

Technische Universität München
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk



**Modellierung der Deformationszone beim inkrementellen Umformen
durch Finite-Elemente-Analyse**

(experimentelle und theoretische Bachelorarbeit)

Bearbeitet von:	Alexander Bös
Matrikelnummer:	03650901
Betreuer:	M. Sc. Christoph Hartmann
Ausgabedatum:	05.07.2016
Abgabedatum:	05.01.2017

Erklärung

Die Bachelor's Thesis

„Modellierung der Deformationszone beim Inkrementellen Umformen durch Finite-Elemente-Analyse“

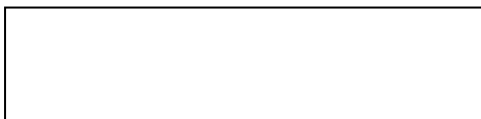
entstand während meiner Tätigkeit als Bachelorand am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen an der Technischen Universität München. Die Ergebnisse wurden zusammen mit Herrn M. Sc. Christoph Hartmann erarbeitet und ausgewertet. Die schriftliche Ausarbeitung erfolgte von mir selbstständig. Es wurden dabei keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Die Richtlinien der Technischen Universität München zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und für den Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten habe ich erhalten und bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit eingehalten.

Ich gestatte dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen diese Studienarbeit bzw. Teile davon nach eigenem Ermessen an Dritte weiterzugeben, zu veröffentlichen oder anderweitig zu nutzen. Mein persönliches Urheberrecht ist über diese Regelung hinaus nicht beeinträchtigt.

Eventuelle Geheimhaltungsvereinbarungen über den Inhalt der Arbeit zwischen mir bzw. dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen und Dritten bleiben von dieser Vereinbarung unberührt.

Garching, 05.01.2017



Alexander Bös

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München während meiner Tätigkeit als Bachelorand. Ich möchte mich bei M. Sc. Christoph Hartmann für die gute und dauerhaft hilfsbereite Betreuung meiner Bachelorarbeit bedanken. Großer Dank gilt meiner Familie für ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen und Stand der Technik	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.1	Blechumformung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.2	Inkrementelles Umformen	4
2.3	Kraftformerverfahren.....	7
2.4	Finite-Elemente-Methode	10
3	Problemstellung, Ziel und Vorgehen.....	12
3.1	Problemstellung	12
3.2	Ziel.....	12
3.3	Vorgehen	13
4	FEA des Kraftformerverfahrens	14
4.1	Pre-Processing	14
4.1.1	Erstellen der Bauteile und Vernetzung.....	14
4.1.2	Bauteilanordnung	15
4.1.3	Definition der Bauteile	17
4.1.4	Materialzuweisung	18
4.1.5	Kontaktbedingungen	19
4.1.6	Erstellen der Werkzeugbewegungen	20
4.1.7	Simulationsparameter	21
4.1.8	Unterschiede in der Modellbildung mit Volumenelementen	22
4.2	Post-Processing.....	22
4.2.1	Streckverfahren	23
4.2.2	Stauchverfahren	25
4.2.3	Streckverfahren mit Volumenelementen im Vergleich.....	28
4.3	Variation von Parametern	30
4.3.1	Variation der Werkzeugposition.....	30

4.3.1.1	Streckverfahren	31
4.3.1.2	Stauchverfahren	34
4.3.2	Variation der Reibwertes	36
5	Das geometrische Optimierungsverfahren	39
6	Validierung der Ergebnisse	40
7	Zusammenfassung und Ausblick	43
A.	Abbildungsverzeichnis	44
B.	Tabellenverzeichnis	47
C.	Literatur	48

1 Einleitung

In der Industrie herkömmlich verwendete Verfahren zur Blechverarbeitung sind darauf angewiesen, große Stückzahlen abzusetzen, um trotz der hohen Investitionskosten einen Gewinn zu erzielen. Zusätzlich, zu den hohen Investitionskosten, besitzen die herkömmlichen Verfahren eine geringe Flexibilität von Produktvariationen aufgrund des Herstellungsprozesses. Für die Herstellung werden zumeist bildgebende Werkzeugkonturen benötigt, welche nur ein bestimmtes Produkt herstellen können. Die Verfahren bieten wenige Möglichkeiten, individuelle Produkte herzustellen, und durch die hohen Kosten eignen sie sich nicht für eine Produktion in Kleinserien.

Auf dem Markt entsteht eine wachsende Nachfrage nach individualisierten Produkten. In diesen müssen oftmals spezielle Kundenwünsche umgesetzt werden. Werden die Produkte jedoch nicht in hohen Stückzahlen benötigt, wie zum Beispiel auch bei Prototyping, entsteht das Problem, die Güter zu wirtschaftlich rentabel herzustellen. Neben den individuellen Kundenwünschen müssen auch Anforderungen an die Qualität erfüllt werden.

Um sämtliche Anforderungen an Qualität, Individualität und wirtschaftlicher Rentabilität in einer Kleinserienproduktion zu erfüllen, wird derzeit an verschiedenen Verfahren geforscht.

Die Umformverfahren der inkrementelle Blechumformung (IBU) besitzen das Potential, alle genannten Anforderungen zu erfüllen. Die Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Formgebung nicht durch eine bildgebende Werkzeugkontur stattfindet, sondern durch eine hohe Anzahl kleiner Arbeitshübe die gewünschte Geometrie erzeugt wird.

Der Lehrstuhl für Umform- und Gießereitechnik (UTG) der Technischen Universität München forscht an einem dieser inkrementellen Umformverfahren. Um dieses Verfahren in der Industrie einsetzbar zu gestalten, muss ein Weg gefunden werden, den derzeit manuellen Herstellweg zu automatisieren.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Blechumformung

Das Umformen stellt nach DIN 8580 eine der sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren dar (Tabelle 2.1). Unter einem Umformvorgang versteht man die plastische oder bildsame Veränderung der Form eines Körpers und seiner Oberfläche und Eigenschaften. Während dieses Vorganges werden Masse und Stoffzusammenhalt beibehalten. Das Umformen findet unter Beherrschung der Geometrie statt, das heißt, es wird eine gezielte Formänderung durchgeführt, da es sich andernfalls um Verformen handelt. Beim Umformen kann zwischen Blech- und Massivumformung unterschieden werden. Hierbei wird durch die verwendeten Halbzeuge differenziert. Die Blechumformung handelt von der Umformung von Blechen mit einer maximalen Dicke von ca. 10 mm. Bei der Massivumformung hingegen handelt es sich um starke Veränderungen in alle drei Raumrichtungen und damit gehen große Querschnittsänderungen einher. (Doege und Behrens, 2007, S.7ff)

Hauptgruppe 1	Hauptgruppe 2	Hauptgruppe 3	Hauptgruppe 4	Hauptgruppe 5	Hauptgruppe 6
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	Stoffeigenschaft ändern

Tabelle 2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (Deutsches Institut für Normung, 2003)

In der Umformtechnik wird auch hinsichtlich der Temperatur unterschieden. Bei der Kaltumformung wird das Werkstück ohne externe Wärmezufuhr umgeformt. Die Maßgenauigkeit ist hoch, jedoch sind große Umformkräfte notwendig. Da mit steigender Temperatur in der Regel das Umformvermögen steigt, können die größten Formänderungen bei der Warmverformung erhalten werden. Der Stahl wird bei 1000° C bis 1250° C umgeformt. Die aufzubringende Kraft ist 8- bis 10-mal geringer als bei der Kaltverformung, jedoch leidet aufgrund von Schrumpfung und Verzug die Maßgenauigkeit. Die Halbwarmverformung findet bei ca. 650° C bis 900° C statt. (Doege und Behrens, 2007, S. 8f)

In DIN 8582 werden Umformverfahren nochmals nach auftretenden, charakteristischen Spannungszuständen eingeteilt (Tabelle 2.2). Die für diese Arbeit relevanten Umformvorgänge sind das Strecken und das Stauchen. Das Strecken wird dem Längen zugeteilt und ist somit eine Zugumformung. Hierbei wird der plastische Zustand durch eine ein- oder mehrachsige Zugbeanspruchung herbeigeführt. In Abbildung 2.1 wird eine Streckung eines Stabes dargestellt. Die Kraft F greift in Richtung der Längsachse an. Der Stab hat die Querschnittsfläche A

und die Länge L . Das Werkstück wird in Richtung der Zugkraft gestreckt. Dabei verringert sich der Querschnitt des Stabes. Erklären lässt sich das, indem man die Gleichung für das Stabvolumen betrachtet und dabei bedenkt, dass sich während des Umformvorganges das Volumen nicht verändert.

$$V = 2 \times \pi \times r \times L \quad \text{Gleichung 2.1}$$

r Radius

Diese Gleichung lässt sich zusammenfassen zu Gleichung 2.2

$$V = A \times L \quad \text{Gleichung 2.2}$$

Vergrößert man nun die Querschnittsfläche A , muss sich folglich die Länge L verringern, damit das Volumen V unverändert bleibt.

Stauen ist ein Verfahren des Freiformens oder auch Freiformschmiedens und ist somit ein Druckumformverfahren. Beim Stauen wird die Länge eines Werkstückes durch eine ein- oder mehrachsige Krafteinwirkung verkürzt. Abbildung 2.2 stellt diesen Vorgang anhand eines Stabes dar. Die mathematischen Beziehungen aus Gleichung 2.1 und 2.2 gelten auch hier. Folglich vergrößert sich, aufgrund der Verringerung der Länge L , die Querschnittsfläche A . Wenn das Werkstück eine zu schlanke Ausgangsgeometrie besitzt, besteht beim Strecken die Gefahr des Ausknickens. (Doege und Behrens, 2007, S. 11ff) (Hoffmann, Neugebauer und Spur, 2012, S. 210f, S. 555)

Druckumformen DIN 8583	Zugdruckumformen DIN 8584	Zugumformen DIN 8585	Biegeumformen DIN 8586	Schubumformen DIN 8587
Walzen	Durchziehen	Längen	Biegen mit geradliniger Werkzeugbewegung	Verschieben
Freiformen	Tiefziehen	Weiten	Biegen mit drehender Werkzeugbewegung	Verdrehen
Gesenkformen	Kragenziehen	Tiefen		
Eindrücken	Drücken			
Durchdrücken	Knickbauchen			

Tabelle 2.2: Einteilung der Umformverfahren nach DIN 8582 (Deutsches Institut für Normung, 2003)

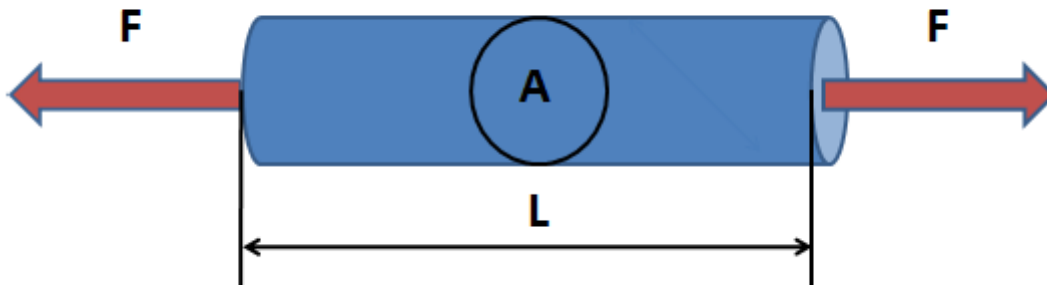


Abbildung 2.1: Strecken eines Stabes

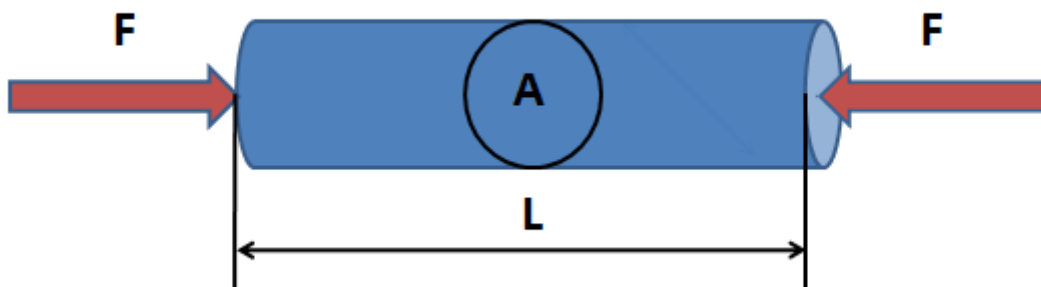


Abbildung 2.2: Stauchen eines Stabes

2.2 Inkrementelles Umformen

Die in der Industrie herkömmlich genutzten Verfahren zur Blechverarbeitung, wie etwa Tiefziehen, verwenden zumeist formgebende Werkzeuge. Mithilfe jedes dieser Werkzeuge kann genau eine Endgeometrie erzeugt werden. Diese Verfahren sind sehr kosten- und zeitintensiv, da die Herstellung der Werkzeuge einen erheblichen Arbeitsaufwand darstellt. Diese werden meist durch die spanende Nachbearbeitung von Gussrohlingen hergestellt. Ferner werden aufgrund der hohen Umformkräfte robuste Maschinen benötigt. Um diese Verfahren rentabel zu gestalten, muss eine hohe Stückzahl erzeugt und abgesetzt werden. Es werden häufig Produkte benötigt, welche nur in Kleinserien hergestellt werden, da der Absatzmarkt nicht groß

genug ist. Auch die Herstellung von Prototypen ist mit konventionellen Verfahren nicht rentabel gestaltbar, da diese immer wieder nachgebessert und somit immer wieder neue Werkzeuge hergestellt werden. Um auch Kleinserien und Prototypen wirtschaftlich herzustellen, sind Umformverfahren gefragt, welche es ermöglichen, individuelle Teile flexibel und ohne erhebliche, dauerhaft anfallende Werkzeugkosten zu produzieren. (Meier, Smukala und Buff, 2008)

Inkrementelle Blechumformverfahren können diese Möglichkeiten bieten, da die Anlagenkosten im Vergleich zu konventionellen Verfahren sehr gering sind und der Verzicht auf Verwendung von werkstückspezifischen Werkzeugen höchste Flexibilität und Variantenvielfalt bietet. Da es sich um einen iterativen Prozess handelt, kann jeder Zeit eingegriffen und das Werkstück, anders als möglicherweise zu Beginn geplant, verändert werden. Inkrementelle Umformverfahren sind dadurch charakterisiert, dass die Endgeometrie durch wiederholte kleine und lokale Umformungen durch ein Universalwerkzeug erzeugt wird. Aufgrund der jeweils kleinen Umformzonen wird eine deutlich geringere Umformkraft im Vergleich zu konventionellen Umformverfahren benötigt. Dabei können größere Verformungen erzeugt werden. Inkrementelle Umformverfahren werden abhängig von der Art der eingebrachten Verformung unterschieden. Es gibt thermische und mechanische Verfahren. Zu den thermischen Verfahren zählen das Laser- und das Plasmastrahlumformen. Mechanische Verfahren werden nochmals in strahlbasierte Verfahren, wie dem Wasserstrahlverfahren, und werkzeugbasierte Verfahren unterschieden, mit welchen sich diese Arbeit beschäftigt. (Emmens, 2008) (Schäfer, 2006)

Die Anfänge des inkrementellen Umformens liegen weit in der Geschichte zurück. Schon in früheren Zeiten wurden durch Treiben, dem Hämmern von Blech mittels Hammer und Amboss, inkrementell individuelle Teile hergestellt. Es benötigt viel Wissen und Erfahrung, diese Technik zu beherrschen, da man anhand der menschlichen Eindrücke, wie dem Fühlen und Sehen, nach jedem Schlag entscheiden musste, auf welche Weise man vorgeht, um die gewünschte Zielgeometrie zu erreichen. Der enorme Zeit- und Kostenaufwand dieser Technik hat dazu geführt, dass das manuelle, handwerkliche Umformen nicht mehr verwendet wird, sondern durch automatische Prozesse abgelöst wurde. (Ilangovan, 2015)

Bei dem inkrementellen Umformen handelt es sich um ein breites und sehr großes Forschungsgebiet, das verbreitetste industriell verwendete inkrementelle Umformverfahren ist das Amino-Verfahren, welches nach der Herstellerfirma „Amino Kooperation“ benannt ist. Der Erfinder des Verfahrens ist S. Matsubara. Bei diesem Verfahren wird das Blech in eine Spannvorrichtung einer CNC-Maschine fest eingespannt. Ein kugelförmiges, rotierendes Werkzeug drückt dabei Schritt für Schritt die gewünschte Kontur in das Blech, in dem es eine

Relativbewegung auf Umformbahnen in der horizontalen Ebene und in vertikaler Richtung erzeugt. Auf der Gegenseite wird eine Patrize, ein Gegenhalter, verwendet. Aus diesem Grund wird das Verfahren two point incremental forming (TPIF) bezeichnet. Dieses Verfahren wurde in den 80er Jahren entwickelt und stellt die Grundlage für die meisten werkzeuggestützten Verfahren dar. (Scherer, 2013) (Meier, Smukala und Buff, 2008) (Amino, Mizoguchi, Terauchi und Maki, 2014)

Das TPIF-Verfahren wurde weiterentwickelt und es wird mittlerweile auch an single point incremental forming (SPIF) gearbeitet, welches ähnlich dem two point incremental forming abläuft, jedoch führt das kugelförmige Werkzeug während der Bewegung eine Rotation um die Längsachse aus und es wird keine Patrize benötigt (Abbildung 2.3). Dies ermöglicht einen nochmals flexibleren Prozess. Hinsichtlich der Qualität der Endprodukte, gibt es keine Unterschiede. [Cambridge University, 2009]

Das inkrementelle Hämmern, die ursprüngliche Methode des inkrementellen Umformens, wird ebenfalls erforscht. Hierbei hämmert ein Industrieroboter computergesteuert die Form in ein Blech. Es wird kein Gegenpart verwendet. (Schäfer, 2006)

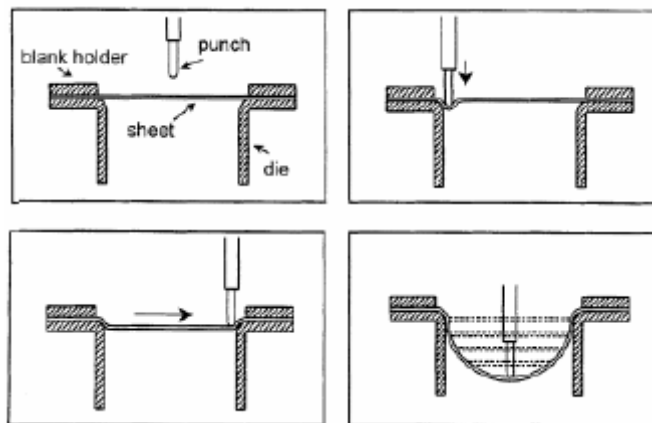


Abbildung 2.3: *Prinzipskizze single point incremental forming (Lamminen, Wadman, Küttner, Svinning, 2003)*

An vielen verschiedenen Instituten wird an SPIF- oder TPIF-Verfahren geforscht, um diese für die wirtschaftliche Nutzung rentabel zu gestalten. Dies ist derzeit nicht vollständig möglich, da bei den Umformungen Probleme auftreten. Die Genauigkeit ist nicht immer hoch genug, die Blechdicke nimmt zu sehr ab, was zu Rissen führen kann, und die herstellbaren Geometrien sind teilweise zu beschränkt. Des Weiteren kann es zu Rückfederung und aufgrund hoher Spannungen zu unvorhersehbaren Verformungen in bereits umgeformten Zonen kommen. Bei dem Kraftformerverfahren der Firma Eckold handelt es sich ebenfalls um ein in-

krementelles Umformverfahren, welches eine vielversprechende Alternative zu diesen Verfahren darstellt. (Opritescu, 2012)

2.3 Kraftformerverfahren

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Kraftformerverfahren handelt es sich um einen Treibprozess, an welchem der Lehrstuhl für Umform- und Gießereitechnik der TU München forscht. Dieser Prozess wurde in den 30er Jahren von Walter Eckold in der eigens gegründeten Firma entwickelt. Mithilfe einer C-förmigen Presse von Eckold und wenigen universellen Werkzeugen wird durch Treiben in Verbindung mit Strecken und Stauchen und den dadurch eingebrachten Druckspannungen ein Blech in die gewünschte Geometrie geformt. Da dieses Verfahren ohne Wärmezufuhr stattfindet, handelt es sich hierbei um Kaltverformung. Üblicherweise sind in der Kaltverformung aufgrund des geringen Umformvermögens von Stahl sehr hohe Umformkräfte notwendig, jedoch können durch die vielen kleinen Umformungen spezielle Bedingungen im Werkstoff erzeugt werden, die das Umformvermögen in der Umformzone steigern und die aufzubringenden Umformkräfte verringern. (Emmens, 2008) (Scherer und andere, 2008)

Die Firma Eckold bietet den Kraftformer in verschiedenen Ausführungen an, um den Anforderungen der verschiedensten Anwendungsbereiche wie Flugzeug-, Schiff- und Automobilbau gerecht zu werden (Abbildung 2.4). Bei dem am Lehrstuhl für Umform- und Gießereitechnik verwendeten Modell handelt es sich um den Kraftformer KF 330 Piccolo. Mit diesem Modell können Stähle bis zu 2 mm Dicke und einer Zugfestigkeit von 400 N/mm² umgeformt werden. Es besitzt eine vertikale Ausladung von 245 mm und eine horizontale Ausladung von 340 mm. Das Modell kann bis zu ca. 400 Arbeitstakte pro Minute ausführen. (Eckold)

Eckold bietet verschiedene Werkzeuge für die C-Presse, mit denen Strecken, Stauchen, Spannen, Wölben, Glätten, Nachformen, Richten, Lochstanzen, Ausschneiden und Abkanten realisiert werden kann. Die in dieser Arbeit untersuchten Verfahren beschränken sich auf das Stauchen und Strecken. Die Werkzeuge bestehen aus jeweils einem oberen und einem unteren Teil (Abbildung 2.5). Das Blech wird zwischen diesen Teilen in Position gebracht und die C-förmige Presse führt vertikale Bewegungen in konstanter Frequenz aus. Das Oberwerkzeug bewegt sich hierbei in Richtung des unteren und wieder zurück. Der untere Teil hingegen ist fixiert. Die Kraft, mit der auf das dazwischenliegende Blech gedrückt wird, resultiert aus der eingestellten Zustellung. (Eckold)

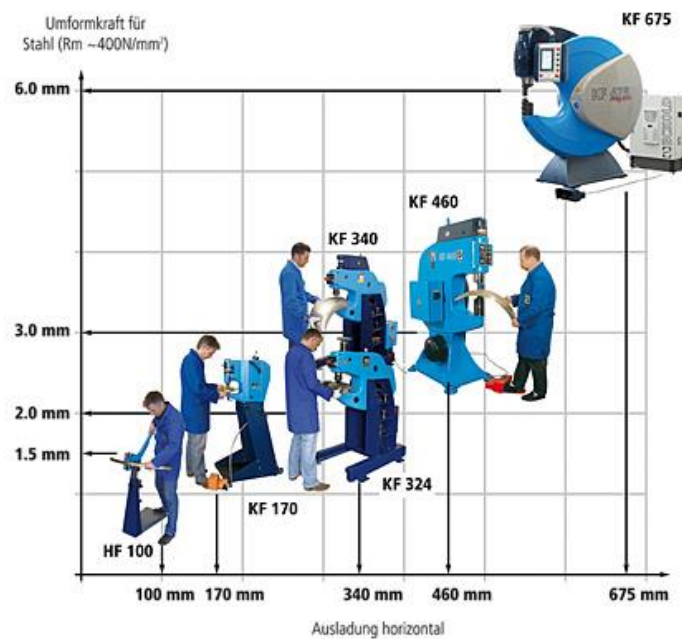


Abbildung 2.4: Das Eckold Kraftformer-Programm (Eckold)



Abbildung 2.5: Strecken (links), Stauchwerkzeug (Mitte), Streckwerkzeug (Eckold)

Werden die Werkzeuge vertikal mit einer Kraft auf das Blech gepresst, wandeln die Werkzeugbacken die vertikale Bewegung in eine zur Blechebene parallele Bewegung um. Während dem Streckvorgang bewegen sich die Backen auseinander und mittels der Reibung werden im Werkstoff lokal Zugspannungen erzeugt. Aufgrund dieser Zugspannungen wird eine kleine Zone des Bleches gestreckt und die Blechdicke in der Umformzone verringert sich. Der Stauchvorgang läuft in genau gegensätzliche Richtung ab. Die Werkzeugbacken bewegen sich zueinander und es werden Druckspannungen eingebracht, welche eine lokale Stauchung er-

zeugen und somit eine Verdickung des Bleches zur Folge haben. Abbildung 2.6 stellt beschriebene Streck- sowie Stauchvorgänge nochmals skizzenartig dar. (Scherer und andere, 2008)



Abbildung 2.6: Prinzip des Streck- und Stauchvorganges (Eckold)

Bei dem Kraftformerverfahren handelt es sich derzeit um ein manuell betriebenes Umformverfahren, da es äußerst komplex und sehr interaktiv ist. Das Herstellen von Geometrien mit diesem Verfahren benötigt viel Können und Erfahrung, da der Arbeiter das Werkstück mit beiden Händen zwischen den Arbeitshüben immer in die korrekte Position bringen muss. Während der Herstellung muss der Arbeiter Entscheidungen treffen, wie er das Blech zu positionieren hat, um die gewünschte Endgeometrie zu erstellen. Das macht er, indem er einerseits seine Erfahrung nutzt und andererseits das Werkstück mit Mustern oder Modellen abgleicht. Aufgrund der manuellen Fertigung ist es beinahe unmöglich, exakt gleiche Produkte zu erzeugen. Folglich unterscheidet sich auch die Qualität der Produkte. Die Dauer für komplexe Bauteile wie einer Autotür beträgt ca. 40 bis 60 Stunden. (Scherer und andere, 2008)

Derzeit wird nach Wegen gesucht, das Verfahren zu automatisieren, um es kosten- und zeiteffizienter zu gestalten, da die Produktionszeiten komplexer Teile zu lang sind. Hierzu wird am UTG daran geforscht, inwiefern die Automatisierung mit der Verwendung eines KUKA-Industrieroboters ablaufen kann, welcher die Positionierung des Werkstücks übernimmt. Der Roboter bietet eine Positioniergenauigkeit von $\pm 0,15$ mm. Die Schwierigkeit liegt darin, den Herstellvorgang exakt vorherzusagen. Bei komplexen Bauteilen kann es sich um tausende von Schlägen handeln und während einem Herstellvorgang kommt es zur Veränderung von Materialparametern und Prozessbedingungen. Dem Roboter muss schon vor Beginn die Positionierung des Werkstückes während dem gesamten Prozess vorgegeben werden. Simple 2D-Geometrien können bereits mithilfe des KUKA-Roboters erzeugt werden, da man hier die Schlagfolge und Bauteilpositionierung bestimmen kann. Für komplexere 2D- und auch 3D-Bauteile ist dies derzeit nicht möglich. (Hofmann und Golle, 2007)

Um den Fertigungsweg zu automatisieren, wurden verschiedene Strategien verfolgt. Eine Finite-Elemente-Simulation wäre eine Möglichkeit, den Fertigungsweg vorher zu berechnen. Bisher sind die Simulationsprogramme jedoch mit der Berechnung mehrerer Schläge überfordert, da die benötigte Rechenzeit zu hoch ist. Die Simulation wurde mit dem Programm

PamStamp 2G der Firma ESI Group, Paris, Frankreich, durchgeführt. Das simulierte Werkstück war dem realen Werkstück nach einem Umformhub sehr ähnlich, die Simulation beansprucht jedoch zu viel Zeit. Für zehn Schläge werden etwa 7 Stunden benötigt. Aufgrund von Gutachtern wurde die Simulation mit zwei weiteren Simulationssoftwares durchgeführt, Autoform und Abaqus, Dassault Systèmes Simulia GmbH, jedoch konnte keine Verringerung der Rechenzeit erzielt werden. (Hofmann und Golle, 2007)

Ein weiterer Ansatz zur Steigerung des Automatisierungsgrades des Verfahrens ist die Verwendung neuronaler Netze. Hierbei sollen die Ausgangs- und die Sollgeometrie als Input verwendet werden. Der Output besteht in den Fertigungsparametern, welche eine Fertigungsstrategie zum Erreichen der Sollgeometrie darstellen. Mittels einer Regressionsanalyse, bei welcher der Einfluss von Parametern auf die Umformung beschrieben wird und der Identifizierung signifikanter Parameter, wird der Umformprozess analysiert. Es werden Trainingsdaten erhoben, mit denen der Parameterzusammenhang bestimmt werden kann. Um Trainingsdaten zu erheben, werden Bleche umgeformt und mittels eines GOM ATOS-Messsystems vermessen. Auf Basis dieser neuronalen Netze kann die gewünschte Fertigungsstrategie hergeleitet werden. Die Fertigung von 2D-Geometrien mittels neuronaler Netze ist möglich, jedoch muss untersucht werden, ob man diese neuronalen Netze auch für komplexe 3D-Geometrien verwenden kann. (Hofmann und Golle, 2007)

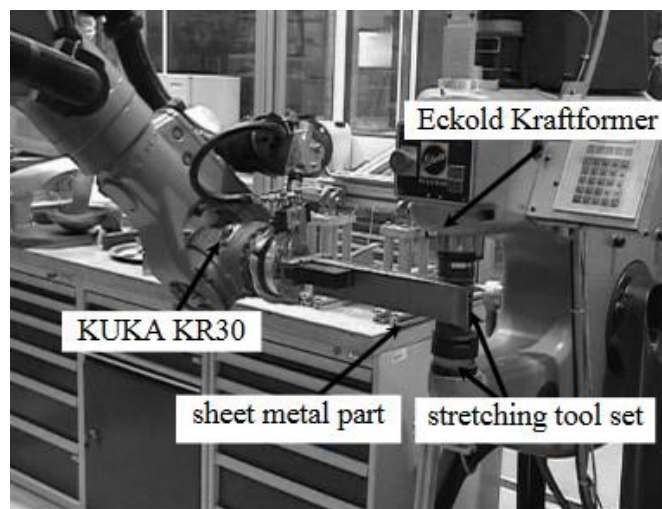


Abbildung 2.7: Kraftformerverfahren mittels Kuka-Roboter (Dötz, Hoffmann, Scherer)

2.4 Finite-Elemente-Methode

Unter Finite-Elemente-Methode versteht man ein numerisches Verfahren zur Lösung partieller Differentialgleichungen, mit dessen Hilfe es möglich ist, verschiedene physikalische Vorgänge zu simulieren. Es kann hiermit zum Beispiel eine durch Krafteinwirkung entstehende

Verformung einer Struktur berechnet, beziehungsweise simuliert werden. Hierbei werden alle teilhabenden Strukturen in endlich viele kleine Elemente unterteilt. In zweidimensionalen Problemen wie einer Scheibe oder Schale sind das Drei- und Vierecke. In dreidimensionalen Problemen wird die Struktur durch Quader- und Tetraederelemente aufgeteilt. Mittels Materialgesetzen und mathematischen Ansätzen werden die entstehenden Dehnungen, Spannungen und Verschiebungen der Werkstücke als Näherungslösung berechnet. Die Berechnung wird aufgrund des hohen Rechenaufwandes durch eine Computersoftware durchgeführt. Die Methode wird für verschiedene Anwendungen in jeglichen Sektoren der Industrie und in der Forschung verwendet. Die FEM wird zumeist im Fahrzeugbau, Maschinenbau, Bauwesen und der Luft- und Raumfahrt verwendet. Es können Festigkeitsberechnungen, Machbarkeitsstudien, Produktentwicklungen und viele weitere Aufgaben bewältigt werden. Um einen tieferen Einblick in die Finite-Elemente-Methode zu erhalten, bietet sich das Buch *Finite-Elemente-Methode* von Peter Steinke an. (Steinke, 2012, S. 3ff) (Mathiak, 2010, S. 1-1ff)

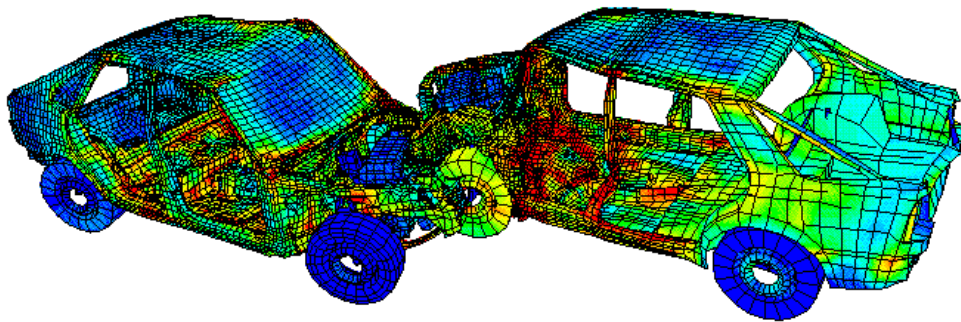


Abbildung 2.8: FEM-Crash-Simulation (Fleming, 1997)

3 Problemstellung, Ziel und Vorgehen

3.1 Problemstellung

Das Kraftformerverfahren besitzt, aufgrund seiner äußerst hohen Flexibilität gepaart mit den niedrigen Investitionskosten für Maschine und Werkzeug, sowie der Möglichkeit der Erzeugung fast aller Geometrien, das Potential, in der Industrie für die Herstellung von Kleinserien und Prototypen verwendet zu werden. Sämtliche individuellen Kundenwünsche könnten durch die Verwendung des Kraftformers und der universellen Werkzeuge einfach verwirklicht werden. Damit das Verfahren wirtschaftlich rentabel verwendet werden kann, muss es jedoch automatisiert werden, um die hohen Kosten, verursacht durch das notwendige Personal und den hohen Zeitaufwand, zu senken. Für die Automatisierung ist eine Finite-Elemente-Simulation notwendig, um Eigenschaften des Werkstücks, wie zum Beispiel Dicke und Spannungen, nach den Umformhüben vorherzusagen. Mithilfe dieser Simulationen kann man einen Fertigungsweg, mit dem das gewünschte Endprodukt erreicht werden kann, bestimmen, beziehungsweise schon vorher auf Machbarkeit überprüfen. Das Simulieren einzelner Hübe mittels FEM ist zwar möglich, jedoch ist die Dauer der Simulationen zu hoch. Eine Rechenzeit von ca. 7 Stunden für die Simulation von 5 bis 10 Schlägen eines 2D-Bauteils lässt das Vorherbestimmen der Produktion eines Bauteiles, für welches mehrere 100 bis 1000 Arbeits Hübe nötig sind, nicht zu. Aus diesem Grund wird nun am UTG eine neue Möglichkeit untersucht, den Fertigungsweg vorher zu bestimmen beziehungsweise zu digitalisieren. Hierbei wird eine Methode mit geometrischer Optimierung verwendet. Eine große Anzahl entstehender Geometrien wird aus Finite-Elemente-Analysen bestimmt. Diese werden daraufhin in einer digitalen Datenbank katalogisiert. Während dem Umformvorgang soll das Blech dauerhaft mit dem Katalog verglichen werden, und anhand dieser Daten die Parameter angepasst werden, um sich der gewünschten Endgeometrie anzunähern. Diese Methode stellt eine Möglichkeit dar, den großen Rechenaufwand mehrerer Finite-Elemente-Analysen zu umgehen, da es sich hierbei nicht um eine physikalische Berechnung der Umformung wie in der Finite-Elemente-Analyse handelt. In dieser Methode werden lediglich Geometrien miteinander verglichen, was einen deutlich geringeren Zeitaufwand bedeutet, da hier, im Gegensatz zu einer FEA, weder Materialgesetze, Materialeigenschaften oder sonstige physikalischen Vorgänge einbezogen werden.

3.2 Vorgehen

Nachdem am Lehrstuhl Finite-Elemente-Analysen mit den expliziten Simulationssoftwares PamStamp und Abaqus, sowie der impliziten Simulationssoftware Autoform durchgeführt wurden, soll nun der explizite Programmcode LS-DYNA, Livermore Software Technology

Corporation (LSTC), USA, verwendet werden. Explizite Programmcodes zeichnen sich im Gegensatz zu den impliziten durch ihre geringeren Rechenzeiten aus. Hierbei wird das Problem in einer Vielzahl kleiner Schritte berechnet. Um die Finite-Elemente-Simulation des Kraftformerverfahrens unter Verwendung von LS-DYNA durchzuführen, muss zuerst ein Inputdeck erstellt werden, welches anschließend durch den LS-DYNA Solver gelöst wird. Danach erhält man zur Auswertung die Ergebnisdateien. Es gibt verschiedene Wege zur Erstellung des Inputdecks, welches auch pre-processing genannt wird, und zur Auswertung der Ergebnisdateien, auch post-processing genannt. In dieser Arbeit wird als Pre- und Post-Prozessor das von LSTC frei zur Verfügung gestellte Programm LS-PrePost verwendet. Es bietet ein effizientes und intuitives Interface.

3.3 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine Finite-Elemente-Analyse eines Arbeitshubes des Kraftformerverfahrens auf einem 100x100mm Blech durchzuführen. Es soll sowohl ein Streck- als auch ein Stauchvorgang simuliert und analysiert werden. Mittels der Ergebnisse der Finite-Elemente-Analyse soll Kenntnis über die Eigenschaften des Werkstücks nach einer realen Umformung erhalten werden. Hierbei soll die Position der Umformung auf dem Blech variiert werden, um die Daten für verschiedene Orte der Umformungen verwendbar zu machen. Die Analyse soll somit möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen. Aufgrund dessen soll das Modell auch so einfach wie möglich gehalten werden, dennoch so realitätsnah wie notwendig, um das Modell in die Realität übertragbar zu gestalten.

Aus den Simulationsergebnissen sollen die entstandenen geometrischen Abmessungen extrahiert werden.

4 FEA des Kraftformerverfahrens

4.1 Pre-Processing

Der reale Prozess wird in dem Modell vereinfacht, um die Simulationszeit und die Komplexität gering zu halten. Dennoch wird darauf geachtet, dass die Realität korrekt abgebildet wird. Ausschlaggebend für die Umformung sind die Kinematik der Werkzeugbacken und die Kontakte zwischen Werkzeugbacken und Blech. Auf diese Teile wird das Modell reduziert. Weitere Einflüsse wie Verformungen des C-Gestells des Kraftformers und auch die Schwerkraft werden vernachlässigt, da sie keinen großen Einfluss auf das Ergebnis besitzen und lediglich einen starken Anstieg des Berechnungsaufwandes bedeuteten.

Das Pre-Processing mit LS-PrePost lässt sich in drei Schritte unterteilen. Zuerst werden mittels des bereitgestellten CAD-Tools die Geometrien der Bauteile erstellt. Diese werden anschließend diskretisiert, also vernetzt und in kleine Elemente aufgeteilt. Je kleiner man die Elemente wählt, desto genauer wird grundsätzlich das Ergebnis, aber desto länger wird auch die benötigte Rechenzeit. Nachdem die Geometrien vernetzt wurden, werden im sogenannten Keyword Manager sämtliche, den Umformvorgang beschreibende Parameter festgelegt. Es wird das Material und sein Verhalten, Bewegungen der Bauteile, Kontaktbedingungen und weiteres eingestellt.

4.1.1 Erstellen der Bauteile und Vernetzung

Das Modell besteht aus fünf Teilen. Es beinhaltet vier Werkzeugbacken, zwei obere und zwei untere, die Platine, das Blech. Die Maße der Werkzeugbacken wurden in der Werkstatt ermittelt und geben die Realität wieder. Der Radius des Halbkreises der Werkzeugbacken beträgt 17,5 mm und die Höhe 3mm. Für das Blech wurden die Maße 100x100mm verwendet, die Blechgröße ist jedoch beliebig anpassbar, sollte man Versuche mit anderen Größen durchführen wollen. Mittels des CAD-Tools in LS-PrePost werden die fünf Teile konstruiert.

Nachdem die Geometrien erzeugt sind, werden sie vernetzt. Die perfekte Größe des Netzes ist nicht eindeutig bestimmbar, es werden mehrere Simulationen benötigt, um eine den Anforderungen entsprechende passende Elementgröße zu finden. Um das Netz schnell und effizient zu erzeugen, kann der Automesher verwendet werden. Es kann die maximale und minimale Elementgröße angegeben werden und LS-PrePost erzeugt automatisch ein Gitter. Es besteht auch die Möglichkeit, das Gitter manuell zu erzeugen. Der Automesher verwendet zur Erzeugung des Blechgitters lediglich Quadrate. Für das Gitter des Werkzeuges hingegen werden aufgrund der Halbkreisform auch Dreiecke und verschiedene Rechtecke wie Trapeze benötigt. An der Rundung der Werkzeugbacke ist das Netz feinmaschiger, als auf der großen Oberflä-

che, da Rundungen detaillierter dargestellt werden müssen. Abbildung 4.1 stellt die fertig vernetzten Bauteile dar.

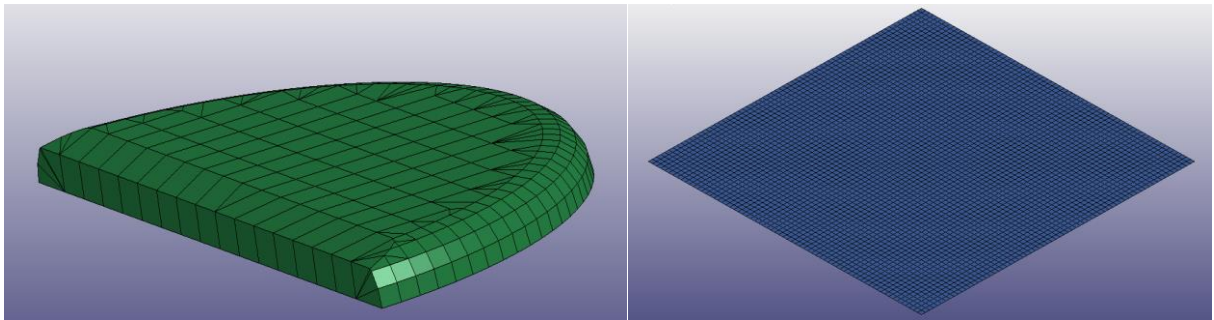


Abbildung 4.1: vernetzte Werkzeugbacken und Blechplatte, mittels LS-PrePost erstellt

4.1.2 Bauteilanordnung

Die erstellten Teile des Modells müssen anschließend im Raum angeordnet werden. Hierzu muss zuerst die Kinematik des Werkzeuges betrachtet werden und wie man diese in der Simulation umsetzen kann. Betrachtet wird zunächst der Streckvorgang. Zu Beginn des Umformvorganges liegt das Blech auf den unteren beiden Werkzeugbacken auf, diese sind in der vertikalen Richtung fixiert. Die oberen Werkzeugbacken besitzen einen bestimmten Abstand zu dem Blech. Sobald der Umformvorgang startet, werden die oberen Werkzeugbacken durch den Kraftformer in Richtung der unteren gefahren. Der Vorgang findet weggesteuert statt, was bedeutet, dass die vertikale Zustellung der oberen Werkzeugbacken angegeben wird. Es wird keine Kraft festgelegt mit der die Werkzeugbacken das Blech pressen, diese resultiert lediglich daraus, wie weit die Zustellung der oberen in Richtung der unteren gewählt wird. Sobald das Blech zwischen den Backen eingeklemmt ist, bewegen sich diese horizontal und ziehen somit das Blech. Beim Streckvorgang bewegen sich diese auseinander, beim Stauchvorgang fahren sie aufeinander zu. Aufgrund dieser horizontalen Bewegung sind die Backen zum Ausgangszeitpunkt beim Stauchen durch eine kleine Distanz voneinander entfernt, damit sie Raum haben, sich zueinander zu bewegen. Beim Strecken liegen sie hingegen dicht aneinander.

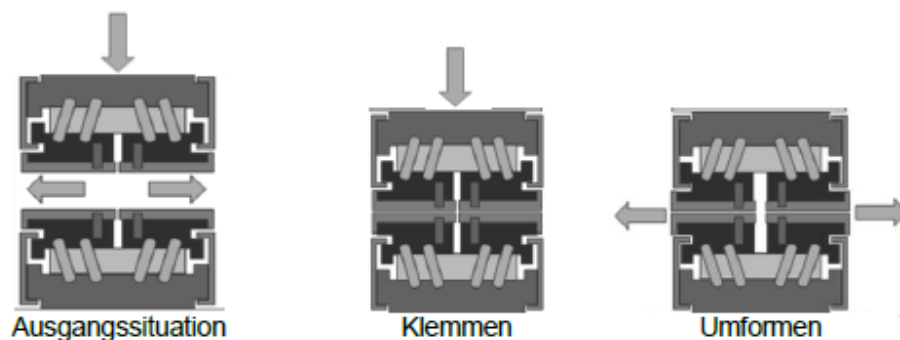


Abbildung 4.2: Kinematik der Werkzeugbacken im Streckvorgang (Scherer, 2013)

Für die Anordnung im Modell folgt, dass die unteren Werkzeugbacken parallel zum Blech angeordnet werden und das Blech auf diesen aufliegt. Die oberen werden ebenfalls parallel angeordnet, jedoch besitzen diese einen kleinen Abstand zum Blech. Dieser Abstand wird jedoch möglichst gering gewählt, da Bauteile nahe aneinander platziert werden sollen. Je kürzer der zurückgelegte Weg ist, desto geringer ist der entstehende Rechenaufwand. Der Abstand beträgt 0,1 mm. Die Distanz zwischen den aneinander liegenden Werkzeugbacken wird für den Streckvorgang auf 0,5 mm und für den Stauchvorgang auf 1 mm festgelegt. Mittels des Keyword Managers werden für die Werkzeugbacken die nötigen Freiheitsgrade gesperrt. Die unteren Backen können sich weder in Z- noch in X-Richtung bewegen. Für die oberen werden lediglich Bewegungen in X-Richtung gesperrt. Das ist notwendig, da sich die Werkzeuge während der Umformsimulation sonst eventuell in ungewünschte Richtungen verschieben können, was das Ergebnis verfälschen würde.

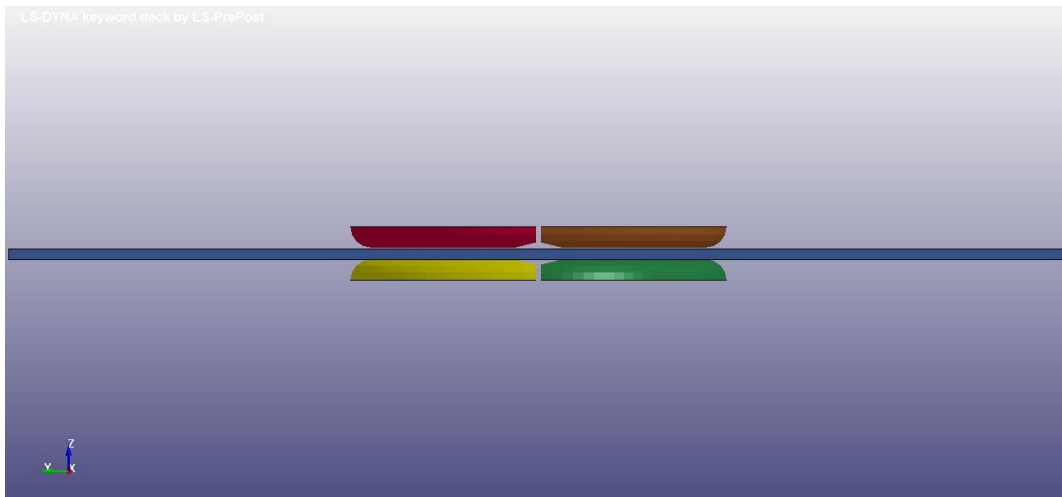


Abbildung 4.3: räumliche Anordnung der vier Werkzeugbacken und der Blechplatte im Streckvorgang

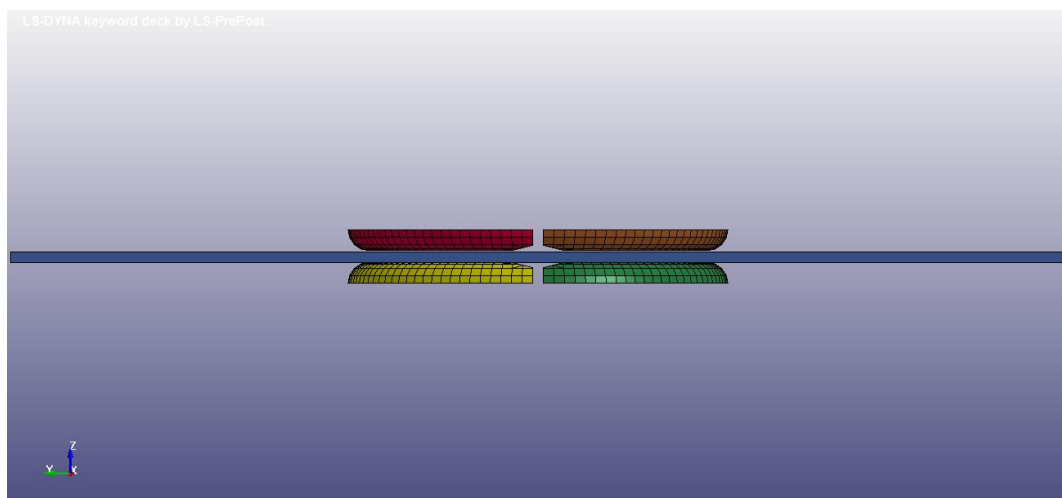


Abbildung 4.4: räumliche Anordnung der vier Werkzeugbacken und der Blechplatte im Stauchvorgang

4.1.3 Definition der Bauteile

Allen Bauteilen muss für die Simulation ein Elementtyp zugeordnet werden. Im Keyword Manager werden verschiedene Typen bereitgestellt. In LS-DYNA werden Balkenelemente, Schalenelemente und Volumenelemente bereitgestellt. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der Freiheitsgrade pro Knoten. Die Werkzeugbacken werden als Schalenelemente deklariert. Es würde keinen Einfluss auf die Ergebnisgenauigkeit haben, wenn man Werkzeugbacken als Volumenelemente definiert, da diese als Starrkörper angesehen werden. Das bedeutet, sie sind nicht verformbar, was vereinfacht der Realität entspricht. In dem realen Umformvorgang passieren minimalste Verformungen an den Werkzeugbacken, welche jedoch so gering sind, dass im Modell davon auszugehen ist, dass diese nicht existieren. Für die Umformoperation wird lediglich die Oberfläche der Werkzeugbacken benötigt, da nur diese mit dem Blech interagiert. Für das Blech wird der Elementtyp variiert. Es werden Simulationen, in denen das Blech als Schalenelement definiert wird, und Simulationen, in denen es als Volumenelement definiert wird, durchgeführt. Schalenelemente haben den Vorteil gegenüber Volumenelementen, dass die Simulationszeit, aufgrund des geringeren Rechenaufwandes, deutlich kürzer ist. Im Folgenden wird vorerst der Modellaufbau für die Verwendung eines Schalenelements für das Blech vorgestellt. Die Unterschiede bei der Verwendung eines Volumenelementes für das Blech werden später erläutert. Für alle Schalenelemente wird die Element Formulierung Belytschko-Tsay verwendet. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie äußerst genau bei gleichzeitig geringen Rechenzeiten ist. Sie ist gut für explizite Berechnungen und das am häufigsten in der Umformsimulation verwendete Element. Da die Blechplatte, im Falle der Verwendung als Schalenelement, nur als Fläche erzeugt wird, muss diesem noch die Elementdicke 1 mm an jedem Knoten zugeordnet werden. Über diese Elementdicke muss die Anzahl der Integrationspunkte festgelegt werden, da über diese die Berechnung der Verschiebungen und Spannungen erfolgen. Hierfür wurden fünf Punkte, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, gewählt.

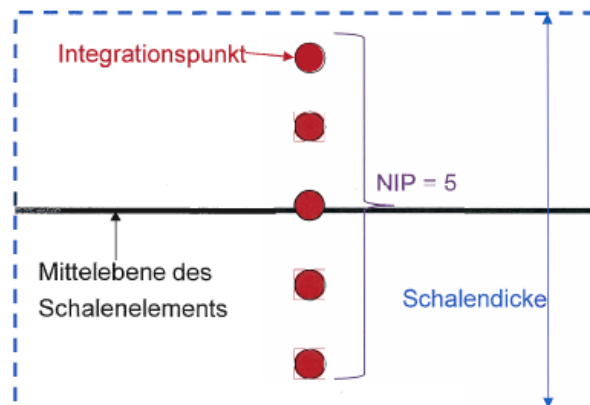


Abbildung 4.5: Seitenansicht des in der Simulation verwendeten Schalenelements (ELFORM=2) (LSDYNA, 2016)

Bei der Verwendung von Belytschko-Tsay-Elemente kann es zu Hourglassing kommen, da es sich um einen unterintegrierten Elementtyp handelt. Das bedeutet, das Element besitzt weniger Integrationspunkte, damit der Rechenaufwand verringert wird. Unter Hourglassing wird das Verzerren einzelner Elemente verstanden. Da es sich um unterintegrierte Elemente handelt, können diese ihre eigene Verzerrung nicht feststellen. Mit Hilfe einer Hourglass-Kontrolle kann das Problem jedoch behoben werden.

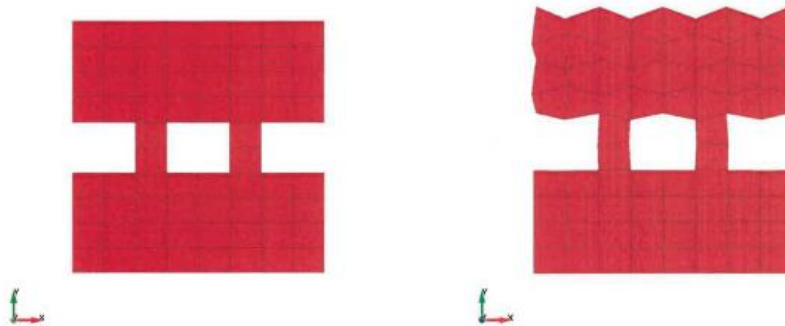


Abbildung 4.6: skizzenartige Darstellung des in Simulationen auftretenden, problematischen Hourglassings (LSDYNA, 2016)

4.1.4 Materialzuweisung

In LS-DYNA werden verschiedene Materialtypen bereitgestellt. Für die Werkzeugbacken wird das Material 020_RIGID verwendet. Die Werkzeugbacken werden somit als Starrkörper definiert. Da sie aus Stahl gefertigt sind, werden auch die Materialparameter von Stahl verwendet. Das E-Modul beträgt 207000 N/mm^2 und die Dichte beträgt $7,83 \text{ g/cm}^3$. Bei der Bestimmung des Materials wird auch die Einschränkung der Freiheitsgrade vorgenommen. Neben den oben genannten Bewegungseinschränkungen in X-Richtung aller Werkzeugbacken und der Z-Richtung der unteren, werden sämtliche Rotationsfreiheitsgrade eingeschränkt, da auch im realen Umformvorgang keine Rotationen der Werkzeugbacken stattfinden. Für die Blechplatte wird das Material 024_PIECEWISE-LINEAR_PLASTICITY verwendet. Dieses Material ist sowohl für Schalen- als auch Volumenelemente geeignet. Bei dem in den Versuchen am UTG verwendeten Werkstoff handelt es sich um den unlegierten Stahl DC04. Das E-Modul beträgt 207000 N/mm^2 und besitzt eine Dichte von $7,83 \text{ g/cm}^3$. Die Zugfestigkeit R_m liegt zwischen 270 und 350 MPa und er besitzt eine Streckgrenze $R_{el}/R_{0,2} \leq 210 \text{ MPa}$. Die Poissonzahl von Stahl beträgt 0,27 bis 0,3. Es wurde der Wert 0,28 verwendet. Eine Einschränkung von Freiheitsgraden ist hier weder möglich noch sinnvoll, da die Verformung des Bleches simuliert werden soll.

4.1.5 Kontaktbedingungen

In LS-DYNA müssen Kontaktbeziehungen erstellt werden, damit während der Berechnung fortlaufend überprüft werden kann, ob Knoten eines Körpers einen anderen Körper durchdringen und falls dies passiert, wie damit umgegangen wird. Die Kontakteinstellungen besitzen einen großen Einfluss auf die Qualität der Simulation.

LS-DYNA bietet eine große Auswahl an Kontakttypen an. Unter dieser Vielzahl der Kontakttypen werden auch spezielle FORMING-Kontakte angeboten, welche für Simulationen von Umformprozessen mit Schalenelementen empfohlen werden. Verwendet wird der Kontakt FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE. ONE_WAY beschreibt eine einseitige Kontaktabfrage. Hierbei wird lediglich untersucht, ob Knoten des Slave-Elements das Master-Element durchdringen. Als Slave-Element wird immer die Platine, also in diesem Modell das Blechteil bestimmt. Die vier Werkzeugbacken stellen die Master-Elemente dar. Abbildung 4.8 zeigt das zuvor beschriebene Prinzip der ONE_WAY Kontaktabfrage. Es gibt auch eine zweiseitige Kontaktabfrage, bei dieser ist die Rechenzeit jedoch fast doppelt hoch. Diese zweiseitige Kontaktabfrage wird in dieser Simulation nicht benötigt. Sie wird nur in seltenen Fällen verwendet, zum Beispiel einer Schwerkraftsimulation. Die Schwerkraft wird in diesem Modell jedoch nicht beachtet, da ihr Einfluss vernachlässigbar gering ist. Für die einseitige Kontaktabfrage muss beachtet werden, dass die Platine deutlich feiner vernetzt ist als die Werkzeuge, da sonst an Radien und Kanten unrealistische Spannungen und Kräfte entstehen können. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass bei FORMING-Kontakten den Starrkörpern keine Schalendicke im Kontakt zugewiesen wird. Das muss bei der Positionierung der Bauteile wie auch bei dem Erstellen der Umformbewegungen beachtet werden. Mit dem SOFT-Parameter wird festgelegt wie eine Durchdringung von Knoten behandelt wird. Es wird die Penalty-Formulierung verwendet, da diese den Kontakt mit Starrkörpern am besten behandelt. Bei der Penalty-Formulierung werden die betroffenen Knoten, nachdem eine Durchdringung detektiert wird, mit einer Strafkraft F_k , der Penalty-Force, aus dem beteiligten Kontaktpartner gedrückt (Abbildung 4.7). (LSDYNA, 2016)

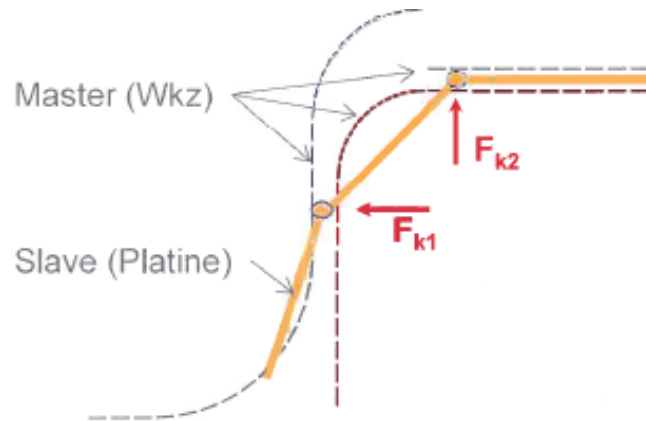


Abbildung 4.7: Darstellung der ONE_WAY Kontaktabfrage (Penalty-Formulierung) und wie das Problem des Eindringens durch Anbringen der Strafkräfte F_{k1} und F_{k2} gelöst wird (LSDYNA, 2016)

Für die Kontakte werden die statischen Reibkoeffizienten benötigt. Am UTG wurden bereits Finite-Elemente-Simulationen mit anderen Softwares durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde in Versuchen der reale Reibkoeffizient von ca. 0,5 für die Paarung DC04 und Streckwerkzeug ermittelt. Dieser Reibkoeffizient wird auch für diese Simulation verwendet. Der dynamische Reibkoeffizient wird auf 0,0 gesetzt, da keine Daten über diesen vorliegen.

4.1.6 Erstellen der Werkzeugbewegungen

In Kapitel 4.1.2 Bauteilanordnung wurde bereits die Kinematik der Werkzeugbacken analysiert. Die unteren Werkzeugbacken sind in Z- und X-Richtung und die oberen in X-Richtung fixiert. Die oberen Werkzeugbacken bewegen sich in negativer Z-Richtung und pressen das Blech auf die unteren. Aufgrund der entstehenden Druckkraft führen die Werkzeugbacken eine Bewegung in Y-Richtung aus, welche abhängig davon ist, ob gestreckt oder gestaucht wird. In LS-DYNA sollten Starrkörperbewegungen in der Regel geschwindigkeitsgesteuert durchgeführt werden, da das Kraftformerverfahren jedoch weggesteuert abläuft, wird auch die Simulation weggesteuert durchgeführt.

Den Werkzeugen werden Bewegungen in verschiedene Richtungen zugeordnet. Zuerst wird den zwei oberen Werkzeugbacken die Zustellung vorgegeben, eine Bewegung in negative Z-Richtung. Die Werkzeugbacken befinden sich 0,1 mm von der Blechoberfläche entfernt. Die Zustellung ist im realen Prozess variabel einstellbar und wird auch in der Simulation variiert, um verschiedene Ergebnisse zu untersuchen. Da das Blech nur 1mm dünn ist, wird die Zustellung in der Simulation nicht mehr als 0,7 mm betragen. Nachdem das Blech zwischen den Werkzeugbacken eingeklemmt ist wird diesen die Bewegung in Y-Richtung vorgegeben. Jede Backe führt eine Bewegung von 0,25 mm in die entsprechende Richtung aus. Daraus ergibt sich, dass das Blech lokal um insgesamt 0,5 mm für einen Arbeitshub gestreckt bzw. ge-

staucht wird. Diese Position wird eine kurze Zeit gehalten und danach bewegen sich die Backen wieder in ihre Ausgangsposition zurück. (Scherer, 2013)

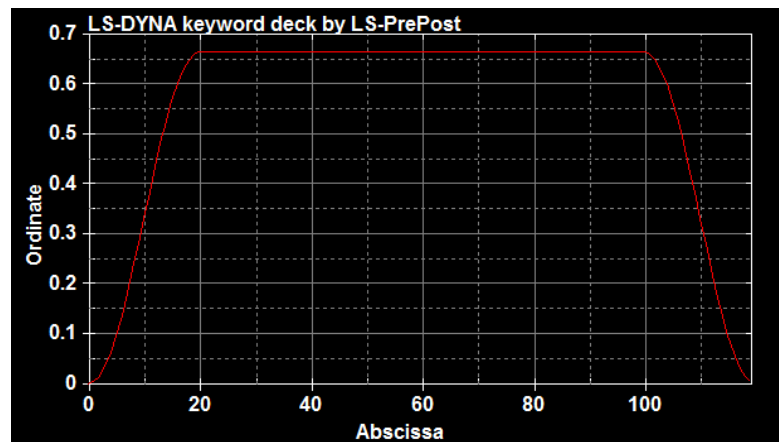


Abbildung 4.8: Weg-Zeit-Diagramm der Zustellung der oberen Werkzeugbacken (Einheiten: mm und ms)

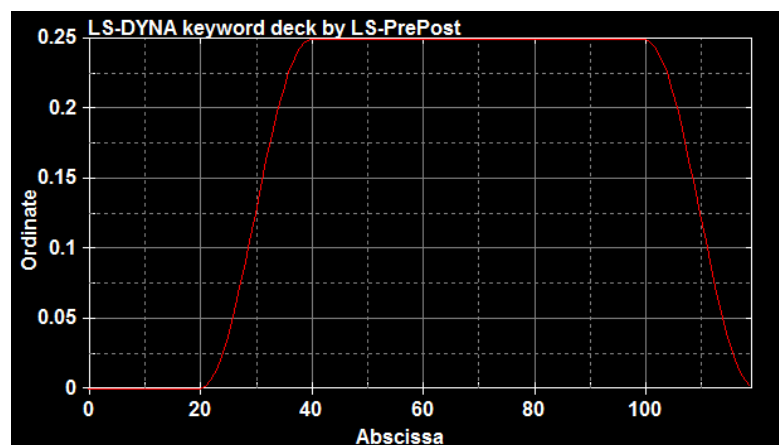


Abbildung 4.9: Weg-Zeit-Diagramm einer Werkzeugbacke in Y-Richtung (Einheiten: mm und ms)

4.1.7 Simulationsparameter

Das Ende der Simulation ist für den Zeitpunkt gewählt, an dem sich die Werkzeuge wieder an ihrer Ausgangsposition befinden. Die Simulation läuft somit 120 ms.

LS-DYNA bietet viele Einheitensysteme an. Eines dieser Einheitensysteme muss ausgewählt und für die Simulation auch beibehalten werden, da es sonst zu Fehlern kommt. Tabelle 4.1 zeigt das in dieser Arbeit verwendete Einheitensystem.

Masse	Länge	Zeit	Kraft	Spannung	Energie	Dichte (Stahl)	E-Modul (Stahl)
kg	mm	ms	kN	10^3 N/mm^2	kNmm	$7,83 \times 10^{-6}$	$2,07 \times 10^2$

Tabelle 4.1: verwendetes Einheitensystem

4.1.8 Unterschiede in der Modellbildung mit Volumen-Elementen

Um die Simulation vergleichen zu können, wird das Blech nochmals als Volumen-Element definiert. Hierbei müssen im Keyword Manager jedoch einige Änderungen vorgenommen werden.

Bei der Erstellung des CAD-Modelles des Bleches wird nun ein Quader mit den Maßen $100 \times 100 \times 1 \text{ mm}$ erzeugt, welcher anschließend vernetzt wird. Hierzu wird der Block Mesher verwendet, mit welchem man über alle Kantenlängen die jeweilige gewünschte Anzahl der Elemente angibt. Die Positionierung der Bauteile verändert sich nicht, da das Blech sowohl als Schalenelement wie auch als Volumenelement die gleichen Maße besitzt.

Als Volumenelementtyp wurde die default-Einstellung ELFORM=1 verwendet. Hierbei handelt es sich um einen unterintegrierten Elementtyp, welcher eine kurze Rechenzeit besitzt und sehr genau ist.

Die Materialzuweisung verändert sich nicht. Das Material 024_PIECEWISE-LINEAR_PLASTICITY kann für Schalen- wie auch für Volumenelemente verwendet werden und die Materialparameter werden beibehalten.

Die von LS-DYNA extra für Umformsimulationen entwickelten FORMING-Kontakte können nur für Schalenelemente verwendet werden. Bei den Werkzeugen handelt es sich zwar um Schalenelemente, aber das Blech wird dennoch als Volumenelement behandelt. Aus diesem Grund muss ein anderer Kontakttyp verwendet werden. Hierfür bietet sich der ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE-Kontakt an.

Die Werkzeugbewegungen werden nicht verändert. Die Werkzeugbacken führen die gleiche Bewegung wie in der Simulation mit Schalenelementen aus.

4.2 Post-Processing

Nachdem das Simulationsmodell des Umformvorganges vom Solver berechnet wurde, können im Post-Processing die Ergebnisse anschließend ausgewertet werden. Es werden verschiedene Daten ausgegeben, diese müssen jedoch schon im Pre-Processing bestimmt werden.

Es werden die durch den Umformvorgang entstehende Geometrie des Bleches, sämtliche Energien, Kontaktkräfte, innerwerkstoffliche Spannungen und vieles weiteres ausgegeben. Das Streckverfahren und das Stauchverfahren werden getrennt voneinander untersucht.

4.2.1 Streckverfahren

Betrachtet wird zuerst die durch die Umformung entstehende Geometrie. In der durchgeführten Simulation befinden sich die Werkzeugbacken direkt in der Mitte des Bleches. Die Elemente der Vernetzung des Bleches besitzen eine maximale Größe von 0.5 mm. Die oberen Werkzeugbacken sind 0,1 mm von dem Blech entfernt positioniert. Sie bewegen sich um 0,17 mm in die negative Z-Richtung. Folglich befinden sich die oberen Werkzeugbacken während des Streckvorganges 0,93 mm von den unteren entfernt. Das Blech wird somit vorübergehend um 0,07 mm gequetscht. Daraus resultieren Kontaktkräfte F_{rc} in Z-Richtung mit einem maximalen Wert von 170 kN zwischen Blech und jeweiliger Werkzeugbacke. Die Kontaktkräfte in Streckrichtung Y haben einen Maximalwert von ca. 10 kN.

Abbildung 4.10 und 4.11 zeigen die Endgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden. Da das Blech in der Simulation keinerlei Einspannungen oder Halter besitzt, bewegen sich die Blechenden durch die lokale Streckung in der Blechmitte in positive Z-Richtung. Es scheint, als würde das Blech in der Frontansicht um die oberen Werkzeugbacken gestülpt werden. Betrachtet man die Seitenansicht, sieht man, dass sich das Blech auf beiden Seiten des Werkzeugeingriffes leicht in positive Z-Richtung biegt.

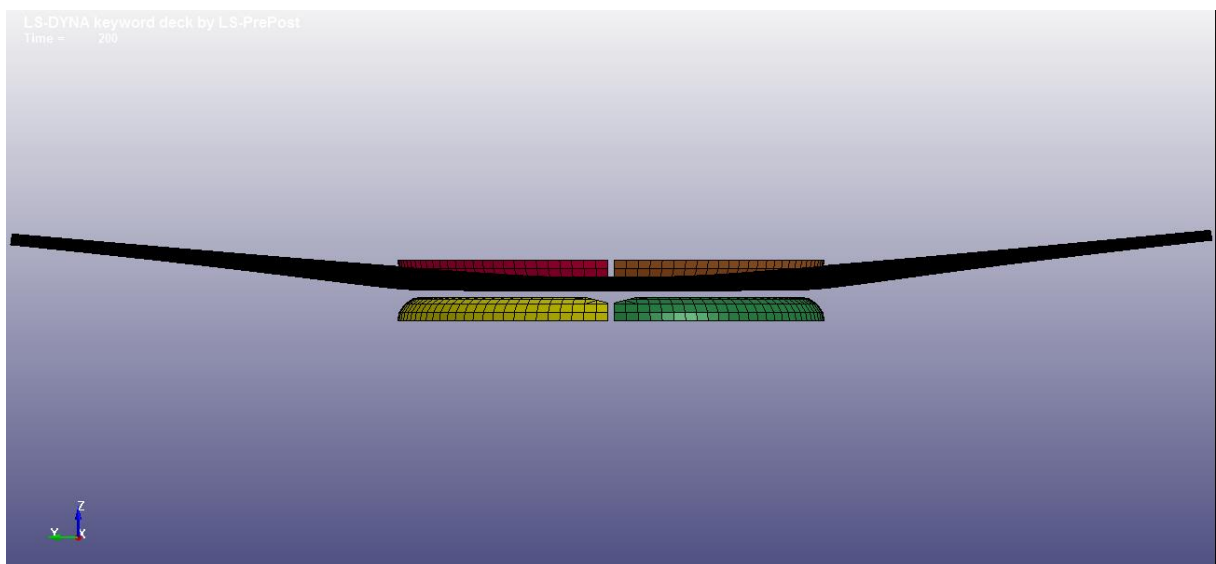


Abbildung 4.10: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Frontansicht)

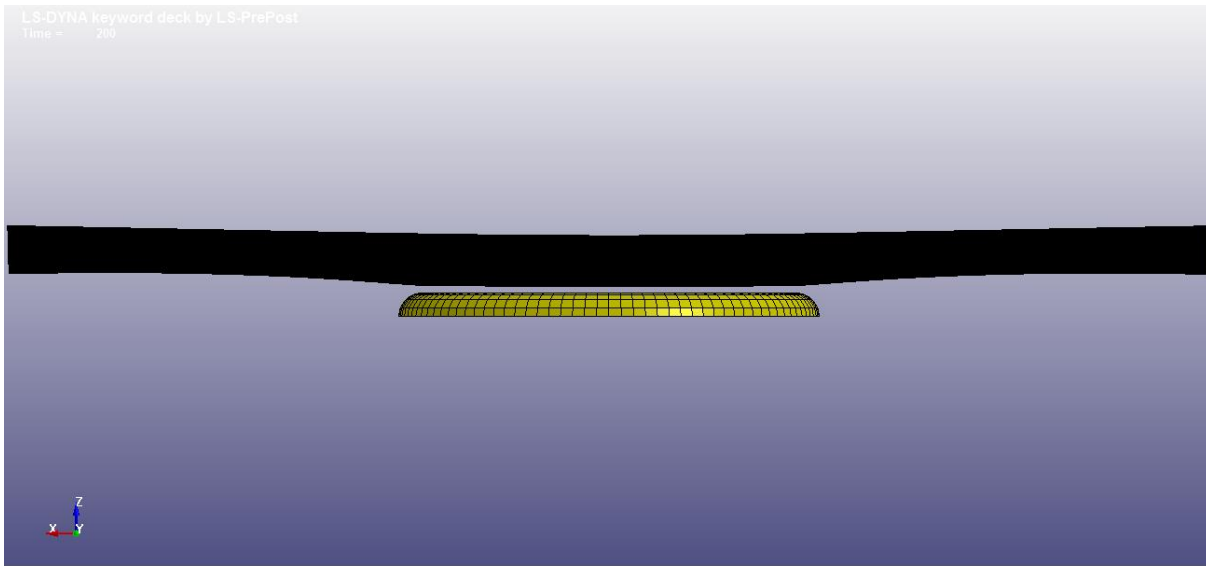


Abbildung 4.11: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Seitenansicht)

Abbildung 4.12 stellt die Verschiebung des Bleches in Z-Richtung an jedem Ort im Vergleich zur Ausgangsposition farblich dar. Die Zahlenwerte sind in der Einheit mm angegeben. Es wird erkennbar, dass die Verschiebung ausgehend von den Werkzeugbacken mit steigender Entfernung zunimmt. In X-Richtung nimmt die Größe der Verschiebungen nur geringfügig zu, da es sich um die Achse handelt, um welche die als Biegung beschriebene Umformung stattfindet. Die größte Verschiebung findet an den Ecken des Bleches statt. Ihre Position weicht um bis zu 5 mm von ihrer Anfangsposition ab.

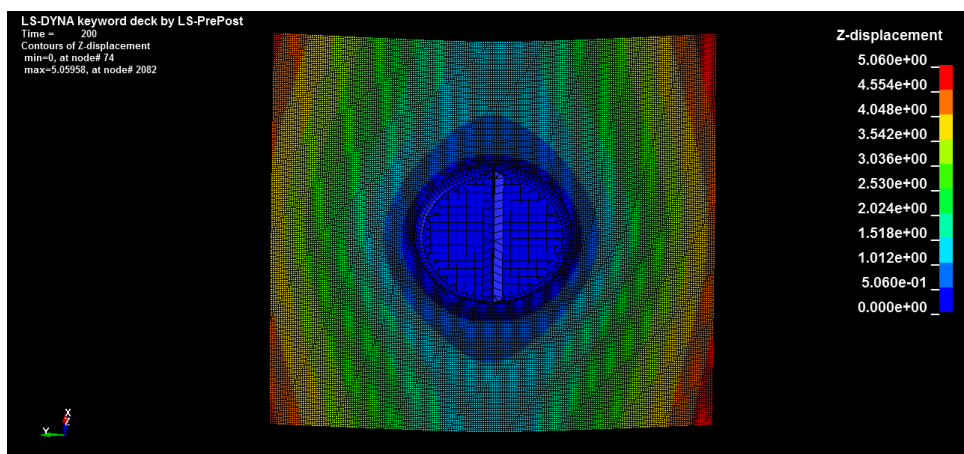


Abbildung 4.12: dargestellt sind die Verschiebungen der einzelnen Knoten in Z-Richtung

In Abbildung 4.13 wird die prozentuale Verringerung der Dicke farblich dargestellt. Eine der beiden Werkzeugbacken wurde in dieser Ansicht ausgeblendet. In der Mitte des Bleches sieht man eine deutliche rote Fläche. Hier wurde das Blech aufgrund der Streckung um bis zu 8,9% dünner. Die Ausdünnung breitet sich auf einen Streifen von ca. 6,5 mm aus und nimmt in positiver wie auch negativer Y-Richtung ab. Wenn man von der Blechmitte in X-Richtung

wandert, nimmt die Ausdünnung noch im Bereich des Werkzeugeingriffes leicht ab, da es dort möglich ist, dass außerhalb der Streckzone befindliches Material nachfließen kann. Aus diesem Grund ist auch eine Ausdünnung, in grün dargestellt, leicht oberhalb und unterhalb der Werkzeugbacken zu finden. Der dunkelblaue Ring, welcher sich an den äußeren Kanten der Werkzeugbacken befindet, beschreibt eine Vergrößerung der Blechdicke um bis zu 2,3%. Durch die Streckung in der Blechmitte entsteht eine Stauchung außerhalb der Werkzeuge. Somit lässt sich die Vergrößerung der Blechdicke erklären, sie ist jedoch nur sehr gering. Die im Kraftformerverfahren größten Deformationen finden in der Zone, welche sich zwischen, beziehungsweise unter den Werkzeugbacken befindet, statt. Die restlichen Dickenänderungen sind zwar klein, aber nicht zu vernachlässigen.

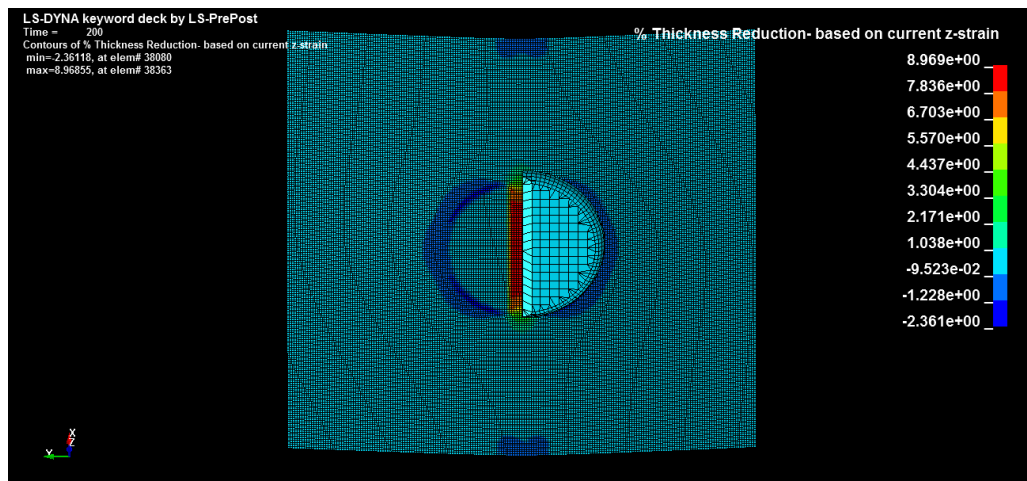


Abbildung 4.13: dargestellt ist die prozentuale Verringerung der Blechdicke an jedem Knoten

4.2.2 Stauchverfahren

Diese Simulation ist im Prinzip die gleiche wie die für das Streckverfahren in Kapitel 4.2.1. Die Werkzeugbacken sind ebenfalls in der Mitte des Bleches positioniert und die oberen Werkzeugbacken sind 0,1 mm von dem Blech entfernt. Die Zustellung beträgt wieder 0,17 mm und die maximale Größe der Netzelemente beträgt 0,5 mm. Die maximalen entstehenden Kontaktkräfte zwischen Werkzeugbacke und Blechplatte betragen ca. 132 kN in Z-Richtung und ca. 12 kN in Y-Richtung.

In Abbildung 4.14 und 4.15 wird die entstehende Geometrie aufgrund der Stauchung dargestellt. In der Frontansicht (Abbildung 4.14) erkennt man, dass dem Blech eine Krümmung widerfährt. Betrachtet man die Seitenansicht, wird erkennbar, dass das Blech auch hier eine Krümmung erfährt. Diese sind in unterschiedliche Richtungen gerichtet. Die Mitten der Seiten verschieben sich in Z-Richtung. In der Frontansicht sieht man, dass die Mitten der linken

und der rechten Seite in negative Z-Richtung verschoben werden, während die Mitten der anderen beiden Seiten in positive Z-Richtung verschoben werden.

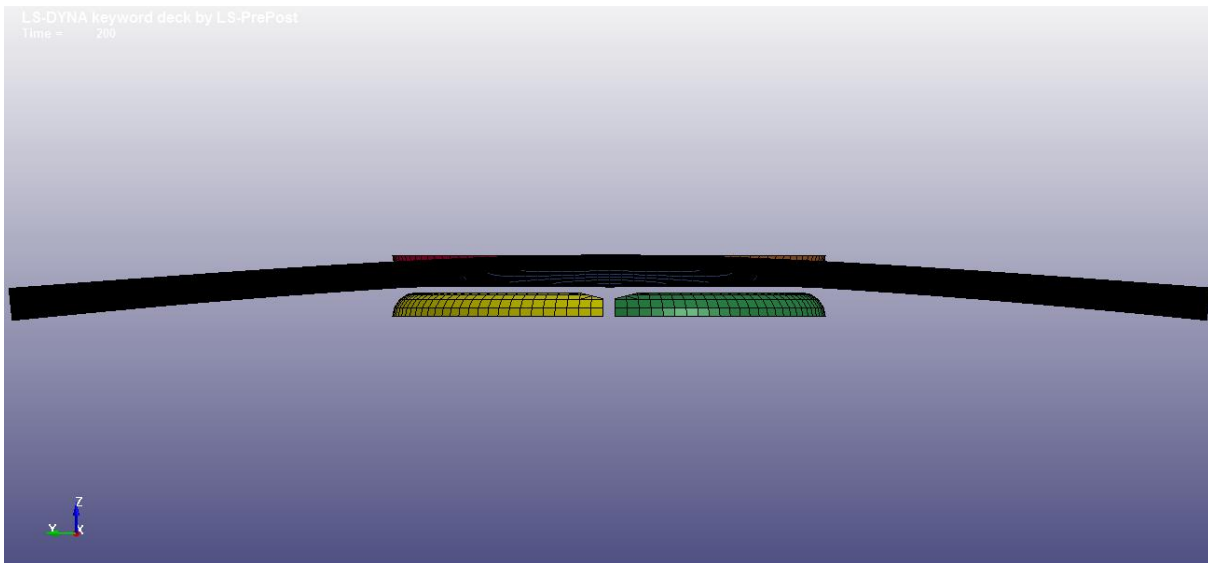


Abbildung 4.14: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Frontansicht)

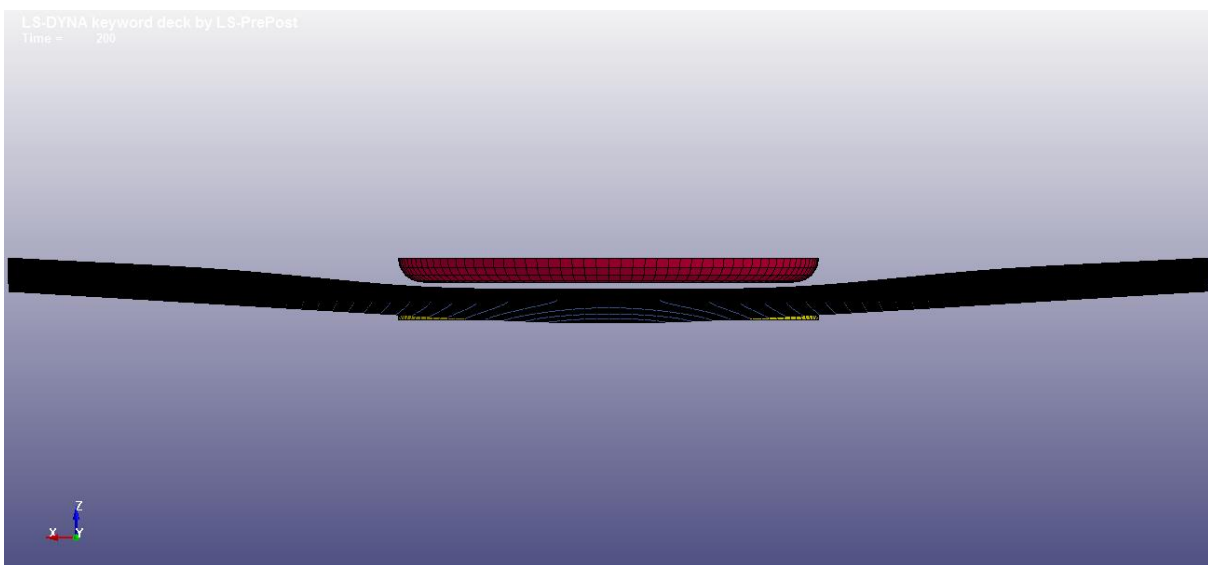


Abbildung 4.15: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Seitenansicht)

Abbildung 4.16 verdeutlicht die in Z-Richtung entstehenden Verschiebungen. Man sieht nochmal deutlich die beschriebenen Verschiebungen der Mitten aller Seiten. Es entstehen Verschiebungen von bis zu 2,8 mm in negative und 2,6 mm in positive Z-Richtung. Es wird erkennbar, dass die Verschiebung der vier Ecken des Bleches beinahe 0 mm beträgt, lediglich der Raum zwischen ihnen erfährt deutliche Verformungen.

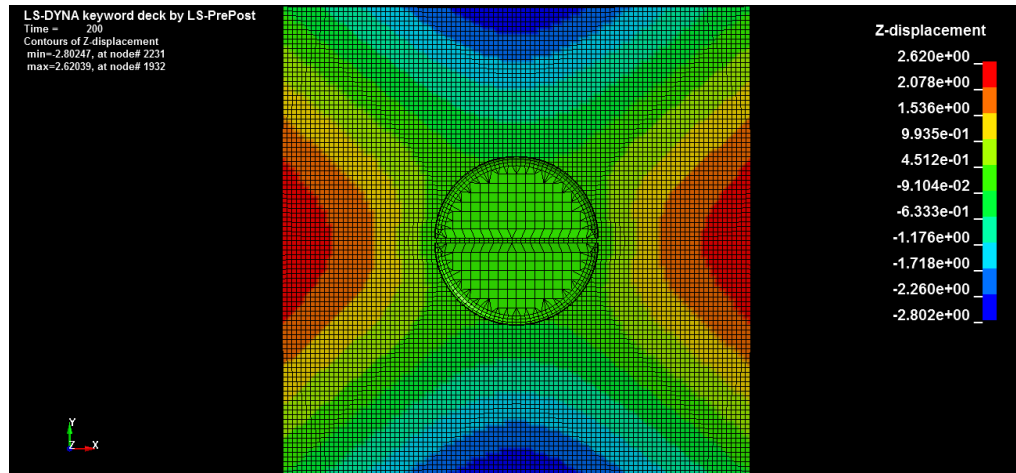


Abbildung 4.16: dargestellt sind die Verschiebungen der einzelnen Knoten in Z-Richtung

Abbildung 4.17 zeigt die prozentuale Verringerung der Blechdicke. Die Deformationszone zwischen und um die Werkzeuge besitzt Ähnlichkeit mit der des Streckvorganges. Hier ist jedoch zu beachten, dass in der Zone zwischen den Werkzeugbacken eine Vergrößerung der Blechdicke stattfindet. Sie steigt um bis zu 8,5% an. Genau in der Mitte des Bleches ist sie am größten und nimmt in X- und Y-Richtung ab. Auch ober- und unterhalb der Werkzeuge, also außerhalb des direkten Werkzeugeingriffes, findet eine Vergrößerung der Blechdicke statt (gelbe Zone). Durch die Stauchung befindet sich zwischen den Werkzeugbacken mehr Material in einer kleineren Zone. Das führt zum Aufdicken des Bleches. Auch außerhalb des Werkzeugeingriffes wird das Material gestaucht, jedoch nicht mehr so stark. An den Kanten des Werkzeuges sieht man einen roten Ring. Das Blech wurde hier um 1,6% dünner, da der Werkstoff in dieser Zone leicht gestreckt wird.

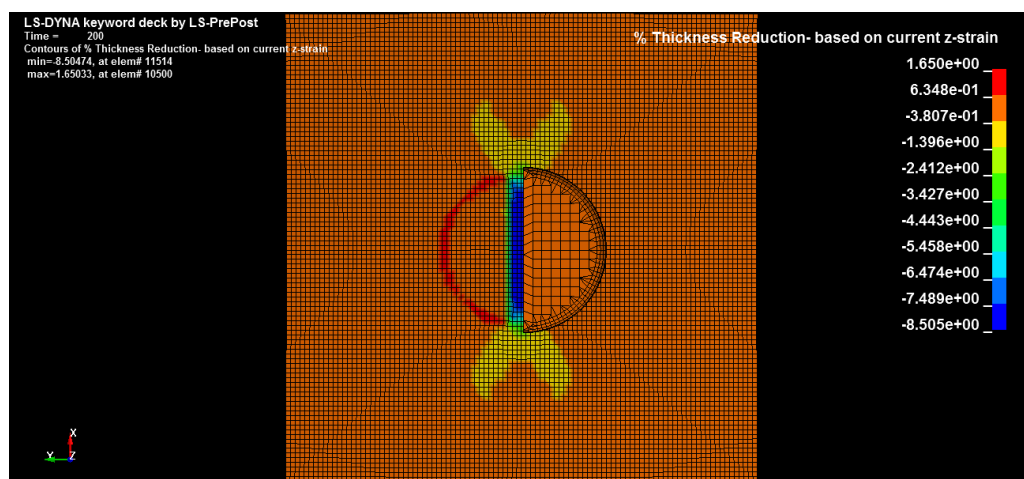


Abbildung 4.17: dargestellt ist die prozentuale Verringerung der Blechdicke an jedem Knoten

4.2.3 Streckverfahren mit Volumenelementen im Vergleich

Im Laufe der Arbeit wurde das Kraftformerverfahren für das Strecken auch unter Verwendung von Volumenelementen durchgeführt. Die Blechplatte wird hierbei als Volumenelement simuliert, die Werkzeugbacken werden weiterhin als Schalenelemente behandelt. Der Sinn liegt darin, die Ergebnisse mit Volumenelementen mit den Ergebnissen der Schalenelemente zu vergleichen, um herauszufinden, welche Simulation die besseren Ergebnisse bietet.

In den Abbildungen 4.18 und 4.19 ist die entstandene Geometrie dargestellt. Man sieht deutliche Unterschiede zu der entstandenen Geometrie in Kapitel 4.2.1. Es fällt auf, dass sich das Blech in negative, anstatt wie vorher in positive Z-Richtung krümmt. Diese Abweichung ist nicht zwangsweise mit der Verwendung von Volumenelementen zu begründen. Hierbei stößt man eher auf ein allgemein auftretendes Problem in dieser Simulation. Da das Blech nicht eingespannt ist, sondern lediglich durch die Werkzeugbacken gehalten wird, kann sich das Blech in beide Richtungen krümmen. Die Richtung der Krümmung ist nicht wirklich vorhersehbar. Es findet beim Strecken eine Art Knicken außerhalb der Werkzeugbacken statt, da aufgrund der Streckung ein deutlicher Anstieg der inneren Spannungen und Kräfte stattfindet. Vergleicht man die entstandenen Geometrien, so werden weitere Unterschiede ersichtlich. Die Verformung mit Volumenelementen ähnelt der mit Schalenelementen, jedoch ist sie mit Volumenelementen deutlich schwächer ausgeprägt. Verdeutlicht wird das, indem man Abbildung 4.20 betrachtet. Das Verschiebungsfeld sieht dem aus Abbildung 4.12 sehr ähnlich, vergleicht man jedoch die maximal auftretenden Verschiebungen, wird ersichtlich, dass sie nur etwas mehr als die Hälfte betragen.

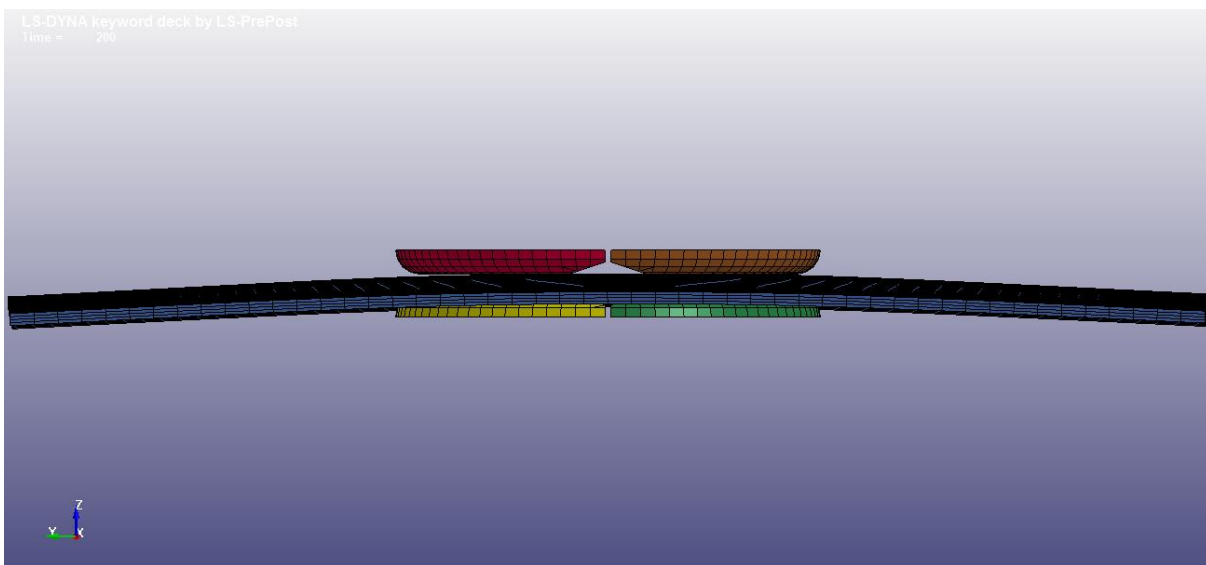


Abbildung 4.18: entstandene Geometrie bei der Verwendung von Volumenelementen als Blechplatte (Frontansicht)

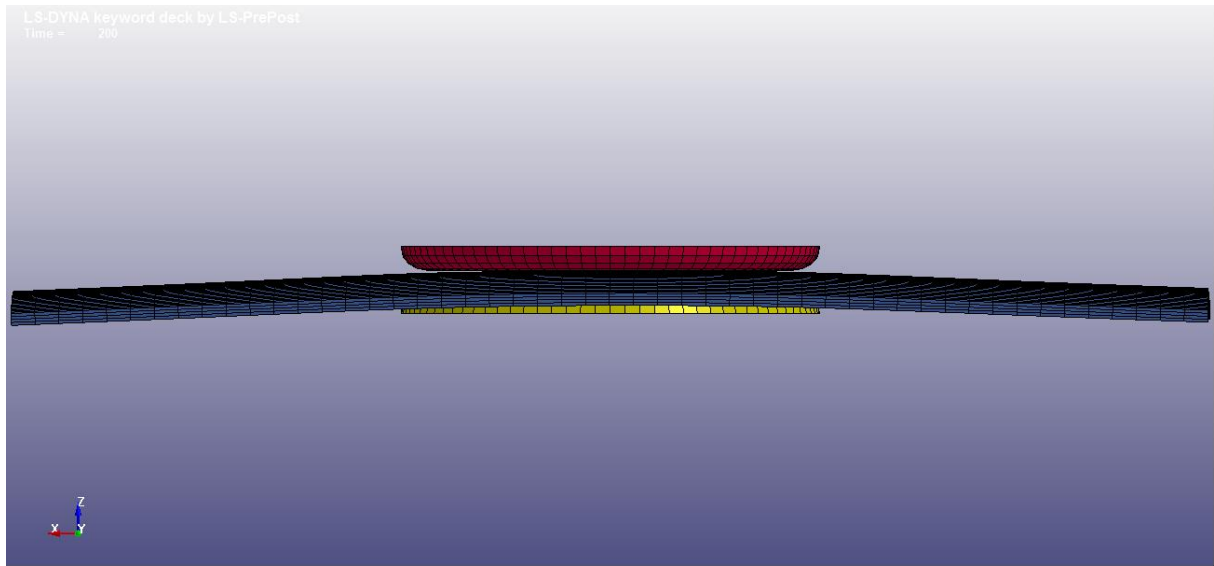


Abbildung 4.19: entstandene Geometrie bei der Verwendung von Volumenelementen als Blechplatte (Seitenansicht)

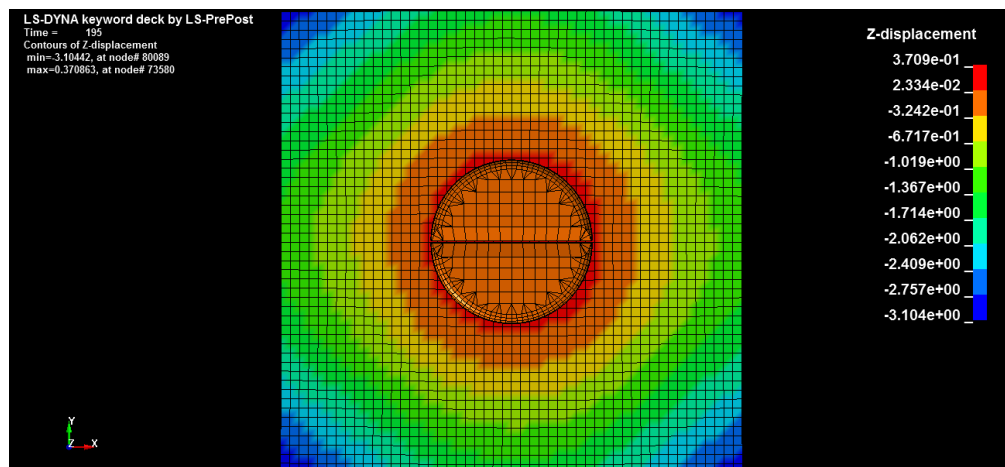


Abbildung 4.20: entstehende Verschiebung jedes Knotens in Z-Richtung

Für Volumenelemente gibt es nicht die Möglichkeit, die Änderung der Dicke anzeigen zu lassen. Es müssen die Verschiebungen der einzelnen Knoten in Z-Richtung betrachtet werden. Hierzu werden nochmals die entstehenden Verschiebungen in Z-Richtung betrachtet, jedoch werden die Größen kleiner skaliert, um einen genaueren Einblick in die Zone zwischen den Werkzeugen zu erhalten, da diese nur dunkelrot dargestellt ist. Ein Erfolg konnte mit dieser Methode jedoch nicht erzielt werden.

Betrachtet man nun abschließend das Ergebnis, welches durch die Simulation mit einem Volumenelement als Blechplatte erlangt wurde, entscheide ich mich für die Verwendung eines Schalenelementes, da das Ergebnis deutlich genauer abgebildet wird und mir persönlich auch logischer erscheint. Des Weiteren ist die Rechenzeit für Volumenelemente sehr hoch im Vergleich zu Berechnungen von Schalenelementen.

Doch woher kommen diese unterschiedlichen Ergebnisse beider Simulationen? LS-Dyna empfiehlt für die Blechumformung eine Verwendung von Schalenelementen, außer es handelt sich um eine Dickblechumformung. In dieser kann auch ein Volumenelement verwendet werden. Bei dem simulierten Blech handelt es sich nicht um einen voluminösen 3D-Körper, der große Abmessungen in alle drei Raumrichtungen besitzt, für welche die Verwendung von Volumenelementen gedacht ist. Des Weiteren besitzen Schalen- und Volumenelemente unterschiedliche Freiheitsgrade pro Knoten. Schalenelemente besitzen drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade, Volumenelemente hingegen besitzen nur drei translatorische Freiheitsgrade.

4.3 Variation von Parametern

4.3.1 Variation der Werkzeugposition

Nachdem Simulationsmodelle für das Strecken, wie auch für das Stauchen, erstellt wurden, welche die Anforderungen an Genauigkeit und Berechnungsdauer erfüllen, werden nun die Positionen des Werkzeugeingriffs variiert. Hierbei wird nur eine Auswahl bestimmter Positionen simuliert, da der Rechenaufwand sonst zu groß wird. Die entstehende Geometrie für den Werkzeugeingriff zwischen simulierten Positionen wird in dem geometrischen Optimierungsverfahren interpoliert.

In Abbildung 4.21 werden die Positionen des Werkzeuges dargestellt, welche simuliert werden. Die Variation der Werkzeugposition beschränkt sich auf ein Viertel des Bleches, da die Geometrien aus Gründen der Symmetrie auf alle anderen Positionen übertragbar ist. Der Werkzeugeingriff wird auf der Y-Achse dreimal im gleichen Abstand verschoben. An der Position X_3 liegt das Werkzeug genau an der Blechkante an. Auf der X-Achse wird der Werkzeugeingriff ebenfalls dreimal im gleichen Abstand verschoben, bis sich das Werkzeug genau an der Blechkante befindet. Zusätzlich wird bei der Verschiebung auf X-Achse das Verformungsverhalten untersucht, wenn das Werkzeug eine Überdeckung von nur 75% (X_7) und 50% (X_8) besitzt. Mit den Positionen X_9 , X_{10} und X_{11} wird das Verformungsverhalten untersucht, wenn das Blech auf der Diagonalen zwischen X- und Y-Achse verschoben wird.

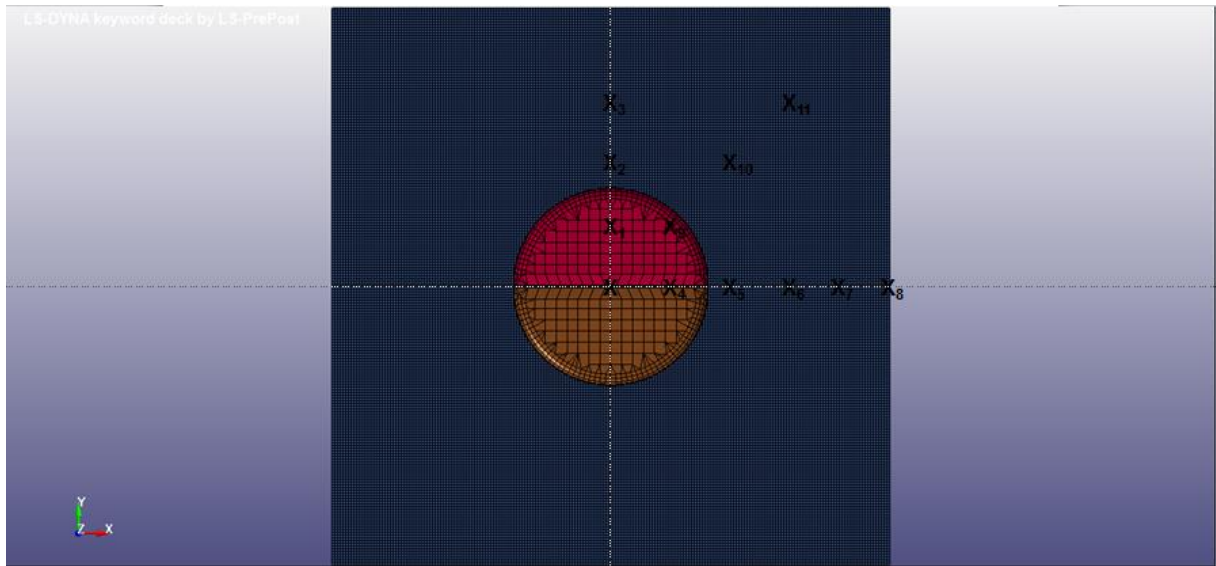


Abbildung 4.21: Variation der Werkzeugposition, x stellt den Mittelpunkt des jeweiligen Werkzeugeingriffes dar

Es ist davon auszugehen, dass die Umformzone zwischen den Werkzeugbacken durch die Variation der Werkzeugpositionen bei 100 prozentiger Abdeckung keine Unterschiede zu denen aus Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 aufweist. Die Verringerung der Blechdicke bleibt die gleiche. Diese Annahme wurde während des Post-Processings der Simulationen bestätigt.

4.3.1.1 Streckverfahren

Es werden als erstes die Variationen der Werkzeugposition auf der Y-Achse betrachtet. Findet der Werkzeugeingriff in X_1 statt, so ähnelt die neue Geometrie der aus 4.2.1, jedoch stülpt sich hier die ausgehend vom Werkzeugeingriff in positiver Y-Richtung gelegene Seite deutlich stärker in Z-Richtung. Die andere Seite erfährt fast keinerlei Verschiebung in Z-Richtung (Abbildung 4.22). Betrachtet man die Geometrie von oben, ist eine deutliche Wulst an der Blechkante erkennbar. Durch die Streckung wird das Material in der Mitte der Blechkante nach außen geschoben (Abbildung 4.23).

Betrachtet man nun die Geometrie, welche durch den Werkzeugeingriff in X_2 entstanden ist, so findet keine Verschiebung in Z-Richtung mehr statt (Abbildung 4.23). Die Maße des Bleches verändern sich jedoch, da sich die Streckung nun äußerst nahe dem Blechende befindet. Betrachtet man das Blech von oben, so wird erkennbar, dass die Blechkante nun eine größere Wulst in der Mitte aufgrund der Streckung besitzt.

Findet der Werkzeugeingriff in Position X_3 statt, findet keine Verformung in Z-Richtung statt, die Ausbeulung der Blechkante fällt jedoch größer aus.

Zur Variation der Werkzeugposition auf der Y-Achse lässt sich abschließend sagen: Je weiter sich der Werkzeugeingriff dem Blechende nähert, desto stärker fällt die Wulst an der Blech-

kante aus. Zwischen Position X_1 und X_2 gibt es einen Punkt, ab dem das Blech in Z-Richtung nicht mehr verformt wird.

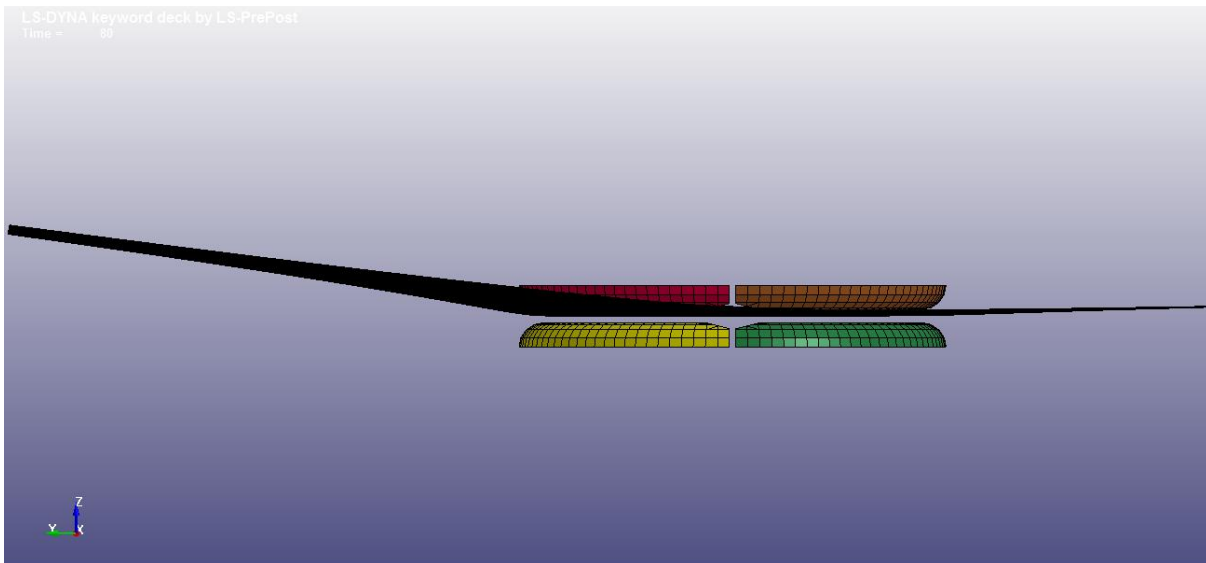


Abbildung 4.22: entstandene Geometrie durch Werkzeugposition X_1

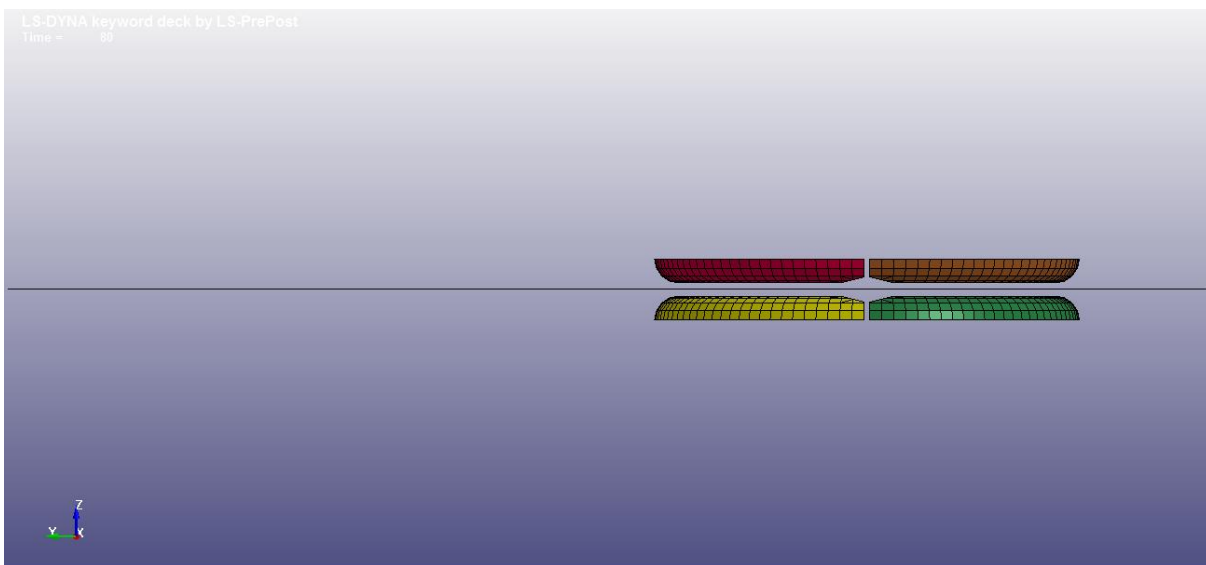


Abbildung 4.23: entstandene Geometrie durch Werkzeugposition X_2

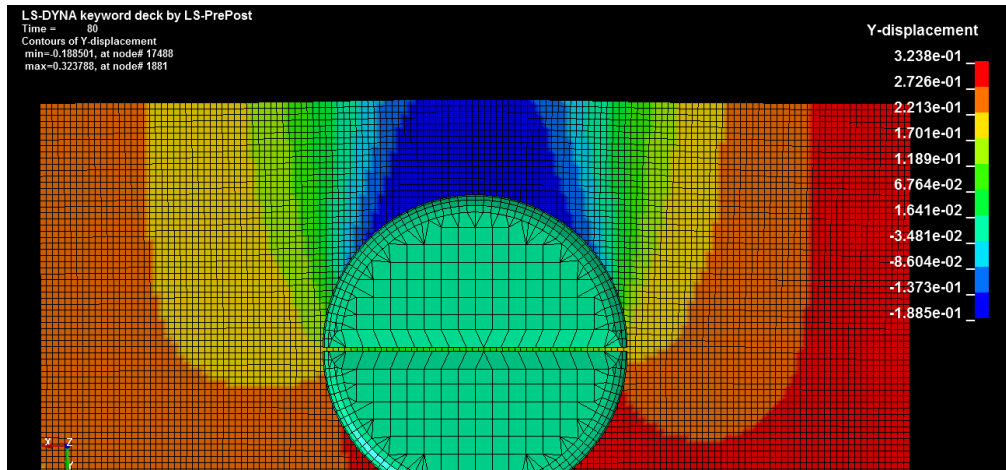


Abbildung 4.24: Verschiebung in Y-Richtung für Werkzeugposition X_2

Im Folgenden wird die Variation der Position auf der X-Achse untersucht. Abbildung 4.25 zeigt die Geometrien für Werkzeugposition X_4 , X_5 , X_6 , X_7 und X_8 . Es wird erkennbar, dass das Blech um die Werkzeugbacken eine geringere Wölbung erfährt, wenn eine größere Distanz zwischen Werkzeugposition und Zentrum liegt. Je weiter sich die Werkzeuge der Position X_8 nähern, desto stärker biegt sich das gegenüberliegende Ende nach oben. Gleichzeitig nimmt mit Annäherung an Position X_8 die Biegung um die X-Achse ab. Betrachtet man die Geometrien von oben sieht man eine leichte Einschnürung des Bleches, da aufgrund der Streckung das Material in Nähe der Blechkante ins Blechzentrum wandert. Bei der Umformung mit teilweiser Überdeckung (Position X_7 und X_8) ist zu erwähnen, dass sich die Umformzone zwischen den Werkzeugen verändert. Es gibt nicht mehr eine durchgehend einheitliche Blechdickenreduktion, sondern in der Nähe der Blechkante nimmt die Reduktion leicht ab (Abbildung 4.26).

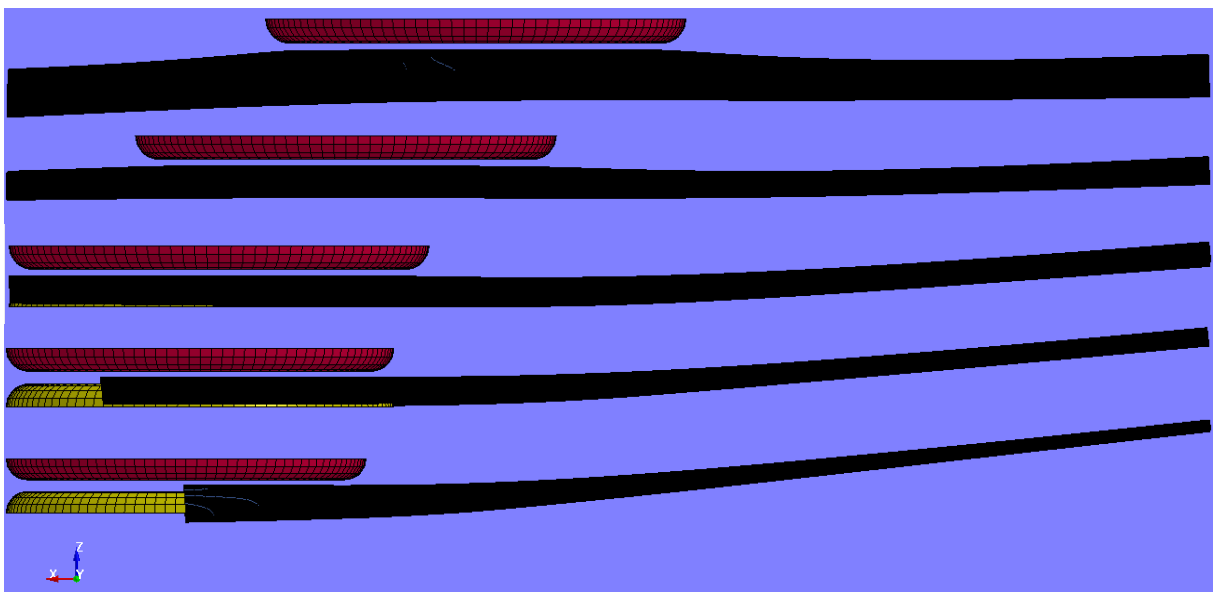


Abbildung 4.25: durch Werkzeugeingriff in X_4 , X_5 , X_6 , X_7 und X_8 erzeugte Geometrie

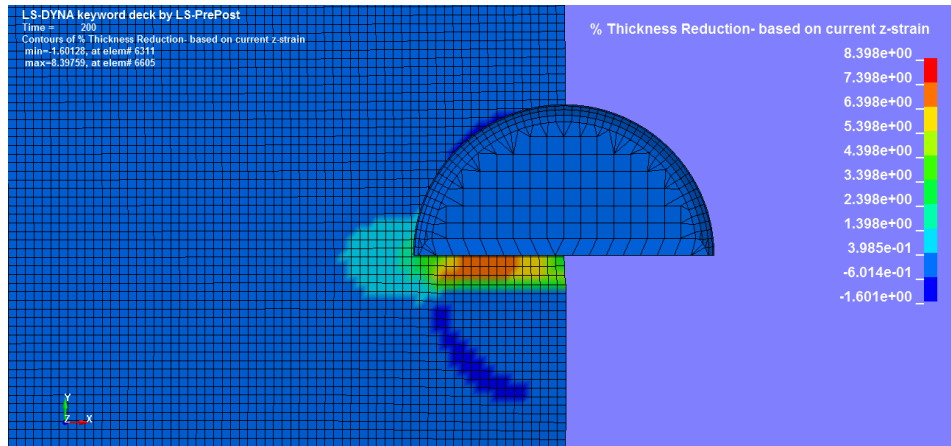


Abbildung 4.26: Blechdickenreduktion in % für Werkzeugposition X_8

Für die Werkzeugpositionen auf der X-/Y-Diagonalen findet eine Überlagerung der vorherigen Ergebnisse statt. Für die Positionen X_{10} und X_{11} gibt es keine sichtbaren Verformungen in Z-Richtung. Position X_9 ist eine Überlagerung der Geometrien von X_1 und X_4 .

4.3.1.2 Stauchverfahren

Zu Beginn werden die Ergebnisse für die Variation auf der Y-Achse untersucht. Hier werden ähnliche Ergebnisse wie für die Streckung erzielt. Für Position X_1 wird eine ähnliche Geometrie wie bei dem Stauchverfahren im Zentrum erhalten, jedoch etwas verschoben. Die Seite, welche in Abbildung 4.27 in negativer Y-Richtung des Werkzeuges liegt, erfährt eine deutlich größere Verschiebung in Z-Richtung als die andere. Die Ergebnisse der Umformungen für Positionen X_2 und X_3 ähneln denen der Streckung. In Z-Richtung findet für den Werkzeugeingriff in Position X_2 lediglich eine sehr kleine Verschiebung statt, für Position X_3 findet keine mehr statt. Da jedoch eine Stauchung anstatt einer Streckung stattfindet, wird das Blech an der Kante, an der eine Ausbeulung stattfand, nun eingeschnürt. Dieses Verhalten wird in Abbildung 4.28 dargestellt.

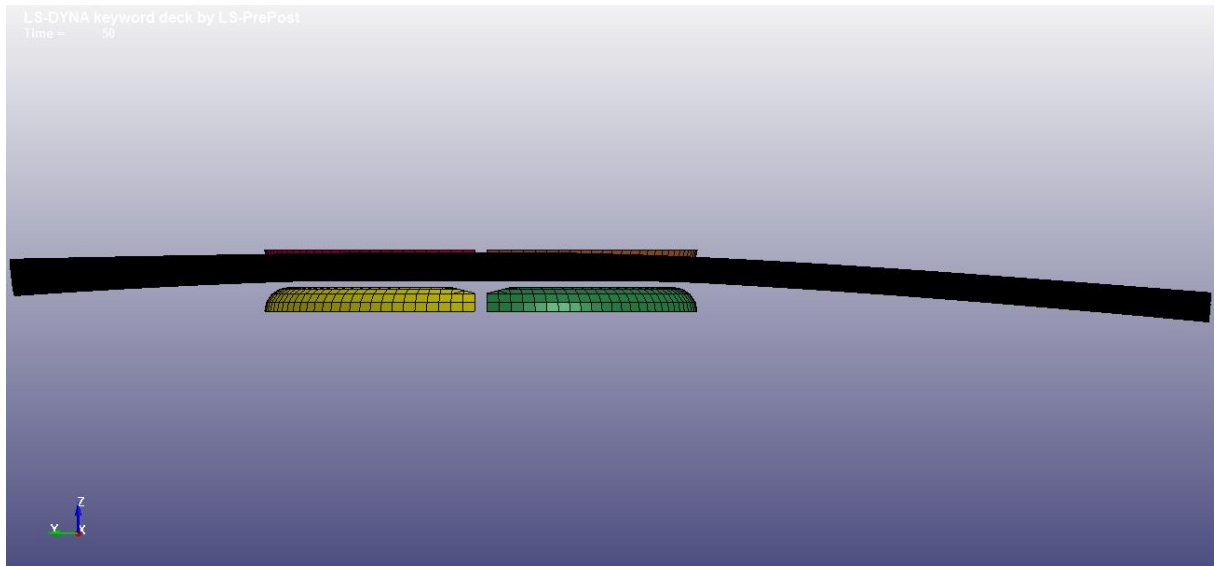


Abbildung 4.27: entstandene Geometrie für Werkzeugposition X_1

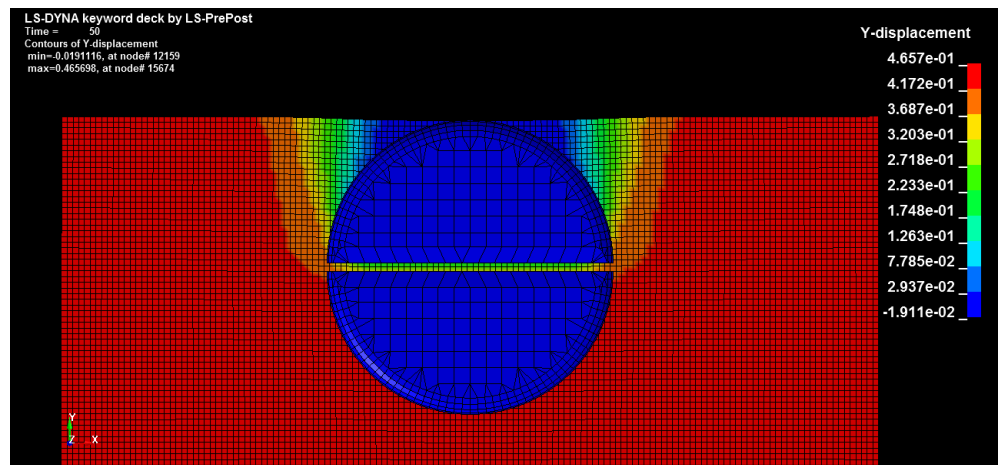


Abbildung 4.28: Verschiebung aller Knoten in Y-Richtung für Werkzeugposition X_3

Bei der Variation der Werkzeugposition auf der Y-Achse tritt das zuvor in Kapitel 4.2.3 beschriebene Problem auf, dass die Richtung der Verformung nicht eindeutig berechenbar ist. Für die Positionen X_4 bis X_8 finden die Verformungen teilweise in positive und teilweise in negative Z-Richtung statt. Vernachlässigt man die Richtung, in welcher die Verformungen geschehen, dann kann man die Ergebnisse dennoch vergleichen. In Abbildung 4.29 sind die Positionen X_4 bis X_8 in der Seitenansicht dargestellt. Erkennbar ist, dass für die Positionen X_5 bis X_8 das Blech eine ähnliche Geometrie besitzt, jedoch mit unterschiedlich starker Verformung. In Abbildung 4.30 ist die Endgeometrie für Werkzeugposition X_4 aus der Hinteransicht dargestellt. Es ist ein leichter Faltenwurf entstanden. Je weiter sich das Werkzeug dem Blech nähert, desto kleiner wird dieser. Wird die Stauchung mit nur teilweiser Überdeckung durchgeführt, Position X_7 und X_8 , entsteht, wie auch beim Streckverfahren, keine einheitliche Blechdickenreduktion in der Umformzone zwischen den Werkzeugbacken.

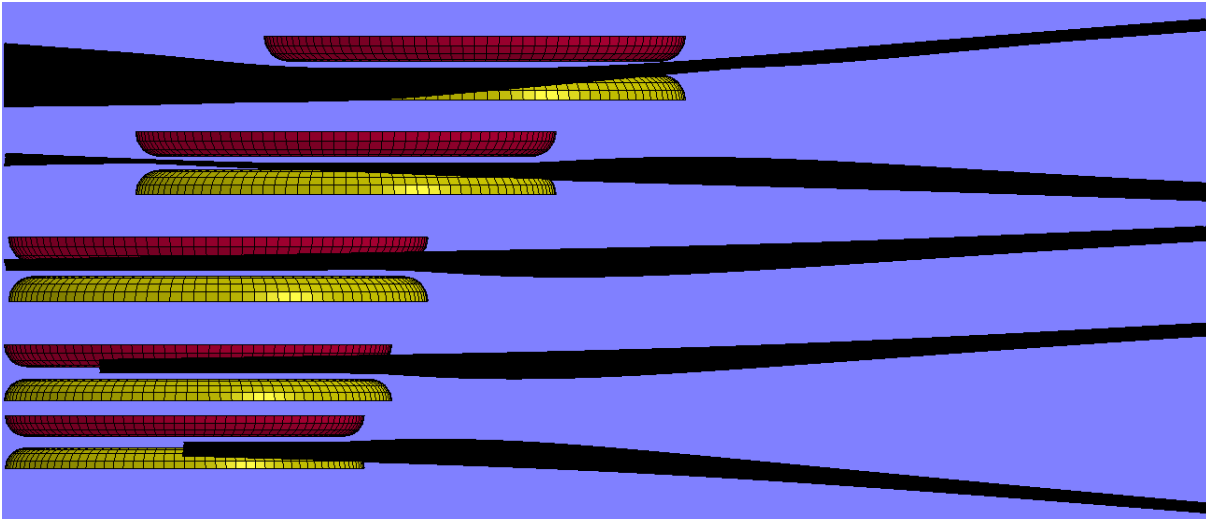


Abbildung 4.29: durch Werkzeugeingriff in X_4 , X_5 , X_6 , X_7 und X_8 erzeugte Geometrie

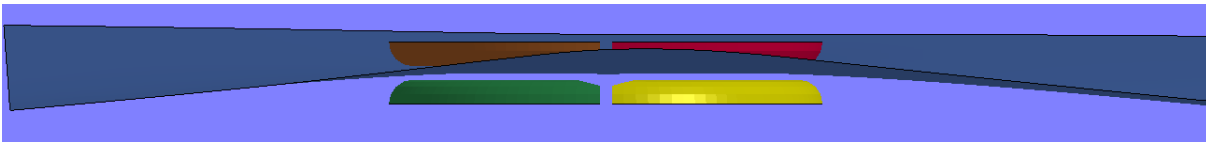


Abbildung 4.30: Geometrie für Werkzeugposition X_4 aus der Hinteransicht

Für die Verschiebung auf der X-/Y-Diagonalen werden bei der Stauchung ähnliche Ergebnisse wie für die Streckung erzielt. Für Position X_{10} und X_{11} entstehen keine sichtbaren Verformungen in Z-Richtung, es findet lediglich eine Verschiebung in der X/Y-Ebene statt.

4.3.2 Variation des Reibwertes

Im Laufe der Arbeit wird der Reibwert variiert, um die Auswirkungen des Werkzeugverschleißes zu untersuchen. Durch dauerhafte Benutzung der gleichen Werkzeuge verschleißt die Oberfläche der Werkzeugbacken. Daraus folgt ein niedrigerer Reibwert zwischen Werkzeugbacken und Blech. Für die Untersuchung wird die Reibzahl lediglich für das Streckverfahren mit zentrischer Werkzeugposition variiert, da die Ergebnisse auf das Stauchverfahren und andere Werkzeugpositionen übertragbar sind.

Für den Reibkoeffizient der Paarung Werkzeug-Blech wurde am utg ein Wert von 0,5 ermittelt. Mit diesem Wert wurden auch sämtliche Simulationen in Kapitel 4.2 und 4.3.1 durchgeführt. Um die Auswirkungen des Werkzeugverschleißes zu untersuchen, werden zwei Simulationen durchgeführt. Die gewählten Reibwerte betragen 0,2 und 0,1.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Simulation aus Kapitel 4.2.1 zeigt, dass die entstandenen Geometrien die gleiche Form besitzen, jedoch fällt der Grad der Umformung deutlich geringer aus. Während in Kapitel 4.2.1 die maximale Verschiebung des Bleches in Z-Richtung

bei ca. 5 mm lag, liegt diese bei der Simulation mit der Reibzahl 0,2 lediglich bei 4,1 mm. Verwendet man eine Reibzahl von 0,1, sinkt die maximale Verformung weiter auf 3,8 mm. Ein weiterer untersuchter Aspekt ist die durch die Umformung entstehende Reduktion der Blechdicke. Unter Verwendung der Reibzahl 0,5 entstand für die Zone zwischen den Werkzeugbacken eine Blechdickenreduktion von 9%. Für den Reibwert 0,2 verringert sich die Blechdicke lediglich um 7,3% und für den Reibwert 0,1 findet nur noch eine Blechdickenreduktion von 6,2% statt. Als letzter Aspekt werden die Kontaktkräfte betrachtet. Die Kräfte in Z-Richtung, die Druckkräfte zwischen Werkzeugbacke und Blech, bleiben logischerweise konstant, unabhängig des Reibwertes. Untersucht man die Kontaktkräfte in Y-Richtung, der Richtung, in welche sich die Werkzeugbacken bewegen, beobachtet man eine Abnahme der Kräfte. Für einen Reibwert von 0,5 erzielt man maximale Kräfte von 10 kN. Die maximalen Kräfte sinken für einen Reibwert von 0,2 auf 9 kN und bei einer Reibzahl von 0,1 betragen die maximalen Kräfte in Y-Richtung lediglich 8,45 kN.

In Abbildungen 4.31, 4.32 und 4.33 sind die maximalen Verschiebungen in Z-Richtung des Bleches in mm, die Blechdickreduktion in % und die entstehenden maximalen Kontaktkräfte in Y-Richtung nochmals gegenüber den Reibzahlen aufgetragen. Es ist eine teilweise lineare Beziehung zwischen den maximalen Verschiebungen in Z-Richtung und den unterschiedlichen Reibwerten erkennbar. Die Beziehung zwischen Blechdickenreduktion und Reibzahl ist zum Teil annähernd linear, bei kleiner Reibzahl sinkt jedoch die Blechdickenreduktion parabelförmig immer stärker. Die Abhängigkeit zwischen der Reibzahl und den in Y-Richtung übertragenen maximalen Kontaktkräften ist ähnlich parabelförmig wie zwischen Reibzahl und Blechdickenreduktion. Bei kleiner werdender Reibzahl steigt die Abnahme der Kontaktkräfte in Y-Richtung an.

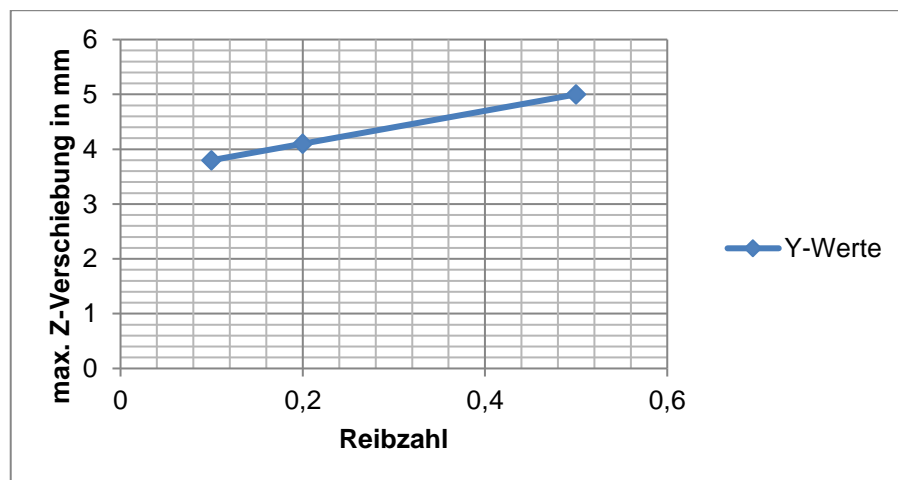


Abbildung 4.31: Darstellung der maximalen Verschiebung in Abhängigkeit des Reibwertes

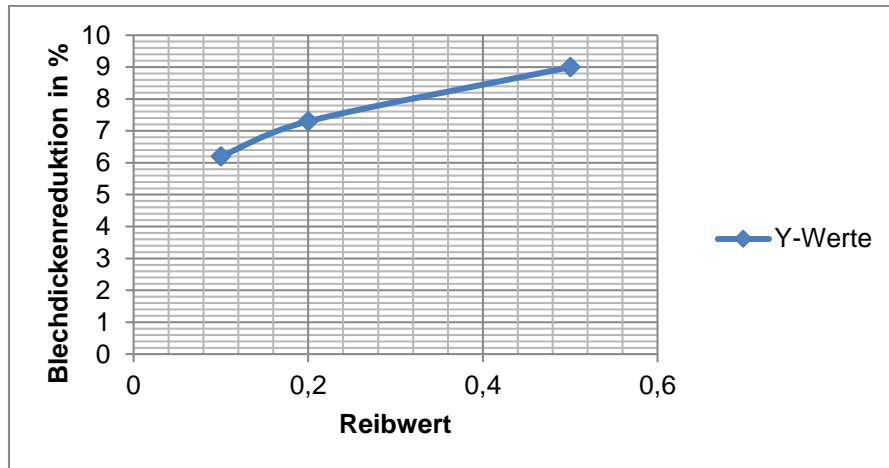


Abbildung 4.32: Darstellung der Blechdickenreduktion in Abhängigkeit des Reibwertes

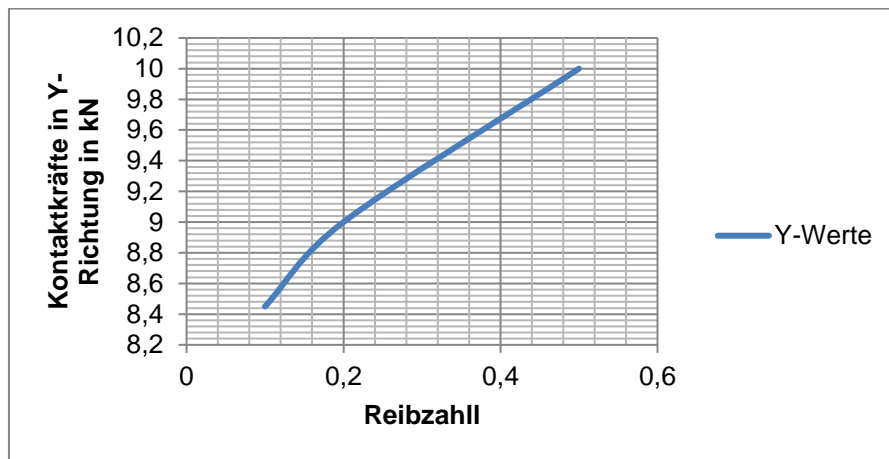


Abbildung 4.33: Darstellung der Kontaktkräfte in Y-Richtung in Abhängigkeit des Reibwertes

5 Das geometrische Optimierungsverfahren

Die in Kapitel 4 gewonnenen Ergebnisse werden benötigt, um mit Hilfe eines geometrischen Optimierungsverfahrens Fertigungswege für die Herstellung verschiedener Geometrien mit dem Kraftformerverfahren vorherzubestimmen. Die geometrischen Optimierungsverfahren besitzen gegenüber der Berechnung des Fertigungsweges mit mehreren Finite-Elemente-Analysen den Vorteil, dass sie deutlich geringere Rechenzeiten besitzen. Des Weiteren treten in dem geometrischen Optimierungsverfahren keine Approximationsfehler und weniger Ungenauigkeiten auf. Die in der FEA durch die Lösung nichtlinearer Gleichungen und Ungleichungen, sowie sämtliche Randbedingungen, auftretenden Approximationsfehler und Ungenauigkeiten summieren sich bei mehreren 100 Analysen und können somit zu deutlichen Abweichungen der Ergebnisse führen

Für das geometrische Optimierungsverfahren werden die durch die Simulationen erzielten Geometrien aller Werkzeugpositionen in ein CAD-Modell übertragen. Die restlichen Daten wie Spannungen und Kräfte werden für das Verfahren nicht benötigt, da es sich nicht um ein physikalisches, sondern ein rein geometrisches Modell handelt. Der Vorteil des rein geometrischen Modells liegt darin, dass die Berechnung des Fertigungsweges deutlich effizienter abläuft und nur geringe Ungenauigkeiten auftreten. Die Ermittlung der Fertigungsstrategie im geometrischen Optimierungsverfahren lässt sich vereinfacht mit Hilfe einer Regelschleife darstellen (Abbildung 5.1). Als Eingang dient das CAD-Modell, welches die gewünschte Endgeometrie darstellt. Das verwendete Blech, welches sich in der Fertigung befindet, stellt den Ist-Zustand der Regelschleife dar. Es wird virtuell vernetzt und mit dem Soll-Zustand verglichen. Aus der gemessenen Abweichung δ des Ist-Zustands von Soll-Zustand wird mit Hilfe eines erstellten Modells eine neue Werkzeugposition bestimmt. Idealerweise nähert man sich iterativ dem Soll-Zustand an. Die Summe aller Werkzeugpositionen, welche zur Erzeugung der Wunschgeometrie notwendig sind, wird als Fertigungsweg bezeichnet. (Su, 2016)

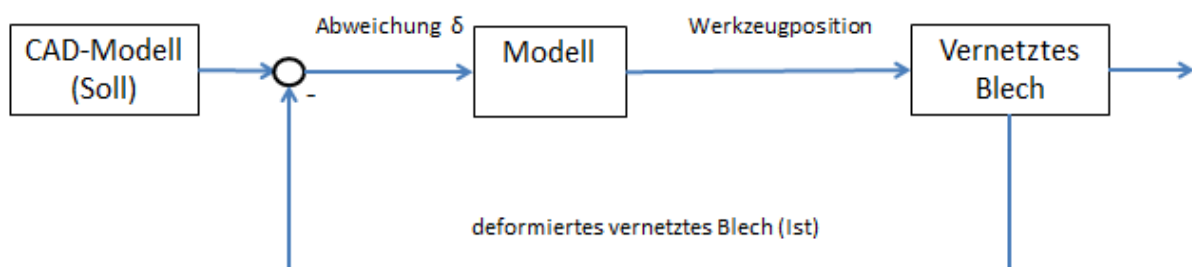


Abbildung 5.1: Regelschleife zur Ermittlung einer Fertigungsstrategie (Su, 2016)

6 Validierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation müssen mit Geometrien, welche aus realen Umformungen entstanden sind, verglichen werden, um zu gewährleisten, dass die erarbeiteten Ergebnisse verwendbar sind. Hierzu werden 100×100 mm Bleche in der Werkstatt des UTGs am Kraftformer umgeformt. Den Simulationen entsprechend wird lediglich ein Arbeitshub ausgeführt. Es wird eine Auswahl von vier Positionen getroffen, für welche die Umformungen am Kraftformer durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus den Vergleichen dieser vier Positionen mit denen der Simulationen sollten eine Übertragbarkeit auf die Ergebnisse aller anderen Werkzeugposition zulassen. Unter diesem Aspekt wird zudem nur das Streckverfahren am Kraftformer durchgeführt. Die Schlussfolgerungen, welche man aus den durch das Streckverfahren erzeugten Geometrien erhält, sollten auch für das Stauchverfahren repräsentativ sein. Die untersuchten Positionen sind X_0 (Zentrum), X_1 , X_2 und X_8 (Abbildung 4.24). X_1 und X_2 werden untersucht, um festzustellen, ob sich zwischen beiden Positionen einen Ort befindet, ab welchem eine Verformung in Z-Richtung nicht mehr stattfindet. Des Weiteren wird X_8 untersucht, um das Verhalten einer teilweisen Überlappung zu untersuchen.

Zur Umformung der Bleche im Kraftformer wird der Industrieroboter Kuka KR30 verwendet. Er ist für die Positionierung der Bleche während des Arbeitshubes zuständig. Zuerst werden die Koordinaten der Schlagpositionen X_0 , X_1 , X_2 und X_8 ermittelt. Zur genauen Beschreibung der Positionen werden sechs Koordinaten in dem Koordinatensystem des Roboters benötigt. Neben den X-, Y- und Z-Koordinaten müssen drei Eulerwinkel ermittelt werden. Mit Hilfe eines Matlab-Programmes können die Koordinaten ermittelt und anschließend an den Roboter gesendet werden. Im Anschluss an die Umformungen werden die Bleche durch eine optische 3D-Koordinatenvermessung digitalisiert. Hierzu wird eine hochauflösende 3D-Kamera der Firma ShapeDrive verwendet. Die Kamera ist in der Lage, Werkstücke bis in den Mikrometerbereich zu vermessen. Zwischen der digitalisierten Geometrie und einem idealen 100×100 mm Blech, welches in Catia v5 konstruiert wurde, wird mit dem Programm GOM Inspect ein CAD-Flächenvergleich durchgeführt. Der Flächenvergleich zeigt die Abweichung jedes Pixels, der mit der 3D-Kamera aufgenommen wurde, von dem idealisierten Blech.

Die am Kraftformer umgeformten Bleche zeigen auf den ersten Blick einen deutlich geringeren Umformgrad als die Bleche, welche simuliert wurden. Vergleicht man die Geometrien für die Position X_0 , so ist im Gegensatz zur Simulation nur eine sehr geringe Verformung in Z-Richtung erkennbar. Die gleichen Ergebnisse erhält man für die anderen Werkzeugpositionen. Die CAD-Flächenvergleiche bestätigen diese Beobachtung. Abbildung 6.1 zeigt den Flächenvergleich für die Werkzeugposition X_0 . Zu erwähnen ist, dass die Streckrichtung des Werkzeuges in dem Bild in X-Richtung liegt. Man sieht deutlich den Bereich, an dem das Werk-

zeug die Umformung ausgeführt hat. Man sieht eine Abweichung von bis zu 0,6 mm von dem idealisierten Blech. Das ist jedoch nicht mit einer Verringerung der Blechdicke um 0,6 mm, also 60% gleichzusetzen, da in dem durchgeführten Verfahren lediglich eine Seite des Bleches untersucht wird. Das Blech war in der linken unteren Ecke im Industrieroboter eingespannt. Die starke Abweichung des Bereiches der Einspannung ist damit zu erklären, dass bei der Ansteuerung mit dem Roboter kleine Ungenauigkeiten existierten. Das Blech befand sich nicht exakt auf der Ebene der unteren Werkzeugbacken, sondern war leicht oberhalb positioniert. Dieser Fakt hat aber keinen Einfluss auf die Schlussfolgerung, dass der Umformgrad in der Realität deutlich kleiner ausfällt als in der Simulation. Des Weiteren gab es bei der Vermessung mit der 3D-Kamera Probleme mit der Reflexion der Blechoberfläche. Die Umformzone zwischen den Werkzeugbacken ist nur mit mäßiger Genauigkeit dargestellt. Jedes Blech wurde vor der Umformung vermessen, um einen Vergleich zwischen vorheriger und durch den Arbeitshub entstandener Geometrie durchzuführen, da die Ausgangsbleche nicht mit einem idealisierten Blech vergleichbar sind. Die Bleche besitzen schon vor der Umformung leichte Krümmungen oder ähnliches. Aufgrund der Reflexionsprobleme war die Software jedoch nicht in der Lage, einen verwendbaren CAD-Flächenvergleich zwischen den beiden Bildern durchzuführen, weshalb ein idealisiertes Blech benutzt wurde.

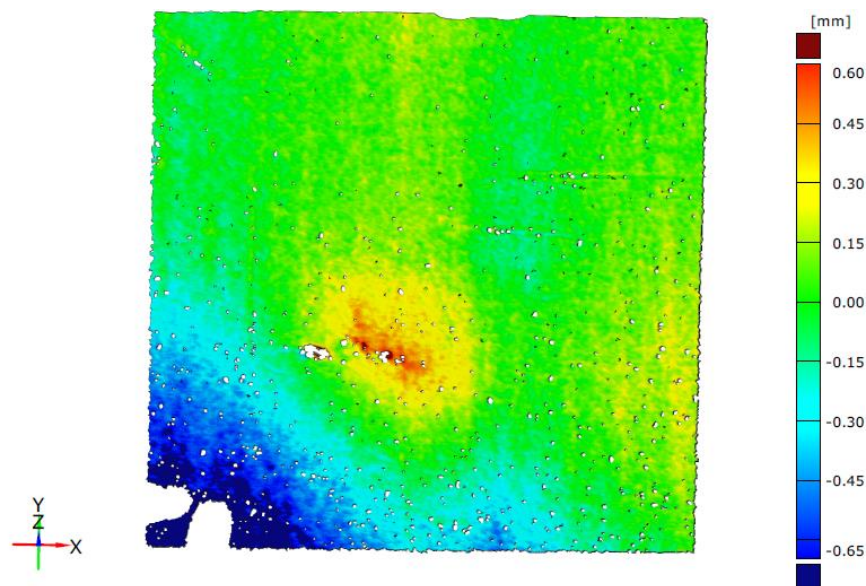


Abbildung 6.1: Flächenvergleich für Werkzeugposition X_0

Abbildung 6.2 zeigt den Flächenvergleich für Werkzeugposition X_8 . Der Werkzeugeingriff an der oberen Kante ist gut zu erkennen. Man sieht die Verformung in diesem Bereich deutlich, jedoch lässt auch diese Abbildung aufgrund der zuvor genannten Faktoren keinen exakten Einblick in die Deformationszone zu.

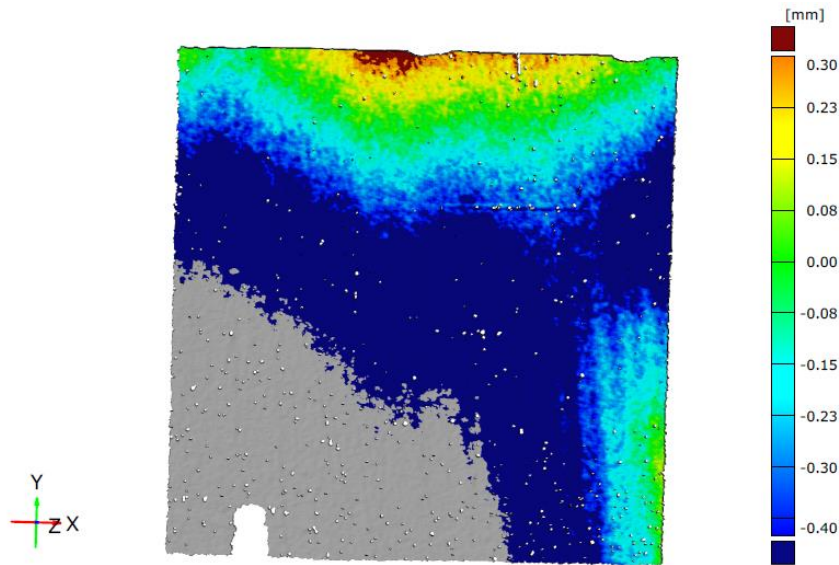


Abbildung 6.2: Flächenvergleich für Werkzeugposition X_8

Auch wenn es kleine Komplikationen während der Validierung gab, kann man dennoch nützliche Schlüsse daraus ziehen. Die Umformzone ist erkennbar und eine Verringerung der Dicke findet statt, jedoch ist der Umformgrad der Simulation deutlich höher als der im realen Kraftformerverfahren entstehende. Um die Ergebnisse der Abweichung zu minimieren, muss das verwendete Materialmodell in der Simulation angepasst werden. Es muss ein steiferes Material verwendet werden. Ein anderer Aspekt ist die Zustellung der Werkzeugbacken. Ein absoluter Wert, wie weit sich das obere Werkzeug dem unteren nähert, ist nicht ermittelbar. Aus diesem Grund muss die Zustellung angepasst werden bis die Umformgrade eine ähnliche Stärke aufweisen. Wird die Zustellung, also die Eintauchtiefe des oberen Werkzeuges in die Blechoberfläche, in der Simulation verringert, sinkt auch der Grad der Umformung. Trotz der Unterschiede sind die Ergebnisse dieser Arbeit verwendbar, da das geometrische Optimierungsverfahren nicht mit absoluten Werten arbeitet. Das Verfahren funktioniert, indem man sich der Endgeometrie Schritt für Schritt nähert. Wenn auch der absolute Wert der Verformung in der Simulation nicht mit dem realen Wert übereinstimmt, so ist immer noch die Richtung der Verformung wichtig. Und solange die Richtung zum Erreichen der Geometrie beiträgt, ist ein Erreichen der gewünschten Endgeometrie gewährleistet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Kraftformerverfahren besitzt das Potential, Marktlücken im Bereich der Umformtechnik zu schließen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren kann das Kraftformerverfahren im Bereich der Kleinserienfertigung eine kostengünstige Alternative bieten, da keine formgebenden Werkzeuge benötigt werden. Aufgrund des Verzichts auf formgebende Werkzeuge, bietet das Verfahren eine hohe Flexibilität der Produktion und eine hohe Individualität der Produkte, welche herkömmliche Umformverfahren nicht erreichen können. Der industriellen Verwendung des Verfahrens steht jedoch die schwierige Automatisierung des bisher manuell durchgeführten Verfahrens im Wege.

Am Lehrstuhl für Umform- und Gießereitechnik wird nach Möglichkeiten zur Automatisierung des Verfahrens geforscht. Hierzu wird ein Industrieroboter verwendet, welcher für die Positionierung des Blechteils verantwortlich ist. Die große Aufgabe besteht darin, dem Roboter die exakte Positionierung des Bleches vorzugeben, um die gewünschte Endgeometrie zu erreichen. Ein Ansatz zur Automatisierung stellt die Verwendung eines geometrischen Optimierungsverfahrens dar. Das Verfahren stellt eine zeiteffiziente Möglichkeit zur Bestimmung des Fertigungsweges und zur dauerhaften Anpassung innerhalb des Produktionsprozesses dar. Hierbei handelt es sich um ein geometrisches Modell. Es wird die gewünschte Endgeometrie mit dem aktuellen Blech verglichen und aus den Differenzen immer wieder die neue Schlagposition bestimmt, bis das angestrebte Ergebnis erreicht wird.

Um das geometrische Optimierungsverfahren durchzuführen, wird eine Datenbank benötigt, welche die entstehenden Umformungen eines Bleches abhängig von der Schlagposition beinhaltet. In dieser Arbeit wurde unter Verwendung der Software LS-DYNA ein Arbeitshub des Kraftformerverfahrens für verschiedene Werkzeugpositionen simuliert. Es wurde das Stauch-, wie auch das Streckverfahren simuliert. Die Simulationen beschränkten sich auf ein ebenes 10×10 cm Blech.

Die erzielten Ergebnisse zeigen bei der Validierung Abweichungen zur Realität auf. Die in der Simulation entstandenen Verformungen sind im Vergleich zur Realität groß, dennoch sind die Ergebnisse verwendbar, da es sich um ein Optimierungsverfahren handelt, bei welchem man sich der gewünschten Zielgeometrie schrittweise nähert. In dem erstellten Modell können einfache Anpassungen vorgenommen werden, um Arbeitshübe von anderen Blechgrößen und -formen durchzuführen, um in der Zukunft weitere Daten für das geometrische Optimierungsverfahren zu sammeln. Materialanpassungen können durchgeführt werden, wie auch Variationen der Zustellung, um eine Datenbank zu schaffen, mit der es eventuell in Zukunft möglich ist, den Grad der Automatisierung des Kraftformerverfahrens zu steigern.

A. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Strecken eines Stabes.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 2.2:	Stauchten eines Stabes	4
Abbildung 2.3:	Prinzipskizze single point incremental forming (Lamminen, Wadman, Küttner, Svinning, 2003)	6
Abbildung 2.4:	Das Eckold Kraftformer-Programm (Eckold)	8
Abbildung 2.5:	Strecken (links), Stauchwerkzeug (Mitte), Streckwerkzeug (Eckold)	8
Abbildung 2.6:	Prinzip des Streck- und Stauchvorganges (Eckold).....	9
Abbildung 2.7:	Kraftformerverfahren mittels Kuka-Roboter (Dötz, Hoffmann, Scherer)....	10
Abbildung 2.8:	FEM-Crash-Simulation (Fleming, 1997)	11
Abbildung 4.1:	vernetzte Werkzeugbacke und Blechplatine, mittels LS-PrePost erstellt.....	15
Abbildung 4.2:	Kinematik der Werkzeugbacken im Streckvorgang (Scherer, 2013)	15
Abbildung 4.3:	räumliche Anordnung der vier Werkzeugbacken und der Blechplatine im Streckvorgang	16
Abbildung 4.4:	räumliche Anordnung der vier Werkzeugbacken und der Blechplatine im Stauchvorgang	16
Abbildung 4.5:	Seitenansicht des in der Simulation verwendeten Schalenelements (ELFORM=2) (LSDYNA, 2016)	17
Abbildung 4.6:	skizzenartige Darstellung des in Simulationen auftretenden, problematischen Hourglassings (LSDYNA, 2016)	18
Abbildung 4.7:	Darstellung der ONE_WAY Kontaktabfrage (Penalty-Formulierung) und wie das Problem des Eindringens durch Anbringen der Strafkkräfte F_{k1} und F_{k2} gelöst wird (LSDYNA, 2016).....	20
Abbildung 4.8:	Weg-Zeit-Diagramm der Zustellung der oberen Werkzeugbacken (Einheiten: mm und ms)	21
Abbildung 4.9:	Weg-Zeit-Diagramm einer Werkzeugbacke in Y-Richtung (Einheiten: mm und ms)	22
Abbildung 4.10:	entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Frontansicht)	23

Abbildung 4.11: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Seitenansicht).....	24
Abbildung 4.12: dargestellt sind die Verschiebungen der einzelnen Knoten in Z-Richtung..	24
Abbildung 4.13: dargestellt ist die prozentuale Verringerung der Blechdicke an jedem Knoten.....	25
Abbildung 4.14: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Frontansicht).....	26
Abbildung 4.15: entstandene Blechgeometrie, nachdem sich die Werkzeugbacken wieder in ihrer Ausgangsposition befinden (Seitenansicht).....	26
Abbildung 4.16: dargestellt sind die Verschiebungen der einzelnen Knoten in Z-Richtung..	27
Abbildung 4.17: dargestellt ist die prozentuale Verringerung der Blechdicke an jedem Knoten.....	27
Abbildung 4.18: entstandene Geometrie bei der Verwendung von Volumenelementen als Blechplatte (Frontansicht).....	28
Abbildung 4.19: entstandene Geometrie bei der Verwendung von Volumenelementen als Blechplatte (Seitenansicht).....	29
Abbildung 4.20: entstehende Verschiebung jedes Knotens in Z-Richtung.....	29
Abbildung 4.21: Variation der Werkzeugposition, x stellt den Mittelpunkt des jeweiligen Werkzeugeingriffes dar	31
Abbildung 4.22: entstandene Geometrie durch Werkzeugposition X_1	32
Abbildung 4.23: entstandene Geometrie durch Werkzeugposition X_2	32
Abbildung 4.24: Verschiebung in Y-Richtung für Werkzeugposition X_2	33
Abbildung 4.25: durch Werkzeugeingriff in X_4 , X_5 , X_6 , X_7 und X_8 erzeugte Geometrie.....	33
Abbildung 4.26: Blechdickenreduktion in % für Werkzeugposition X_8	34
Abbildung 4.27: entstandene Geometrie für Werkzeugposition X_1	35
Abbildung 4.28: Verschiebung aller Knoten in Y-Richtung für Werkzeugposition X_3	35
Abbildung 4.29: durch Werkzeugeingriff in X_4 , X_5 , X_6 , X_7 und X_8 erzeugte Geometrie.....	36
Abbildung 4.30: Geometrie für Werkzeugposition X_4 aus der Hinteransicht.....	36
Abbildung 4.31: Darstellung der maximalen Verschiebung in Abhängigkeit des Reibwertes	37

Abbildung 4.32: Darstellung der Blechdickenreduktion in Abhängigkeit des Reibwertes	38
Abbildung 4.33: Darstellung der Kontaktkräfte in Y-Richtung in Abhängigkeit des Reibwertes	38
Abbildung 5.1: Regelschleife zur Ermittlung einer Fertigungsstrategie	39
Abbildung 6.1: Flächenvergleich für Werkzeugposition X_0	41
Abbildung 6.2: Flächenvergleich für Werkzeugposition X_8	42

B. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (Deutsches Institut für Normung, 2003)	2
Tabelle 2.2:	Einteilung der Umformverfahren nach DIN 8582 (Deutsches Institut für Normung, 2003)	3

C. Literatur

AMINO, Masaaki, Masashi MIZOGUCHI, Yuji TERAUCHI und Trent MAKI, 2014. *Current status of "Dieless" Amino's incremental forming* In: *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014*. Nagoya, Japan, 19.-24.10.2014. Amsterdam: www.elsevier.com

CAMBRIDGE UNIVERSITY, 2009. *Incremental Sheet Forming* [online]. Cambridge: University of Cambridge [Zugriff am: 01.10.2016]. Verfügbar unter: <http://www.lcmp.eng.cam.ac.uk/wellformed/incremental-sheet-forming>

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2003. DIN 8580: *Fertigungsverfahren-Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth, 2003-09

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2003. DIN 8582: *Fertigungsverfahren Umformen- Einordnung, Unterteilung Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Berlin: Beuth, 2003-09

DOEGE, Eckart und Bernd-Arno BEHRENS, 2007. *Handbuch Umformtechnik*. 2., bearbeitete Auflage. Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-04248-5

DÖTZ, Dominik, Hartmut HOFFMANN, Daniel SCHERER, Carsten TRINITIS und Max WALTER. *On the Automation on Incremental Metal Forming Process*. München: Technische Universität

ECKOLD GMBH & CO KG, 2016. St. Andreasberg: Eckold GmbH & CO KG. [Zugriff am: 10.10.2016]. Verfügbar unter: www.eckold.com

EMMENS, Wilko C., 2008. *Mechanisms in Incremental Sheet Forming* [PowerPoint-Präsentation]. Helsinki: University of Twente, 29-30.10.2008

FLEMING, Marc, 1997. *Advanced Finite Elements* [online]. *Instructor: Prof. Ted Belytschko*. Civil Engineering Department, Northwestern University [Zugriff am: 15.10.2016]. Verfügbar unter: <http://www.tam.northwestern.edu/tb/D26/>

HOFFMANN, Hartmut und Roland GOLLE, 2007. *DFG-Forschungsprojekt (Projekt HO 2165/30-1 bis Projekt HO2165/30-3): Automatisierte Fertigung von 2D-Blechbauteilen durch Treiben*. München: Technische Universität

HOFFMANN, Hartmut, Reimund NEUGEBAUER und Günter SPUR, 2012. *Handbuch Umformen*. München: Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-42778-5

- ILANGO VAN, Balaji, 2015. *Fixtureless automated incremental sheet metal forming*. [Dissertation]. Loughborough: University
- LAMMINEN, Lotta, Boel WADMAN, Rein KÜTTNER und Torgeir SVINNING, 2003. *ProSheet: Prototyping and low volume production of sheet metal components*. Nordic Industrial Fund
- LS-DYNA, KÜNZEL, Markus, Jeanette RAQUET und Pierre GLAY, 2016. *Einführung in LS-DYNA* [PowerPoint-Präsentation]. DYNAmore GmbH, 07.03.2016
- MATHIAK, Friedrich U., 2010. *Die Methode der Finiten Elemente (FEM): Einführung und Grundlagen*. Neubrandenburg: Hochschule
- MEIER, Horst, Volker SMUKALA und Bolko BUFF, 2008. *Roboterbasierte, inkrementelle Blechumformung*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG
- OPRITESCU, Daniel, 2012. *Automated Driving by Standardizing and Scaling the Manufacturing Strategy*. In: 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Athens, 16.-18.05.2012. Amsterdam: www.elsevier.com
- SCHÄFER, Timo, 2006. *Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter* [Dissertation]. Stuttgart: Universität
- SCHERER, Daniel, 2013. *Methoden zur Automatisierung der inkrementellen Blechumformung*. [Dissertation]. München: Technische Universität
- SCHERER, Daniel und andere, 2008. *Driving as an Innovative Manufacturing Method for Mass Customization of Individualized Sheet Metal Products*. In: POMS 19th Annual Conference. La Jolla, California, USA, 09.-12.05.2008
- STEINKE, Peter, 2012. *Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung*. 4., neu bearbeitete und ergänzte Auflage. Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-29505-8
- SU, Jizong, 2016. *Abbildung eines inkrementellen Umformschnitts über geometrische Ansätze* [Masterarbeit]. München: Technische Universität