nach jeder Hubbewegung um den Winkel  $\alpha$  (Abbildung 5.7) in die Ausgangslage zurückgedreht werden. Die Werkzeugüberdeckung entspricht beim folgenden Schlag dann wieder dem ursprünglichen Wert.

Um die Freiheitsgrade des Blechs während der Umformung nicht einzuschränken, werden alle permanenten Fixierungen nicht weiter betrachtet. Es werden daher weitere Guides eingeführt, die den Blechwinkel nach der Umformung in die richtige Position schieben. Einer der Guides bildet einen festen Anschlag und der andere führt die Korrekturbewegung aus. Der feststehende Guide muss dabei so positioniert werden, dass sich der Blechwinkel beim Umformvorgang aufgrund der Krümmungsänderung vom ihm wegbewegt. Er muss dem Blech beim Zurückdrehen einen festen Anschlag bieten, damit dies immer bis zur exakten (parallelen) Ausgangsposition zurück verschoben wird. Der sich bewegende Guide schiebt den verdrehten Blechwinkel zwischen zwei Hüben durch eine Bewegung in y-Richtung zurück. Der bewegte Guide schiebt das Werkstück zurück in die parallele Ausgangslage, führt eine Bewegung in negativer y-Richtung aus und begibt sich wieder in seine ursprüngliche Position. Dadurch kann sich der Blechwinkel beim folgenden Hub wieder frei verformen. Um das Werkstück im richtigen Abstand zum Werkzeug zu halten, wird ein zusätzlicher runder Stabguide eingeführt. Seine zylindrische Form führt lediglich zu einer Linienberührung mit dem Werkstück, die keinen Einfluss auf die Umformung hat. Das Prinzip und die geometrische Anordnung verdeutlichen die nachfolgenden Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10.

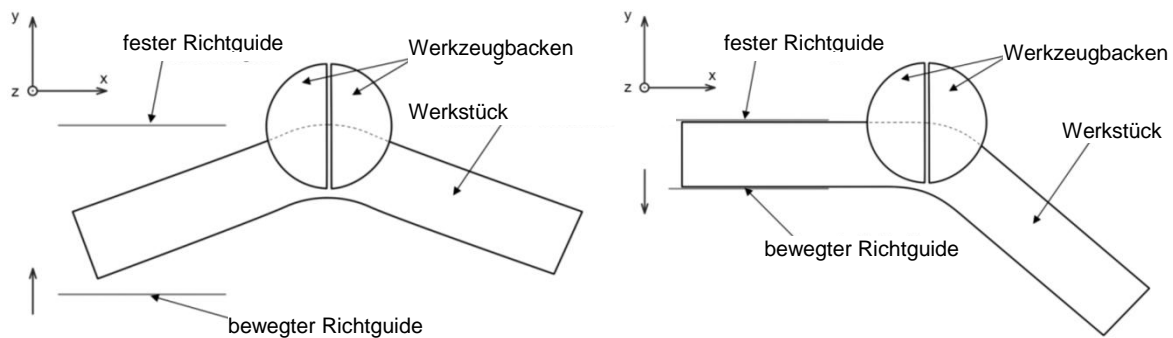


Abbildung 5.9: Prinzip des Geraderichtens durch zwei Guides

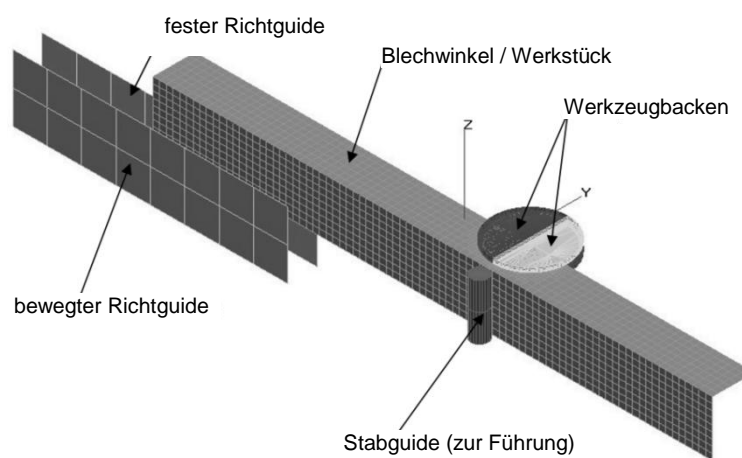


Abbildung 5.10: FEM-Modell, Geraderichten durch zwei Guides

Zur Überprüfung werden vier Hübe mit der bisher implementierten Druckrandbedingung (Attribut *pressure*) als Vorschub gewählt, da nur bei einem Mehrfachhub das Geraderichten beobachten werden kann.

Zum Modell werden dazu die beiden Richtguides hinzugefügt, als Starrkörper definiert (Attribut *rigid body*) und ihr Kontakt mit dem Blechwinkel als reibungsfrei festgelegt (Attribut *contact*). Dadurch werden durch die Guides keine ungewollten Verformungen induziert. Zudem wird der feststehende Guide in allen Freiheitsgraden gesperrt und der bewegte Guide mit einer entsprechenden Verschiebungsrandbedingung (*imposed displacement*) in *y*-Richtung des Attributs *cartesian kinematic* beaufschlagt.

Abbildung 5.11 zeigt das Ergebnis der Simulation. Die blauen Umformzonen stehen senkrecht zum Blechwinkel, eine Verdrehung ist nicht erkennbar. Der Abstand zwischen Blechwinkelkante und den Umformbacken ist konstant und nimmt nicht mit zunehmender Hubzahl zu.

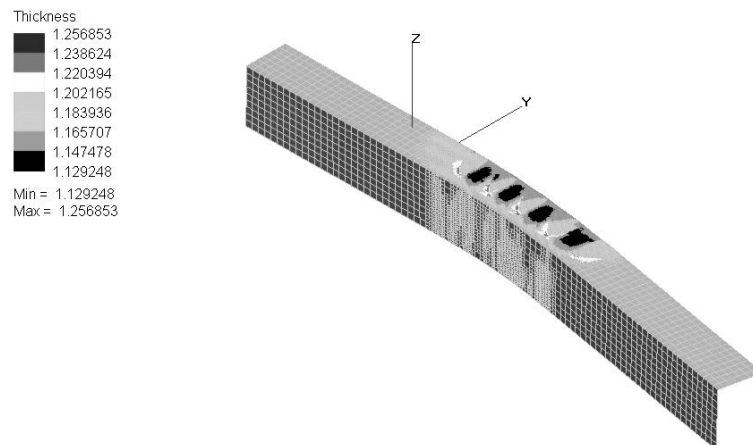


Abbildung 5.11: Simulationsergebnis, Geraderichten nach 4 Hieben

In Abbildung 5.12 wird der beim Herausdrehen entstehende Winkelfehler des Blechwinkels zur den Werkzeugbacken mit und ohne Richtguides dargestellt. Ohne Richtguides beträgt dieser nach dem vierten Hub 8,34°. Durch das Geraderichten nach jedem Schlag kann dieser Fehler vollständig behoben werden und der Winkel zwischen der Mittelachse des Werkzeugs und der Kante des Blechwinkels beträgt nach vier Schlägen noch immer 90°.

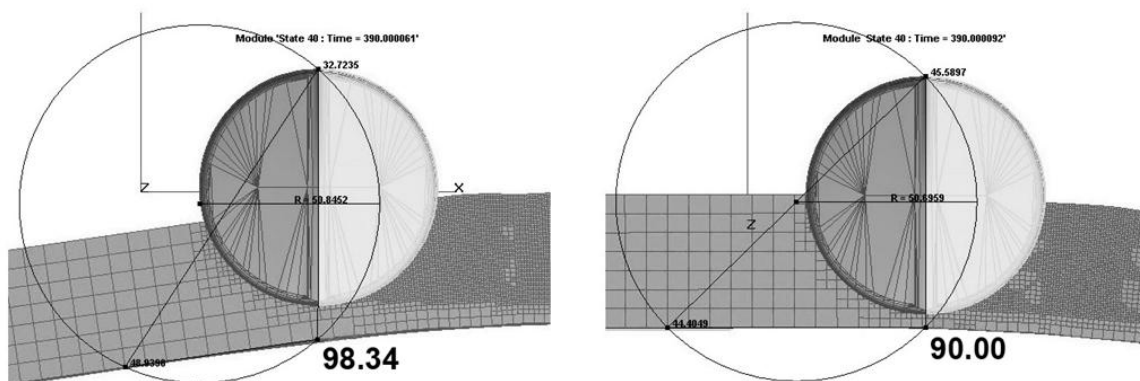


Abbildung 5.12: Winkelfehler ohne (links) und mit Richtguides (rechts)

## 5.4 Ansätze zur Modellierung der Vorschubbewegung

Durch die Einführung zweier Richtguides kann der Winkelfehler zwischen den Schlägen auf ein Minimum reduziert werden, die Vorschubproblematik bleibt allerdings weiterhin bestehen. Zur Lösung werden mehrere Alternativen untersucht und in Optimierungsschleifen stetig verbessert. Die wichtigsten fünf Optimierungsschritte werden in den Kapiteln 5.4.1 bis 5.4.5 näher erläutert.

- Vorschub durch Geschwindigkeitsrandbedingung
- Vorschub durch Richtguides
- Vorschub durch Richtguides mit horizontalen Führungsguides
- Vorschub durch Richtguides mit horizontalen Führungsguides mittels Kraftsteuerung
- Vorschub durch zusätzliche vertikale Vorschubguides

### 5.4.1 Vorschub durch Geschwindigkeitsrandbedingung

Zur Implementierung einer Geschwindigkeitsrandbedingung wurden die Randknoten des Blechwinkels als separates Element definiert und ihnen im Attribut *cartesian kinematic* eine Geschwindigkeit (*imposed velocity*) für die Vorschubrichtung in x-Richtung zugewiesen (Abbildung 5.13 (links)). Nach jedem Schlag des Werkzeuges erhalten die äußersten Blechknoten für eine bestimmte Zeit eine bestimmte Geschwindigkeit in x-Richtung. Der Geschwindigkeitsverlauf wird mit einer Dreiecksfunktion beschrieben, was eine vergleichsweise einfache Berechnung der resultierenden Verschiebung durch Multiplikation des Geschwindigkeitsbetrages mit dessen halber Dauer ermöglicht. Die Richtguides bleiben während der Vorschubbewegung am Blechwinkel angelegt, um diesem eine Führung zu bieten. Abbildung 5.13 (links) verdeutlicht die Versuchsanordnung mit dem Blechwinkel, dem Werkzeug, dem Stabguide, der ein Herausschieben des Blechwinkels in y-Richtung verhindert, den Richtguides und den Knoten (rot markiert), die mit der Geschwindigkeitsrandbedingung beaufschlagt sind.

Abbildung 5.13 (rechts) zeigt das Simulationsergebnis. Die Geschwindigkeitsrandbedingung führt auf Grund von Gegenkräften zu ungewünschten Verformungen des vertikalen Schenkels sowie zu Faltenbildungen am horizontalen Schenkel. Diese entstehen durch die Reibverhältnisse zwischen den Werkzeugbacken und dem Werkstück sowie am zur Führung benötigten Stabguide (Abbildung 5.13 (orange)).

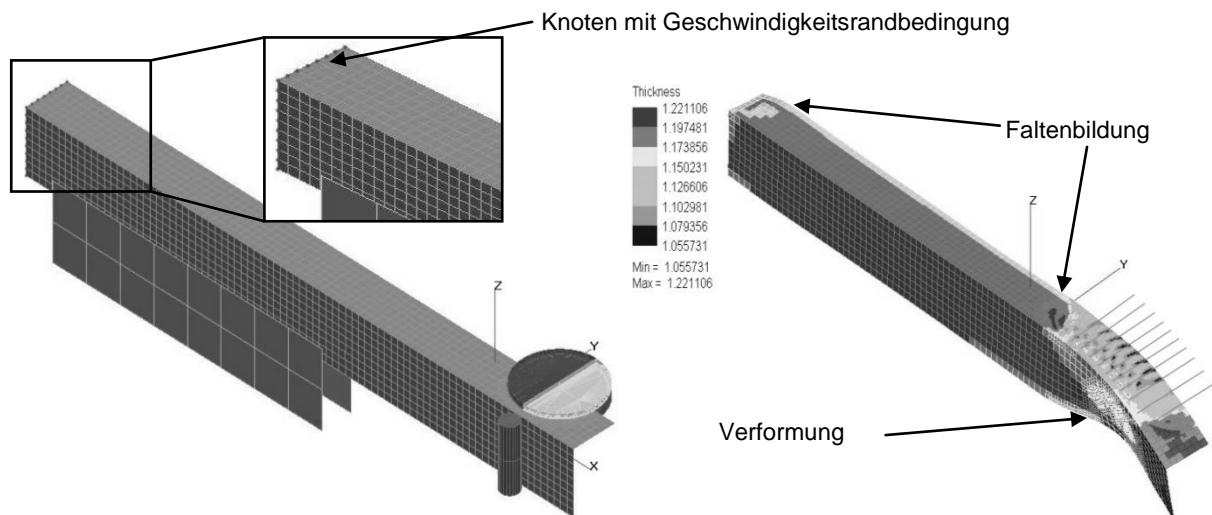


Abbildung 5.13.: Vorschub mit Geschwindigkeitsrandbedingung

#### 5.4.2 Vorschub durch Richtguides

Die in Kapitel 5.4.1 entstehenden ungewollten Verformungen sollen durch die Verwendung von Richtguides behoben werden. Diese Guides sollen sich am Ende eines Hubes schließen, das Blech klemmen und es um einen Betrag in x-Richtung schieben.

Sowohl die Richtbewegung der Guides als auch ihre Vorschubbewegung werden als „imposed displacement“ im Attribut „cartesian kinematic“ definiert. Eine Geschwindigkeits- in einer Richtung und eine Verschiebungsrandbedingung in einer anderen Richtung lässt PamStamp 2G nicht zu. Die Vorschubbewegung wird als Treppenfunktion implementiert und der Weg des Blechwinkels nimmt absolut gesehen bei jeder Vorschubbewegung um die Vorschubstrecke  $\Delta x$  zu. Die exakte Abstimmung und Parametrierung der Richt- und Vorschubbewegung mit der Umformkraftkurve bildet hierbei die größte Herausforderung. Abbildung 5.14 zeigt die aus PamStamp exportierten Kurven für die ersten beiden Hübe.

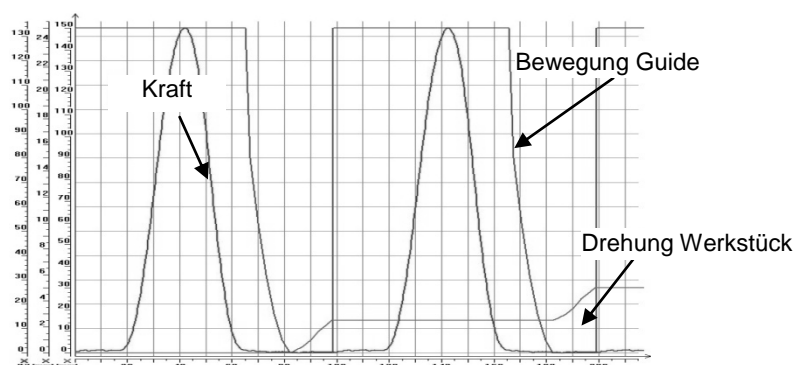


Abbildung 5.14: Umformkraft-, Verschiebungs- und Vorschubkurve

Das *contact* Attribut der Richtguides wird zur Übertragung einer Reibkraft auf den Blechwinkel auf 0,8 (Reibpaarung Stahl-Gummi) geändert. Dadurch wird die Vorschubbewegung der Richtguides über eine Reibkraft auf den Blechwinkel übertragen. Der reine Kontakt der Richtguides reicht allerdings nicht aus und durch die fehlende Normalkraft entsteht keine ausreichend große Reibkraft. Die Folge ist eine Relativbewegung zwischen dem Bauteil und den Guides. Dies führt zwar zu einem Vorschub, welcher allerdings nicht dem eingestellten Vorschubweg entspricht.

Alle im Kapitel 5.4.1 auftretenden Faltenbildungen und ungewünschten Verformungen werden vermieden. Allerdings zeigt Abbildung 5.15 eine leichte Abnahme des Vorschubwegs mit zunehmender Schlagzahl. Erkennbar ist dies am geringer werdenden Abstand der Umformzonen, welche durch die grauen Linien verdeutlicht werden. Allerdings verdreht sich der Blechwinkel um die y-Achse, wodurch er sich während der Vorschubbewegung im Werkzeug geringfügig verkantet, was zur Erhöhung der Gegenkraft und damit zu der auftretenden zunehmenden Reduktion des Vorschubweges führt.

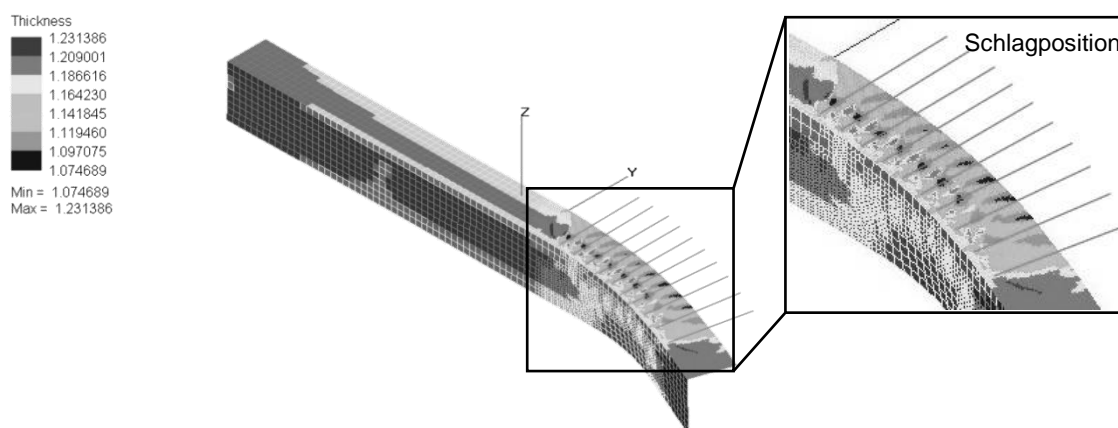


Abbildung 5.15: Vorschub durch Richtguides

### 5.4.3 Vorschub durch Richtguides mit horizontalen Führungsguides

Die in Kapitel 5.4.2 verwendete Vorschubvariante verbesserte das Simulationsergebnis hinsichtlich der entstehenden Bauteilverformungen, allerdings tritt eine zusätzliche Verdrehung des Bleches um die y-Achse auf. Dies führt zu einem Verkanten des Bleches im Werkzeug. Um dem entgegenzuwirken werden zwei flache Guides zur horizontalen Führung verwendet (Abbildung 5.16 (links)) und ein gerader Einlauf in das Werkzeug ist sichergestellt.

Je ein Guide wird über- und unterhalb des horizontalen Schenkels des Blechwinkels angebracht, ihr Reibkoeffizient wird auf 0 gesetzt und ihre Freiheitsgrade des Attributs

„*cartesian kinematic*“ in allen Richtungen gesperrt. Sie dienen als reine ortsfeste Führung und dürfen die Umformung sowie den Vorschub nicht beeinflussen.

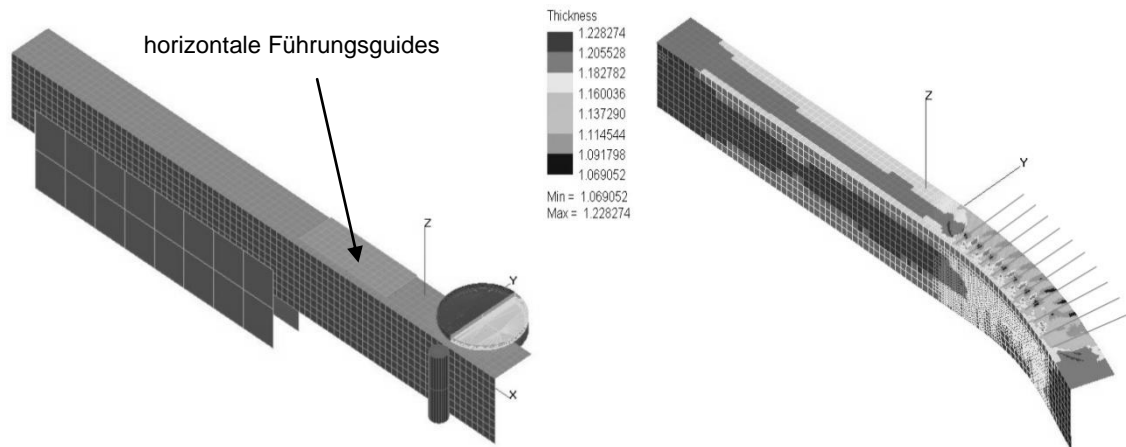


Abbildung 5.16: Führungsguides und Vorschub durch Richtguides

Das Ergebnis in Abbildung 5.16 (rechts) zeigt im Vergleich zu Abbildung 5.15 eine geringfügige Verbesserung. Auch bei höheren Hubzahlen bleibt der Vorschubweg konstant und ein Verkanten sowie die damit verbundene erhöhte Vorschubkraft werden vermieden.

Ein leichtes Durchrutschen der Vorschubguides, das zwar zu einem relativ konstanten aber undefinierten Vorschubweg führt, bleibt bestehen. Weder eine Veränderung der Richtbewegung von der Verschiebungs- zu einer Geschwindigkeitsrandbedingung (*imposed velocity*), noch eine zusätzlich eingeführte Kraft (Attribut *Force*) in y-Richtung beim bewegten Richtguide führen zu einer Verbesserung.

#### 5.4.4 Vorschub durch horizontale Führungsguides mittels Kraftsteuerung

Das in Kapitel 5.4.3 entdeckte Durchrutschen der Vorschubguides entsteht durch die Verschiebungsrandbedingung (*imposed displacement*) im Attribut „*cartesian kinematic*“ der Richtguides, die sich zwar nach jedem Schlag wieder vollständig an das Blech anlegen, jedoch nur eine sehr geringe Klemmkraft erzeugen. Diese Klemmkraft ist notwendig, um die zum Transport benötigte Reibkraft zwischen Blech und Guides aufzubauen.

Eine über das Attribut „*force*“ in y-Richtung hinzugefügte Kraft von den Guides auf das Blech erzielt keine Wirkung, da die Richtguides in y-Richtung exakt dem durch ihre Verschiebungskurve festgelegten Verlauf folgen. Eine geringe weitere Verschiebung in y-Richtung, die eine Normalkraft zur Klemmung des Bleches erzeugen sollte, ist wirkungslos.

Daher wird eine weitere Alternative getestet, die den Vorschub durch die in Kapitel 5.4.3 eingeführten horizontalen Führungsguides (Abbildung 5.16) umsetzt. Die Aufgabe der



vertikalen Richtguides ist dann lediglich die Positionierung des Werkstücks nach jeder Umformoperation. Diese Führungsguides sind in allen Freiheitsgraden gesperrt und haben keine Verschiebungsrandbedingung. Ein Kraftverlauf in z-Richtung kann hinzugefügt werden und soll sowohl das Verkanten des Blechwinkels verhindern, als auch die während der Vorschubphase notwendige Normalkraft aufbringen, um das Werkstück ohne Durchrutschen um den Vorschubweg in x-Richtung zu verschieben. Hierfür ist jedoch die Freigabe des z-Freiheitsgrades beim oberen Richtguide notwendig, der untere Guide bleibt zur Aufnahme der erzeugten Klemmkraft weiterhin in z-Richtung gesperrt.

Den beiden horizontalen Führungsguides wird in x-Richtung eine Vorschubkurve als Geschwindigkeitsrandbedingung hinzugefügt, die sie nach der Vorschubbewegung auch wieder zurück in ihre Ausgangsposition bringt.

Der Reibwert beim Kontakt der Guides mit dem Blechwinkel wird im Attribut *contact* auf 0,8 gesetzt. Wichtig dabei ist, dass die freie Bewegung des Blechwinkels während der Umformung durch den hohen Reibwert nicht eingeschränkt oder behindert wird.

Dazu wird in der Kraftkurve des oberen Führungsguides ein kurzer Kraftimpuls in z-Richtung eingesetzt, um einen ausreichenden Abstand zwischen Guide und Blech sicherzustellen und eine Berührungen während der Rückföhrbewegung zu verhindern (Abbildung 5.17).

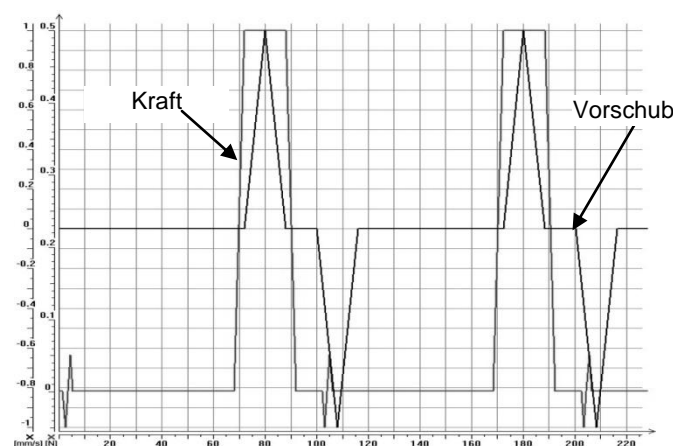


Abbildung 5.17: Kraftkurve und Vorschubkurve des oberen Führungsguides

Durch die vollständige Freigabe des Freiheitsgrades in z-Richtung und dem benötigten großen Abstand zum Blech, trifft der obere Führungsguide beim Einsetzen der Klemmkraft aus vergleichsweise großer Entfernung auf das Blech auf und verformt es.

Um dem entgegenzuwirken wird ein zusätzlicher Guide eingeföhrt, der die Bewegungen während der Umformung aufnimmt. Der mit der Kraftsteuerung geföhrte Vorschubguide dient

nun ausschließlich dem Zweck des Vorschubes. Da der Vorschub aber nun konstant ist, wird er von 20 mm auf den realistischeren Wert 10 mm reduziert.

Das Simulationsergebnis verbessert sich erheblich (Abbildung 5.18). Die Vorschubwege entsprechen nun den exakten Vorgaben. Es kommt lediglich noch zu leichten Blechverformungen durch die kraftgesteuerten Vorschubguides.

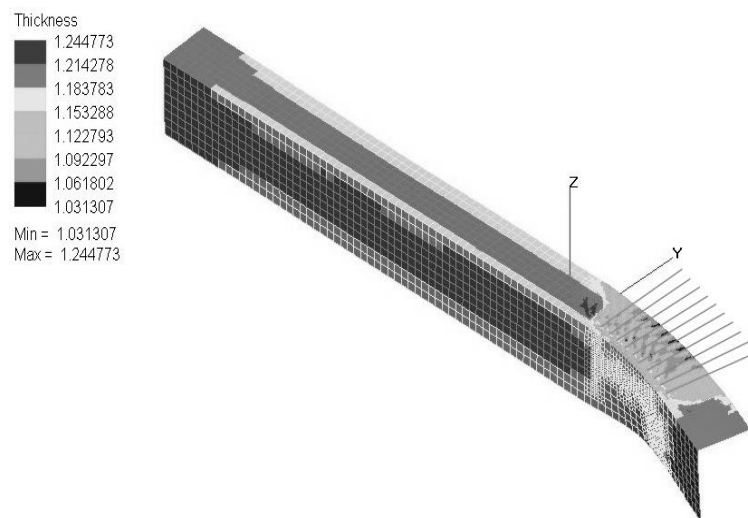


Abbildung 5.18: Vorschub des Führungsguides über Kraftsteuerung

#### 5.4.5 Vorschub durch zusätzliche vertikale Vorschubguides

Das deutlich verbesserte aber noch nicht optimale Ergebnis aus Kapitel 5.4.4 führt schließlich zur nächsten Lösungsalternative, der Aufteilung der Richtguides. Von den vier vertikalen Guides sind nun zwei Guides für den Richtvorgang (Abbildung 5.19 Richtguides) und zwei für den Vorschub zuständig (Abbildung 5.19 Vorschubguides). Diese Aufteilung ermöglicht es, die komplexe Aufgabe des Richtens mittels Kraftsteuerung auf zwei getrennte Komponenten aufzuteilen.

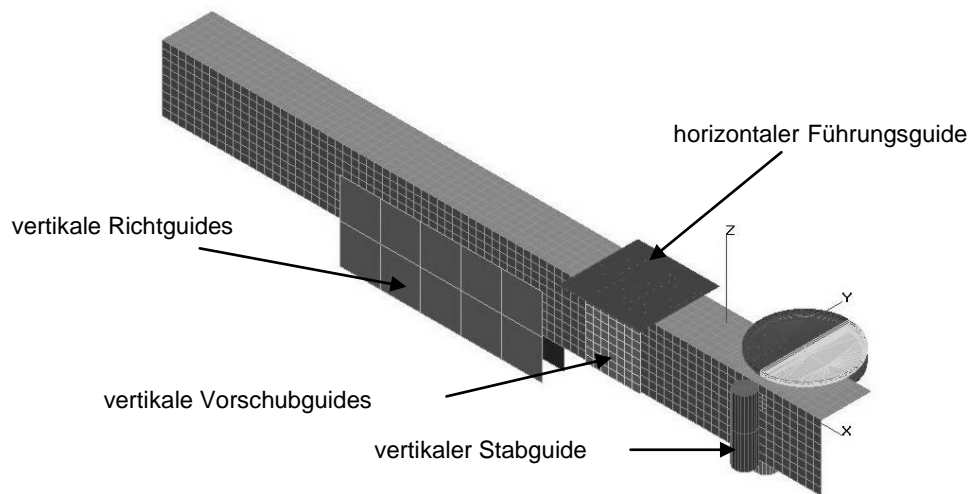


Abbildung 5.19: Vorschub durch zusätzliche vertikale Vorschubguides

In y-Richtung kann die Richtbewegung vergleichsweise einfach durch eine Wegrandbedingung als *imposed displacement* im Attribut *cartesian kinematic* ausgeführt werden. Die Kontaktbedingung der Richtguides mit dem Werkstück im Attribut *contact* kann nun wieder als reibungsfrei mit Reibkoeffizient 0 eingestellt werden, da durch sie nun kein Vorschub mehr geleistet werden muss.

Ungewünschte Einflüsse durch den höheren Reibwertes beim Richtvorgang werden vermieden. Die Vorschubguides erhalten wieder die Kraftsteuerung in y-Richtung, wobei einer der beiden Guides in y-Richtung gesperrt werden muss, um dem Winkel beim Zurückdrehen einen festen Anschlag zu geben.

Die Kraftkurve für den zweiten Vorschubguide (Abbildung 5.20) bewirkt nun, dass der Guide kurz vor der Umformung einen leichten Impuls in negativer y-Richtung bekommt. Während der Umformung wird eine Berührung mit dem Blechwinkel vermieden. Eine geringe zusätzliche konstante Dauerkraft in positiver y-Richtung verhindert ein Wegbewegen des Guides, da dieser während der Umformung leichten Impulsen des Werkstücks ausgesetzt ist.

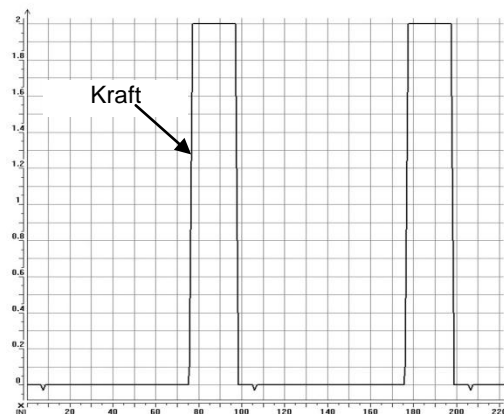


Abbildung 5.20: Kraftkurve des Vorschubguides

Nach dem Richtvorgang setzt die hohe Kraft in y-Richtung ein. Sie klemmt den Blechwinkel zwischen den beiden Vorschubguides ein, bringt die Normalkraft auf und ermöglicht dadurch die Übertragung der Vorschubbewegung. Sobald diese hohe Klemmkraft einsetzt, ist der Richtvorgang durch die Richtguides bereits abgeschlossen und der Blechwinkel liegt schon am unbewegten Vorschubguide an. Durch den hohen Kraftimpuls werden eine Beschleunigung des Werkstückes und die daraus resultierenden ungewollten Verformungen vermieden. Neben der Normalkraft ist noch ein entsprechender Reibkoeffizient zwischen Vorschubguides und Blechwinkel nötig, der mit 0,8 eingestellt wird (Kapitel 5.4.4).

Es besteht nun die Möglichkeit, die Vorschubbewegung durch eine Weg- (*imposed displacement*; Abbildung 5.21 links), oder Geschwindigkeitsrandbedingung (*imposed velocity*; Abbildung 5.21 rechts) für die beiden Vorschubguides in x-Richtung im Attribut *cartesian kinematic* umgesetzt werden. Beide Randbedingungen führen dabei zum gleichen Vorschubweg.

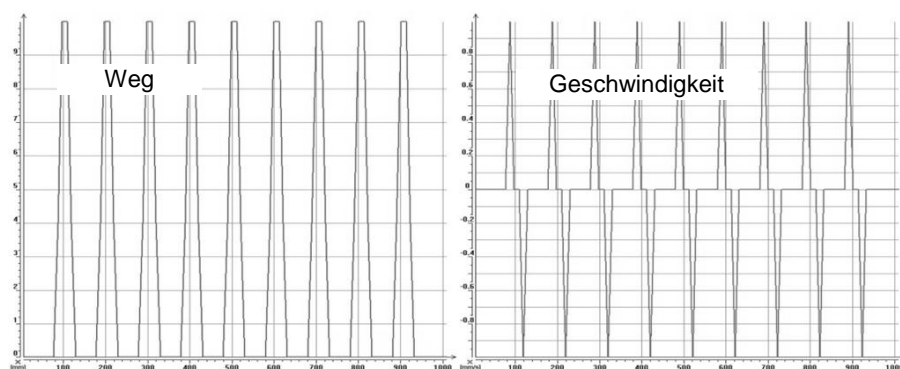


Abbildung 5.21: Weg- (l.) und Geschw.-kurve (r.) für die Vorschubbewegung

Die Aufteilung der Richtguides liefert ein hervorragendes Resultat für Umformung und Vorschub (Abbildung 5.22). Das Durchrutschen der Vorschubguides wird durch die Kraftsteuerung vollständig gelöst. Der Vorschubweg ist nun absolut konstant und jegliche ungewünschten Verformungen werden vermieden.

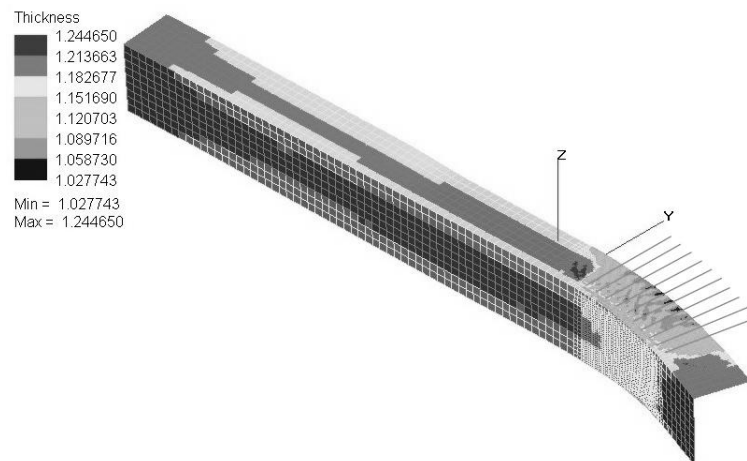


Abbildung 5.22: Vorschub durch zusätzliche vertikale Vorschubguides

Zur Beschleunigung der Simulation wird auf den horizontalen Führungsguide verzichtet. Der Einfluss der wieder auftretenden Verdrehung des Bleches um die y-Achse und das damit verbundene Verkannten des Blechs zwischen den Werkzeugen kann durch die nun höheren Reibkräfte zwischen Vorschubguides und Blechwinkel kompensiert werden.

Weiterhin wird auf den Stabguide verzichtet (Abbildung 5.19), da die Führung des vertikalen Schenkels vollständig von den vertikalen Vorschubguides übernommen wird.

Abbildung 5.23 zeigt im vertikalen Teil des Blechwinkels eine erhebliche Verbesserung des Simulationsergebnisses. In diesem Bereich werden alle unnötigen Netzverfeinerungen vermieden und damit die Rechenzeit reduziert.

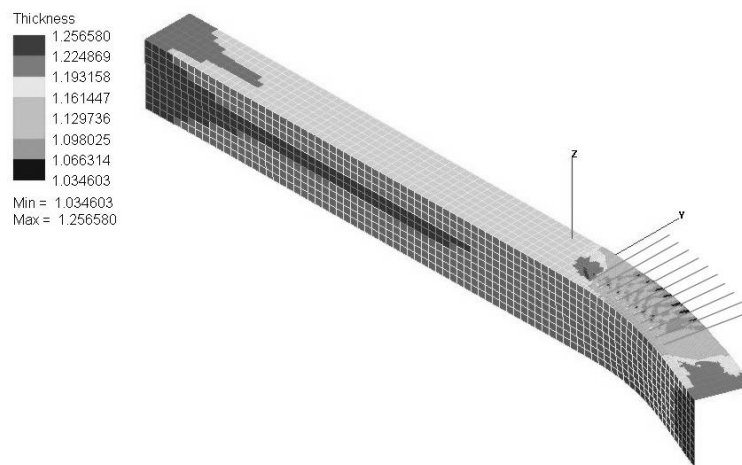


Abbildung 5.23: Ohne Führungs- und Stabguides

## 5.5 Geradbiegen des Winkels

Mit zunehmender Schlaganzahl zeigen die Simulationsergebnisse, dass sich die simulierten Blechwinkel im Gegensatz zur Realität stark nach unten verbiegen. Die Ursache hierfür ist an der Führung des Winkels in der Simulation festzumachen. In der realen Fertigung wird das Werkstück mit einem Zwei-Backen-Greifer geklemmt, für die Auflagen in den Backen wurde ein Elastomer verwendet. Dies dient zur gefederten bzw. gedämpften Aufnahme des Blechs. Bei jedem Schlag werden die Bewegungen des Blechwinkels abgedämpft und er wird stets in die Ausgangslage zurückgedrückt. Der gefederte Elastomergreifer ist in PamStamp 2G nicht umsetzbar.

Im Simulationsmodell wird der Winkel durch Guides geführt und durch sie am nicht verformten Ende in fünf Freiheitsgraden gesperret. Die Richtung der x-Achse bleibt offen und ermöglicht den Vorschub des Winkels zwischen den einzelnen Schlägen. Die feste Einspannung durch die Guides lassen keine Verdrehung bzw. ungewollte Verformung des Winkels am nicht verformten Ende zu und führen zu Spannungen im Bauteil. Nach jedem ausgeführten Schlag resultieren diese dann in einer leichten Verbiegung des Bauteils in Z-Richtung. Bei einer Erhöhung der Schlaganzahl summiert sich dieser Effekt auf und führt zu einer ungewünschten Verformung in Z-Richtung (Abbildung 5.24 links).

Zur Kompensation wird der Winkel durch einen Biegeguide in Z-Richtung gerade gebogen (Abbildung 5.24).

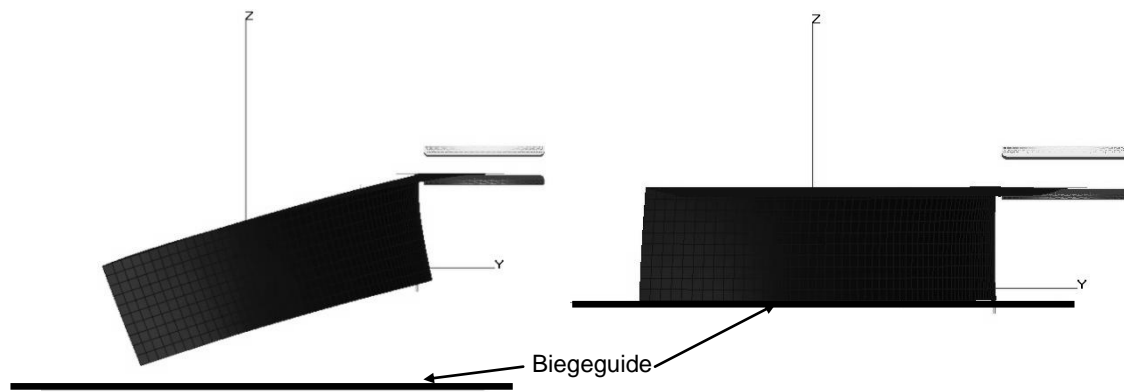


Abbildung 5.24: Prozess des Geradebiegens

Das Ergebnis des Geradebiegens zeigt Abbildung 5.25 anhand eines Winkels mit 40 simulierten Schlägen. Durch das Geradebiegen wird das Bauteil lediglich in der horizontalen Lage ausgerichtet. Eine Verformung des horizontalen Schenkels und eine damit verbundene Veränderung des erzeugten Radius entsteht nicht.

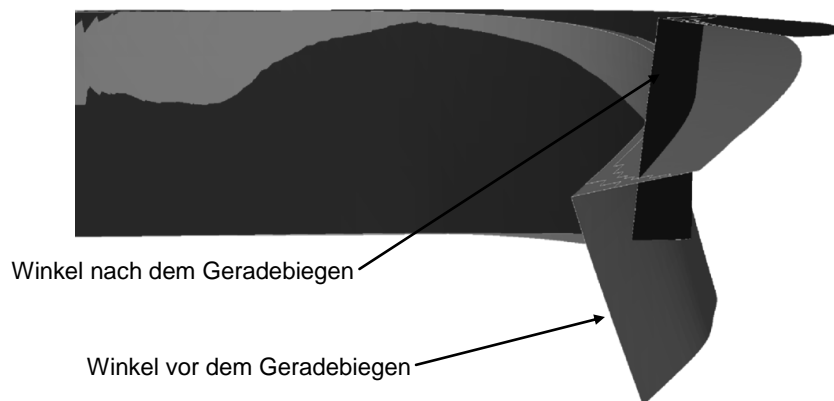


Abbildung 5.25: Geradebiegen des Winkels nach 40 simulierten Schlägen

## 5.6 Letzte Entwicklungsstufe des Simulationsmodells

Aus den Erkenntnissen der Kapitel 5.1 bis 5.5 kann nun das abschließende Simulationsmodell erstellt werden. Zusammenfassend werden die einzelnen Objekte erneut beschrieben (Abbildung 5.26).

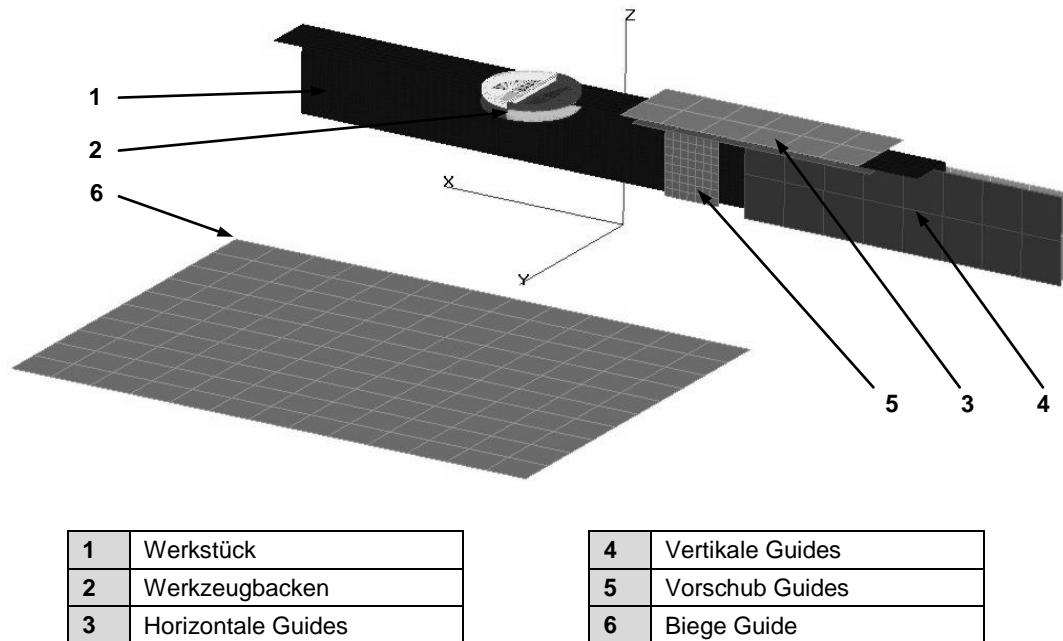


Abbildung 5.26: Letzte Entwicklungsstufe des Simulationsmodells

Das Modell besteht aus den drei Hauptkomponenten Werkstück, Werkzeug und Guides.

Das Werkstück (1) wurde über eine STL-Datei aus Catia exportiert (Abbildung 7.3), in PamStamp 2G vernetzt, die Materialeigenschaften zugewiesen und lediglich über die Oberfläche definiert (Kapitel 5.2.4.).

Das Umformwerkzeug wird über vier identische Werkzeugbacken (2) modelliert und die beiden Verfahren Strecken und Stauchen verwendet. Die Werkzeugbacken (2) werden über eine Geschwindigkeitskurve (*imposed velocity*, x-Richtung) und eine Kraftkurve (*imposed force*, y-Richtung) gesteuert (Kapitel 5.2.5). Zur Umformung klemmen die Werkzeuge das Blech und bewegen sich dann in x-Richtung je nach Verfahren, beim Strecken voneinander weg oder beim Stauchen auf einander zu (Abbildung 5.3). Diese Bewegung wird von einer Klemmkraft in y-Richtung überlagert und es kommt zur gewünschten Umformung.

Die Guides (3, 4, 5) halten und führen das Werkstück. Der horizontale Guide (3), oben und unten am Werkstück (1) angebracht, verhindert ein Abheben des Winkels in z-Richtung. Die vertikalen Guides (4), am Schenkel des Winkels, ermöglichen eine gezielte Verdrehung des Winkels bei einem Schlag um die z-Achse. Nach jeder Umformoperation schieben die



Guides den Winkel in seine Ausgangslage zurück. Ein Guide auf der anderen Seite des Werkstücks dient als fester Anschlag. Je nach Verfahren wird einem der beiden vertikalen Guides (4) eine Bewegungskurve (*imposed displacement*, y-Richtung) zugeordnet, der andere wird fixiert.

Die beiden Guides (5) ermöglichen den Vorschub nach jeder Umformoperation. Diese Guides werden über eine Geschwindigkeitskurve (*imposed velocity*, x-Richtung) bewegt. Einer der Guides (5), wieder abhängig vom Verfahren Strecken oder Stauchen, bekommt zusätzlich eine Kraftkurve (*imposed force*, y-Richtung) zugewiesen. Dieser führt, wie der bewegliche vertikale Guide, eine Bewegung in y-Richtung aus um die Verdrehung des Werkstücks während des Schlages nicht zu behindern. Diese Kraft dient zusätzlich zum Klemmen des Winkels und zur Umsetzung der Vorschubbewegung.

Der Biege Guide (6) wird bei Simulationen mit einer hohen Anzahl an Umformungen benötigt und gleicht ungewollte Verformungen in z-Richtung aus. Seine Bewegung wird über eine Positionskurve (*imposed displacement*, z-Richtung) ausgeführt (Kapitel 5.5).

Der Aufbau des Simulationsmodells ist bezüglich der Komponenten für die Verfahren Strecken und Stauchen identisch. Der Unterschied liegt in den Bewegungs- bzw. Geschwindigkeitskurven der Werkzeuge und Guides.

## 5.7 Anpassung der Eingangsparameter des Simulationsmodells

### 5.7.1 Benötigte Rechenzeit

Das in Kapitel 5.6 abschließend beschriebene Simulationsmodell bildet den realen Fertigungsprozess sehr gut ab. Allerdings ist die Simulation des Gesamtprozesses mit PamStamp 2G sehr zeitaufwändig. Am Lehrstuhl utg standen Workstations mit Intel Core 2 Quad Q6600 (2,4 GHz, 4 GB RAM) zur Verfügung. Für das Verfahren Strecken benötigt PamStamp 2G bei Belegung aller Kerne bis zu 27 Stunden für eine Simulation mit 40 simulierten Schlägen und für das Verfahren Stauchen verlängert sich diese nochmal um etwa 20 % - 30 %. Tabelle 5.2 zeigt die Rechenzeiten mit unterschiedlicher Anzahl an simulierten Umformoperationen. Im Mittel ergibt sich eine Rechenzeit pro simuliertem Schlag von ca. 40 min beim Strecken und 48 min beim Stauchen (Tabelle 5.2).

Anzahl Schläge $n_s$	Rechenzeit T [h,min]	
	Strecken $T_{\text{Streck}}$	Stauchen $T_{\text{Stau}}$
1	$T_{\text{Streck,s}} \approx 40 \text{ min}$	$T_{\text{Stau,s}} \approx 48 \text{ min}$
10	6 h 41 min	7 h 43 min
20	12 h 59 min	16 h 4 min
30	19 h 52 min	24 h 28 min
40	27 h 15 min	31 h 32 min

*Tabelle 5.2: Rechenzeiten bei unterschiedlicher Anzahl simulierter Schläge*

Zur Reduktion der Rechenzeit werden in den Kapiteln 5.7.2 und 5.7.4 die verwendeten Schlagkräfte, Reibungsverhältnisse und die Bewegungskurven der Werkzeuge genauer analysiert.

Als Grundlage dient zunächst das Simulationsmodell für das Verfahren Strecken. Es werden zehn Schläge auf einer Strecke von 335 mm abgebildet.

Ziel ist eine Anpassung des Simulationsmodell, so dass Parameter einfacher variiert, die Abweichungen zwischen Simulation und Versuch minimiert und die Rechenzeiten der Modelle deutlich verringert werden können.

### 5.7.2 Analyse der Schlagkraft im Simulationsmodell

Im Simulationsmodell wird jede Umformoperation durch eine Geschwindigkeitskurve (imposed velocity) in Verbindung mit einer regulierenden Klemmkraft der Werkzeugbacken (imposed force) umgesetzt. Die Ermittlung dieser Kraftkurve ist sehr aufwendig, weshalb in allen Simulationen dieselbe Kraftkurve aus Kapitel 4.1 verwendet wird. Unterschiedliche Kräfte werden durch die gezielte Anpassung der Amplitude realisiert.

Zur Ermittlung der Größe des Einflusses des Verlaufs der Kraftkurven auf den Umformprozess werden Simulationen mit unterschiedlichen Klemmkraften gerechnet und der resultierende Endradius gemessen.

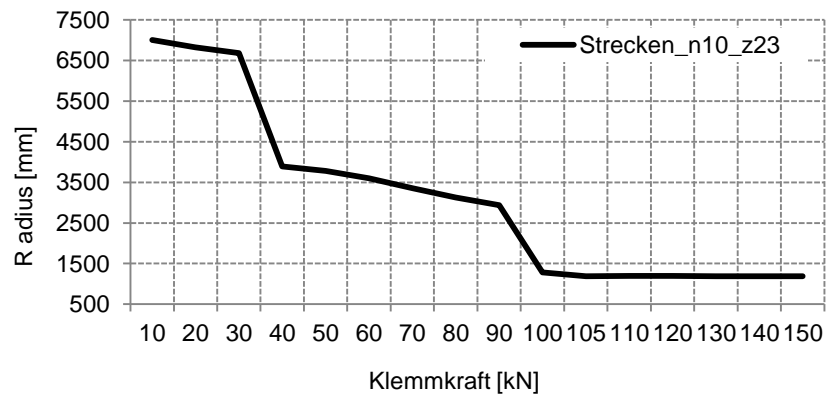


Abbildung 5.27: Einfluss der Klemmkraft auf das Umformergebnis

Für das aktuelle Simulationsmodell ist der Einfluss der Klemmkraft nur in einem Bereich unterhalb von ~105 kN erkennbar. Die Abbildung 5.27 zeigt exemplarisch den Einfluss einer Klemmkraft auf das Umformergebnis. Im Bereich zwischen 0 und ~40 kN findet zwar ein leichter Kontakt zwischen den Werkzeugen und dem Werkstück statt, die Umformung ist allerdings sehr gering. Zwischen 40 kN und 90 kN kann man bereits eine Umformung beobachten, allerdings ist die entstehende Reibung noch nicht groß genug um ein Durchrutschen der Werkzeugbacken zu verhindern. Erst ab ~105 kN Haften die Werkzeuge fest am Werkstück und eine Erhöhung der Klemmkraft hat keinen weiteren Einfluss auf das Umformergebnis. Die eingestellte Kraft muss groß genug gewählt werden, sodass die resultierende Reibkraft  $F_R$  die plastische Formänderung durchführen kann. Versuche ergeben, dass für das gewählte Simulationsmodell und die definierten Eingangsparameter mindestens eine Kraft von  $F_s = 103,82$  kN benötigt wird.

Dieser Zusammenhang und der ermittelte Kraftwert gilt allerdings nur für die verwendete Kombination aus Werkstoffkennwerten, Materialstärke, Reibkoeffizient und Klemmkraft. Bei der Erstellung eines Simulationsmodells für eine beliebige Kombination der Einflussgrößen ist nur darauf zu achten, dass die Klemmkraft über einem zu ermittelnden Minimalwert liegt.

Im realen Fertigungsprozess kann die Schlagkraft nicht direkt eingestellt werden, sie resultiert aus dem Wert der Zustellung und damit aus der Werkzeugbewegung. Bleibt in der Simulation die Bewegungskurve konstant, ändern sich nur die Reibverhältnisse zwischen den Werkzeugbacken und dem Werkstück.

### 5.7.3 Analyse der Reibungskoeffizienten zwischen Werkzeug und Werkstück

Die ersten Simulationsmodelle für die inkrementelle Umformung mit dem Eckold Kraftformer basierten auf der Annahme, dass die Anpassung der Reibverhältnisse die Realität am besten abbildet. [HOFF05], [SCHE06]

Durch die enorm aufwändigen Simulationsmodelle, die begrenzte Rechenkapazität und die dadurch sehr hohen Rechenzeiten, konnten nicht ausreichend Simulationen durchgeführt werden, um diese Annahme bereits frühzeitig zu widerlegen.

Nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.7.2 verhält sich der Reibkoeffizient  $\mu$  analog zur Klemmkraft. Der exakte Wert des Reibkoeffizienten ist nicht entscheidend. Es muss vielmehr darauf geachtet werden, dass eine definierte Untergrenze nicht unterschritten wird. Die Werkzeugbacken müssen bei der Umformoperation am Werkstück haften, ein Durchrutschen und damit ein undefinierter Kontakt muss verhindert werden.

Die Einstellung des Reibkoeffizienten  $\mu > 1$  bedeutet, dass keine Relativbewegung zwischen Blechwinkel und Werkzeugbacken stattfindet. Mehrere Simulationsergebnisse zeigen, dass ein Reibungskoeffizient von  $\mu = 1,2$  die besten Ergebnisse erzielt. Ein Wert  $\mu > 1,2$  führt zu leichten Verformungen des Blechwinkels durch die Vorschubbewegung, da die Kraftkurve der Werkzeuge nie den Wert Null annimmt.

### 5.7.4 Korrektur der Werkzeugbewegung

Die Erkenntnisse aus Kapitel 5.7.2 und 5.7.3 zeigen, dass für eine Modellierung unterschiedlicher Fertigungsparameter vor allem der absolute Weg der Werkzeugbacken  $\Delta x_s$  bestimmend für den entstehenden Radius ist. Der Einfluss der beiden Eingangsparameter Schlagkraft  $F_s$  und Reibkoeffizient  $\mu$  ist für das Simulationsergebnis nicht entscheidend.

Im Simulationsmodell ist der Weg  $\Delta x_s$  im Gegensatz zum realen Werkzeug unabhängig von der Schlagkraft. Die Kombination aus Kraft und Reibkoeffizient muss groß genug gewählt werden, sodass die resultierende Reibkraft  $F_R$  die plastische Formänderung durchführen kann. Dies erklärt den geringen Einfluss unterschiedlicher Kräfte in der Simulation.

Die Bewegung der Werkzeugbacken bestimmt maßgeblich das Simulationsergebnis und muss daher exakt in der Simulation abgebildet werden.

### Anpassung der Werkzeugbewegung

Simulationen zeigen, dass die berechnete Werkzeugbewegung (Formel 5.1., Abbildung 5.29) in PamStamp 2G auf Grund der gemessenen Geschwindigkeitskurve (Abbildung 5.28) nicht korrekt umgesetzt wird. Die Werkzeugbacken bewegen sich je nach Verfahren pro Schlag

minimal aber konstant voneinander weg oder aufeinander zu. Das Integral der gemessenen Geschwindigkeitskurve wird nach einer ausgeführten Umformoperation nicht Null. Die Position der Werkzeugbacken wird beim nächsten Schlag um den verbleibenden Betrag verschoben. Bei mehreren Schlägen summiert sich dieser Fehler auf und führt zu einer Verschiebung der Werkzeugbacken (Abbildung 5.30).

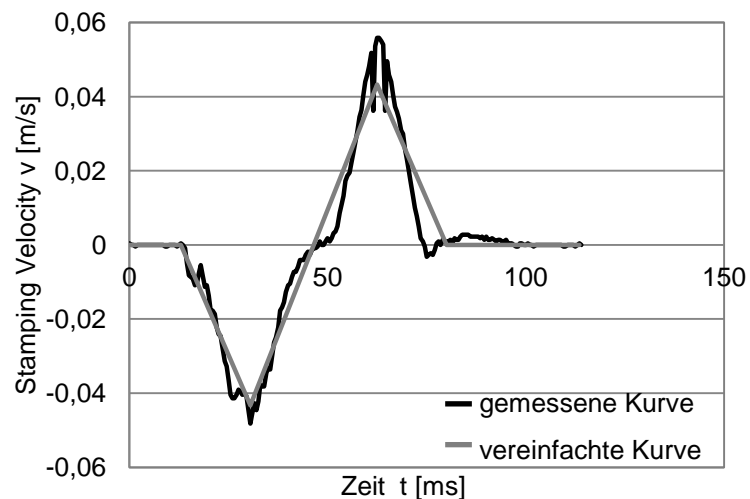


Abbildung 5.28: Geschwindigkeitskurve der Werkzeugbacken

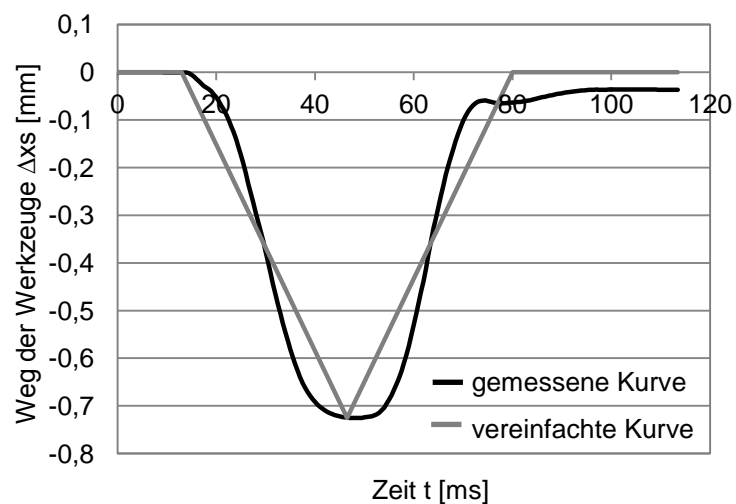


Abbildung 5.29: Bewegungskurve der Werkzeugbacken

$$\Delta x_s = \int_{t=0}^{t=100\text{ms}} v dt$$

(Formel 5.1)

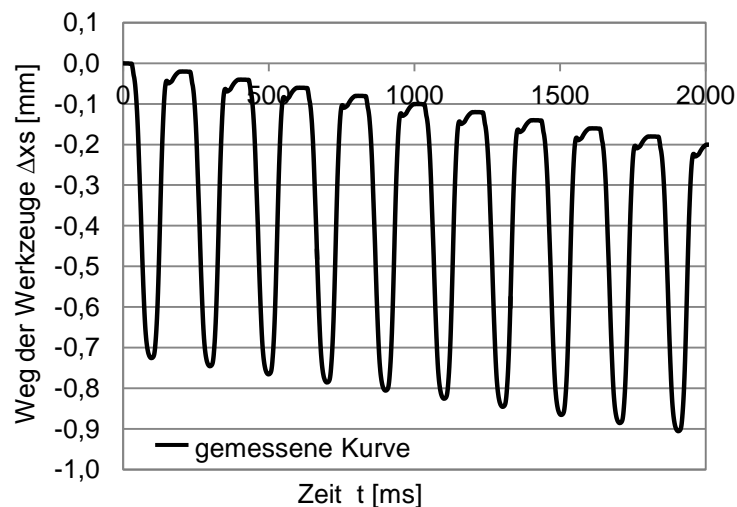


Abbildung 5.30: Verschiebung der Bewegungskurve bei mehreren Schlägen

Zur Optimierung wird der Verlauf dieser Geschwindigkeitskurve vereinfacht. Das Integral der Geschwindigkeit (Abbildung 5.28) über der Zeit ergibt den Weg der Werkzeugbacken  $\Delta x_s$ . Zur exakten Abbildung der Werkzeugbewegung wird in der Simulation eine vereinfachte Kurve verwendet (Abbildung 5.28), deren Integral den Wert Null annimmt, wodurch sich die Werkzeugbacken exakt zur Ausgangsposition zurück bewegen.

Ein weiterer großer Vorteil ist die schnelle Anpassung des Modells. Die vereinfachte Kurve kann durch die Eingabe des maximalen bzw. minimalen Werts sehr schnell verändert werden und es wird nicht mehr für jede Zustellung eine eigens aufgezeichnet Geschwindigkeitskurve benötigt.

### Messung der Werkzeugbewegung am Kraftformer

Um die exakte Bewegung der Werkzeugbacken im Simulationsmodell abzubilden, wird sie mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera neu aufgenommen. Für die Verfahren Strecken und Stauchen werden unterschiedliche Zustellungen  $z$  aufgezeichnet und ausgewertet.

Beim Vermessen der aufgenommenen Bilder wird der Abstand von zwei Lichtkanten der Werkzeugbacken untersucht. Die Differenz der Abstände bei offenem ( $x_{auf}$ ) und geschlossenem Werkzeug ( $x_{zu}$ ) ergibt den absoluten Weg der Werkzeugbacken  $\Delta x_s$  (Abbildung 5.31). Da beim Stauchen durch die Schiefstellung der Werkzeugeinsätze (Abbildung 2.8) eine ungleiche Backenbewegung vorliegt, werden die Messwerte von mehreren Schlägen gemittelt.

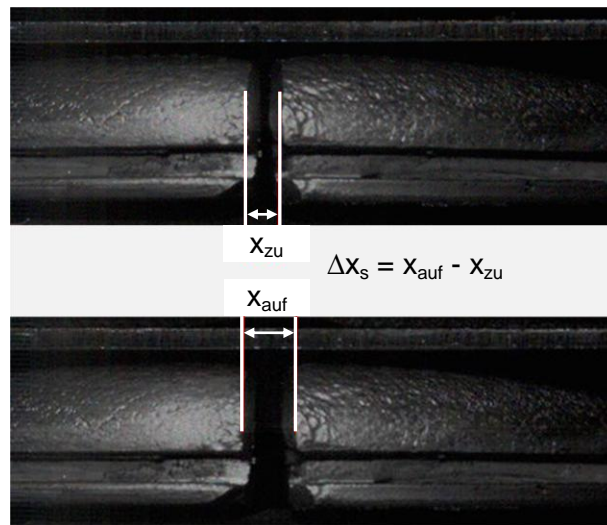


Abbildung 5.31: Messung der Werkzeugbackenbewegung  $\Delta x_s$

Die Auswertung der Messungen zeigt Tabelle 5.3.. Die Abbildung 5.32 bestätigt den in Kapitel 4.2.2 dargestellten linearen Zusammenhang zwischen Werkzeugbewegung und Zustellung.

	Strecken	Stauen
Zustellung z [mm]	$\Delta x_{s, \text{Streck}} [\text{mm}]$	$\Delta x_{s, \text{Stau}} [\text{mm}]$
22,5	0,577	-
22,7	0,635	0,568
23,0	0,718	0,625
23,3	0,798	0,682

Tabelle 5.3: Messungen der Werkzeugbewegung

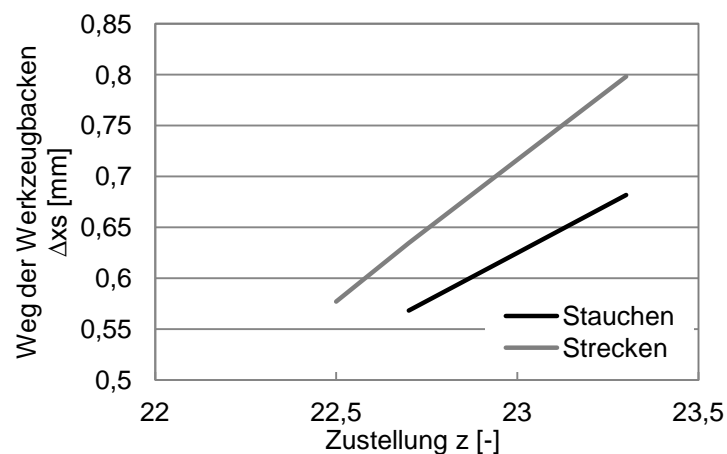


Abbildung 5.32: Werkzeugbewegung bei unterschiedlichen Zustellungen

Zur Übernahme der gemessenen Werkzeugbewegungen in das Simulationsmodell muss der Wert der Amplitude für die vereinfachte Geschwindigkeitskurve  $v_{s, \text{ver}}$  aus der

Werkzeuggestbewegung  $\Delta x_s$  berechnet werden. Das Integral der Geschwindigkeitskurve  $v_{s,ver}$  entspricht dem Betrag der Werkzeuggestbewegung  $\Delta x_s$ . Die vereinfachte Geschwindigkeitskurve  $v_{s,ver}$  ist eine Dreiecksfunktion. Daher kann mit Hilfe der Formel 5.2 die Amplitude aus der Werkzeuggestbewegung  $\Delta x_s$  und der Schlagdauer  $t_s$  berechnet werden (Tabelle 5.4).

$$\Delta x_s = \int_{t=0}^{t=48ms} v_{s,ver} dt = \frac{t_s \cdot v_{s,ver}}{2} \rightarrow v_{s,ver} = 2 \cdot \Delta x_s \cdot t_s \quad (\text{Formel 5.2})$$

	Strecken	Stauen
Zustellung z [mm]	$v_{max,ver}$ [m/s]	$v_{max,ver}$ [m/s]
22,5	0,0344	-
22,7	0,0379	0,0339
23,0	0,0428	0,0373
23,3	0,0477	0,0407

Tabelle 5.4: Geschwindigkeit der Werkzeugbacken

### 5.7.5 Bewertung der Anpassungen

Die erhoffte Verkürzung der Rechenzeiten durch vereinfachte Eingangsparameter bzw. deren Verlaufskurven konnte nicht erfüllt werden. Allerdings zeigten sich große Vorteile beim Anpassen bestehender und Erstellen neuer Simulationsmodelle.

Vor allem die Vereinfachung der Geschwindigkeitskurve stellte eine große Erleichterung dar. Zudem konnte im Simulationsmodell ein weiterer kleiner Fehler, der zu ungewollten Verformungen führte, behoben werden. Die in Abbildung 5.30 aufgezeigte Verschiebung der Werkzeugeinsätze führte zu einer leichten Verdrehung des simulierten Werkstücks (Abbildung 5.33). Diese Verdrehung wird durch die angepasste Bewegungskurve vermieden und das Umformergebnis im gezeigten Fall ( $R_{alt} = 618 \text{ mm}$ ) um \*1,13% verbessert.

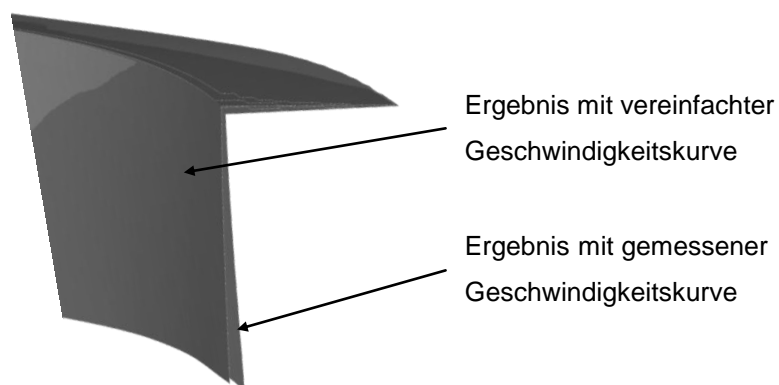


Abbildung 5.33: Optimierung durch angepasste Geschwindigkeitskurve



## 5.8 Verifikation und Zusammenfassung

In den folgenden Kapiteln wird zusammenfassend die Anwendbarkeit des erstellten Simulationsmodells bewertet. Zur Verifikation der Simulation werden zusätzliche Ergebnisse aus Kapitel 7 verwendet. Zum Verständnis muss der in Kapitel 7 eingeführte Wert der Schlagdichte bereits jetzt kurz definiert werden.

Die Schlagdichte  $\rho_s$  wird als Anzahl der Umformoperationen innerhalb einer Bauteillänge von  $l = 100,5 \text{ mm}$  definiert. Bei einer Schlagdichte von 3 können drei Schläge nebeneinander aufgebracht werden, ohne dass eine Umformung in einem bereits durch die Werkzeugbacken berührten Bereich erfolgt, was im Simulationsmodell einem Schlagabstand  $a$  von  $33,5 \text{ mm}$  entspricht. Eine genaue Definition kann dem Kapitel 7 entnommen werden.

### 5.8.1 Verifikation der Simulationsergebnisse für den Streckprozess

Mit dem in Kapitel 5.6 beschriebenen Simulationsmodell werden mehrere Parametersätze simuliert und in Abbildung 5.36 mit real gefertigten Bauteilen verglichen.

Abbildung 5.34 und Abbildung 5.35 zeigen exemplarisch zwei Simulationsergebnisse für einen Winkel mit der Schlagdichte 3,  $n = 10$  simulierten Schlägen und einer Zustellung von  $z = 23,0 \text{ mm}$  sowie für einen Winkel mit der Schlagdichte 9,  $n = 30$  simulierten Schlägen und einer Zustellung  $z = 23,3 \text{ mm}$ . Die Abbildungen zeigen die Blechdickenanalyse der Simulationsergebnisse. Die Ausdünnung in den Umformbereichen ist klar erkennbar.

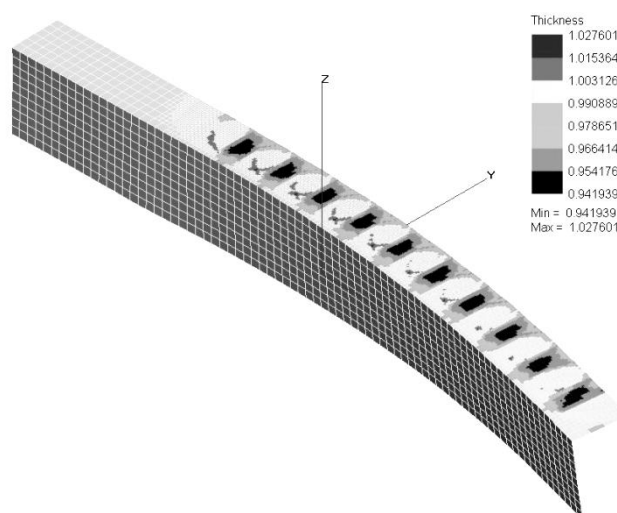


Abbildung 5.34: Strecken mit einer Schlagdichte  $\rho_s = 3$ ,  $z = 23,0 \text{ mm}$

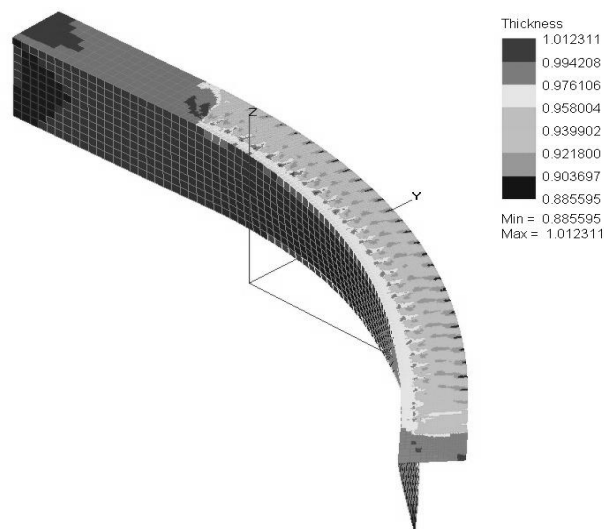


Abbildung 5.35: Strecken mit einer Schlagdichte  $p_s = 9$ ,  $z = 23,3$  mm

Abbildung 5.36 zeigt die gemessenen Radien der simulierten Winkel mit den Schlagdichten  $p_s$  3, 6, 9 und 12 bei jeweils drei unterschiedlichen Zustellungen 22,7, 23,0 und 23,3 mm. Die zum Vergleich dargestellten Potenzfunktionen stützen sich auf die ermittelten Versuchsergebnisse aus Kapitel 7.2.

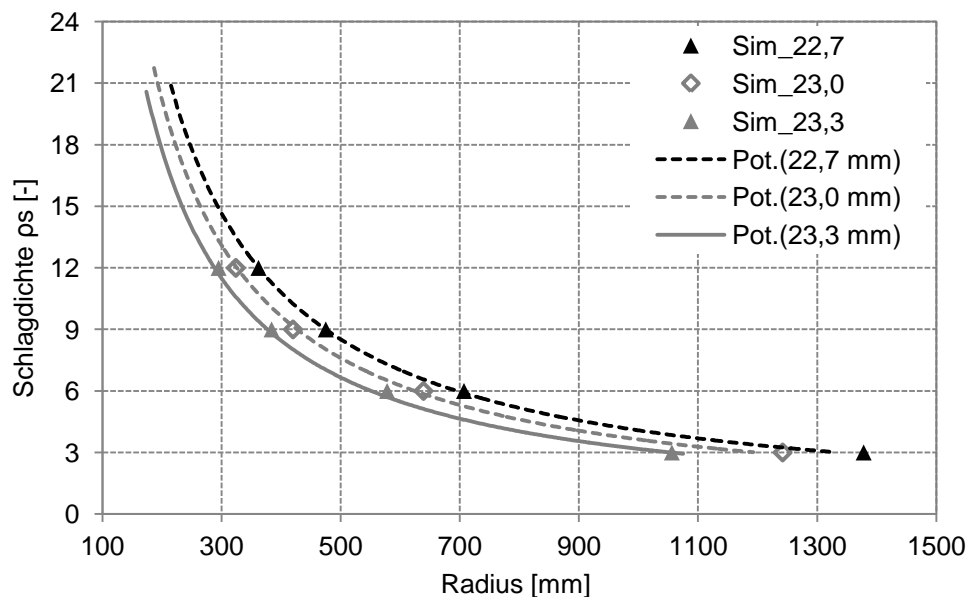


Abbildung 5.36: Verifikation der Simulationsergebnisse mit Versuchswerten (Strecken)

Für das Verfahren Strecken hat das Simulationsmodell eine hohe Vorhersagegenauigkeit. Beim Strecken treffen die Simulationsergebnisse sehr genau die Potenzfunktionen aus der Fertigung. Die besten Ergebnisse werden mit einer Zustellung von  $z = 23,0$  mm erzielt.

### 5.8.2 Stauchen

Für den Stauchprozess kann das Simulationsmodell für das Verfahren Strecken mit kleinen Anpassungen übernommen werden. Die beiden Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen durch die entgegengesetzte Bewegungsrichtung der Werkzeugbacken.

Um ein Durchdringen der Werkzeugbacken aufgrund ihrer um  $180^\circ$  gedrehten Bewegungsrichtung zu vermeiden, werden die Werkzeuge zu Beginn der Simulation über die Autopositionierungsfunktion von PamStamp 2G mit einem Abstand zueinander neu positioniert.

Es ist möglich, die gleichen Geschwindigkeitskurven wie beim Strecken zu verwenden, da sich der grundsätzliche Aufbau der Umformwerkzeuge nur durch die Einbaurichtung der in Gummi vulkanisierten Heben unterscheidet. Alle im Kraftfluss befindlichen und bewegten Bauteile sind nahezu identisch.

Die Ausweich- und Richtbewegung der Guides muss hinsichtlich der entgegengesetzten Verdrehung des Winkels während und nach der Ausführung jedes Schlages angepasst werden.

Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38 zeigen exemplarisch das Ergebnis zweier Simulationen für einen Winkel mit der Schlagdichte 3,  $n = 10$  simulierten Schlägen und einer Zustellung von  $z = 23,3$  mm sowie für einen Winkel mit der Schlagdichte 9,  $n = 30$  simulierten Schlägen und einer Zustellung  $z = 23,3$  mm. Bei Betrachtung der Blechdickenanalyse sind die Umformzonen klar ersichtlich und eine Aufdickung von bis zu 13% ist erkennbar.

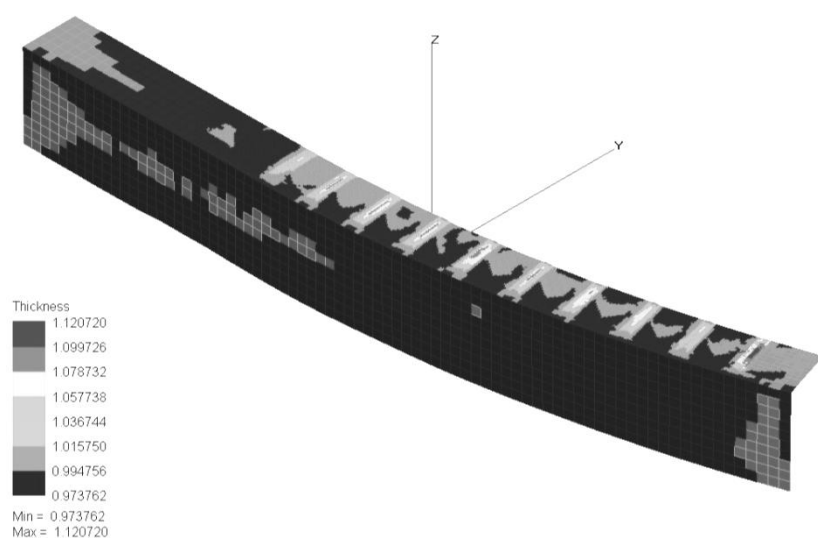


Abbildung 5.37: Stauchen mit einer Schlagdichte  $\rho_s = 3$ ,  $z = 23,3$  mm

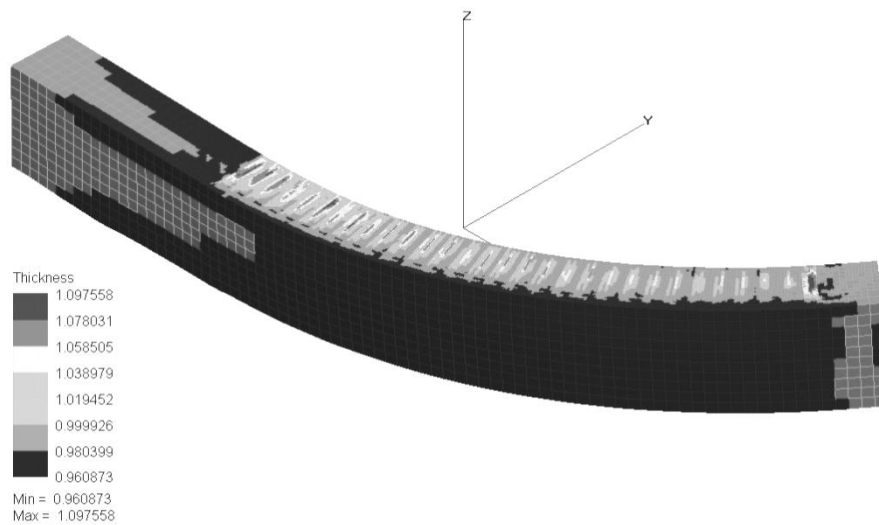


Abbildung 5.38: Stauchen mit einer Schlagdichte  $\rho_s = 9$ ,  $z = 23,3$  mm

Abbildung 5.36 zeigt die gemessenen Radien der Simulationsergebnisse für den Stauchprozess mit den Schlagdichten  $\rho_s$  3, 6, 9 und 12 bei jeweils drei unterschiedlichen Zustellungen 22,7, 23,0 und 23,3 mm. Die zum Vergleich dargestellten Potenzfunktionen stützen sich ebenfalls auf die ermittelten Versuchsergebnisse aus Kapitel 7.2.

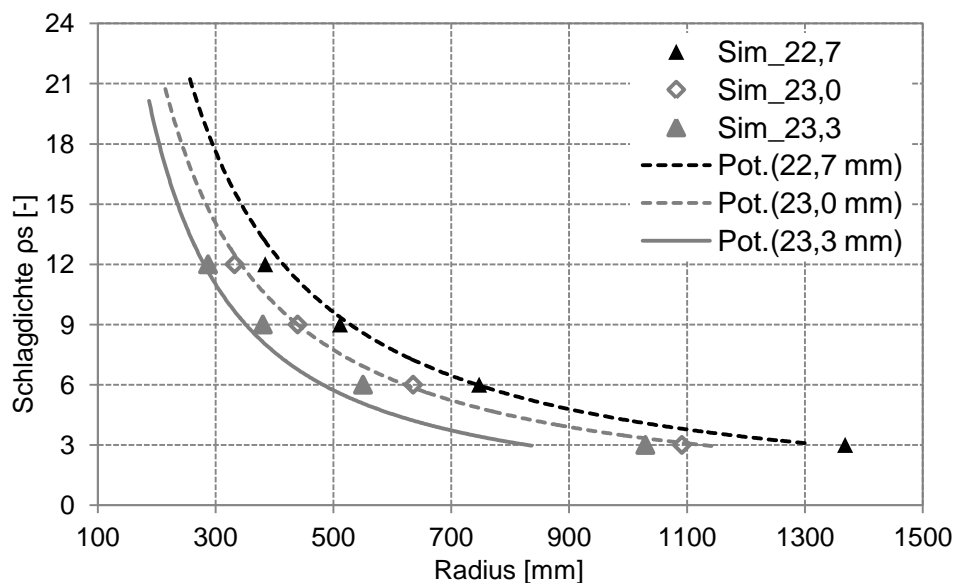


Abbildung 5.39: Verifikation der Simulationsergebnisse mit Versuchswerten (Stauchen)

Für die mittlere Zustellung  $z = 23,0$  mm kann eine hohe Vorhersagegenauigkeit festgestellt werden. Für die Zustellung  $z = 22,7$  mm ist eine Abweichung der Simulationsergebnisse bereits ab einer Schlagdichte  $\rho_s > 6$  erkennbar und bei der Zustellung  $z = 23,3$  mm weichen die Ergebnisse im gesamten Versuchsbereich ab.

### 5.8.3 Zusammenfassung FEM - Simulation

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Simulationsmodelle die Realität ausreichend genau abbilden. Fertigungsstrategien können damit im Vorfeld auf ihre Machbarkeit überprüft und auftretende Spannungen sowie Blechdickenveränderungen am Bauteil abgeschätzt werden. Die größten Herausforderungen liegen nicht in der Berechnung der entstehenden Spannungen und Blechdickenveränderungen oder der Ermittlung der Eingangsdaten, sondern bei der Positionierung und Führung des Werkstücks während und nach jeder Umformoperation.

Die direkte Ableitung von Fertigungsstrategien ist hingegen nicht bzw. nur mit einem enormen Aufwand möglich. Die Annäherung durch ein Trial-and-Error-Verfahren ist grundsätzlich möglich aber aufgrund der hohen Rechenzeiten in der Praxis nicht umsetzbar.

#### **Strecken**

Der Streckprozess bildet die Realität sowohl bei Einzelumformung als auch bei Mehrfachumformungen sehr gut ab und kann zur Beurteilung von Fertigungsstrategien verwendet werden.

#### **Stauchen**

Das für den Streckprozess entwickelte Simulationsmodell kann für den Stauchprozess übernommen werden. Beim Stauchen kann bei einer mittleren Zustellung eine mit dem Streckprozess vergleichbare hohe Vorhersagegenauigkeit erreicht werden. Bei höheren oder niedrigeren Zustellungen kommt es allerdings zu deutlichen Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den gefertigten Bauteilen.

Die Hauptursache für diese Abweichungen ist das Geradeklopfen der entstehenden Falten im realen Prozess. Bei jeder ausgeführten Umformoperation entsteht zwischen den Backen eine kleine Falte. Diese wird im realen Prozess durch den nächsten Schlag geglättet und das Blech dabei zusätzlich etwas gestaucht. Mit zunehmender Schlagkraft und Schlagdichte vergrößert sich dieser Effekt. In der Simulation führt dies zu keiner zusätzlichen Stauchung.

Bei niedrigeren Zustellungen ( $< 22,7$  mm) ist die Faltenbildung zwar sehr gering, allerdings ermöglichen die verringerten Klemmkräfte Relativbewegungen zwischen den Werkzeugbacken und dem Blech, was zu abweichenden Fertigungsergebnissen führt.

Beim Stauchprozess fällt der simulierte Radius bei großen Zustellungen kleiner und bei niedrigen Zustellungen eher größer aus. Verwertbare Ergebnisse können beim Stauchen daher nur in einem sehr engen Prozessfenster erzielt werden, in dem der Einfluss der Faltenbildung sehr gering ist und es zu keinerlei undefinierten Umformungen kommt.

## 6 Analyse des erreichbaren Umformwinkels

Die Ableitung von Fertigungsstrategien mit Hilfe der FEM-Simulation ist aufgrund der langen Rechenzeiten und der fehlenden Flexibilität der Simulationsmodelle nicht praktikabel (Kapitel 5). Der Umformprozess muss daher noch genauer analysiert werden, um einen alternative Lösungswege zu eröffnen. Das Ziel dieses Kapitels ist es, den Prozess auf Basis von Versuchsdaten mathematisch exakt zu beschreiben um damit eine Fertigungsstrategie abzuleiten bzw. exakt zu berechnen.

### 6.1 Definition des Umformwinkels

Der inkrementelle Umformprozess am Eckold Kraftformer besteht aus eine Vielzahl einzelner Umformoperationen bzw. Umformschlägen. Wird ein L-Profil bearbeitet, so erzeugt jeder einzelne Schlag, sowohl beim Streck- als auch beim Stauchprozess, einen inkrementellen Umformwinkel. Die Summe aller einzelnen Umformwinkel ergibt damit den Gesamtwinkel und bezogen auf die Bauteillänge den gewünschten Bauteilradius.

Eine Fertigungsstrategie besteht daher aus mehreren Umformoperationen  $n$ , dem jeweils erzeugten Umformwinkel  $\alpha$  und einem Schlagabstand  $a$ . Das Ergebnis ist ein Kreisbogen mit dem Winkel  $\alpha_{gesamt}$  und dem Radius  $r$  (siehe Abbildung 6.1).

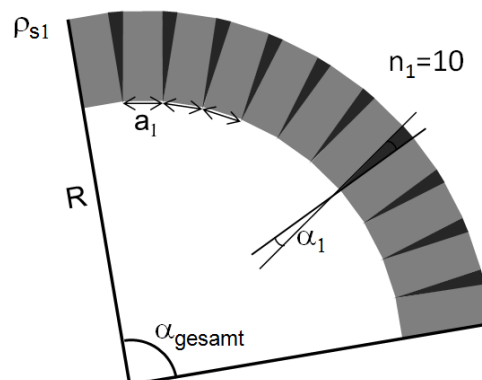


Abbildung 6.1: Fertigungsstrategie mit Umformwinkeln  $\alpha$  im Abstand  $a$

Ist der Zusammenhang zwischen allen erforderlichen Fertigungsparametern zur Herstellung einer Einzelumformung mit einem gewünschten Umformwinkel genau beschrieben, dann kann daraus eine Fertigungsstrategie abgeleitet werden. Je höher die Anzahl der Umformoperationen desto gleichmäßiger wird der Kreisbogen. Bei einer steigenden Anzahl an Umformoperationen muss sowohl der Schlagabstand als auch die Schlagkraft (kleinerer Umformwinkel) verringert werden, um einen identischen Radius zu erhalten.

## 6.2 Lösungsansatz

Mit Hilfe der Regressionsanalyse werden alle Einflüsse auf den Umformwinkel untersucht und mathematisch beschrieben. Mit einer geeigneter Software wird ein analytisches Modell erzeugt und verifiziert. Zur Analyse werden Prozessgrenzen definiert, die Geometrie der Versuchsteile (Abbildung 6.2) festgelegt, mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung Versuchspläne aufgestellt und Bauteile in der Fertigungszelle Kraftformer-Roboter gefertigt.

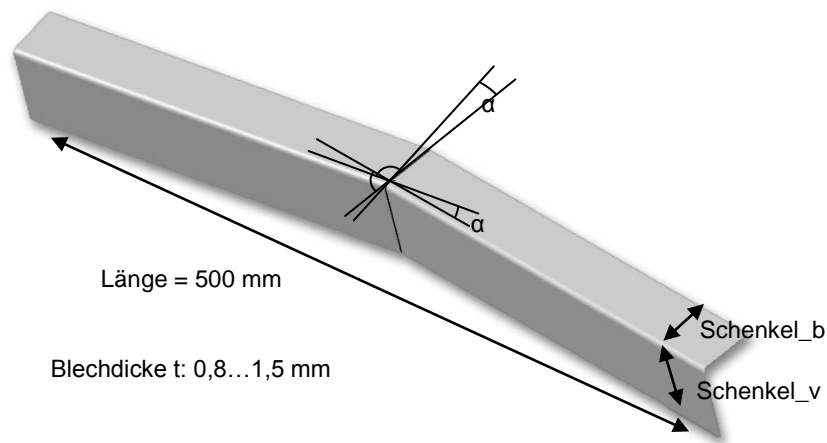


Abbildung 6.2: Verwendetes Versuchswerkstück

Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt mit dem Programm Visual XSel 10.0 und speziell mit dem Modul Multiple Regression (Regressionsanalyse). Mit der Regressionsanalyse wird auf Basis von Versuchsdaten ein lineares Modell erzeugt und der Einfluss der Parameter dargestellt. Um den Unterschied zwischen Modell und Realität möglichst gering zu halten und kleine Abweichungen auszugleichen, wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet.

Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist der Regressionskoeffizient (p-Value), ein Wert zwischen Null und Eins, der die Wahrscheinlichkeit angibt, das Versuchsergebnis ohne die Betrachtung des Parameters zu erhalten. Das bedeutet, je kleiner der p-Value ausfällt, um so größer ist der Einfluss des Parameters. Liegt er unter 5%, dann spricht man von einem signifikanten Faktor. Dadurch können bereits sehr früh alle nicht signifikanten Parameter bzw. Faktoren ausgeschlossen werden.

### 6.2.1 Fertigungsparameter

Relevante Parameter sind die geometrischen Abmessungen des L-Profils, der horizontale Schenkel (Schenkel\_b), der vertikale Schenkel (Schenkel\_h) sowie die Dicke des Materials. Die Bauteillänge spielt keine Rolle, da nur ein einzelner Schlag aufgebracht und somit nur

ein kleiner Bereich betrachtet wird. Weiterhin müssen die Schlagkraft, der einzige am Kraftformer einstellbare Parameter, sowie der Versuchswerkstoff betrachtet werden. Die Umformkraft kann am Kraftformer zwar nicht genau genug eingestellt werden, sie wird beim Versuch allerdings exakt gemessen und der genaue Wert ins Modell aufgenommen.

Als Versuchswerkstoffe stehen der Tiefziehstahl DX54 sowie eine deutlich weichere Aluminiumlegierung AlMg5 zur Verfügung. Der Werkstoff geht als kategorialer Faktor ein, er wird nicht quantifiziert und es wird ausschließlich die Abweichung zur Basis DX54 betrachtet.

### 6.2.2 Software

Als Softwaretool wird das von Dipl.-Ing. (FH) Curt Ullrich Ronniger entwickelte Visual XSel 10.0 von CRGRAPH verwendet. Es umfasst zahlreiche Funktionen zur Versuchsplanung und -auswertung. Neben voll- und teilfaktoriellen Versuchsplänen können auch D-optimale Designs erstellt werden. Damit ist es möglich, unterschiedliche Stufenanzahlen für die Faktoren zu definieren. Es wird dann automatisch ein Versuchsplan generiert, der bei vorgegebener Auflösung die minimale Anzahl an Versuchen angibt. Zudem können die wichtigsten Auswertungen sehr schnell und einfach ausgegeben werden. Die Regressionsanalyse ermöglicht eine schnelle, einfache und dennoch realitätsnahe Abbildung des Prozesses mit Polynommodellen. Dies stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen dar. Visual XSel bietet eine sehr flexible Anpassung der Versuchsreihen sowie umfangreiche Auswertungsmöglichkeiten.

## 6.3 Versuchsreihe 1

### 6.3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Versuchsreihe 1

Mit Hilfe der Regressionsanalyse wird in den ersten Versuchsreihen der Einfluss der unterschiedlichen Fertigungsparameter auf das Umformergebnis analysiert.

Die in Tabelle 6.1 aufgeführten Parameter gehen mit den Stufen -1 und +1 in die Versuchsplanung ein und es wird ein teilfaktorieller Versuchsplan erstellt.

Bezeichnung	-1	+1
Schlagkraft	50 kN	120 kN
Dicke	0,8 mm	1,5 mm
Schenkel_b	33,5 mm	65,0 mm
Schenkel_h	50 mm	100 mm
Werkstoff	DX54	AlMg5

Tabelle 6.1: Parameter (Versuchsreihe 1)



Es wird ein fünfdimensionaler Versuchsraum aufgespannt, der durch die beiden Stufen -1 und +1 begrenzt wird. Der Umformwinkel wird in der sechsten Dimension aufgetragen und vorerst nur linear interpoliert.

Die Werte der Fertigungsparameter entsprechen den Verfahrensgrenzen. Bei einer Schlagkraft von 50 kN bzw. einer Blechdicke von 0,8 mm findet keine Umformung statt. Wogegen bei 120 kN bzw. einer Blechdicke von 1,5 mm einige Proben bereits reißen.

Die Definition des *Schenkel\_b* erfolgt über die Geometrie des Versuchswerkzeugs. Bei 65,0 mm erhält man 100% bei 33,5 mm 50% Werkzeugüberdeckung. Der Werkzeugdurchmesser beträgt zwar 67 mm, die fehlenden 2 mm entstehen allerdings durch eine an den Werkzeugbacken umlaufende Fase, die nur auf der bauteilzugewandten Seite betrachtet werden muss. Bei Überdeckungen größer 100% kommt es zu einer Aufwölbung die nicht vermessen werden kann. Der *Schenkel\_h* wird auf 50 mm und 100 mm festgelegt.

Nr.	Werkstoff	Dicke [mm]	Schenkel_b [mm]	Schlagkraft [kN]	Schenkel_h [mm]
1	DX54	0,8	33,5	50	100
2	DX54	0,8	33,5	120	50
3	DX54	0,8	65	50	50
4	DX54	0,8	65	120	100
5	DX54	1,5	33,5	50	50
6	DX54	1,5	33,5	120	100
7	DX54	1,5	65	50	100
8	DX54	1,5	65	120	50
9	AlMg5	0,8	33,5	50	50
10	AlMg5	0,8	33,5	120	100
11	AlMg5	0,8	65	50	100
12	AlMg5	0,8	65	120	50
13	AlMg5	1,5	33,5	50	100
14	AlMg5	1,5	33,5	120	50
15	AlMg5	1,5	65	50	50
16	AlMg5	1,5	65	120	100

*Tabelle 6.2: Versuchsplan (Versuchsreihe 1)*

Die Untersuchungen beschränken sich auf einen teilfaktoriellen  $2^{5-1}$ -Versuchsplan (vgl. Abbildung 4.4). Es werden somit für die vorliegenden  $p=5$  Faktoren mit jeweils  $S=2$  Stufen lediglich 16 Versuche (Tabelle 6.2) benötigt. Zur Vermeidung systematischer Verzerrungen wird eine zufällige Versuchsreihenfolge gewählt.

### 6.3.2 Auswertung

Die Auswertung der Versuchsreihe 1 ergibt folgende p-Values:

Bezeichnung	p-Value
Schenkel_b	0
Schlagkraft	0,0134
Dicke	0,0325
Werkstoff	0,0464
Schenkel_h	0,662

Tabelle 6.3: p-Values (Versuchsreihe 1)

Der für den Faktor *Schenkel\_h* ermittelte Regressionskoeffizient liegt deutlich über 5%. Der Parameter *Schenkel\_h* hat daher keinen signifikanten Einfluss auf den Umformwinkel.

Die grafische Darstellung erfolgt durch die *analysis of means* (ANOM; deutsch: Analyse der Mittelwerte). Es werden für die unterschiedlichen Faktoren die Mittelwerte der Ergebnisse für die Stufen -1 und +1 aufgetragen und so miteinander verglichen.

Exemplarisch ergeben sich für den Faktor *Schenkel\_b* folgende Mittelwerte:

$$m_{-1} = \frac{\alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_7 + \alpha_8 + \alpha_{11} + \alpha_{13} + \alpha_{15} + \alpha_{17}}{8} = 1,827745 \quad (\text{Formel 6.1})$$

$$m_{+1} = \frac{\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_6 + \alpha_9 + \alpha_{10} + \alpha_{12} + \alpha_{14} + \alpha_{16}}{8} = 0,3302457 \quad (\text{Formel 6.2})$$

Die Versuche wurden für die horizontale Schenkellänge mit den beiden Stufen  $m_{-1} = 33,5$  mm und  $m_{+1} = 65,0$  mm durchgeführt. Die Umformwinkel des jeweils  $i$ -ten Versuches werden mit den Werten  $\alpha_i$  dargestellt. Die Summe der Werte weicht geringfügig von dem durch die Software errechneten Wert ab, was an dem mittels Regressionsanalyse erstellten Modell liegt. Abbildung 6.3 zeigt die ermittelten und mit einer Linie verbundenen Werte für alle Faktoren.

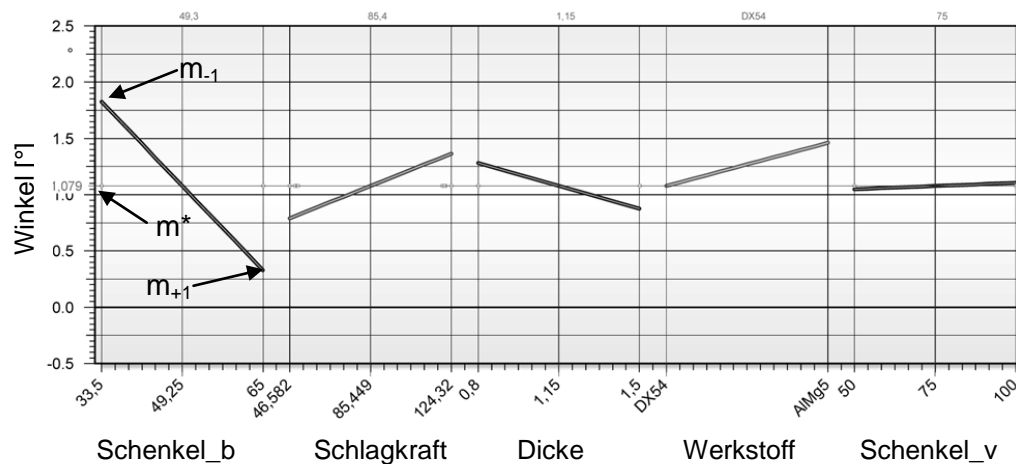


Abbildung 6.3: ANOM (Versuchsreihe 1, Visual XSel)

Der Unterschied der Werte für die Stufe -1 und +1 spiegelt den Einfluss des Parameters auf den gesamten Umformwinkel wider. Die Steigung der Gerade ist eine Indiz für den Einfluss auf den Prozess. Je größer die Steigung, desto größer der Einfluss. Am Vorzeichen erkennt man die Richtung. Vergleicht man exemplarisch den *Schenkel\_b* mit der *Schlagkraft*, so führt ein größerer *Schenkel\_b* ( $m_{+1}$  in Abbildung 6.3) zu einem kleineren und eine höhere *Schlagkraft* ( $m_{+1}$  in Abbildung 6.3) zu einem größeren Umformwinkel.

Mit zunehmender Materialstärke (*Dicke*) verringert sich der Umformwinkel und beim Aluminiumwerkstoff (AlMg5) erhält man im Vergleich zum Stahlwerkstoff (DX54) einen größeren Umformwinkel. Der Werkstoff geht als kategorialer Faktor in die Betrachtung ein, dabei dient der Stahlwerkstoff DX54 als Basis und es wird lediglich die Veränderung durch die Verwendung der Aluminiumlegierung aufgezeigt. Die anderen Faktoren sind quantitativ und können beliebige Zwischenwerte annehmen. Bei kategorialen Faktoren ist eine Interpolation zwischen den Stufen weder sinnvoll noch zulässig.

Der angegebene globale Mittelwert  $m^*$  berechnet sich über die Anzahl der Versuche  $n$  nach:

$$m^* = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} = 1,079 \quad \alpha_i = \text{inkrementeller Umformwinkel} \quad (\text{Formel 6.3})$$

Die Einflüsse einzelner Parameter können ausschließlich dann ermittelt werden, wenn alle anderen Parameter konstant bleiben. Denn es ist möglich, den selben Umformwinkel mit anderen Parametersätzen zu erhalten.

Bei einer reinen Betrachtung der Gewichtung der Einflüsse trägt man für jeden Faktor nur den absoluten Effekt  $\Delta$  auf, der sich aus der Differenz der Mittelwerte der Stufen -1 und +1 berechnet. (Formel 6.4)

$$\Delta = |m_{+1} - m_{-1}| \quad (\text{Formel 6.4})$$

In Tabelle 6.4 sind sowohl die beiden Stufen aus Abbildung 6.3 als auch deren Differenz aus Abbildung 6.4 zusammengefasst.

Bezeichnung	$m_{-1}$	$m_{+1}$	$\Delta$
Schenkel_b	1,82774447	0,33024573	1,49749874
Schlagkraft	0,79298957	1,36500062	0,57201105
Dicke	1,2814769	0,87651329	0,40496361
Werkstoff	1,0789951	1,46229312	0,38329802
Schenkel_h	1,05076378	1,10722642	0,05646264

Tabelle 6.4: Werte für ANOM und absolute Effekte (Versuchsreihe 1)

Das Paretdiagramm in Abbildung 6.4 zeigt die absoluten Effekte der ersten Versuchsreihe. Die Länge des *Schenkel\_b* hat demnach den größten und die des *Schenkel\_h* den geringsten Einfluss auf den Umformwinkel.

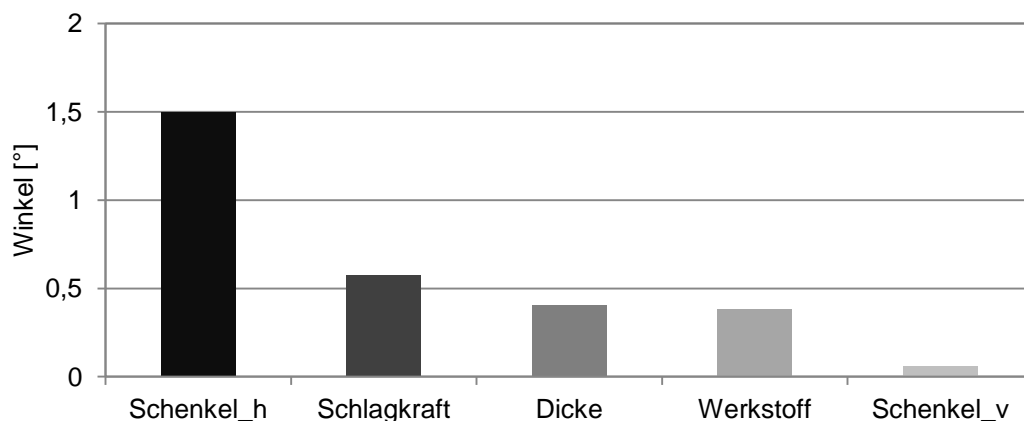


Abbildung 6.4: Paretdiagramm (Versuchsreihe 1, Visual XSel)

Um den Versuchsaufwand deutlich zu reduzieren und sich stärker auf die Analyse der Zusammenhänge innerhalb des Versuchsraums zu konzentrieren, wird in den folgenden Versuchsreihen Faktor *Schenkel\_h* vernachlässigt. Er hat einen nur sehr geringen Einfluss auf das Umformergebnis, allerdings muss er sich in den kommenden Versuchen innerhalb der untersuchten Grenzen zwischen 50 bis 100 mm bewegen.

Zur Darstellung der genaueren Zusammenhänge der Parameter werden die Daten normiert. Dies ist speziell im vorliegenden Fall sinnvoll, da die Variationen der Parameter sehr unterschiedlich sind. Betrachtet man die Dicke, so ergibt sich ein Unterschied von nur

1,5 mm - 0,8 mm = 0,7 mm, bei der Schlagkraft hingegen variiert der Wert zwischen 120 kN und 50 kN, also ein Delta von 70 kN, was einer hundertfachen Bandbreite entspricht.

Bei einer Normierung werden alle Datenwerte so umgerechnet, dass sie zwischen -1 und +1 liegen. Dazu werden sie gemäß Abbildung 6.5 zentriert und skaliert. [RONN08]

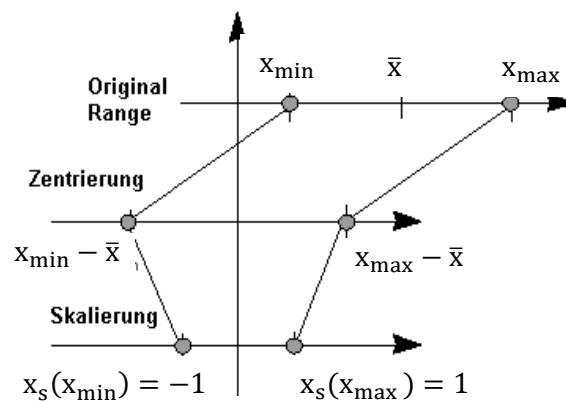


Abbildung 6.5 Normieren der Daten [RONN08]

Das Ergebnis wird durch Subtraktion des Mittelwerts um die y-Achse zentriert. Anschließend wird durch die Spannweite zwischen Maximum und Minimum dividiert, um die gewünschte Normierung zwischen -1 und +1 zu erhalten (siehe Formel 7.5).

$$x_s = \frac{x - \bar{x}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{Formel 6.5})$$

Die Ergebnisse des Modells aus Visual XSel 10.0 werden wie folgt dargestellt:

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	p-Wert	Min	Max	AktWert	Transf	Normiert
Constant	1,270644								
Schenkel_b	-0,74875	0,067048	-11,1674	0	33,5	65	49,25	Keine	((Schenkel_b-49,25)/15,75)
Schlagkraft	0,286006	0,067732	4,222623	0,0134	46,5820	124,316	85,45	Keine	((Schlagkraft-85,44922)/38,86719)
Dicke	-0,20248	0,062999	-3,21404	0,0325	0,8	1,5	1,15	Keine	((Dicke-1,15)/0,35)
DX54	-0,19165	0,067235	-2,85043						
AlMg5	0,191649	0,067235	2,850428	0,0464					
Schenkel_h	0,028231	0,05989	0,471386	0,662	50	100	75	Keine	((Schenkel_h-75)/25)
R²=0,982	DF=4								
Radj²=0,959	RMS=0,1769		RMS/Ym=0,16						
Q²=0,897									
Zielgröße-Transf	Keine								

Tabelle 6.5 Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 1)

### 6.3.3 Modellbeschreibung

Das mit der Regressionsanalyse erstellte Modell wird mit den statistischen Kennzahlen und weiteren Koeffizienten beschreiben. Nach der Normierung (vgl. Abbildung 6.5) beschreiben die angegebenen Koeffizienten den Effekt der einzelnen Faktoren auf den Umformwinkel.

Der gewünschte Umformwinkel lässt sich mit dem erzeugten, linear angenäherten Modell wie folgt berechnen:  $K_i$

$$Umformwinkel = \sum_{Faktoren} (Koeffizient * normierter Faktor) + Konstante \quad (Formel 6.6)$$

Nach dem Einsetzen der Koeffizienten aus Tabelle 6.5 ergibt sich folgende Formel:

$$\alpha = -0,74875 * \frac{Schenkel_h - 49,25}{15,75} + 0,286006 * \frac{Schlagkraft - 85,44922}{38,86719} - 0,20248 \\ * \frac{Dicke - 1,15}{0,35} + 0,028231 \frac{Schenkel_v - 75}{25} + 1,270644 + K_i$$

$$K_{(DX54)} = -0,19165 ; K_{(AlMg5)} = 0,19164 \quad (Formel 6.7)$$

Der Werkstoff wird nur als kategorialer Faktor berücksichtigt. Daher ergibt sich eine einfache Fallunterscheidung. Je nach verwendetem Werkstoff, wird der Umformwinkel für DX54 nach unten und für AlMg5 nach oben korrigiert.

## 6.4 Versuchsreihe 2

### 6.4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Versuchsreihe 2

Der Regressionskoeffizient für den Faktor *Schenkel\_h* überschreitet das Signifikanzniveau von 5 %, wird daher als nicht signifikant eingestuft und kann vernachlässigt werden. Es verbleiben für die zweite Versuchsreihe folgende Faktoren mit den zugehörigen Stufen:

Bezeichnung	-1	+1
Schlagkraft	50 kN	120 kN
Dicke	0,8 mm	1,5 mm
Schenkel_b	33,5 mm	65,0 mm
Werkstoff	DX54	AlMg5

Tabelle 6.6 Parameter (Versuchsreihe 2)

Wird die vertikale Schenkellänge aus Versuchsreihe 1 nicht berücksichtigt, so lässt sich ohne zusätzliche Versuche ein vollfaktorieller Versuchsplan gemäß Abbildung 4.2 erstellen.

### 6.4.2 Auswertung

Nach dem gleichen Vorgehen wie in Kapitel 6.3 werden die Versuchsergebnisse mit Visual XSel 10.0 ausgewertet und ein lineares Modell samt Wechselwirkungen erzeugt. Speziell wird der Fokus auf die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren gesetzt. In Tabelle 6.7 sind die p-Values der möglichen Wechselwirkungen aufgelistet, allerdings lassen sich keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen den gegebenen Faktoren erkennen. Sie liegen alle über der Grenze von 5% und werden daher im Folgenden vernachlässigt.

Bezeichnung	p-Value
Schenkel_b*Kraft	0,448
Schenkel_b*Dicke	0,651
Schenkel_b*Werkstoff [AlMg5]	0,057
Kraft*Dicke	0,618
Kraft*Werkstoff [AlMg5]	0,796
Dicke*Werkstoff [AlMg5]	0,189

Tabelle 6.7: p-Values Wechselwirkungen (Versuchsreihe 2)

Folgende Kennwerte und Koeffizienten ergeben sich nach einer Normierung und der Vernachlässigung der nicht signifikanten Wechselwirkungen für das erstellte Regressionsmodell.

	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	p-value	Min	Max	AktWert	Transf	Normiert
Constant	1,278133								
Schenkel_b	-0,74737	0,04758	-15,7055	0	33,5	65	49,25	Keine	((Schenkel_b -49,25)/15,75)
Kraft	0,287278	0,05394	5,325832	0,00179	46,5820	124,316	85,45	Keine	((Kraft-85,44922)/38,86719)
Dicke	-0,20084	0,04971	-4,03996	0,0068	0,8	1,5	1,15	Keine	((Dicke-1,15)/0,35)
DX54	-0,19013	0,04789	-3,97005						
AlMg5	0,19013	0,04789	3,970055	0,0074					
R <sup>2</sup> =0,984	DF=6								
Radj <sup>2</sup> =0,973	RMS=0,149		RMS/Ym=0,12						
Q <sup>2</sup> =0,9431									
Zielgröße-Transf	Keine								

Tabelle 6.8: Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 2)

Abbildung 6.6 zeigt die *analysis of means* (ANOM) für die Versuchsreihe 2. Die annähernd gleichen Ergebnisse wie in Versuchsreihe 1 bestätigen, dass der Einfluss des Faktors *Schenkel\_h* nicht signifikant ist.

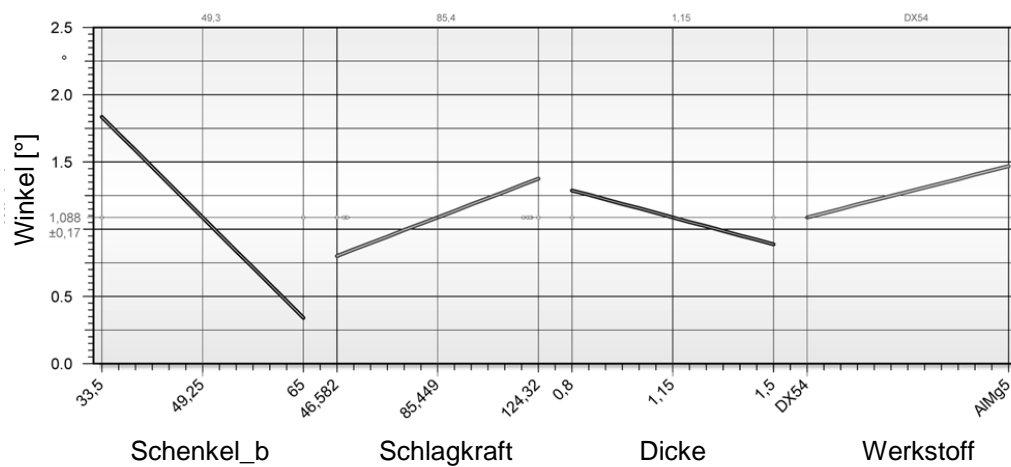


Abbildung 6.6: ANOM (Versuchsreihe 2, Visual XSel)

Daher weichen auch die absoluten Effekte in Abbildung 6.7 kaum von denen in Abbildung 6.4 ab.

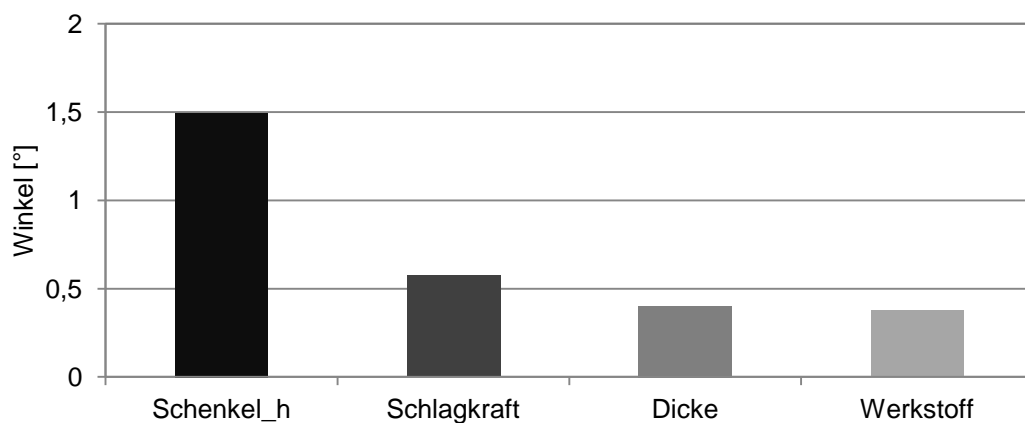


Abbildung 6.7: Paretodiagramm (Versuchsreihe 2, Visual XSel)

Tabelle 6.9 fasst die Stufen und deren Differenz zusammen:

Bezeichnung	m-1	m+1	$\Delta$
Schenkel_b	1,835373	0,3406327	1,4947403
Schlagkraft	0,8007253	1,3752804	0,5745551
Dicke	1,288843	0,8871627	0,4016803
Werkstoff	1,0880028	1,468263	0,3802601

Tabelle 6.9: Werte für ANOM und absolute Effekte (Versuchsreihe 2)

Die statistischen Kennzahlen aus Tabelle 6.8 deuten auf ein sehr gutes Modell hin. Zur Verifikation werden die Modellwerte mit den Versuchsergebnissen in Abbildung 6.8 verglichen. Auf einer Achse wird der berechnete, auf der anderen der gemessene



Umformwinkel aufgetragen. Je kleiner der Abstand zur eingezeichneten Winkelhalbierenden ist, desto genauer überdeckt sich das Ergebnis aus Modell und Versuch. Die dargestellten Zahlen kennzeichnen die Versuchsnummern.

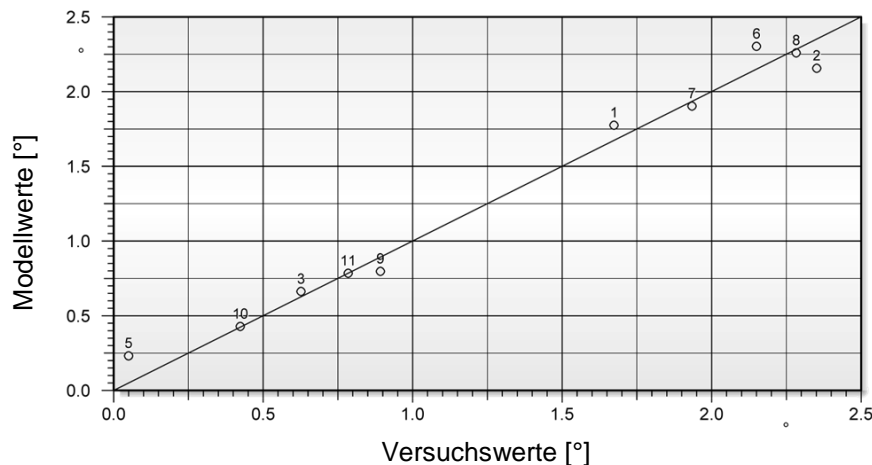


Abbildung 6.8: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Versuchsreihe 2)

Für diese Abweichungen (Residuen) kann eine Häufigkeitsverteilung erstellt werden. Daran lässt sich erkennen, ob die Residuen normal verteilt sind. Abweichungen von der Normalverteilung sind ein Indiz dafür, dass systematische Fehler vorliegen oder nicht berücksichtigte Störgrößen einen Einfluss haben. Ausreißer wären in diesen beiden Darstellungen als weit von der Geraden entfernte Punkte einfach zu erkennen. [RONN08]

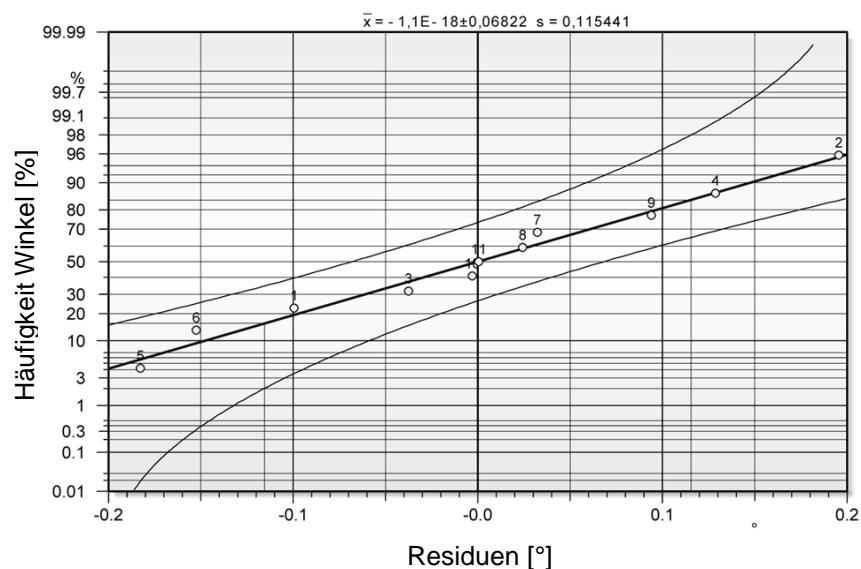


Abbildung 6.9: Residuenverteilung (Versuchsreihe 2, Visual XSel)

Beide Auswertungen zur Modellgenauigkeit zeigen eine hinreichend genaue Modellierung für den vorliegenden zweistufigen Versuch mit vier Faktoren. Die Koeffizienten des vorliegenden Modells aus Tabelle 6.8 werden in der Modellgrafik (Abbildung 6.10) dargestellt.

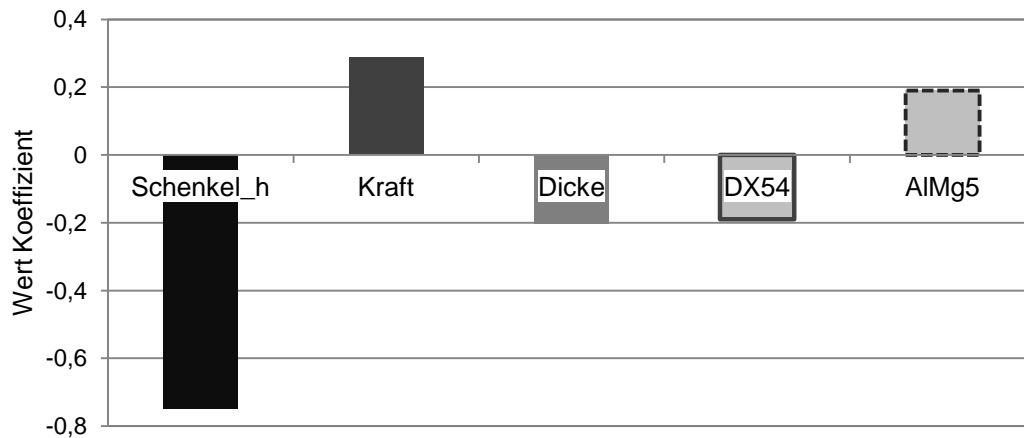


Abbildung 6.10: Paretodiagramm (Versuchsreihe 2, Visual XSel)

### 6.4.3 Modellbeschreibung

Nach der Normierung und dem Einsetzen der Werte aus Tabelle 6.8 erhält man folgende Modelbeschreibung:

$$\alpha = -0,74737 * \frac{\text{Schenkel}_h - 49,25}{15,75} + 0,287278 * \frac{\text{Schlagkraft} - 85,44922}{38,86719} - 0,20084 * \frac{\text{Dicke} - 1,15}{0,35} + 1,278133 + K_i$$

$$K_{(DX54)} = -0,19013 ; K_{(AlMg5)} = 0,19013 \quad (\text{Formel 6.8})$$

Die Haupteinflussparameter für den gegebenen Versuchsraum sind damit identifiziert. In den Versuchsreihen 3 und 4 wird das Verhalten innerhalb dieses Versuchsraumes genauer beschrieben. Der Versuchs- und Ergebnisraum kann mit den bisher ermittelten Daten sehr gut eingegrenzt werden. Allerdings werden die Zwischenwerte nur linear interpoliert, was dem realen Systemverhalten nicht entsprechen muss. Auf Basis der bisherigen Versuche wird die Definition der folgenden Versuchsreihen erheblich erleichtert und ermöglicht eine fokussierte Betrachtung einzelner Faktoren.

## 6.5 Versuchsreihe 3

### 6.5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Versuchsreihe 3

Die Ergebnisse der Kapitel 6.3 und 6.4 ermöglichen die Vernachlässigung des Faktors *Schenkel\_h* und halbieren damit den Versuchsaufwand. Zusätzlich wird im Folgenden auf die Variation des kategorialen Faktors *Werkstoff* verzichtet. Es wird ausschließlich der Stahlwerkstoff DX54 in den Materialstärken 0,8 mm, 1,0 mm und 1,5 mm verwendet. Weiterhin werden die Faktoren *Schlagkraft* und *Schenkel\_b* betrachtet. Allerdings steht für die Blechdicke 1 mm nur der Stahlwerkstoff DC04 zur Verfügung, er sollte sich grundsätzlich aber nur durch den Markennamen unterscheiden. Zur genauen Werkstoffcharakterisierung wurden Zugversuche durchgeführt (Kapitel 4.3). Es kann dennoch zu Chargenunterschieden kommen, deren Einfluss sich in dieser Versuchsreihe 3 zeigen wird.

Zur genaueren Analyse der Einflüsse dieser drei Faktoren werden ihnen nun mehrere Stufen zugeordnet (Tabelle 6.10). Es werden Versuche mit vier unterschiedlichen Schlagkräften durchgeführt, da diese sehr leicht zu variieren und sehr gut reproduzierbar einzustellen sind.

Die horizontale Schenkellänge wird vorerst noch nicht variiert.

Bezeichnung	1	2	3	4
Schlagkraft	50 kN	80 kN	100 kN	120 kN
Dicke	0,8 mm	1,0 mm	1,5 mm	
Schenkel_b	33,5 mm	65,0 mm		

Tabelle 6.10: Parameter (Versuchsreihe 3)

Die Reduktion auf drei Faktoren ermöglicht es, den vollständigen Versuchsraum als Würfel darzustellen. Die zusätzlichen Stufen für die Faktoren bilden neue Punkte im Versuchsraum (Abbildung 6.11).

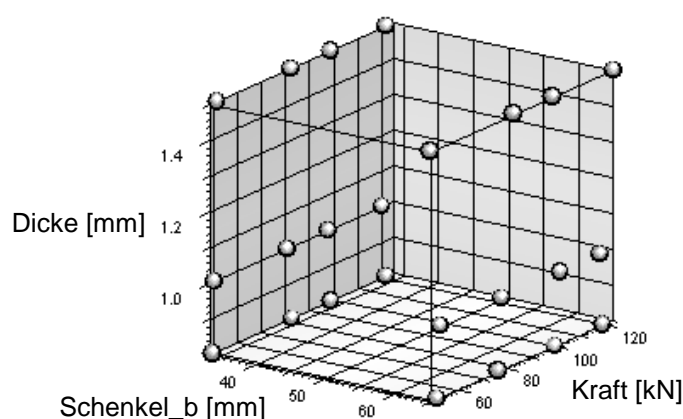


Abbildung 6.11: Versuchsraum (Versuchsreihe 3, Visual XSel)

Die Zusammenführung der Versuche erfolgt in Tabelle 6.2 und Tabelle 6.11. Die Ergebnisse ermöglichen die Aufstellung eines vollfaktoriellen Versuchsplans.

Nr.	Dicke [mm]	Schenkel_b [mm]	Schlagkraft [kN]	Werkstoff [-]
1	0,8	65	80	DX54
2	0,8	33,5	80	DX54
3	0,8	33,5	100	DX54
4	0,8	65	100	DX54
5	1	33,5	50	DC04
6	1	65	50	DC04
7	1	65	80	DC04
8	1	33,5	80	DC04
9	1	33,5	100	DC04
10	1	65	100	DC04
11	1	65	120	DC04
12	1	33,5	120	DC04
13	1,5	33,5	80	DX54
14	1,5	65	80	DX54
15	1,5	33,5	100	DX54
16	1,5	65	100	DX54

*Tabelle 6.11: Zusätzliche Versuche (Versuchsreihe 3)*

### 6.5.2 Auswertung

Die zusätzlichen Stufen ermöglichen eine detaillierte Betrachtung der bisher rein linear durchgeführten Regressionsanalyse. Bisherige Annahmen können verifiziert und nichtlineare Abhängigkeiten der Faktoren nun ermittelt werden. Für die Modellbeschreibung werden Polynome bis zum Grad 4 zugelassen und für die Faktoren „ $x^4$ “ erneut die p-Values berechnet. Liegt ihr Signifikanzniveau über 5% werden sie aus dem Modell entfernt.

Tabelle 6.12 gibt einen Überblick über die für das Modell ermittelten signifikanten Faktoren und Koeffizienten.

Winkel	Koeffizient	StdAb w	t-Wert	p-value	Min	Max	Wert	Trans	Normiert
Constant	1,230314								
Schenkel_b	-0,71727	0,0261	-27,5339	0	33,5	65	49,25	-	$((\text{Schenkel\_b} - 49,25)/15,75)$
Kraft	0,377916	0,0380	9,94219	0	49,121	124,32	86,72	-	$((\text{Kraft} - 86,71875)/37,5976)$
Dicke	-0,19222	0,0319	-6,02412	0	0,8	1,5	1,15	-	$((\text{Dicke} - 1,15)/0,35)$
Dicke^2	-0,1496	0,0697	-2,14527	0,045					
R <sup>2</sup> =0,979	DF=19								
Radj <sup>2</sup> =0,975	RMS=0,1276		RMS/Ym=0,11						
Q <sup>2</sup> =0,9654									
Zielgröße- Transf	Keine								

Tabelle 6.12: Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 3)

Abbildung 6.12 bestätigt in der *analysis of means* (ANOM) die linearen Zusammenhänge für *Schenkel\_b* und *Schlagkraft*. Für die *Dicke* hingegen zeigt sich ein quadratischer Verlauf.

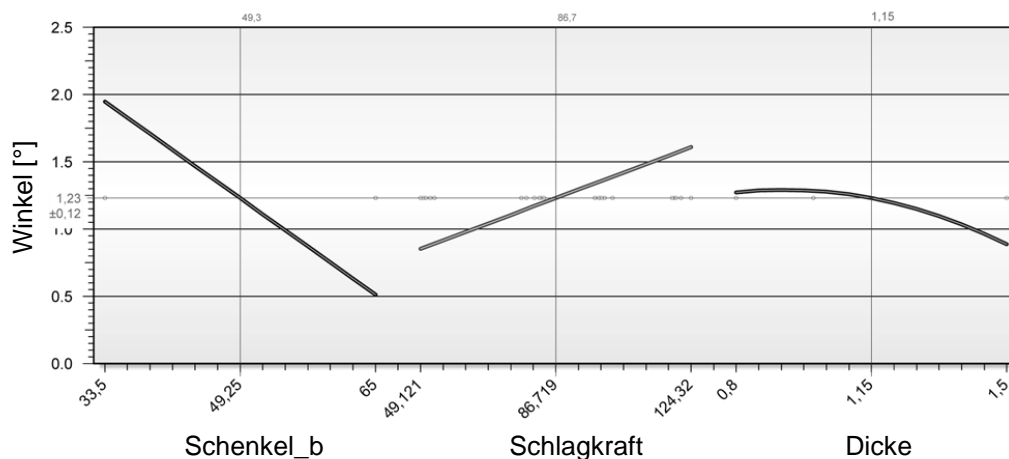


Abbildung 6.12: ANOM (Versuchsreihe 3, Visual XSel)

Um die Ergebnisse genauer zu analysieren wird der Einfluss der Dicke auf den Umformwinkel in Abbildung 6.13 detaillierter betrachtet.

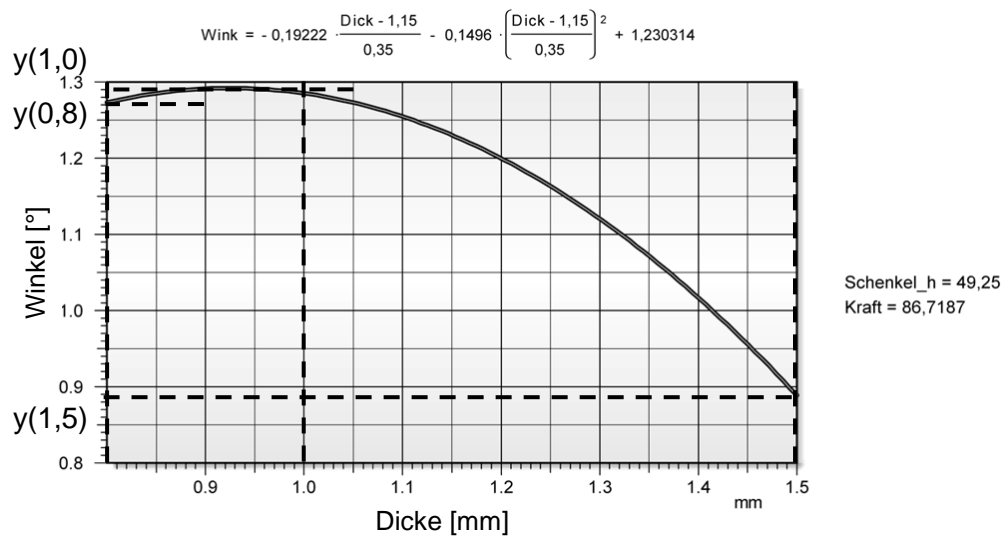


Abbildung 6.13: Abhängigkeit Winkel zu Dicke (Versuchsreihe 3, Visual XSel)

Eine Verkleinerung des Umformwinkels mit zunehmender Blechdicke wäre bei sonst gleichen Fertigungsparametern zu erwarten. Im Umformbereich bewirkt ein größerer Querschnitt eine größere Steifigkeit gegen die durch das Werkzeug verursachte Zugkraft, folglich müsste der Winkel stetig kleiner werden. Abbildung 6.13 zeigt allerdings einen nicht zu erwartenden Verlauf. Die in Abbildung 6.13 blau markierte Modellkurve stützt sich durch die drei Punkte der Blechdicken 0,8 mm, 1,0 mm und 1,5 mm (Tabelle 6.10), an die das Modell der Regressionsanalyse angepasst wird.

Für die Blechdicke 1,0 mm wurde der Blechwerkstoff DC04 verwendet. Der Unterschied der beiden Stahlwerkstoffe DX54 und DC04 ist für die Modellierung doch zu erheblich. Chargenschwankungen müssten daher bereits bei der Modellierung berücksichtigt werden. Das leicht unterschiedliche Verhalten der beiden Werkstoffe DC04 und DX54 sowie weiterer Werkstoffe muss zur exakten Modellierung separat untersucht werden.

Die absoluten Einflüsse der Faktoren werden dennoch bestätigt, allerdings zeigt diese Verzerrung der Modellbeschreibung leichte Veränderungen gegenüber den vorherigen Versuchen (Abbildung 6.14).

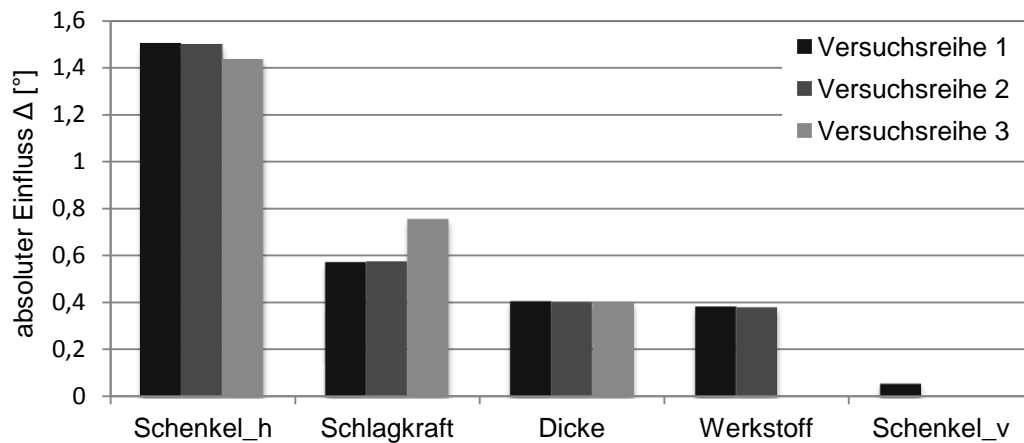


Abbildung 6.14: Vergleich absoluter Einflüsse, Paretodiagramm (Versuchsreihe 1-3)

In Abbildung 6.15 wird die Modellbeschreibung den realen Versuchen gegenübergestellt. Die Auswertung in Abbildung 6.15 zeigt, dass alle Werte nahe der dargestellten Geraden liegen und das Modell die Versuchsergebnisse somit gut darstellt. Die Residuenverteilung (Abbildung 6.16) deutet ebenso auf einen guten Abgleich hin, weshalb sich systematische Fehler ausschließen lassen.

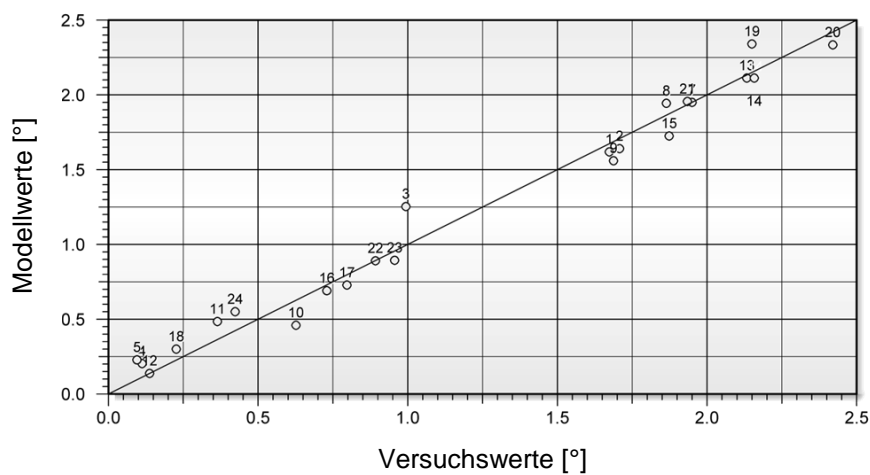


Abbildung 6.15: Modell- ggü. Versuchswerte (Versuchsreihe. 3, Visual XSel)

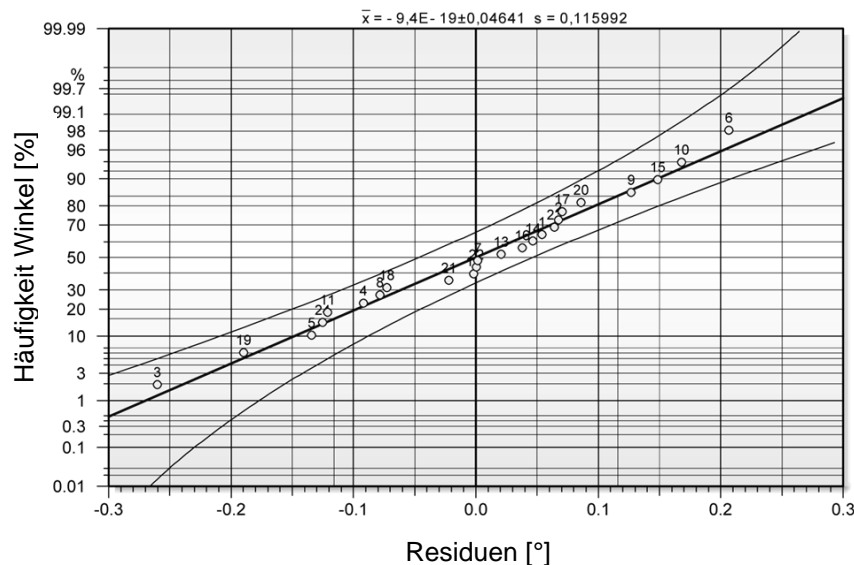


Abbildung 6.16: Residuenverteilung (Versuchsreihe 3, Visual XSel)

### 6.5.3 Modellbeschreibung

Die Zusammenhänge der vorliegenden Versuche können wie folgt beschrieben werden:

$$\alpha = -0,71727 \frac{\text{Schenkel}_h - 49,25}{15,75} + 0,377916 \frac{\text{Schlagkraft} - 86,71875}{37,59766} - 0,19222 \frac{\text{Dicke} - 1,15}{0,35} - 0,1496 \left( \frac{\text{Dicke} - 1,15}{0,35} \right)^2 + 1,230314 \quad (\text{Formel 6.9})$$

## 6.6 Versuchsreihe 4

### 6.6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Versuchsreihe 4

Bei Betrachtung der ersten drei Versuchsreihen wird der Faktor *Schenkel\_h* als nicht signifikant identifiziert und innerhalb der Grenzen zwischen einer Länge von 50 und 100 mm vernachlässigt. Der Einfluss der *Schlagkraft* geht linear ein und der Werkstoffeinfluss kann nicht durch wenige kategoriale Faktoren beschrieben werden, sonder muss weiterhin konstant gesetzt werden. Als Werkstoff dient in den folgenden Versuchen der Stahlwerkstoff DX54 und es kann nun ein vollständiges Modell für diesen Werkstoff erstellt werden. Es verbleiben die Faktoren *Schenkel\_b*, *Kraft* und *Dicke* (Tabelle 6.13).

In Versuchsreihe 4 wird nun der letzte wichtige Faktor, die horizontale Schenkellänge, genauer untersucht. Da sie einen enormen Einfluss auf den Umformwinkel hat, wird nun die Variation der horizontalen Schenkellänge durch die beiden Stufen 25 mm und 50 mm erweitert und es lassen sich die in Tabelle 6.14 zusammengefassten zusätzlichen Versuche ableiten.



Die untere Grenze des Versuchsraums wird von 33,5 mm auf 25,0 mm erweitert, und die Länge 50 mm ergibt einen zusätzlichen Zwischenwert. Eine Vergrößerung des Versuchsraumes über 65 mm hinaus ist nicht zielführend (Kapitel 6.3).

Die Schlagkraft kann linear modelliert werden und ist daher mit vier Stufen ausreichend genau beschrieben.

Es ergeben sich folgende Faktoren mit zugehörigen Stufen:

Bezeichnung	1	2	3	4
Schlagkraft	50 kN	80 kN	100 kN	120 kN
Dicke	0,8 mm	1,0 mm	1,5 mm	
Schenkel_b	25 mm	33,5 mm	50 mm	65,0 mm

*Tabelle 6.13: Parameter (Versuchsreihe 4)*

Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten in der Ergebnisdarstellung werden die Versuche weiterhin vollfaktoriell durchgeführt. Dabei werden alle bisher durchgeführten Versuche mit einbezogen und der Versuchsraum durch die in Tabelle 6.14 zusammengefassten Versuche ergänzt.

Nr.	Dicke [mm]	Schenkel_b [mm]	Kraft [kN]	Nr.	Dicke [mm]	Schenkel_b [mm]	Kraft [kN]
1	0,8	50	50	17	1,0	50	100
2	1,0	50	50	18	1,5	50	100
3	1,5	50	50	19	1,0	33,5	100
4	1,0	25	50	20	1,5	25	100
5	0,8	25	50	21	0,8	25	100
6	1,0	65	50	22	1,0	25	100
7	1,5	25	50	23	1,0	65	100
8	1,0	33,5	50	24	0,8	50	100
9	1,5	50	80	25	1,5	25	120
10	1,5	25	80	26	1,0	65	120
11	0,8	50	80	27	1,0	33,5	120
12	1,0	25	80	28	0,8	25	120
13	1,0	50	80	29	1,5	50	120
14	0,8	25	80	30	1,0	50	120
15	1,0	65	80	31	1,0	25	120
16	1,0	33,5	80	32	0,8	50	120

*Tabelle 6.14: Zusätzliche Versuche (Versuchsreihe 4)*

Zur Modellbildung werden nun 48 Versuche, inklusive der sechzehn verwendbaren Versuchsergebnissen für die Blechdicken 0,8 mm und 1,5 mm des Werkstoffes DX54, herangezogen. Der Versuchsraum ist in Abbildung 6.17 dargestellt.

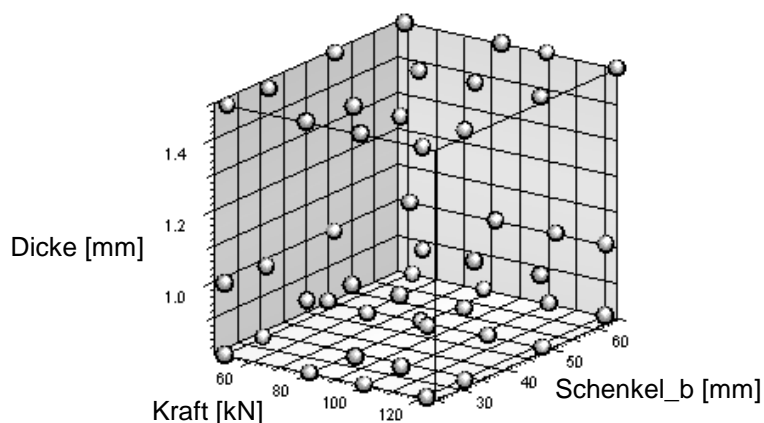


Abbildung 6.17: Versuchsraum (Versuchsreihe 4, Visual XSel)

### 6.6.2 Auswertung

Die Auswertung erfolgt erneut mit Visual XSel 10.0 und dem Modul Multiple Regression. Für die Modellbeschreibung werden Polynome bis zum Grad 4 zugelassen. Tabelle 6.15 gibt einen Überblick über die für das Modell ermittelten signifikanten Faktoren und Koeffizienten.

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	P-Value	Min	Max	Akt.Wert	Transf	Normiert
Constant	1,164454								
Schenkel_b	-0,9667	0,02265	-42,677	0	25	65	45	Keine	$((\text{Schenkel\_b} - 45)/20)$
Kraft	0,419243	0,02576	16,274	0	46,28906	124,3164	85,3	Keine	$((\text{Kraft} - 85,30273)/39,01367)$
Dicke	-0,18916	0,02070	-9,1376	0	0,8	1,5	1,15	Keine	$((\text{Dicke} - 1,15)/0,35)$
Schenkel_b^2	0,174959	0,04225	4,1411						
Kraft^4	-0,10051	0,04803	-2,0927	0,0425					
R <sup>2</sup> =0,981	DF=42								
Radj <sup>2</sup> =0,979	RMS=0,120		RMS/Ym=0,088						
Q <sup>2</sup> =0,9748									
Zielgröße-Transf	Keine								

Tabelle 6.15 Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 4)

Abbildung 6.18 zeigt die *analysis of means* der gefundenen Einflüsse. Aufgrund des identischen Werkstoffes zeigt auch der Einfluss der *Dicke* erneut einen plausiblen linearen Verlauf.

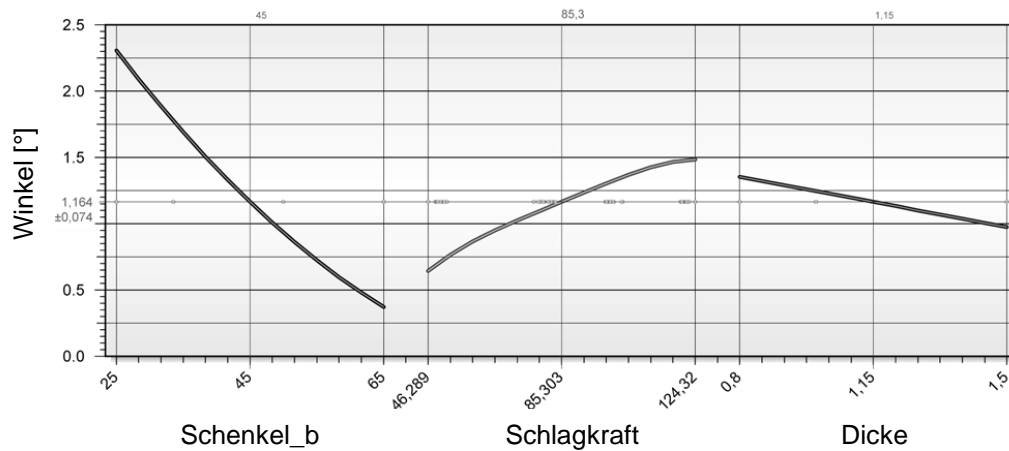


Abbildung 6.18: ANOM (Versuchsreihe 4, Visual XSel)

Der in Abbildung 6.19 zusammengefasste Vergleich der absoluten Effekte der Versuchsreihen zeigt, dass die Gewichtung der drei stärksten Faktoren größer wird. Vor allem der Einfluss des Faktors *Schenkel\_b* wird in der Versuchsreihe 4 deutlich größer, was am gewählten Variationsbereich liegt. Es verschiebt sich daher die Gewichtung der anderen Faktoren. Allerdings wird die angewandte Vorgehensweise durch die konstant bleibende Reihenfolge bestätigt.

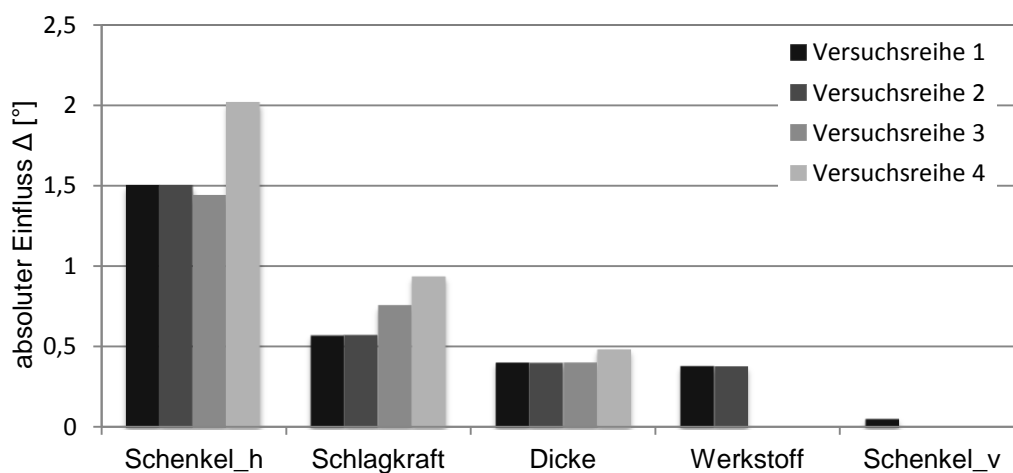


Abbildung 6.19: Vergleich absoluter Einflüsse (Versuchsreihe 1-4)

Die Abweichungen zwischen Modell und Versuchswerten für das gefundene Modell werden in Abbildung 6.20 und die Residuenverteilung in Abbildung 6.21 dargestellt. Beide Grafiken bestätigen die sehr gute Beschreibung der Realität durch das ermittelte Modell.

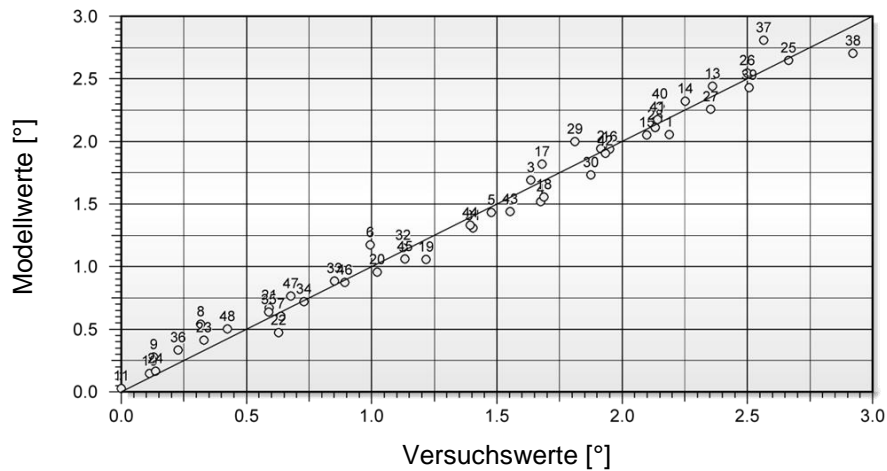


Abbildung 6.20: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Versuchsreihe 4)

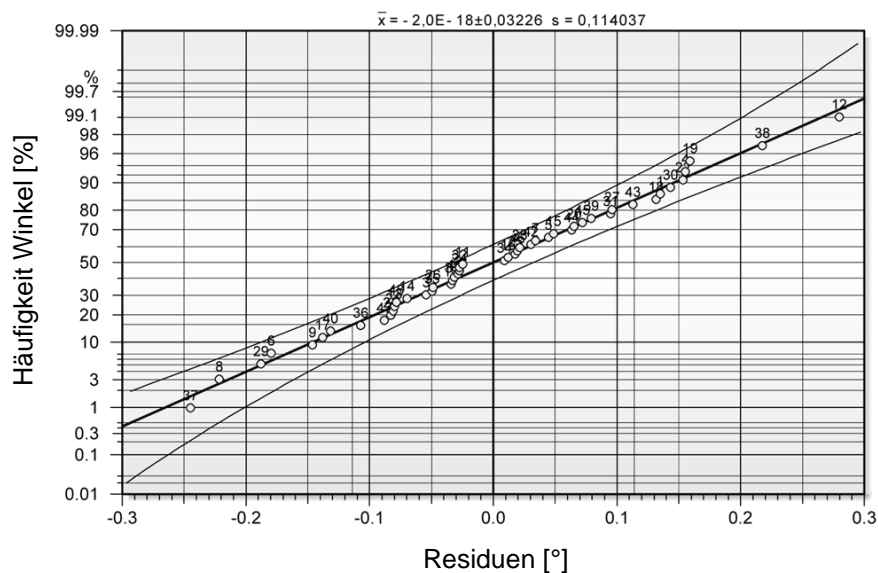


Abbildung 6.21: Residuenverteilung (Versuchsreihe 4, Visual XSel)

### 6.6.3 Modellbeschreibung

Das vorliegende Modell wird wie folgt beschrieben:

$$\alpha = -0,9667 * \frac{Schenkel_h - 45}{20} + 0,419243 * \frac{Schlagkraft - 85,30273}{39,01367} - 0,18916 * \frac{Dicke - 1,15}{0,35} + 0,174959 * \left( \frac{Schenkel_h - 45}{20} \right)^2 - 0,10051 * \left( \frac{Schlagkraft - 85,30273}{39,01367} \right)^4 + 1,164454$$

(Formel 6.10)

## 6.7 Versuchsreihe 4.2

### 6.7.1 Zielsetzung und Vorgehensweise der Versuchsreihe 4.2

Die Versuchsreihe 4.2 basiert auf den Ergebnissen der Versuchsreihe 4. Um den Einfluss des Faktors  $Kraft^4$  genauer zu untersuchen, findet nur eine erneute Auswertung statt. Seine p-Value (0,0425) erfüllt das Signifikanzkriterium nur knapp und er geht mit einem Koeffizienten von -0,10051 in das Modell ein. Die Auswirkungen einer Modellvereinfachung durch die Vernachlässigung des Faktors werden durch eine erneute Auswertung überprüft. Bei einer Vernachlässigung des Faktors bereits bei der Regressionsanalyse, passt sich das Modell wieder optimal an die Versuchswerte an und die Koeffizienten aller Faktoren verändern sich leicht (Tabelle 6.16).

Winkel	Koeffizient mit $Kraft^4$	Koeffizient ohne $Kraft^4$
Constant	1,164454	1,12498
Schenkel_b	-0,9667	-0,96824
Kraft	0,419243	0,419494
Dicke	-0,18916	-0,18916
Schenkel_b <sup>2</sup>	0,174959	0,179529
$Kraft^4$	-0,10051	fällt weg

Tabelle 6.16: Koeffizienten mit und ohne  $Kraft^4$

Die Gegenüberstellung von Modell- und Versuchswerten (Abbildung 6.22) sowie der Residuenverteilung (Abbildung 6.23) zeigt eine ausreichend genaue Modellierung.

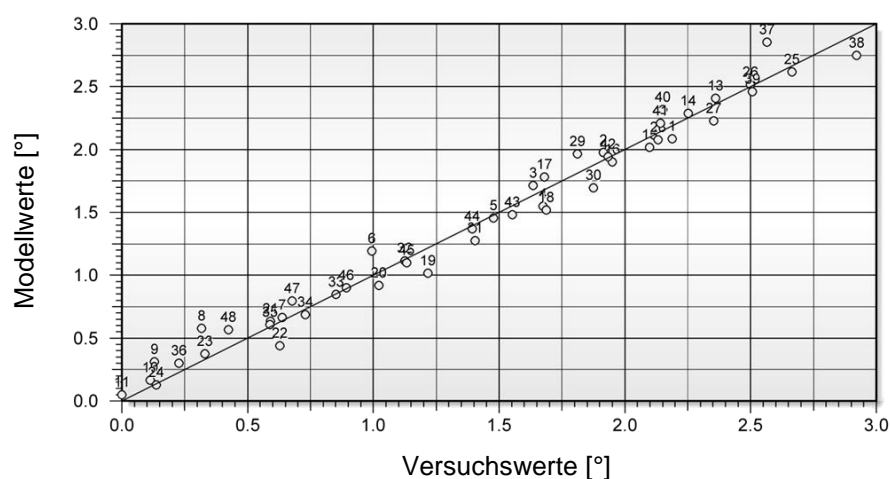


Abbildung 6.22: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Versuchsr. 4.2)

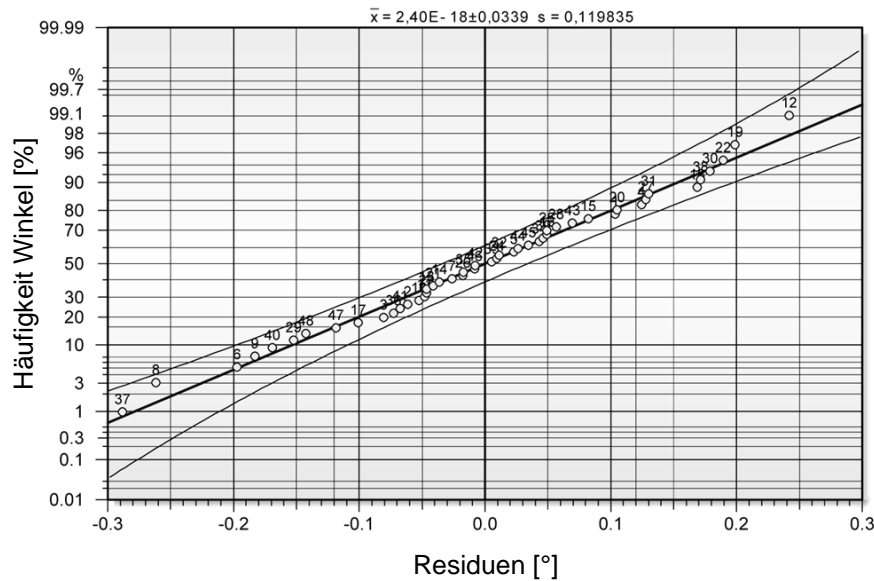


Abbildung 6.23: Residuenverteilung (Versuchsreihe 4.2, Visual XSel)

### 6.7.2 Modellbeschreibung

Zur Beschreibung des Systems mit allen signifikanten Faktoren aus Versuchsreihe 4 ergeben sich folgenden Formeln:

$$\alpha = -0,9667 * \frac{Schenkel_h - 45}{20} + 0,419243 * \frac{Schlagkraft - 85,30273}{39,01367} - 0,18916 * \frac{Dicke - 1,15}{0,35} + 0,174959 * \left( \frac{Schenkel_h - 45}{20} \right)^2 - 0,10051 * \left( \frac{Schlagkraft - 85,30273}{39,01367} \right)^4 + 1,164454$$

(Formel 6.11)

Versuchsreihe 4.2 ohne den Faktor  $Kraft^4$ :

$$\alpha = -0,96824 * \frac{Schenkel_h - 45}{20} + 0,419494 * \frac{Schlagkraft - 85,30273}{39,01367} - 0,18916 * \frac{Dicke - 1,15}{0,35} + 0,179529 * \left( \frac{Schenkel_h - 45}{20} \right)^2 + 1,12498$$

(Formel 6.12)

Versuchsreihe 4.2 ohne den Faktor  $Kraft^4$  und vereinfacht:

$$\alpha = -0,08881 * Schenkel_h + 0,01075 * Schlagkraft - 0,54046 * Dicke + 0,0004488 * Schenkel_h^2 + 3,91670$$

(Formel 6.13)

Der hergeleitete Zusammenhang ermöglicht die Abschätzung des erzielbaren Umformwinkels bei gegebenen Parametern. Zur Ermittlung der Fertigungsparameter wird die Formel nach der Kraft aufgelöst:

$$\text{Schlagkraft} = \frac{\alpha}{0,01075} + 8,2614 * \text{Schenkel}_h + 50,2753 * \text{Dicke} - 0,04174 * \text{Schenkel}_h^2 - 364,3442 \quad (\text{Formel 6.14})$$

Der Winkel  $\alpha$  sowie die Geometrie des Bleches sind gegeben und der Werkstoff weiterhin DX54. Um den gewünschten Winkel für das vorliegende Bauteil zu fertigen, muss lediglich die berechnete Schlagkraft am Kraftformer eingestellt werden.

## 6.8 Fertigungsgenauigkeit

Das in Kapitel 6.7 hergeleitete Modell dient als Referenz, um die Abweichungen der Versuchswerte vom Modell als Fertigungstoleranzen zu interpretieren. Abbildung 6.24 zeigt für die Werte aus Versuchsreihe 4 eine Normalverteilung.

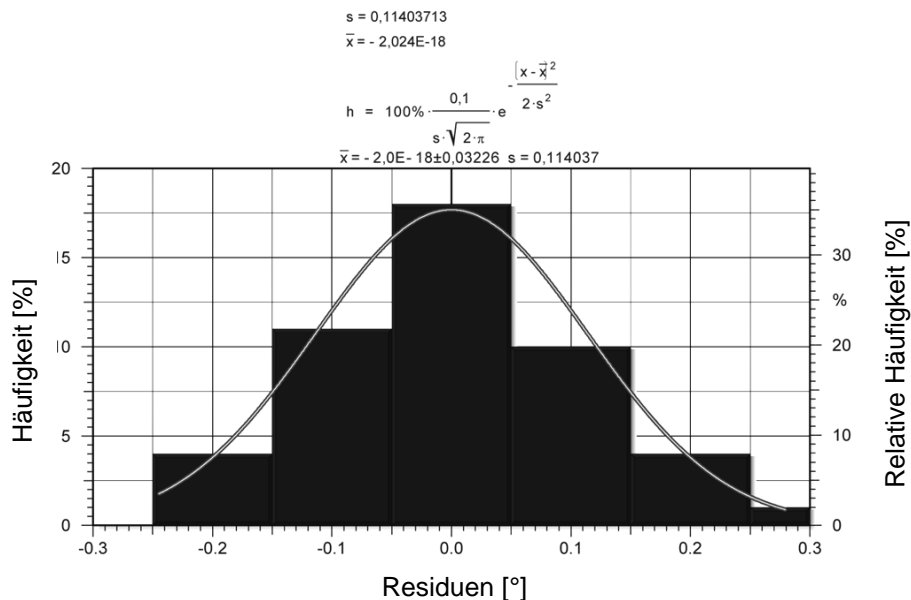


Abbildung 6.24: Normalverteilung (Versuchsreihe 4, Visual XSel)

Die Standardabweichung für eine Stichprobe  $s$  um den Mittelwert  $\bar{x}$  gibt an, dass ein Versuch mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3% weniger als  $s = 0,114037^\circ$  von der Modellvorhersage entfernt liegt. Bei einer Abweichung von maximal  $2 \cdot s = 0,228074^\circ$  ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 95,4 % und für  $3 \cdot s = 0,342111^\circ$  sogar 99,7%.

Die Genauigkeit wird über den gesamten Versuchsraum gemittelt und erhöht sich deutlich, wenn der Versuchsraum verkleinert wird und nur gut reproduzierbare Umformwinkel erzeugt werden. In Bereichen mit sehr geringer Umformung ist ein großer Unterschied zwischen Modell und Realität erkennbar. Eine Fokussierung auf Umformwinkel  $>1^\circ$  verbessern die

Übereinstimmung erheblich, da die schlechter übereinstimmenden Randbereiche des Versuchsraumes nicht betrachtet werden (Versuche 37 und 38 in Abbildung 6.22).

## 6.9 Vergleich der Modelle

In diesem Kapitel werden die gefundenen Modelle miteinander verglichen. Zur Darstellung der fünf Eingangsparameter und des erzielten Umformwinkels ist eine sechsdimensionale Beschreibung nötig. Zur Reduzierung der Auswertung auf einen dreidimensionalen Raum müssen Parameter fixiert werden. Abbildung 6.25 beschränkt sich auf die beiden wichtigsten Einflussgrößen *Schenkel\_b* und *Schlagkraft*. Die Blechdicke ist mit 1 mm, der Werkstoff mit DX54 und die vertikale Schenkellänge mit 50 mm fixiert.

Die vorliegende Grafik wurde auf Basis der mit Visual XSel 10.0 erzeugten Modellgleichungen in MATLAB erstellt.

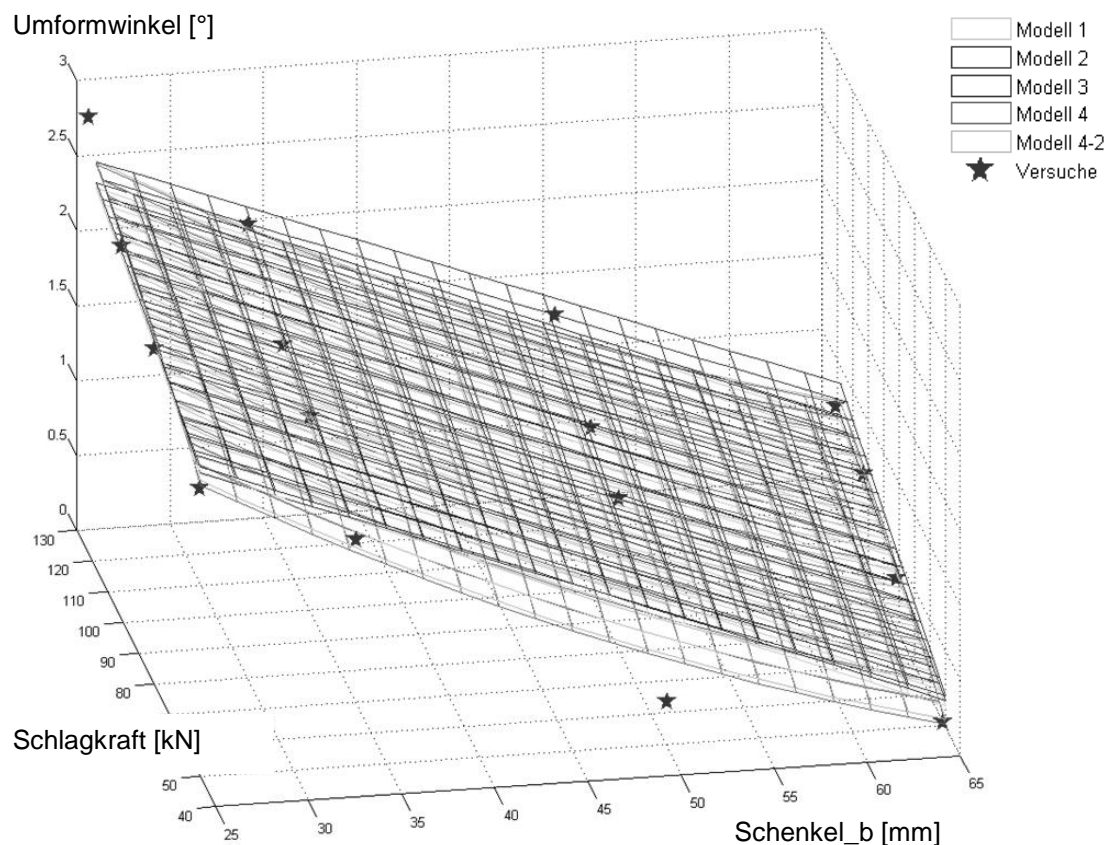


Abbildung 6.25: Vergleich der gefundenen Modellbeschreibungen

Bereits die linearen Modelle mit nur 16 notwendigen Versuchen aus den ersten beiden Versuchsreihen beschreiben das Systemverhalten sehr gut. Erst bei der Variation der horizontalen Schenkellänge in Versuchsreihe 4 werden die Nichtlinearitäten innerhalb des



Versuchsraumes festgelegt. Dies zeigt sich, da die Umformwinkel etwas geringer, als bei der linearen Interpolation angenommen, ausfallen. Zudem hängen sie von dem Quadrat der horizontalen Schenkellänge ab. Der Verzicht auf den Einfluss der Kraft<sup>4</sup> zeigt vernachlässigbar kleine Unterschiede zwischen Modell 4 und Modell 4.2. Faktor *Schenkel\_b* ist damit die einzige nichtlineare Einflussgröße.

Das System kann allgemein wie folgt beschrieben werden:

$$\alpha = a_1 * \text{Schenkel}_h + a_2 * \text{Schlagkraft} - a_3 * \text{Dicke} + a_3 * \text{Schenkel}_h^2 + a_4 \quad (\text{Formel 6.15})$$

Allerdings müssen die Koeffizienten  $a_i$  für unterschiedliche Werkstoffe, Werkzeuge oder Kraftformer neu ermittelt werden. Es können die Einflüsse der einzelnen Parameter auf den Umformwinkel jedoch auf andere Zusammenstellungen übertragen werden.

Das Modell 4 wird mit MATLAB in Abbildung 6.26 als Höhenprofil dargestellt. Es beschreibt die Zusammenhänge am besten und berücksichtigt Einflüsse höherer Ordnung. Mit dem Modell sind Umformwinkel zwischen 0° und etwa 2,7° fertigbar. Die Vergrößerung des *Schenkel\_b* erfordert zur Fertigung des gleichen Umformwinkels eine höhere Umformkraft.

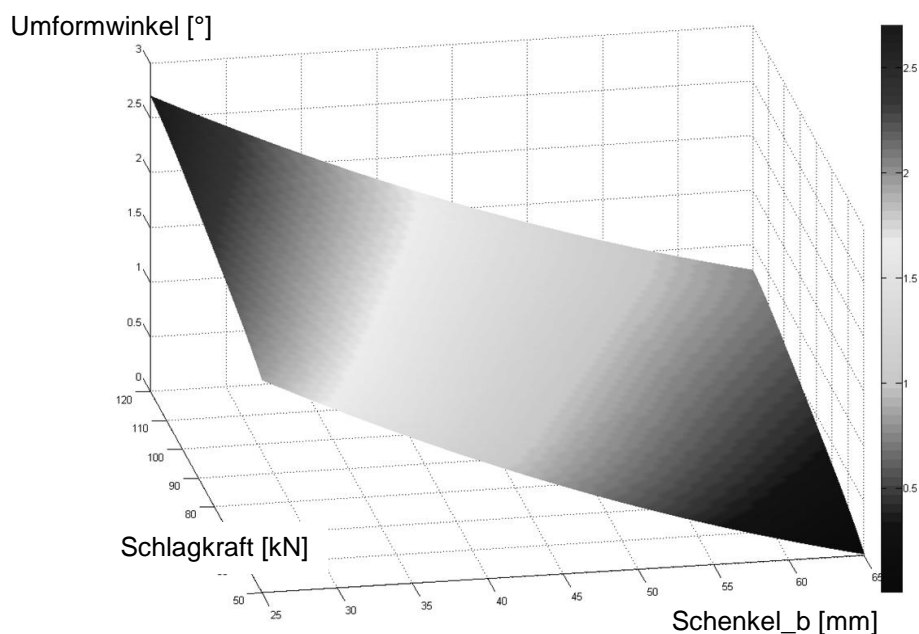


Abbildung 6.26: Winkel über *Schenkel\_b* und Kraft für Modell 4

### 6.10 Einflussparameter auf die Schlagkraft beim Strecken

Zur Beeinflussung des Umformwinkels ist die Zustellung bzw. die aus ihr resultierende *Schlagkraft* der einzige frei einstellbare Parameter. Die am Kraftformer benötigten Maschinenparameter zur exakten Einstellung der benötigten *Kraft* sind daher essentiell. Die Faktoren *Kraft*, *Blechdicke*, *Schenkel\_b* sowie die Summe *Z* aus *Kraft* und *Zustellung* werden in Visual XSel ausgewertet. Der Zusammenhang zwischen *Zustellung* und *Schlagtiefe* wurde in Kapitel 4.2.4 bereits genau beschrieben, weshalb lediglich die Summe aus beiden für den Kraftverlauf betrachtet werden muss. Bei der Winkelmessung werden weiterhin die gewonnen Versuchsergebnisse für den Werkstoff DX54 verwendet. Durch die vorhandenen Werte ist der Versuchsraum bereits gut mit Datenpunkten gefüllt (Abbildung 6.27).

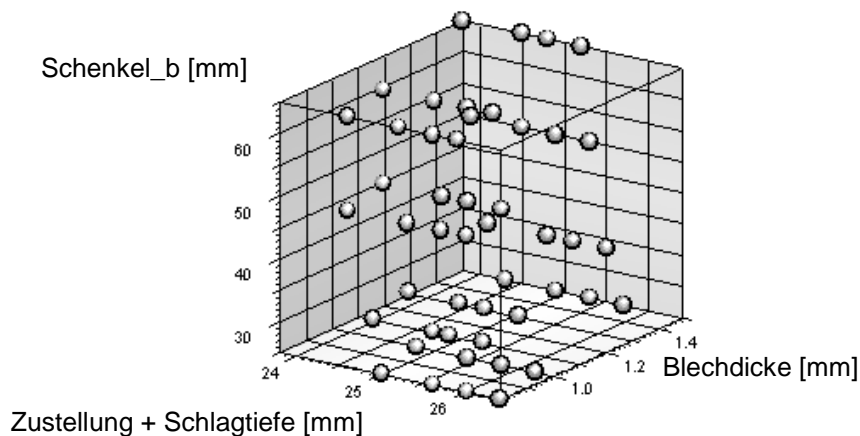


Abbildung 6.27: Versuchsraum (Kraft, Visual XSel)

Ohne Betrachtung von Wechselwirkungen liefert die Regressionsanalyse mit einem quadratischen Modell die beste Übereinstimmung zum Versuch (Tabelle 6.17).

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	p-value	Min	Max	AktWrt	Trans	Normiert
Constant	88,03948								
Z	67,3966	0,68938	97,764	0	23,8	26,4	25,1	-	$((Z-25,1)/1,3)$
Dicke	19,24851	0,379299	50,748	0	0,8	1,5	1,15	-	$((Dicke-1,15)/0,35)$
Schenkel_b	11,85488	0,378379	31,331	0	25	65	45	-	$((Schenkel\_b-45)/20)$
Z^2	3,866556	1,050274	3,6815	0					
Schenkel_b^2	-4,74386	0,669572	-7,085	0					
R <sup>2</sup> =0,995	DF=44								
Radj <sup>2</sup> =0,995	RMS=1,932		RMS/Ym=0022						
Q <sup>2</sup> =0,9939									
Zielgröße-Transf	Keine								

Tabelle 6.17: Ergebnisse Visual XSel (Abhängigkeit der Kraft)

Die analysis of means (Abbildung 6.28) verdeutlicht, dass die Summe aus *Zustellung* und *Schlagtiefe* der entscheidende Faktor auf die Schlagkraft ist, jedoch können *Dicke* und *Schenkel\_b* nicht unberücksichtigt bleiben.

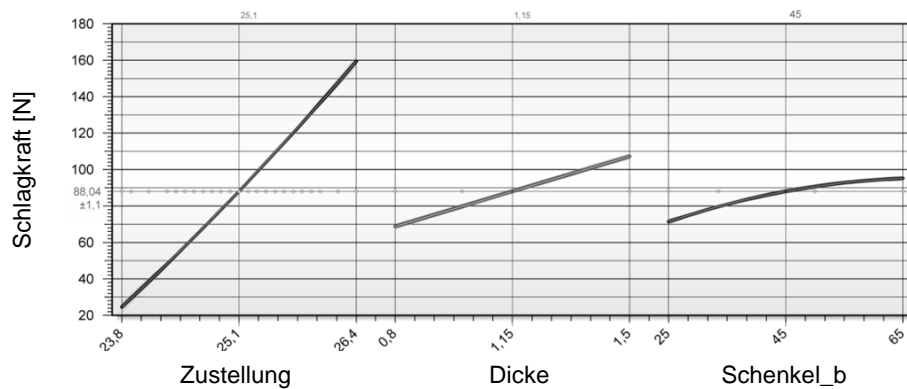


Abbildung 6.28: ANOM (Abhängigkeit der Kraft, Visual XSel)

Abbildung 6.29 zeigt in der Modellgrafik die Richtung des jeweiligen Einflusses und dessen Anteil an der resultierenden *Schlagkraft*. Die Koeffizienten werden hierzu normiert aufgetragen.

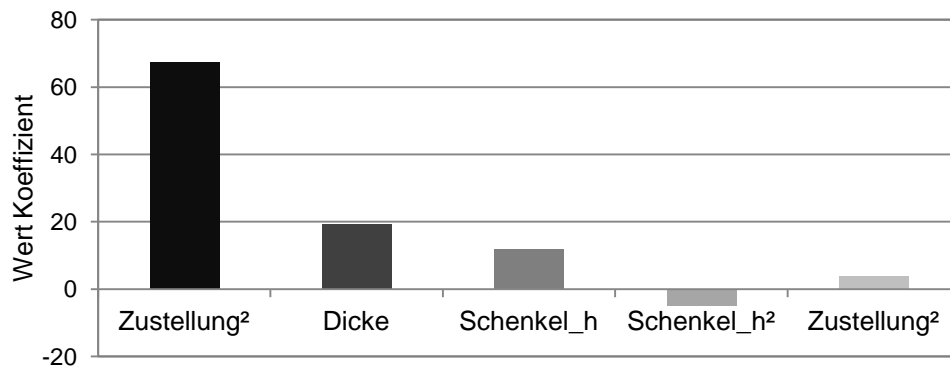


Abbildung 6.29: Modellgrafik (Abhängigkeit der Kraft, Visual XSel)

Die Abhängigkeit der *Kraft* zu den Parametern wird mit der Formel 6.16 beschrieben:

$$\begin{aligned}
 \text{Schlagkraft} = & 67,3966 * \frac{\text{Zustellung} + \text{Schlagtiefe} - 25,1}{1,3} + 19,24851 * \frac{\text{Dicke} - 1,15}{0,35} + \\
 & 11,85488 * \frac{\text{Schenkel}_h - 45}{20} + 3,866556 * \left( \frac{\text{Zustellung} + \text{Schlagtiefe} - 25,1}{1,3} \right)^2 - \\
 & 4,74386 * \left( \frac{\text{Schenkel}_h - 45}{20} \right)^2 + 88,03948 \quad (\text{Formel 6.16})
 \end{aligned}$$

Zum Einstellen einer *Schlagkraft* bleiben bei gegebener Bauteilgeometrie nur noch die Parameter *Zustellung* und *Schlagtiefe*. Die *Schlagtiefe* muss so hoch eingestellt werden,

dass ohne Auslösen eines Hubes, keine ungewollte Umformung erzeugt wird. Am zur Verfügung stehenden Eckold Kraftformer beträgt die maximale Zustellung 2 mm. Dieser Wert wird im Folgenden in die Formel eingesetzt. Wird die Gleichung vereinfacht und nach der *Zustellung* aufgelöst, kann kein ausreichend genaues Ergebnis berechnet werden.

Die kleinen Fehler der bereits gerundeten Koeffizienten summieren sich durch ein Quadrieren und erneutes Runden umso stärker auf, sodass es sinnvoller ist, das Modell erneut in Visual XSel erzeugen zu lassen. Bei der Regressionsanalyse wird die *Summe* aus *Zustellung* und *Schlagtiefe* als Zielgröße angegeben.

Da beim erzeugten Modell die Koeffizienten der quadratischen Einflussfaktoren sehr klein sind und die realen Ergebnisse ungeordnet um die Modellergebnisse streuen, werden diese vernachlässigt. Ein lineares Modell, das zur Berechnung der Zustellung dient, ist ausreichend.

$$\text{Zustellung} = 0,019176 * \text{Kraft} - 1,06604 * \text{Dicke} - 0,01118 * \text{Schenkel}_h + 25,17785 - \text{Schlagtiefe} \quad (\text{Formel 6.17})$$

Mit der maximalen *Schlagtiefe* auf 2 mm ergibt sich:

$$\text{Zustellung} = 0,019176 * \text{Kraft} - 1,06604 * \text{Dicke} - 0,01118 * \text{Schenkel}_h + 23,17785 \quad (\text{Formel 6.18})$$

Zur Überprüfung des linearen Modells werden die Modellwerte gegenüber den Versuchswerten aufgetragen (Abbildung 6.30), die Residuenverteilung (Abbildung 6.31) analysiert und die Normalverteilung (Abbildung 6.32) betrachtet.

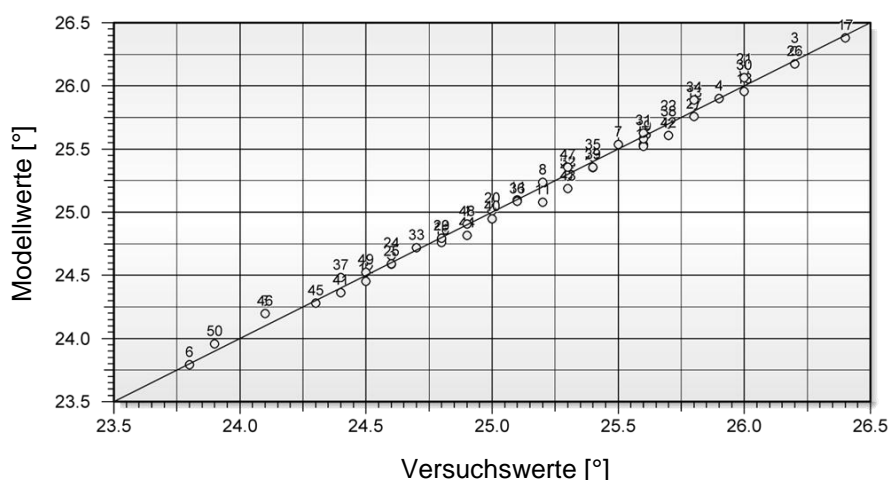


Abbildung 6.30: Modell- ggü. Versuchswerten (Zustellung, Visual XSel)

Sowohl in Abbildung 6.30 als auch bei der Residuenverteilung in Abbildung 6.31 liegen alle Punkte innerhalb des Vertrauensbereichs. Statistische Ausreißer oder systematische Abweichungen von der Geraden sind nicht festzustellen.

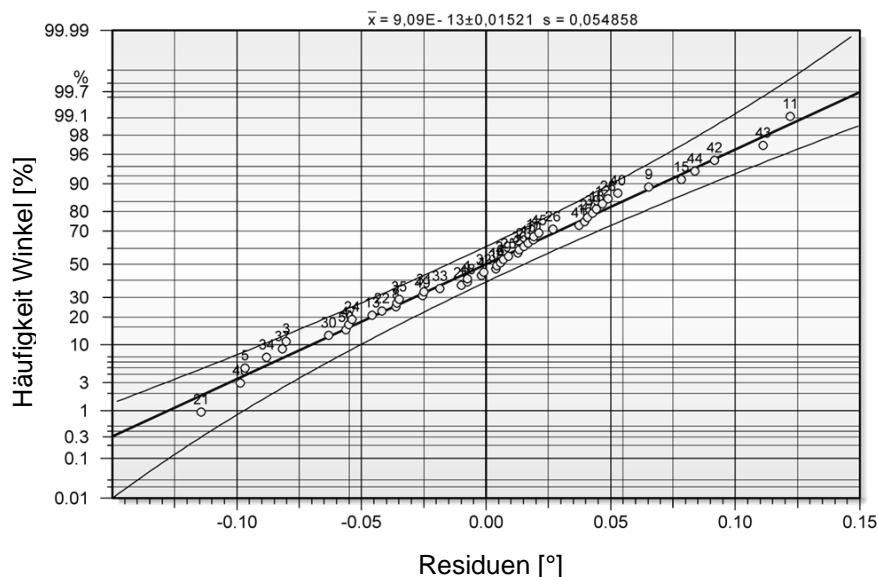


Abbildung 6.31: Residuenverteilung (Zustellung, Visual XSel)

Abbildung 6.32 zeigt eine normalverteilte Häufigkeit der Residuen und bestätigt damit die gute Anpassung des Modells. Die Genauigkeit ist ausreichend, da die Zustellung am Kraftformer lediglich mit 0,1 mm Schritten eingestellt werden kann und die Standardabweichung  $s=0,054858$  beträgt.

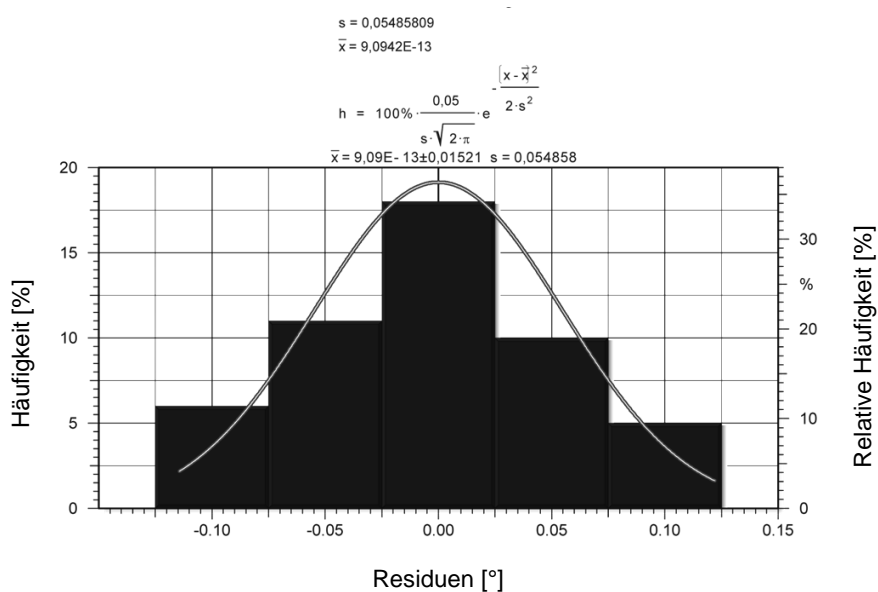


Abbildung 6.32: Normalverteilung (Zustellung, Visual XSel)

## 6.11 Versuche mit Stauchen

### 6.11.1 Vorversuche

Die Zusammenhänge für das Verfahren Strecken konnten in Kapitel 6.1 - 6.10 bereits sehr gut beschrieben werden. In diesem Kapitel werden die gesammelten Erkenntnisse auf den Stauchprozess übertragen.

Im ersten Schritt wird zunächst untersucht, wie sich eine Variation der Schlagkraft auf die gefertigten Umformwinkel auswirkt. Die in Tabelle 6.18 aufgeführten Versuche werden mit dem Werkstoff DC04, einer *vertikalen Schenkellänge* von 50 mm, einer *horizontalen Schenkellänge* von 33,5 mm, einer *Blechdicke* von 1,0 mm und einer *Schlagtiefe* von 2 mm durchgeführt.

Zustellung [mm]	Kraft [kN]	Winkel [°]
21,2	25,976	0
21,4	30,957	0,395
21,4	31,250	0,475
21,5	33,595	0,753
21,8	44,336	0,766
21,6	37,500	0,782
21,6	37,500	0,802
21,8	45,801	1,028
22,0	54,922	1,126
22,2	62,793	1,215
22,0	54,589	1,226
22,4	74,316	1,268
22,0	53,418	1,315
22,5	76,613	1,432
22,6	82,277	1,650
22,8	93,313	1,661
23,0	105,957	1,849
23,5	134,473	2,917

Tabelle 6.18: Versuche für Stauchen 1

Die Regressionsanalyse der Versuchsergebnisse ergibt die in Tabelle 6.19 zusammengefassten Kennwerte und Koeffizienten.

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	P-value	Min	Max	Wert	Transf	Normiert
Constant	1,281968								
Kraft	0,437283	0,05324	8,21335	0	25,9765 6	134,472 7	80,22	Keine	((Kraft- 59,977)/29,541)
Kraft^2	-0,2881	0,06006	-4,79647	0					
Kraft^3	0,148463	0,02818	5,26729 5	0					
R²=0,971	DF=14								
Radj²=0,965	RMS=0,12 2		RMS/Ym=0,11						
Q²=0,9012									
Zielgröße- Transf	Keine								

Tabelle 6.19: Ergebnisse Visual XSel (Stauchen 1)

In Abbildung 6.33 werden die Umformwinkel über der *Schlagkraft* aufgetragen. Zur Beschreibung der Zusammenhänge wird im ermittelten Modell ein Polynom dritten Grades verwendet. Der Einfluss der *Kraft*<sup>4</sup> ist nicht signifikant und höhere Polynomgrade können in der Software nicht berücksichtigt werden.

Die in Abbildung 6.33 dargestellte Formel beschreibt bisher nur den Einfluss der *Schlagkraft*, da die weiteren Faktoren noch nicht berücksichtigt sind. Allerdings ist erkennbar, dass sich der in Kapitel 6.7 ermittelte lineare Einfluss der *Schlagkraft* nicht auf den Stauchprozess übertragen lässt.

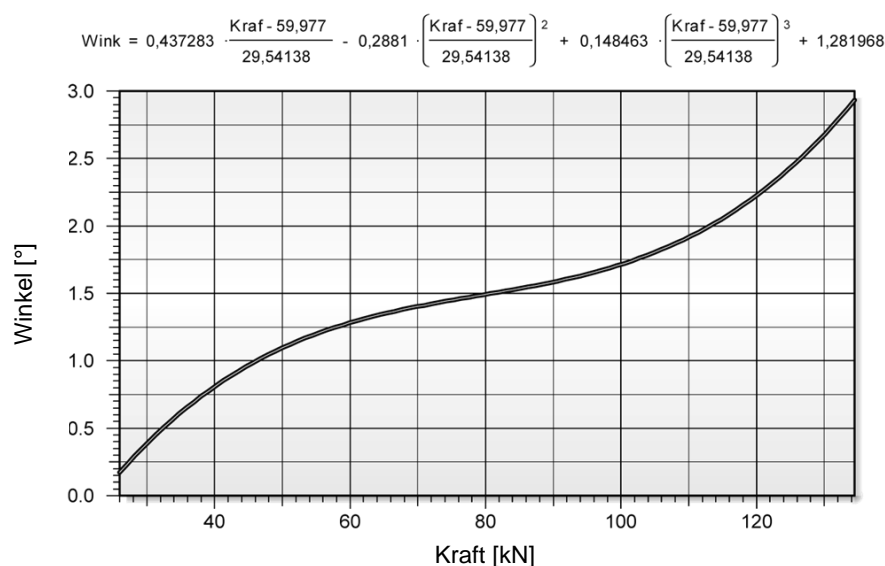


Abbildung 6.33: Zusammenhang Kraft und Winkel (Stauchen 1, Visual XSel)

Bei der Betrachtung der Modellwerte im Vergleich zu den Versuchswerten (Abbildung 6.34) sowie der Residuenverteilung (Abbildung 6.35) lassen sich weder Ausreißer noch systematische Abweichungen erkennen.

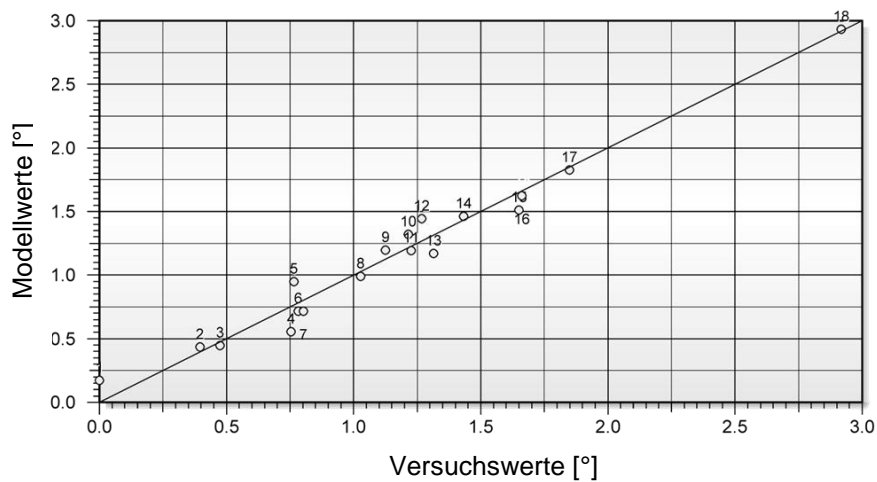


Abbildung 6.34: Modell- ggü. Versuchswerten (Stauch 1, Visual XSel)

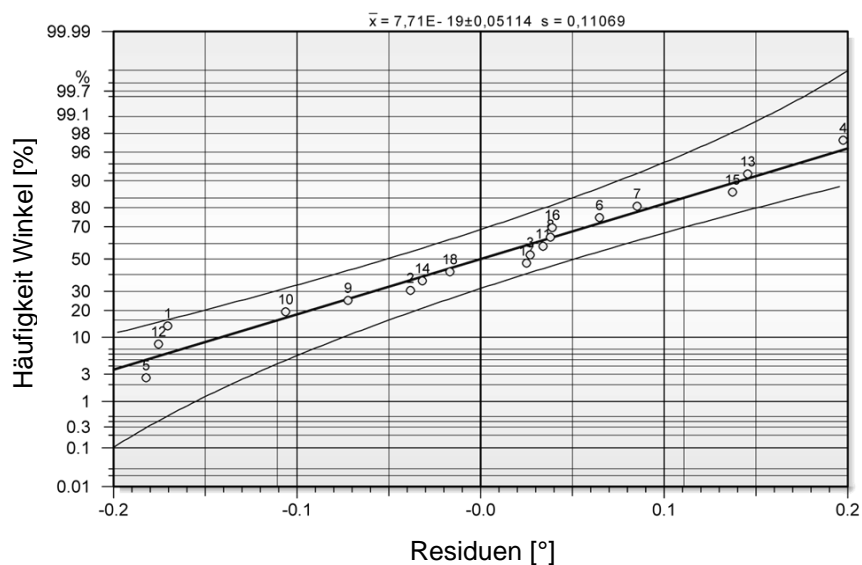


Abbildung 6.35: Residuenverteilung (Stauch 1, Visual XSel)

Allerdings zeigt Abbildung 6.36, dass die Residuen ohne erkennbares Muster um den Erwartungswert streuen und nicht normalverteilt sind. Dies ist ein klares Zeichen für einen instabilen Prozess.



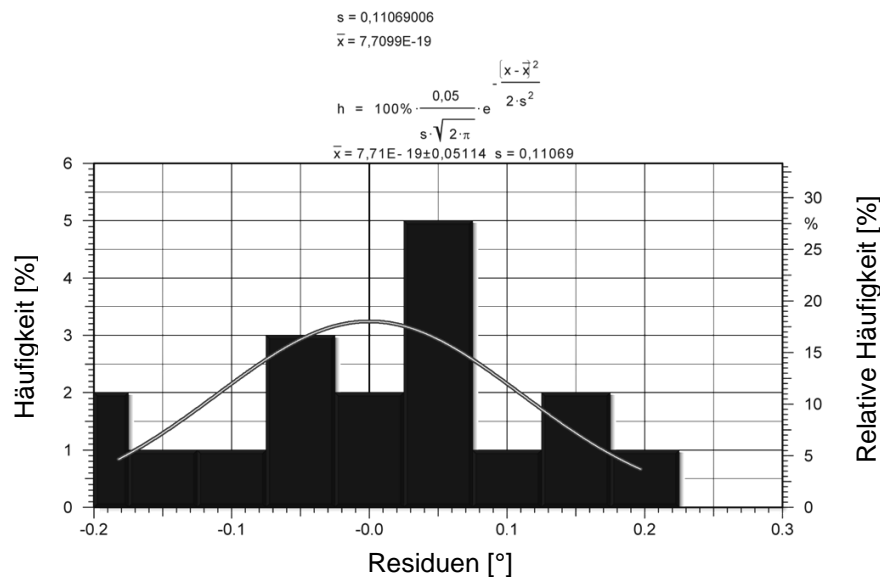


Abbildung 6.36: Normalverteilung (Stauchung 1, Visual XSel)

Die Versuchsergebnisse können zusammen mit dem Regressionsmodell dargestellt werden, da bei diesem Vorversuch nur ein Parameter variiert wurde (Abbildung 6.37).

Zwischen den Modell- und Versuchsergebnissen sind die Abweichungen relativ gering, allerdings ist der Einfluss der Kraft vom Streckprozess nicht auf das Verfahren Stauchen übertragbar. In Abbildung 6.37 ist zum Vergleich der lineare Einfluss aus dem Modell der Versuchsreihe 4-2 dargestellt.

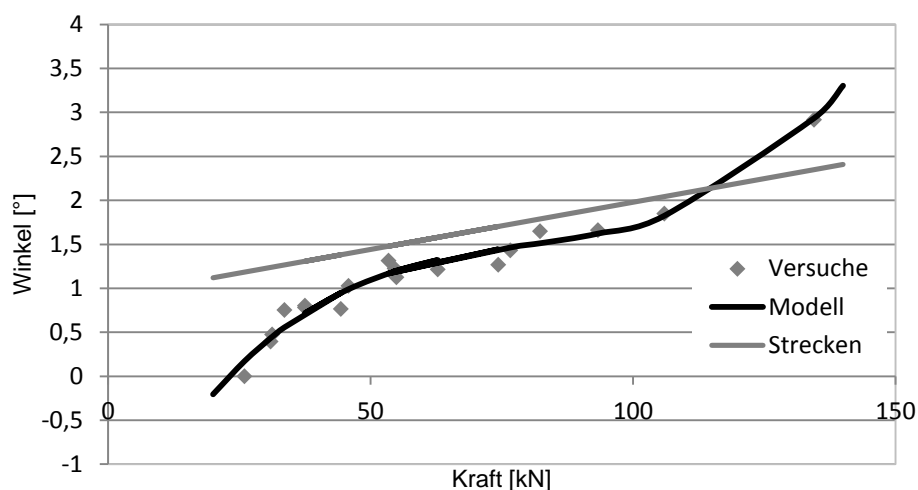
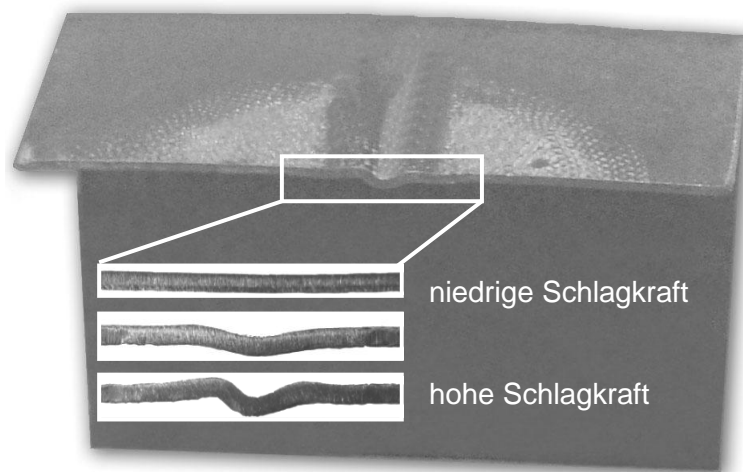


Abbildung 6.37: Modell- und Versuchswerte Stauchen; Modellwerte Strecken

Zur besseren Modellierung können die Grenzen des Versuchsraums enger gesetzt werden. Dabei ist es zunächst wichtig die Qualität der Bauteile bzw. die Grenze zwischen Gutteil und Ausschuss genau festzulegen. Beim Stauchprozess kommt es bei jeder Umformoperation zu

einer Faltenbildung (Abbildung 6.38), die mit steigendem Umformwinkel stetig zunimmt und ab einer gewissen Höhe zu einer Werkzeugberührung führt.



*Abbildung 6.38: Faltenbildung beim Stauchen*

Bei mehreren Umformoperationen wird die Falte vom jeweils nächsten Schlag wieder platt gedrückt. Eine realitätsnahe Modellierung ist daher kaum bzw. gar nicht möglich. In den folgenden Kapiteln werden Grenzen gesetzt und ein Modell für den definierten Arbeitsbereich entwickelt.

### 6.11.2 Parametereinstellungen

Die maximale Faltenhöhe wird durch die Geometrie der Werkzeugbacken bestimmt, da ab einer gewissen Faltenhöhe eine Berührung mit dem Werkzeug stattfindet. Es entstehen dann undefinierbare und nicht vorhersehbare Verformungen, die nicht durch weitere versetzte Schläge geglättet werden können. Da diese Grenze stark von den geometrischen Eigenschaften des Werkstückes abhängt, kann beim Stauchen keine allgemeingültige Bandbreite für die Kraft definiert werden. Es ist daher kein mit den Streckversuchen vergleichbarer Versuchsplan aufstellbar.

Die Geometriemerkmale werden analog zu den Versuchsreihen für den Streckprozess variiert. Der Faktor Schenkel\_b wird mit den Stufen 25 mm, 33,5 mm, 50 mm und 65 mm untersucht. Der Versuchswerkstoff DC04 steht in den Dicken 0,9 mm und 1,5 mm zur Verfügung.

Die Kraft wird jeweils mit vier Stufen abgebildet. Die Umformkraft orientiert sich an den fertigmöglichen Umformgrenzen. Bei der unteren Kraftgrenze wird das Bauteil gerade noch minimal verformt und bei der oberen Grenze wird die Faltenbildung gerade noch nicht durch

das Werkzeug behindert. Zusätzlich werden für die Schlagkraft zwei Zwischenstufen definiert und möglichst gleichmäßig über die zulässige Bandbreite verteilt.

Mit den vorliegenden Vorgaben ergeben sich folgende Parameter:

Bezeichnung	1	2	3	4
Schlagkraft	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
Dicke	0,9 mm	1,5 mm		
Schenkel_b	25 mm	33,5 mm	50 mm	65,0 mm

Tabelle 6.20: Parameter (Stauchen 2)

Die einzustellende Kraft wird sehr pragmatisch durch mehrere Versuch bestimmt. Um die richtigen Grenzen und gleichzeitig eine gleichmäßige Verteilung der Werte zu erreichen, sind teilweise mehr als vier Versuche notwendig (Tabelle 6.21).

	Bauteilgeometrie			Messergebnisse			
	Dicke [mm]	Schenkel_b [mm]	Teil	Zustellung [mm]	Schlagtiefe [mm]	Kraft [kN]	Winkel [°]
1	0,9	25	1	23,0	2,0	84,0227	2,0529
2	0,9	25	2	23,5	2,0	113,1840	2,2470
3	0,9	25	3	22,0	2,0	34,2237	1,9789
4	0,9	25	5	23,5	2,0	112,7950	2,4678
5	0,9	65	6	22,0	2,0	57,8620	0,4679
6	0,9	65	7	23,0	2,0	105,6860	0,9005
7	0,9	65	8	22,5	2,0	77,2771	0,8714
8	0,9	33,5	10	22,0	2,0	40,3387	1,6856
9	0,9	33,5	11	21,7	2,0	28,1533	1,3577
10	0,9	33,5	12	22,5	2,0	64,6840	1,9294
11	0,9	33,5	13	23,0	2,0	93,0359	1,8236
12	0,9	33,5	14	21,5	2,0	22,3632	0,9769
13	0,9	65	15	21,8	2,0	48,8742	0,0737
14	0,9	50	16	22,0	2,0	49,6068	1,0725
15	0,9	50	17	21,5	2,0	31,9306	0,3119
16	0,9	50	18	22,5	2,0	74,9840	1,2567
17	0,9	50	19	23,5	2,0	134,9430	1,3641
18	1,5	33,5	20	22,0	2,0	68,7480	1,6460
19	1,5	33,5	21	21,5	2,0	46,0843	1,1263
20	1,5	33,5	23	23,5	2,0	156,9180	0,9617
21	1,5	33,5	24	23,0	2,0	125,5280	1,7701
22	1,5	25	25	22,0	2,0	61,9004	1,7223
23	1,5	25	26	21,5	2,0	40,0202	1,1265
24	1,5	25	27	23,0	2,0	113,3360	2,1235
25	1,5	25	28	22,5	2,0	86,6279	1,9848
26	1,5	50	29	21,5	2,0	60,9513	0,3015
27	1,5	50	30	22,0	2,0	81,9844	1,0153
28	1,5	50	31	22,5	2,0	109,4190	1,0486
29	1,5	50	32	23,0	2,0	139,7200	1,1651
30	1,5	65	33	21,5	2,0	65,6968	0,3294
31	1,5	65	35	22,5	2,0	114,1960	0,5095
32	1,5	65	36	23,0	2,0	142,7840	0,6399
33	1,5	65	37	22,0	2,0	90,9021	0,3051

Tabelle 6.21: Versuchsplan (Stauchen 2)

### 6.11.3 Auswertung

Die Versuchsergebnisse werden ebenfalls mit Visual XSel 10.0 ausgewertet und mit Hilfe der Regressionsanalyse wird ein Modell erzeugt, das die nun beliebig verteilten Messwerte möglichst gut annähert. Bei einem maximal möglichen Polynomgrad von vier ergeben sich für das Modell folgende Werte:

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	p-value	Min	Max	Wert	Transf	Normiert
Constant	1,3327								
Schenkel_b	-0,7873	0,0401	-19,657	0	25	65	45	Keine	$((\text{Schenkel\_b} - 45)/20)$
Kraft	0,4284	0,0599	7,1489	0,0023	22,36	156,92	89,7	Keine	$((\text{Kraft} - 89,6406)/67,2774)$
Dicke	-0,1992	0,0319	-6,2454	0,0129	0,9	1,5	45	Keine	$((\text{Dicke} - 1,2)/0,3)$
Schenkel_b*Kraft	0,2812	0,08317	3,3809	0					
Kraft*Dicke	0,1991	0,07461	2,6693	0					
Kraft^4	-1,0314	0,14441	-7,1424	0,0023					
R <sup>2</sup> =0,948	DF=26								
Radj <sup>2</sup> =0,937	RMS 0,1643		RMS/Ym=0,13						
Q <sup>2</sup> =0,9173									
Zielgröße-Transf	Keine								

Tabelle 6.22: Ergebnisse Visual XSel (Stauchen 2,  $x^4$ )

Abbildung 6.39 zeigt die *analysis of mean* (ANOM) für die Einflüsse der Faktoren *Schenkel\_b*, *Kraft* und *Dicke* auf den Umformwinkel.

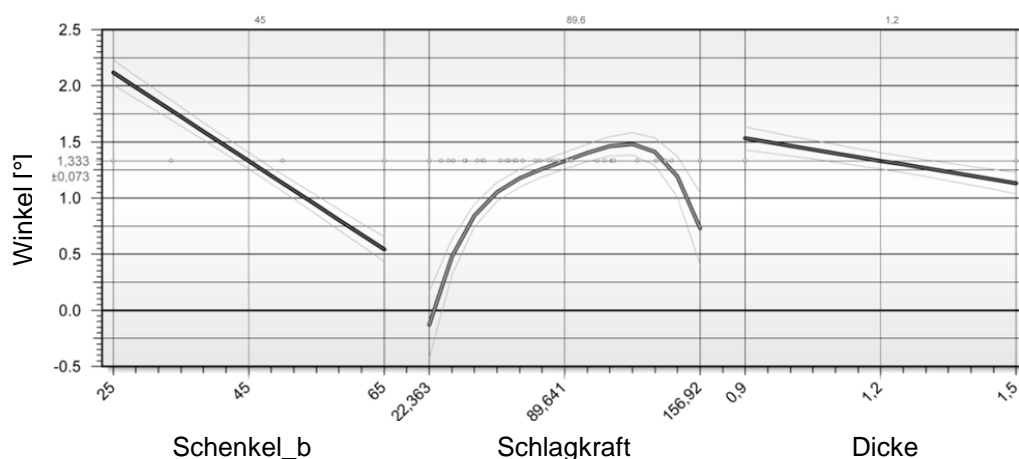


Abbildung 6.39: ANOM (Stauchen 2,  $x^4$ , Visual XSel)

Der Verlauf des Krafteinflusses widerspricht den Versuchsergebnissen. Bei zunehmender Kraft vergrößert sich der Umformwinkel stetig bis hin zu einer Grenze, ab der die Faltenbildung durch das Werkzeug selbst behindert wird. Im Bereich hoher Kräfte wird der Einfluss maßgeblich durch die Komponente  $Kraft^4$  bestimmt. Aufgrund des negativen Vorzeichens des zugehörigen Koeffizienten, strebt das vorliegende Modell für große Kräfte gegen  $-\infty$ . Die große Standardabweichung von 0,144405 für den Faktor  $Kraft^4$  deutet in diesem Bereich auf eine ungenaue Modellierung hin.

Eine mögliche Sättigung ist mit dem gefundenen Polynom mathematisch aber nicht darstellbar. Allerdings ist es auch nicht nötig außerhalb des Versuchsraumes plausible Ergebnisse zu erhalten.

Die Ergebnisse für den Streckprozess zeigen, dass offensichtlich keine Wechselwirkungen zwischen den Parametern bestehen und bleiben im Folgenden vorerst unberücksichtigt. Die beim Stauchen festgestellten signifikanten Wechselwirkungen ergeben sich durch die Streuung der Versuchsergebnisse und die Verzerrung aufgrund der unterschiedlichen Schlagkräfte. Da bei dieser Annahme weiterhin ein ähnlicher Verlauf wie in Abbildung 6.39 festzustellen ist, werden nur Polynome bis zum dritten Grad zugelassen und auf den Faktor  $Kraft^4$  verzichtet.

Eine erneute Regressionsanalyse enthält, unter den oben genannten Voraussetzungen, nur noch signifikante und maximal quadratische Terme. Für die Modellierung ohne Wechselwirkungen ergibt sich die Übersicht in Tabelle 6.23:

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	p-value	Min	Max	AktWert	Transf	Normiert
Constant	1,387393								
Schenkel_b	-0,76556	0,049475	-15,4735	0	25	65	45	Keine	$((Schenkel\_b - 45)/20)$
Kraft	0,372532	0,074904	4,973462	0	22,36	156,92	89,64	Keine	$((Kraft - 89,6406)/67,277)$
Dicke	-0,19399	0,039587	-4,90038	0	0,9	1,5	1,2	Keine	$((Dicke - 1,2)/0,3)$
Kraft^2	-0,62041	0,129535	-4,7895	0					
R <sup>2</sup> =0,907	DF=28								
Radj <sup>2</sup> =0,893	RMS=0,213		RMS/Ym=0,17						
Q <sup>2</sup> =0,8502									
Zielgröße-Transf	keine								

Tabelle 6.23: Ergebnisse Visual XSel (Stauchen 2,  $x^2$  ohne WW)

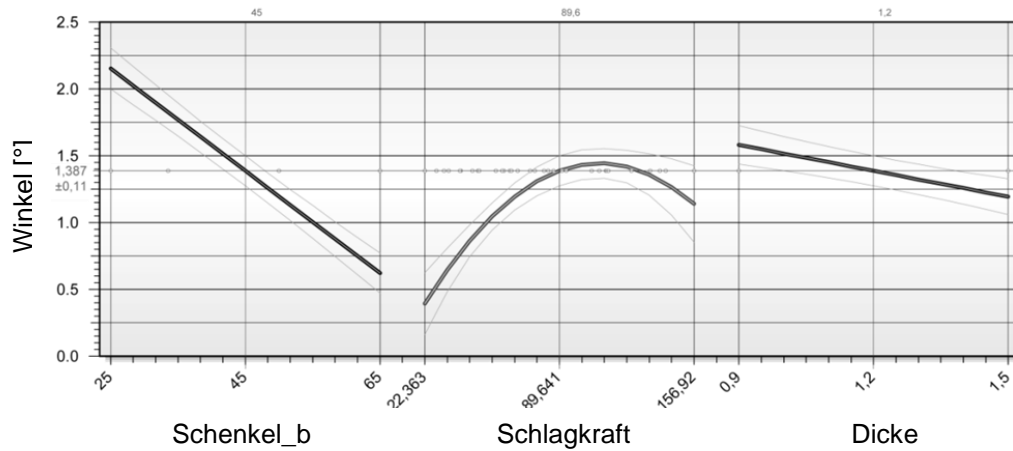


Abbildung 6.40: ANOM (Stauchung 2,  $x^2$  ohne WW, Visual XSel)

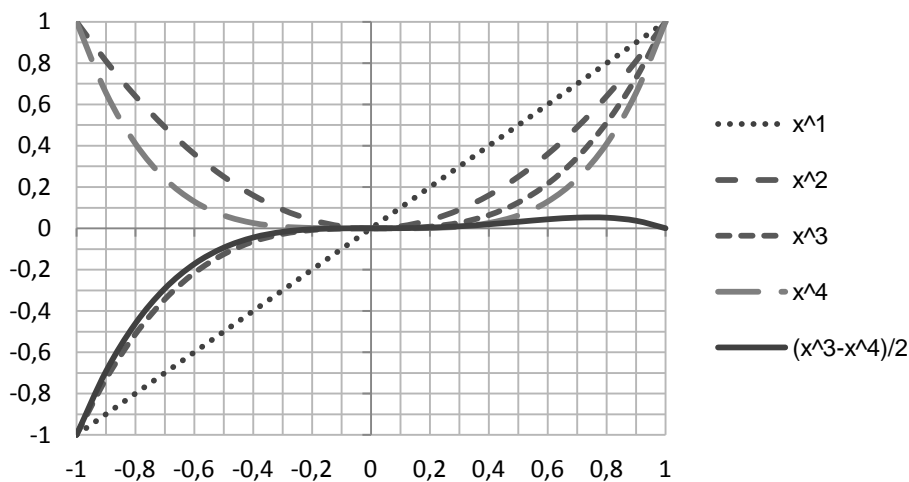


Abbildung 6.41: Funktionen für die Regressionsanalyse

Das Systemverhalten für den Faktor *Schlagkraft* lässt sich mit den Beschreibungsmöglichkeiten der verwendeten Regressionsanalyse nicht besser darstellen. In Abbildung 6.41 sind die zur Verfügung stehenden Funktionen qualitativ aufgetragen. Alle Funktionen sind punkt- oder achsensymmetrisch. Es ist daher nicht möglich einen stetig wachsenden Verlauf mit einer Sättigung an der oberen Prozessgrenze darzustellen. Am nächsten kommt dem gewünschten Verlauf eine Kombination der Funktionen  $y=x^3$  und  $y=x^4$ . Die Division durch zwei erfolgt innerhalb der Wertemenge  $[-1;1]$ . Da aber keine Verschiebung in horizontaler Richtung möglich ist, liegt der Punkt der angenäherten Sättigung immer mittig zur Definitionsmenge.

Trotz der Abweichungen in der Modellbeschreibung zum realen Fertigungsprozess, liefert der Vergleich der Modellwerte gegenüber den Versuchswerten (Abbildung 6.42) und der

Residuenverteilung (Abbildung 6.43) eine annehmbare Übereinstimmung von Modell und Realität. Die Darstellung ist auf das quadratische Modell ohne Wechselwirkungen beschränkt, da das Modell mit Polynomen vierten Grades keine höhere Genauigkeit erzielt.

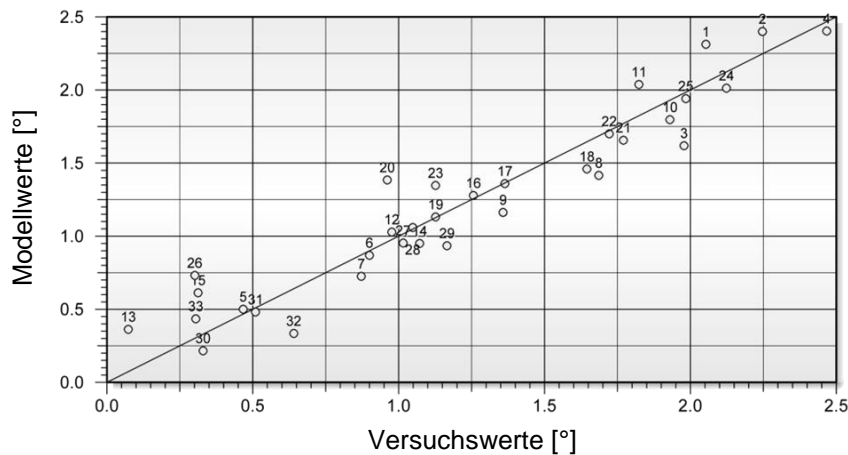


Abbildung 6.42: Vergleich von Modell- und Versuchswerten  
(Stauch 2,  $x^2$  ohne WW, Visual XSel)

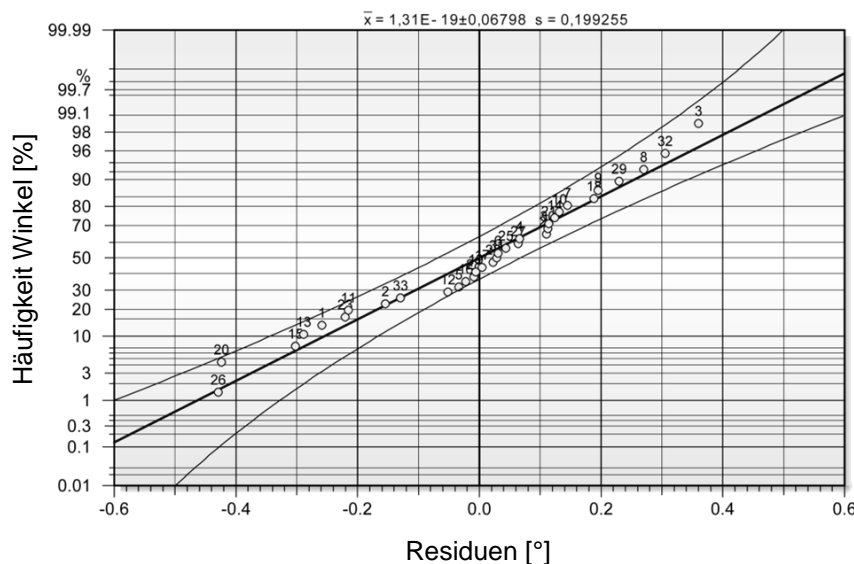


Abbildung 6.43: Residuenverteilung (Stauch 2,  $x^2$  ohne WW, Visual XSel)

Eine Normalverteilung der Residuen kann mit den Versuchen nicht nachgewiesen werden, allerdings ist ein deutliches Maximum im Zentrum zu erkennen (Abbildung 6.44). Die maximalen Abweichungen vom Modell sind mit bis zu  $0,4^\circ$  fast doppelt so groß wie beim Strecken ( $\sim 0,2^\circ$ ) und auch die Standardabweichung ist mit  $s=0,19925461^\circ$  deutlich größer als beim Strecken ( $s=0,114037^\circ$ , Kapitel 6.8).

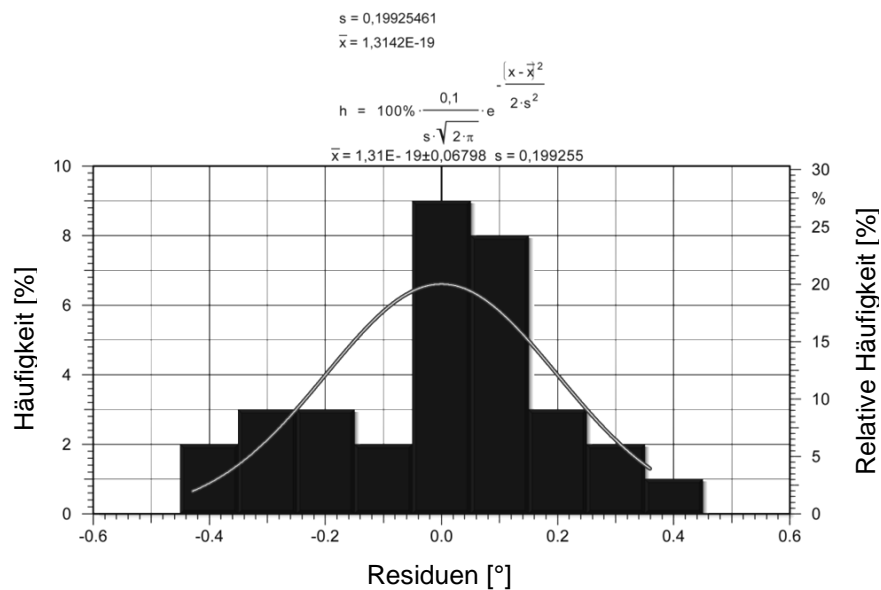


Abbildung 6.44: Normalverteilung (Stauchungen 2,  $x^2$  ohne WW, Visual XSel)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Erkenntnisse aus den Versuchsreihen für das Strecken nicht direkt auf das Stauchen übertragen werden können. Der Stauchprozess kann nicht mit derselben Genauigkeit wie der Streckprozess modelliert werden.

Zum einen liegt dies an den Einschränkungen in der Beschreibung von funktionalen Zusammenhängen durch die Polynommodelle. Zum anderen erfolgt die Modellierung nur für eine isoliert betrachtete Umformoperation. Zur Erstellung einer Fertigungsstrategie müssten die erzeugten bzw. berechneten Umformwinkel aufsummiert und aneinander gesetzt werden. Das Plattdrücken der entstehenden Falte beim nächsten Schlag vermindert den erzeugten Umformwinkel allerdings drastisch und lässt keinen zielführenden Vergleich mit dem erzeugten Modell zu.

#### 6.11.4 Einflussparameter auf die Schlagkraft beim Stauchen

Beim Stauchprozess hängt die Schlagkraft wie beim Strecken von den Parametern *Zustellung*, *Blechdicke* sowie der Werkzeugüberdeckung (*Schenkel\_b*) ab. Die maximal am Kraftformer einstellbare *Schlagtiefe* wird bei 2 mm belassen. Es soll ein definierter Umformwinkel erzeugt werden für den die benötigte Kraft mit dem gefundenen Modell näherungsweise berechnet werden kann. Am Kraftformer selbst muss die Zustellung in die Steuerung direkt eingegeben werden, daher wird sie als Ausgangsgröße für das Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Parametern *Kraft*, *Zustellung*, *Blechdicke* und *Schenkel\_b* herangezogen.



Nach der Annäherung ergibt sich mittels Visual XSel ein lineares Regressionsmodell:

Winkel	Koeffizient	StdAbw	t-Wert	p-value	Min	Max	AktWert	Transf	Normiert
Constant	22,51115								
Kraft	1,289399	0,026684	48,32074	0	22,363	156,92	89,64	Keine	$((\text{Kraft} - 89,6406)/67,277)$
Dicke	-0,30252	0,013792	-21,9342	0	0,9	1,5	1,2	Keine	$((\text{Dicke} - 1,2)/0,3)$
Schenkel_b	-0,23798	0,016392	-14,5182	0	25	65	45	Keine	$((\text{Schenkel\_b} - 45)/20)$
R <sup>2</sup> =0,987	DF=33								
Radj <sup>2</sup> =0,985	RMS=0,0775		RMS/Ym=0,0035						
Q <sup>2</sup> =0,9829									
Zielgröße-Transf	Keine								

Tabelle 6.24: Ergebnisse Visual XSel (Abhängigkeit Schlagkraft Stauchen, linear)

In Abbildung 6.45 zeigt die analysis of means die Einflüsse der einzelnen Faktoren und dass analog zum Strecken der größte Zusammenhang zwischen *Zustellung* und *Schlagkraft* besteht.

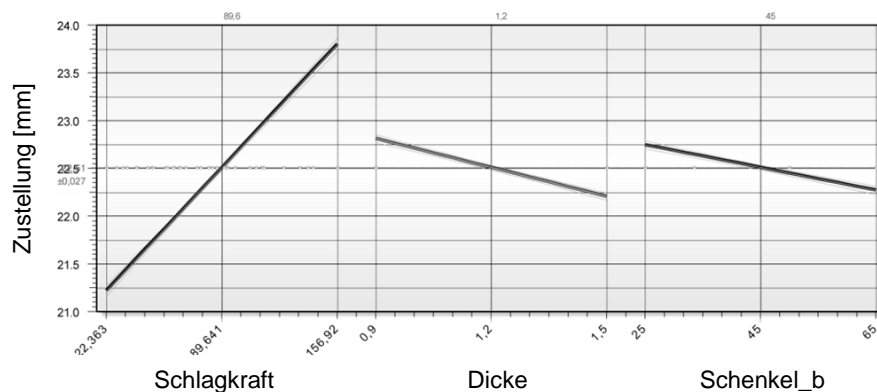


Abbildung 6.45: ANOM (Abhängigkeit Schlagkraft Stauchen, Visual XSel)

Eine Normalverteilung der Residuen kann nicht nachgewiesen werden, da wesentlich weniger Versuchsdaten zum Stauchen vorliegen als zum Strecken. Allerdings sind die Abweichungen mit denen beim Strecken vergleichbar (Abbildung 6.46).

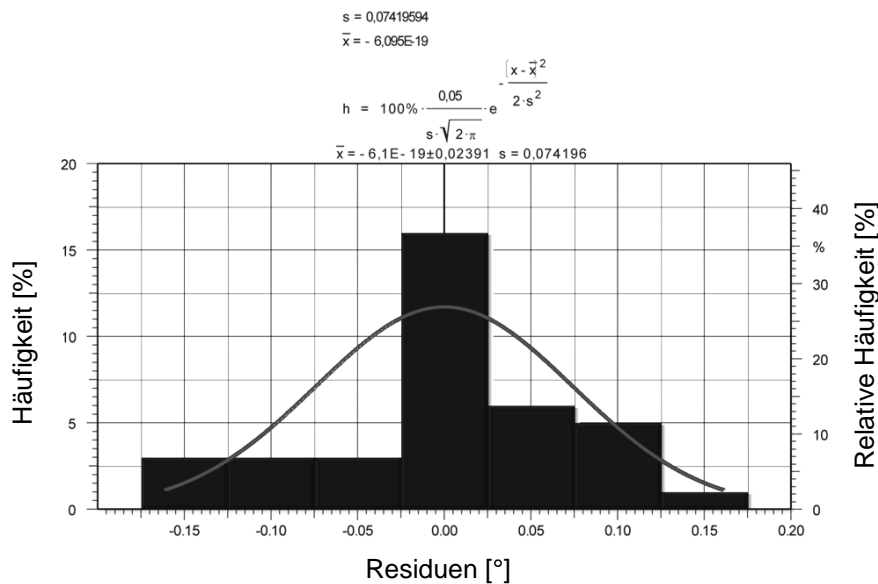


Abbildung 6.46: Normalverteilung (Schlagkraft Stauchen, Visual XSel)

Der Zusammenhang lässt sich wie folgt beschreiben:

$$Zustellung = 1,2893399 * \frac{Kraft - 89,6406}{67,2774} - 0,30252 * \frac{Dicke - 1,2}{0,3} - 0,23798 * \frac{Schenkel\_h - 45}{20} + 22,51115 \quad (\text{Formel 6.19})$$

Eine Vereinfachung der Gleichung liefert:

$$Zustellung = 0,01916 * Kraft - 1,0084 * Dicke - 0,01899 * Schenkel\_h + 22,53876 \quad (\text{Formel 6.20})$$

Werden die gefundenen Zusammenhänge mit den Ergebnissen für das Strecken aus Kapitel 6.10 verglichen, so ergibt sich im Wesentlichen eine Verschiebung in vertikaler Richtung. Diese Verschiebung ist auf eine unterschiedliche Werkzeughöhe zurückzuführen und wird durch die Konstante beschrieben. Die geringen Unterschiede der Faktoren zeigen allerdings, dass die Einflüsse auf die Normalkraft bei den Verfahren Strecken und Stauchen vergleichbar sind. Das Ergebnis wurde auch in dieser Form erwartet, da sich der grundsätzliche Aufbau der Umformwerkzeuge nur durch die Einbaurichtung der in Gummi vulkanisierten Hebel unterscheidet. Alle im Kraftfluss befindlichen Bauteile und verwendeten Materialien sind nahezu identisch (siehe Kapitel 2.3.7).

## 6.12 Verifikation der ermittelten Fertigungsstrategien

### 6.12.1 Ableitung einer Fertigungsstrategie

Ziel der Untersuchungen in Kapitels 6 ist die Berechnung einer Fertigungsstrategie auf Basis des Umformwinkels  $\alpha$ , unterschiedlichste Radien mit einem L-Winkel gemäß Abbildung 6.47 herzustellen.

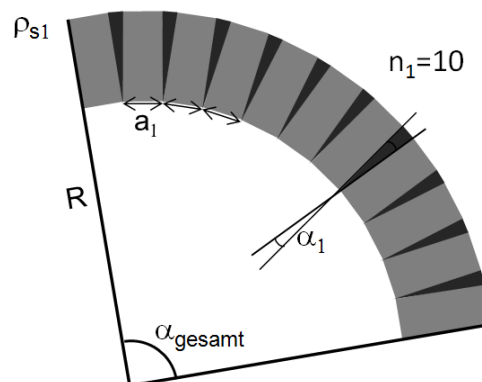


Abbildung 6.47: Fertigungsstrategie

Die für den Fertigungsprozess erforderlichen Parameter können durch die erstellten Modelle für beliebige Umformwinkel  $\alpha$  berechnet werden. Wenn mehrere Einzelumformungen mit dem Winkel  $\alpha$  bei einem Schlagabstand  $a$  aneinander gefügt werden, erhält man nach  $n$  Schlägen einen Kreisbogen mit dem Winkel  $\alpha_{gesamt}$  und dem Radius  $r$ . Je höher die Anzahl der aufgetragenen Schläge und je kleiner der Schlagabstand  $a$ , desto homogener wird der erzeugte Radius.

Die ermittelten Modell können aber erst ab einem Umformwinkel  $>1^\circ$  eine ausreichende Genauigkeit liefern und da sich kleine Abweichungen der Einzelschläge bei einer hohen Anzahl an Schlägen  $n$  sehr schnell aufsummieren, müssen die Verfahrensgrenzen für eine reproduzierbare Fertigung genau definiert werden.

Für einen beliebigen gewünschten Gesamtumformwinkel  $\alpha_{gesamt}$  wird ein Winkelwert in Grad und die entsprechende Anzahl an Schlägen benötigt. Wird der gewünschte Gesamtumformwinkel durch die Anzahl an Schlägen geteilt, so erhält man den Umformwinkel  $\alpha$ . Bei einem nicht ganzzahligen Wert muss er aufgerundet werden.

Die minimale Werkstücklänge bzw. Bogenlänge des Bauteils  $l_{b,gesamt}$  berechnet sich mit:

$$l_{b,gesamt} = \frac{\pi}{180^\circ} * r * \alpha_{gesamt} \quad (Formel 6.21)$$

Dividiert man die Bogenlänge durch die Anzahl der Schläge  $n$ , so ergibt sich der benötigte Schlagabstand  $a$ :

$$a = \frac{\pi * r * \alpha_{\text{gesamt}}}{n * 180^\circ} \quad (\text{Formel 6.22})$$

Der Kreisbogen wird im Detail aus einzelnen geraden Stücken zusammengesetzt. Diese Geraden sind Sehnen des berechneten Kreises (Abbildung 6.48).

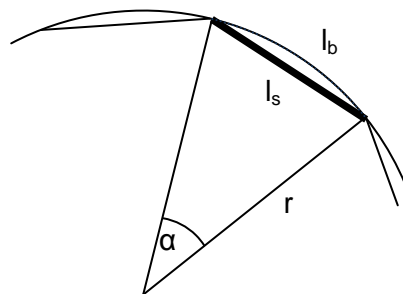


Abbildung 6.48: Kreissehne und Kreisbogen

Die Sehnenlänge  $l_s$  berechnet sich zu:

$$l_s = 2 * r * \sin\left(\frac{l_b}{2r}\right) \quad (\text{Formel 6.23})$$

Es kann die lineare Näherung der Sinusfunktion in der Nähe von 0 verwendet werden, da die Bogenlänge eines Umformschrittes  $l_b$  sehr klein und der Radius  $2r$  sehr groß ist. Dadurch ist der Sinus des Arguments gleich dem Argument (Formel 6.24).

$$l_s = 2 * r * \sin\left(\frac{l_b}{2r}\right) \cong 2 * r * \frac{l_b}{2r} = l_b \quad (\text{Formel 6.24})$$

Werden Schlagabstand und Umformwinkel bestimmt, so kann mit dem Modell aus Kapitel 6.7 die nötige Kraft berechnet werden. Diese wird wiederum zur Berechnung der Zustellung herangezogen (Kapitel 6.10). Eine Verknüpfung der Formeln ermöglicht eine Berechnung der benötigten Fertigungsparameter aus den geometrischen Daten des Werkstücks (Abbildung 6.49). Die Berechnung mit dem ermittelten Modell gilt allerdings nur für den Werkstoff DX54, bei einer Schlagtiefe von 2 mm und für das Streckwerkzeug FWR603S (Fa. Eckold).

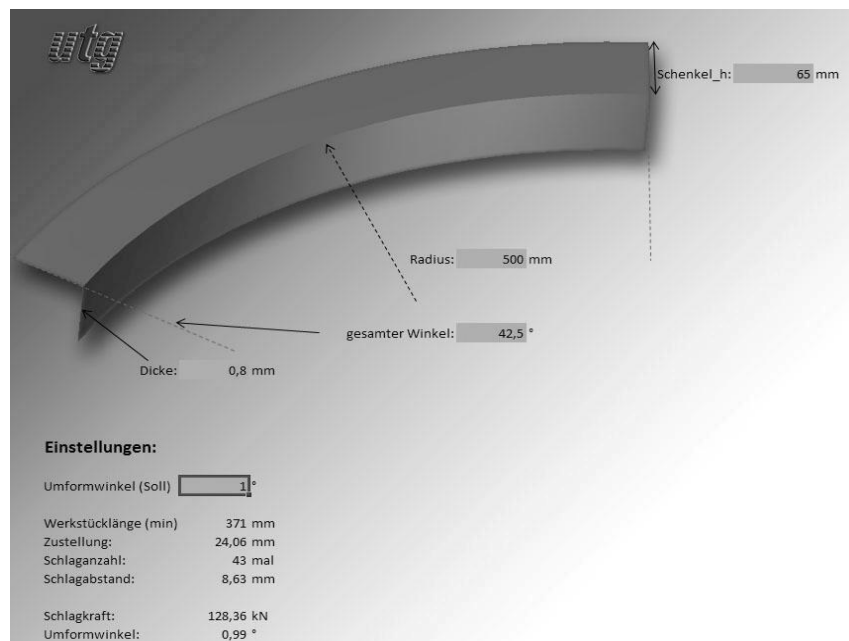


Abbildung 6.49: Excel Makro zur Berechnung der Fertigungsparameter

### 6.12.2 Verifikation

Zum Abgleich der hergeleiteten Fertigungsstrategie mit den experimentellen Versuchen wird ein L-Profil mit beliebig gewähltem Radius und Winkel gefertigt (siehe Tabelle 6.25).

Bezeichnung	Wert
Schenkel_b	50 mm
Dicke	1,5 mm
Radius	500 mm
gesamter Winkel	40 °

Tabelle 6.25: Sollgeometrie

Werden diese Werte in das Excel-Datenblatt aus Abbildung 6.49 eingetragen, so erhält man die in Tabelle 6.26 dargestellten Maschinenparameter.

Bezeichnung	Wert
Umformwinkel	1 °
Zustellung	23,18 mm
Schlaganzahl	40
Schlagabstand	8,73 mm
Schlagkraft	112,74 kN

Tabelle 6.26 Berechnete Maschinenparameter

Die Zustellung wird auf 23,2 mm gerundet, da sie am Kraftformer nur in 0,1 mm Schritten eingestellt werden kann. Der berechnete Vorschub von 8,7 mm wird in der Fertigungszelle

Kraftformer-Roboter realisiert. Die Steuerung des Roboters erlaubt die Positionierung von Bauteilen mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm (Kapitel 2.5).

Die gefertigten Bauteile werden mit GOM ATOS optisch vermessen und können mit einem Winkel mit Sollgeometrie verglichen werden. Dieser wird gemäß Tabelle 6.25 in CATIA V5 konstruiert. Abbildung 6.50 (oben) zeigt beide Bauteile übereinandergelegt. Es ist zu erkennen, dass der etwas hellere CAD-Winkel im Vergleich zum realen Bauteil einen kleineren Krümmungsradius besitzt. Eine Fixierung der beiden Bauteile auf der rechten Seite ergibt in der Falschfarbendarstellung Abbildung 6.50 (unten) am umgeformten Ende eine maximale Abweichung von 12,5 mm. Der am realen Bauteil gemessene Radius beträgt 560°mm.



Abbildung 6.50: Abweichungsanalyse zw. CAD und gefertigtem Werkstück

Wird die Abweichung auf den einzelnen Umformwinkel bezogen, so berechnet sich dieser bei dem gegebenen Schlagabstand  $l_s$  von 8,7 mm und dem erzielten Radius  $r$  von 560 mm mit der Näherung aus Kapitel 6.12.1 wie folgt:

$$l_s = \frac{\pi}{180^\circ} * r * \alpha \rightarrow \alpha = \frac{l_s * 180^\circ}{\pi * r} = \frac{8,7 \text{ mm} * 180^\circ}{\pi * 560 \text{ mm}} = 0,890 \quad (\text{Formel 6.25})$$

Anstelle des vorgegebenen Winkels  $1^\circ$  wurde 40 mal ein um  $0,11^\circ$  abweichender Winkel gefertigt. Diese Abweichungen sind zum einen auf Rundungsfehler und Ungenauigkeiten im Modell und zum anderen auf die in Kapitel 4.5 bereits angesprochenen Fertigungsrandbedingungen zurückzuführen, summieren sich bei hohen Schlaganzahlen sehr schnell auf und liefern ein ungenaues Umformergebnis. Eine Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit kann durch zusätzliche Iterationsschleifen erfolgen.

### 6.12.3 Verifikation mit Iterationsschleifen

Das vorliegende Modell bietet eine einfache und schnelle Möglichkeit die Maschinenparameter für die gewünschte Umformung zu berechnen. Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit lassen sich mit Hilfe zusätzlicher Iterationsschritte sehr gute Ergebnisse erzielen. So kann nun das nächste Bauteil mit einer etwas größeren Zustellung gefertigt werden und an die Sollgeometrie angenähert werden.

Zum Modellaufbau wurden L-Profile aus dem Werkstoff DX54 verwendet, für die folgenden Versuche dieser durch den Stahlwerkstoff DC04 ersetzt. Wie bereits in Kapitel 6.5 untersucht, besitzen diese beiden Werkstoffe die gleichen Eigenschaften, stammen aber aus einer unterschiedlichen Fertigungscharge. Mit dem Modell werden exemplarisch die Fertigungsparameter für Blechwinkel mit dem Radius 300 mm und 500 mm berechnet. Nach der Fertigung wird das Bauteil vermessen, die Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten berechnet und diese im nächsten Iterationsschritt vom Zielradius abgezogen (Tabelle 6.27). Die Fertigungsparameter werden dann vom Modell für jeden Versuch und die veränderten Radien neu berechnet (Tabelle 6.28). Abbildung 6.51 zeigt den Verlauf der gefertigten Radien für den Zielradius 300 mm.

Die Bauteile werden mit drei unterschiedlichen Verfahren vermessen. Als taktiles Messverfahren wird ein Tastmessgerät der Firma Zeiss verwendet. Zur optischen, stereometrischen Vermessung werden zum einen der Versuchsaufbau CoDrive [SCHE07] (Stereokamerasystem, Firma NDI) und das ATOS System der Firma GOM verwendet.

Versuch	Radius im Modell [mm]	Ist-Radius [mm] - Zeiss	Ist-300 [mm]
RA-300-1	300	333,00	-33
RA-300-2	265	285,00	-15
RA-300-3	273	300,25	+0,25

*Tabelle 6.27: Iterationsschleifen für den Radius 300 mm*

Versuch	Schlaganzahl	Zustellung [mm]	Schlagabstand [mm]
RA-1-1	45	23,0	7,753
RA-1-2	51	23,0	6,84
RA-1-3-1	51	23,0	7,055

*Tabelle 6.28: Berechnete Fertigungsparameter für den Radius 300 mm*

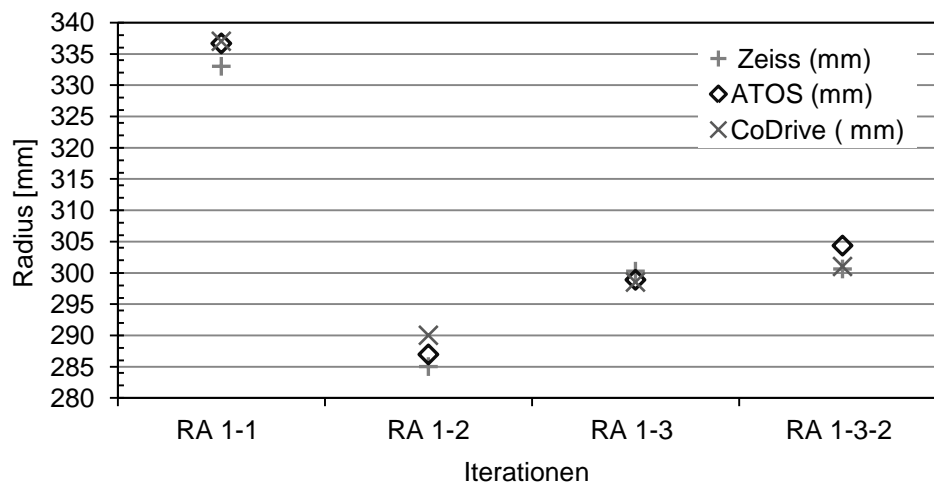


Abbildung 6.51: Iterationsschritte für ein L-Profil mit dem Zielradius 300 mm

### 6.13 Zusammenfassung Umformwinkel

Die mathematische Modellierung des Streckprozesses liefert Berechnungsmodelle, die als Basis für die Ableitung erster Fertigungsstrategien verwendet werden können. Bei sehr vielen Einzelschlägen ist jedoch zu beachten, dass sich auch kleine Abweichungen durch Ungenauigkeiten in der Modellierung oder durch den Einfluss von Fertigungsrandbedingungen sehr schnell aufsummieren und die Fertigungsgenauigkeit sehr stark verschlechtern. Auch wird als untere Prozessgrenze die Erzeugung von Winkeln  $>1^\circ$  gesetzt, was in der reale Fertigungsanwendung nicht umsetzbar ist.

Beim Stauchprozess ist das betrachtete Prozessfenster für einen stabilen Prozess noch sehr viel kleiner, da der Einfluss der Wechselwirkungen auf Grund der entstehenden Falten so groß ist, dass er nicht vernachlässigt, aber auch nicht modelliert werden kann. Eine mathematische Modellierung einer Umformoperation und die Ableitung von Fertigungsstrategien für das betrachtete Prozessfenster, sind daher nicht zielführend.

Zudem sind die Einflüsse einer Schlagüberdeckung noch nicht berücksichtigt. Überdecken sich Einzelschläge, so wird ein Bereich umgeformt, der bereits durch vorherige Umformschritte kaltverfestigt wurde. Die Kaltverfestigung ist wiederum stark vom Werkstoff und Umformgrad abhängig.

Die in Kapitel 6 erstellten Modelle konnten zwar das Ziel der Berechnung von Fertigungsstrategien nicht gänzlich erreichen, sie tragen aber erheblich zum Verständnis des Gesamtsystems Eckold Kraftformer bei.



## 7 Analyse der Schlagdichte

Die Erkenntnisse aus den Kapiteln 5 und 6 zeigen, dass trotz aufwändiger mathematischer Modellierung die Vorhersage eine Fertigungsstrategie für die beiden Verfahrensvarianten des Eckold Kraftformers Strecken und Stauchen nur bedingt möglich ist.

Die in Kapitel 5 untersuchte FEM-Simulation bildet den Realprozess zwar sehr gut ab, mit den erstellten Modellen können Fertigungsstrategien aber nur vorab überprüft und nicht aus einer gegebenen Bauteilgeometrie abgeleitet werden.

Die in Kapitel 6 auf der Basis von Versuchsdaten erarbeiteten Modelle kamen dem eingangs formulierten Ziel schon deutlich näher. Der Streckprozess konnte durch Modelle bereits sehr gut berechnet werden. Für den Stauchprozess hingegen musste der Versuchsraum auf ein sehr enges Prozessfenster beschränkt werden, in dem der Prozess stabil und reproduzierbar untersucht werden konnte.

Aufgrund des doch sehr großen Einflusses der in Kapitel 4.5 beschriebenen Fertigungsrandbedingungen konnte keine der bisher untersuchten Variante die Fertigungsstrategie auf Anhieb exakt beschreiben. Um eine für den Großteil industrieller Anwendungen hinreichende Fertigungsgenauigkeit zu erhalten, müssen bei beiden Varianten mehrere Iterationsschleifen durchgeführt werden.

Da die Erfahrung zeigt, dass nicht alle Fertigungsrandbedingungen durch eine Modellierung exakt abgebildet werden können und Iterationsschleifen daher unvermeidbar sind, wird in Kapitel 7 nach einer alternativen Lösung gesucht.

Ziel ist nun nicht mehr die detaillierte mathematische Modellierung, vielmehr sollen die Zusammenhänge beim Kraftformerverfahren möglichst einfach und pragmatisch beschrieben werden. Dies ermöglicht eine schnelle Ableitung einer ersten Fertigungsstrategie und die flexible Anpassung dieser, um mit möglichst wenigen Iterationsschritten ans Ziel zu gelangen. Hierzu wird eine neue Kenngröße die Schlagdichte  $p_s$  eingeführt.

## 7.1 Definition der Schlagdichte

Zur Fertigung eines gebogenen L-Profils muss eine Vielzahl an Parametern berücksichtigt werden. Zu den Haupteinflussgrößen auf einen gewünschten Radius  $r$  zählen die prozessbedingten Größen Schlagkraft  $F_s$ , Schlaganzahl  $n$  und der Schlagabstand  $a$  zwischen zwei Umformoperationen. Das Ziel ist es daher, einen möglichst einfachen Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern und dem gefertigten Radius zu finden.

$$r = f(F_s, n, a) \quad (\text{Formel 7.1})$$

Einflussgrößen wie Werkzeugverschleiß, Fertigungsungenauigkeiten der vorgelagerten Fertigungsprozesse (z.B. Zuschnitt, Abkanten), Reibverhältnisse zwischen den Werkzeugbacken und dem Blechwerkstoff werden zunächst nicht betrachtet.

Die Schlagkraft kann am Kraftformer nicht direkt eingestellt werden, sie resultiert aus der Zustellung  $z$ , der Schlagtiefe  $s$  und der Blechdicke  $t$  (Kapitel 2.3.6 und 4.2). Zusätzlich hat nach den Erkenntnissen aus Kapitel 6.10 und 6.11.4 auch der Werkstoff und die horizontale Schenkellänge Schenkel<sub>b</sub> einen Einfluss. Diese beiden Faktoren werden in den folgenden Versuchen nicht variiert und daher vernachlässigt. Als Werkstoff dient weiterhin DC04 in der Materialstärke 1 mm und das Versuchsbauteil hat die in Abbildung 7.3 skizzierten Abmessungen.

Für das weitere Vorgehen werden daher nur folgende Parameter berücksichtigt:

$$r = f(n, a, \underbrace{z, s, t}_F) \quad (\text{Formel 7.2})$$

$n$  = Anzahl Schläge;  $a$  = Abstand /Vorschub;  $z$  = Zustellung;  $s$  = Schlagtiefe;  $t$  = Blechdicke

Ein gefertigter Blechwinkel besteht aus verformten Bereichen und nicht umgeformten Teilbereichen zwischen den einzelnen Schlägen. Je dichter die Schläge bei konstanter Kraft aneinander gesetzt werden, desto kleiner wird der gefertigte Radius. Der Abstand zwischen den einzelnen Schlägen bestimmt den Vorschub  $a$ .

Die Erhöhung der Schlaganzahl  $n$  bei konstantem Vorschub  $a$  führt zu einem größeren Winkel  $\alpha_{\text{gesamt}}$ . Die Bogenlänge bzw. die Länge des Bauteils ändert sich, der Radius bleibt allerdings konstant. Bleibt neben der Kraft auch die zu bearbeitende Länge  $l$  konstant, führt eine Erhöhung der Schlaganzahl bezogen auf die Bauteillänge zu einer Verringerung des Vorschubes und zu einem kleineren Radius.

Der gleiche Zielradius kann mit unterschiedlichen Fertigungseinstellungen hergestellt werden (Abbildung 7.1), allerdings steigt mit zunehmender Schlaganzahl die Homogenität des

Kreises. Die Größen Schlaganzahl  $n$  und der Vorschub  $a$  lassen sich für eine konstante Bearbeitungslänge  $l$  zu der neuen Größe Schlagdichte  $\rho_s$  zusammenfassen. Diese gibt an, wie dicht die Schläge auf dem Längenmaß  $l$  gesetzt werden.

$$\rho_s = \frac{n}{l} \quad (\text{Formel 7.3})$$

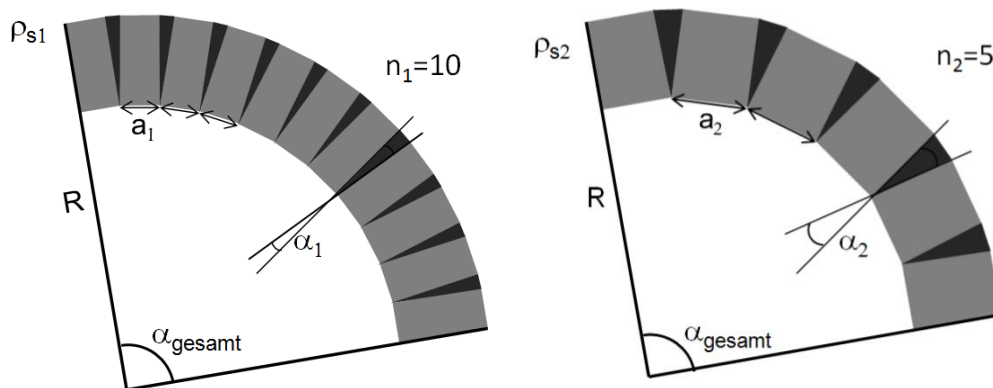


Abbildung 7.1: Umformprinzip der Verfahren Strecken und Stauchen

Im Folgenden wird  $\rho_s$  als Schlagdichte bezeichnet und auf das Längenmaß  $l = 100,5 \text{ mm}$  bezogen. Dies entspricht bei drei Umformungen einem Schlagabstand von  $33,5 \text{ mm}$  und somit dem halben Werkzeugdurchmesser. In Abbildung 7.2 sind drei Werkzeuge mit dem Schlagabstand  $33,5 \text{ mm}$  dargestellt. Bei einer Schlagdichte von 3 wird damit sichergestellt, dass keine Umformung in einem bereits durch die Werkzeugbacken berührten Bereich erfolgt. In den Simulationsmodellen in Kapitel 5 wurden diese geometrischen Abmessungen ebenfalls verwendet, was eine sehr gute Vergleichbarkeit gewährleistet.

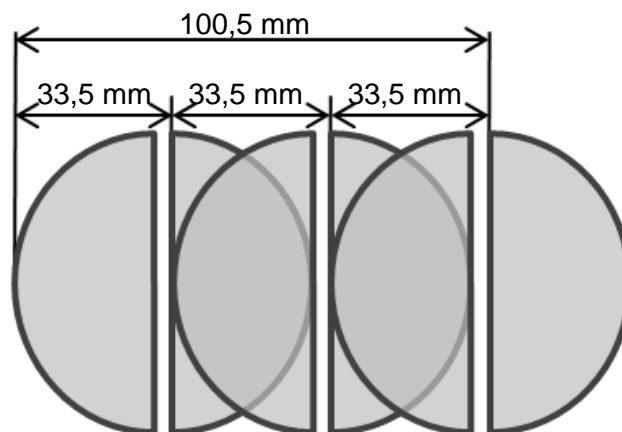


Abbildung 7.2: Erklärung Zusammenhang Schlagabstand und Schlagdichte

Im Folgenden wird nur ein Versuchswerkstoff mit konstanter Dicke verwendet. Die Schlagtiefe bleibt ebenfalls konstant, da die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.4 zeigen, dass bei gleicher Summe aus unterschiedlichen Zustellungen und Schlagtiefen auch das gleiche Umformergebnis zu erwarten ist.

Der Bauteilradius ist daher nur noch von zwei direkt einstellbaren Parametern abhängig, der Schlagdichte  $\rho_s$  und der Zustellung  $z$ .

$$R = f(\rho_s, z) \quad (\text{Formel 7.4})$$

Mit nur zwei noch Parametern ist es möglich einen einfachen Zusammenhang für die Fertigungsstrategie herzuleiten. Werden der geforderte Radius und eine Schlagdichte festgelegt, kann die am Kraftformer einzustellende Zustellung abgeleitet werden und bei gegebener Zustellung wird die Schlagdichte berechnet.

## 7.2 Zusammenhang Schlagdichte und Radius

Die folgenden Versuche werden mit L-Profilen aus dem Blechwerkstoff DC04 mit einer konstanten Dicke  $t = 1 \text{ mm}$  und den folgenden Abmessungen (Abbildung 7.3) gefertigt.

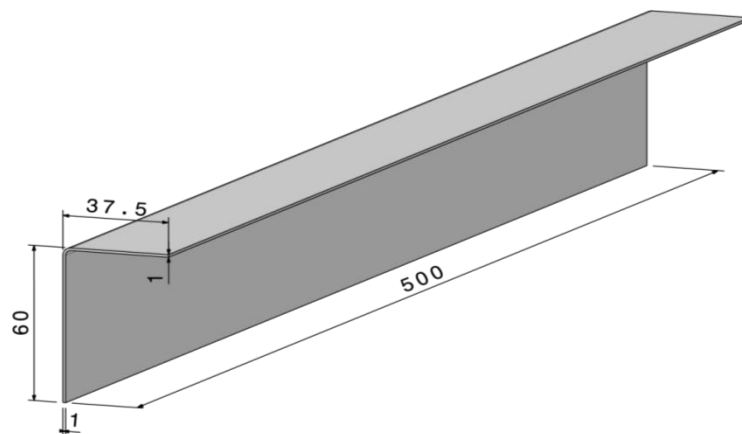


Abbildung 7.3: Hauptmaße Werkstück [mm]

### 7.2.1 Strecken in der Fertigung

Die Bauteile werden in der Fertigungszelle Kraftformer-Roboter mit neuwertigen Werkzeugeinsätzen hergestellt. Die teilautomatisierte Fertigung gewährleistet eine hohe Reproduzierbarkeit und ermöglicht die gezielte Variation der Fertigungsparameter. Die gefertigten Bauteile werden mit einer taktilen 3D-Koordinaten-Messmaschine der Firma Zeiss (Oberkochen) bzw. mit dem optischen Messsystem ATOS der Firma GOM (Braunschweig) vermessen.

Die Zustellung wird in den drei Stufen 22,7 mm, 23,0 mm und 23,3 mm variiert. Es werden Bauteile mit den Schlagdichten  $\rho_s$  (3, 6, 12, 18, 21) hergestellt, vermessen und in einem Diagramm aufgetragen.

Die Ergebnisse für das Verfahren Strecken werden in Abbildung 7.4 und Tabelle 7.1 dargestellt.

Die Erhöhung der Zustellung bzw. der Schlagdichte führt erwartungsgemäß zu einem kleineren Radius. Der Zusammenhang zwischen Radius und Schlagdichte ist allerdings nicht linear. Durch die zunehmende Kaltverfestigung und Ausdünnung des Materials in der Umformzone haben weitere Umformschläge im selben Bereich eine verminderte Umformung zur Folge. Die maximale Schlagdichte wird daher auf  $\rho_s = 21$  begrenzt, wodurch Mehrschlagschläge auf derselben Stelle vermieden werden.

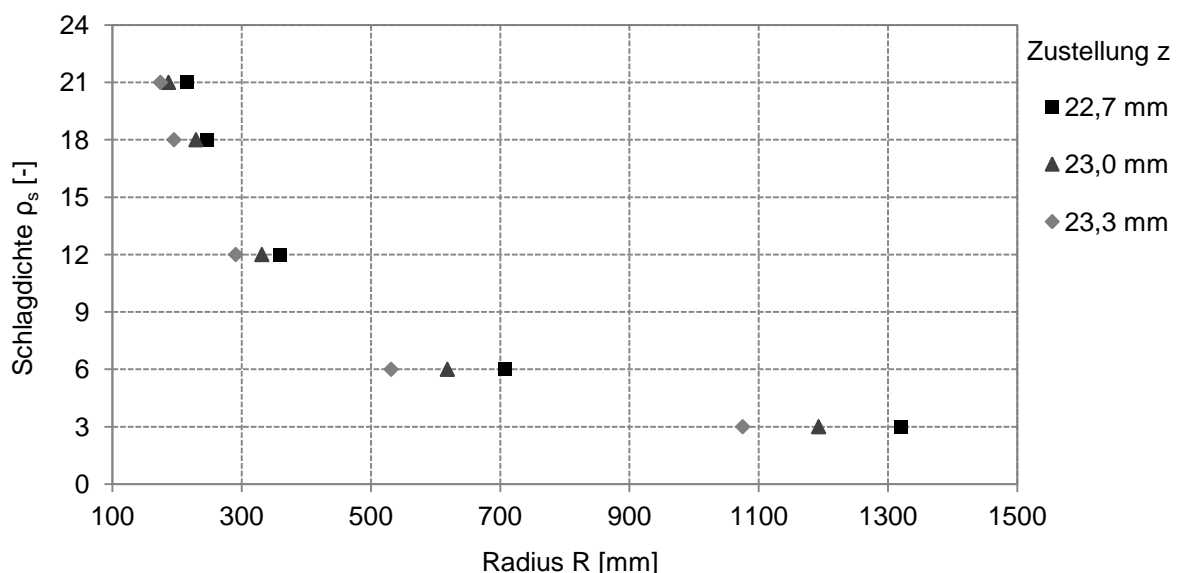


Abbildung 7.4: Zusammenhang zwischen Radius und Schlagdichte beim Strecken

Zur Ableitung einer Fertigungsstrategie aus den vorliegenden Daten ist eine Darstellung notwendig, bei der die Schlagdichte in Abhängigkeit vom gewählten Radius aufgetragen wird. Mit Potenzfunktionen der in Formel 7.5 beschriebenen Art kann der Zusammenhang zwischen Radius und Schlagdichte sehr gut angenähert werden.

$$y = k \cdot x^{-t} \quad (\text{Formel 7.5})$$

Die in Abbildung 7.5 dargestellte Approximation führt zu leichten Abweichungen. Diese können allerdings aufgrund des höheren Einflusses der Vielzahl der Fertigungsrandbedingungen (Kapitel 4.5) vernachlässigt werden. Bei der Fertigung kann

ohnein nicht auf Iterationsschleifen verzichtet werden, daher ist eine genauere Beschreibung der Zusammenhänge nicht notwendig.

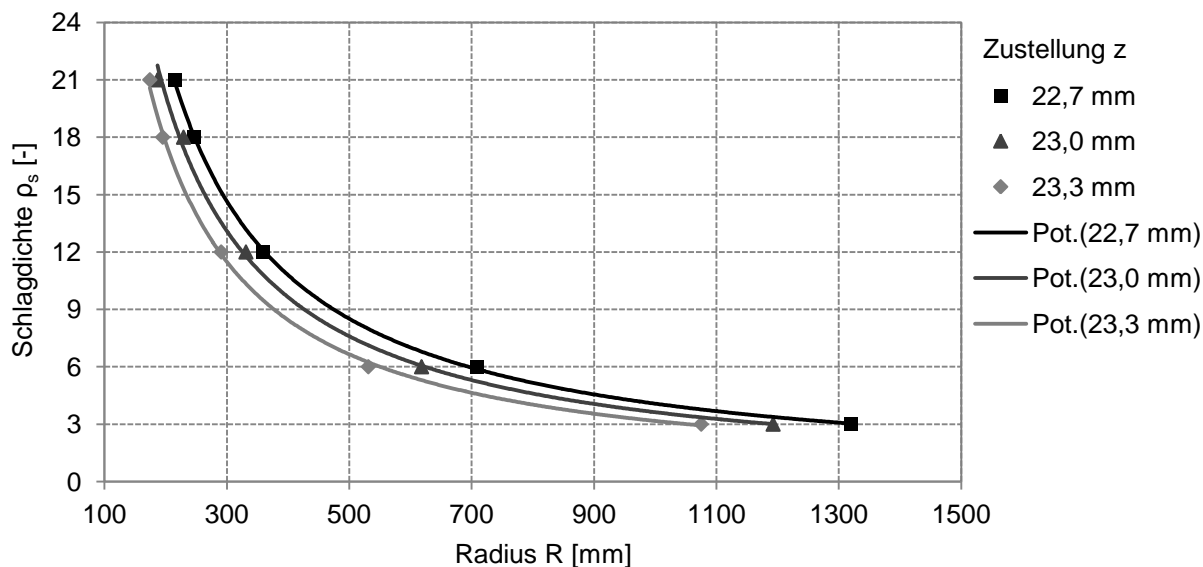


Abbildung 7.5: Schlagdichte in Abhängigkeit vom Radius beim Strecken

Experimente zur Bestimmung der Fertigungsstrategie				
Strecken	Zustellung $z$ [mm]	Schläge $n$ [-]	Schlagdichte $\rho_s$ [-]	Radius $R$ [mm]
Streck_n10_s08	22,7	8	3	1320,5
Streck_n20_s17	22,7	17	6	708,0
Streck_n40_s35	22,7	35	12	359,7
Streck_n60_s55	22,7	55	18	245,5
Streck_n70_s60	22,7	60	21	215,0
Streck_n10_s08	23,0	8	3	1192,5
Streck_n20_s15	23,0	15	6	618,0
Streck_n40_s30	23,0	30	12	331,0
Streck_n60_s40	23,0	40	18	229,0
Streck_n70_s60	23,0	60	21	186,5
Streck_n10_s08	23,3	8	3	1075,0
Streck_n20_s17	23,3	17	6	531,0
Streck_n40_s35	23,3	35	12	290,5
Streck_n60_s55	23,3	55	18	195,0
Streck_n70_s60	23,3	60	21	174,0

Tabelle 7.1: Versuche zur Ermittlung der Potenzkurve für das Strecken

### 7.2.2 Stauchen in der Fertigung

Das Stauchen erfolgt mit dem gleichen Versuchsaufbau und unter Verwendung derselben Versuchsparameter (Abbildung 7.6, Tabelle 7.2) wie beim Streckprozess.

Analog zum Strecken werden in Abbildung 7.6 die erzielten Radien in Abhängigkeit von der Schlagdichte aufgetragen. Das Diagramm zeigt einen dem Strecken sehr ähnlichen Verlauf (vgl. Kapitel 3.2.1). Auffallend ist jedoch, dass der Einfluss der Zustellung stärker ausgeprägt ist als beim Strecken. Dieser Effekt kann mit der auftretenden Faltenbildung erklärt werden. Je höher die Schlagkraft desto stärker bildet sich eine Falte (vgl. Abbildung 6.38). Diese wird beim nachfolgenden Schlag geglättet, was zu einer zusätzlichen Stauchung des Materials führt.

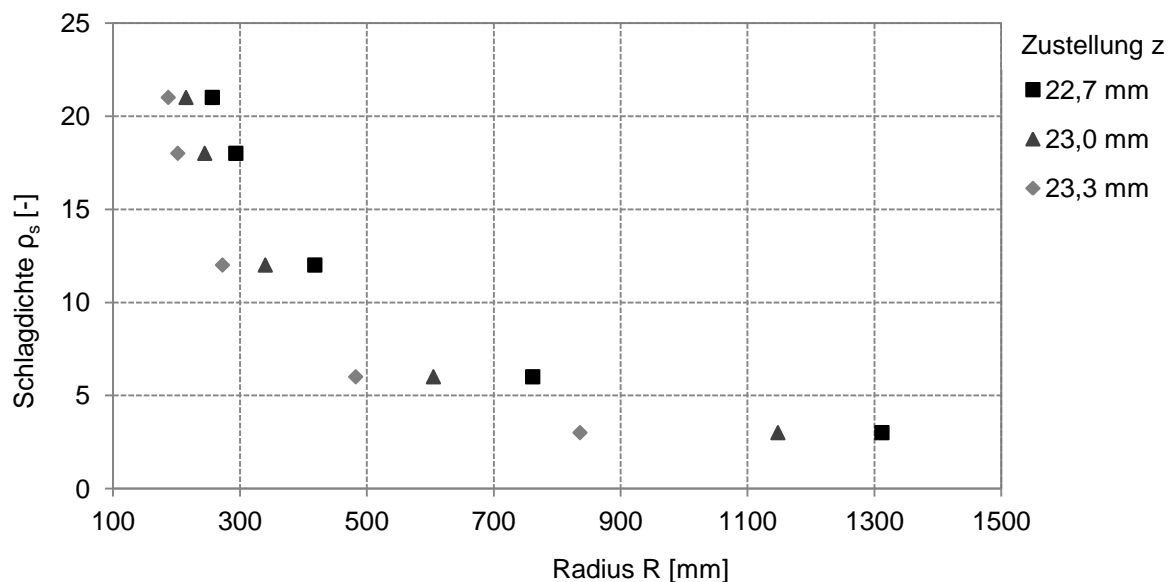


Abbildung 7.6: Zusammenhang zwischen Radius und Schlagdichte beim Stauchen

Abbildung 7.7 zeigt zusätzlich zu den Versuchsergebnissen zum Stauchen (Tabelle 7.2) für jede Zustellung die Approximation durch eine Potenzfunktion.

Experimente zur Bestimmung der Fertigungsstrategie				
Stauchen	Zustellung z [mm]	Schläge n [-]	Schlagdichte $\rho_s$ [-]	Radius R [mm]
Stau_n10_s08	22,7	8	3	1312,0
Stau_n20_s18	22,7	18	6	761,5
Stau_n40_s35	22,7	35	12	418,0
Stau_n60_s55	22,7	55	18	293,5
Stau_n70_s60	22,7	60	21	256,5
Stau_n10_s08	23,0	8	3	1148,0
Stau_n20_s18	23,0	18	6	605,0
Stau_n40_s35	23,0	35	12	340,0
Stau_n60_s55	23,0	55	18	244,5
Stau_n70_s60	23,0	60	21	215,0
Stau_n10_s08	23,3	8	3	836,0
Stau_n20_s18	23,3	18	6	482,5
Stau_n40_s35	23,3	35	12	272,5
Stau_n60_s55	23,3	55	18	202,0
Stau_n70_s60	23,3	60	21	187,0

Tabelle 7.2: Versuche zur Ermittlung der Potenzkurve für das Stauchen

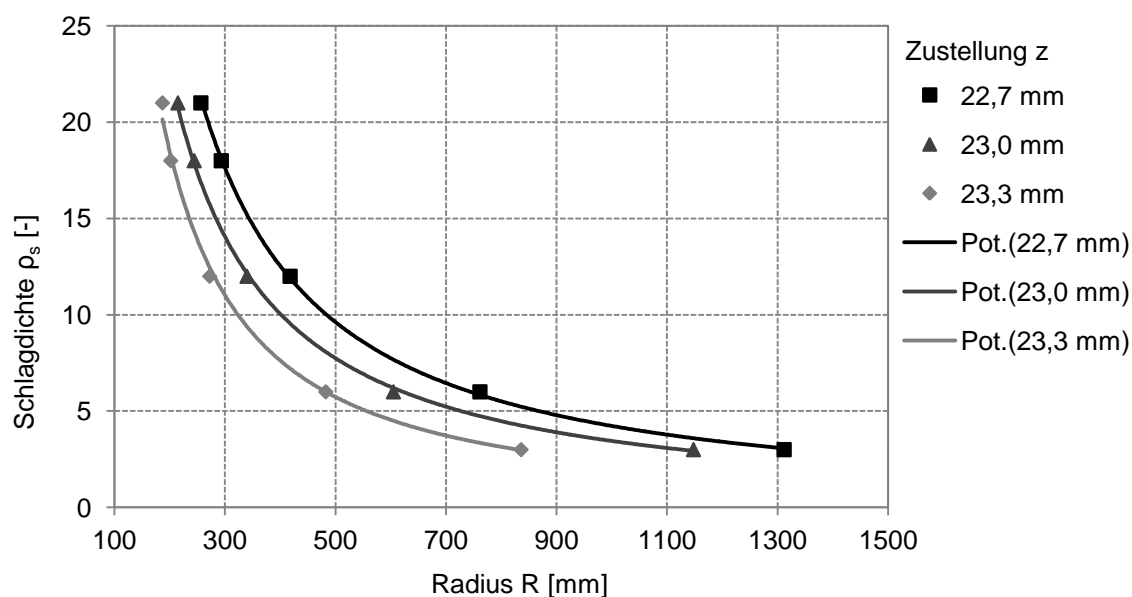


Abbildung 7.7: Schlagdichte in Abhängigkeit vom Radius beim Stauchen

Mit den in Abbildung 7.5 für das Strecken und in Abbildung 7.7 für das Stauchen dargestellten Potenzfunktionen können für beliebige Radien die entsprechenden Schlagdichten abgelesen bzw. über die Potenzfunktionen genau berechnet werden.



### 7.2.3 Einfluss von Fertigungsrandbedingungen

Die Argumentation in diesem Kapitel stützt sich auf die Annahmen, dass der Einfluss der Fertigungsrandbedingungen auf den Prozess so groß ist, dass er mit Hilfe mathematischer Methoden nicht berechnet werden kann und daher zur Erreichung eines Zielradius immer mehrere Iterationsschleifen notwendig sind. Exemplarisch wird diese Annahme durch die gezielte Variation der Randbedingung Werkzeugverschleiß belegt.

Ein zunehmender Verschleiß der Werkzeugoberfläche hat einen erheblichen Einfluss auf die Umformkraft. Es entsteht ein leichteres Durchrutschen des Werkzeuges auf dem Blech. Zum Vergleich wurden die Versuche aus Kapitel 7.2.1 mit einem in Kapitel 4.4 verschlissenen Werkzeug (>100.000 Schläge) erneut durchgeführt. In Abbildung 7.8 sind die Werte für diese zusätzliche Versuchsreihe dargestellt. Die große Abweichung zwischen neuen und verschlissenen Werkzeugen ist vor allem bei geringen Schlagdichten klar erkennbar.

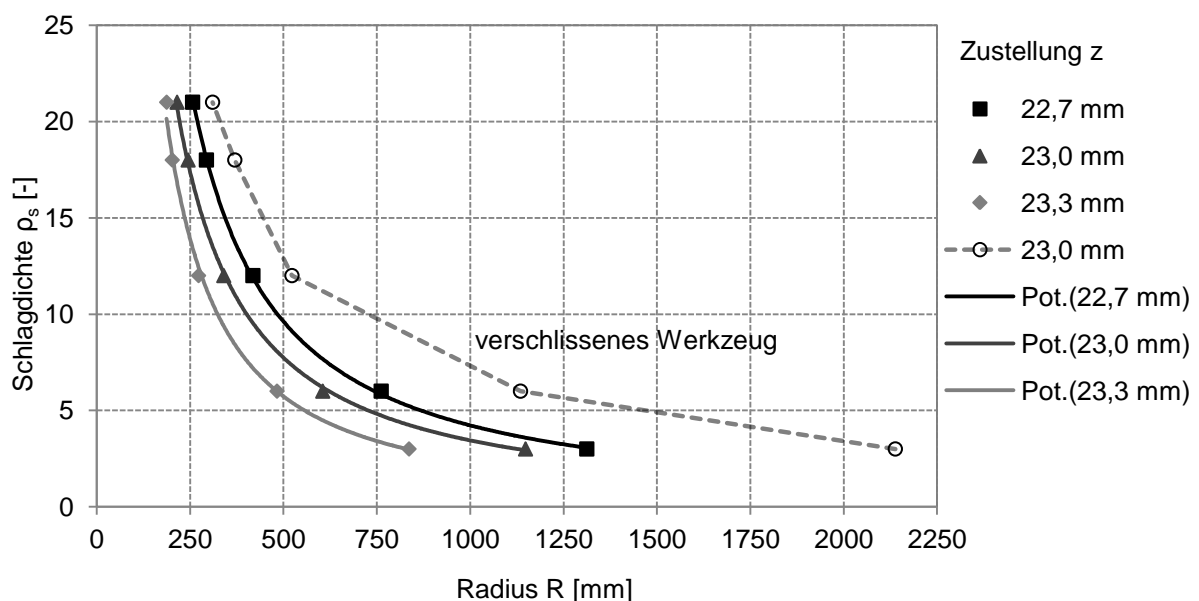


Abbildung 7.8: Einfluss des Werkzeugverschleißes

Die Ergebnisse zeigen, dass Verschleiß zu einer erheblichen Reduktion der effektiv wirkenden Schlagkraft führt. Es ist daher wichtig den Zustand der verwendeten Werkzeuge genau zu kennen bzw. können Aussagen über ein Modell bzw. einen Zusammenhang zwischen Schlagstärke und dem Umformergebnis nur für einen gewissen Werkzeugzustand gemacht werden. Da dieser aber nur sehr schwer zu bestimmen ist, sind Iterationsschleifen nicht zu vermeiden.

### 7.3 Ableitung einer Fertigungsstrategie

Die in Kapitel 7.2 abgeleiteten Fertigungsstrategien werden in mehreren Versuchsreihen verifiziert und die jeweilige Abweichung zwischen dem Soll- und dem gefertigten Ist-Radius ermittelt.

#### 7.3.1 Verifikation der Fertigungsstrategie für das Strecken

Zur Verifikation des Streckprozesses werden Bauteile mit den drei unterschiedlichen Radien 300 mm, 400 mm und 500 mm und den drei Zustellungen 22,7 mm, 23,0 mm, 23,3 mm gefertigt. Aus den vorgegebenen Radien und den Zustellungen kann die benötigte Schlagdichte berechnet werden. Tabelle 7.3 und Abbildung 7.9 veranschaulichen die Versuchsergebnisse.

Experimente zur Verifikation der Fertigungsstrategie					
Strecken	Zustellung z[mm]	Schläge n[-]	Schlagdichte $\rho_s$ [-]	Radius R [mm]	Abweichung [%]
R_300	22,7	42	14,67	316,5	5,5
R_400	22,7	31	10,79	426,0	6,5
R_500	22,7	25	8,51	523,5	4,7
R_300	23,0	38	13,10	310,3	3,4
R_400	23,0	31	9,64	408,2	2,1
R_500	23,0	22	7,60	509,7	1,9
R_300	23,3	33	11,49	312,5	4,2
R_400	23,3	24	8,45	416,0	4,0
R_500	23,3	19	6,65	514,5	2,9

Tabelle 7.3: Erste Verifikation der Fertigungsstrategie (Strecken)

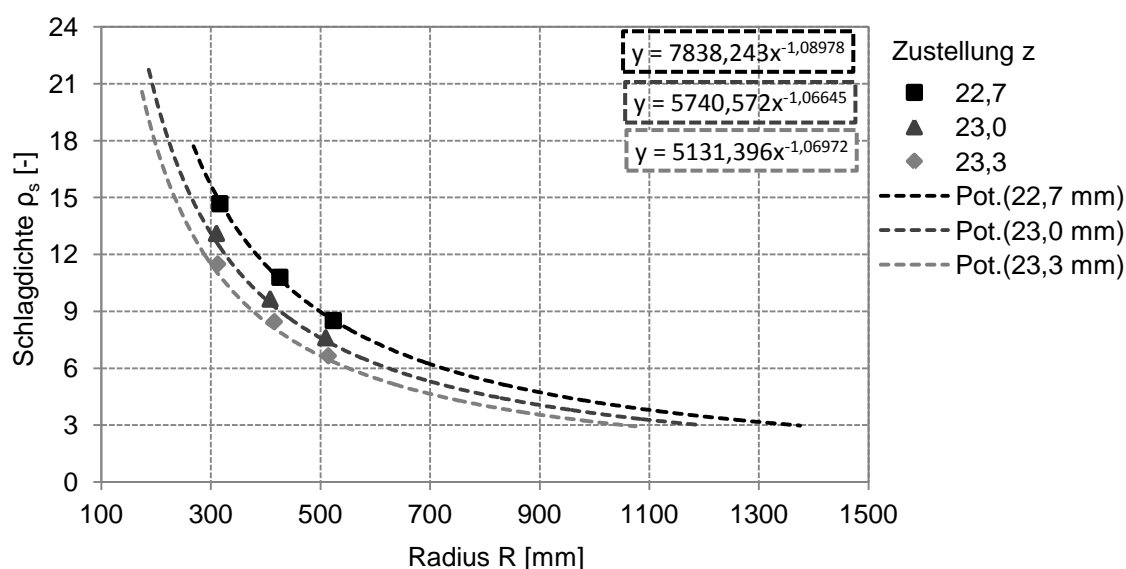


Abbildung 7.9: Verifikation der Fertigungsstrategie (Strecken)

Die Verifikation mit einer Zustellung von  $z = 22,7$  mm trifft den Radius mit einer durchschnittlichen Abweichung von etwa 5,6 %, für  $z = 23,0$  mm von etwa 2,5 % und für  $z = 23,3$  mm von etwa 5,6 %. Da alle Abweichungen im positiven Bereich liegen, ist davon auszugehen, dass das Werkzeug eventuell einen höheren Verschleiß aufweist als zu dem Zeitpunkt, an dem die Potentialkurve ermittelt wurde. Um die Abweichungen zu reduzieren muss ein Iterationsschritt durchgeführt und die Zustellung bzw. die Schlagdichte angepasst werden.

### 7.3.2 Verifikation der Fertigungsstrategie für das Stauchen

Analog zum Streckprozess wird auch für die Fertigungsstrategie zum Stauchen eine Verifikation durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Verifikation sind in Tabelle 7.4 und Abbildung 7.10 dargestellt.

Experimente zur Verifikation der Fertigungsstrategie					
Stauchen	Zustellung $z$ [mm]	Schläge $n$ [-]	Schlagdichte $ps$ [-]	Radius $R$ [mm]	Abweichung [%]
R300	22,7	51	17,63	284,5	-5,2
R400	22,7	39	12,6	387,5	-3,1
R500	22,7	28	9,62	471,5	-5,7
R300	23,0	41	14,05	286,5	-4,5
R400	23,0	31	10,04	391,2	-2,2
R500	23,0	22	7,74	474,1	-5,2
R300	23,3	32	11,01	285,3	-5,0
R400	23,3	24	6,85	386,2	-3,5
R500	23,3	17	5,13	500,1	0,0

*Tabelle 7.4: Verifikation der Fertigungsstrategie für das Stauchen*

Die Verifikation mit einer Zustellung von  $z = 22,7$  mm trifft den Radius mit einer durchschnittlichen Abweichung von etwa -4,7 %, für  $z = 23,0$  mm von etwa -3,9 % und für  $z = 23,3$  mm von etwa -2,8 %. Im Vergleich zum Streckprozess sind die Abweichungen im Schnitt minimal geringer, sie liegen aber ebenfalls im Bereich von 5 %. Auffallend ist hier, dass sich die Abweichungen im negativen Bereich bewegen. Das bedeutet, dass die gefertigten Radien kleiner sind als die berechneten Radien. Das Umformvermögen der Werkzeuge ist damit höher als zum Zeitpunkt der Ermittlung der Potenzkurve. Um die Abweichungen zu reduzieren muss auch hier ein Iterationsschritt durchgeführt und die Zustellung bzw. die Schlagdichte angepasst werden.

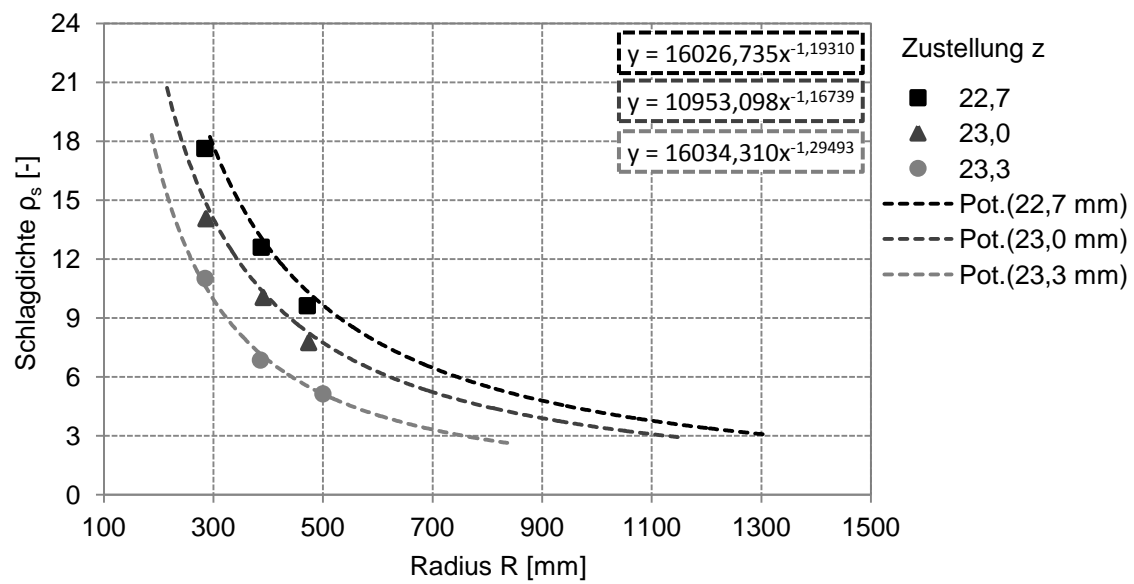


Abbildung 7.10: Verifikation der Fertigungsstrategie für das Stauchen

## 7.4 Iterative Optimierung der Fertigungsstrategie

Werden die grundlegenden Untersuchungen und Versuche zur Ermittlung der Datenbasis mit denselben Rahmenbedingungen durchgeführt wie anschließend der Fertigungsprozess, so ist es möglich ein Werkstück mit ausreichend hoher Genauigkeit zu fertigen. Wie bereits in Kapitel 4.5 dargestellt, gibt es allerdings mehrere nicht beeinflussbare Störgrößen auf den Fertigungsprozess. Daher ist es sehr unwahrscheinlich zwei Versuche mit exakt den gleichen Rahmenbedingungen (Umgebungstemperatur, Werkzeugverschleiß, Materialcharge, usw.) durchzuführen. Aufgrund dieser stets leicht unterschiedlichen Fertigungsrandbedingungen (Kapitel 4.5) können auftretende Abweichungen nicht vermieden werden. Um dennoch ein Fertigungsergebnis mit ausreichender Genauigkeit zu erzielen, kann zum Einstellen des Prozesses auf Iterationsschritte nicht verzichtet werden.

Abbildung 7.11 zeigt den Ablauf einer Iterationsschleife. Weicht der gefertigte Radius nach der ersten Fertigung vom Soll-Radius ab, lässt sich eine Schlagdichte bestimmen, die laut Fertigungsstrategie dem Ist-Radius entsprechen müsste. Aus der Differenz dieser und der im ersten Fertigungsschritt verwendeten Schlagdichte ergibt sich eine Abweichung  $\Delta\rho_s$ . Diese Differenz wird zur ersten Schlagdichte addiert und das zweite Bauteil mit der neuen Iterationsschlagdichte gefertigt.

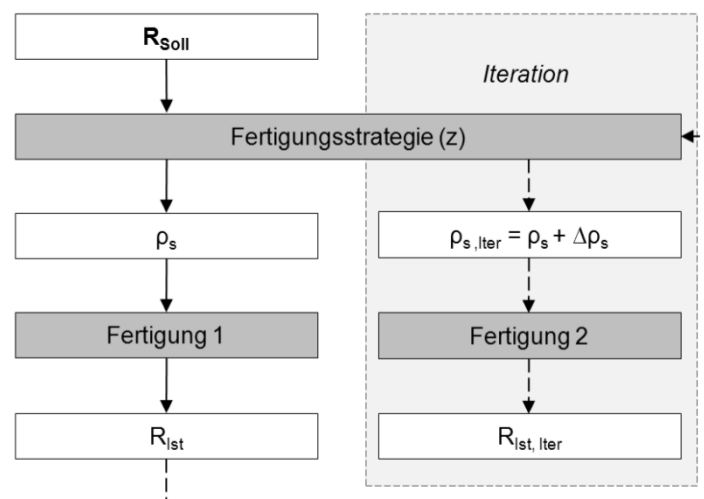


Abbildung 7.11: Fertigungsablauf mit Iterationsschritt

Exemplarisch wird ein Iterationsschritt für einen Soll-Radius von 600 mm berechnet. Mit Hilfe der Fertigungsstrategie kann aus den Daten eine Zustellung von 23 mm und eine Schlagdichte von  $\rho_s = 6,25$  abgeleitet werden. Beim ersten gefertigten Bauteil wird ein Radius von 645 mm (Abweichung 7,5 %) gemessen. Nach der Fertigungsstrategie wäre für einen Radius von 645 mm eine Schlagdichte von  $\rho_{ist} = 5,81$  notwendig. Die neue

Schlagdichte ergibt sich dann aus der ursprünglichen  $\rho_s$  plus der Differenz zwischen  $\rho_s$  und  $\rho_{ist}$  (Formel 7.6). Im vorliegenden Beispiel ergibt sich eine Schlagtiefe für den Iterationsschritt von  $\rho_{s,iter} = 6,70$ .

Danach ergibt sich die Schlagdichte des Iterationsschritts mit:

$$\rho_{s,iter} = \rho_s + (\rho_s - \rho_{ist}) \quad (\text{Formel 7.6})$$

#### 7.4.1 Iterationen beim Strecken

Die Radien der gefertigten Werkstücke weichen vom jeweiligen Soll Radius um etwa 2 - 3 % ab. Mit dem beschriebenen Vorgehen kann die Abweichung bei allen drei Radien bereits nach einem Iterationsschritt auf unter 0,5 % reduziert werden (Abbildung 7.12, Tabelle 7.5).

Fertigung mit Iterationsschritten							
Strecken	$\Delta\rho_s$	Zustellung z [mm]	Schläge n	Schlagdichte $\rho_s$	Radius R [mm]	$\rho_{ist}$	Abweichung [%]
R300	-	23	38	13,10	310,3	12,56	3,4
R300 Iteration 1	0,54	23	38	13,64	300,7		0,2
R400	-	23	31	9,64	408,2	9,41	2,1
R400 Iteration 1	0,23	23	31	9,87	401,2		0,3
R500	-	23	22	7,60	509,7	7,45	1,9
R500 Iteration 1	0,15	23	22	7,75	502,1		0,4

Tabelle 7.5: Versuche mit Iterationsschritten (Strecken)

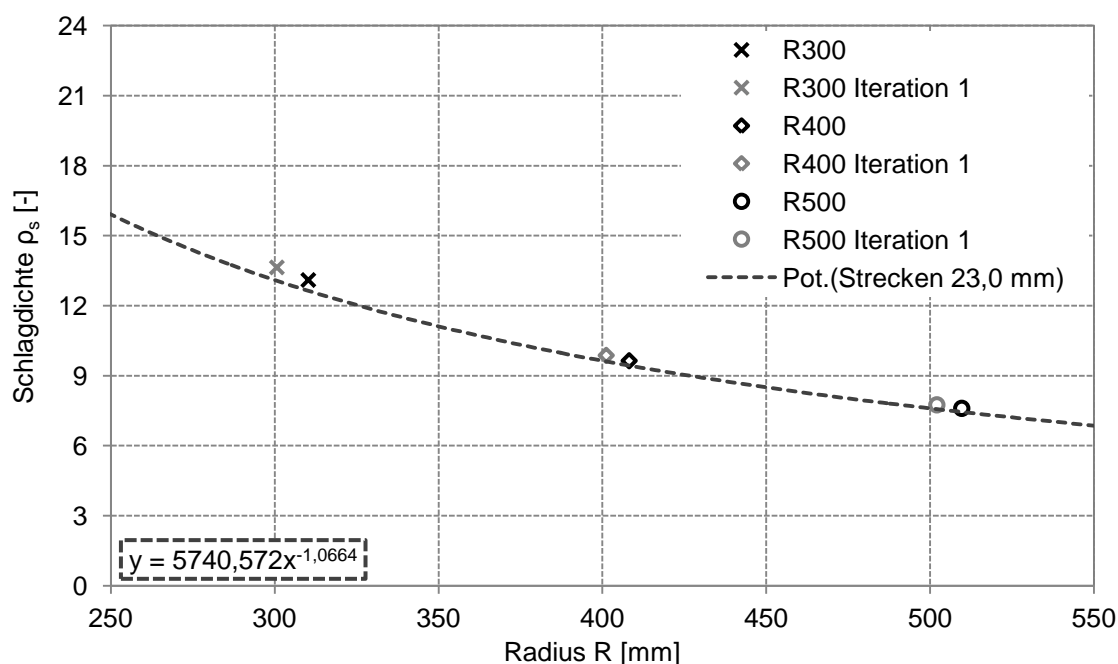


Abbildung 7.12: Fertigung mit Iterationsschritten (Strecken)

### 7.4.2 Iterative Optimierung beim Stauchen

Beim Stauchprozess ist die Abweichung der drei betrachteten Radien minimal größer, aber auch hier lässt sie sich bereits nach einem Iterationsschritt auf unter 0,5 % reduzieren (Tabelle 7.6, Abbildung 7.13).

Fertigung mit Iterationsschritten							
Stauchen	$\Delta\rho_s$	Zustellung z [mm]	Schläge n	Schlagdichte $\rho_s$	Radius R [mm]	$\rho_{ist}$	Abweichung [%]
R300	-	23	22	14,05	286,5	14,83	-4,5
R300 Iteration 1	-0,78	23	22	13,28	298,7		-0,4
R400	-	23	31	10,04	391,2	10,32	-2,2
R400 Iteration 1	-0,28	23	31	9,78	398,6		-0,3
R500		23	22	7,74	474,1	8,24	-5,2
R500 Iteration 1	-0,50	23	22	7,24	497,9		-0,4

Tabelle 7.6: Versuche mit Iterationsschritten (Stauchen)

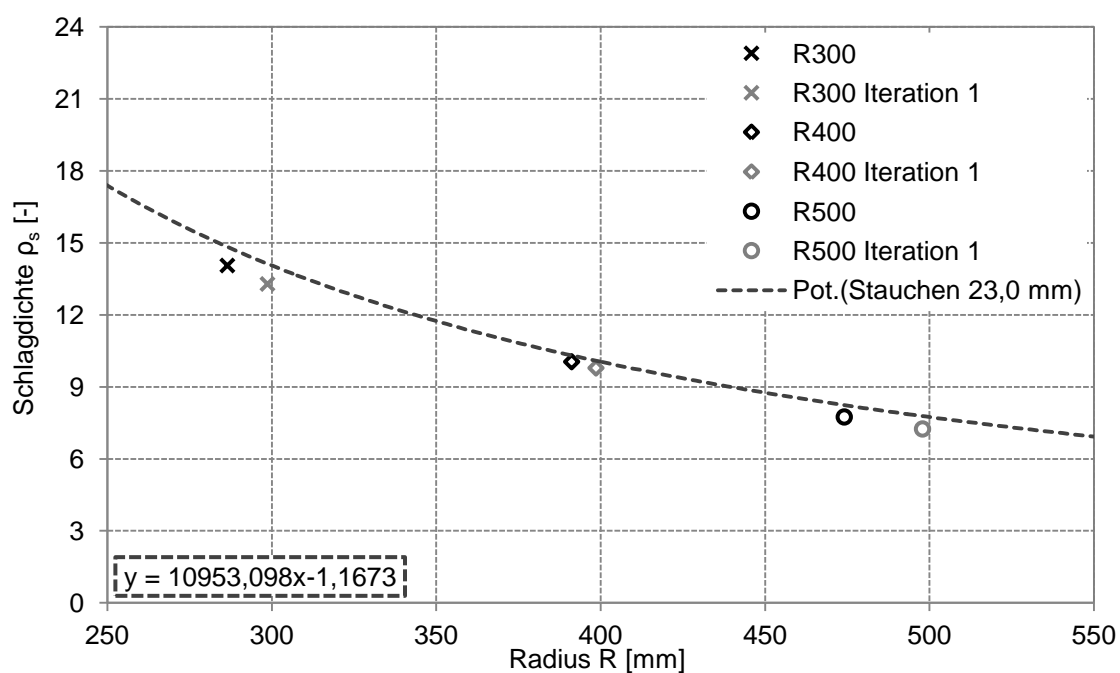


Abbildung 7.13: Fertigung mit Iterationsschritten (Stauchen)

## 7.5 Zusammenfassung der Schlagdichte

Die Ergebnisse in Kapitel 7 zeigen, dass die Schlagdichte als zentraler Fertigungsparameter verwendet werden kann.

Die benötigte Fertigungsstrategie wird aus dem Zusammenhang zwischen der Schlagdichte und dem Bauteilradius abgeleitet. Dieser wird für die Verfahren Strecken und Stauchen durch eine einfache Approximation einer Trendfunktion an mehreren Stützwerten ermittelt.

Die Vorhersagegenauigkeit der ersten Fertigungsstrategie hängt allerdings stark vom Einfluss der Fertigungsrandbedingungen ab (Kapitel 4.5), da sich kleine Fehler durch die Vielzahl an Umformoperationen sehr schnell zu großen Abweichungen aufsummieren.

Allerdings können diese bereits durch wenige Iterationsschritte minimiert werden. In den durchgeführten Versuchen konnte mit nur einem Iterationsschritt die Abweichung zwischen dem Sollradius und dem gefertigten Radius von ~5 % im ersten Schritt auf unter ~0,5 % nach der Iteration reduziert werden.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich der Umformtechnik eröffnen die inkrementellen Verfahren im Hinblick auf individuelle Produkte und flexible Fertigungskonzepte zukunftsweisende Alternativen. Gerade das in dieser Arbeit behandelte Kraftformerverfahren bietet durch seine beiden Verfahrensvarianten Strecken und Stauchen zahlreiche, aber bisher ungenutzte Potentiale. Vor allem die Verfahrensvariante Stauchen stellt unter den inkrementellen Fertigungsverfahren ein Alleinstellungsmerkmal dar. Keines der bekannten inkrementellen Verfahren bietet diese Möglichkeit. Einer verbreiteten industriellen Nutzung steht einzig der hohe manuelle Fertigungsanteil im Wege.

Ein erster große Meilenstein hin zur Automatisierung wurde mit dieser Arbeit gelegt. Zur robotergestützten Bauteilführung wurde eine Versuchszelle aufgebaut und damit erstmals eine reproduzierbare Fertigung von Versuchsbauteilen ermöglicht. Das eingangs formulierte Ziel, die inkrementellen Blechumformverfahren Strecken und Stauchen genauer zu analysieren und aus den Erkenntnissen Strategien für eine automatisierte Fertigung abzuleiten, konnte erreicht werden.

Im ersten Lösungsansatz wurden die Fertigungsstrategien für die Verfahren Strecken und Stauchen mit Hilfe der FEM-Simulation im Voraus berechnet. Mit der für die Umformtechnik im Karosseriebau entwickelten Software PamStamp 2G wurden Simulationsmodelle für das Kraftformerverfahren erstellt, die den gesamten Fertigungsprozesses realitätsnah abbilden.

Eine im Voraus definierte Fertigungsstrategie kann auf ihre Machbarkeit überprüft, nach Fehlern analysiert und gegebenenfalls angepasst werden. Allerdings ist die benötigte Rechenzeit noch immer sehr hoch und die erstellten Modelle müssen bei jeder Parameter- oder Geometrieänderung neu berechnet werden. Um das Simulationsergebnis an das gewünschte Zielbauteil anzunähern und verwertbare Fertigungsstrategien abzuleiten, sind zahlreiche Iterationsschritte erforderlich. Der Weg, die Strategie direkt aus den reinen CAD-Daten einer Zielgeometrie zu berechnen, ist mit den verwendeten Methoden nicht möglich.

Die FEM-Simulation stellt aufgrund des Rechenaufwands und der fehlenden Flexibilität bei der Modellerstellung keine zielführende Alternative dar, um Strategien für den automatisierten inkrementellen Fertigungsprozess abzuleiten.

Der zweite Lösungsansatz konzentrierte sich auf den einzelnen Umformschritt. Die Gesamtumformung ergibt sich bei inkrementellen Verfahren aus der Summe aller Einzelumformungen. Basierend auf einer sehr großen Anzahl an Versuchsdaten, wird die einzelne Umformoperation möglichst genau mit mathematischen Mitteln beschrieben. Die

benötigten Fertigungsparameter werden dann für diese einzelne Umformoperation berechnet und auf die folgenden Umformschritte übertragen.

Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung wurden mehrere Versuchspläne aufgestellt und die einstellbaren Fertigungsparameter auf ihren Einfluss analysiert. Durch eine Regressionsanalyse konnten Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Parametern identifiziert werden.

Für den Streckprozess konnte damit ein mathematischer Zusammenhang ermittelt und daraus Fertigungsstrategien abgeleitet werden. Nach wenigen Iterationsschleifen sind Bauteile mit sehr geringen Abweichungen zum Zielbauteil herstellbar. Allerdings bleiben dabei die Wechselwirkungen zwischen mehreren Umformoperationen komplett unberücksichtigt und führen bei einer großen Anzahl an inkrementellen Umformungen zu erheblichen geometrischen Abweichungen.

Vor allem beim Stauchprozess haben die Wechselwirkungen einen großen Einfluss auf das Umformergebnis und somit auch auf die Analyse und Auswertung der Umformversuche. Bei einer einzelnen Umformoperation entsteht in Abhängigkeit von der Schlagkraft eine Falte. Bei mehreren Schlägen wird diese Falte vom nachfolgenden Schlag undefiniert und nicht reproduzierbar flachgedrückt. Eine Reduzierung der Schlagkraft und damit des betrachteten Versuchsraums auf den Bereich vor der Faltenbildung würde eine genauere Beschreibung zwar zulassen, aber keine in der Praxis verwendbare Lösung liefern. Für das Verfahren Stauchen ist daher eine mathematische Modellierung sowie die Ableitung von verwertbaren Fertigungsstrategien nicht zielführend.

Mit dem dritten Lösungsansatz konnte durch die Einführung einer neuen Kenngröße -der Schlagdichte  $\rho_s$ - eine industriell anwendbare Lösung entwickelt werden. Die Schlagdichte  $\rho_s$  wird durch die Anzahl der ausgeführten Umformoperationen  $n$  auf einer bestimmten Länge  $l$  definiert. Im Gegensatz zur Betrachtung des Umformwinkels werden dabei auch Wechselwirkungen zwischen mehreren Umformoperationen betrachtet. Für eine Werkzeug-Werkstoff-Schlagkraft-Kombination muss ein einfacher Zusammenhang zwischen einer gewählten Schlagdichte und dem gewünschten Radius ermittelt werden.

Der große Einfluss der nicht direkt beeinflussbaren Fertigungsrandbedingungen konnte aber auch durch das Einführen der Schlagdichte nicht vollständig verhindert werden. Sobald die Randbedingungen bei der Modellerstellung auch nur geringfügig von denen bei der Versuchsdurchführung abweichen, hat dies einen beträchtlichen Einfluss auf das Umformergebnis. Diese Randbedingungen sind zum Beispiel die veränderte Umgebungs-

und Werkzeugtemperatur sowie die davon abhängige Viskosität des Gummis in den Werkzeugen, die Verschmutzung der Werkzeugbacken bzw. deren Verschleißzustand sowie Chargenunterschiede der Blechwerkstoffe.

Allerdings können mit Hilfe der gefunden Zusammenhänge diese Abweichungen der Fertigungs- und Eingangsparameter durch wenige Iterationsschritte kompensiert werden. Die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 7 zeigen, dass die Schlagdichte als zentraler Fertigungsparameter verwendet werden kann. Durch ein bis zwei Iterationsschritte konnte in den durchgeführten Versuchen für beide Verfahren, Strecken und Stauchen, eine Fertigungsstrategie abgeleitet werden, deren durchschnittliche Abweichung zum Zielradius unter 0,5 % liegt.

Weitere Arbeiten im Bereich der mathematische Modellierung des Kraftformerverfahrens sind nur dann zielführend, wenn die Fertigungsrandbedingungen genauer analysiert, exakt beschrieben und in der Modellierung berücksichtigt werden.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Varianten des Eckold Kraftformers [Quelle: Eckold] .....	7
Abbildung 2.2: Baugruppen Eckold Kraftformer KF 330 [Quelle: Eckold] .....	8
Abbildung 2.3: Abmessungen Eckold Kraftformer [Quelle: Eckold] .....	9
Abbildung 2.4: Werkzeugpalette für den Eckold Kraftformer [Quelle: Eckold] .....	10
Abbildung 2.5: Verfahrensvarianten [Quelle: Eckold] .....	11
Abbildung 2.6: Verfahrensprinzip Strecken .....	11
Abbildung 2.7: Verfahrensprinzip Stauchen .....	11
Abbildung 2.8: Aufbau der Umformwerkzeuge (l. Strecken, r. Stauchen) [Q.: Eckold] .....	12
Abbildung 2.9: Automatisiert gefertigte Winkel, geometrische Abweichung .....	16
Abbildung 3.1: Versuchsplan .....	18
Abbildung 4.1: Lokales und globales Optimum [ROEP05] .....	19
Abbildung 4.2: Vollfaktorieller $2^p$ -Versuchsplan .....	20
Abbildung 4.3: Teilfaktorieller $2^{4-1}$ -Versuchsplan .....	21
Abbildung 4.4: Übersicht Versuchsaufwand [RONN08] .....	22
Abbildung 4.5: Klassische bestanden/nicht bestanden Stufenfunktion [FUNK05] .....	23
Abbildung 4.6: Quadratische Verlustfunktion nach Taguchi [FUNK05] .....	23
Abbildung 4.7: Robustes Design [KROT90] .....	24
Abbildung 4.8: Faktoren suchen [RONN08] .....	25
Abbildung 4.9: Faktoren einstellen [RONN08] .....	25
Abbildung 4.10: Zielwert einstellen [RONN08] .....	26
Abbildung 4.11 Kalibrierung Kraftmessdose .....	28
Abbildung 4.12: Typischer Kraftverlauf .....	28
Abbildung 4.13: Typisches Kraftmaximum .....	28
Abbildung 4.14: Einfluss der Zustellung .....	29
Abbildung 4.15: Vergleich Kraftmaxima .....	29
Abbildung 4.16: Einfluss von Blechdicke und Material .....	30
Abbildung 4.17: Vergleich Kraftmaxima .....	31
Abbildung 4.18: Vergleich Kraftmaxima und Dicke .....	31
Abbildung 4.19: Beziehung Schlagtiefe und Zustellung .....	32
Abbildung 4.20: CAD-Modell und realer Aufbau zur Reibwertermittlung .....	36
Abbildung 4.21: Abnahme des Reibwertes bei steigender Schlaganzahl .....	37
Abbildung 4.22: ATOS Aufnahme .....	38
Abbildung 4.23: Verwendetes Versuchswerkstück .....	38

---

Abbildung 4.24: Winkeländerung am L- Profil.....	39
Abbildung 4.25: Änderung des Umformwirkungsgrades .....	39
Abbildung 5.1: Kinematik der Werkzeugbacken beim Strecken .....	43
Abbildung 5.2: Vernetzung der Werkzeuge und des Werkstückes.....	44
Abbildung 5.3: Kinematische und kinet. Beschreibung der Werkzeugbacken .....	46
Abbildung 5.4: Weg-, Kraftverlauf der Werkzeuge über der Zeit .....	46
Abbildung 5.5: Positionierung Werkzeug - Werkstück nach einer Umformung.....	48
Abbildung 5.6: Positionierung nach dem Vorschub in x-Richtung .....	49
Abbildung 5.7: Herausdrehen des Bleches aus der Stempelfläche.....	49
Abbildung 5.8: Faltenbildung nach Fixierung des Schenkels (vier Hübe, Abstand 5mm) .....	50
Abbildung 5.9: Prinzip des Geraderichtens durch zwei Guides .....	51
Abbildung 5.10: FEM-Modell, Geraderichten durch zwei Guides .....	51
Abbildung 5.11: Simulationsergebnis, Geraderichten nach 4 Hüben .....	52
Abbildung 5.12: Winkelfehler ohne (links) und mit Richtguides (rechts).....	52
Abbildung 5.13.: Vorschub mit Geschwindigkeitsrandbedingung .....	54
Abbildung 5.14: Umformkraft-, Verschiebungs- und Vorschubkurve .....	54
Abbildung 5.15: Vorschub durch Richtguides .....	55
Abbildung 5.16: Führungsguides und Vorschub durch Richtguides .....	56
Abbildung 5.17: Kraftkurve und Vorschubkurve des oberen Führungsguides .....	57
Abbildung 5.18: Vorschub des Führungsguides über Kraftsteuerung .....	58
Abbildung 5.19: Vorschub durch zusätzliche vertikale Vorschubguides.....	59
Abbildung 5.20: Kraftkurve des Vorschubguides .....	60
Abbildung 5.21: Weg- (l.) und Geschw.-kurve (r.) für die Vorschubbewegung .....	60
Abbildung 5.22: Vorschub durch zusätzliche vertikale Vorschubguides .....	61
Abbildung 5.23: Ohne Führungs- und Stabguides .....	62
Abbildung 5.24: Prozess des Geradebiegens.....	63
Abbildung 5.25: Geradebiegen des Winkels nach 40 simulierten Schlägen.....	63
Abbildung 5.26: Letzte Entwicklungsstufe des Simulationsmodells .....	64
Abbildung 5.27: Einfluss der Klemmkraft auf das Umformergebnis .....	67
Abbildung 5.28: Geschwindigkeitskurve der Werkzeugbacken .....	69
Abbildung 5.29: Bewegungskurve der Werkzeugbacken .....	69
Abbildung 5.30: Verschiebung der Bewegungskurve bei mehreren Schlägen .....	70
Abbildung 5.31: Messung der Werkzeugbackenbewegung $\Delta x_s$ .....	71
Abbildung 5.32: Werkzeugbewegung bei unterschiedlichen Zustellungen .....	71
Abbildung 5.33: Optimierung durch angepasste Geschwindigkeitskurve .....	72
Abbildung 5.34: Strecken mit einer Schlagdichte $p_s = 3$ , $z = 23,0$ mm .....	73

---

Abbildung 5.35: Strecken mit einer Schlagdichte $\rho_s = 9$ , $z = 23,3$ mm .....	74
Abbildung 5.36: Verifikation der Simulationsergebnisse mit Versuchswerten (Strecken) .....	74
Abbildung 5.37: Stauchen mit einer Schlagdichte $\rho_s = 3$ , $z = 23,3$ mm .....	75
Abbildung 5.38: Stauchen mit einer Schlagdichte $\rho_s = 9$ , $z = 23,3$ mm .....	76
Abbildung 5.39: Verifikation der Simulationsergebnisse mit Versuchswerten (Stauchen) .....	76
Abbildung 6.1: Fertigungsstrategie mit Umformwinkeln $\alpha$ im Abstand $a$ .....	78
Abbildung 6.2: Verwendetes Versuchswerkstück .....	79
Abbildung 6.3: ANOM (Versuchsreihe 1, Visual XSel) .....	83
Abbildung 6.4: Paretodiagramm (Versuchsreihe 1, Visual XSel) .....	84
Abbildung 6.5 Normieren der Daten [RONN08] .....	85
Abbildung 6.6: ANOM (Versuchsreihe 2, Visual XSel) .....	88
Abbildung 6.7: Paretodiagramm (Versuchsreihe 2, Visual XSel) .....	88
Abbildung 6.8: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Versuchsreihe 2) .....	89
Abbildung 6.9: Residuenverteilung (Versuchsreihe 2, Visual XSel) .....	89
Abbildung 6.10: Paretodiagramm (Versuchsreihe 2, Visual XSel) .....	90
Abbildung 6.11: Versuchsraum (Versuchsreihe 3, Visual XSel) .....	91
Abbildung 6.12: ANOM (Versuchsreihe 3, Visual XSel) .....	93
Abbildung 6.13: Abhängigkeit Winkel zu Dicke (Versuchsreihe 3, Visual XSel) .....	94
Abbildung 6.14: Vergleich absoluter Einflüsse, Paretodiagramm (Versuchsreihe 1-3) .....	95
Abbildung 6.15: Modell- ggü. Versuchswerte (Versuchsreihe. 3, Visual XSel) .....	95
Abbildung 6.16: Residuenverteilung (Versuchsreihe 3, Visual XSel) .....	96
Abbildung 6.17: Versuchsraum (Versuchsreihe 4, Visual XSel) .....	98
Abbildung 6.18: ANOM (Versuchsreihe 4, Visual XSel) .....	99
Abbildung 6.19: Vergleich absoluter Einflüsse (Versuchsreihe 1-4) .....	99
Abbildung 6.20: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Versuchsreihe 4) .....	100
Abbildung 6.21: Residuenverteilung (Versuchsreihe 4, Visual XSel) .....	100
Abbildung 6.22: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Versuchsr. 4.2) .....	101
Abbildung 6.23: Residuenverteilung (Versuchsreihe 4.2, Visual XSel) .....	102
Abbildung 6.24: Normalverteilung (Versuchsreihe 4, Visual XSel) .....	103
Abbildung 6.25: Vergleich der gefundenen Modellbeschreibungen .....	104
Abbildung 6.26: Winkel über Schenkel_b und Kraft für Modell 4 .....	105
Abbildung 6.27: Versuchsraum (Kraft, Visual XSel) .....	106
Abbildung 6.28: ANOM (Abhängigkeit der Kraft, Visual XSel) .....	107
Abbildung 6.29: Modellgrafik (Abhängigkeit der Kraft, Visual XSel) .....	107
Abbildung 6.30: Modell- ggü. Versuchswerten (Zustellung, Visual XSel) .....	108
Abbildung 6.31: Residuenverteilung (Zustellung, Visual XSel) .....	109

---

Abbildung 6.32: Normalverteilung (Zustellung, Visual XSel) .....	109
Abbildung 6.33: Zusammenhang Kraft und Winkel (Stauchen 1, Visual XSel) .....	111
Abbildung 6.34: Modell- ggü. Versuchswerten (Stauchen 1, Visual XSel) .....	112
Abbildung 6.35: Residuenverteilung (Stauchen 1, Visual XSel) .....	112
Abbildung 6.36: Normalverteilung (Stauchen 1, Visual XSel) .....	113
Abbildung 6.37: Modell- und Versuchswerte Stauchen; Modellwerte Strecken .....	113
Abbildung 6.38: Faltenbildung beim Stauchen .....	114
Abbildung 6.39: ANOM (Stauchen 2, $x^4$ , Visual XSel) .....	116
Abbildung 6.40: ANOM (Stauchen 2, $x^2$ ohne WW, Visual XSel) .....	118
Abbildung 6.41: Funktionen für die Regressionsanalyse .....	118
Abbildung 6.42: Vergleich von Modell- und Versuchswerten (Stauchen 2, $x^2$ ohne WW, Visual XSel) .....	119
Abbildung 6.43: Residuenverteilung (Stauchen 2, $x^2$ ohne WW, Visual XSel) .....	119
Abbildung 6.44: Normalverteilung (Stauchen 2, $x^2$ ohne WW, Visual XSel) .....	120
Abbildung 6.45: ANOM (Abhängigkeit Schlagkraft Stauchen, Visual XSel) .....	121
Abbildung 6.46: Normalverteilung (Schlagkraft Stauchen, Visual XSel) .....	122
Abbildung 6.47: Fertigungsstrategie .....	123
Abbildung 6.48: Kreissehne und Kreisbogen .....	124
Abbildung 6.49: Excel Makro zur Berechnung der Fertigungsparameter .....	125
Abbildung 6.50: Abweichungsanalyse zw. CAD und gefertigtem Werkstück .....	126
Abbildung 6.51: Iterationsschritte für ein L-Profil mit dem Zielradius 300 mm .....	128
Abbildung 7.1: Umformprinzip der Verfahren Strecken und Stauchen .....	131
Abbildung 7.2: Erklärung Längenmaß Schlagdichte, .....	131
Abbildung 7.3: Hauptmaße Werkstück [mm] .....	132
Abbildung 7.4: Zusammenhang zwischen Radius und Schlagdichte beim Strecken .....	133
Abbildung 7.5: Schlagdichte in Abhängigkeit vom Radius beim Strecken .....	134
Abbildung 7.6: Zusammenhang zwischen Radius und Schlagdichte beim Stauchen .....	135
Abbildung 7.7: Schlagdichte in Abhängigkeit vom Radius beim Stauchen .....	136
Abbildung 7.8: Einfluss des Werkzeugverschleißes .....	137
Abbildung 7.9: Verifikation der Fertigungsstrategie (Strecken) .....	138
Abbildung 7.10: Verifikation der Fertigungsstrategie für das Stauchen .....	140
Abbildung 7.11: Fertigungsablauf mit Iterationsschritt .....	141
Abbildung 7.12: Fertigung mit Iterationsschritten (Strecken) .....	142
Abbildung 7.13: Fertigung mit Iterationsschritten (Stauchen) .....	143

## 9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Mechanische Kennwerte.....	34
Tabelle 5.1: Vergleich der beiden Einheitssysteme [ESIG07] .....	47
Tabelle 5.2: Rechenzeiten bei unterschiedlicher Anzahl simulierter Schläge.....	66
Tabelle 5.3: Messungen der Werkzeugbewegung .....	71
Tabelle 5.4: Geschwindigkeit der Werkzeugbacken .....	72
Tabelle 6.1: Parameter (Versuchsreihe 1) .....	80
Tabelle 6.2: Versuchsplan (Versuchsreihe 1) .....	81
Tabelle 6.3: p-Values (Versuchsreihe 1).....	82
Tabelle 6.4: Werte für ANOM und absolute Effekte (Versuchsreihe 1) .....	84
Tabelle 6.5 Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 1) .....	85
Tabelle 6.6 Parameter (Versuchsreihe 2) .....	86
Tabelle 6.7: p-Values Wechselwirkungen (Versuchsreihe 2) .....	87
Tabelle 6.8: Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 2).....	87
Tabelle 6.9: Werte für ANOM und absolute Effekte (Versuchsreihe 2) .....	88
Tabelle 6.10: Parameter (Versuchsreihe 3) .....	91
Tabelle 6.11: Zusätzliche Versuche (Versuchsreihe 3) .....	92
Tabelle 6.12: Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 3).....	93
Tabelle 6.13: Parameter (Versuchsreihe 4) .....	97
Tabelle 6.14: Zusätzliche Versuche (Versuchsreihe 4).....	97
Tabelle 6.15 Ergebnisse Visual XSel (Versuchsreihe 4) .....	98
Tabelle 6.16: Koeffizienten mit und ohne Kraft <sup>4</sup> .....	101
Tabelle 6.17: Ergebnisse Visual XSel (Abhängigkeit der Kraft).....	106
Tabelle 6.18: Versuche für Stauchen 1.....	110
Tabelle 6.19: Ergebnisse Visual XSel (Stauchen 1).....	111
Tabelle 6.20: Parameter (Stauchen 2).....	115
Tabelle 6.21: Versuchsplan (Stauchen 2).....	115
Tabelle 6.22: Ergebnisse Visual XSel (Stauchen 2, $x^4$ ).....	116
Tabelle 6.23: Ergebnisse Visual XSel (Stauchen 2, $x^2$ ohne WW) .....	117
Tabelle 6.24: Ergebnisse Visual XSel (Abhängigkeit Schlagkraft Stauchen, linear) .....	121
Tabelle 6.25: Sollgeometrie.....	125
Tabelle 6.26 Berechnete Maschinenparameter .....	125
Tabelle 6.27: Iterationsschleifen für den Radius 300 mm .....	127
Tabelle 6.28: Berechnete Fertigungsparameter für den Radius 300 mm .....	127
Tabelle 7.1: Versuche zur Ermittlung der Potenzkurve für das Strecken .....	134



---

Tabelle 7.2: Versuche zur Ermittlung der Potenzkurve für das Stauchen .....	136
Tabelle 7.3: Erste Verifikation der Fertigungsstrategie (Strecken) .....	138
Tabelle 7.4: Verifikation der Fertigungsstrategie für das Stauchen .....	139
Tabelle 7.5: Versuche mit Iterationsschritten (Strecken) .....	142
Tabelle 7.6: Versuche mit Iterationsschritten (Stauchen) .....	143

### 9.3 Literaturverzeichnis

#### 9.3.1 Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

- [ALLW05] Allwood, J; Houghton, N; Jackson, K.: The Design of an Incremental Sheet Forming Machine; Advanced Materials Research, Vol 6-8, S. 471-478, 2005
- [ANON75] Vintage skill. Kraftformer zum Treiben von Kraftfahrzeugteilen, Zeitschriftenaufsatz: mach.tool rev., Band 63 Heft 367, Seite 117-118, 1975
- [ARNE92] Arne, H.; Vollertsen, F.: Extending laser bending for generation of convex shape, Umformtechnik - Ideen, Konzepte und Entwicklungen, Teubner, S. 71-85, 1992
- [BZDOK88] Bzdok, J.: Treiben - eine Technik der künstlerischen Metallgestaltung, Zeitschriftenaufsatz: Metallverarbeitung, Band 42 Heft 1, S. 12-15, 1988
- [DICK97] Dick, P.: Technologie des Hochdruckumformens ebener Bleche, Dissertation, Universität Darmstadt, 1997
- [DOEG95] Doege, E.; Kruska, J.-U.: Flexible Streckforming, Production Engineering 2, S. 76-70, 1995,
- [DOEG97] Doege, E.; Griesbach, B.; Schulz-Marner, H.: Adaptive Werkzeugkonzepte zur Umformung von gefügten Halbzeugen, EFB-Tagungsband T17, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, S. 10-11, 1997
- [DOET07] Dötz, D., Hoffmann, H., Scherer, D., Trinitis, C., Walter, M.; On the Automation of Incremental Metal Forming Processes; IEEE ARCS'07 Workshop Architecture of Computing Systems, "Dependability and Fault Tolerance", Zurich, Schweiz, 2007
- [DROS99] Drossel, G.; Friedrich, S.; u.a.: Aluminium-Taschenbuch, Aluminium-Zentrale, Düsseldorf, 1999
- [DUFL05] Duflou, J.R; Callebaut, B; Kruth, J.-P.: Laserforming of 3D Features Advanced Material Research, SHEMET 5, Nürnberg, 2005
- [ESIG07] ESI Group, PAM-STAMP 2G User Guide, 2007
- [FUMW95] Fu, M.W.; Lu, S.Q.; Huang, M.H.: A new technology of sheet-metal flexible die-forming using a viscoplastic pressure-carrying medium, Journal of Material Processing Technology 52, S. 359ff, 1995
- [FUNK05] Funkenbusch, P.: Practical guide to designed experiments; Dekker, New York, 2005

- 
- [GEIG94] Geiger, M.; Vollertsen, F.; Arnet, H.: Laserumformung von Blechen, SFU, Innovationspotential Umformtechnik, 1. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz, S. 24.2-24.13, 1994
- [GEIG99] Geiger, M.; Euringer, M; Neugebauer, R.; Garreis, F.: Lamellierte Aktiv-Werkzeugelemente in flexiblen Blechumformwerkzeugen, Blech, Rohre, Profile, Heft 1/2, S. 34-37, 1999
- [GOLL00] Golle, M.; Kerschner, M.; Semmler, S.: Wasserkraft die Autos schafft, Die neue Fabrik 3, S. 78-80., 2000
- [GROC05] Groche, P., Fritsche D.: Inkrementelle Massivumformung. Eine Technologie vor dem Comeback?, Zeitschriftenaufsatz: wt-Werkstattstechnik online \* Band 95 Heft 10, Seite 798-802, 2005
- [HAAS98] Haase, F.: Eigenspannungsermittlung an dünnwandigen Bauteilen und Schichtverbunden. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund, 1998
- [HAFN02] Hafner, M.: Modellbasierte stationäre und dynamische Optimierung von Verbrennungsmotoren am Motorenprüfstand unter Verwendung neuronaler Netze, Fortschr.-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 482, VDI Verlag, Düsseldorf 2002
- [HALM70] Halm, D.; Spanloses Kaltformen von Profilen und Blechen, Schweiz. Maschinen-Markt, S. 32ff, 1970
- [HARD93] Hardt, E.D.; Boyce, M.C.; Ousterhout, K.B.; Karafillis, A.; Eigen, G.M.: A CAD-driven flexible forming system for three-dimensional sheet metal parts, SAE-Papers, Paper-No. 930282, S. 1ff, 1993
- [HAUT06] Hoffmann H., Stanchev S., Hautmann R., Scherer D., Petry R.: Rapid Manufacturing von Blechformteilen, in: Reinhard G., Zäh M.: Rapid Manufacturing Heutige Trends, zukünftige Anwendungsfelder, Herbert Utz Verlag, ISBN 3-89675-081-X, München, 2006
- [HENN97] Hennige, T.; Holzer, S.; Vollertsen, F; Geiger: M.: On the working accuracy of laser bending, in: Journal of Materials Processing Technology, Band 71, S. 422-432, 1997
- [HIRT01] Hirt, G.; Junk, S.; Witulski, N.: Surface quality, geometric precision and sheet thinning in incremental sheet forming, Konferenz-Einzelbericht: Materials Week 2001, Internat. Congress on Adv. Materials, their Processes and Applications, Proc., S. 1-8, 2001
- [HIRT02] Hirt, G.; Junk, S.; Witulski, N.: Incremental sheet forming: quality evaluation and process simulation, Konferenz-Einzelbericht: Advanced Technology of Plasticity 2002, Proc. of the 7th ICTP Internat. Conf. on Technol. of Plasticity, Band 1, S. 925-930, 2002

- [HOFF05] Hoffmann, H.; Hautmann, R.; Petry, R.: Studies for the Development of a Simulation Basis for Numerically Controlled Driving of Sheet Metal, SheMet 2005 - International Conference on Sheet Metal, Erlangen, 2005
- [HOFF05-2] Hoffmann, H.; Petry, R.: Numerically Controlled Driving of Sheet Metal as a Manufacturing Method for Individualized Products, MCPC 2005 - World Congress on Mass Customization and Personalization, Hong Kong, 2005
- [HOFF07] Hoffmann, H., Lohmann, B., Lueth, T. C., Golle, M., Weber, S., Scherer, D., Markert, M., Yang, Z.: Driving as a Flexible Manufacturing Method for Mass Customization of Individualized Sheet Metal Products; 18th Annual Conference of the Production and Operations Management Society POMS Dallas, Texas, 2007
- [HOFF07] Hoffmann, H., Golle, R., Scherer, D., Petry, R.: Numerically Controlled Driving of Sheet Metal as a Flexible Manufacturing Method for Individualized Products; International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production; CARV 2007, ISBN 978-0-9783187-0-3, Toronto, Canada, 2007
- [HOWA08] Howard, D.: Neural Network Toolbox 6™ Users Guide; (Ersch. 2008, Zugriff: 01.12.2008, 09:28 MEZ);  
<[http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/nnet/nnet.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf)>
- [JADH04] Jadhav, S.: Basic Investigations of the Incremental Sheet Metal Forming Process on a CNC Milling Machine; Dissertation, Universität Dortmund, 2004
- [JUNK03] Junk, S.: Inkrementelle Blechumformung mit CNC-Werkzeugmaschinen: Verfahrensgrenzen und Umformstrategien; Dissertation, Universität Saarbrücken, 2003
- [KAPO73] Kaporovich, V.; Vashchuk, L.: Tangential swaging of tubular blanks, Vestn. Masstro, S. 64ff, 1973
- [KLEI04] Klein, B.: Versuchsplanung - DoE; Oldenburg, München, 2004
- [KLEI91] Kleiner, M.; Smatloch, C.: Flexibles Werkzeug zum Tiefziehen mit verstellbarem Stempel, Bänder, Bleche, Rohre 12, S. 33-37, 1991
- [KLEI98] Kleiner, M.; Arendes, D.; Weidner, T.: Konzepte zur Fertigung von Tiefziehwerkzeugen für Kleinserien und Prototypen, Industrie Management 14, Heft 5, S. 29-33, 1998
- [KOPP95] Kopp, R.: Flexible Umformtechnik – Abschlusskolloquium zum DFG Schwerpunktprogramm. In: WZL, RWTH Aachen (Hrsg.), Mainz, 1995

- 
- [KOPP96] Kopp, R.; Wüstefeld, F.; Linnemann, W.; Kittel, S.; Werner, G.; Dürr, W.; Köhler, W.: ¼ Tank Bulkhead Segment for the European Ariane 5, Tagungsband 6. Internationale Kugelstrahlkonferenz (ICSP6), San Francisco, S. 87-94, 1996
- [KROT90] Krottmaier, J.: Versuchsplanung - Der Weg zur Qualität des Jahres 2000; Verl. Industrielle Organisation u.a., Zürich u.a., 1990
- [LAMM04] Lamminen, L; Tuomi, J: Incremental Sheet Forming as a Method for Sheet Metal Component Prototyping and Manufacturing; 10èmes Assises Européennes des Prototypage Rapide-14/15; 2004
- [LAMM05] Lamminen, L.: Incremental Sheet metal Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design
- [LAMM08] Lamminen, L; Wadmann, B; Küttner, R; Svinning, T.: ProSheet – Prototyping and low volume production of sheet metal components; Research report – Nordic Industrial Fund (Ersch. unbekannt, Zugriff: 18.11.2008)
- [MARK09] Markert, M., Koschany, A., Lueth, T.C.: Tracking of the liver for navigation in open surgery, accepted for CARS 2009, Computer Assisted Radiology and Surgery, Berlin, 2009,
- [MCCU43] McCulloch, W.; Pitts, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity Bulletin of Mathematical Biology, Volume 5, Number 4; Springer, S. 115-133, New York, 1943,
- [MUTZ76] Mutz, A.: Aus der Vielfalt der römischen Metalltechnik, Schweizerisch Technische Zeitung 73, 15/16, S. 393-396, 1976,
- [NAKA94] Nakamura, S.; Sugiura, H.; Onoe, H.; Ikemoto, K., Aichi, J.: Hydromechanical drawing of automotive parts, Journal of Materials Processing Technology, Band 46, S. 491-503, 1994
- [NAKA97] Nakagawa, T.; Toda, M; Hokao, K.: Experimental manufacturing of auto-body panel forming tool by laser cut steel laminating, LANE 97, Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proc. of the 30th Internat. CIRP Seminar on Manufacturing Systems, Erlangen, Band 30, 1997
- [NN70] N.N.: Le chaudonnage de l'aluminium et de des alliages, Rev. Aluminium 389, S. 923-931, 1970
- [NN75] N.N.: Vintage skill, Mach. Tool Rev. 63 367, S. 117-118, 1975
- [OLSS96] Olsson, J.: Flexibles Herstellen von Blechprototypen, Blech Rohre Profile, Band 43, S. 128f, 1996

- 
- [REIC96] Reichenbach, B.: Mit aktivem Wirkmedium Beulsteifigkeit erhöhen, Industrieanzeiger, Band 118, Heft 42, S. 62-64, 1996
- [REIM99] Reimann, K.: Neuer Schub für Umformwerkzeuge aus Kunstharz, WB Werkstatt und Betrieb, Band 132, Heft 10, S. 50-51, 1999
- [REIT08] Reiter, T.: Taguchi Versuchsplanung Kurzzusammenfassung; (Ersch. 23.03.2006, Zugriff: 02.02.2009)  
<[http://www.reiter1.com/Glossar/DOE,%20Taguchi\\_Kompakt.doc](http://www.reiter1.com/Glossar/DOE,%20Taguchi_Kompakt.doc)>
- [ROEP05] Röpke, K.: DoE - Methoden und Anwedungen in der Motorenentwicklung; Die Bibliothek der Technik Nr. 272, sv corporate media, München, 2005
- [ROEP05] Röpke, K.: DoE - Methoden und Anwedungen in der Motorenentwicklung; Die Bibliothek der Technik Nr. 272, sv corporate media, München, 2005
- [RONN07] Ronniger, C.: Systemanalyse – Vom Wirkungsdiagramm zum Versuchsplan CRGRAPH 2008 (Ersch. unbekannt, Zugriff: 08.12.2008)  
<[http://www.crgraph.de/Prog\\_Beschreibung\\_Systemanalyse.pdf](http://www.crgraph.de/Prog_Beschreibung_Systemanalyse.pdf)>
- [RONN08] Ronniger, C.: Versuchsmethoden Statistik & DoE (Auflage 10.9, 2008, Zugriff: 21.01.2009) <<http://www.versuchsmethoden.de>>
- [SCHÄ96] Schäfer, T.: Bleche individuell bearbeiten; Werkstatttechnik online, Jahrg. 06
- [SCHÄ07] Schäfer, T.: Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter; Dissertation, Universität Stuttgart, 2007
- [SCHE06] Scherer, D.: NC-Formen individualisierter Bauteile; Münchener Kolloquium - Zukunft denken. Zukunft gestalten., Tagungsbandbeitrag, ISBN: 3-8316-0575-0 München, Deutschland, 2006
- [SCHE07] Scherer, D., Hoffmann, H., Lohmann, B., Lueth, T. C., Golle, M., Weber, S., Markert, M., Yang, Z.: Driving as a Flexible Innovative Manufacturing Method for Individualized Sheet Metal Products. International Conference - Innovations in Sheet Metal Forming; IDDRG 2007; Győr, Hungary, 2007
- [SCHE07-2] Scherer, D., Hoffmann, H., Lohmann, B., Lueth, T. C., Golle, M., Weber, S., Markert, M., Yang, Z.: Cognitive Driving as a Prospective Manufacturing Method for Individualized Sheet Metal Products."; International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production; CARV 2007, ISBN 978-0-9783187-0-3 Toronto, Canada, 2007

- 
- [SCHE07-3] Hoffmann, H.; Lohmann, B.; Lueth, T. C.; Golle, M.; Weber, S.; Scherer, D.; Markert, M.; Yang, Z.: Driving as a Flexible Manufacturing Method for Mass Customization of Individualized Sheet Metal Products. 18th Annual Conference of the Production and Operations Management Society POMS 2007, Dallas, Texas, USA, 2007
- [SCHE08] Scherer, D., Hoffmann, H., Lohmann, B., Lueth, T. C., Golle, M., Weber, S.: Driving as an Innovative Manufacturing Method for Mass Customization of Individualized Sheet Metal Products. POMS 19th Annual Conference La Jolla, California, USA, 2008
- [SCHR02] Schermeier, O.; Lüth, T.C.: "Methoden und Verfahren zur Navigation in der dentalen Implantologie," at- Automatisierungstechnik, vol. 6, pp. 253–261, 2002
- [STOP07] Stopp, S.; von Kienlin, E.; Deppe, H.; Lueth, T.: A system for save and precise laser bone removal. Hospital Healthcare Europe 2007/2008, pp. T21-T23, 2007
- [STOP08] Stopp, S.; Svejdar, D.; v. Kienlin E.; Deppe, H.; Lueth, T.C.: A New Approach for Creating Defined Geometries by Navigated Laser Ablation Based on Volumetric 3-D Data. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 55, pp. 1872-1880, 2008
- [STRA05] Strauss, G.; Koulechov, K.; Richter, R.; Dietz, A.; Meixensberger, J.; Trantakis, C.; Lueth, T. C.: Navigated control: a new concept in computer assisted ENT-surgery. Laryngorhinootologie, Aug 84 (8), pp. 567-76, 2005
- [TAGU00] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Taguchi, S.: Robust Engineering; McGraw-Hill, New York, 2000
- [YANG07] Z. Yang, M. Markert, D. Scherer, M. Golle, S. Weber, H., Hoffmann, B. Lohmann and T.C. Lueth, "Driving Using a Cognitive Method for Production of Customized Sheet Metal Parts", IFAC Workshop on Manufacturing Modelling, Management and Control, Budapest, Hungary, 2007
- [YANG08] Z. Yang, M. Markert, D. Scherer, M. Golle, S. Weber, H. Hoffmann, B. Lohmann and T.C. Lueth, "A Human-Machine interactive Driving System", IEEE International Conference on Distributed Human-Machine Systems, Athens, Greece, 2008
- [ZHAN07] Zhang, J.: Roboterbasiertes inkrementelles Blechumformen; Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2007

### 9.3.2 Diplom-, Master- und Semesterarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2005 bis 2010 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden unter anderem Fragestellungen zur Automatisierung der inkrementellen Umformtechnik mit dem Eckold Kraftformer untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen.

**Dendl, M.:** Experimentelle Ermittlung der Veränderungen von Werkstoffkenn-werten bei inkrementellen Umformprozessen; Semesterarbeit

**Dötz, D.:** Von Klitzing, T.: Entwicklung eines Tools zur synchronen Steuerung eines Kraftformers und eines Positioniertisches mit zwei Achsen; Systementwicklungsprojekt

**Dötz, D.:** Modellierung und Entwicklung einer Softwareschnittstelle und Versuchssteuerung für dynamische inkrementelle Umformprozesse mittels eines KUKA KR-30 Industrieroboters sowie einer Eckold C-Gestellpresse (Kraftformer); Diplomarbeit

**Frahm, M.:** Tribologische Untersuchungen von Werkzeugeinsätzen für die inkrementelle Blechumformung; Semesterarbeit

**Mayr, S.:** Optimierung der FE-Simulation für die inkrementelle Umformung komplexer 2D-Geometrien mit PAM-STAMP 2G; Semesterarbeit

**Meraner, C.; Schmidt P.:** Entwicklung und Verifikation von Fertigungsstrategien für die inkrementelle Blechumformung mittels Experimenten und FEM-Simulationen; Semesterarbeit

**Nothhaft, K.:** Simulation und Verifikation der inkrementellen Umformung komplexer 2D-Geometrien mittels der Software PAM-STAMP 2G; Semesterarbeit

**Scharschinger, M.:** Verschleißuntersuchung von Werkzeugeinsätzen zur inkrementellen Blechumformung; Semesterarbeit

**Sengül, H.:** FEM-Simulation der inkrementellen Umformung komplexer 2D-Geometrien mittels ABAQUS; Semesterarbeit

**Stadlberger, A.:** Konstruktion eines Werkzeugs zur inkrementellen Umformung von Blechen durch Strecken und Stauchen; Diplomarbeit

**Vogt, S.:** Optimierung und Verifikation der FE-Simulation für die inkrementelle Blechumformung, Semesterarbeit

**Vogt, S.:** Entwicklung einer Fertigungsstrategie für die inkrementelle Blechumformung, Diplomarbeit

**Widmann, U.:** Simulation der inkrementellen Umformung komplexer 2D-Geometrien mittels der Software PAM-STAMP 2G; Semesterarbeit