



FINITE-ELEMENTE ANALYSE ZUM EINFLUSS DER
WERKSTOFFVERFESTIGUNG AUF DAS
BIEGEWECHSELRICHTEN VON BLECHEN

BACHELOR-THESIS

VON

MARIO FRITSCH

GEBOREN AM 23. AUGUST 1987 IN OFFENBURG

27. FEBRUAR 2013

BETREUER:

PROF. DR.-ING. THOMAS SEIFERT
PROF. DR.-ING. HABIL. LUTZ NASDALA

HOCHSCHULE OFFENBURG
FAKULTÄT MASCHINENBAU & VERFAHRENSTECHNIK
SUDIENGANG MASCHINENBAU/WERKSTOFFTECHNIK

Zusammenfassung

Da die Bleche in der automatisierten Umformtechnik stets mit Eigenspannungen und Verformungen angeliefert werden, ist dem eigentlichen Prozess ein Biegewechselrichten vorgestellt. Dadurch sollen vorhandene Eigenspannungen abgebaut und die Bleche gleichbleibende Eigenschaften, unabhängig vom Anlieferungszustand, bekommen.

Ziel dieser Bachelorthesis ist es den Prozess des Biegewechselrichtens mit einem FEM-Programm zu modellieren. Hierzu ist es wichtig, die notwendigen Grundlagen im Bereich der Werkstoffmechanik, des Richtvorgangs, der FE-Methode und dem Umgang mit dem FE-Programm ABAQUS zu verstehen. Damit soll dann ein lauffähiges Modell mit ABAQUS erstellt werden und erste Untersuchungen über den Verlauf der Spannungen und Dehnungen im Werkstoff durchgeführt werden.

Vorwort

Ich möchte als erste meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. Thomas Seifert danken, der mir dieses spannende Thema relativ kurzfristig zur Verfügung stellte und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Außerdem gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Nasdala, der sich bereit erklärt hat die Zweitkorrektur zu übernehmen. Zudem konnte er mir, aufgrund seines weitreichenden Wissens über FEM/ ABAQUS, viele Verbesserungen für das Simulationsmodell näher bringen. Zum Schluss möchte ich noch Steffen, Lina, Katharina und Matthias danken, die mir bei allerlei Fragen und Problemen rund um die Bachelorthesis helfen konnten.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass die vorliegende Bachelor-Thesis mit dem Titel

Finite-Elemente Analyse zum Einfluss der Werkstoffverfestigung auf das Biegewechselrichten von Blechen

von mir selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich oder dem Gedanken nach aus Veröffentlichungen, unveröffentlichten Unterlagen und Gesprächen entnommen worden sind, als solche an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit durch Zitate kenntlich gemacht habe. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Versicherung rechtliche Folgen haben wird.

Mario Fritsch,
Offenburg, 27. Februar 2013

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
b	Aufklingkonstante isotrope Verfestigung	Pa
C	Verfestigungsmodul kinematische Verfestigung	Pa
E	Elastizitätsmodul	Pa
N	Fließrichtung	
Q_∞	Sättigungswert isotrope Verfestigung	Pa
R_e	Streckgrenze	Pa
R_m	Zugfestigkeit	Pa
R_p	Dehngrenze	Pa
$R(\bar{\epsilon}^p)$	Verfestigungsfunktion	Pa
x,y,z	Kartesisches Koordinatensystem	m
α	Rückspannung kinematische Verfestigung	Pa
ϵ	Dehnung	
ϵ^e	elastische Dehnung	
ϵ^p	plastische Dehnung	
$\dot{\epsilon}^p$	plastische Dehnrates	$\frac{1}{s}$
$ \dot{\epsilon}^p $	Betrag der plastischen Dehnrates	$\frac{1}{s}$
$\bar{\dot{\epsilon}}^p$	Plastische Vergleichsdehnrates	$\frac{1}{s}$
$\bar{\epsilon}^p$	akkumulierte plastische Dehnung	
$\bar{\epsilon}_0^p$	Akkumulierte plastische Dehnung beim letzten Vorzeichenwechselder plastischen Dehnrates	
γ	Erholungsparameter kinematische Verfestigung	
ν	Querkontraktionszahl	
σ	Spannung	Pa
σ_{xx}	Spannung in xx -Richtung	Pa
σ_F	Fließspannung	Pa

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Biegewechselrichten	2
1.3	Warum Simulieren?	3
1.3.1	ABAQUS	4
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Elastizität	5
2.2	Pastizität	6
2.2.1	Etwas Begriffserklärung	7
2.2.2	Idealplastisches Verhalten	8
2.2.3	Isotrope Verfestigung	8
2.2.4	Kinematische Verfestigung	9
2.3	FEM	10
2.3.1	ABAQUS-Standard	11
2.3.2	ABAQUS-Explicit	11
2.4	Weitere Begriffe	12
2.4.1	Hertzsche Pressung	12
2.4.2	Reduziert integrierte Elemente/ Hourglassing	12
3	Umsetzung	14
3.1	Annahmen und Vereinfachungen	14
3.2	Abbilden der Geometrie	14
3.3	Erzeugen der Ergebnisse	16
3.4	Elastisches Materialmodell	17
3.4.1	Rollenantrieb	17
3.4.2	Randbedingungen und Antrieb	18
3.4.3	Kontaktbedingungen	18
3.5	Plastische Materialmodelle	20
3.5.1	Kennwerte	21
3.5.2	Netzstudie	21

4	Auswertung	25
4.1	Erwartungen	25
4.2	Einstellen Modellparameter mit idealplastischem Verhalten . .	29
4.2.1	Vergleich ebener Spannungszustand und ebener Dehnungszustand	29
4.2.2	Vergleich <i>Node-To-Surface</i> und <i>Surface-To-Surface</i> . .	31
4.2.3	Vergleich reduziert integrierte und vollintegrierte Elemente	32
4.2.4	Endgültiges Modell	33
4.3	Vergleich Materialmodelle	35
4.3.1	Spannungsverläufe	36
4.3.2	Dehnungsverläufe	38
5	Ausblick	40
6	Zusammenfassung	42
	Literaturverzeichnis	43
	Abbildungsverzeichnis	44
	Tabellenverzeichnis	46

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Viele Prozesse in der Umformtechnik werden mittlerweile automatisiert durchgeführt. Um zu gewährleisten, dass diese stabil sind, muss das eingehende Material möglichst gleichmäßige und gleichbleibende Eigenschaften besitzen. In der Realität ist dies aber selten der Fall, da die benötigten Blechbänder meistens auf Coils (Abb. 1.1) aufgewickelt angeliefert werden.



Abbildung 1.1: Coil [<http://zhutianming.en.busytrade.com>]

Auf Grund dessen besitzt das Blech im Laufe der Abwicklung eine zuneh-

mende Bandkrümmung, was noch den einfachsten Fehler darstellt. Mögliche weitere Fehler ergeben sich, wenn beim Walzvorgang die Walzgeschwindigkeit über die Blechbreite variiert. So ergeben sich Mittel- oder Randwellen, oder es bilden sich Säbelfehler (Krümmung um die Längsachse).

Jeder dieser Fehler führt zu Eigenspannungen im Blech, welche das Ergebnis des Umformprozesses maßgeblich mit beeinflussen. Daher ist es wichtig, dass die Bleche beim Umformprozess möglichst eigenspannungsfrei sind und vor allem die gleichen Eigenschaften besitzen, unabhängig vom Anlieferungszustand. Deshalb werden die Bleche vor dem eigentlichen Umformprozess gerichtet.

1.2 Biegewechselrichten

Eine weit verbreitete Möglichkeit hierfür ist das Biegewechselrichten, oder auch Richtwalzen genannt. Die dafür benutzte Biegewechselmaschine (Abb. 1.2) besitzt einen oberen und unteren Walzstuhl, in dem eine bestimmte Anzahl von Richtwalzen versetzt voneinander gelagert sind.



Abbildung 1.2: 3D-CAD-Modell einer Richtmaschine [<http://www.arku.de/>]

Abhängig von Material und Dicke des Bleches besitzen die Walzen einen fixen horizontalen Abstand (Teilung) sowie einen unterschiedlichen vertikalen

Abstand (Zustellung). Die Zustellung ist hierbei am Anfang am größten, das heißt das Blech wird relativ viel gebogen, und am Ende am geringsten, so dass das Blech hier nur noch relativ wenig gebogen wird. Es gibt verschiedene Arten der Zustellung, die einfachste ist die Blockzustellung, das heißt die Zustellung nimmt linear ab. Diese Art wird auch in dieser Bachelorthesis verwendet.

Somit wird das Blech während es durch die Walzen läuft ständig plastig verformt, wobei der Querschnitt der plastischen Verformung mit jeder Walze abnimmt. Das Ziel ist hierbei auf das Material so viele plastische Verfestigungen aufzubringen, dass die resultierende Spannungsverteilung - unabhängig vom Anlieferungszustand - stets in etwa gleich ist und vorhandene Eigenstressen abgebaut werden.

1.3 Warum Simulieren?

Die Auslegung der Richtmaschinen basiert im Moment auf einfachen analytischen Berechnungen und vor allem aus langjähriger Erfahrungswerte der Hersteller. Außerdem steigen stets die Anforderungen an die zu verarbeitenden Materialien und dadurch auch an die Richtmaschinen.

Da die Versuch & Irrtum Methode daher immer unwirtschaftlicher und teurer wird müssen Alternativen gesucht werden. Eine Möglichkeit besteht daher darin, den ganzen Prozess zu simulieren und damit einen "virtuellen Prototyp" zu erstellen. Mit diesem besteht dann die Möglichkeit die Maschinenparameter zu bestimmen und dadurch Zeit und Material zu sparen. Außerdem lässt sich mit einer Simulation ermitteln, wie sich die für den Umformvorgang relevanten Werkstoffeigenschaften während des Richtvorgangs verhalten.

Um dies alles umzusetzen muss allerdings zuerst mit einem geeigneten Simulationsmodell geklärt werden was mit dem Werkstoff während des Richtens genau passiert, das heißt

- Welche plastische Verformungen treten auf?
- Welche Spannungsverteilung stellt sich ein?

Somit ergibt sich auch das Ziel dieser Bachelorthesis: zuerst muss ein lauffähiges Modell erstellt werden. Hier wird dies mit dem industrienahen FEM-Programm ABAQUS gemacht. Danach können dann erste Betrachtungen zu den oben aufgeführten Fragen durchgeführt werden.

1.3.1 ABAQUS

Für die Umsetzung der Simulation wurde das in der Industrie weit verbreitete FEM-Programm ABAQUS verwendet. Es zeichnet sich durch eine relativ intuitive Handhabung aus und die meisten Parameter und Einstellungen lassen sich bequem in der Benutzeroberfläche eingeben. Außerdem lassen sich mit der Programmiersprache „Python“ Skripte schreiben, die dann in ABAQUS eingelesen werden. So kann zum Beispiel das Modell mittels eines Skriptes automatisch erstellt werden, es müssen nur vorher die gewünschten Parameter eingetragen werden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Elastizität

Die Elastizität, nicht nur bei Metallen, beruht auf der Auslenkung der Atome aus ihrer Gleichgewichtslage [5]. Um sich dies zu veranschaulichen kann man sich die Verbindungen zwischen den Atomen als Federn vorstellen (Abb. 2.1). Wirkt nun eine Kraft auf den Werkstoff, werden die Atome aus der Gleichgewichtslage herausgelenkt und verweilen dort. Wird dann die Kraft wieder weggenommen sorgen die Federn dafür, dass die Atome wieder in ihre Ursprungslage zurückkehren, die elastische Verformung ist daher stets ein reversibler Prozess. Trägt man bei einem elastischen Werkstoff die Spannung σ über die Dehnung ϵ (bei einer einachsigen Belastung) auf so erhält man die *Hookesche Gerade* mit dem Elastizitätsmodul E als Steigung. Es gilt also:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} [6] \quad (2.1)$$

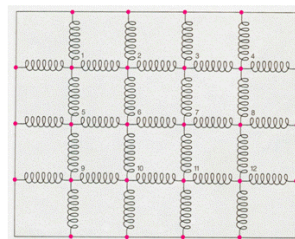


Abbildung 2.1: Modell: Atome untereinander mit Federn verbunden [5]

2.2 Pastizität

In Wahrheit treten natürlich auch plastische Verformungen auf. Das hierbei beim eindimensionalen Zugversuch erzeugte Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist allgemein bekannt (Abb. 2.2). Im vorderen Teil ist die eben beschriebene *Hookesche Gerade* mit dem Elastizitätsmodul als Steigung. Sobald die Spannung die Streckgrenze R_e beziehungsweise die Dehngrenze R_p überschreitet fängt der Werkstoff an sich plastisch zu verformen: er fließt.

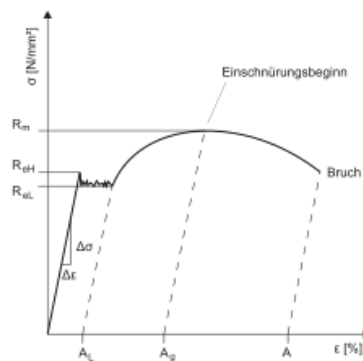


Abbildung 2.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [de.wikipedia.org]

Diese Spannung wird auch Fließspannung σ_F genannt und gilt es zu beschreiben. Stellt man sich nun wieder das vorherige Modell mit den Atomen und Federn vor, so werden die Federn so lange auseinander gezogen bis sie anfangen zu fließen. Somit sind diese plastisch verformt und bewegen sich nicht mehr in ihre Ausgangslage zurück. Dies würde allerdings bedeuten, dass wenn der Körper so weit plastisch verformt würde bis Versagen eintritt, die Spannung nie höher sein kann als die Streck- beziehungsweise Dehngrenze. Da dies aber nicht so ist und der Körper Spannungen bis zur Zugfestigkeit R_m ertragen kann liegt am *Versetzungswandern*. Damit Versetzungen durch den Werkstoff wandern ist normalerweise eine deutlich geringere Belastung nötig als zum Eintreten von plastischen Verformungen. Werden die Versetzungen allerdings behindert, so wird eine höhere Spannung benötigt. Ein Behinderungsgrund für das Wandern für Versetzungen sind andere Versetzungen. Da mit zunehmender plastischer Verformung auch die Anzahl der Verfestigungen zunimmt, verfestigt der Werkstoff.

2.2.1 Etwas Begriffserklärung

Folgende Gleichungen beziehen sich verständnishafter auf den eindimensionalen Fall. In Wahrheit sind Spannungen natürlich dreidimensional und damit Tensoren.

Solange die Fließgrenze noch nicht erreicht ist, ist der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung linear, das heißt jeder Spannung kann eine Dehnung zugeordnet werden. Überschreitet die Spannung allerdings die Fließgrenze so ist es möglich das einer Spannung mehrere Dehnungen zugeordnet werden können oder umgekehrt. Um hier keine Fehler zu erzeugen braucht man Gleichungen, mit denen man an der entsprechenden Kurve praktisch "entlangschreitet". Diese werden *Entwicklungsgleichungen* genannt. Diese erhält man, indem man die plastische Dehnung ϵ^p durch die Integration der plastischen Dehnrate $\dot{\epsilon}^p$ ermittelt:

$$\epsilon^p = \int \dot{\epsilon}^p dt \quad (2.2)$$

Man rechnet hier mit ϵ^p und $\dot{\epsilon}^p$; diese Gleichung ist also eine Differentialgleichung. Wie bereits erwähnt verfestigt der Werkstoff mit zunehmender plastischer Verformung. Allerdings würde bei einer Lastumkehr $\dot{\epsilon}^p$ ein negatives Vorzeichen bekommen und somit ϵ^p auch geringer werden, was bedeutet das der Werkstoff entfestigt. In der Realität zeigt sich allerdings das der Werkstoff immer verfestigt, egal ob eine Druck- oder eine Zugbelastung vorliegt. Man benötigt also eine Größe die unabhängig von der Belastungsrichtung ist. *Hierfür nimmt man den Betrag der plastischen Dehnrate $|\dot{\epsilon}^p|$, welcher als plastische Vergleichsdehnrate $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ bezeichnet wird [1].* Um die gesammte plastische Dehnung, die der Werkstoff gesehen hat, zu erhalten, muss man diesen Wert integrieren: man erhält die plastische Vergleichsdehnung oder auch akkumulierte plastische Dehnung $\bar{\epsilon}^p$:

$$\int |\dot{\epsilon}^p| dt = \int \dot{\bar{\epsilon}}^p dt = \bar{\epsilon}^p \quad (2.3)$$

Da die Fließspannung mit der Verfestigung zunimmt, folgt daraus, dass die Fließspannung abhängig ist von der akkumulierten plastischen Dehnung:

$$\sigma_F = \sigma_F(\bar{\epsilon}^p) \quad (2.4)$$

Als letzte Größe wird noch die Fließrichtung N betrachtet. Diese ist Bestandteil der plastischen Dehnrate und kann nur den Wert +1 oder -1 annehmen. Sie gibt an in welche Richtung(Zug/Druck) der Werkstoff fließt.

2.2.2 Idealplastisches Verhalten

Beim idealplastischen Materialverhalten wird angenommen, dass sobald die Spannung die Streckgrenze erreicht keinerlei Verfestigung mehr auftritt (Abb. 2.3). Kann der Werkstoff sich vorher elastisch verformen spricht man von elastisch-idealplastisch, ansonsten starr-idealplastisch. *In der Realität gibt es keinen idealplastischen Werkstoff* [4], allerdings werden sie in der Umformtechnik oft verwendet, da sie relativ einfache analytische Lösungen zulassen. Beim idealplastischen Materialverhalten gilt für die Fließspannung stets:

$$\sigma_F = N \cdot R_p \quad (2.5)$$

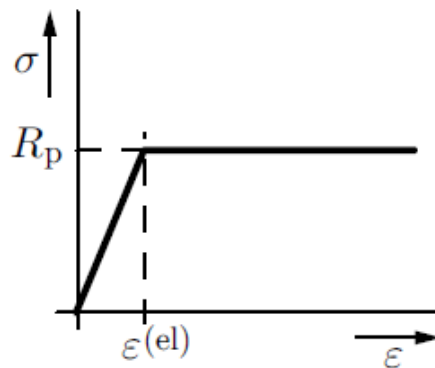


Abbildung 2.3: Spannungs-Dehnungskurve elastisch-idealplastisch [4]

2.2.3 Isotrope Verfestigung

Wird bei einem Versuch zuerst einachsiger Zug und dann Druck ausgeübt, so ergibt sich bei einem isotrop verfestigenden Werkstoff ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm entsprechend Abbildung 2.4 [4]. Hierbei entspricht σ_{F1} der maximal im Zug aufgebrachten Spannung; daraus ergibt sich die betragsmäßig gleich große Spannung $-\sigma_{F1}$, bei der die Probe im Druckbereich plastifiziert. Daher beschreibt die isotrope Verfestigung eine Aufweitung des linear-elastischen Bereichs.

Die exponentielle isotrope Verfestigungsfunktion beträgt (ohne Herleitung):

$$R(\bar{\epsilon}^p) = Q_\infty \cdot (1 - e^{-b\bar{\epsilon}^p}) [5] \quad (2.6)$$

Hierbei ist Q_∞ der Sättigungswert der Exponentialfunktion und b kontrolliert, wie schnell der Sättigungswert erreicht wird. Mit Hilfe der Verfestigungsfunktion lässt sich nun die Fließspannung berechnen:

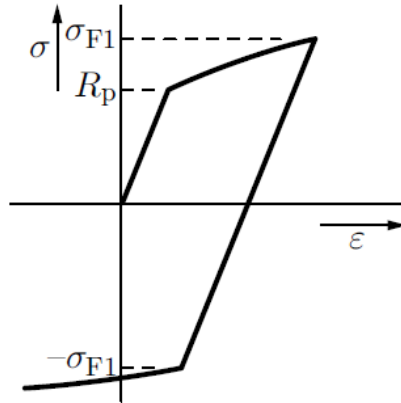


Abbildung 2.4: Spannungs-Dehnungskurve isotrope Verfestigung [4]

$$\sigma_F = N \cdot (R_e + R(\bar{\epsilon}^p)) [5] \quad (2.7)$$

Die Fließrichtung N gibt hier auch wieder an, ob eine Zug- oder Druckbelastung vorliegt.

2.2.4 Kinematische Verfestigung

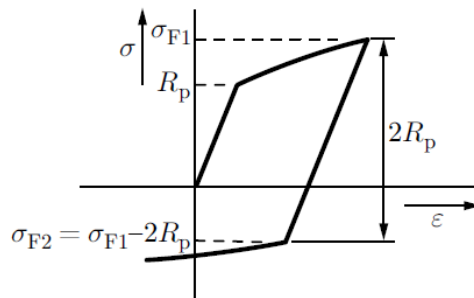


Abbildung 2.5: Spannungs-Dehnungskurve kinematische Verfestigung [4]

Werkstoffe neigen in Allgemeinen dazu bei Lastumkehr schon deutlich früher zu fließen als beim isotropen Werkstoffverhalten. Wird wie vorher wieder ein Zug-Druck-Versuch durchgeführt, so plastifiziert die Probe schon bei $\sigma_{F2} = \sigma_{F1} - 2R_p$ (Abb. 2.5), da die Größe der Fließfläche unverändert bleibt [4]. Dieser Effekt der Dehngrenzenverringerung wird *Bauschinger-Effekt* genannt.

Somit beschreibt die kinematische Verfestigung eine Verschiebung des linear-elastischen Bereichs.

Bei der kinematischen Verfestigung fließt die Rückspannung in die Fließbedingungen mit ein. Diese beträgt nach dem *Armstrong-Frederik Modell* (wieder ohne Herleitung):

$$\text{monoton} : \alpha = \frac{C}{\gamma} \cdot (1 - e^{-\gamma \bar{\epsilon}^p}) [5] \quad (2.8)$$

$$\text{zyklisch} : N \cdot \frac{C}{\gamma} \cdot (1 - e^{-\gamma(\bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}_0^p)}) + \alpha(\bar{\epsilon}_0^p) \cdot e^{-\gamma(\bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}_0^p)} [5] \quad (2.9)$$

Hierbei ist C der Verfestigungsmodul und γ der Parameter für die Erholung. Die Größen mit dem tiefgestellten Index 0 haben den Wert, den sie beim letzten Vorzeichenwechsel der plastischen Dehnung hatten. Die Lastumkehr geht diesmal direkt in die Rückspannung mit ein und muss für die Fließbedingung nicht extra eingesetzt werden. Die Fließbedingung ergibt sich aus:

$$\sigma_F = |\sigma - \alpha| - R_e [5] \quad (2.10)$$

Es ist möglich, um beliebige Spannungs-Dehnungshysteresen miteinander zu verrechnen, die Rückspannung aus verschiedenen Rückspannungsanteilen zu berechnen:

$$\alpha = \sum_i \alpha_i [5] \quad (2.11)$$

2.3 FEM

Die Grundlagen, wie Knoten, Elemente und Netz, wurden schon im Studium behandelt und sollten daher klar sein. Ein FEM-Programm versucht immer die Knotenverschiebungen u zu bestimmen, die aus äußeren Belastungen resultieren. Es gilt ganz allgemein folgende Gleichgewichtsbedingung:

$$F_{int}(\sigma(\epsilon(u))) - F_{ext} = 0 [5] \quad (2.12)$$

F_{ext} ist hierbei die Belastung die Außen auf das Bauteil wirkt und F_{int} sind die inneren Kräfte, die durch die Spannungen im Bauteil bestimmt sind. Ein FEM-Programm versucht also stets die Gleichung 2.12 zu lösen und damit dann alle Knotenverschiebungen zu erhalten. Handelt es sich um ein lineares Problem, können die Gleichungen der einzelnen Knoten leicht und schnell berechnet werden, es handelt sich praktisch um eine Gleichung mit einer Unbekannten. Sobald man in den plastischen Bereich kommt funktioniert

dies aber nicht mehr: es besteht ein nichtlineares Problem. Dies kann man sich als Gleichung mit mehreren Unbekannte vorstellen, dass heißt das FE-Programm ist nicht mehr in der Lage diese so einfach zu lösen. Um trotzdem zu einer Lösung zu kommen, kann die Gleichung iterativ, dass heißt in mehreren Schritten, gelöst werden. So wird zum Beispiel das nichtlineare Problem in mehrere lineare Zeitschritte unterteilt. So kann über die Lösungen der Teilschritte die Lösung des nichtlinearen Problems angenähert werden. Logischerweise braucht es daher viel länger ein nichtlineares Problem zu berechnen.

2.3.1 ABAQUS-Standard

In ABAQUS gibt es zwei verschiedenen Solver: ABAQUS-Standard und ABAQUS-Explicit. Zuerst wird hier kurz auf ABAQUS-Standard eingegangen.

Dieser ist durch eine implizite Zeitintegration gekennzeichnet. Hierbei wird oft die *Euler-Rückwärts-Methode* angewendet. Dieser erfordert einen hohen rechnerischen Aufwand, da die Ableitung zum noch unbekanntem nächsten Zeitpunkt bestimmt wird: die Größen werden implizit bei der Lösung bestimmt. Der Vorteil hierbei ist, dass beliebig große Zeitschritte berechnet werden können, ohne dass es zu Instabilitäten kommt. Da jedoch für kleinere Zeitinkremente die Genauigkeit zunimmt, durch kleinere Zeitinkremente aber wieder mehr Zeitinkremente berechnet werden müssen, erhöht sich die Rechenzeit auf diese Art relativ schnell, wenn man hinreichend genaue Ergebnisse erzeugen will [5].

2.3.2 ABAQUS-Explicit

Der explizite Solver zeichnet sich dadurch aus, dass die Werte zum vorherigen Zeitschritt bekannt sind und diese können dann in die vorhandenen Formeln eingesetzt werden und so ergeben sich die Werte für den nächsten Zeitschritt relativ leicht. Ein hierzu benutztes Verfahren ist die *Euler-Vorwärts-Methode* [3]. Damit die Integration stabil läuft, ist darauf zu achten, dass das Zeitinkrement klein bleibt, da sonst die Gefahr besteht dass die zu untersuchende Größe ins Unendliche abdriftet. Die Dauer der Rechnung hängt hierbei nicht von der Elementanzahl, sondern von der Größe des kleinsten Elements ab: je kleiner dieses ist, desto geringer ist auch der Zeitschritt. Allerdings ist die Rechenzeit im Allgemeinen deutlich kleiner als beim impliziten Verfahren. Es hat sich bewährt die explizite Integration bei nichtlinearen Problemen zu verwenden, bei denen Kontakt und Reibung eine Rolle spielt.

2.4 Weitere Begriffe

2.4.1 Hertzsche Pressung

Unter der Hertzschen Pressung (nach Heinrich Hertz) versteht man die größte Spannung, die in der Mitte der Berührungsfläche zweier elastischer Körper herrscht [7]. Im idealisierten Fall berühren sich zwei elastische Körper mit gewölbten Oberflächen nur punktförmig, wenn sie aneinander gepresst werden. Allerdings entsteht, aufgrund der Elastizität der beiden Körper, eine Berührungsfläche, an der eine Flächenspannung vorliegt, mit dem höchsten Wert in der Mitte (Abb. 2.6). Dieser Wert wird auch *Hertzsche Pressung* genannt.

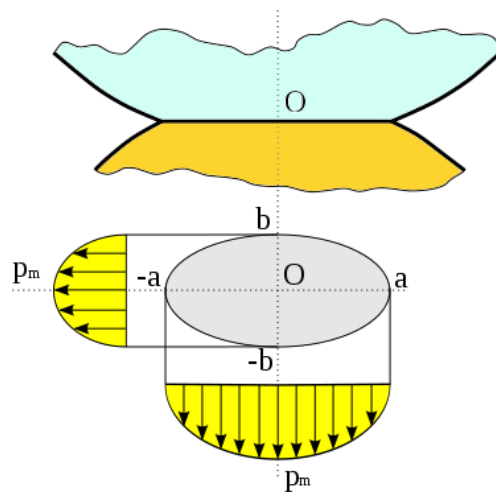


Abbildung 2.6: Spannungsverteilung Pressung [7]

2.4.2 Reduziert integrierte Elemente/ Hourglassing

Bei der Verwendung von reduziert integrierten Elementen werden weniger Integrationspunkte benutzt. Hierdurch wird die Rechnung schneller, allerdings besteht die Gefahr des *Hourglassing*. Die Bezeichnung führt daher, dass sich ein regelmäßiges Muster bildet, das bei linearen, reduziert integrierten Elementen wie eine Aneinanderreihung von Sanduhren (*Hourglasses*) aussieht [2] (Abb. 2.7).

Hourglassing kann entstehen, wenn eine Unterintegration, das heißt in jeder Raumrichtung fehlt ein Integrationspunkt, herrscht. Hierbei kann das Element nicht feststellen ob es verzerrt ist, da an den Integrationspunkten die Dehnung 0 ist (Abb. 2.8).

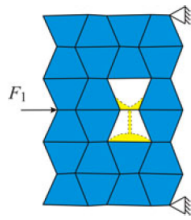


Abbildung 2.7: Hourglassing komplettes Modell [2]

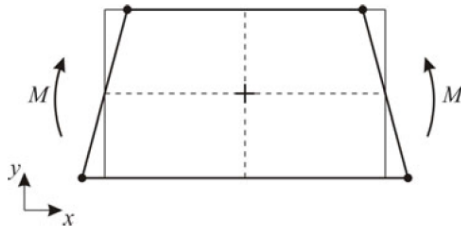


Abbildung 2.8: Hourglassing an einem Element [2]

Um *Hourglassing* zu vermeiden können vollintegrierte Elemente verwendet werden, oder die Elementgröße wird verkleinert. Allgemein gilt: *Bei hinreichend feinen Netzen tritt kein Hourglassing auf* [2].

Kapitel 3

Umsetzung

Das Modell wird in dieser Arbeit mit ABAQUS-Standard umgesetzt, da dies am Anfang einfacher ist und somit schneller ein lauffähiges Modell erstellt werden kann.

3.1 Annahmen und Vereinfachungen

Um ein Modell zu erhalten, welches zügig erste Ergebnisse liefert und mit den grundlegenden Betrachtungen möglich sind, müssen Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden. Das Modell kann dann zu einem späteren Zeitpunkt, falls notwendig, an die Realität angepasst werden.

Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen sind:

- Zweidimensionales Modell (Keine „Tiefenrichtung“)
- Die Richtwalzen sind starr, es kann sich nur das Blech verformen
- Alles reibungsfrei
- Da das Blech langsam durch die Walzen geschoben wird gibt es keine thermischen Einflüsse
- Blech wird gerade eingeführt um die Ergebnisse besser zu verstehen

3.2 Abbilden der Geometrie

Da zwischen den Richtwalzen und dem Blech keine Reibung vorliegt müssen sich die Richtwalzen nicht drehen. Somit reicht es diese nur zur Hälfte zu modellieren. Die Teilung bezeichnet den horizontalen Abstand zweier Walzenmittelpunkte und die Zustellung das Doppelte des vertikalen Abstandes der

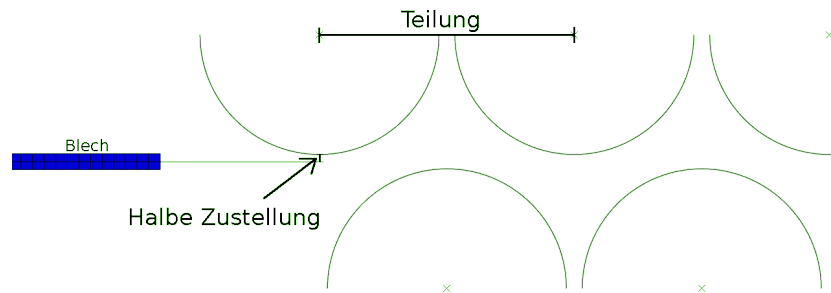


Abbildung 3.1: Teilung und Zustellung

Walze zum unausgelenkten Mittelpunkt des Bleches. Die Zustellung nimmt, wie oben schon geschrieben, linear von Walze zu Walze ab, das heißt am Anfang wird das Blech stark beansprucht und am Schluss noch relativ wenig. In Abbildung 3.1 sind Teilung und Zustellung grafisch dargestellt.

Die relevanten Angaben für das Modell werden durch die Anlagen in der Industrie vorgegeben und sind folgendermaßen definiert:

- Walzendurchmesser: 30 mm
- Teilung: 32 mm
- Walzenzahl: 21
- Blechstärke: 2 mm

Folgende Werte wurden selbst bestimmt und können im Rahmen einer Parameterstudie variiert werden:

- Maximale Zustellung: 1,8 mm
- Minimale Zustellung: 1,98 mm
- Blechlänge: 120 mm

Das komplette Modell ist in Abbildung 3.2 zu sehen.



Abbildung 3.2: Gesamtübersicht Modell

3.3 Erzeugen der Ergebnisse

Um möglichst genaue und vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, werden die Ergebnisse entlang eines Pfades über die Blechdicke ausgelesen. Dieser ist stets in der Mitte des Bleches um unerwünschte Randeffekte möglichst auszuschließen. Außerdem sind die Ausgabedaten von ABAQUS so konfiguriert, dass die Ergebnisse an jeder Walze herausgeschrieben werden, das heißt wenn der Pfad in der Mitte an der jeweiligen Walze ist schreibt ABAQUS die gewünschten Daten heraus. In Abbildung 3.3 ist dieser Zeitpunkt an einer beliebigen Rollen zu sehen..

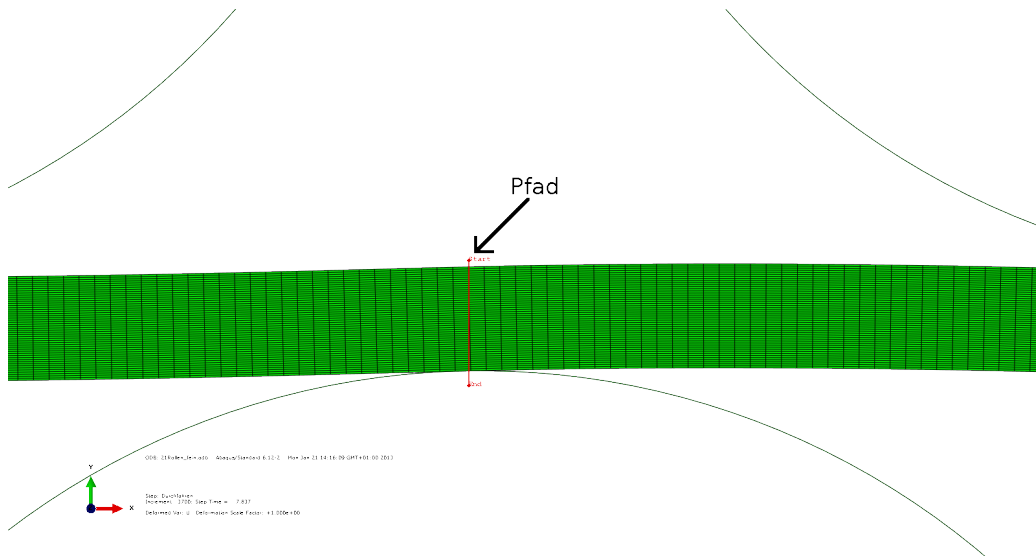


Abbildung 3.3: Pfad zum Auslesen der Ergebnisse

Da die Walzen abwechseln oben und unten sind, würden, bei nur einem Pfad, die Ergebnisse der einzelnen Walzen anscheinend immer wieder gespiegelt werden, das heißt in den Diagrammen wäre die Seite des Bleches in Kontakt mit der Walze abwechseln auf der linken und der rechten Seite. Um dies zu verhindern werden zwei Pfade definiert - der Eine von oben nach unten und

der Andere von unten nach oben - so dass in den Diagrammen die Seite des Bleches in Kontakt mit der Walze stets links und die der Walze gegenüberliegenden Seite stets rechts ist.

3.4 Elastisches Materialmodell

Bevor Untersuchungen am Modell mit den plastischen Materialmodellen durchgeführt werden können, muss erst einmal ein lauffähiges Modell erstellt werden. So müssen unter anderem die Randbedingungen korrekt gesetzt und das Blech durch die Walzen bewegt werden. Hierbei ist auch darauf zu achten, dass es später das Ziel ist auch ein krummes Blech in die Walzen hineinlaufen zu lassen und so die Randbedingungen dementsprechend zu wählen sind. Dieses Vorgehen wird mit einem rein elastischem Materialmodell durchgeführt, da hier die Rechnungen schnell gehen und so in relativ kurzer Zeit ein lauffähiges Modell erstellt wird. Die elastischen Kennwerte sind hierbei:

- E-Modul: $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
- Querkontraktionszahl: $\nu = 0,3$

Diese sind der Bachelorthesis von Marc Bühler [1] entnommen.

3.4.1 Rollen Antrieb

Ein Versuch die Randbedingungen korrekt abzubilden besteht darin das Blech, wie in Abbildung 3.4 zu sehen, zuerst durch einen Rollen antrieb laufen zu lassen. Die Rollen links und rechts dienen hierbei der Fixierung des Blechs in y-Richtung (nach oben und unten) und die mittleren Rollen sollen das Blech antreiben. Hierzu fahren diese Rollen zusammen bis Kontakt zwischen den Rollen und dem Blech besteht und fangen sich dann an zu drehen, so dass das Blech sich in x-Richtung bewegt. Der Vorteil an diesem Modell ist, dass man hier ohne Probleme ein krummes Blech eingeben kann, da dieses automatisch zwischen den vier Halterollen hindurchläuft. Außerdem kann das Blech nicht mehr in y-Richtung verrutschen und der Antrieb ist auch zufriedenstellend gelöst.

Die Nachteile bei dem Modell sind die Kontaktbedingungen korrekt zu modellieren; so muss das Blech immer zwischen den Halterollen sein und darf sich nicht in diese hinein bewegen. Zudem geht bei den Antriebsrollen der Kontakt verloren, sobald sich diese anfangen zu drehen. Da sich diese Probleme nicht so leicht lösen ließen wurde dieses Modell nicht weiter benutzt.

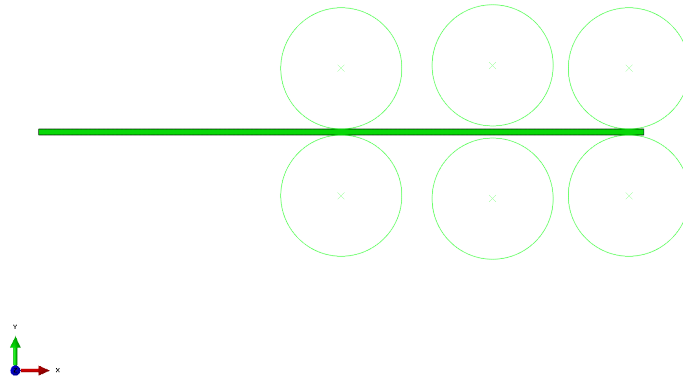


Abbildung 3.4: Rollen Antrieb

3.4.2 Randbedingungen und Antrieb

In Abbildung 3.5 sind die Randbedingungen so modelliert, wie sie im weiteren Verlauf dieser Thesis auch benutzt werden: das Blech ist vorne in x-Richtung fixiert, kann also nicht von den Walzen weggeschoben werden. Die Walzen hingegen bewegen sich über das Blech und sind in der Bewegung in y-Richtung und Rotation um die z-Achse fixiert. Die zwei Federn, welche vorne oben und unten am Blech sind, stabilisieren das Blech in y-Richtung, damit dieses sich nicht unkontrolliert nach oben oder unten bewegt wenn das Blech auf die Walzen trifft. Für ABAQUS macht es keinen Unterschied ob sich das Blech nach rechts oder die Walzen nach links bewegen, allerdings ist die umgesetzte Methode einfacher in der Auswertung, da das Blech sich im Programm immer an der gleichen Stelle befindet und sich somit die Koordinaten nicht ändern.

Da das Blech nur vorne fixiert ist kann im späteren Verlauf auch ein krummes Blech eingegeben werden. Daher wurde davon abgesehen auch hinten oder über die Länge des Bleches Randbedingungen aufzugeben.

3.4.3 Kontaktbedingungen

Damit das Blech nicht in die Walzen hinein läuft müssen Kontaktbedingungen definiert werden. Hierzu muss für jedes Kontaktpaar Walze-Blech eine *Master Surface* und eine *Slave Surface* zugeordnet werden; in Abbildung 3.6

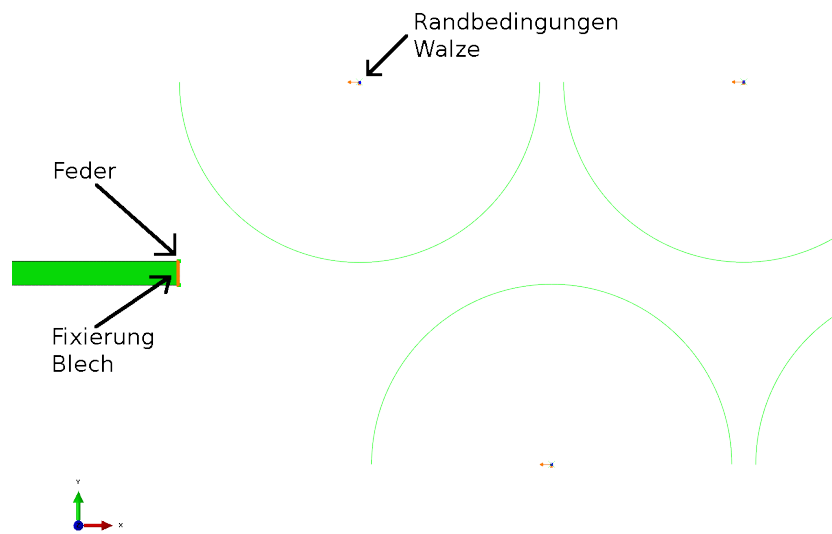


Abbildung 3.5: Randbedingungen Modell

ist das für die erste Walze zu sehen. Die *Master Surface* ist die Oberfläche der jeweiligen Walze und die *Slave Surface* die obere, linke und rechte Kante des Bleches (Für die unteren Walzen wird entsprechend die untere, linke und rechte Kante des Bleches gewählt).

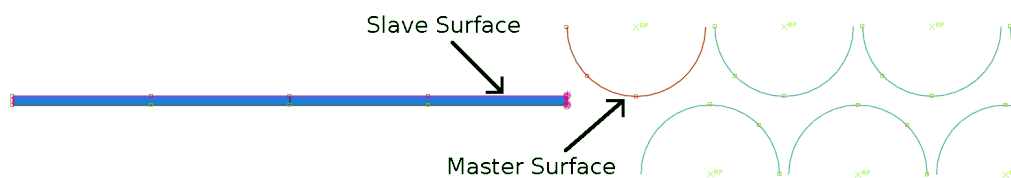


Abbildung 3.6: *Master Surface* (rot) und *Slave Surface* (violett)

Es gibt zwei Arten von Kontaktbedingungen: *Node-To-Surface* und *Surface-To-Surface*. Bei ersterem ist es den Knoten der *Slave Surface* verboten in die *Master Surface* einzudringen und bei *Surface-To-Surface* ist es einer Fläche - die ABAQUS automatisch selbst festlegt - in Umgebung eines Knotens verboten die *Master Surface* zu durchdringen. Daher ist der *Surface-To-Surface* Kontakt im Allgemeinen genauer als der *Node-To-Surface* Kontakt, allerdings ist der Rechenaufwand hier auch größer.

Aufgrund dieser Definitionen ist es den beiden Flächen möglich sich zu überlagern, wie auch in Abbildung 3.7 zu sehen. Die Walze ist hierbei der weiße Bereich über der runden Linie. Aufgrund dieser Eigenschaften ist es daher wichtig, dass die Elemente möglichst klein sind, da somit auch die Überlappungsfläche zwischen Blech und Walze minimiert wird.

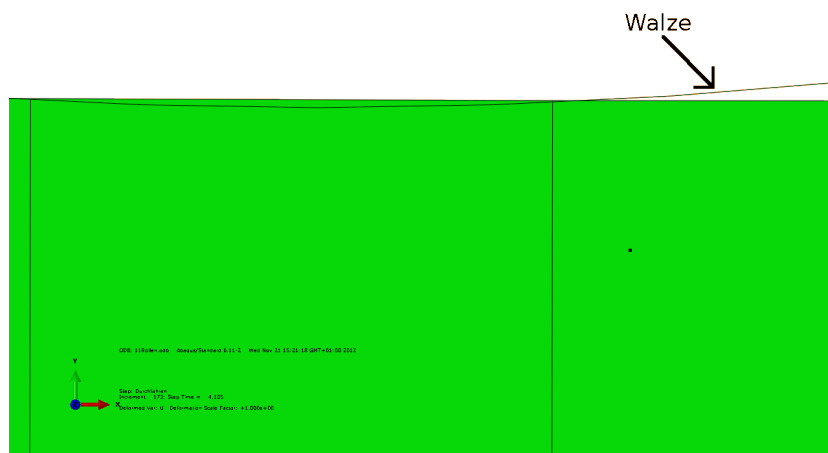


Abbildung 3.7: Kontakt zwischen Blech und Walze

3.5 Plastische Materialmodelle

Da jetzt das Grundmodell erstellt ist, kann nun auf das Plastische Materialverhalten umgestellt werden. In dieser Thesis werden folgende drei Plastizitätsmodelle untersucht:

1. Ideal Plastisch
2. Isotrope Verfestigung
3. Kinematische Verfestigung

Es ist anzumerken, dass dem Werkstoff bei dem ideal plastischen Materialverhalten eine minimale Verfestigung (Tabelle 3.1) zugesprochen wird, da sonst die Gefahr besteht, dass die Rechnung in ABAQUS nicht stabil läuft.

Tabelle 3.1: Materialdaten ideal plastisches Materialverhalten

ϵ in %	R_e in MPa
0	180
0,2	190
10	200

3.5.1 Kennwerte

Die zu den plastischen Modellen dazugehörigen Werkstoffkennwerte R_p , Q_∞ , b , C und γ müssen aus Versuchsdaten erstellt werden. Hierzu müssen diese Parameter der Verfestigungsmodelle so angepasst werden, dass sie mit den dazugehörigen Versuchsdaten übereinstimmen. Um die Ergebnisse der isotropen und kinematischen Verfestigung zu vergleichen muss $Q_\infty = \frac{C}{\gamma}$ und $b = \gamma$ gelten. Die Streckgrenze R_e wird dem entsprechenden Werkstoffdatenblatt entnommen. Das genaue Vorgehen kann in [1] nachgelesen werden, die entsprechenden Werte sind:

- $R_e = 180$ MPa
- $R_p = 180$ MPa
- $Q_\infty = \frac{C}{\gamma} = 150$ MPa
- $C = 64500$ MPa
- $b = \gamma = 430$ (MPa)

3.5.2 Netzstudie

Die Ergebnisse und die Rechenzeit eines FEM-Modells hängen maßgeblich davon ab wie das Modell vernetzt wurde. Da bei einem feineren Netz die zu lösenden Gleichungen zunehmen, nimmt auch die Genauigkeit der Ergebnisse zu, allerdings erhöht sich logischerweise dadurch die Rechenzeit. Um ein möglichst wirtschaftliches Modell zu erhalten müssen beide Aspekte betrachtet werden. Hierzu empfiehlt es sich im Allgemeinen ein globales grobes Netz zu verwenden und die kritischen Stellen, wie zum Beispiel Kerben oder Radien, lokal fein zu vernetzen. Da es in diesem Modell keine solchen kritischen Stellen gibt, wird nur der zu untersuchende Bereich fein vernetzt und das restliche Modell relativ grob. Dieser Bereich wurde in der Mitte des Bleches gewählt, da hier unerwünschte Randeefekte möglichst klein beziehungsweise nicht vorhanden sind.

Wie in den Abbildungen 3.8 und 3.9 zu sehen ist, ist die Netzfeinheit bei dem verbesserten Netz in der Mitte groß und wird dann nach außen hin immer größer. So soll verhindert werden, dass die Ergebnisse zu ungenau werden. In beiden Abbildungen ist rechts jeweils ungefähr die Mitte des Bleches zu sehen, da das Netz symmetrisch ist und somit auf beiden Seiten gleich aussieht.

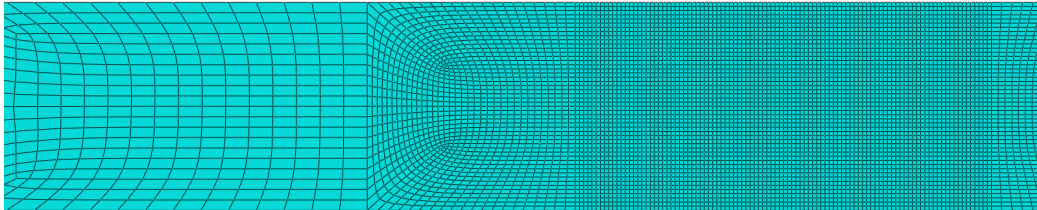


Abbildung 3.8: Nahansicht Verbessertes Netz



Abbildung 3.9: Verbessertes Netz

Um die Ergebnisse des so verbesserten Netzes vergleichen zu können muss auch ein feines Netz erstellt werden, dass zwar einmalig lang rechnet, dafür aber ein genaues Ergebnis liefert. Ein solches Netz ist in Abbildung 3.10 dargestellt, wobei das Bild stark vergrößert ist damit die Elemente sichtbar sind. Sowohl bei dem feinen Netz als auch bei dem feinen Teil des verbesserten Netzes sind über die Dicke 50 Elemente modelliert.

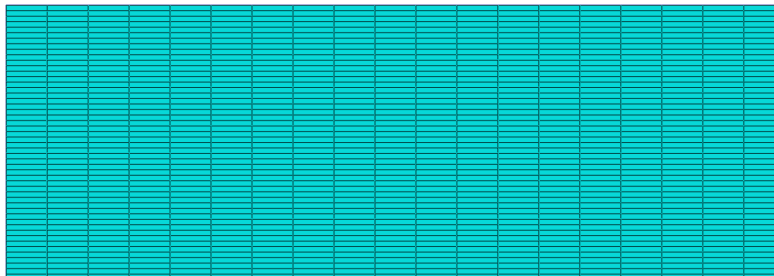


Abbildung 3.10: Nahansicht feines Netz

Um die beiden Netze zu vergleichen wird die Spannung in x-Richtung (σ_{11}) über die Blechdicke aufgetragen. Sieht man sich das entsprechende Diagramm an, so fällt auf, dass bei der sechsten Walze die Kurven fast identisch sind (Abb. 3.11). Beim verbesserten Netz steigt die Spannung allerdings, im Gegensatz zum feinen Netz, an der Walze nochmal deutlich an. Da hier die Walze auf das Blech drückt, könnte dies an der *Hertschen Pressung* liegen, erklärt aber dann nicht warum die Spannung beim feinen Netz stabil bleibt.

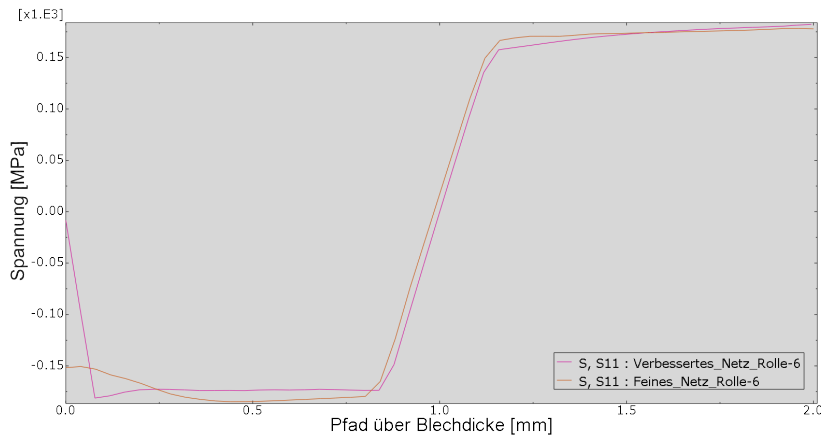


Abbildung 3.11: Vergleich Netz an Walze 6

Als nächstes werden die Kurven der beiden Netze an der letzten Walze verglichen (Abb. 3.12). Hier fällt sofort auf, dass die Ergebnisse nicht mehr identisch sind sondern einige Unterschiede zeigen; genau wie bei der sechsten Walze ist die Spannung direkt an der Walze beim verbesserten Netz wieder deutlich höher als beim feinen Netz. Außerdem zeigen beide Kurven zwar ein gezacktes Muster, allerdings ist dieses nicht identisch, bewegt sich aber bei beiden um $\sigma_{11} = 0$ MPa.

Das Ergebnis des verbesserten Netzes ist sicherlich nicht ideal, aber in Hinblick auf die für diese Bachelorthesis vorhandene Zeit wird das verbesserte Netz für die weiteren Untersuchungen verwendet. Mit Blick über diese Bachelorthesis hinaus muss das Netz natürlich noch weiter verbessert werden und somit an die Ergebnisse des feinen Netzes angenähert werden.

Die Walzen müssen nicht vernetzt werden, da sie als starrer Körper modelliert wurden und somit keine Verformungen und Spannungen sehen.

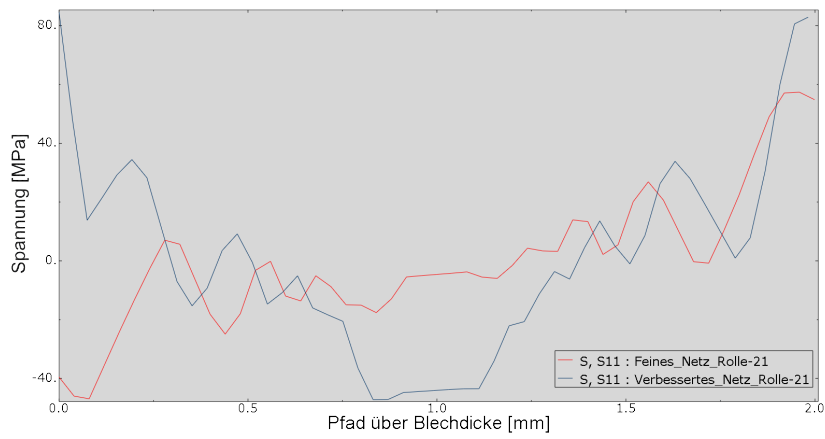


Abbildung 3.12: Vergleich Netz an Walze 21

Kapitel 4

Auswertung

In den kommenden Diagrammen und Betrachtungen werden stets die Spannungen und Dehnungen in x-Richtung, das heißt in Richtung des Bleches untersucht. Die anderen Spannungen sind entweder sehr klein oder für die hier zu untersuchenden Ergebnisse nicht relevant. Es ist auch anzumerken, dass wie oben beschrieben immer ein gerades Blech durch die Walzen geschoben. Dieses ist im Gegensatz zur Realität eigenspannungsfrei.

4.1 Erwartungen

Bevor die Ergebnisse ausgewertet werden, muss klar sein, was eigentlich erwartet wird. Hierzu wird in diesem Kapitel kurz aufgeführt, was rein qualitativ passieren sollte. Als erstes wird hierzu das Blech betrachtet, wenn es durch die Walzen läuft (Abb. 4.1). Hier sieht man deutlich die Zugbereiche (rot) gegenüber den Walzen und die Druckbereiche (blau) an den Walzen.

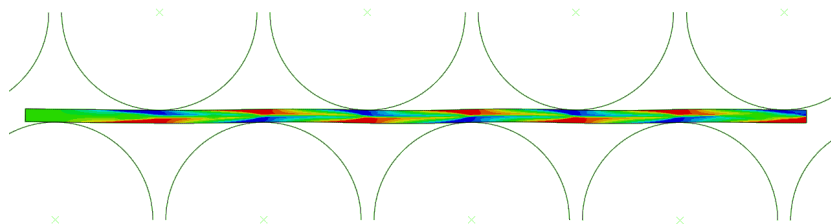


Abbildung 4.1: Spannungen in x-Richtung beim belasteten Blech

Schaut man sich nun an was an den Walzen passiert, so erkennt man, dass das Blech das erste Mal richtig an der zweiten Walze gebogen wird. Ist die

Biegung so gering, dass nur elastische Verformungen vorhanden sind (Spannungen immer unter der Streckgrenze R_e), so würde sich eine Spannungsverteilung wie in Abbildung 4.2 ergeben.

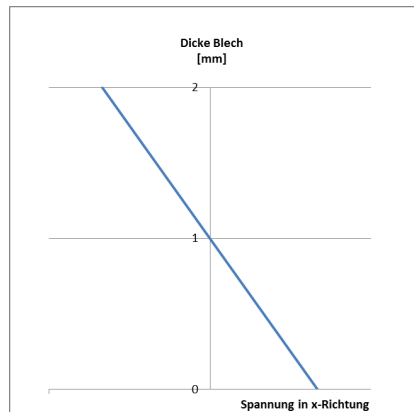


Abbildung 4.2: Spannungsverteilung bei elastischer Verformung

Da die Spannungen aber so groß sind, dass die Streckgrenze überschritten wird, wird das Blech am Rand plastisch verformt, wobei die Zone der plastischen Verformung von der Höhe der Spannung abhängt. Eine solche Spannungsverteilung ist in Abbildung 4.3 abgebildet.

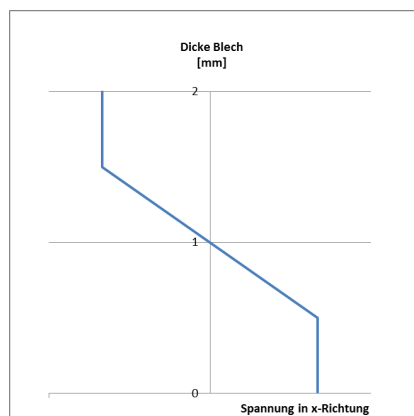


Abbildung 4.3: Spannungsverteilung bei elastischer und plastischer Verformung

Als nächster Schritt wird angenommen, dass das Blech ausgebaut wird, dass heißt es ist frei von allen Belastungen. Da sich hierbei die elastischen Dehnungen wieder zurückbilden, würde sich das Blech in Richtung seiner Ausgangslage bewegen, allerdings nicht komplett, da noch plastische Verformungen vorhanden sind. Dadurch werden die durch Zugbeanspruchung plastisch

verformten Stellen zusammengedrückt und die Stellen, welche durch einen Druck plastisch verformt wurden werden auseinandergezogen (Abb. 4.4). Da sich das Blech nicht komplett zurückbewegt bleiben relativ kleine Bereiche zurück, an denen noch Zug- beziehungsweise Druckspannungen vorliegen. Dies sind die zwei “Zacken” in Abbildung 4.4.

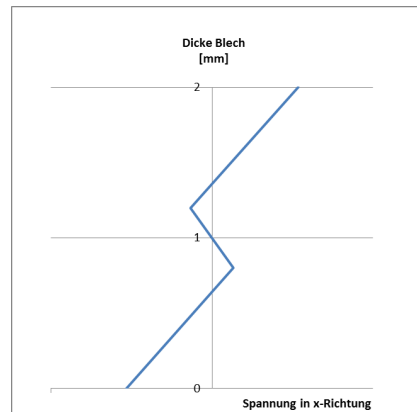


Abbildung 4.4: Spannungsverteilung bei weggenommener Belastung

In Realität wird das Blech natürlich nicht nach der Walze ausgebaut, sondern erfährt an der nächsten Walze wieder eine Biegung. Diesmal allerdings in die andere Richtung. Hier nimmt der plastische Anteil im Gegensatz zur Walze zuvor ab, da die Zustellung abnimmt und dadurch die Biegung geringer ausfällt. In Abbildung 4.5 ist die reine Spannung zu sehen, die das Blech sieht, wenn es ohne Spannungen dort hindurchlaufen würde.

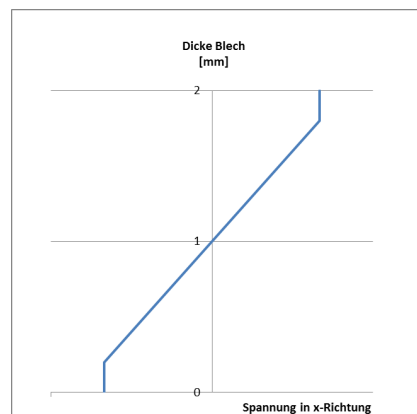


Abbildung 4.5: Spannungsverteilung bei elastischer und plastischer Verformung

In Wahrheit hat es natürlich die oben aufgeführte Spannungsverteilung. Um die Spannungsverteilung an dieser Walze zu erhalten müssen also die Spannungsverteilungen aus den Abbildungen 4.4 und 4.5 überlagert werden. Es ergibt sich somit die Spannungsverteilung in Abbildung 4.6. Sobald bei der Addition die Streckgrenze überschritten wird plastifiziert der Werkstoff wieder.

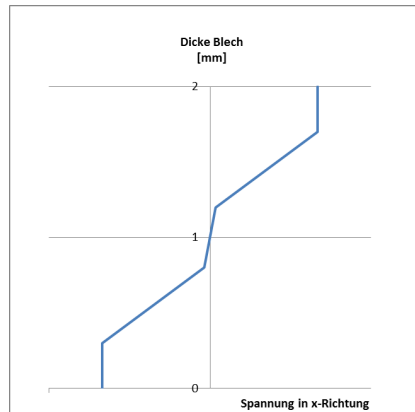


Abbildung 4.6: Spannungsverteilung bei überlagerter Belastung

Jetzt wird wieder die Spannungsverteilung betrachtet, wenn alle Belastungen vom Blech entfernt wären. Außen entstehen wieder durch die vorhandenen plastischen Verformungen Zug- und Druckbereiche und im Innern des Blech kommen zwei “Zacken” hinzu deren Maximalwerte sich außerdem verringern (Abb. 4.7).

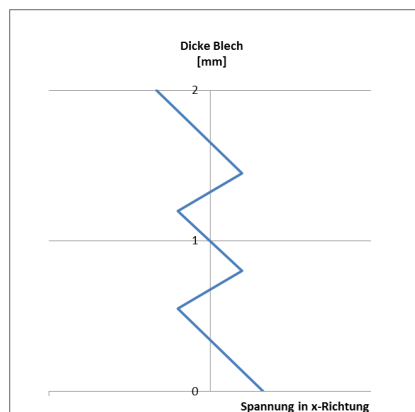


Abbildung 4.7: Spannungsverteilung bei weggenommener Belastung

Wiederholt man dass nun mit mehreren Walzen so wird der plastische Bereich immer geringer. Außerdem nimmt die Anzahl der “Zacken” immer zu und

deren Maximalwerte ab. So werden die Eigenspannungen zwar nicht komplett abgebaut, allerdings auf ein Minimum reduziert.

4.2 Einstellen Modellparameter mit idealplastischem Verhalten

Zuerst sollte der gerade erklärte Effekt korrekt modelliert werden. Hierzu werden im folgenden drei verschiedene Parameter untersucht und dann die beste Kombination ausgewählt zum weiteren bearbeiten. Es wird im folgenden immer die Spannungen und Dehnungen an der letzten (21.) Walze betrachtet. In den einzelnen Untersuchungen werden immer die gleichen Einstellungen genommen, mit Ausnahmen des Parameters, der gerade untersucht wird.

4.2.1 Vergleich ebener Spannungszustand und ebener Dehnungszustand

Hier wird untersucht ob für das Modell ein ebener Spannungszustand (ESZ) oder ein ebener Dehnungszustand (EVZ) verwendet wird. Beim ESZ wird angenommen, dass es in eine Raumrichtung (fast) keine Spannung gibt und beim EVZ gibt es in eine Raumrichtung (fast) keine Dehnung. In ABAQUS wird dies geändert in dem man den Elementen bei der Netzerstellung die gewünschte Eigenschaft gibt.

In Abbildung 4.8 ist die Spannung über die Blechdicke aufgetragen, wobei die blaue Kurve die Ergebnisse für den ESZ und die rote Kurve die Ergebnisse für den EVZ darstellt. Die Kurven sind relativ identisch, allerdings weist der ESZ am Rand höhere Spannungen auf und der EVZ ist in der Mitte symmetrischer zum Nullpunkt. Generell sind also die Ergebnisse für den EVZ besser.

Betrachtet man nun noch die Dehnungen über die Blechdicke (Abb. 4.9), so fällt auf, dass die Ergebnisse für den ESZ (violette Kurve) stets unter 0% Dehnung sind. Da aber auch hier erwartet wird, dass die Dehnung „Zacken“ ausbildet, die um den Nullpunkt hin und her springen, so ist dieses Ergebnis unerwünscht. Daher ist auch hier der EVZ zu bevorzugen, da die „Zacken“ relativ schön ausgebildet sind. Der Abfall der Dehnung links und rechts am Rand kann damit erklärt werden, dass hier die „zurückgebliebene“ plastische Dehnung von der letzten Biegung noch nicht abgebaut ist. Würde man das Blech noch weiter biegen, so wird dieser Teil wahrscheinlich immer kleiner werden.

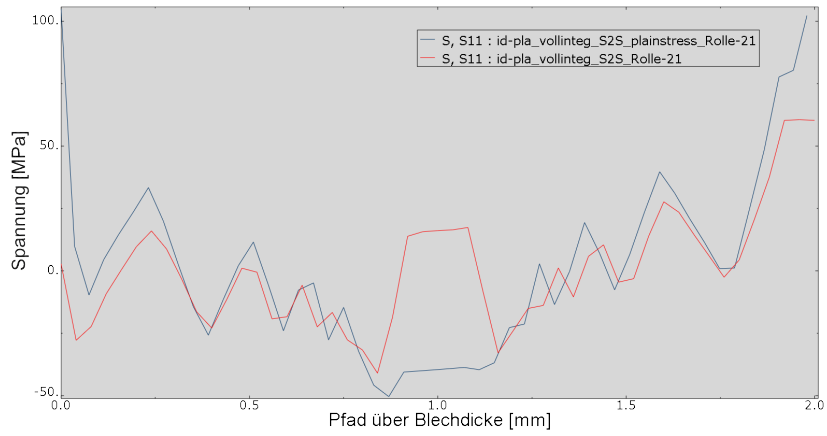


Abbildung 4.8: Spannung über die Blechdicke

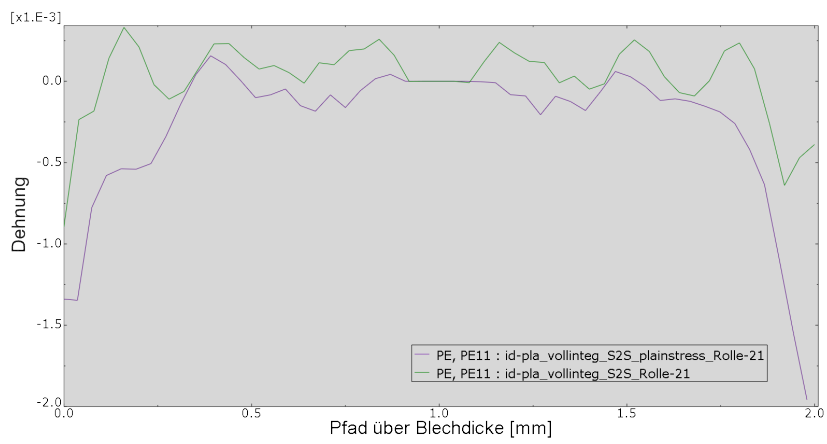


Abbildung 4.9: Dehnung über die Blechdicke

4.2.2 Vergleich *Node-To-Surface* und *Surface-To-Surface*

Als nächstes wird untersucht, ob es einen Unterschied macht, wenn man bei den Kontaktbedingungen die Einstellung *Node-To-Surface* (N2S) oder *Surface-To-Surface* (S2S) vornimmt. Zuerst wird wieder die Spannung über die Blechdicke betrachtet (Abb. 4.10). Es fällt auf, dass beide Kurven fast identisch sind, sowohl was den Wert der Spannung betrifft, als auch die Anzahl der „Zacken“. Somit ist es für die Spannung unerheblich ob *Node-To-Surface* oder *Surface-To-Surface* ausgewählt wird.

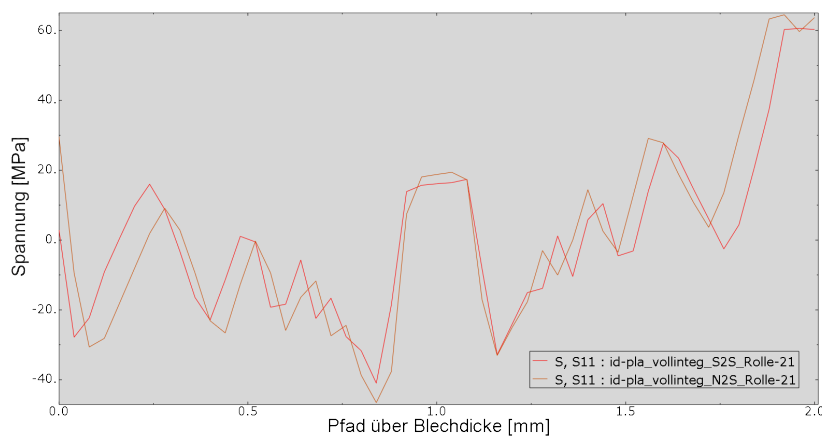


Abbildung 4.10: Spannung über die Blechdicke

Auch bei den Dehnungen ergeben sich keine signifikanten Unterschiede (Abb. 4.11), so dass es auch hier egal ist welche Einstellung gewählt wird.

Bei beiden Diagrammen sind die Ergebnisse also qualitativ in Ordnung und die beiden Kurve sind fast identisch: somit ist es egal welche Einstellung gewählt wird.

Für die späteren Analysen wurde *Surface-To-Surface* eingestellt, mit Blick auf die Rechenzeit und Datengröße ist es aber in Zukunft sinnvoll auf *Node-To-Surface* umzustellen.

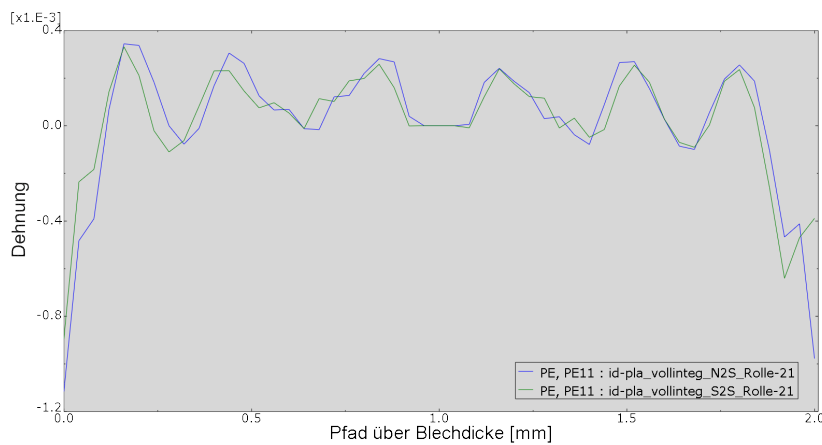


Abbildung 4.11: Dehnung über die Blechdicke

4.2.3 Vergleich reduziert integrierte und vollintegrierte Elemente

Als letztes wird noch untersucht, wie sich die Kurven bei vollintegrierten und reduziert integrierten Elementen verhalten. Wie oben schon angedeutet, enthält jedes vollintegrierte Element mehrere Integrationspunkte und die reduziert integrierten Elemente nur einen Integrationspunkt.

Als erstes wird wieder die Spannung über die Blechdicke betrachtet (Abb. 4.12): der Unterschied zwischen Kurven ist auch wieder relativ gering, allerdings zeigt sich die Tendenz, dass die Kurve für die reduziert integrierten Elemente (violett) die „Zacken“ etwas ungenauer abbildet und am linken Rand eine größere betragsmäßige Spannung hat.

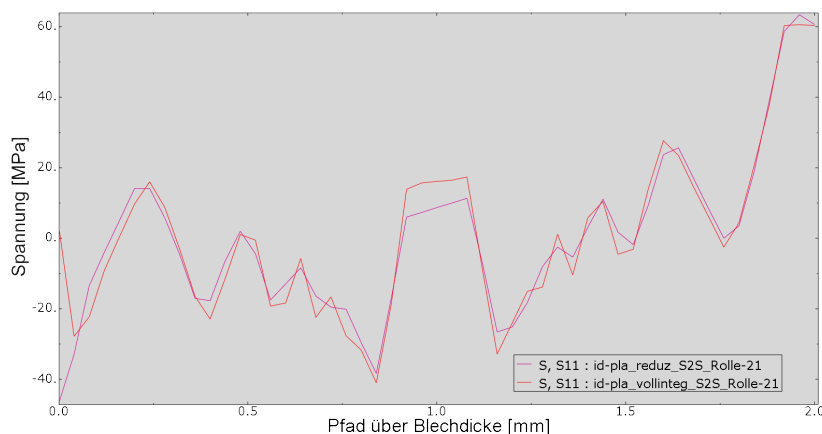


Abbildung 4.12: Spannung über die Blechdicke

Bei den Dehnungen ergibt sich ein ähnliches Bild: auch hier werden die „Zacken“ von der Kurve für die reduziert integrierten Elemente (braun) ungenauer abgebildet. Außerdem zeigen beide Kurven am Rand deutliche Unterschiede, auch hier sieht die braune Kurve schlechter aus. Die schlechteren Ergebnisse können daher rühren das bei den reduziert integrierten Elementen *Hourglassing* vorliegt. Aufgrund dessen wird für die weiteren Rechnungen die vollintegrierten Elemente verwendet.

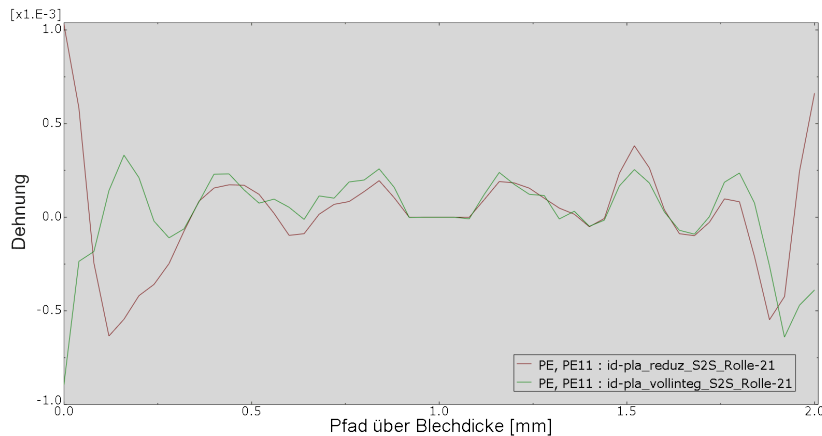


Abbildung 4.13: Dehnung über die Blechdicke

4.2.4 Endgültiges Modell

Aus den drei vorher gemachte Untersuchungen ergeben sich also folgende Parameter für das Modell:

- Ebener Dehnungszustand
- *Surface-To Surface*
- Vollintegrierte Elemente

Nun kann man untersuchen wie sich die Spannung verhält, wenn das Blech durch die Walzen fährt. Hierzu werden zuerst die Walzen zwei bis sieben analysiert (Abb. 4.14). Man sieht, dass der Anteil der plastischen Verformung bis zur sechsten Walze zu nimmt und erst ab der siebten Walze konstant ist. Hier wurde eigentlich erwartet das der plastische Anteil an der zweiten Walze am größten ist und dann langsam abnimmt. Das dies nicht so ist liegt daran, dass zum Zurückbiegen aus dem verformten Zustand mehr Kraft benötigt wird, als gebraucht wurde um das Blech in den ausgelenkten Zustand zu

bringen. Daher nimmt der plastische Anteil erst einmal zu. Der Maximalwert der Spannung von etwa 200 MPa ist auch in Ordnung, da das dem maximalen Anteil der Streckgrenze entspricht.

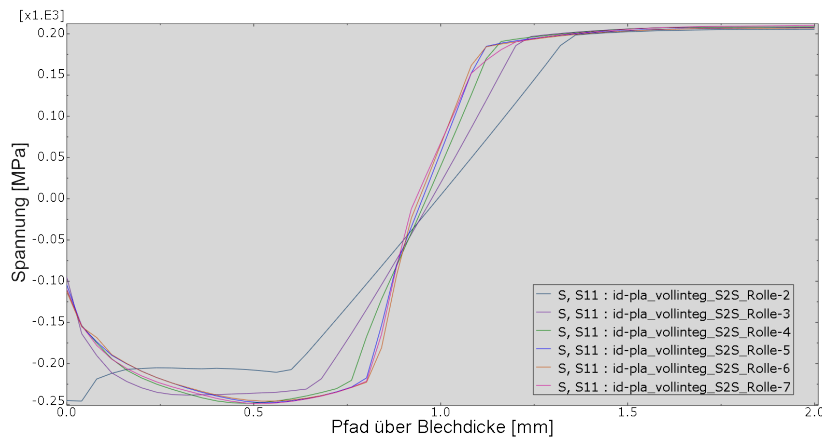


Abbildung 4.14: Spannung über die Blechdicke Walze 2 bis 7

Als nächstes werden die Walzen 8, 12, 15, 18 und 21 betrachtet (Abb. 4.15). Hier geht nun die plastische Verformung, wie erwartet, immer weiter zurück. Außerdem bilden sich die gewünschten „Zacken“ und bei der letzten Walze ist die Spannung erheblich abgesunken.

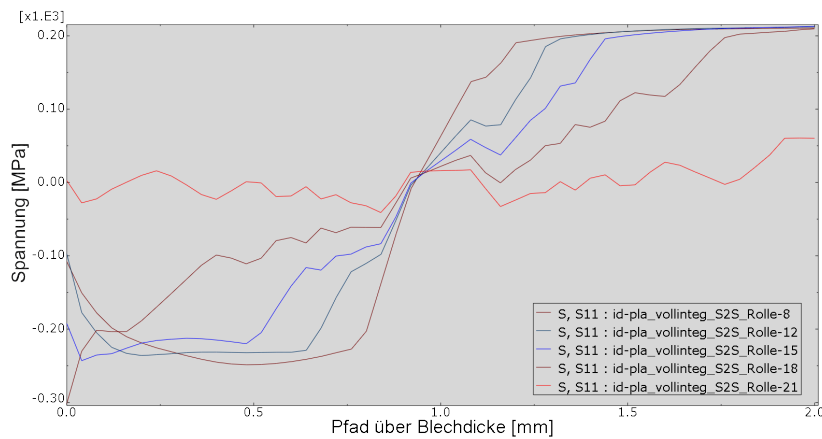


Abbildung 4.15: Spannung über die Blechdicke Walze 8 bis 21

Betrachtet man jetzt noch den Vergleich der sechsten und letzten Walze in Abbildung 4.16, so ist offensichtlich, dass die Spannung an der letzten Walze deutlich zurückgegangen ist, von etwa 200 MPa zu 50 MPa. Außerdem sind die gewünschten „Zacken“ an der letzten Walze zu sehen.

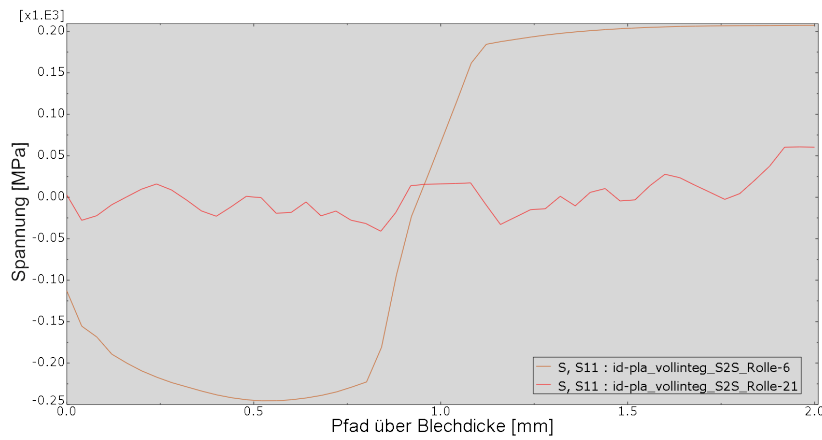


Abbildung 4.16: Spannung über die Blechdicke Walze 6 und 21

Da die Spannungen so weit den zu erwartenden Ergebnissen entsprechen, werden jetzt noch die Dehnungen an der sechsten und letzten Walze betrachtet (Abb. 4.17). Auch hier ist offensichtlich, dass die Dehnungen an der letzten Walze deutlich zurückgegangen sind und die Kurve wie gewünscht um den Nullpunkt herum verläuft. Somit wird der gewünschte Effekt mit den Spannungen und Dehnungen schön abgebildet.

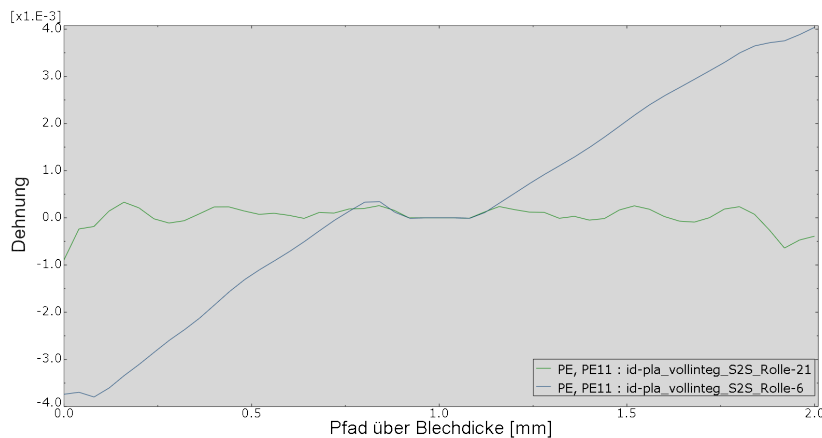


Abbildung 4.17: Dehnung über die Blechdicke Walze 6 und 21

4.3 Vergleich Materialmodelle

Nachdem nun die Ergebnisse für das idealplastische Material so ausfallen wie gewünscht, können auch noch die Ergebnisse für die isotrope und kinemati-

sche Verfestigung untersucht werden.

4.3.1 Spannungsverläufe

Zuerst werden die Spannungsverläufe an der sechsten Walze betrachtet (Abb. 4.18). Man sieht, dass die Kurven für die isotrope und kinematische Verfestigung betragsmäßig höhere Spannungen erzeugen als die Kurve für das idealplastische Materialmodell. Dies führt daher, dass beide Verfestigungen dem Material mehr Verfestigung zugestehen und dadurch die Spannungen höher werden. Die Spannungen der isotropen Verfestigung sind allerdings nochmal höher als die der kinematischen Verfestigung, da diese die Fließgrenze immer weiter erhöht und daher den linear-elastischen Bereich erweitert, so dass die Spannungen noch höher werden.

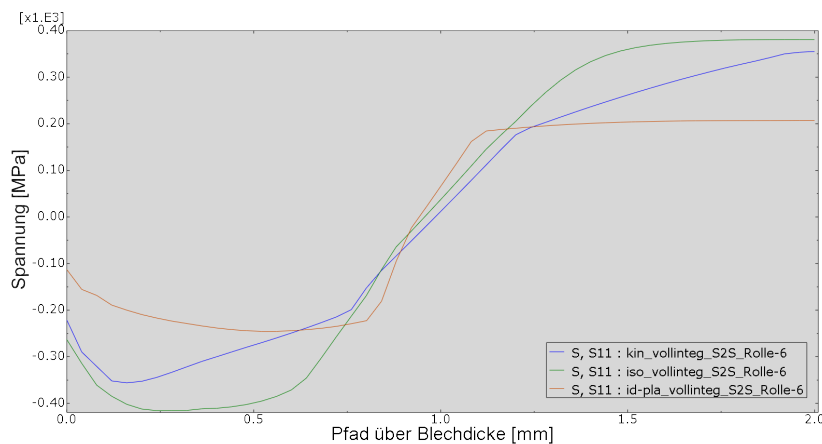


Abbildung 4.18: Spannungsverlauf über die Blechdicke an Walze 6

An der letzten Walze haben sich bei allen drei Materialmodellen die gewünschten „Zacken“ ausgebildet und die Spannungen haben in etwa die Gleiche Größe (Abb. 4.19). Die kinematische Verfestigung weist allerdings weniger „Zacken“ auf und unterscheidet sich daher auch von der isotropen Belastung. Vergleicht man nun die Spannungen der drei Materialmodelle an den Walzen 6 und 21 (Abb. 4.20) so sieht man wieder, dass die Spannungen abgebaut werden und an der letzten Walze nur noch ein Bruchteil den Spannungen an der sechsten Walze entsprechen.

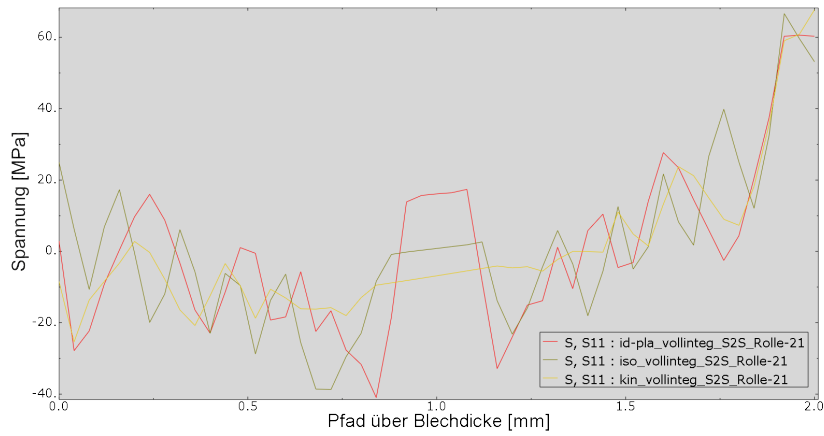


Abbildung 4.19: Spannungsverlauf über die Blechdicke an Walze 21

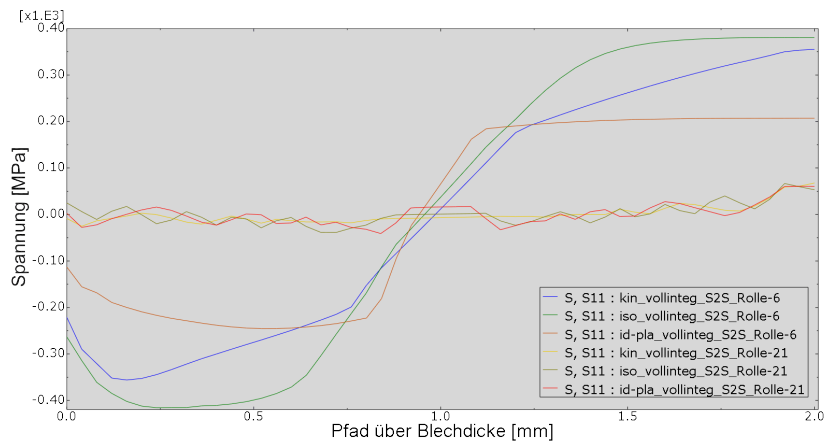


Abbildung 4.20: Spannungsverlauf über die Blechdicke an den Walzen 6 und 21

4.3.2 Dehnungsverläufe

Bei den Dehnungsverläufen wird zuerst auch wieder die Walze sechs angeschaut (Abb. 4.21). Es fällt auf, dass die isotrope und kinematische Verfestigung fast den gleichen Kurvenverlauf besitzen und eine geringere Dehnung sehen als das idealplastische Materialmodell. Dies ist plausibel, da die beiden Verfestigungen auch eine höhere Spannungen erfahren und somit die Dehnung geringer sein muss.

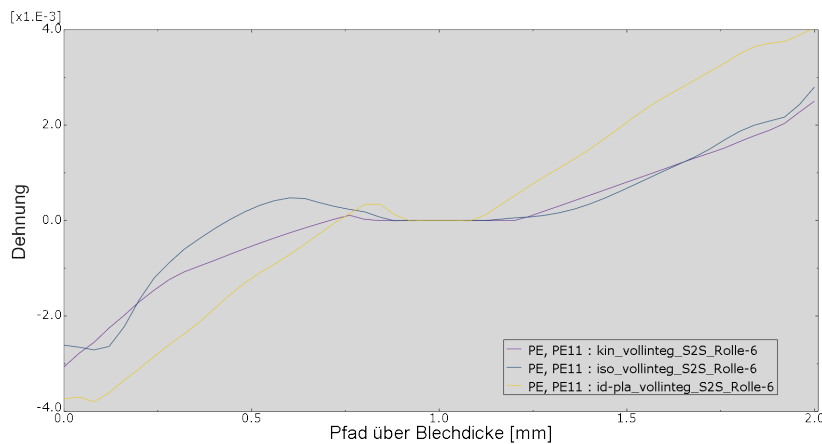


Abbildung 4.21: Dehnungsverlauf über die Blechdicke an Walze 6

Auch die Dehnungsverläufe an der letzten Walze erscheinen logisch; hier werden auch wieder die gewünschten „Zacken“ gebildet. Außerdem stimmen die Dehnungswerte der Materialmodelle in etwa überein, wobei die Ergebnisse für die isotrope und kinematische Verfestigung etwas besser aussehen als die des idealplastischen Materialmodells (Abb. 4.22).

Vergleicht man zu Schluss auch wieder die Ergebnisse an der sechsten und letzten Walze, so sieht man, dass die Dehnung sich wieder erheblich reduziert hat (Abb. 4.23). Somit zeigen alle drei Materialmodelle die richtige Tendenz.

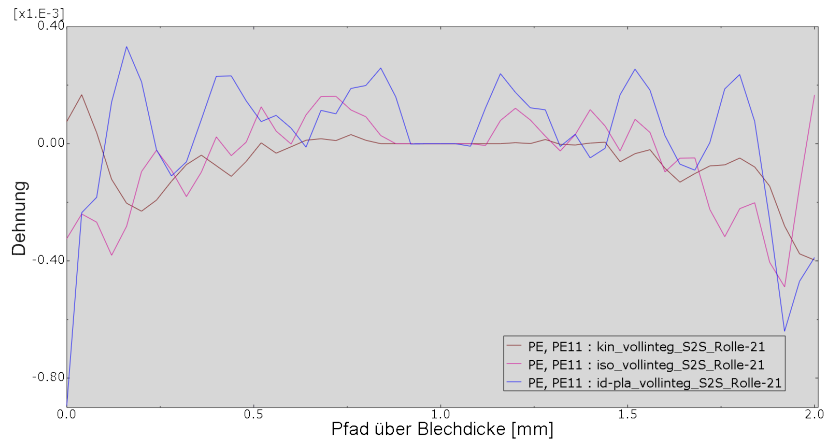


Abbildung 4.22: Dehnungsverlauf über die Blechdicke an Walze 21

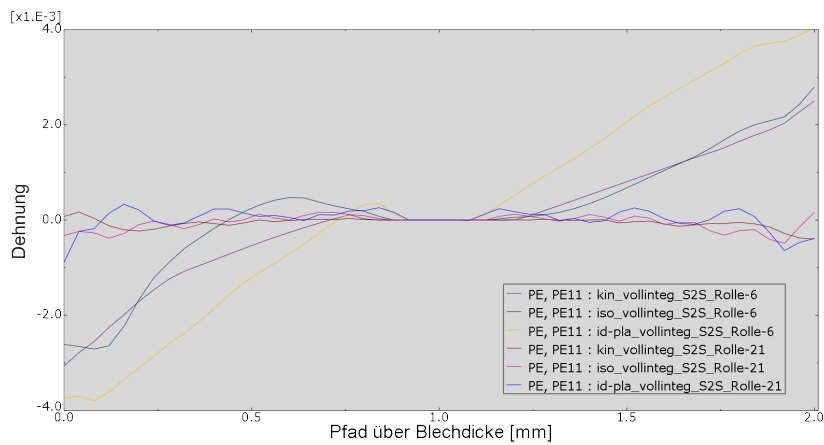


Abbildung 4.23: Dehnungsverlauf über die Blechdicke an Walze 6 und 21

Kapitel 5

Ausblick

Da ein lauffähiges Modell erstellt wurde und die Ergebnisse so weit auch stimmen, kann man noch ein kurzer Blick in die Zukunft werfen wie es mit dieser Studie weitergehen kann.

Als erstes ist es sicherlich nötig die Netzstudie zu wiederholen und zu verbessern. Wie weiter oben schon geschrieben gehen die Ergebnisse an der letzten Walze doch relativ weit auseinander. Außerdem ist zu klären warum die Spannung an der Walze beim verbesserten Netz noch so einen Sprung nach oben macht. Zudem kann überlegt werden, ob der gewählte Elementtyp der geeignetste ist.

Als zweites kann man eine Studie über die Zustellung durchzuführen. Bisher wurde immer eine Blockzustellung mit den gleichen Werten gewählt. Es bietet sich also an die Zustellung zu ändern und andere Zustellungsarten zu wählen. Die Werte für die Zustellung könnte von der Industrie besorgt werden um die simulierten Ergebnisse mit den realen Ergebnissen zu vergleichen.

Als drittes könnte man eine allgemeine Parameterstudie durchführen. In ABAQUS gibt es noch viele Einstellmöglichkeiten, die bisher ignoriert wurden. Wenn man mit diesen etwas herumspielt verbessern sich vielleicht die Ergebnisse oder die Rechenzeit verkürzt sich.

Als viertes kann dann auch ein krummes Blech durch die Walzen geschoben werden. Da das Blech von vornerein Eigenspannungen mitbringt (was ja dem eigentlichen Ist-Zustand entspricht) sollte das Modell diese abbauen und das Blech sollte auch nach den Walzen gerade hinaus laufen.

Als fünftes kann man sich überlegen ob es sich lohnt auf ABAQUS-Explicit umzusteigen. Dies wurde in dieser Arbeit auch kurz durchgeführt, allerdings waren die Ergebnisse noch nicht wie erwartet und so wurde, mit Blick auf die zur Verfügung stehenden Zeit, beschlossen die Arbeit mit ABAQUS-Standard durchzuführen. Es hat sich aber gezeigt, dass mit ABAQUS-Explicit die Rechenzeit deutlich nach unten geht. Das Problem hierbei ist, dass ABAQUS

für die Verringerung der Rechenzeit die Massenskalierung sehr hoch setzt und damit unschöne Massenträgheiten auftreten. Da dies noch verbesserungswürdig war wurde ABAQUS-Explicit nicht weiter verwendet.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Das erste Ziel dieser Bachelorthesis war es ein lauffähiges Modell zu erstellen, da hierzu mit ABAQUS noch nichts erstellt wurde. Dies hat ein bisschen Zeit in Anspruch genommen, da auf gewisse Dinge, wie zum Beispiel Randbedingungen oder Kontaktbedingungen, geachtet werden musste. Um im weiteren Verlauf dieser Studie keine Probleme beziehungsweise falsche Ergebnisse zu erhalten mussten diese Dinge korrekt modelliert werden.

Das nächste Ziel war es den im Kapitel Erwartungen aufgeführten Effekt rein qualitativ zu simulieren. Da dieser Effekt in der Realität auftritt wäre es Zeitverschwendung eine Parameterstudie mit einem Modell durchzuführen, dass die zu erwartenden Ergebnisse nicht abbildet.

Da der Effekt abgebildet wurde konnten noch ein paar Parameterstudien durchgeführt und verschiedene Materialmodelle untersucht werden.

Zum Schluss lässt sich also sagen, dass ein lauffähiges Modell erstellt wurde, dass den erwünschten Effekt abbildet. Somit steht der Weg offen weitere Parameterstudien zu betreiben, das Netz zu verbessern und auch ein krummes Blech mit Eigenspannungen durch die Walzen zu schieben.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Bühler. Finite-Elemente-Analyse der Spannungsverteilungen und Wechselplastizität beim Biegewechselrichten von Blechen. Bachelorthesis, Hochschule Offenburg, 2012.
- [2] L. Nasdala. *FEM - Formelsammlung und Dynamik*. Springer Vieweg, 2012.
- [3] H. Riedel. Numerische Simulation von Fertigungsschritten und Bauteilverhalten. Skript zur Vorlesung, Universität Karlsruhe, 2004.
- [4] J. Rösler, H. Harders, and M. Bäker. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, chapter Plastizität und Versagen. Springer Vieweg, 2012.
- [5] T. Seifert. Werkstoffmechanik. Skript zur Vorlesung, Hochschule Offenburg, Sommersemester 2012.
- [6] Wikipedia. Elastizitätsmodul. <http://de.wikipedia.org/wiki/Elastizitätsmodul>, 2013. [Online; abgerufen am 22.02.2013].
- [7] Wikipedia. Hertzsche Pressung. [http://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsche Pressung](http://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsche_Pressung), 2013. [Online; abgerufen am 25.02.2013].

Abbildungsverzeichnis

1.1	Coil	1
1.2	3D-CAD-Modell einer Richtmaschine	2
2.1	Modell: Atome untereinander mit Federn verbunden	5
2.2	Spannung-Dehnungs-Diagramm	6
2.3	Spannungs-Dehnungskurve elastisch-idealplastisch	8
2.4	Spannungs-Dehnungskurve isotrope Verfestigung	9
2.5	Spannungs-Dehnungskurve kinematische Verfestigung	9
2.6	Spannungsverteilung Pressung	12
2.7	Hourglassing komplettes Modell	13
2.8	Hourglassing an einem Element	13
3.1	Teilung und Zustellung	15
3.2	Gesamtübersicht Modell	16
3.3	Pfad zum auslesen der Ergebnisse	16
3.4	Rollenantrieb	18
3.5	Randbedingungen Modell	19
3.6	<i>Master Surface</i> und <i>Slave Surface</i>	19
3.7	Kontakt zwischen Blech und Walze	20
3.8	Nahansicht Verbessertes Netz	22
3.9	Verbessertes Netz	22
3.10	Nahansicht feines Netz	22
3.11	Vergleich Netz an Walze 6	23
3.12	Vergleich Netz an Walze 21	24
4.1	Spannungen in x-Richtung beim belasteten Blech	25
4.2	Spannungsverteilung bei elastischer Verformung	26
4.3	Spannungsverteilung bei elastischer und plastischer Verformung	26
4.4	Spannungsverteilung bei weggenommener Belastung	27
4.5	Spannungsverteilung bei elastischer und plastischer Verformung	27
4.6	Spannungsverteilung bei überlagerter Belastung	28
4.7	Spannungsverteilung bei weggenommener Belastung	28

4.8	Spannung über die Blechdicke	30
4.9	Dehnung über die Blechdicke	30
4.10	Spannung über die Blechdicke	31
4.11	Dehnung über die Blechdicke	32
4.12	Spannung über die Blechdicke	32
4.13	Dehnung über die Blechdicke	33
4.14	Spannung über die Blechdicke Walze 2 bis 7	34
4.15	Spannung über die Blechdicke Walze 8 bis 21	34
4.16	Spannung über die Blechdicke Walze 6 und 21	35
4.17	Dehnung über die Blechdicke Walze 6 und 21	35
4.18	Spannungsverlauf über die Blechdicke an Walze 6	36
4.19	Spannungsverlauf über die Blechdicke an Walze 21	37
4.20	Spannungsverlauf über die Blechdicke an den Walzen 6 und 21	37
4.21	Dehnungsverlauf über die Blechdicke an Walze 6	38
4.22	Dehnungsverlauf über die Blechdicke an Walze 21	39
4.23	Dehnungsverlauf über die Blechdicke an Walze 6 und 21	39

Tabellenverzeichnis

3.1	Materialdaten ideal plastisches Materialverhalten	21
-----	---	----