

# Untersuchung der umformtechnischen Wirkmechanismen des Fließformbiegens im Hinblick auf Prozessfähigkeit und Robustheit

**Master Thesis**

**Author(s):**

Horat, Patrik

**Publication date:**

2007

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006089657>

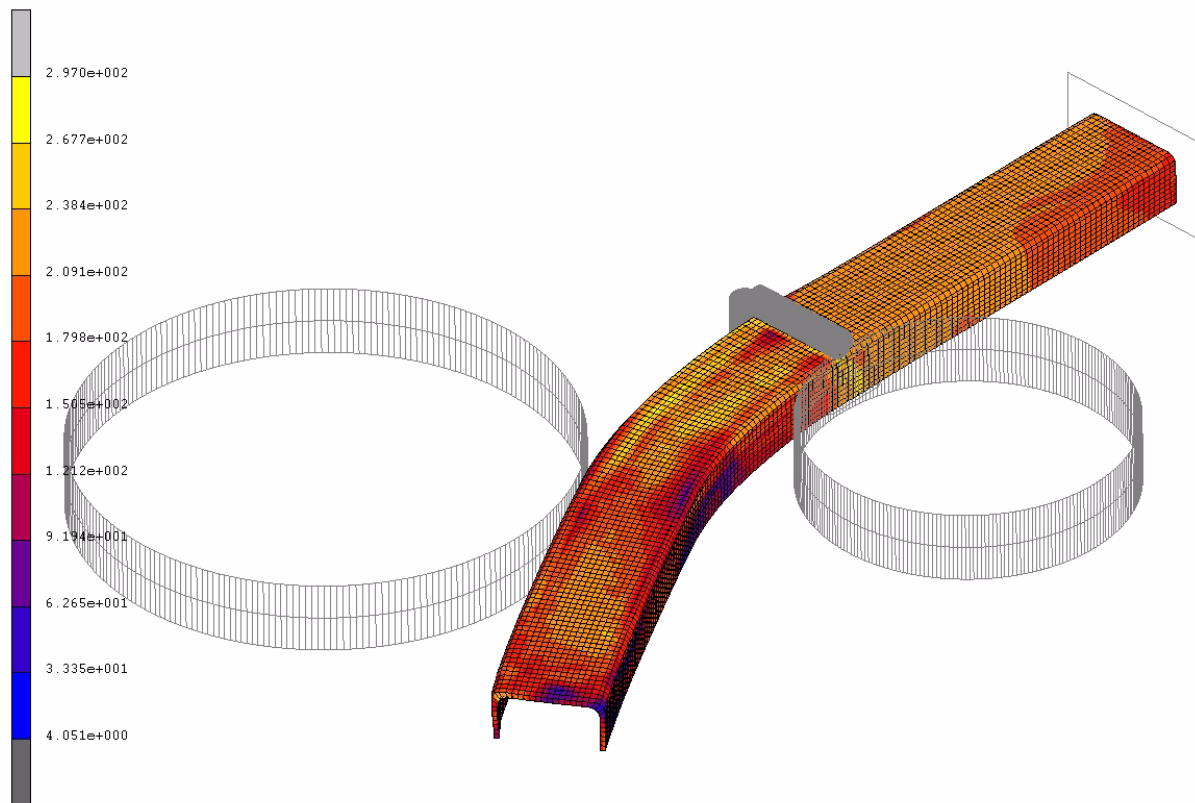
**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Masterarbeit Nr. 07-004

# Untersuchung der umformtechnischen Wirkmechanismen des Fließformbiegens im Hinblick auf Prozessfähigkeit und Robustheit

Patrik Horat



Betreuer: Dr. Marcus Stolz, Klingelberg AG

Institut für Virtuelle Produktion  
Prof. Dr. Pavel Hora  
ETH Zürich

ETH Zürich  
Institut für Virtuelle Produktion  
CLA F 07.0  
Tannenstrasse 3  
8092 Zürich

Telefon: +41 (0)44 632 26 10  
Fax: +41 (0)44 632 11 65

[sek@ivp.mavt.ethz.ch](mailto:sek@ivp.mavt.ethz.ch)  
[www.ivp.ethz.ch](http://www.ivp.ethz.ch)

## **Bestätigung der Eigenständigkeit**

Der Unterzeichnende bestätigt mit seiner Unterschrift, dass die Arbeit selbständig verfasst und in schriftliche Form gebracht worden ist, dass sich die Mitwirkung anderer Personen auf Beratung und Korrekturlesen beschränkt hat und dass alle verwendeten Unterlagen aufgeführt sind.

Zürich, 15. Oktober 2007

Patrik Horat





## **Abstract**

This master thesis discusses the mechanics of flowform bending in terms of process capability and robustness. Flowform bending is a new process to manufacture bended high-strength steel and aluminum profiles. Bended profiles are used for space frame structures in the automobile industry.

To examine physical mechanism of flowform bending in terms of process capability and robustness several FE simulations are conducted. Virtual rolling experiments show that sheet metal will bend due to the difference in size of the rolls. The experiments also show that the realized results depend heavily on the meshing used for FE simulation. Virtual rolling with different roll sizes reveal that the size of the rolling roll, friction and material properties affect the radius of curvature. The parameters mentioned also have an impact on rolling and shearing loads. FE simulations of the flowform bending process (rolling and bending) point out that on one hand the meshing used is suboptimal and that on the other hand the results of the rolling experiments correlate to the outcome of the complete virtual flowform bending simulations.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung/Motivation.....	1
1.2	Aufgabenstellung.....	1
1.3	Vorgehensweise.....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen des Fließformbiegens.....</b>	<b>3</b>
2.1	Begriffsbestimmungen und Verfahrensprinzip.....	3
2.2	Einordnung des Fließformbiegens in die Umformtechnik.....	4
2.3	Einflüsse auf die Serienfähigkeit des Fließformbiegens.....	5
<b>3</b>	<b>Theoretische Ansätze und Simulation.....</b>	<b>7</b>
3.1	Theoretische Ansätze.....	7
3.1.1	Biegen.....	7
3.1.2	Walzen.....	10
3.1.3	Fließformbiegen.....	14
3.2	Simulation mit FE.....	19
<b>4</b>	<b>Wirkmechanismen des Fließformbiegens.....</b>	<b>21</b>
4.1	Formulierung eines Referenzprozesses „Fließformbiegen“.....	21
4.1.1	Inputparameter.....	22
4.1.2	Outputparameter.....	22
4.2	Grundlagenversuche.....	23
4.2.1	Aufbau der Simulation.....	23
4.2.2	Minirollentoptimierung.....	26
4.2.3	Versuche mit Reibkoeffizienten.....	33
4.2.4	Materialversuche.....	36
4.2.5	Kinematische Gestaltung des Walzkontakts.....	39
4.3	Biegen offener Profile.....	46
4.3.1	Referenzbauteil/Referenzsimulation.....	46
4.3.2	Aufbau der Parameterstudie.....	49
4.3.3	Vorgehen bei der Auswertung.....	50
4.3.4	Einfluss der Reibung.....	55
4.3.5	Einfluss der Wandstärke.....	57
4.3.6	Einfluss des Materials.....	61
4.3.7	Stauchversuche.....	63
4.4	Biegen geschlossener Profile.....	67
4.4.1	Referenzbauteil/Referenzsimulation.....	67
4.4.2	Aufbau der Parameterstudie.....	70
4.4.3	Vorgehen bei der Auswertung.....	72
4.4.4	Biegen mit flexiblem Innendorn.....	72
4.4.5	Biegen mit festem Innendorn.....	75
4.5	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den Simulationen.....	78
4.5.1	FE Simulation.....	78
4.5.2	Umformtechnische Mechanismen.....	79
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>81</b>
5.1	Zusammenfassung.....	81
5.2	Ausblick.....	82
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>83</b>
6.1	Quellenverzeichnis.....	83

6.2	Abbildungsverzeichnis .....	83
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>87</b>
A	Ursache-Wirkungs-Diagramm .....	87
B	Matlab Funktion für Radiusermittlung .....	88

## Abkürzungsverzeichnis

IVP	Institut für Virtuelle Produktion
IHU	Innenhochdruckumformen
WR	Walzrolle
MR	Mittelrolle
PIP	Klingenberg Process Information Platform

## Verzeichnis der Kurzzeichen

### Biegen

$\varepsilon_x$	Dehnung in X-Richtung	
$\Delta l$	Längenänderung	mm
$l_0$	ursprüngliche Länge	mm
$r(y)$	Biegeradius	mm
$r_m$	mittlerer Biegeradius	mm
$\alpha$	Biegewinkel	
$\sigma_x$	Spannung in X-Richtung	N/mm <sup>2</sup>
$E$	Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>
$M_{el}$	elastisches Biegemoment	Nm
$b$	Breite	mm
$s_0$	ursprüngliche Blechdicke	mm
$J_z$	Flächenträgheitsmoment bezüglich Z	mm <sup>4</sup>
$m_F$	Einheitsbiegemoment	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_F$	Fliessspannung	N/mm <sup>2</sup>
$M_{pl}$	plastisches Biegemoment	Nm
$m_{vpl}$	vollplastisches Einheitsbiegemoment	N/mm <sup>2</sup>

### Walzen

$l_0$	ursprüngliche Länge	mm
$h_0$	ursprüngliche Höhe	mm
$b_0$	ursprüngliche Breite	mm
$v_0$	ursprüngliche Geschwindigkeit	m/s
$v$	Geschwindigkeit	m/s
$h$	Höhe	mm
$b$	Breite	mm
$l_1$	Länge nach dem Walzen	mm
$h_1$	Höhe nach dem Walzen	mm
$b_1$	Breite nach dem Walzen	mm
$v_1$	Geschwindigkeit nach dem Walzen	m/s
$\alpha_E$	Walzwinkel	
$r$	Walzrollenradius	mm
$x_E$	gedrückte Länge	mm
$\Delta h$	Stichabnahme	mm
$x_F$	Position der Fliessscheide	mm
$\mu$	Reibkoeffizient	

$\sigma_x$	Spannung in X-Richtung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_y$	Spannung in Y-Richtung	N/mm <sup>2</sup>
$k_f$	Fliessspannung	N/mm <sup>2</sup>
$F$	Walzkraft	N
$M_d$	Drehmoment	Nm

# 1 Einleitung

Beim vorliegenden Dokument handelt es sich um den Schlussbericht der Masterarbeit zum Studium der Maschineningenieurwissenschaften von Patrik Horat. Die Masterarbeit bildet den Abschluss des Studiums im Fachbereich Maschinenbau an der ETH Zürich. In der Arbeit werden die umformtechnischen Wirkmechanismen des Fließformbiegens im Hinblick auf Prozessfähigkeit und Robustheit untersucht.

## 1.1 Problemstellung/Motivation

Ständig steigende Anforderungen an Komfort und Sicherheit im Automobilbau verursachen eine Erhöhung des Fahrzeuggewichtes. Mit Leichtbaukonstruktionen soll dem entgegen gewirkt werden. Einerseits wird durch die Verwendung von Verbundwerkstoffen für einige Komponenten eine Gewichtsreduktion erreicht, andererseits werden neue Konstruktionsmethoden für den Karosseriebau entwickelt und auch eingesetzt. Die sogenannte Skelettkarosserie besteht aus einem Skelett von Hohlprofilen, die direkt oder über Knoten miteinander verbunden sind. Als Beispiele für die Skelettkarosserie sind das Aluminium Space Frame (Audi A8 und A2) oder auch das Stahl Space Frame von Fiat (Fiat Multipla) zu nennen. Mit der Space Frame Bauweise kann zwar das Gewicht gesenkt und die Verwindungssteifigkeit erhöht werden, sie bringt allerdings auch Probleme mit sich, denn es fehlen angepasste Fertigungsverfahren für die wirtschaftliche Herstellung der gewünschten Stahl- und Aluminiumprofile.

Heute werden vor allem Drei-Rollen-Biegen, Streckbiegen und das Innenhochdruckumformen (IHU) für die Herstellung von gebogenen Profilen eingesetzt. Ein neues Verfahren für die Herstellung gebogener Profile ist das Fließformbiegen der Firma Klingelberg.

Das Fließformbiegen ist ein Verfahren zur effizienten Herstellung gebogener Profile aus hochfesten Stählen und Aluminiumlegierungen. Damit bietet es vielfältige Möglichkeiten zum Einsatz in der Leichtbautechnik, insbesondere den bereits angesprochenen Space-Frames. Da es sich hierbei jedoch um eine neuartige Kombination von klassischem Drei-Rollen-Biegen und Walztechnik handelt, sind einzelne umformtechnische Wirkmechanismen noch nicht vollständig beherrscht.

## 1.2 Aufgabenstellung

Für die Verwendung des Verfahrens in der Automobil-Serienfertigung mit den dort gängigen Anforderungen hinsichtlich Toleranzen und Prozessfähigkeit ist ein solches grundlegendes Verständnis jedoch unabdingbar. Insbesondere die Kombination von Walzen und Biegen erweist sich jedoch als recht komplexer Prozess und ist bisher kaum untersucht worden. Es fehlen teilweise Kenntnisse bezüglich Robustheit, Prozessfähigkeit und Sensibilität, welche für die wirtschaftliche Serienfertigung von Bauteilen unabdingbar sind.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher zunächst das Fließformbiegen in Bezug auf die grundlegenden Wirkbeziehungen und Prozessparameter untersucht werden. Ausgehend davon sollen die wesentlichen Einflussgrößen identifiziert und daraus Ansätze für ein robusteres Verfahren abgeleitet werden.



### 1.3 Vorgehensweise

Die Arbeit befasst sich zu Beginn mit den Grundlagen des Fließformbiegens. Dabei wird zuerst das Verfahrensprinzip erläutert, der Prozess in die Umformtechnik eingeordnet und aufgezeigt, welche Einflüsse auf die Serienfähigkeit des Prozesses wirken. Im Anschluss werden die mechanischen Grundlagen der Verfahrenskomponenten Biegen und Walzen aufgezeigt. Zudem werden die bereits bekannten Grundlagen des Fließformbiegens beschrieben. Der Abschluss des Grundlagenteils bildet die Beschreibung der Finite Element Simulation.

Aufbauend auf den Grundlagen wird ein Referenzprozess "Fließformbiegen" definiert. Dieser Referenzprozess dient als Grundlage für die virtuelle Untersuchung des Prozesses im Hauptteil dieser Arbeit. Zunächst werden einige Grundlagensimulationen zum Walzprozess durchgeführt. Dabei soll die Variation von verschiedenen Parametern deren Einflüsse auf das Walzen aufzeigen. Im Anschluss werden diverse Parameterstudien zum kompletten Fließformbiegeprozess (Walzen und Biegen) anhand von einem offenen und einem geschlossenen Profil durchgeführt. Sämtliche Ergebnisse werden anschliessend ausgewertet und die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen daraus aufgezeigt.

Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über das mögliche weitere Vorgehen gegeben.

## 2 Grundlagen des Fließformbiegens

Das Fließformbiegen ist ein Verfahren zur effizienten Herstellung gebogener Profile mit konstantem Querschnitt. Das Verfahren ermöglicht auch das Biegen von Profilen aus hochfesten Stählen und Aluminiumlegierungen. Gebogene Profile werden im Leichtbau z.B. für die Herstellung von Space Frames im Automobilbereich eingesetzt. Die folgenden Abschnitte erläutern die Grundlagen des Fließformbiegens. Zunächst wird das Prinzip des Fließformbiegens beschrieben. Dann wird das Verfahren mit alternativen Verfahren verglichen und in die Umformtechnik eingeordnet. Anschliessend werden der aktuelle Stand des Verfahrens in der Praxis, sowie Probleme und Erfahrungen aufgezeigt.

### 2.1 Begriffsbestimmungen und Verfahrensprinzip

Fließformbiegen ist ein Umformverfahren zur Herstellung gebogener Profile mit konstantem Querschnitt. Es handelt sich dabei um eine Kombination des klassischen Drei-Rollen-Biegens mit der Walztechnik. Der Werkzeugaufbau des Fließformbiegens ist in der nachfolgenden Abbildung (Abbildung 2.1) dargestellt. Die Anordnung der Werkzeuge hängt von der Art des Profils ab. Die Abbildung zeigt den Aufbau der Werkzeuge bei einem geschlossenen Profil. Bei einem offenen Profil kann auf den Dorn verzichtet werden.

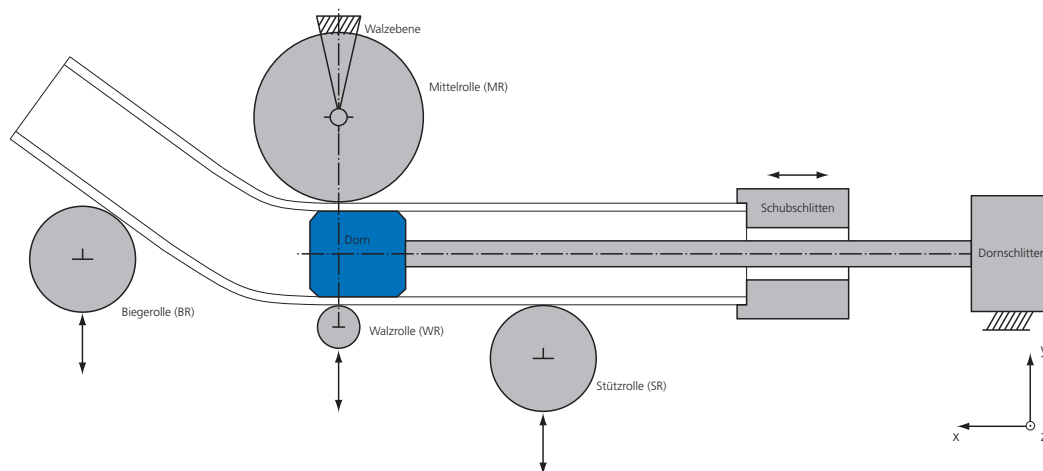


Abbildung 2.1 Aufbau Walzbiegen

Der Schubschlitten drückt das Profil durch die Walz- und Mittelrolle. Das Profil wird bei der Walzebene auf der Seite der Walzrolle ausgedünnt. Zusätzlich wird das Profil durch die Biegerolle gebogen. Der Innendorn verhindert im Fall des Hohlprofils, dass das Profil zusammengedrückt wird und sorgt dafür, dass lediglich die Profilwand ausgedünnt wird. Die Stützrolle stützt das Profil zusätzlich, damit es durch das Biegemoment nicht zum Einknicken kommt. Durch das Auswalzen der Profilwand im Bereich der Walzrolle, also beim äusseren Biegeradius, soll die neutrale Faser bzw. Biegelinie zur Innenseite des Biegeradius verschoben werden und dadurch das Falten des Profils in diesem Bereich verhindern. Eine ausführliche Beschreibung des Fließformbiegens befindet sich in Kapitel 3.1.

## 2.2 Einordnung des Fließformbiegens in die Umformtechnik

Beim Fließformbiegen handelt es sich um eine Kombination der Prozesse Walzen und Biegen. Nach DIN 8580 sind beide Verfahren den Umformverfahren (DIN 8582) zugeordnet, wobei Walzen zu den Druckumformverfahren (DIN 8583) und Biegen zum Biegeumformen (DIN 8586) gehört. Um das Fließformbiegen in der Umformtechnik einzuordnen, ist ein Vergleich mit anderen Verfahren nötig.

### *Drei-Rollen-Biegen*

Das konventionelle Drei-Rollen-Biegen gilt als Alternative. Vorallem beim Rohrbiegen wird es häufig eingesetzt. Vorteil des Prozesses ist, dass er relativ günstig ist und auch recht flexibel bezüglich Endgeometrie der Bauteile. Nachteil des Verfahrens ist, dass die neutrale Faser ungefähr in der Mitte des Bauteils liegt. Daraus entstehen Druckspannungen im Bereich des Innenradius und deshalb besteht die Gefahr der Faltenbildung.

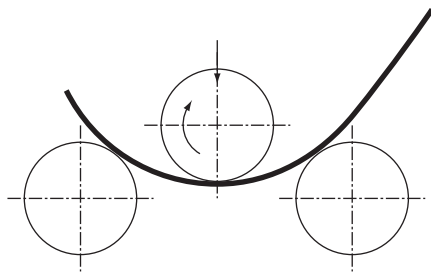


Abbildung 2.2 Drei-Rollen-Biegen aus [2]

### *Streckbiegen*

Beim Streckbiegen wird zusätzlich zum Biegemoment eine Zugspannung aufgebracht. Das bringt wie beim Fließformbiegen den Effekt, dass die neutrale Faser verschoben wird und so die Druckspannungen und die Gefahr für Faltenbildung verkleinert werden. Nachteil ist, dass in der Regel ein formgebendes Werkzeug nötig ist.

### *Innenhochdruckumformen*

Beim Innenhochdruckumformen (IHU) wird ein Rohprofil oder Rohr (allenfalls auch vorgebogen) in ein formgebendes Werkzeug eingelegt und anschliessend mit Innendruck aufgeweitet und gleichzeitig mit einer Axialkraft gestaucht. Das Profil weitet sich soweit auf, bis es die Form des Werkzeugs annimmt. Durch IHU sind sehr komplexe und qualitativ hochwertige Bauteile herstellbar, allerdings sind die Kosten für die Bauteile sehr hoch. Zum einen wird eine grosse Presse für die Zuhaltekräfte benötigt, andererseits ist für jede Profilform und -grösse ein eigenes Werkzeug nötig.

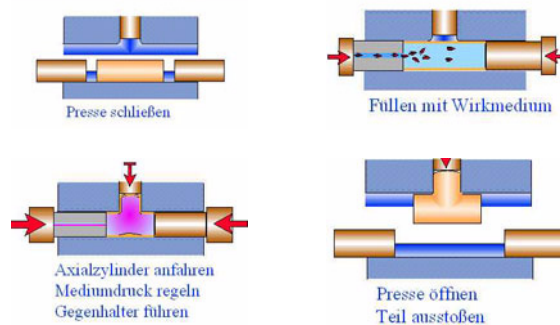


Abbildung 2.3 Innenhochdruckumformen von Rohren aus [3]

### Vergleich mit dem Fließformbiegen

Das Fließformbiegen vereint viele der positiven Eigenschaften aus den beschriebenen Verfahren und eliminiert gleichzeitig Schwächen dieser Verfahren. Das Fließformbiegen ist als Weiterentwicklung des Drei-Rollen-Biegens zu betrachten und übernimmt dessen Eigenschaften, d.h. es ist ein sehr flexibles Verfahren, jedoch wird durch das Verschieben der neutralen Faser die Gefahr von Faltenbildung beim Innenradius verhindert. Es hat somit den Vorteil, der das Streckbiegen bringt, ist aber wesentlich flexibler. Im Vergleich zum IHU ist das Fließformbiegen wesentlich flexibler, schneller und somit auch kostengünstiger. Das IHU ermöglicht jedoch Bauteilformen, die mit allen übrigen Verfahren nicht herstellbar sind.

Die hohe Flexibilität und die Kosten machen das Fließformbiegen sehr attraktiv. Der Aufwand für die Erstellung der Werkzeuge ist wesentlich geringer, zudem kann dasselbe Werkzeug für Profile mit unterschiedlichen Biegeradien verwendet werden. Weiter sind mit dem Fließformbiegen Bauteile herstellbar, die mit den übrigen Verfahren gar nicht möglich sind, da durch das Walzen engere Biegeradien ermöglicht werden.

Das Fließformbiegen findet überall dort Anwendung, wo auch die herkömmlichen Biegeverfahren für Profile angewendet werden, also im Automobilbau, Flugzeugbau usw., bietet aber den Vorteil der sehr hohen Flexibilität.

## 2.3 Einflüsse auf die Serienfähigkeit des Fließformbiegens

Um den Reifegrad des Fließformbiegens bestimmen zu können, soll zunächst die aktuelle Situation bei der Firma Klingelberg analysiert werden. Das Ergebnis dieser Analyse wird in einem Ursachen-Wirkungs-Diagramm dargestellt (reduziertes Diagramm siehe Abbildung 2.4, komplettes Diagramm siehe Anhang A). In diesem Diagramm werden die Einflüsse auf einen serienfähigen Prozess und mögliche Schwachstellen aufgezeigt. Die mutmasslich kritischen Aspekte sind mit einem Ausrufezeichen markiert. Die Darstellung ist gemäss dem Ishikawa-Diagramm nach Einflüssen von Milieu, Methode, Material, Maschine und Mensch aufgeteilt. Die unterschiedlichen Einflüsse und Einflussstärken sind jedoch heute noch weitgehend unbekannt.

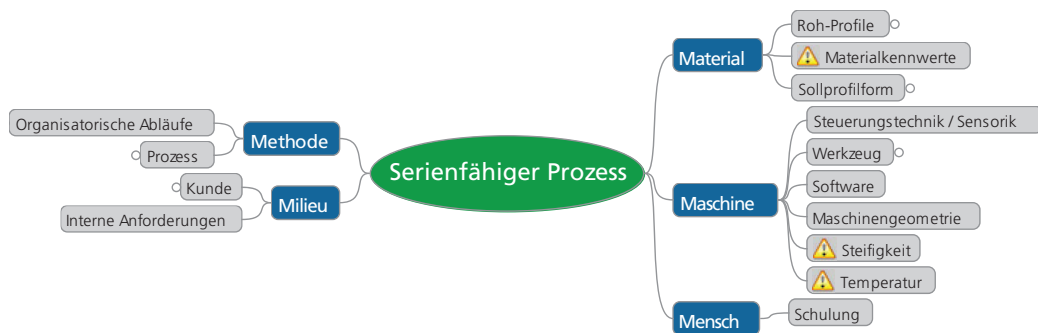


Abbildung 2.4 Reduziertes Ursache-Wirkungs-Diagramm

Der Bereich *Milieu* beinhaltet den Kunden und die internen Anforderungen. Hier zeigt sich ein Phänomen, das in Produktionsbetrieben sehr oft anzutreffen ist. Der Faktor Zeit ist ein zentrales Konfliktfeld. Einerseits sollen qualitativ gute Produkte hergestellt und dabei der Prozess auch ständig verbessert werden, auf der anderen Seite besteht ein Zeit- und Kostendruck, der das erschwert oder gar verhindert.

Probleme sind auch im Bereich *Methode* vorhanden. Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass der Prozess selber in einigen Aspekten noch wenig oder ungenügend bekannt ist und deshalb vor allem hier ein Verbesserungspotential besteht.

Die Probleme im Bereich *Methode* werden durch vorhandene Probleme im Bereich *Material* verstärkt. Die Materialkennwerte werden selber nicht ermittelt. Obwohl teilweise Lieferanten Kennwerte liefern, führt diese Situation dazu, dass Materialkennwerte vielfach nicht bekannt sind. Ein weiteres Problem stellen die Toleranzen im Bereich der Ausgangsbauteile dar. Dies kann aber nur in Zusammenarbeit mit den Zulieferern gelöst werden.

Als Fließformbiegemaschine wird ein Prototyp der KlingelInberg AG eingesetzt. Die Besonderheiten dieser *Maschine* beeinflussen die Serienfähigkeit des Prozesses ebenfalls. Die Maschine muss hier als gegebener Faktor angesehen werden und kann somit nur geringfügig beeinflusst werden. Mögliche weitere Fehlerquellen sind die Konstruktion der Werkzeuge und die fehlende Kenntnis einiger Prozessgrößen (z.B. Reibung).

Obwohl das Fließformbiegen in verschiedener Hinsicht ein sehr attraktives Verfahren darstellt, zeigt das Ursache-Wirkungs-Diagramm klar, dass der Prozess noch nicht vollständig serienfähig ist. Einige Aspekte können nicht oder nur mit sehr grossem Aufwand verbessert werden. Dabei sind sicherlich die Fließformbiegemaschine selber, aber auch das Milieu zu nennen. Für andere Aspekte bestehen teilweise auch schon Vorschläge für Lösungswege, so könnten gewisse Punkte bereits mit Finite-Element-Simulationen erforscht werden.

Die vorliegende Arbeit soll kritische Aspekte der dargestellten Problemfelder in Bezug auf die Serienfähigkeit des Fließformbiegens grundlegend untersuchen. Zuerst soll jedoch das Fließformbiegen kurz hinsichtlich seiner umformtechnischen Grundlagen charakterisiert werden, sowie die Grundlagen der Finite Elemente Methode als mögliche Technologie zur Prozesssimulation aufgezeigt werden.

### 3 Theoretische Ansätze und Simulation

In Kapitel 2 wurde das Verfahrensprinzip des Fließformbiegens beschrieben. Im aktuellen Kapitel soll dieses Verfahrensprinzip mithilfe der Umformtechnik und den Grundlagen von Walzen und Biegen ausführlich beschrieben werden. Abschnitt 3.2 befasst sich mit der Finite-Element-Simulation.

#### 3.1 Theoretische Ansätze

Die umformtechnischen Grundlagen des Fließformbiegens sind nur teilweise bekannt. Um den Prozess besser zu verstehen, ist es sinnvoll, die beiden Verfahrenskomponenten Biegen und Walzen zuerst einzeln genauer zu betrachten.

##### 3.1.1 Biegen

Biegen ist ein umformendes Fertigungsverfahren. Dabei werden durch Aufbringen eines Biegemoments plastische Verformungen herbeigeführt. Bei den meisten Biegeverfahren wirken zusätzlich Zug-, Druck- und Schubspannungen.

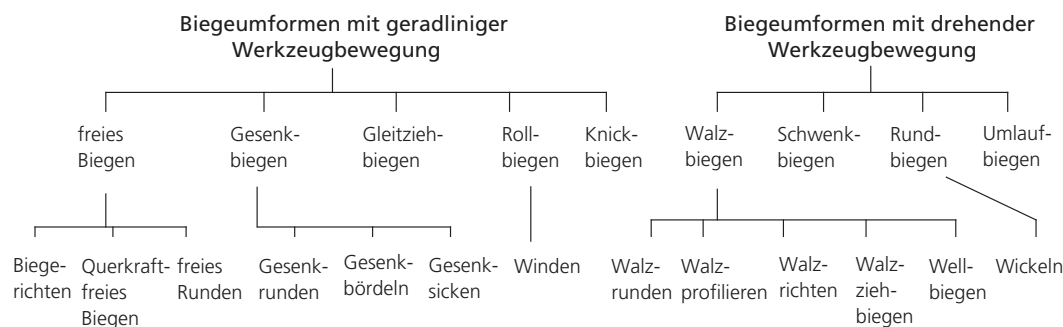


Abbildung 3.1 Einteilung der Biegeverfahren nach DIN 8586 aus [2]

#### Mathematische Beschreibung

Eine genaue mathematische Beschreibung des Biegens beschränkt sich nicht auf Beanspruchung durch ein reines Biegemoment. In vielen industriell angewendeten Biegeverfahren treten zusätzlich zur Belastung durch ein Biegemoment auch Querkräfte, Drücke und Reibung auf. Dies resultiert in einem dreiachsigen Spannungszustand, welcher für den allgemeinen Fall einen dreiachsigen Verzerrungszustand bewirkt. Für eine analytische bzw. numerische Berechnung werden deshalb sowohl für den Prozess, als auch für das Material, diverse Vereinfachungen und Annahmen getroffen [2]:

- Das Blech werde durch ein reines Biegemoment beansprucht.
- Das Blech sei sehr breit, so dass ein ebener Formänderungszustand herrscht (keine Dehnungen in Breiten-Richtung).
- Ebene Blechquerschnitte bleiben eben und senkrecht zur Blechoberfläche.
- Es werden nur Spannungen in tangentialer Richtung berücksichtigt.
- Die auch bei reiner Biegung vorhandenen Spannungen in Breiten- und Dickenrichtung werden vernachlässigt.
- Der Blechwerkstoff sei homogen und isotrop, die Spannungs-Dehnungslinien für Zug und Druck sind symmetrisch zum Nullpunkt.
- Die Blechdicke bleibe konstant während des Biegens.

Die einachsige Dehnung ergibt sich daraus zu:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{[r(y) - r_m] \delta \alpha}{r_m \delta \alpha} \quad (3.1)$$

Mit  $r(y) = r_m + y$  eingesetzt in (3.1) ergibt sich:

$$\varepsilon_x = \frac{y}{r_m} \quad (3.2)$$

Aus den oben aufgezählten Vereinfachungen ergeben sich folgende Spannungs- und Dehnungsverteilungen:

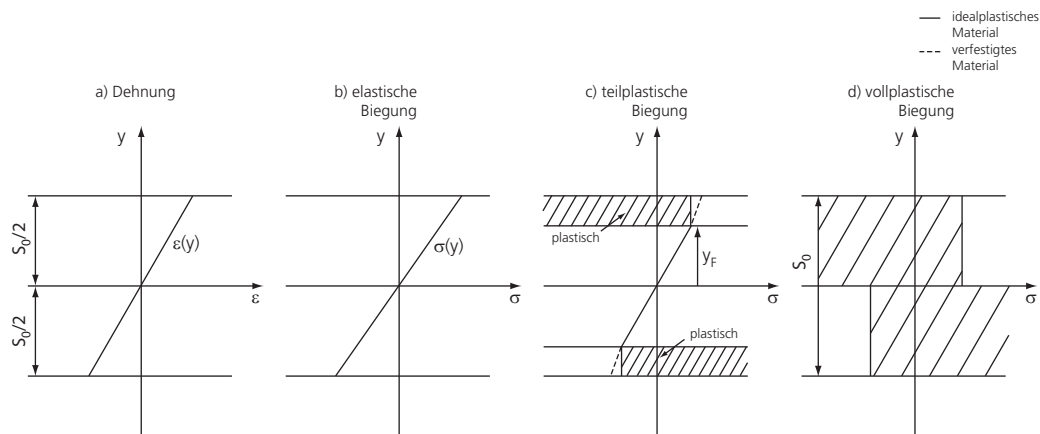


Abbildung 3.2 Spannungs- und Dehnungsverteilung beim Biegen

### Elastische Biegung

Im elastischen Fall gilt das Hookesche Gesetz. Im einachsigen Fall lautet es

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (3.3)$$

Mit der Spannung ergibt sich das Biegemoment zu

$$M_{el} = 2 \int_0^{s_0/2} \sigma_x(y) b y dy \quad (3.4)$$

Gleichung 3.4 integriert mit 3.3 und 3.2 ergibt

$$M_{el} = \frac{E b s_0^3}{12 r_m} = \frac{E J_z}{r_m} \quad (3.5)$$

### Plastische Biegung

Bei der Grenzdehnung  $\varepsilon_F$  erreichen die Aussenfasern des Querschnittes die Fließspannung  $\sigma_F$ . Somit wird das Einheitsbiegemoment (auf Blechdicke und -breite bezogenes Biegemoment) zu:

$$m_F = \frac{1}{6} \cdot \sigma_F \quad (3.6)$$

Für den teilplastischen Fall ist das Biegemoment in einen elastischen und einen plastischen Teil unterteilt:

$$M_{pl} = 2 \int_0^{y_f} \sigma_x(y) b y dy + 2 \int_{y_f}^{s_0/2} \sigma_x(y) b y dy \quad (3.7)$$

Dabei ist die Dehnung aus 3.1 bekannt. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung  $\sigma_x(\epsilon)$  folgt aus dem Zugversuch.

Beim vollplastischen Fall ergibt sich das Einheitsmoment zu:

$$m_{vpl} = \frac{I}{4} \sigma_F = \frac{3}{2} m_F \quad (3.8)$$

### Bauschingerereffekt

Unter Bauschingerereffekt versteht man die richtungsbestimmte Änderung der Elastizitätsgrenze nach einer vorangegangener plastischen Verformung. Dieser Effekt spielt vor allem beim Richten eine Rolle, da dort die Dehnungsrichtung gewechselt wird. Er kann aber auch beim Biegen in eine Richtung auftreten, da sich dort lokal die Dehnungsrichtung ändern kann.

### Eigenspannungen

Durch die elastischen Anteile der Umformung federt das Bauteil nach Entfernen des Biegemomentes um einen Betrag  $\Delta\beta$  zurück. Bei der Berechnung der Rückfederung und der Restspannung geht man davon aus, dass die Formänderung dabei rein elastisch geschieht.

Beim Aufbringen des Biegemomentes  $M_B$ , wirkt auf dem Bauteil auf der Aussenseite eine Zugspannung und auf der Innenseite eine Druckspannung. Übersteigen diese Spannungen in gewissen Bereichen die Fließgrenze des Materials, kommt es dort zu plastischer Verformung. Sobald das Bauteil entlastet wird, wirkt ein fiktives Biegemoment  $M_{Rueck}$  in der Gegenrichtung mit rein elastischen Anteilen. Die Überlagerung der Biegemomente und -spannungen liefert die bleibende Dehnung nach Entlastung des Werkstücks (siehe Abbildung 3.3).

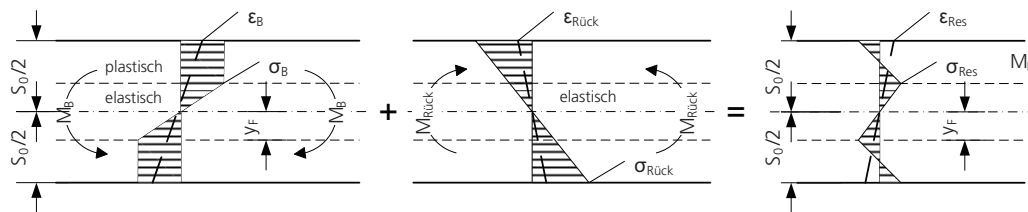


Abbildung 3.3 Spannungen und Dehnungen vor und nach der Entlastung

### Reibung - Schmierung

Der Einfluss der Reibung beim Biegen ist im Allgemeinen relativ klein und wird deshalb vernachlässigt. Eine Schmierung beim Biegen ist deshalb in der Regel nicht nötig.

### Anwendungsbereich

Biegen hat zahlreiche Anwendungsgebiete. Diese können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden. Einerseits das Biegen von Blechen, andererseits das Biegen von Rohren und Profilen, wobei im Kontext mit dem Fließformbiegen vor allem das Biegen von Rohren und



Profilen eine Rolle spielt. Im Bereich Rohr- und Profilbiegen gibt es zahlreiche Anbieter sowohl von einfachen Handgeräten als auch von Maschinen zur industriellen Fertigung. Abnehmer von gebogenen Profilen und Rohren sind unter anderem die Automobilindustrie und die Flugzeughersteller.

### 3.1.2 Walzen

Walzen gehört zu den Druckumformverfahren und kann gemäss DIN 8583 folgendermassen geordnet werden (Abbildung 3.4).

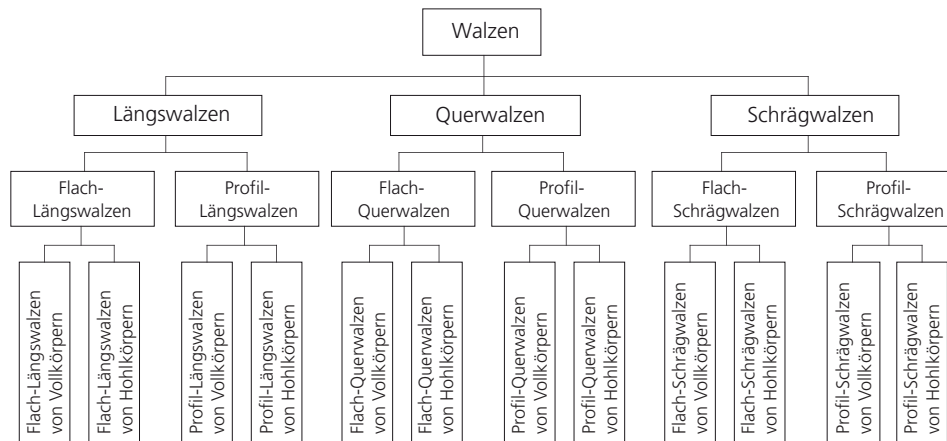


Abbildung 3.4 Ordnungssystem der Walzverfahren nach DIN 8583, Bl.2

Walzen ist als stetiges oder schrittweises Druckumformen mit einem oder mehreren sich drehenden Werkzeugen (Walzen) definiert. Die Kraft wird entweder durch angetriebene Walzen oder durch vom Walzgut geschleppte Walzen eingeleitet. Das Walzen kann nach der Kinematik in Längs-, Quer- und Schrägwalzen eingeteilt werden (Abbildung 3.4).

#### Grundbegriffe

Bei den Walzverfahren werden vom Werkzeug auf einen Teil der Werkstückoberfläche Druckspannungen aufgebracht. Diese rufen im Werkstück innere Spannungen hervor, die den Werkstoff in der Umformzone zum Fließen bringen.

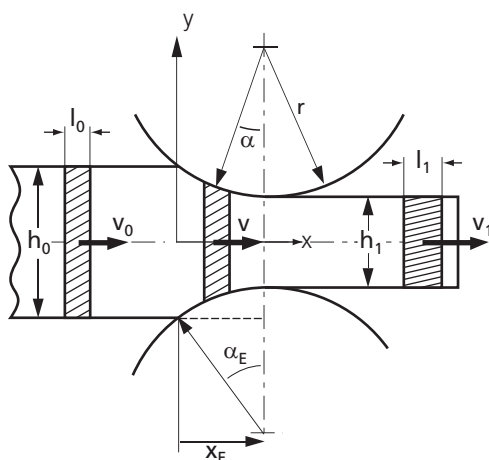


Abbildung 3.5 Bezeichnungen beim Flach-Längswalzen

Die Höhenabnahme beim Walzen (Stichabnahme) ist in Gleichung 3.9 definiert:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 2r(1 - \cos \alpha_E) \quad (3.9)$$

Dabei ist  $\alpha_E$  der Walzwinkel.

Nach der Kontinuitätsgleichung gilt:

$$v_0 \cdot h_0 \cdot b_0 = v \cdot h \cdot b = v_1 \cdot h_1 \cdot b_1 \quad (3.10)$$

Für  $b/x_E \geq 20$  ist die Zunahme in der Breite (Breitung) aufgrund des hohen Reibwiderstandes in dieser Richtung vernachlässigbar klein. Mit der Annahme  $b_0 = b = b_1$  gilt für die Geschwindigkeit in x-Richtung:

$$v = v_0 \cdot h_0 / h \quad (3.11)$$

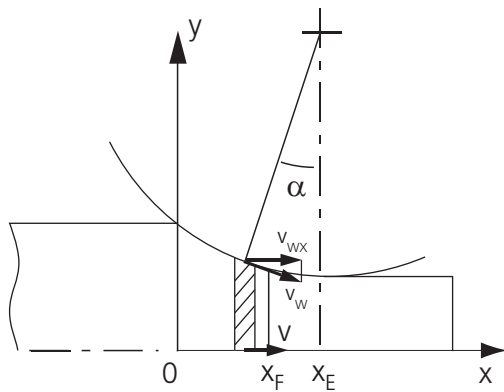


Abbildung 3.6 Geschwindigkeiten im Walzspalt

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Walze und Walzgut ist an der Stelle  $x_F$  gleich Null. Dieser Querschnitt wird auch Fliessscheide oder neutraler Querschnitt genannt. Die Fliessscheide teilt die Umformzone in die Nacheilzone ( $0 \leq x < x_F$ ) und die Voreilzone ( $x_F < x \leq x_E$ ) auf. Für die Nacheilzone ist die Geschwindigkeit des Walzgutes kleiner und für die Voreilzone grösser als die horizontale Komponente der Walzenumfangsgeschwindigkeit.

### Spannungen im Walzspalt

Nach LANGE ist das Flach-Längswalzen bei Vernachlässigung der Breitung ein Problem, welches mit der elementaren Plastizitätstheorie näherungsweise beschrieben werden kann [1].

Für die Spannung im Walzspalt ergibt sich die folgende Differenzialgleichung:

$$\frac{d(\sigma_x \cdot h)}{dx} + 2\sigma_y \tan(\alpha \pm \rho) = 0 \quad (3.12)$$

mit positivem Wert für  $\rho$  in der Voreilzone und negativem Wert in der Nacheilzone. Für kleine Walzwinkel können zudem Vereinfachungen gemacht werden.

$$\mu = \tan \rho \approx \rho \quad (3.13)$$

$$\tan(\alpha \pm \rho) \approx \alpha \pm \rho \approx \alpha \pm \mu \quad (3.14)$$

$$\alpha = \sin \alpha = \frac{x_E - x}{r} \quad (3.15)$$

Aus (3.13), (3.14) und (3.15) ergibt sich:

$$\tan(\alpha \pm \rho) \approx \left( \frac{x_E - x}{r} \pm \mu \right) \quad (3.16)$$

Unter der Annahme, dass beim Walzvorgang keine überlagerten Längsspannungen auftreten, folgt, dass der Betrag der Längsspannung  $\sigma_x$  klein gegenüber  $\sigma_y$  ist. Daher folgt aus dem FlieBskriterium von Tresca ( $\sigma_x - \sigma_y = k_f$ ):

$$\sigma_y \approx -k_f \quad (3.17)$$

Setzt man nun (3.16) und (3.17) in die ursprüngliche Differenzialgleichung (3.12) ein, erhält man

$$\frac{d(\sigma_x \cdot h)}{dx} - 2k_f \left( \frac{x_E - x}{r} \pm \mu \right) = 0. \quad (3.18)$$

Während des Walzens ändert sich die FlieBsspannung  $k_f$ , daher wird näherungsweise mit der mittleren FlieBsspannung  $k_{fm} = (k_{f0} + k_{f1})/2$  weitergerechnet.

Mit den Randbedingungen  $\sigma_x = 0$  für  $x = 0$  und  $x = x_E$  erhält man für die Integration der Gleichung (3.18) für die Nacheilzone

$$\sigma_{x_1} \cdot h = 2 \cdot k_{fm} \left( \frac{x_E \cdot x}{r} - \frac{x^2}{2r} - \mu x \right) \quad (3.19)$$

und für die Voreilzone

$$\sigma_{x_2} \cdot h = 2 \cdot k_{fm} \left( \frac{x_E \cdot x}{r} - \frac{x^2}{2r} + \mu x \right) - 2 \cdot k_{fm} \left( \frac{x_E^2}{2r} + \mu x_E \right) \quad (3.20)$$

Mit dem Tresca FlieBskriterium  $\sigma_x - \sigma_y = k_f$  können auch die Spannungen in y-Richtung berechnet werden:

$$\sigma_{y_1} = -k_{fm} \left( 1 - \frac{2}{h} \left( \frac{x_E \cdot x}{r} - \frac{x^2}{2r} - \mu x \right) \right) \quad (3.21)$$

$$\sigma_{y_2} \cdot h = -k_{fm} \left( 1 - \frac{2}{h} \left( \frac{x_E \cdot x}{r} - \frac{x^2}{2r} + \mu x - \frac{x_E^2}{2r} + \mu x_E \right) \right) \quad (3.22)$$

#### Lage der FlieBsscheide

Die Grösse  $\sigma_x \cdot h$  ist die auf die Breite des Walzgutes bezogene Horizontalkraft. Diese soll an der FlieBsscheide stetig sein, d.h. an der Stelle  $x_F$  soll

$$\sigma_{x_1} \cdot h = \sigma_{x_2} \cdot h \quad (3.23)$$

sein. Mit dieser Bedingung ergibt sich die Lage der FlieBsscheide  $x_F$  zu

$$x_F = \frac{x_E}{2} \left( 1 + \frac{x_E}{2\mu r} \right). \quad (3.24)$$

Damit das Walzgut nach dem Greifen auch durchgezogen werden kann, muss eine Fließscheide in der Umformzone vorhanden sein, d.h. die Bedingung

$$x_F \leq x_E \quad (3.25)$$

erfüllt sein. Daraus ergibt sich zusammen mit (3.24):

$$\frac{x_E}{2} \left( 1 + \frac{x_E}{2\mu r} \right) \leq x_E \quad (3.26)$$

Die Ungleichung ist erfüllt bei

$$x_E = 0 \quad (3.27)$$

und

$$x_E/r \leq 2\mu. \quad (3.28)$$

Da die Lösung  $x_E = 0$  eine Höhenabnahme von Null ergibt, macht sie walztechnisch keinen Sinn. Mit der Näherung  $x_E/r = \sin \alpha_E \approx \alpha_E$  ergibt sich (3.28) zur sogenannten Durchziehbedingung

$$\alpha_E \leq 2\mu. \quad (3.29)$$

Ein Vergleich mit der Greifbedingung  $\alpha_E \leq \mu$  zeigt, dass einmal gegriffenes Material auch durchgezogen wird.

Walzkraft und Drehmoment

Für die Walzkraft und das Drehmoment gilt:

$$F = b \int_0^{x_E} \sigma_y dx \quad (3.30)$$

$$M_d = b \int_0^{x_E} \sigma_y (x_E - x) dx = F \cdot l \quad (3.31)$$

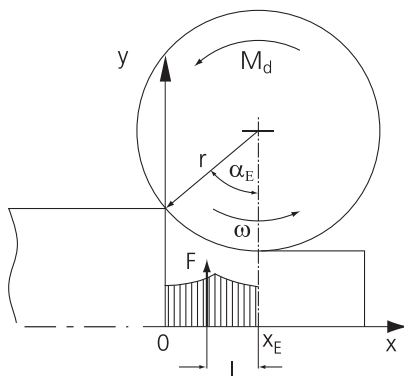


Abbildung 3.7 Drehmoment und Walzkraft beim Walzen

*Reibung - Schmierung*

Im Unterschied zum Biegeprozess, wo die Reibung vernachlässigt wird, hat der Reibwert  $\mu$  beim Walzen auf die Spannungen und somit auf den ganzen Prozess einen Einfluss.

*Anwendungsbereich*

Anwendungsbereiche sind ganz verschieden und hängen von der jeweiligen Art des Walzverfahrens ab. Das Walzen wird im Bereich der Halbzeug- und Halbfertigteil-Herstellung eingesetzt, so z.B. für die Herstellung von Rohren oder Profilen. Mit dem Walzen können allerdings auch Fertigteile hergestellt werden, so z.B. Schrauben mit dem Gewindewalzverfahren.

**3.1.3 Fließformbiegen**

Die Idee des Fließformbiegens ist, die neutrale Faser des Biegens, welche üblicherweise zwischen dem Innen- und dem Aussenradius liegt, auf die Seite des Innenradius zu verschieben (siehe Abbildung 3.8). Dadurch sollen Druckspannungen im Innenradiusbereich (vgl. Abschnitt Kapitel 3.1.1) eliminiert und somit Faltenbildung verhindert werden. Um das zu erreichen, wird beim Aussenradius das Material durch Walzen (Walzrolle) ausgedünnt und somit die neutrale Faser in Richtung Innenradius verschoben. Die Z-Rollen walzen das Material dann abhängig vom Ort der neutralen Faser aus, d.h. beim Aussenradius wird das Material gleich stark wie bei der Walzrolle ausgedünnt, zur neutralen Faser hin nimmt die Ausdünnung linear bis Null ab.

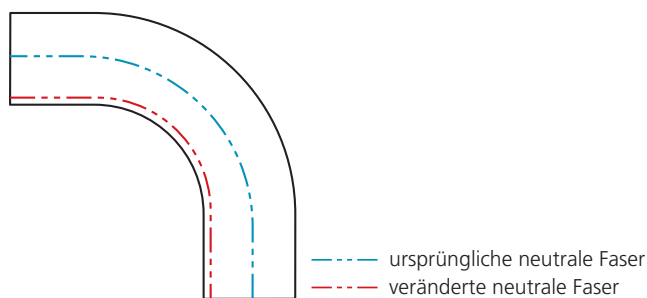


Abbildung 3.8 Verschiebung der neutralen Faser

*Werkzeugaufbau*

Das Schema in Abbildung 3.9 zeigt den Aufbau der Werkzeuge beim Fließformbiegen bei einem geschlossenen Profil (Ansicht von oben). Bei offenen Profilen fällt der Innendorn weg (mehr dazu in Kapitel 4). Rot eingetragen sind alle Kräfte, die von der Biegemaschine entweder gesteuert oder gemessen werden können. Das umzuformende Profil wird mit einem Schubschlitten durch Walz- und Mittelrolle durchgedrückt. Mit der Biegerolle wird zudem ein Biegemoment auf das Profil aufgebracht. Die Stützrolle verhindert, dass das Profil durch das Biegemoment nicht knicken kann. Im Bereich der Walzebene sorgt der Innendorn dafür, dass die Profilwände einzeln gewalzt werden können und das Profil nicht zusammengedrückt werden kann. Durch die unterschiedliche Grösse von Walzrolle und Mittelrolle wird erreicht, dass bei einer bestimmten Kraft nur im Bereich der Walzrolle gewalzt wird, während dem das Material bei der Mittelrolle nicht ausgedünnt wird.

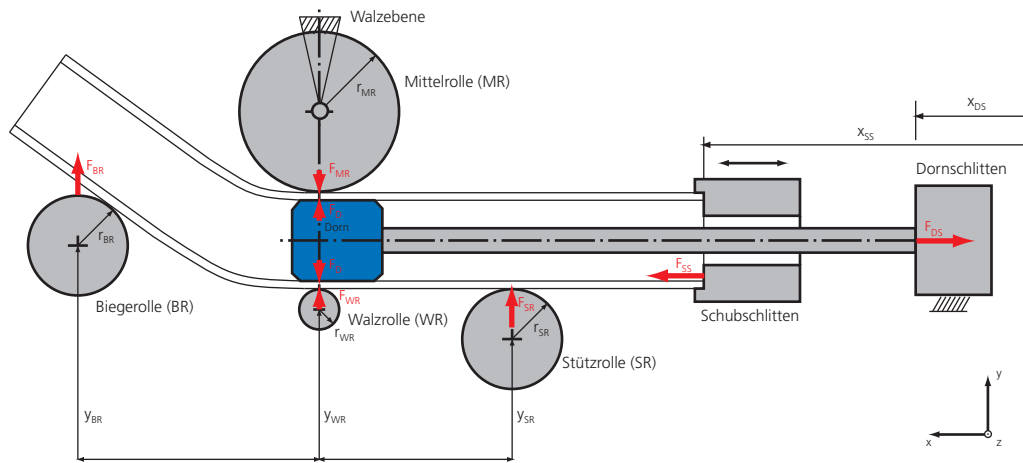


Abbildung 3.9 Kräftemodell Fließformbiegen

Abbildung 3.10 zeigt die Ansicht des Werkzeugaufbaus von vorne. Die Z-Rollen sind zusätzliche Walzrollen, die abhängig von der Endgeometrie das Profil unterschiedlich auswalzen.

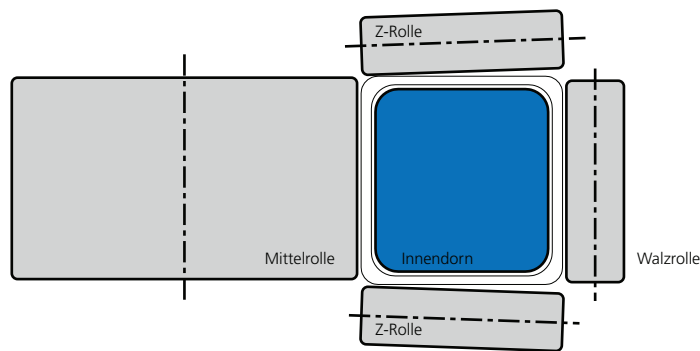


Abbildung 3.10 Rollenordnung geschlossenes Profil

*Berechnung der Ausdünnung*

Die notwendige Ausdünnung wird mithilfe der Volumenkonstanz berechnet. Sowohl der Innen- als auch der Aussenradius sind aus den Angaben des Auftraggebers bekannt. Für die Berechnung der Ausdünnung wird mit dem Aussenradius gerechnet. Es wird angenommen, dass die Breitung des gewalzten Blechs zu vernachlässigen ist. Die Position der neutralen Faser des Biegeteils kann über den Faktor  $a$ , der zwischen 0 und 1 definiert ist, bestimmt werden. Bei  $a=1$  fällt die neutrale Faser mit dem Innenradius zusammen (siehe Abbildung 3.11). Da der Faktor  $a$  maximal den Wert 1 annimmt, wird folglich nur beim Aussenradius ausgewalzt.

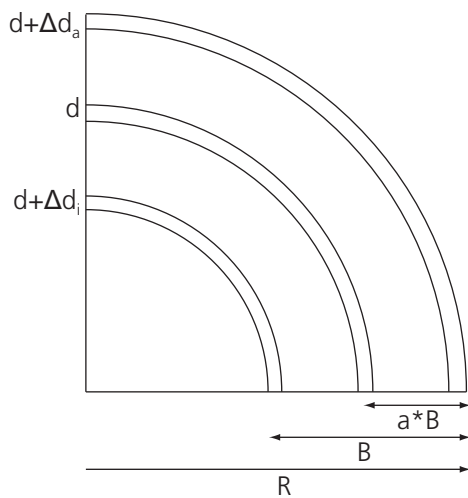


Abbildung 3.11 Schema der Ausdünnung

Bei der neutralen Faser ist die Längung des Materials gleich Null. Mit der Volumenkonstanz gilt für die Ausdünnung aussen:

$$R(d + \Delta d_a) = (R - aB)d \quad (3.32)$$

$$\Delta d_a = \frac{-aBd}{R} \quad (3.33)$$

Für die Ausdünnung innen gilt:

$$(R - B)(d + \Delta d_i) = (R - aB)d \quad (3.34)$$

$$\Delta d_i = \frac{(1 - a)Bd}{R - B} \quad (3.35)$$

Diese Berechnungsformel werden bei der Klingelberg AG angewendet und auch den Kunden für die Festigkeitsberechnung zur Verfügung gestellt.

Wird der Faktor  $a = 1$  gesetzt und die Ausdünnung beim Aussenradius für einen vorgegebenen Krümmungsradius berechnet und auch angewendet, erreicht das Bauteil theoretisch den vorgegebenen Radius ohne Einwirkung der Biegerolle. In der Regel wird beim Prozess jedoch zusätzlich zum Walzprozess ein Biegen überlagert.

#### Grösse der Walz- und Mittelrolle

Die Firma Klingelberg arbeitet seit über drei Jahren im Bereich Fließformbiegen. Seit Beginn hat sich das Konzept der Walz- und Biegerollen grundsätzlich verändert. Ursprünglich waren vor allem die Walzrollen wesentlich grösser. Die heute verwendeten Walzrollen haben, sofern Minirollen verwendet werden, einen Durchmesser von 16 mm. Betrachtet man die Walztheorie in Abschnitt 3.1.2, so sind folglich die Walzkräfte und dementsprechend auch die benötigten Schubkräfte kleiner geworden. Dies wiederum hat zur Folge, dass Profile weniger schnell stauchen oder knicken und dadurch eine stärkere Auswalzung und engere Krümmungsradien möglich sind.

Das Konzept von unterschiedlich grossen Rollen für Walz- und Mittelrolle ist bei Hohlprofilen zwingend notwendig. Aus Abbildung 3.9 kann der Schluss gezogen werden, dass ein Aufbringen einer Walzkraft auch eine Reaktionskraft bei der Mittelrolle zur Folge hat. Da die Walzkraft proportional zum Walzrollendurchmesser ist, beginnt die plastische Formänderung durch Walzen bei einer kleineren Rolle bereits früher, d.h. bei einer geringeren Walzkraft. Somit kann erreicht werden, dass auf der Seite der Walzrolle, also beim Aussenradius, das Profil ausgewalzt wird, während dem das Profil im Bereich der Mittelrolle noch keine plastische Formänderung erfährt.

*Überlagerung von Biegen und Walzen*

Das Biegen mit überlagerter Druckspannung wird nach MEIER und GÄNSICKE anhand des Walzrundbiegens beschrieben [4]. Es zeigt in Bezug auf Umformvermögen klare Vorteile gegenüber dem herkömmlichen Verfahren. Im Unterschied zu dieser Überlagerung, wo keine plastische Verformung durch die Druckspannung erzeugt wird, wird beim Fließformbiegen durch das Walzen eine plastische Formänderung bewirkt.

In Abbildung 3.12 ist eine vereinfachte Darstellung der Zug- und Druckkräfte aufgezeigt. Dabei wird angenommen, dass sowohl Walzen- als auch Biegekräfte auf den Prozess wirken.

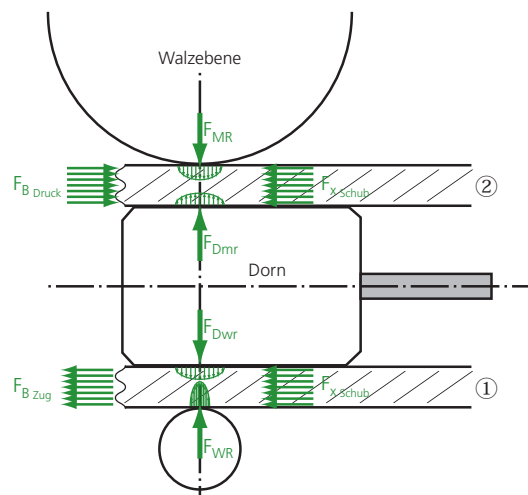


Abbildung 3.12 Kräftemodell im Walzspalt

Aus der Walztheorie ist bekannt, dass die Grösse der Rollen Einfluss auf die Spannungsverhältnisse hat. Dabei wird immer von gleich grossen Walzrollenpaaren ausgegangen. Wie sich jedoch unterschiedlich grosse Rollen, wie es zwischen Walzrolle und Innendorn vorkommt, auf den Fließformbiegeprozess auswirken, ist nicht bekannt und soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

*Grenzen des Fließformbiegens*

Die Möglichkeiten des Fließformbiegens werden durch bauteil- und maschinenspezifische Kriterien begrenzt.

Maschinenspezifisch wird der Prozess durch

- die maximal möglichen Walz- und Schubkräfte und auch durch
- die Beschränkung der Verfahrswege begrenzt.



Bauteilspezifisch wird das Verfahren sowohl durch

- die Bruchdehnung des Materials (vorwiegend in den Kanten), als auch durch
- geometrische (Knicken) und materielle (Stauchungen) Instabilitäten begrenzt.

Die Bruchdehnung ist ein Materialkennwert, der durch Materialversuche ermittelt werden kann. Stauchen und Knicken kann, zumindest für den Idealfall der reinen Druckbelastung, berechnet werden. Nachfolgend wird anhand von zwei Profilen gezeigt, welcher der beiden Versagensfälle auftreten wird und bei welchen Druckkräften das Profil versagen wird.

Die kritische Last für Knicken nach Euler wird folgendermassen berechnet [8]:

$$F_k = \frac{\pi^2 EI}{s^2} \quad (3.36)$$

Wobei E der E-Modul, I das Flächenträgheitsmoment und s die Knicklänge ist. Die Knicklänge ist abhängig vom Eulerlastfall und als  $s = \beta \cdot L$  definiert. In Abbildung 3.13 sind die vier Eulerfälle dargestellt.

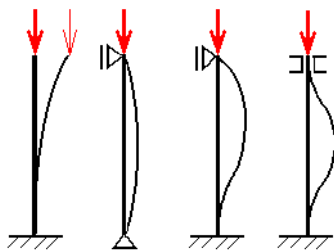


Abbildung 3.13 Eulerfälle aus [7]

Von links nach rechts gelten die Randbedingungen: eingespannt/frei (1), gelenkig/gelenkig (2), eingespannt/gelenkig (3) und eingespannt/eingespannt (4). Dabei gilt für  $\beta$  bei

- (1) = 2
- (2) = 1
- (3) = 0.699
- (4) = 0.5

Die Berechnung für das Trägheitsmoment kann aus der Literatur entnommen werden (z.B. aus [6]). Für komplexere Querschnitte empfiehlt sich die Berechnung mithilfe einer CAD Software durchzuführen.

Fließformbiegen ist ein komplexer Prozess, der analytisch nur schwer zu beschreiben ist. Daher sollen in den Untersuchungen anhand von verschiedenen virtuellen Versuchen zumindest einige der umformtechnischen Grundlagen, wie z.B. das Walzen mit unterschiedlichen Walz- und Mittelrollenkombinationen, erarbeitet und beschrieben werden.

### 3.2 Simulation mit FE

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung von Differenzialgleichungen. Mit der FE-Methode können Berechnungsaufgaben verschiedenster Disziplinen gelöst werden. Zur Berechnung von Deformationen wird ein Modell eines Bauteils in eine endliche (finite) Anzahl Elemente unterteilt. Da es sich im vorliegenden Fall um ein 3-D Problem handelt, werden die Bauteile in Quaderelemente aufgeteilt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden mithilfe der FE-Methode verschiedene Biege- und Walzprozesse simuliert. Am Institut für Virtuelle Produktion (IVP) wird unter anderem das multipurpose Programm Marc von MSC verwendet. Marc ist Teil von MSC SimOffice und bietet auch die Möglichkeit, nicht-lineare Probleme zu lösen. Dr. C. Karadogan vom IVP hat mit dieser Software bereits mehrere Berechnungen im Bereich Fließformbiegen für die Klingelberg AG durchgeführt. Die von ihm durchgeführten Simulation dienen auch als Grundlage für die Berechnungen in dieser Arbeit.

Abbildung 3.14 zeigt die Oberfläche des FE Programms Marc.

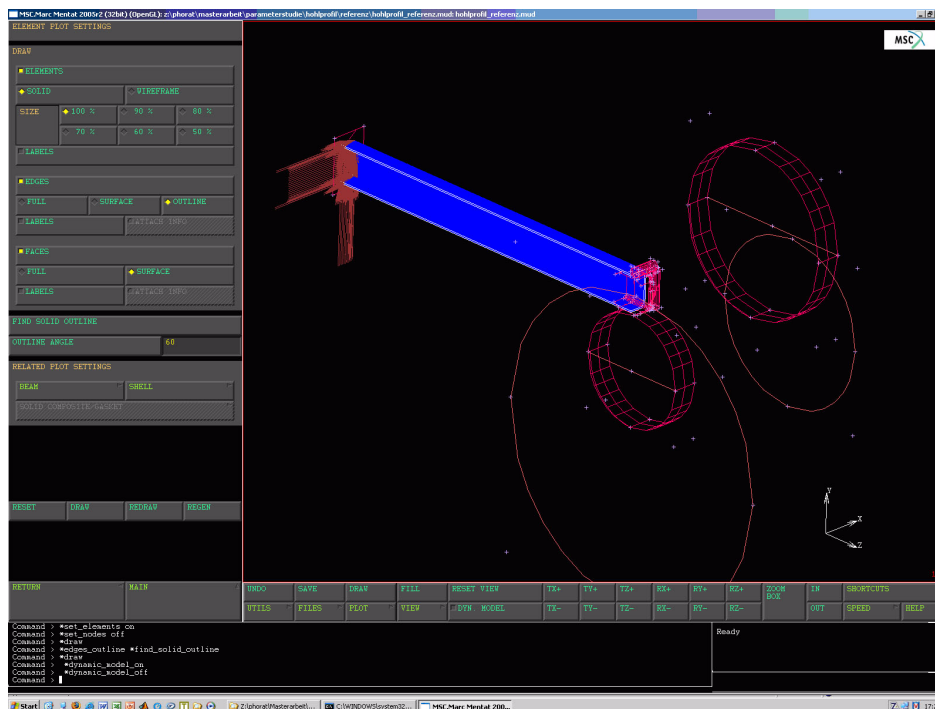


Abbildung 3.14 Printscreen MSC Marc

Mithilfe der FE Simulation und den umformtechnischen Grundlagen können nun virtuelle Versuche mit dem Fließformbiegeprozess durchgeführt werden. Diese Versuche sollen Einflüsse von Parametern, welche aus den analytischen Betrachtungen teilweise noch nicht bekannt sind, aufzeigen.



## 4 Wirkmechanismen des Fließformbiegens

In Kapitel 2 wurde die Serienfähigkeit des Fließformbiegens betrachtet. Daraus geht hervor, dass zur Zeit noch einige Einflussstärken unbekannt sind und die in Abschnitt 2.3 genannten Problemfelder in Bezug auf die Serienfähigkeit noch zu untersuchen sind. In Kapitel 3 wurden die theoretischen Grundlagen für das Fließformbiegen, sowie die Simulation mit Finiten Elementen beschrieben.

Aus den Problemfeldern in Kapitel 2 und den in Kapitel 3 gewonnenen Grundlagen werden nachfolgend verschiedene virtuelle Versuche zum Fließformbiegen durchgeführt. Zuerst wird ein Referenzprozess für das Fließformbiegen formuliert. Dieser dient als Ausgangslage für die FE Simulationen. Zunächst werden diverse virtuelle Walzversuche durchgeführt, bei denen noch keine überlagerte Biegung berücksichtigt wird. Diese sollen den Einfluss von verschiedenen Parametern beim Walzen aufzeigen. Anschliessend wird das Fließformbiegen (Walzen und Biegen) von ganzen Profilen, konkret eines offenen und eines geschlossenen Profils, simuliert. Eine Trennung zwischen offenen und geschlossenen Profilen wird deshalb vorgenommen, weil sich der Werkzeugaufbau der beiden Profilarten unterscheidet und z.B. Probleme des Innendorns ausschliesslich mit geschlossenen Profilen aufgezeigt werden können. Die Simulationen mit den Profilen sollen anhand einer Parameterstudie zeigen, welche Grössen wie auf das Fließformbiegen einwirken. Zum Schluss werden die Erfahrungen bezüglich der FE Simulationen und der umformtechnischen Mechanismen gezeigt.

### 4.1 Formulierung eines Referenzprozesses „Fließformbiegen“

In Kapitel 3.1 wurden die mechanischen Vorgänge beim Biegen, Walzen und bei der Kombination der beiden Prozesse, dem Fließformbiegen, aufgezeigt. Als Grundlage für die Simulationen eines beliebigen Bauteils wird ein Referenzprozess definiert. Dieser soll aufzeigen, welche Komponenten und Parameter den Prozess „Fließformbiegen“ beeinflussen können und welche Outputgrössen das System hat. Die Inputparameter können Steuer- und allenfalls auch Regelgrössen sowohl für den realen als auch für den virtuellen Prozess sein. Die Outputparameter sind einerseits Qualitätskriterien, könnten andererseits aber auch für eine allfällige Regelung des Prozesses verwendet werden (adaptive Regelung). In Abbildung 4.1 ist der Referenzprozess „Fließformbiegen“ abgebildet.

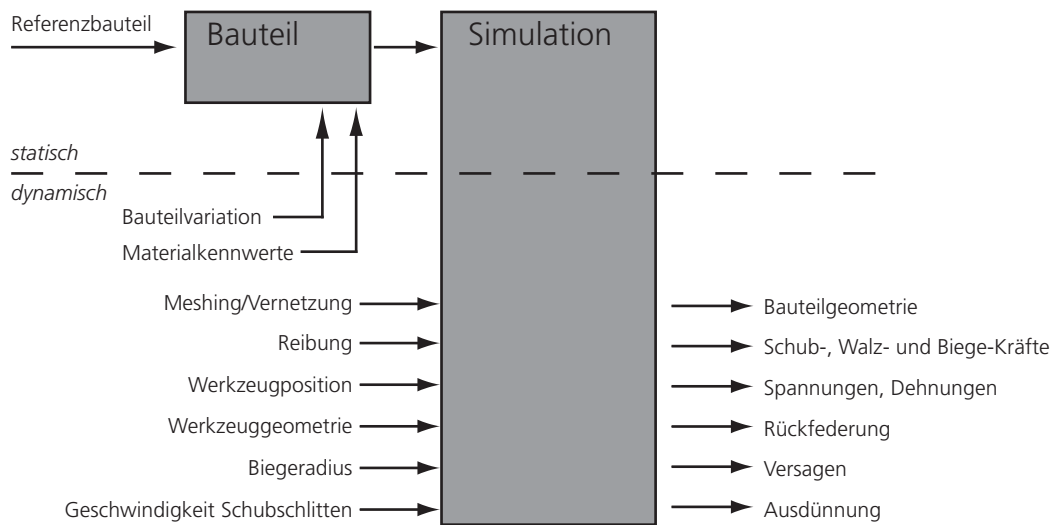


Abbildung 4.1 Referenzprozess mit Input- und Outputparametern

In der Abbildung 4.1 sind auf der linken Seite die Inputparameter und auf der rechten Seite die Outputgrößen abgebildet.

#### 4.1.1 Inputparameter

Die Inputparameter sind unterteilt in statische und in dynamische Größen. Das umzuförmende Bauteil ist grundsätzlich eine statische Grösse, definiert durch das Referenzbauteil, jedoch kann mit einem dynamischen Parameter "Bauteilvariation" das Bauteil verändert werden. Die Bauteilvariation kann verschiedene Gröszen beinhalten, so z.B. die Wandstärke oder allenfalls auch eine Geometrieangepassung des Ausgangswerkstücks.

Die Materialkennwerte sind ebenfalls dynamische Gröszen, die direkt Einfluss auf die Eigenschaften des Bauteils haben. Alternativ dazu können die Materialkennwerte als direkt auf die Simulation einwirkenden Gröszen definiert werden, da sie im Simulationsprogramm angepasst werden können, ohne das Bauteil direkt zu verändern.

Unter Meshing versteht man die Vernetzung des Bauteils bei FE Simulationen. Die Grösze der Elemente ist entscheidend für die Genauigkeit der Simulation. Das Netz wird beim Aufsetzen einer Simulation definiert, kann jedoch mit Remeshing Funktionen während dem Prozess angepasst werden und ist somit eine dynamische Grösze.

Die Reibung ist ein dynamischer Parameter, der beim realen Bauteil über die Beschaffenheit der Oberfläche von Bauteil und Werkzeugen und vom Schmiermittel (falls eines verwendet wird) abhängt.

Alle übrigen Inputgröszen sind Steuerungsparameter für die Werkzeuge.

#### 4.1.2 Outputparameter

Als Outputparameter definiert sind: Bauteilgeometrie, Kräfte (Schubschlittenkräfte, Walzrollenkräfte, Biegerollenkräfte), Spannungen, Dehnungen, Ausdünnung, Rückfederung und Versagen (Falten, Risse usw.). Diese Ausgangsgröszen sind einerseits ein Mass für die Qualität der hergestellten Bauteile, andererseits zeigen sie, ob die Bauteile überhaupt herstellbar sind. Die Outputparameter können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Parameter der Fließformbiegemaschine und Parameter des Bauteils.

Für die Biegemaschine sind vor allem die Kräfte auf die Werkzeuge interessant. Die für die Umformung benötigten Kräfte geben Auskunft über die Herstellbarkeit der Bauteile. Liegen die Walz- und Schubkräfte oberhalb der Möglichkeiten der Biegemaschine, kann das Bauteil nicht hergestellt werden.

Alle weiteren Parameter betreffen vorwiegend das Bauteil. Die Bauteilgeometrie liefert den Biegeradius des Bauteils sowie die Genauigkeit der Kontur im Vergleich zum Soll-Bauteil. Zu grosse Abweichungen von der Vorgabe ergeben Ausschuss und sind für die Serienfähigkeit nicht zulässig. Zusammenhängend mit der Bauteilgeometrie sind auch die Ausdünnung und die Rückfederung. Die Ausdünnung zeigt einerseits an, wo sich die neutrale Faser befindet. Andererseits ist sie ein Mass für die Festigkeit des verformten Bauteils für die weitere Verwendung. Die Stärke der Rückfederung bestimmt, wie die endgültige Kontur des Biegeteils nach dem Entlasten sein wird. Die Rückfederung hängt mit der Kraft in der Biegerolle zusammen und ist auch abhängig von der Ausdünnung und der Position der neutralen Faser. Die Dehnungen im verformten Bauteil geben darüber Auskunft, welche Stellen (vor allem im Kantenbereich) bezüglich Versagen kritisch werden könnten. Das Versagen zeigt auf, an welchen Stellen im Bauteil Risse oder Faltenbildung auftreten werden.

## 4.2 Grundlagenversuche

In Abbildung 2.4 bzw. in Anhang A sind die kritischen Parameter des Fließformbiegens aufgezeigt. Bei Simulationen, die den gesamten Fließformbiegeprozess anhand eines konkreten Profils untersuchen, ist es sehr schwierig, die Einflüsse von Parameterveränderungen zu entkoppeln, da gleichzeitig gewalzt und gebogen wird. Um die Einflüsse von einzelnen Parametern zu eruieren, werden deshalb zuerst verschiedene virtuelle Grundlagenversuche durchgeführt. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Walzsimulationen. Diese sollen die folgenden Gesichtspunkte genauer betrachten:

- Rollengeometrie, insbesondere Radienverhältnisse
- Reibung
- Material
- Rollenkinematik

Ziel der Walzversuche ist es, die Einflüsse der Walzoperation auf die Fließformbiege-Simulationen zu untersuchen.

Bevor jedoch auf die Walzversuche eingegangen wird, soll zunächst der Aufbau der FE Simulation beschrieben werden, die als Basis für alle Walzversuche verwendet wird.

### 4.2.1 Aufbau der Simulation

Der Aufbau der virtuellen Walzversuche ist mit Ausnahme der Werkzeugkonfiguration, der Blechgrösse und der Vernetzung bei allen Simulationen gleich. Der simulierte Prozess dauert 10 Sekunden. Berechnet werden 1000 Schritte (Inkrementen), wobei jeder zehnte für die Auswertung abgespeichert wird.

Sofern nicht explizit angegeben, werden für alle Versuche dieselben Materialdaten verwendet. Als Ausgangsmaterialien dienen die Stahlsorten DC 04, DP 600 und DP 800. Wenn nicht anders angegeben, dient DC 04 als Referenzmaterial. Die Fließkurven für diese Materialien stammen alle aus der Materialdatenbank des FE-Pakets Autoform. Zusätzlich zu den drei Datensätzen werden noch drei abgeänderte Materialkurven von DC 04 verwendet. "DC 04

V1" ist um +20 MPa und "DC 04 V2" um -20 MPa zur ursprünglichen DC 04 Kurve verschoben. "DC 04 V3" ist ein Hybrid aus den vorhergehenden zwei Varianten und wird durch Gleichung (4.1) beschrieben.

$$k_f = k_f(DC04) + (\varphi - 0.5) \times 40 \quad (4.1)$$

Die Materialkurven sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

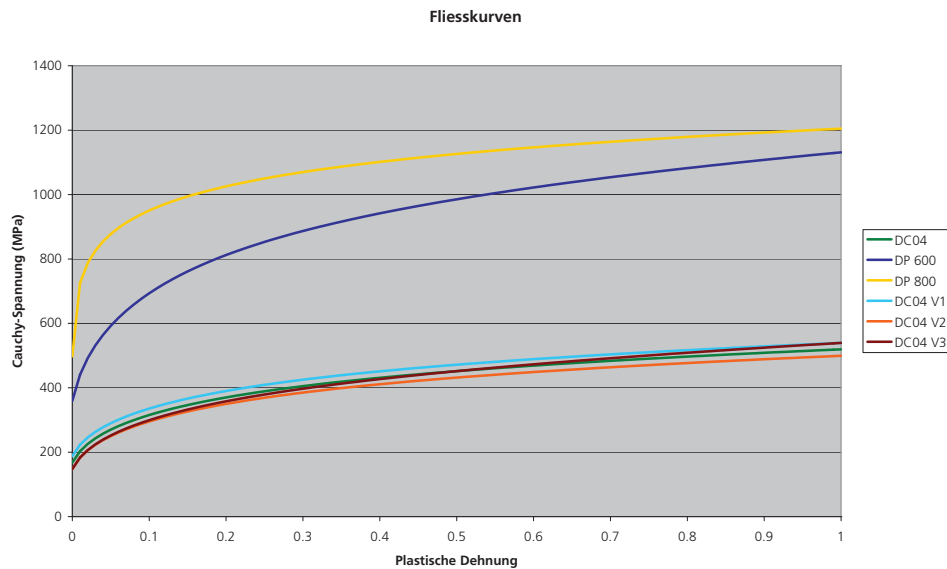


Abbildung 4.2 Fließkurven

Bei allen Grundlagenversuchen werden die Kräfte auf die Walzrolle und auf den Schubschlitten ausgewertet. Zudem wird mithilfe eines Matlab Skripts anhand von drei Knoten (jeweils Y- und Z-Koordinaten) im gewalzten Bauteil der Krümmungsradius gemessen. Das verwendete Matlab Skript befindet sich in Anhang B.

Der Werkzeugaufbau für die Versuche zur Walzrollengröße, zu den Reibkoeffizienten und zum Material ist bis auf die Walzrollengröße bei allen drei Simulationsreihen derselbe. Der verwendete Werkzeugsatz besteht aus einer Walzrolle, einer Mittelrolle, zwei Stützrollen und einem Schubschlitten. Das Blech wird mittels Schubschlitten durch die Walz- und Mittelrolle hindurch geschoben, der Schubschlitten ist dabei weggesteuert. Walz- und Mittelrolle sind angetrieben. Sie haben im Kontaktpunkt jeweils dieselbe Geschwindigkeit wie das Blech. Die ersten Versuche ohne Stützrollen haben gezeigt, dass das Bauteil knickt. Um das zu verhindern, wird das Blech in der Mitte der ursprünglichen Länge durch zwei Stützrollen gestützt (siehe Abbildung 4.3). Sämtliche Werkzeuge sind als "rigid bodies" (Starrkörper) definiert. Das Blech ist deformierbar mit einem isotropen, elasto-plastischen Materialverhalten.

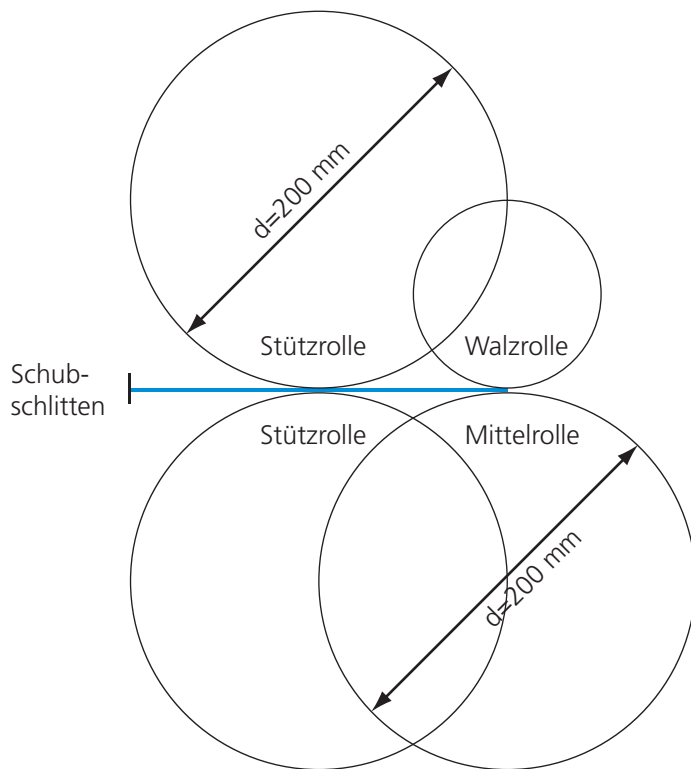


Abbildung 4.3 Simulationsaufbau Grundlagenversuche 2D

Beim Schubschlitten ist der Kontakt als "glue" definiert, die beiden Stützrollen stehen still und haben Reibkoeffizienten Null. Der Ausgangswert der Reibung für Walz- und Mittelrolle ist  $\mu = 0.1$ . Die vorgegebene Auswalzung beträgt bei allen Simulationen mit diesem Grundaufbau 0.05 mm. Der Walzspalt beträgt zu Beginn noch 2 mm, d.h. das Blech wird nicht ausgewalzt. Die Walzrolle fährt nach 0.2 von 10 Sekunden bis 0.05 mm ins Blech hinein.

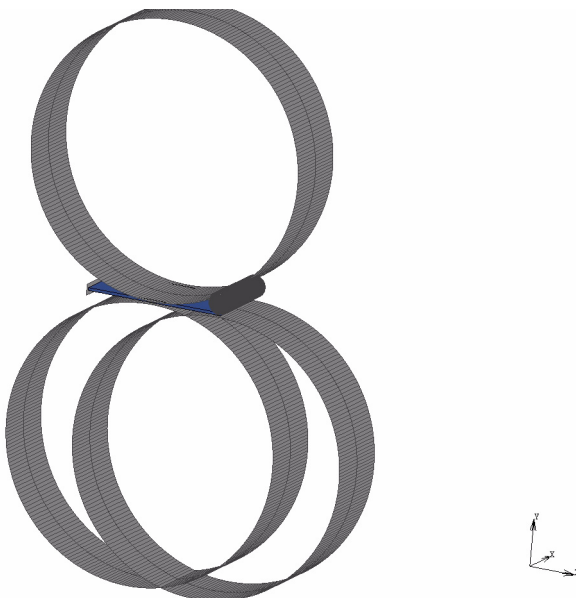


Abbildung 4.4 Simulationsaufbau Grundlagenversuche 3D



Um die Einflüsse der Vernetzung des Bauteils in der Simulation zu untersuchen, werden zwei verschiedene Bleche verwendet. Die beiden Blechvarianten unterscheiden sich in der Länge und vor allem in der verwendeten Vernetzung. Blech 1 ist das eher grob vernetzte Bauteil, Blech 2 ist die fein vernetzte Variante.

#### *Blech 1: grobe Vernetzung*

Das zu verformende Bauteil ist ein Blech mit 200 mm Länge, einer Dicke von 2 mm und einer Breite von 50 mm. Das Bauteil besteht aus insgesamt 800 Volumen-Elementen, 400 in der Längsrichtung (Z-Richtung), zwei in der Breite (X-Richtung) und eines in der Dicke (Y-Richtung). Dies entspricht in der Dickenrichtung einer rechenstechnisch abbildbaren Konfiguration für ein komplettes Profil.

#### *Blech 2: feine Vernetzung*

Das feiner vernetzte Blech ist 100 mm lang, wiederum 2 mm dick und 50 mm breit. Das Bauteil besteht aus 2000 Volumen-Elementen, 200 in der Längsrichtung (Z-Richtung), zwei in der Breite (X-Richtung) und fünf in der Dicke (Y-Richtung). Es ist in der Dickenrichtung wesentlich feiner vernetzt als Blech 1, sonst ist die Vernetzung dieselbe. Die Länge des Bauteils wird im Vergleich zu Blech 1 halbiert, damit die Anzahl Elemente nicht zu gross wird und somit die Berechnungen effizienter lösbar sind.

### **4.2.2 Minirollenoptimierung**

Für einige Werkzeuge verwendet die Firma Klingelberg Walzrollen mit 16 mm Durchmesser. Es stellt sich die Frage, ob diese Grösse optimal ist oder ob die Grösse dieser Minirollen angepasst werden muss. Aus der analytischen Betrachtung (siehe Walztheorie Abschnitt 3.1.2) ist zu erwarten, dass im Bereich von technisch realisierbaren Rollendurchmessern die Walzkraft und dementsprechend auch die Schubkraft bei kleineren Walzrollen geringer wird. Da die analytische Berechnung jeweils von zwei gleich grossen Walzrollen ausgeht, soll hier gezeigt werden, dass dies auch bei unterschiedlichen Rollendurchmessern der Fall ist. Bei der Minirollenoptimierung soll ein Zusammenhang zwischen dem Walzrollendurchmesser und der benötigten Walz- und Schubkraft hergestellt werden.

Für die Untersuchung der Walzrollengrösse werden zwei Simulationsreihen durchgeführt. Die erste mit Blech 1, also mit einer groben Vernetzung, die zweite mit dem feiner vernetzten Blech 2.

#### *Simulationen mit grober Vernetzung*

Für die Simulation werden die folgenden Walzrollengrössen verwendet:

- zwischen 4 mm und 24 mm Rollendurchmesser im Abstand von jeweils 2 mm
- zwischen 24 mm und 104 mm im Abstand von jeweils 8 mm
- 100 mm
- 200 mm

In Abbildung 4.5 ist der Walzkraftverlauf bei einem Walzrollendurchmesser von 100 mm aufgezeigt. Bei 0.2 Sekunden ist ein Maximum zu sehen. Das kommt deswegen zustande, weil zwischen 0.1 und 0.2 Sekunden die Walzrolle ins Blech hinein fährt. Ein weiterer Peak ist am Ende der Umformung zu sehen. Um die Einflüsse dieser beiden Ausschläge der Kraft zu eliminieren, wird für die folgende Auswertung jeweils der Durchschnitt zwischen Zeitwert 2 Sekunden und 8 Sekunden berechnet.

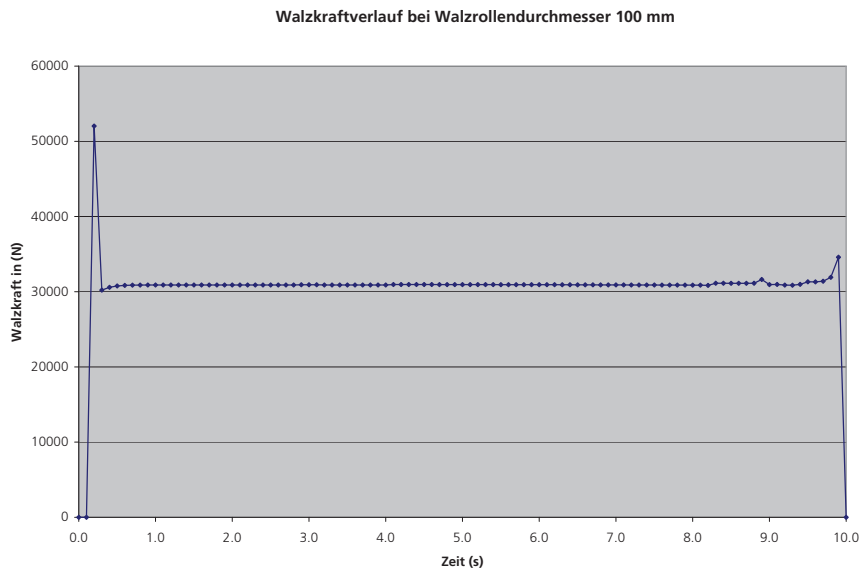


Abbildung 4.5 Walzkraftverlauf bei Walzrollendurchmesser 100 mm

Betrachtet man die Verteilung der durchschnittlich benötigten Walzkraft (Abbildung 4.6), zeigt sich klar, dass auch bei unterschiedlich grossen Walz- und Mittelrollen kleinere Walzrollen eine geringere Walzkraft zur Folge haben.

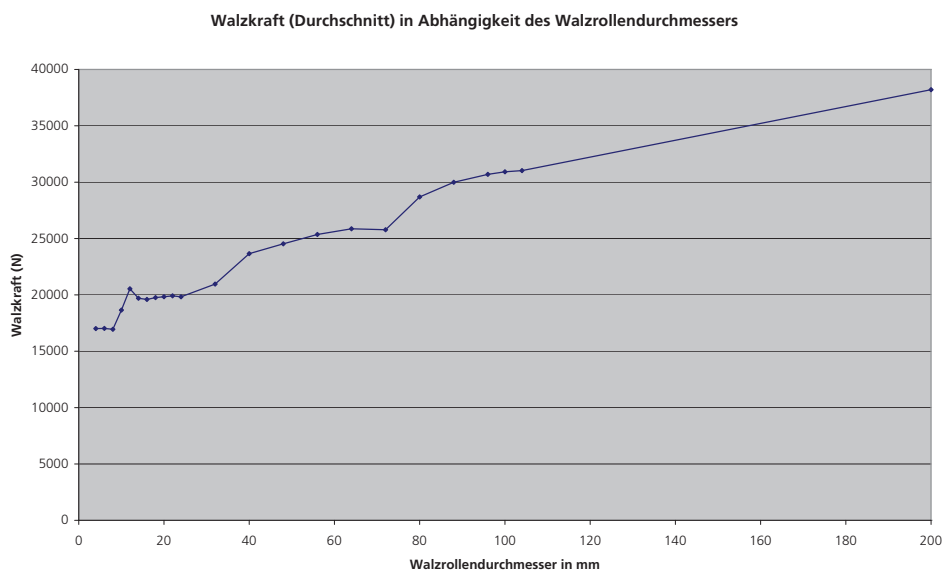


Abbildung 4.6 Durchschnittliche Walzkraft in Abhängigkeit des Walzrollendurchmessers

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Auswertung der durchschnittlich benötigten Schubkraft. Diese nimmt ebenfalls mit dem Durchmesser der Walzrolle zu bzw. ab (siehe Abbildung 4.7).

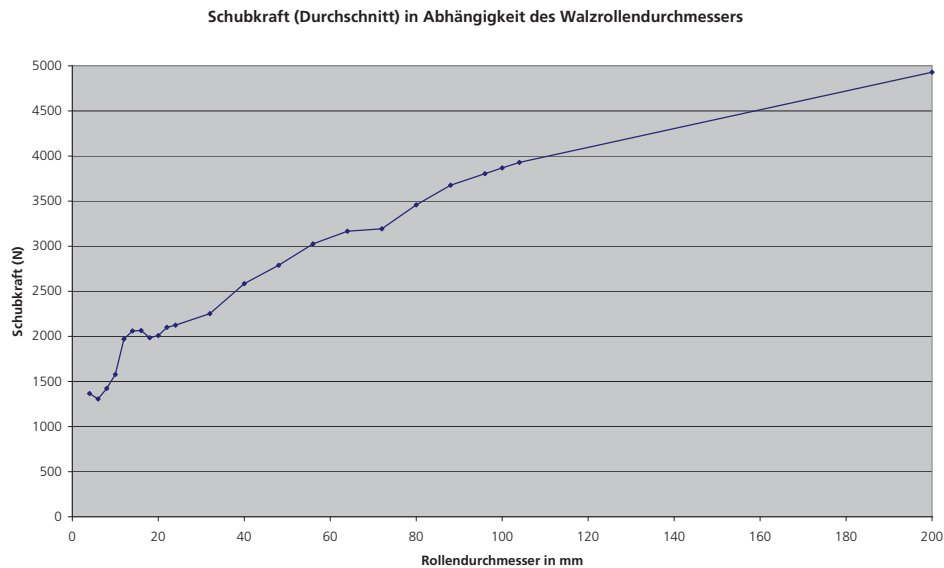


Abbildung 4.7 Durchschnittliche Schubkraft in Abhängigkeit des Walzrollendurchmessers

Bei den Simulationen mit dem Blech zeigt sich, dass sich das Blech beim Auswalzen teilweise massiv krümmt. Deshalb wird als weiterer Output-Parameter der Krümmungsradius des Blechs gemessen. Die bei den Versuchen erreichten Radien sind in Abbildung 4.8 aufgeführt.

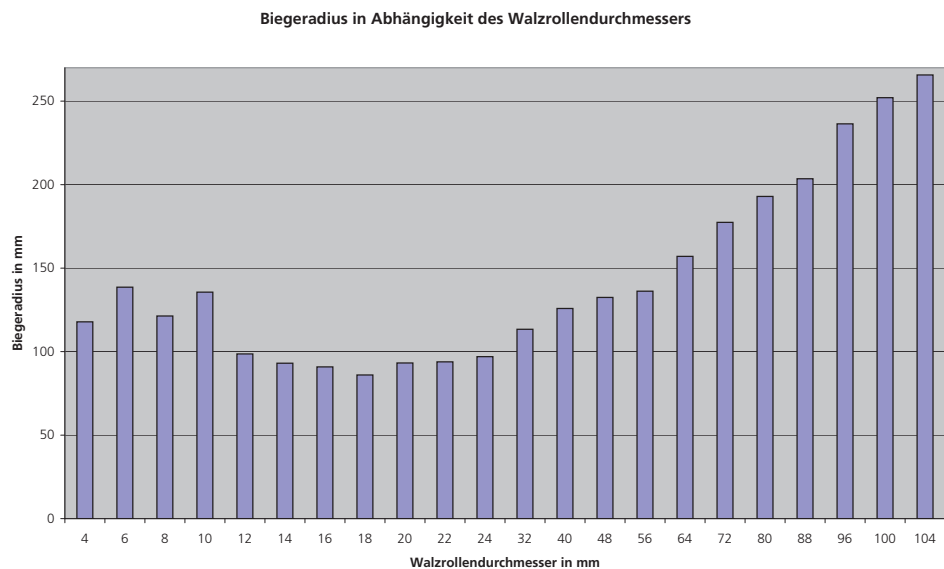


Abbildung 4.8 Biegeradius bei unterschiedlichen Walzrollendurchmessern

Das Blech krümmt sich jeweils auf die Seite der kleineren Rollen, hier also um die Walzrolle herum. Bei zwei gleich grossen Rollen verbiegt sich das Bauteil gar nicht. Aus Abbildung 4.8 ist klar zu erkennen, dass der Krümmungsradius zumindest bis Rollendurchmesser 18 mm mit dem Rollendurchmesser abnimmt. Bei Walzrollendurchmesser 16 mm und kleiner trifft dies nicht mehr zu. Aus den virtuellen Versuchen ist nicht zu schliessen, ob bei Rollendurchmesser 18 mm ein Minimum vorliegt oder ob es sich wegen der sehr kleinen Walzrollen möglicherweise um ein Kontaktproblem in der Simulation handeln könnte.

Abbildung 4.9 zeigt die bei diesen Versuchen erreichten Krümmungen bei 16 mm (grün), 56 mm (orange) und 104 mm (blau) Walzrollendurchmesser.

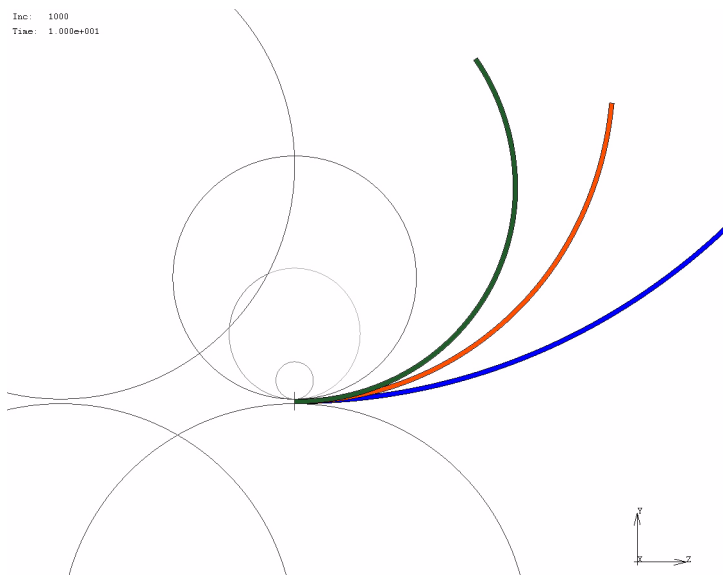


Abbildung 4.9 Krümmung bei Walzrollendurchmessern von 16 mm, 56 mm und 104 mm

Gründe für diese Krümmung sind folgende:

Durch die grössere Deformation im Bereich der Walzrolle werden die Knoten in der Simulation im oberen Bereich (siehe Abbildung 4.10) stärker zurückgehalten als unten. Deshalb krümmt sich das Blech auch auf diese Seite. Die Simulation geht davon aus, dass sich die Rückhaltekraft im Bereich des oberen Knotens linear über die Dicke verteilt, da nur ein Element in der Blechdicke modelliert ist. Bezogen auf den realen Prozess scheint dies jedoch eher unwahrscheinlich. Eine feinere Vernetzung soll zeigen, ob dieser Effekt ebenfalls auftreten wird oder die Effekte durch den Aufbau und die Vernetzung des Blechs hervorgerufen wurden.

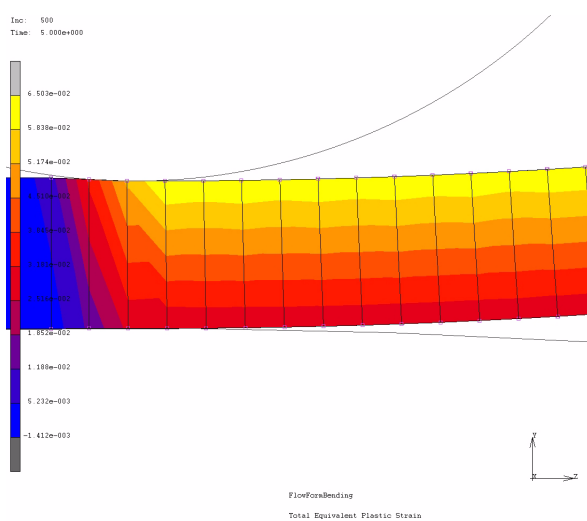


Abbildung 4.10 Detailansicht - Krümmung durch Walzen

*Versuche mit feiner Vernetzung*

Die Minirollenoptimierung mit der feineren Vernetzung soll zeigen, ob beim Auswalzen des Bleches die gleichen Effekte wie bei der groben Vernetzung auftreten oder sich die Kräfte und die Krümmung anders verhalten.

Für die Versuche mit der feineren Vernetzung werden folgende Walzrollengrößen simuliert:

- zwischen 10 mm und 24 mm Rollendurchmesser im Abstand von jeweils 2 mm
- zwischen 24 mm und 88 mm im Abstand von jeweils 8 mm
- 100 mm
- 200 mm

Die Auswertung der Krümmungsradien zeigt, dass sich das Blech nicht gleich verhält wie bei der groben Vernetzung. Anstatt sich um die Walzrolle zu krümmen, verbiegt es sich bei kleinen Walzrollen auf die andere Seite.

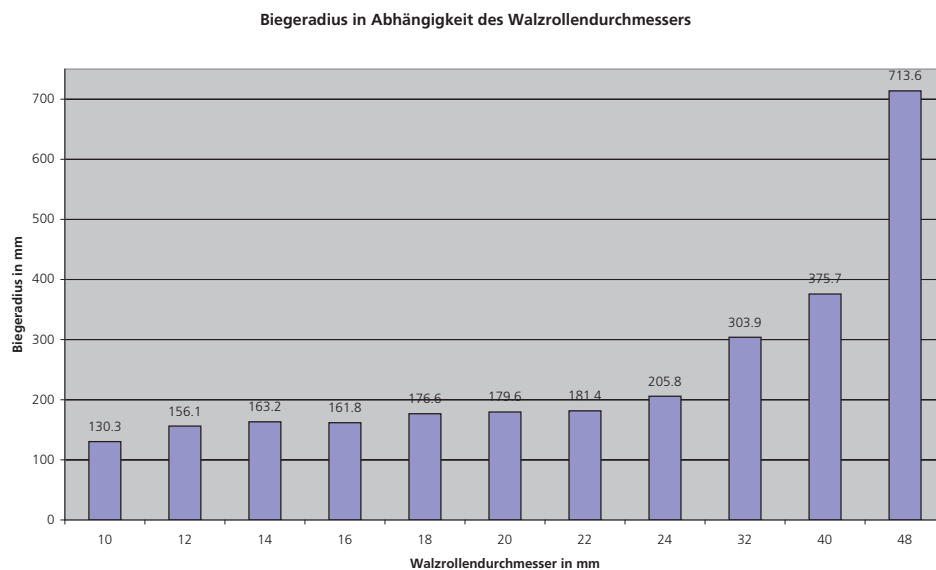


Abbildung 4.11 Krümmungsradien bei verschiedenen Walzrollendurchmessern

In Abbildung 4.11 sind die Krümmungsradien für Walzrollendurchmesser zwischen 10 und 48 mm abgebildet. Die Krümmung nimmt mit zunehmendem Walzrollendurchmesser ab. Bei Walzrollendurchmesser 72 oder 80 mm kehrt die Krümmungsseite und das Blech wird wieder auf die Seite der Walzrolle verbogen. Abbildung 4.12 zeigt die Krümmungen bei Walzrollendurchmesser von 16 mm (rot), 40 mm (grün) und 100 mm (blau).

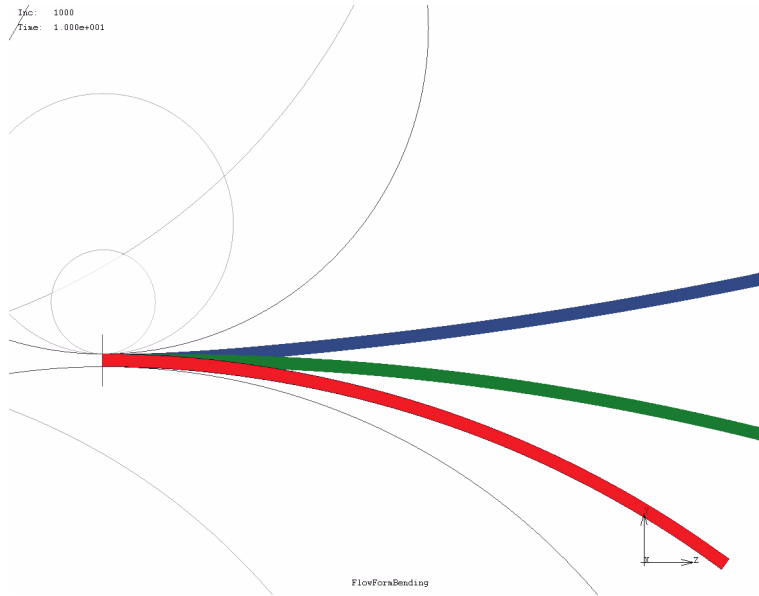


Abbildung 4.12 Krümmungen bei Walzrollendurchmesser 16 mm (rot), 40 mm (grün) und 100 mm (blau)

Der Krümmungseffekt kann durch die unterschiedlichen Spannungen bei Walz- und Mittelrolle erklärt werden. Die Kräfte auf die Walzrolle und auf die Mittelrolle sind jeweils gleich gross, da es ein Kräftegleichgewicht geben muss. Die Walzrolle hat abhängig von ihrer Grösse eine unterschiedliche Auflagefläche. Je kleiner die Walzrolle ist, umso kleiner ist auch die Berührungsfläche im Vergleich zu jener der Mittelrolle. Weil die Auflagefläche kleiner wird, erhöhen sich im Kontaktbereich der Walzrolle die Spannungen stärker als bei der Mittelrolle. Eine höhere Spannung bedingt mehr plastische Dehnung, was bedeutet, dass bei einer kleineren Rolle die Layer (Schicht von Elementen in der Dickenrichtung) bei der Walzrolle stärker ausgedünnt werden, als die bei der Mittelrolle und somit das Blech gekrümmt wird.

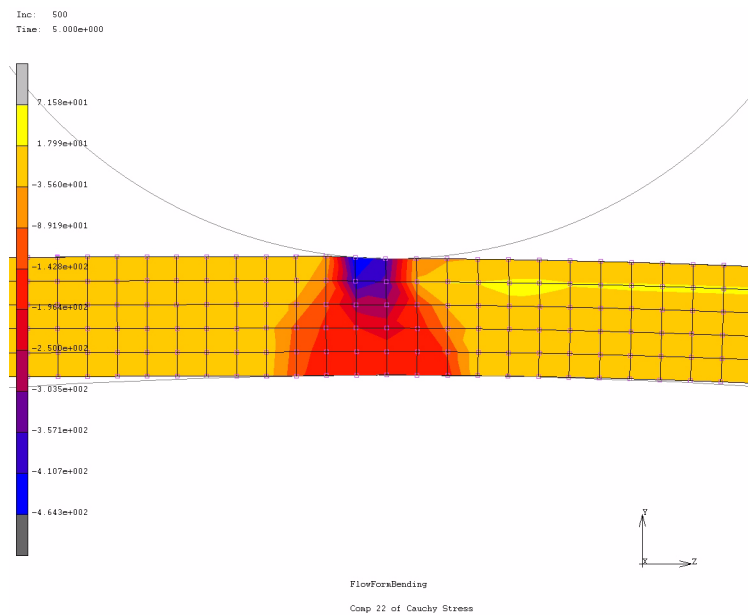


Abbildung 4.13 Druckspannungen im Walzspalt

Für die Simulation des Walzprozesses ist die Grösse des verwendeten FE Netzes essentiell und hat auf die Ergebnisse einen sehr grossen Einfluss.

Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 zeigen die Walz- und Schubkräfte für verschiedene Walzrollendurchmesser jeweils für die Simulationen mit einem und mit fünf Layern in der Dickenrichtung. Die Walzkraft ist für kleinere Walzrollendurchmesser bei fünf Layern grösser als bei einem Layer, wird jedoch ab einem Rollendurchmesser von ca. 80 mm kleiner als diejenige der 1-Layer-Simulationen. Bei den Schubkräften beträgt die Differenz zwischen den beiden Simulationen ungefähr 1000 N, wobei die Schubkräfte der Simulationen mit fünf Layern wesentlich grösser sind.

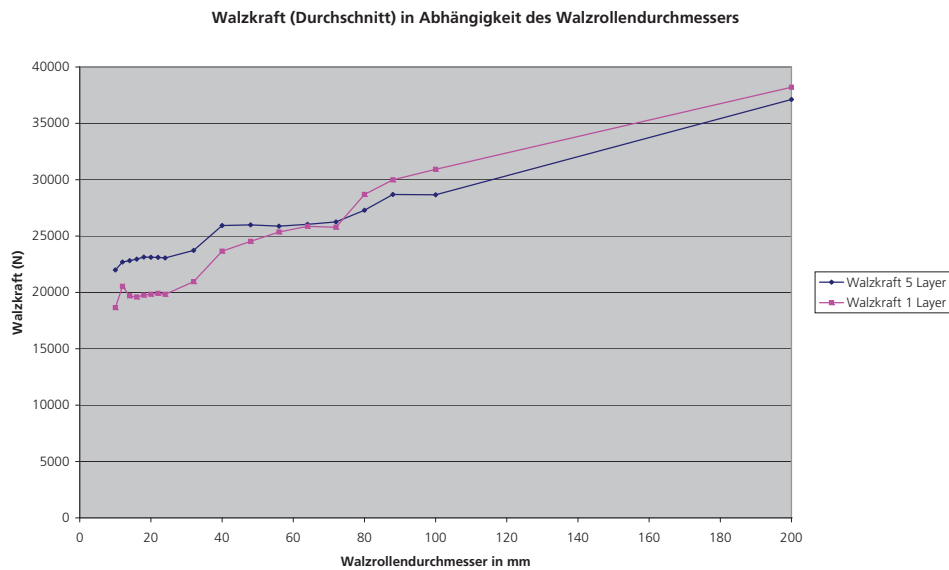


Abbildung 4.14 Durchschnittliche Walzkraft bei unterschiedlichen Walzrollen für 1 und 5 Layer

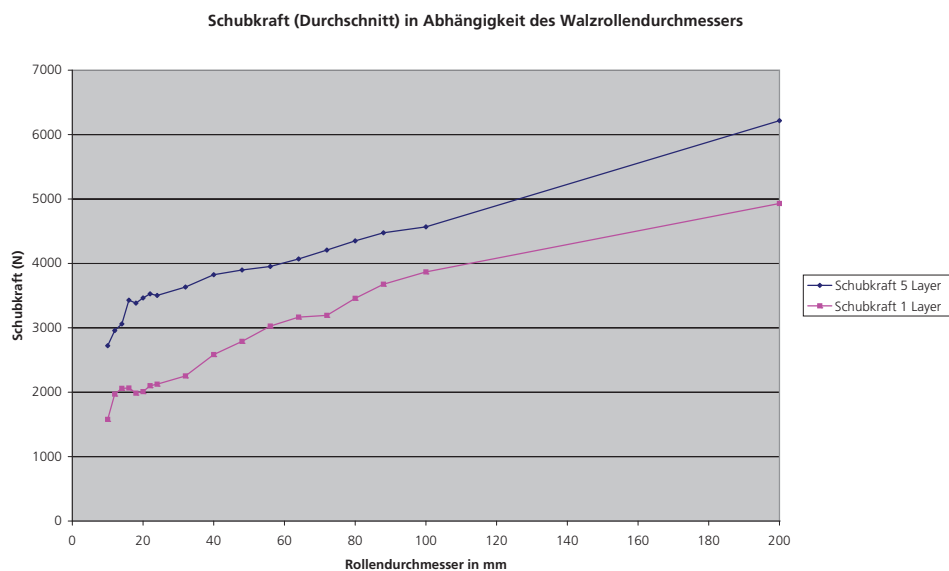


Abbildung 4.15 Durchschnittliche Schubkraft bei unterschiedlichen Walzrollen für 1 und 5 Layer

Bei der Simulation des Walzprozesses sind Walz- und Mittelrolle angetrieben. Diese angetriebenen Rollen könnten einen Einfluss auf die Krümmung haben bzw. sogar Auslöser dafür

sein. Anhand einer Simulation ohne Reibung und mit stehender Walz- und Mittelrolle soll gezeigt werden, dass der Krümmungseffekt trotzdem auftritt. Die Walzrolle hat einen Durchmesser von 16 mm.

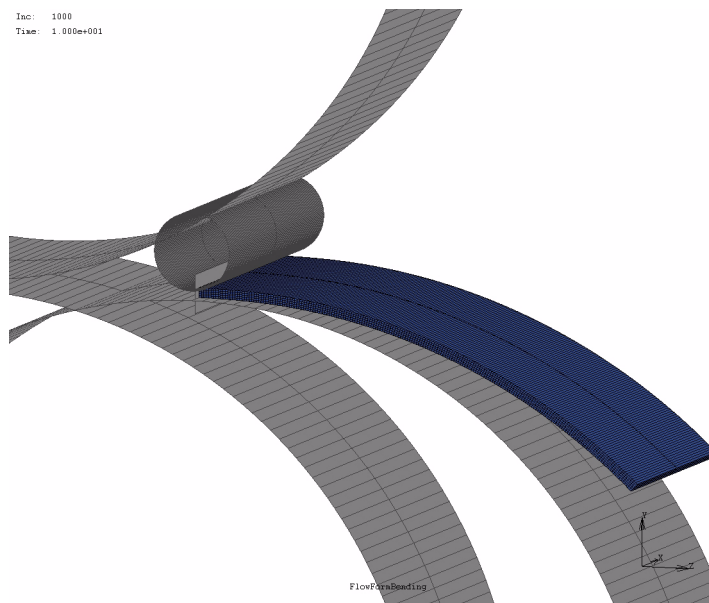


Abbildung 4.16 Walzsimulation ohne Reibung

Abbildung 4.16 zeigt, dass sich das Blech auch bei den genannten Einstellungen verkrümmt. Der Krümmungsradius beträgt 130 mm. Ein ähnlicher Radius ergibt sich bei Walzrolldurchmesser 10 mm (siehe Abbildung 4.11). Dabei ist der Reibungskoeffizient 0.1 und die Walzrollen drehen sich. Es kann somit angenommen werden, dass das Blech wirklich durch die unterschiedlich grossen Rollen beim Walzen gekrümmt wird.

Die Simulationen zu den Walzrollengrössen zeigen, dass sich das Blech abhängig von der Grösse der Walzrolle unterschiedlich stark krümmt. Die Krümmung des Bleches ist ein Schmutzeffekt und ist nicht erwünscht. Bei grösser werdenden Walzrollen nimmt der Effekt ab, bei gleich grossen Rollen für Walz- und Mittelrolle verschwindet dieser Effekt vollständig.

#### 4.2.3 Versuche mit Reibkoeffizienten

Für praktische Versuche mit diversen Bauteilen verwendet die Firma Klingelberg teilweise unterschiedliche Schmiermittel. Aus diesen Versuchen ist bekannt, dass sich die verschiedenen Schmiermittel unterschiedlich auf die Schub- und Walzkräfte auswirken. Eine Anpassung des Schmiermittels hat eine Änderung der Reibverhältnisse im Prozess zur Folge. Die Reibwertversuche sollen zeigen, wie sich die ändernde Reibung auf das Verhalten des Bleches beim Walzen auswirkt und welchen Einfluss die Reibung auf die Walzkräfte hat. Der Simulationsaufbau ist dabei identisch mit dem Aufbau in Abschnitt 4.2.1, die Walzrolle hat einen Durchmesser von 16 mm. Die Versuche aus Abschnitt 4.2.2 zeigen, dass die Vernetzung des Bleches auf die Ergebnisse beim Auswalzen einen sehr grossen Einfluss haben. Daher werden die Versuche mit verschiedenen Reibkoeffizienten nur mit Blech 2, dem feiner vernetzten Bauteil, durchgeführt. Die Krümmungsradien in Abbildung 4.17 zeigen, dass die Krümmung mit zunehmender Reibung zunimmt.



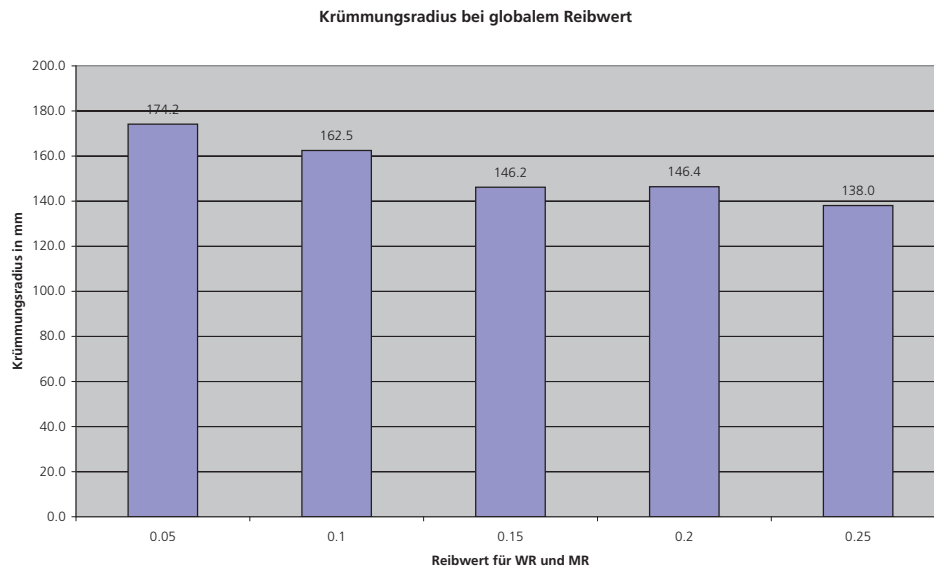


Abbildung 4.17 Krümmungsradien bei global geänderten Reibkoeffizienten

Wird der Reibwert jeweils nur bei einer Rolle geändert, ergeben sich folgende Krümmungsradien (siehe Abbildung 4.18).

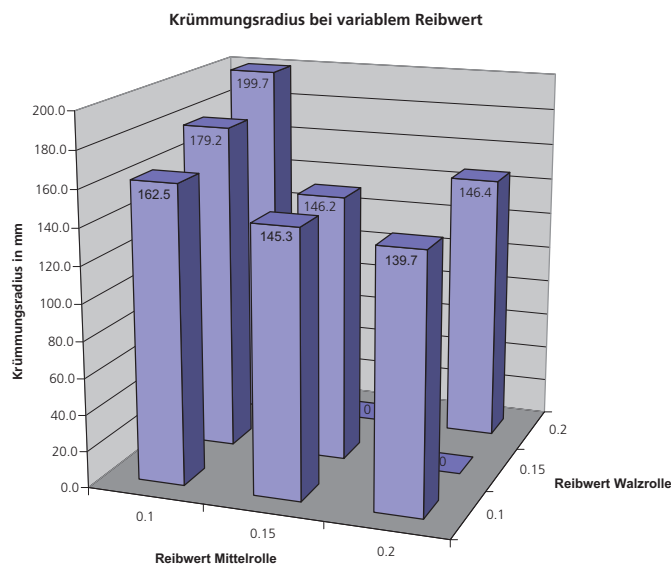


Abbildung 4.18 Krümmungsradien bei unterschiedlichen Reibkoeffizienten für WR/MR

Abbildung 4.18 zeigt, dass sich das Blech bei einer Zunahme des Reibkoeffizienten bei der Mittelrolle stärker krümmt. Im umgekehrten Fall nimmt die Krümmung ab.

Eine Zunahme der Reibung, unabhängig davon ob bei beiden oder nur einer Rolle, bedeutet, dass die Walzkräfte grösser werden (siehe Abbildung 4.19 und Abbildung 4.20).

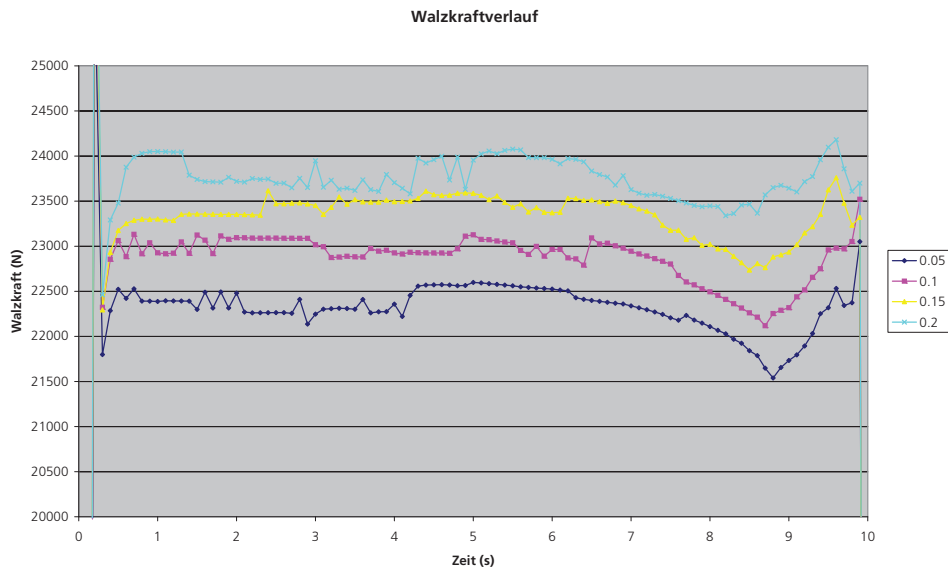


Abbildung 4.19 Walzrollenkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten (globaler Reibwert)

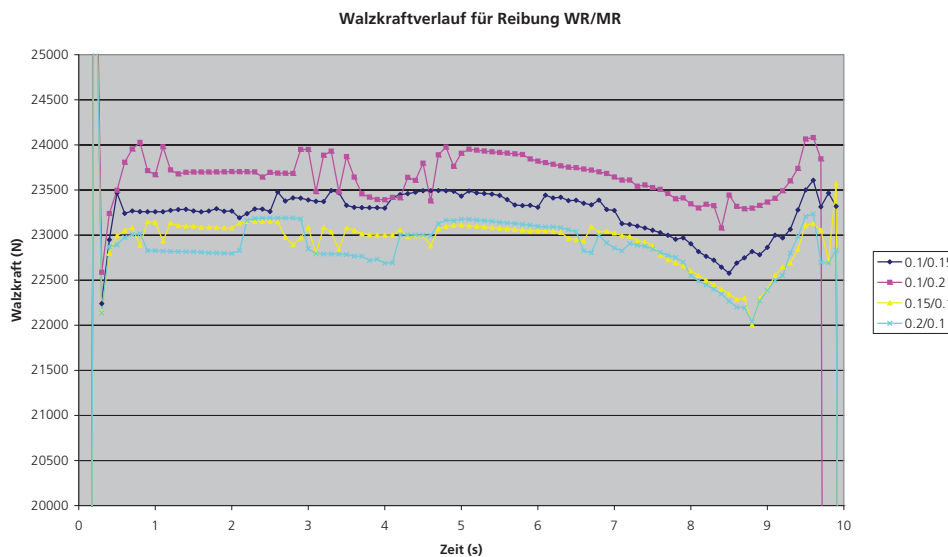


Abbildung 4.20 Walzrollenkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten (Reibwerte für WR/MR)

Aus Abbildung 4.20 ist ersichtlich, dass eine Änderung der Reibparameter auf der Seite der Mittelrolle die Walzkraft stärker beeinflusst als eine Änderung der Reibung bei der Walzrolle.

Einerseits erhöht die Reibung die Walzkräfte. Was wiederum bedeutet, dass auch die Walzspannungen grösser werden und sich dadurch die Dehnungsverhältnisse vom Blech bei Walz- und Mittelrolle verändern. Auf Grund des nichtlinearen Materialverhaltens wirkt sich eine höhere Spannung nicht auf beiden Seiten gleich stark aus. Andererseits ist denkbar, dass die Reibung das Material auch teilweise zurückhält und somit für eine Krümmung verantwortlich ist (siehe Abschnitt 4.2.2). Damit könnte auch erklärt werden, wieso bei der Zunahme der Reibung auf der Walzrollenseite die Krümmung weniger stark wird.

Wie bei der Studie zur Walzrollengrösse ist auch bei den Versuchen mit Reibwerten die Krümmung (speziell die unterschiedliche Krümmung) des Blechs als Schmutzeffekt zu werten. Mit abnehmender Reibung wird dieser Schmutzeffekt kleiner, verschwindet jedoch bei unterschiedlich grossen Rollen (Walz- und Mittelrolle) nie vollständig.

#### 4.2.4 Materialversuche

Bei Klingenberg werden Profile aus verschiedensten Materialien gebogen. Ebenfalls wird für grössere Versuchsreihen gleiches Material aus verschiedenen Chargen verwendet. Die Unterschiede der erzielten Ergebnisse mit Material aus verschiedenen Chargen sind teilweise nicht zu vernachlässigen. Der Einfluss des Materials ist nicht vollständig bekannt. Es soll bei den Materialversuchen deshalb untersucht werden, inwiefern sich die Kräfte und das Krümmungsverhalten bei unterschiedlichen Materialkurven verändern. Der Aufbau der Simulation ist in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Die Walzrolle ist 16 mm im Durchmesser, die Reibwerte sind konstant 0.1 für Walz-, Mittelrolle und die Kontaktbereiche zwischen Rollen und Blech. Wie bei den Versuchen zu den Reibkoeffizienten wird nur das feiner vernetzte Blech 2 simuliert. Die Materialdaten sind in Abbildung 4.2 aufgeführt und in Abschnitt 4.2.1 beschrieben.

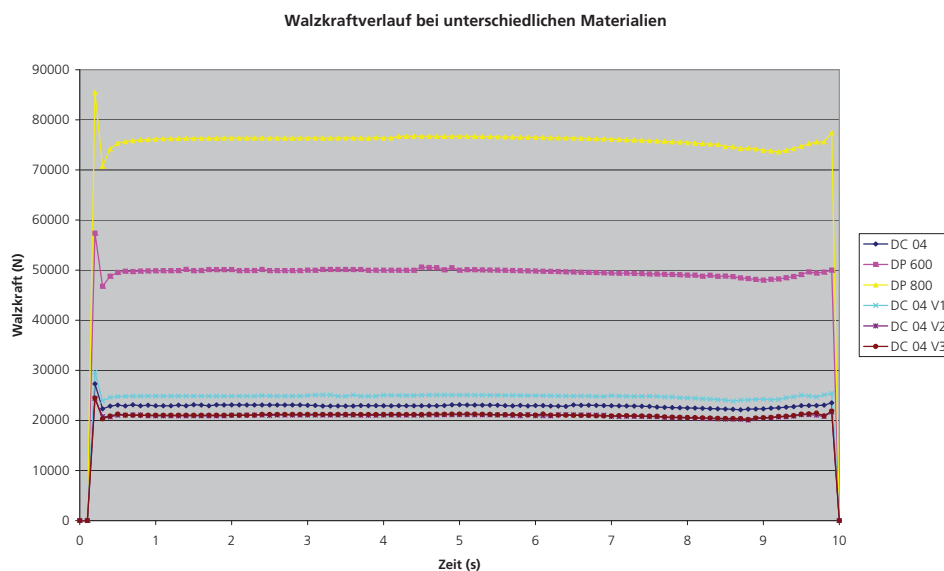


Abbildung 4.21 Walzkraftverlauf bei verschiedenen Materialkennwerten

Abbildung 4.21 zeigt den Verlauf der Walzkraft bei den jeweiligen Materialien. Es ist ersichtlich, dass die benötigte Walzkraft mit der Höhe der Streckgrenze der Materialkennlinie zusammenhängt. Ebenso verhält sich der Verlauf der Schubkräfte (siehe Abbildung 4.22). Der Peak bei 0.2 Sekunden beim Walzkraftverlauf kommt daher, dass die Walzrolle nicht von Beginn an im Blech ist, sondern erst nach 0.2 Sekunden vollständig ins Bauteil eingedrungen ist (siehe Abschnitt 4.2.1). Dadurch, dass die Resultate nur alle 0.1 Sekunden aufgezeichnet werden, ist die Auflösung für den Anfangsbereich nicht sehr gut. Die Aussagekraft der Resultate wird dadurch aber nicht geschwächt.

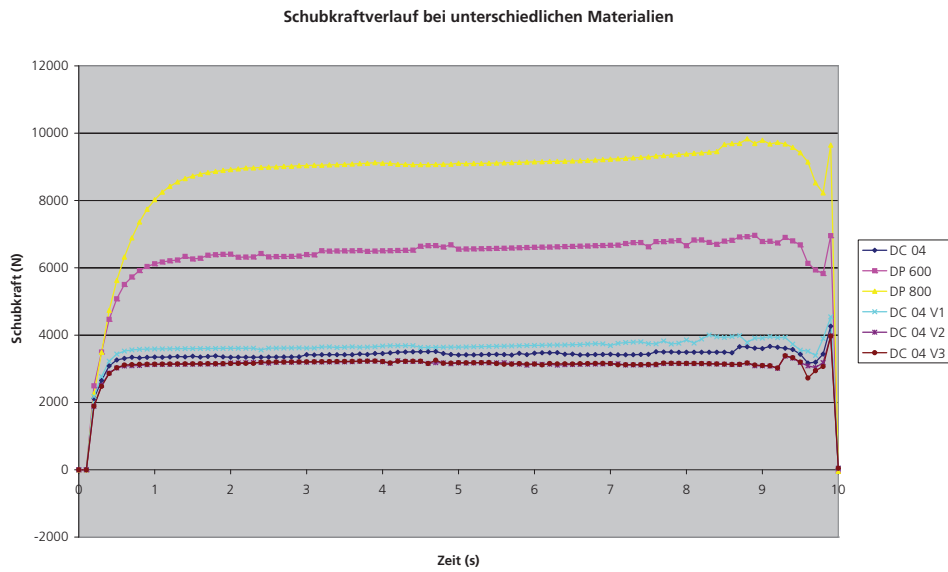


Abbildung 4.22 Schubkraftverlauf bei verschiedenen Materialkennwerten

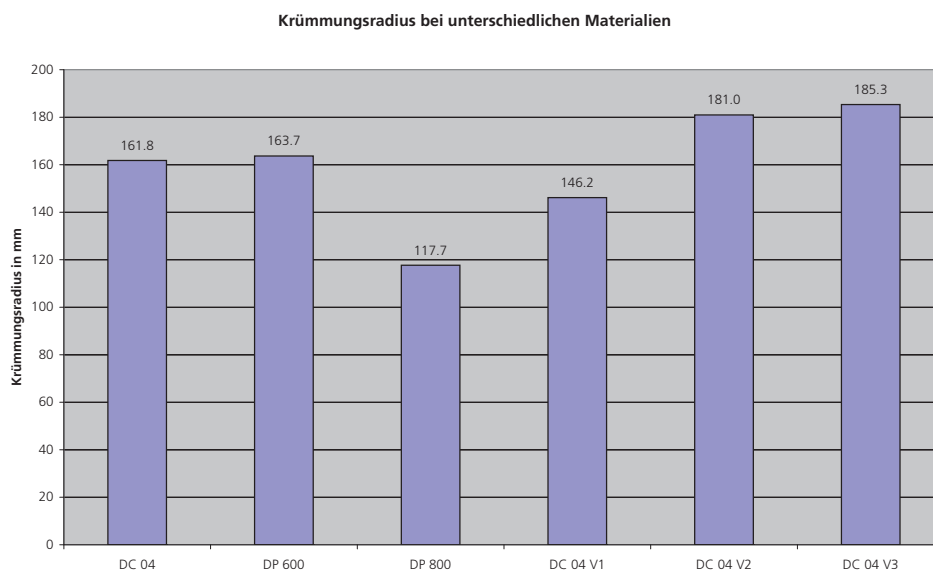


Abbildung 4.23 Krümmungsradius bei verschiedenen Materialkennwerten

Bei der Krümmung ist der Zusammenhang zwischen Materialkennwert und Krümmungsradius wiederum relativ klar ersichtlich. Eine höhere Streckgrenze ergibt in der Regel einen kleineren Krümmungsradius (Abbildung 4.23). Eine Ausnahme bildet DP 600. Vergleicht man die Fließkurven in Abschnitt 4.2.1, ist zu erkennen, dass die Fließkurve von DP 600 zu Beginn etwas flacher verläuft als die übrigen Kurven. Die Dehnungen, die aus den unterschiedlichen Spannungen bei der Walz- und der Mittelrolle resultieren, sind von diesem Verlauf abhängig.

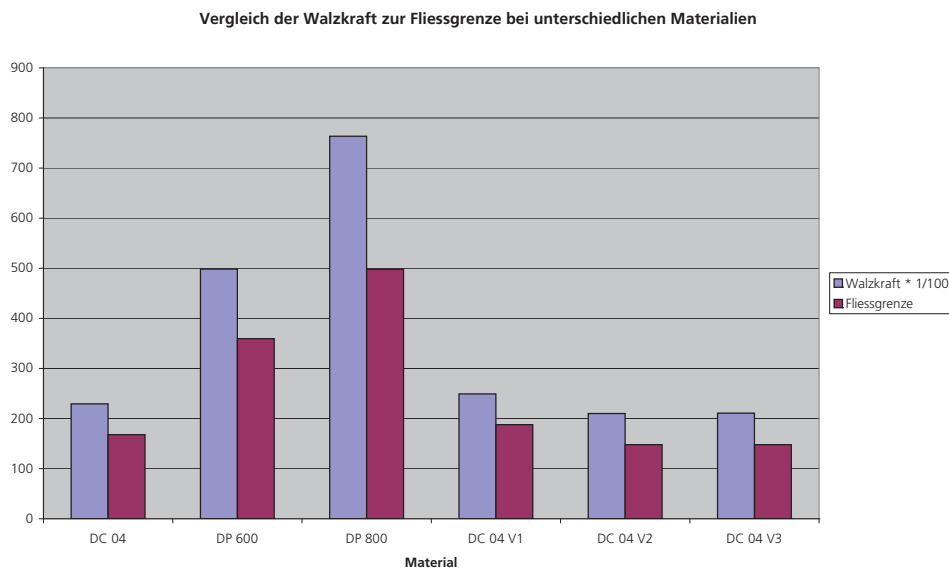


Abbildung 4.24 Vergleich der durchschnittlichen Walzkraft zur Fließgrenze des Materials

Abbildung 4.24 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen Walzkraft (Mittelwert zwischen 2 und 8 Sekunden geteilt durch Faktor 100) und der Fließgrenze des Materials. Es ist klar ein Zusammenhang der beiden Größen zu erkennen.

4.2.5 Kinematische Gestaltung des Walzkontakts

Mit dem Fließformbiegeverfahren werden verschiedene offene und geschlossene Profile gebogen. Dabei werden verschiedene Kombinationen von Walz- und Mittelrollen eingesetzt. Der Einfluss der kinematischen Gestaltung des Walzkontakts ist teilweise nicht bekannt, könnte jedoch für die Verbesserung des Prozesses eingesetzt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Spektrum der möglichen Kombinationen von Walz- und Mittelrollen (siehe Abbildung 4.25).

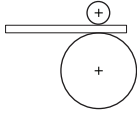
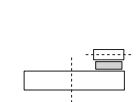
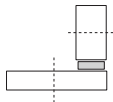
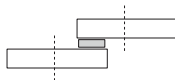
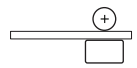
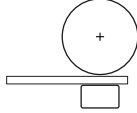
obere Rolle \ untere Rolle	Minirolle (16 mm)	Normalrolle (200 mm)	Querrolle (200 mm)	Dorn/Reibkörper
Minirolle (16 mm)	X	X	X	X
Normalrolle (200 mm)		X	X	X
Querrolle (200 mm)				X
Dorn/Reibkörper			X	X

Abbildung 4.25 Kombinationen von Walz- und Mittelrollen

Aus diesen Kombinationen soll anhand von Einzelversuchen gezeigt werden, wie sich das Blech beim Walzen verhalten wird. Die Kombination von Minirolle/Normalrolle bzw. Normalrolle/Normalrolle wurde bereits untersucht (siehe Abschnitte 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4). Nachfolgend werden die folgenden Rollenkonfigurationen betrachtet (jeweils Walzrollen/Mittelrolle): Querrolle/Querrolle, Minirolle/Querrolle, Normalrolle/Querrolle und Minirolle/Dorn. Der Simulationsaufbau entspricht demjenigen aus Abschnitt 4.2.1. Für das Walzen wird das feiner vernetzte Blech 2 verwendet. Die jeweilige Rollenkonfiguration ist aus Abbildung 4.25 zu entnehmen.

*Querrolle/Querrolle*

Für die Kombination von Querrolle/Querrolle werden unterschiedliche Kontaktbedingungen definiert. Die obere Rolle hat beim Kontakt zum Blech einen Reibkoeffizienten von 0.15, die untere Rolle einen von 0.05.

Abbildung 4.26 zeigt, dass sich das Blech einerseits leicht verdreht (oberes Bild), andererseits wird es auf die Seite der oberen Rollen (nach rechts) verkrümmt. Die Krümmung entsteht durch den höheren Reibkoeffizienten zwischen der oberen Rolle und dem Blech. Das Blech wird durch die Reibkräfte auf die Seite gebogen.

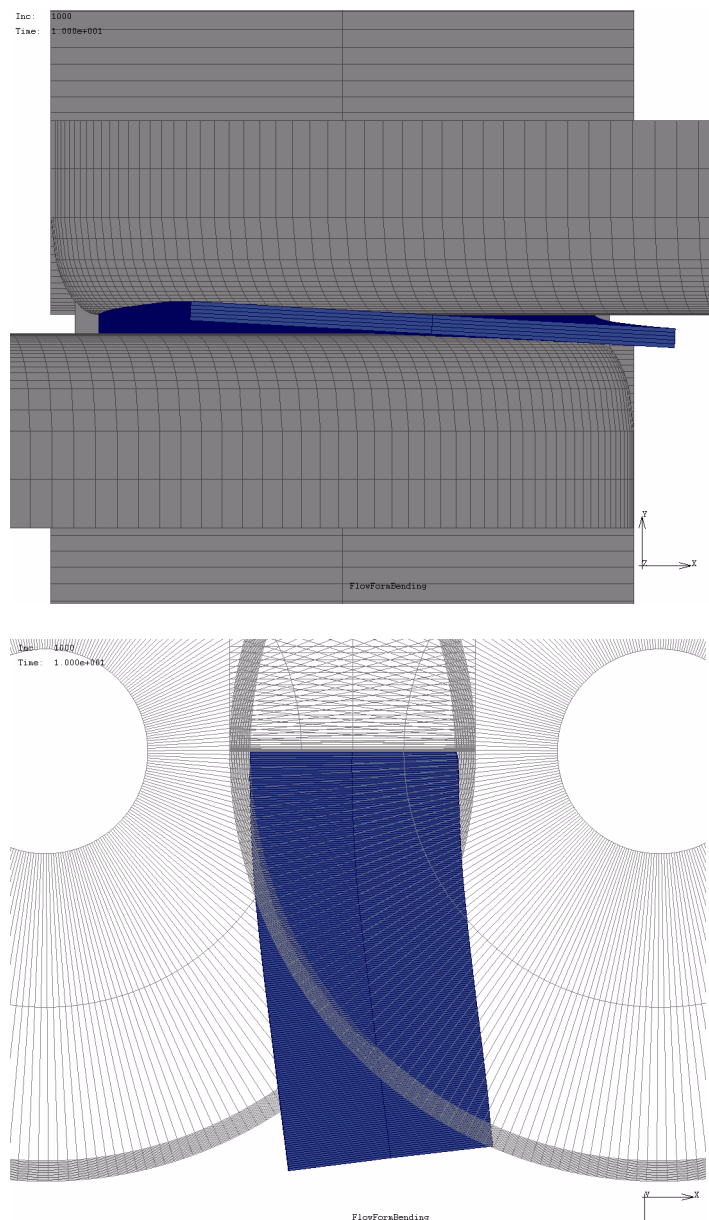


Abbildung 4.26 Querrolle/Querrolle - Frontansicht (oben) und Draufsicht (unten)

Minirolle/Querrolle

Bei der Kombination Minirolle/Querrolle sind beide Werkzeugkontakte zum Blech mit Reibwert 0.1 definiert. Das Blech krümmt sich beim Walzen (im Unterschied zur Kombination von zwei unterschiedlich grossen Rollen, wie sie z.B. in Abschnitt 4.2.2 verwendet wird) nach oben. Durch das Drehen der Querrolle wäre ein Verdrehen des Bleches anzunehmen. Dies geschieht allerdings nicht, bzw. nur sehr gering, da durch die sehr kleine Walzrolle die Kräfte der Rollen klein bleiben. Somit sind auch die Reibungskräfte bei der Querrolle nicht sehr gross und das Profil wird nicht um die Achse der Querrolle gekrümmt.

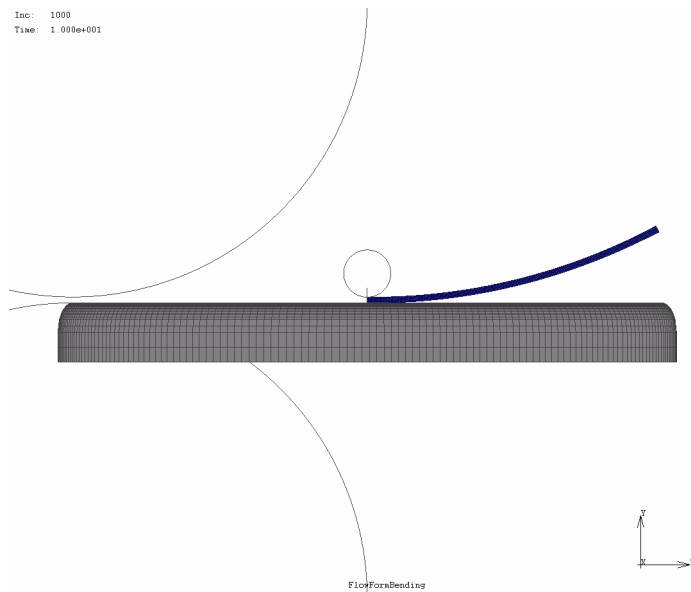


Abbildung 4.27 Minirolle/Querrolle - Seitenansicht

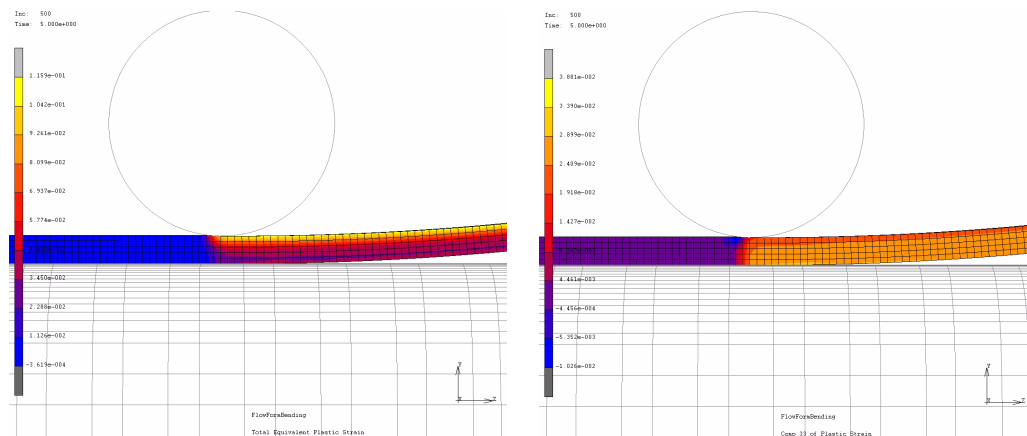


Abbildung 4.28 Minirolle/Querrolle - Totale plastische Dehnung (links) und plastische Dehnung in Z-Richtung

Anhand von Abbildung 4.28 kann erklärt werden, wieso sich das Blech nach oben krümmt. Die totale plastische Dehnung (total equivalent plastic strain) ist im oberen Bereich grösser, trotzdem ist die plastische Dehnung in Z-Richtung in den unteren Fasern grösser. Die plastische Dehnung in Y-Richtung, also in der Dicke, ist nicht abgebildet. Sie ist aber in den unteren Schichten stärker negativ, d.h. die unteren Bereiche werden stärker ausgedünnt in der Dickenrichtung.



### Normalrolle/Querrolle

Die Verbindung von Normalrolle/Querrolle entspricht der vorhergehenden Kombination, mit der Ausnahme, dass die obere Rolle wesentlich grösser ist. Das Blech krümmt sich wiederum nach oben. Im Unterschied zur Kombination Minirolle/Querrolle verdreht sich das Blech leicht auf die linke Seite um die Drehachse der Querrolle (Abbildung 4.29 von vorne betrachtet). Durch die grössere Walzrolle (obere Rolle) werden die Spannungen und damit die Kräfte im Walzspalt wesentlich grösser. Damit werden auch die Reibkräfte der Querrolle grösser. Das Blech wird somit von der unteren Rolle mitgedreht.

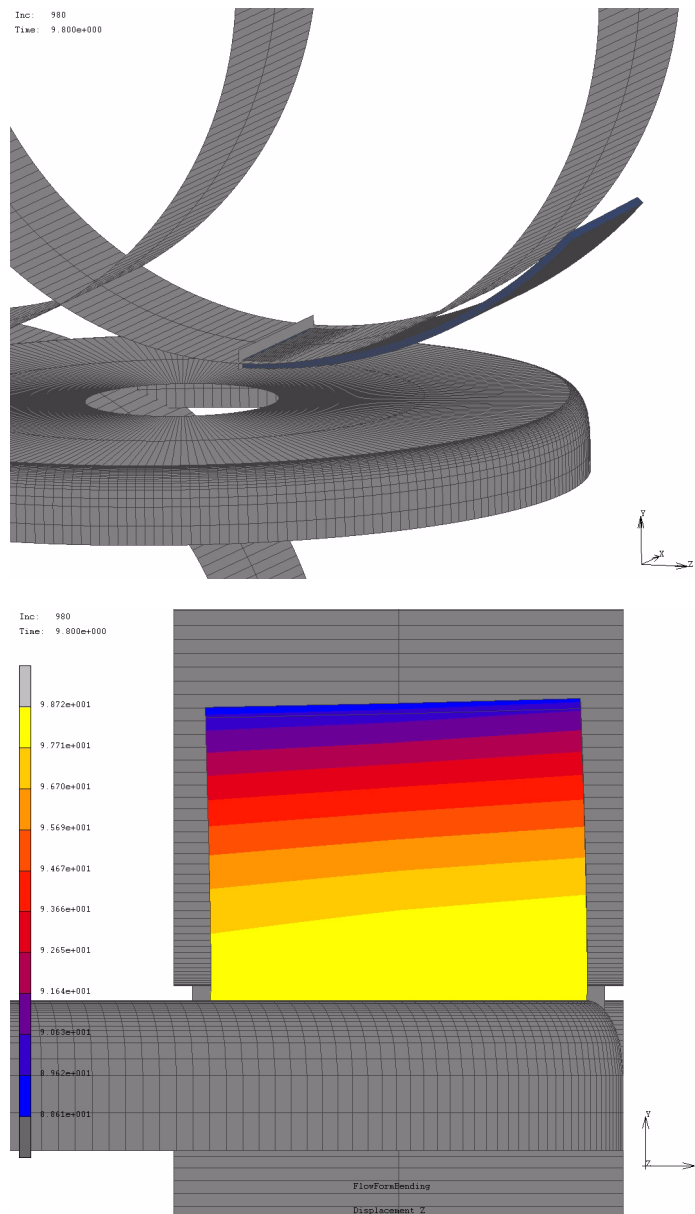


Abbildung 4.29 Normalrolle/Querrolle - 3D-Ansicht und Frontansicht (Displacement Z)

Im Gegensatz zur totalen plastischen Dehnung bei der Verbindung Minirolle/Querrolle ist bei Normalrolle/Querrolle die totale plastische Dehnung in den unteren Layern grösser (siehe Abbildung 4.30). Wiederum ist hier auch die plastische Dehnung in Z-Richtung bei den unteren Fasern grösser. Deshalb krümmt sich das Blech auch nach oben.

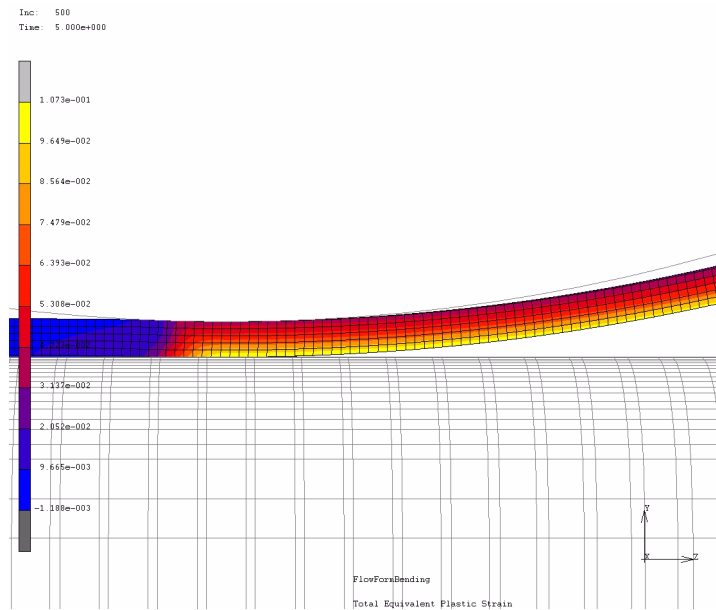


Abbildung 4.30 Normalrolle/Querrolle - Total Equivalent Plastic Strain

Minirolle/Dorn

Für die Kombination Minirolle/Dorn werden zwei verschiedene Werkzeuge als Dorn verwendet. Einerseits wird eine Reibfläche verwendet, andererseits eine grosse stehende Rolle mit Durchmesser 400 mm. Abbildung 4.31 zeigt, dass sich das Blech bei einem flachen Dorn leicht nach oben krümmt. Es entsteht eine ähnliche Situation wie bei der Kombination Minirolle/Querrolle.

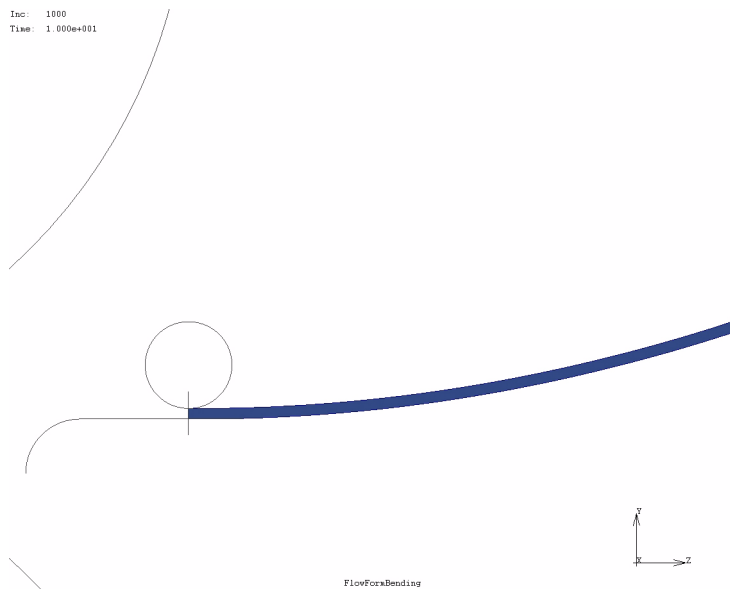


Abbildung 4.31 Minirolle/Dorn (Fläche) - Seitenansicht (oben) und 3D-Ansicht (unten)

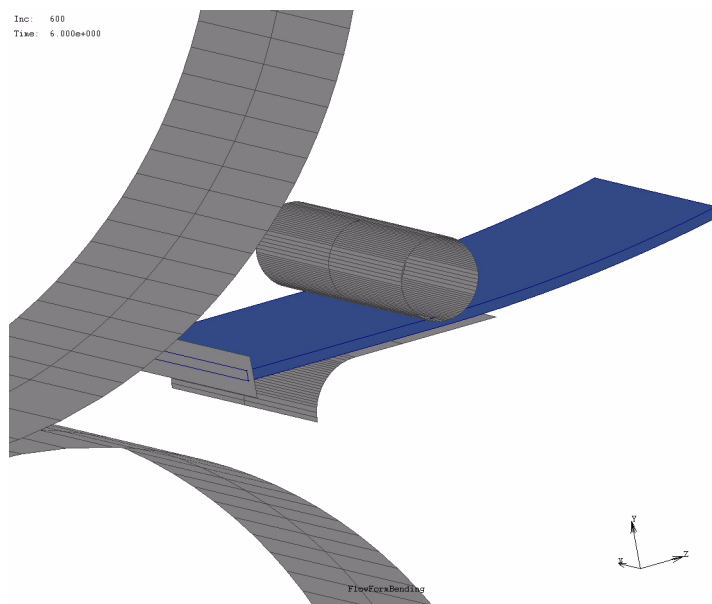


Abbildung 4.31 Minirolle/Dorn (Fläche) - Seitenansicht (oben) und 3D-Ansicht (unten)

In Abbildung 4.32 ist die Kombination einer 16 mm Walzrolle mit einer stehenden Rolle mit Durchmesser 400 mm zu sehen. Das Blech krümmt sich ganz leicht nach unten. Durch die Krümmung des Dorns wird eine Krümmung nach unten ermöglicht. Es entsteht eine vergleichbare Situation zu den Rollengeometrierversuchen in Abschnitt 4.2.2. Allerdings krümmt sich das Blech nur ganz leicht. Die Ursache dafür könnte bei der stehenden Mittelrolle liegen.

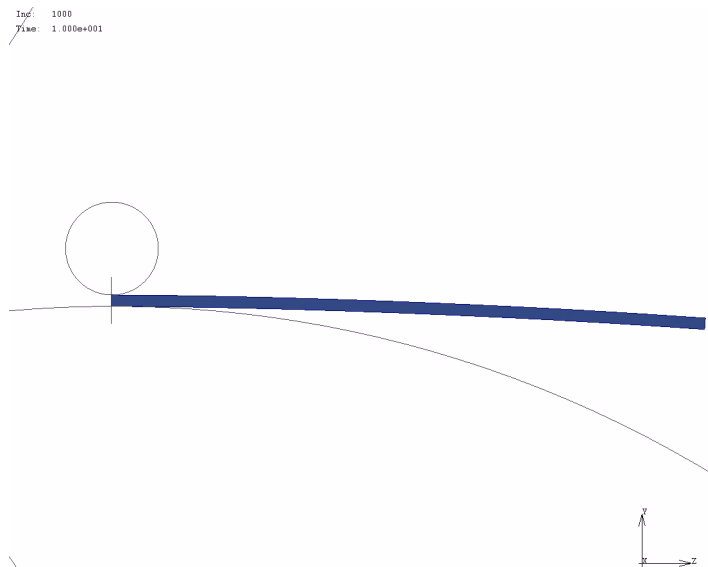


Abbildung 4.32 Minirolle/Dorn (grosse stehende Rolle) - Seitenansicht (oben) und 3D-Ansicht (unten)

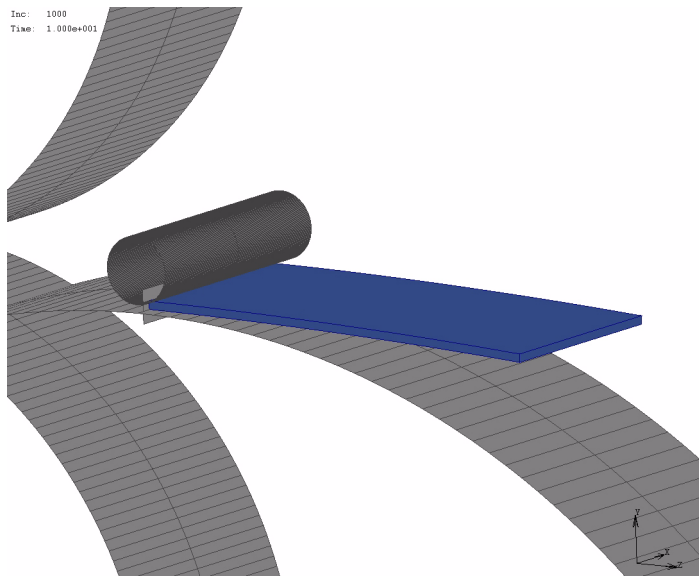


Abbildung 4.32 Minirolle/Dorn (grosse stehende Rolle) - Seitenansicht (oben) und 3D-Ansicht (unten)

Bei beiden Versuchen ist jeweils die totale plastische Dehnung in den oberen Layern grösser. Die plastische Dehnung in Z-Richtung und Y-Richtung unterscheidet sich jedoch. Beim Reibkörper als Dorn ist die plastische Dehnung in Z-Richtung bei den unteren Bereichen grösser, in der Dicke nehme diese allerdings stärker ab. Beim Versuch mit der stehenden Rolle tritt genau das Gegenteil auf, d.h. die plastische Dehnung in Z-Richtung ist bei der oberen Faser am grössten. Diese nimmt allerdings auch in der Dicke am stärksten ab.

Die Versuche aus den Abschnitten 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4 haben gezeigt, dass beim Walzen mit zwei unterschiedlich grossen Rollen (kleine Walzrolle, grosse Mittelrolle) ein unerwünschter Krümmungseffekt entsteht. Dieser Effekt ist von der Grösse der Walzrolle, der Reibung im Kontakt und dem Bauteilwerkstoff abhängig. Abschnitt 4.2.5 hat gezeigt, dass mit der Gestaltung der Walzwerkzeuge unterschiedliche Effekte erzeugt werden, die für den Fließformbiegeprozess genutzt werden können. Mit den Simulationen zur kinematischen Gestaltung des Walzkontakts sind die Grundlagenuntersuchungen abgeschlossen.

### 4.3 Biegen offener Profile

Die folgenden Untersuchungen widmen sich dem Fließformbiegeprozess, d.h. der kombinierten Beanspruchung durch Biegen und Walzen. Im Gegensatz zu den Vorversuchen wird hier ein ganzes Profil verwendet, um anwendungsnahe Ergebnisse für typische Profilformen zu erhalten. Aufgeteilt ist die Untersuchung in zwei Teile. Der erste Teil befasst sich mit einem Biegeteil mit einer einfachen Walzung (offene Profile). Im zweiten Teil wird der Fließformbiegeprozess mit gekoppelter Walzung (geschlossene Profile) betrachtet.

Als Referenzbauteil für das Biegen von offenen Profilen dient ein Hutprofil eines Kunden der Klingelberg AG. Zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit wurden bei der Firma Klingelberg Versuche zu diesem Profil durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird zuerst der Aufbau der Referenzsimulation beschrieben und danach eine Parameterstudie durchgeführt. Zum Schluss folgen virtuelle Stauchversuche.

#### 4.3.1 Referenzbauteil/Referenzsimulation

Für die Parameterstudie zum offenen Profil wird zuerst das Referenzbauteil beschrieben. Anschliessend wird der Aufbau der FE Simulation aufgezeigt.

##### Referenzbauteil

In Abbildung 4.33 ist der Querschnitt des verwendeten Profils abgebildet. Die Wandstärke des Profils beträgt 1 mm. Das simulierte Profil ist 840 mm lang. Die übrigen Masse sind in Abbildung 4.33 ersichtlich.

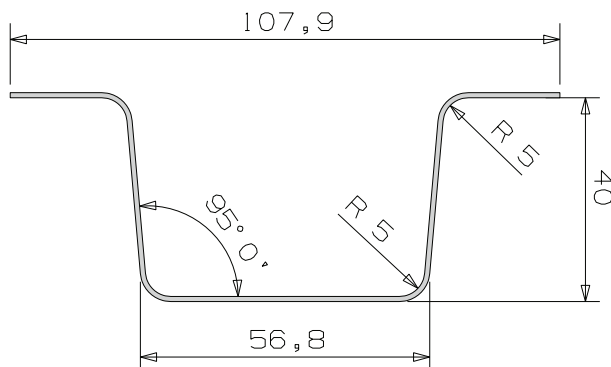


Abbildung 4.33 Querschnitt Hutprofil

##### Simulationsaufbau

Grundlage für die Simulation des Hutprofils bildet eine Simulationsreihe von Dr. C. Karadogan, welche im November 2006 präsentiert wurde. Damals war das Werkzeugkonzept mit Minirollen noch nicht aktuell, somit bestand das Werkzeug aus einem Rollenpaar (Walz- und Mittelrolle) mit ungefähr gleichen Durchmessern. Für die Simulationen wird mithilfe einer Symmetriebedingung jeweils nur das halbe Profil simuliert.

Um die Option offen zu halten, allfällig reale Versuche durchzuführen, entspricht der Aufbau der Werkzeuge in den durchgeführten Simulationen weitgehend dem aktuellen Aufbau des realen Werkzeugs. Die beiden Walzrollen sind neu Minirollen und haben einen Radius von jeweils 8 mm. Die Mittelrolle besteht aus zwei Teilen mit zwei verschiedenen Radien, der kleinere beträgt 80 mm, der grössere 120 mm. Die beiden Radien der Biegerolle betragen 100 mm und 140 mm. Walzrollen und Mittelrolle sind wie folgt angeordnet:

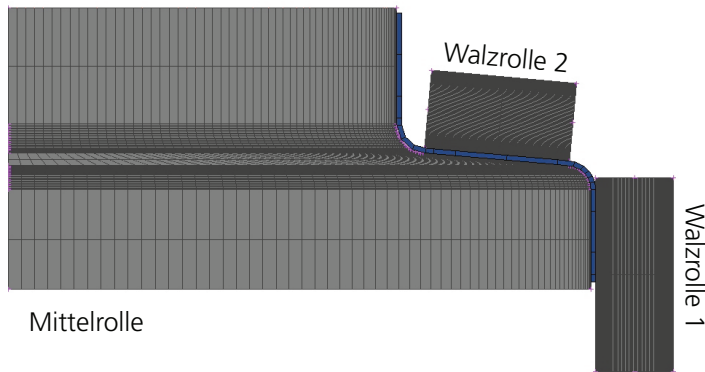


Abbildung 4.34 Aufbau der Walzrollen und der Mittelrolle Hutprofil

Der Walzspalt zwischen Walzrolle 1 und der Mittelrolle beträgt 0.8 mm. Das ergibt beim Referenzbauteil eine Ausdünnung von 0.2 mm. Walzrolle 2 ist so positioniert, dass sich eine lineare Verteilung der Ausdünnung von 0 mm beim Innenradius bis 0.2 mm beim Aussenradius ergibt.

Die theoretisch benötigte Auswalzung (siehe Abschnitt 3.1.3) für den vorgegebenen Innenbiegeradius von 360 mm beträgt 0.11 mm, führt bei der Simulation jedoch zu Wellenbildung beim Profilboden (Abbildung 4.35). In mehreren Vorversuchen werden deshalb die Einstellungen für ein Referenzbauteil, welches keine oder nur minimal Falten bildet, ermittelt.

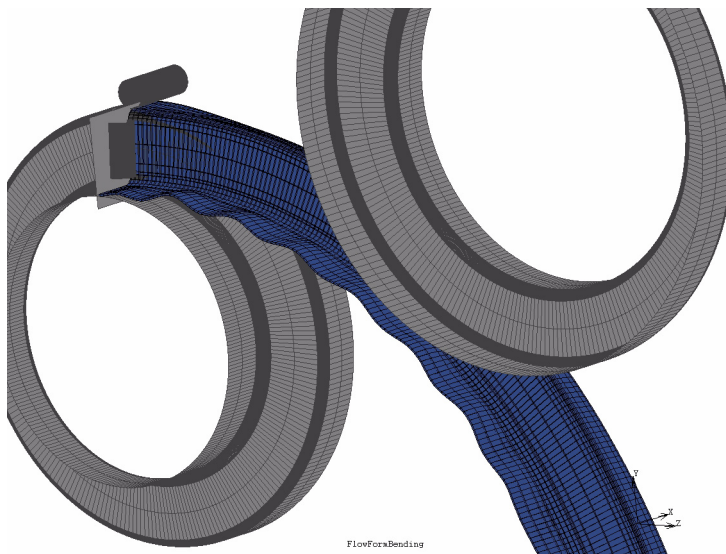


Abbildung 4.35 Hutprofil - Faltenbildung im Bodenbereich

Das Profil ist im Ausgangszustand so positioniert, dass es bereits bis zur Biegerolle reicht und im Kontakt mit dieser ist (Abbildung 4.37). Die Biegerolle verschiebt sich in Y-Richtung mithilfe einer Bewegungstabelle (Abbildung 4.36) zur gewünschten Endposition. Die Biegerolle gibt einen Innenradius des Bauteils von 360 mm vor. Die Bewegungstabelle der Biegerolle stammt aus der Simulationsreihe von Dr. C. Karadogan, jedoch ist ein Zurückfahren der Biegerolle zum Ermitteln der Rückfederung eingebaut worden.

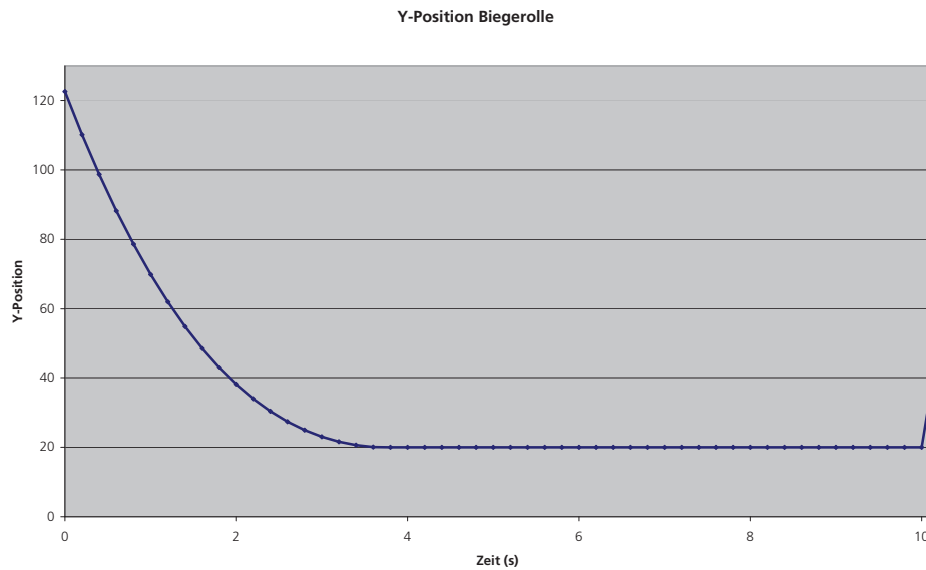


Abbildung 4.36 Bewegungstabelle Biegerolle (Y-Position)

In der ursprünglichen Simulation wird der Vorschub mithilfe von Randbedingungen realisiert. Den Knoten am Ende des Profils wurde ein Zeit-Weg-Verlauf vorgegeben. Um auf einfache Weise die Gesamtschubkraft zu ermitteln, ist es von Vorteil, wenn der Vorschub über ein Werkzeug realisiert wird. Deshalb wird das Profil neu über eine positionsgesteuerte Platte bewegt (vergleiche Aufbau Grundlagenversuche in Abschnitt 4.2.1).

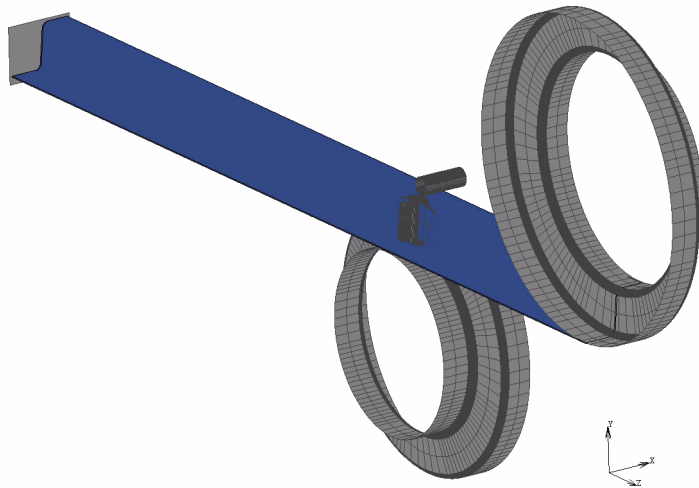


Abbildung 4.37 Simulationsaufbau mit Schubschlitten, Walz-, Mittel- und Biegerollen, Ausgangszustand

Sämtliche Rollen, sowohl die Walz- und Mittelrollen als auch die Biegerolle sind angetrieben, ihre Rotationsgeschwindigkeit ist jeweils so gewählt, dass sie beim tangentialen Berührungspunkt mit dem Profil dieselbe Geschwindigkeit haben. Im Fall der Mittelrolle ist dabei die Geschwindigkeit beim Flansch ausschlaggebend.

Die Materialdaten, welche ursprünglich vom Kunden stammen, werden durch Materialdaten aus Autoform ersetzt. Die Materialdaten sind in Abschnitt 4.2.1 abgebildet und erklärt.

Das Bauteil ist, wie bereits in der Ausgangssimulation, in 5880 Elemente aufgeteilt und nur zur Hälfte abgebildet. Die Vernetzung in der Dickenrichtung ist mit einem Element etwas grob, scheint für die Simulation grundsätzlicher Versuche jedoch genügend. Über eine Randbedingung ist die Symmetrieebene definiert. Die Dauer der Simulation beträgt neu 10.2 Sekunden (anstatt 10 Sekunden), da das Zurückfahren der Biegerolle zusätzlich an die Simulation angefügt ist. Es werden 1020 Inkremente berechnet, wobei der Umformprozess 1000 Inkremente lang dauert und die Rückfederung während der übrigen Zeit simuliert wird. Um nicht unnötig viele Daten zu generieren, wird jedes zwanzigste Inkrement abgespeichert.

Die Rechenzeit der Simulationen des Hutprofils liegen zwischen 22 und 33 Stunden (lokal auf Windows gerechnet). Gewisse Simulationen dauern länger, da gleichzeitig zwei Berechnungen auf dem gleichen PC am Laufen sind.

Als Überblick folgt nachstehend eine Zusammenfassung der Änderungen zur ursprünglichen Simulation von Dr. C. Karadogan:

- Die Werkzeuge sind auf das neue Werkzeugkonzept angepasst
- Die ursprünglich verwendeten Materialdaten werden durch Daten aus Autoform ersetzt
- Der Vorschub wird über einen Schubschlitten realisiert
- Die Biegerolle fährt am Ende der Simulation zurück, damit die Rückfederung gemessen werden kann
- Die Dauer der Simulation wird von 10 auf 10.2 Sekunden verlängert



Abbildung 4.38 Rollenordnung Hutprofil, deformierter Zustand

#### 4.3.2 Aufbau der Parameterstudie

Für die Parameterstudie "Hutprofil" werden die folgenden Parameter untersucht:

- Reibung
- Wandstärke
- Material

Nachfolgend wird aufgezeigt, wie der Aufbau der Parameterstudien der einzelnen Parameter aussieht.



### *Parameter Reibung*

Reibkoeffizienten bei der Verbindung Stahl/Stahl variieren in der Literatur für trockene und geschmierte Zustände in einem Bereich von 0.04 bis 0.4. Wird bei MICHAELIS für Stahl/Stahl ein Gleitreibungskoeffizient von 0.1 bis 0.4 angegeben [5], liegen die Werte für dieselbe Verbindung nach STÖCKER zwischen 0.02 und 0.08 (geschmiert) und 0.1 und 0.3 (trocken) [6]. Für die Simulationen werden hier Reibwerte zwischen 0.05 und 0.4, jeweils im Abstand von 0.05 vorgegeben.

Um den Einfluss der Reibung auf die Bauteilqualität und das Deformationsverhalten zu untersuchen, werden bei der Referenzsimulation jeweils die Reibparameter angepasst. Der Reibkoeffizient kann als globaler Parameter betrachtet werden, er bezieht sich jeweils auf sämtliche Kontakte zwischen Bauteil und Werkzeugkomponenten.

### *Parameter Wandstärke*

Beim Parameter Wandstärke soll untersucht werden, wie sich eine Abweichung der Soll-Dicke des Bleches auf das Bauteil auswirkt. Im realen Prozess kommt es oft vor, dass Profile sich innerhalb einer Charge oder von Charge zu Charge in der Blechdicke unterscheiden.

Für die Simulation wird der Parameter Wandstärke zwischen 0.97 mm und 1.03 mm, jeweils im Abstand von 0.01 mm simuliert. Zusätzlich wird eine Simulation mit Wandstärke 1.05 mm und eine mit Wandstärke 0.95 mm als Maximal- und Minimalwert gerechnet.

Die Blechdicke wird in der Simulation folgendermassen verändert: Ausgehend vom Referenzprofil werden die Wandstärken jeweils manuell angepasst, d.h. die einzelnen Elementknoten werden in Normalenrichtung in die positive oder negative Richtung verschoben. Die Auswalzeinstellungen bleiben jeweils gleich wie beim Referenzprofil (Kapitel 4.3.1).

Alternativ zur verwendeten Methode könnte die Wandstärke jeweils im CAD angepasst und das Modell dann frisch vernetzt werden. Die gewählte Methode bietet jedoch den Vorteil, dass sich an der Vernetzung ausser der Dicke der Elemente nichts ändert. Bei einer frischen Vernetzung könnte möglicherweise die Auswertung verfälscht werden.

### *Parameter Material*

Ausgehend von den Materialtabellen in Abbildung 4.2 wird die Referenzsimulation mit der jeweiligen Materialkennwerten neu berechnet. Die übrigen Einstellungen entsprechen der Referenzsimulation.

## **4.3.3 Vorgehen bei der Auswertung**

Bei der Auswertung der Simulationsresultate geht es darum, die Einflüsse der verschiedenen variierten Parametern zu ermitteln. Dabei stellt sich die Frage, welche Outputparameter sinnvolle Resultate und Erkenntnisse bringen und welche Kriterien für die Qualität der Bauteile entscheidend sind. Im Vordergrund steht dabei der Einfluss der Inputparameter auf die Kontur des fertigen Bauteils, wobei hier vorallem auch die Rückfederung entscheidend mitspielt. Weiter werden die Kräfte auf Schubschlitten, Walz- und Biegerollen und die Ausdünnung untersucht. Nachfolgend wird gezeigt, wie diese Outputparameter ermittelt werden.

*Ermittlung der Kräfte*

Bei der Auswertung der Outputparameter zeigt sich, dass einige Ausgangsgrößen einen extrem unstetigen Verlauf aufweisen. Als Beispiel hier der Schubkraftverlauf beim Referenzprofil bzw. der Referenzsimulation (Abbildung 4.39):

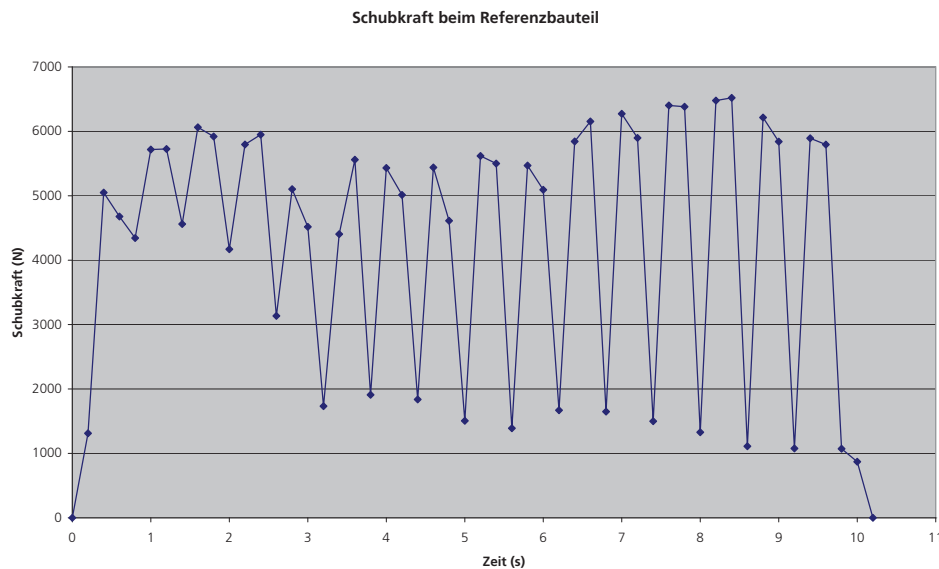


Abbildung 4.39 Hutprofil - Schubkraftverlauf beim Referenzprofil

Ein solches Verhalten der Schubkraft scheint nicht plausibel. Beim genaueren Betrachten des dynamischen Kontaktstatus zeigt sich, dass der Grund für den unsteten Verlauf bei der Vernetzung des Bauteils bzw. bei der Grösse der Walzrollen liegt. Da die Knoten des vernetzten Bauteils im Verhältnis zum Walzrollendurchmesser und zur Walzlänge (vergleiche Walztheorie in Abschnitt 3.1.2) relativ weit auseinander liegen, reisst der Kontakt zwischen Walzrollen und Bauteil partiell ab. In dem Moment sinken auch sämtliche Kräfte. Sobald die Rollen wieder in Kontakt sind, baut sich die Kraft wieder auf. Daher rührt der unstete Verlauf. Bei den Simulationen von Dr. C. Karadogan hatte dieses Problem nicht dasselbe Ausmass, da bei der alten Werkzeugkonfiguration keine Minirollen (Durchmesser 16 mm) sondern nur grosse Rollen (Durchmesser ca. 200 mm) zum Einsatz kamen. Dadurch war bei gleicher Auswalzung die Walzlänge länger und somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Knoten im Kontakt mit der Rolle war, auch grösser.

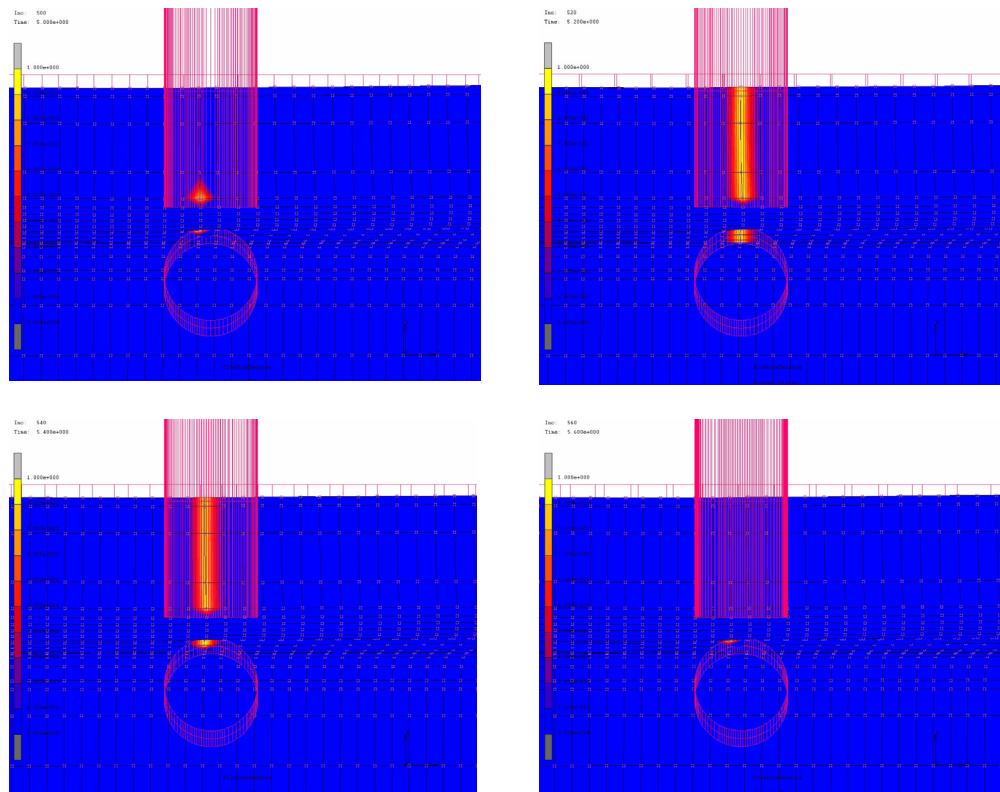


Abbildung 4.40 Kontaktstatus bei den Inkrementen 500, 520, 540 und 560 (Draufsicht)

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, wie die Kräfte ausgewertet werden können. So könnte z.B. ein Durchschnitt aller Werte, ein einziger Maximalwert, der Durchschnitt der Minimalwerte (gelbe Kurve) oder der Durchschnitt der Maximalwerte (pinke Kurve) als Mass für die Kräfte verwendet werden (siehe Abbildung 4.41). Für die Auswertung in dieser Arbeit wird, wenn nicht anders angegeben, der Durchschnittswert der Maximalwerte verwendet.

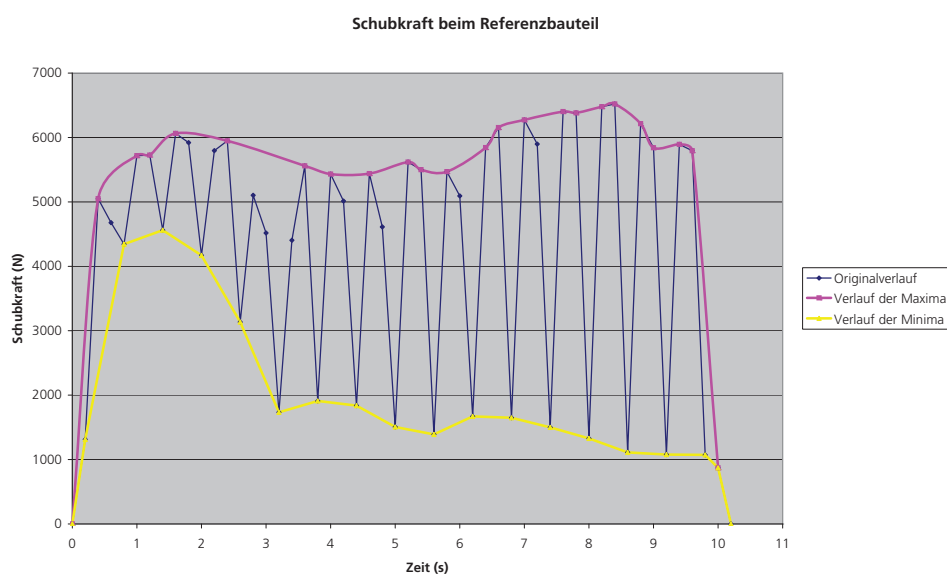


Abbildung 4.41 Hutprofil - Schubkraftverlauf beim Referenzprofil

Will man das beschriebene Kontaktproblem beheben, gibt es mit MSC Marc vor allem folgende Möglichkeit: Die Vernetzung des Bauteils muss verfeinert werden. Die Grundlagenversuche in Kapitel 4.2 zeigen, dass bei einer feineren Vernetzung in Schubrichtung die Kräfte stetiger verlaufen.

Um eine Verfeinerung des Netzes zu erhalten, gibt es zwei Varianten:

1. Vernetzung global verfeinern

Das bringt den Nachteil, dass die sonst schon grosse Anzahl Elemente noch grösser wird und die Berechnung dementsprechend mehr Zeit in Anspruch nimmt.

2. Lokales Remeshing

MSC Marc bietet eine Remeshing-Funktion. Dabei wird zuerst der Ort des Remeshings definiert (Remeshing within Box), anschliessend kann gewählt werden, ob das verfeinerte Netz bestehen bleibt oder sich das Netz wieder in den Ursprungszustand auflöst (Unrefine).

Beide Fälle bedeuten auf jeden Fall längere Rechenzeiten, wobei sich mit der Unrefine Funktion die Verlängerung der Rechenzeit eher im Rahmen halten sollte. Bei der Remeshing Funktion kann neben der Position der Box, in dem die Verfeinerung angewendet wird, auch das maximale Refinement Level gewählt werden. Das Level definiert die Anzahl Teilungen der Elementseiten. Für Level 1 werden alle Seiten eines Elements halbiert und somit entstehen aus dem ursprünglichen Element acht neue Elemente mit jeweils halber Seitenlänge. Stufe 2 des Refinements werden die Seiten geviertelt bzw. Level 1 nochmals halbiert. Das führt zu 64 Elementen.

Sowohl die Versuche mit dem Remeshing, als auch mit Verfeinerung des von Dr. C. Karadogan verwendeten Netzes, zeigen ein weiteres Problem der Simulation auf. Durch die erhöhte Zahl von Elementen stösst der Arbeitsspeicher des Rechners an seine Grenzen. Die Simulationen können mit der vorhandenen Kombination aus Hardware und Software nicht durchgeführt werden. Zudem verfeinert ein Remeshing das Netz in alle drei Richtungen, was im vorliegenden Fall nicht nötig ist. Eine Verfeinerung des Netzes ist daher bei der bestehenden Simulation nicht möglich. Die vorhandene Vernetzung scheint trotzdem ausreichend, um grundlegende Versuche zum Fließformbiegen zu simulieren. Die Auswertung der Kräfte wird aufgrund ihrer Unstetigkeit, wie bereits angesprochen, anhand von Durchschnittswerten der Maximalwerte durchgeführt.

### *Messen der Rückfederung*

Um die Rückfederung beim vorliegenden Bauteil zu bestimmen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Rückfederung könnte anhand eines Vergleichs der Biegeradien bei Inkrement 1000 (Umformung abgeschlossen, Bauteil aber durch Biegerolle noch belastet) und Inkrement 1020 (unbelastetes Bauteil) gemessen werden. Dabei käme wieder die Matlab Funktion aus Anhang B zum Einsatz. Problem dabei ist allerdings die Ungenauigkeit der Methode und die unregelmässige Krümmung des Bauteils. Daher kommt diese Methode nicht zum Einsatz.

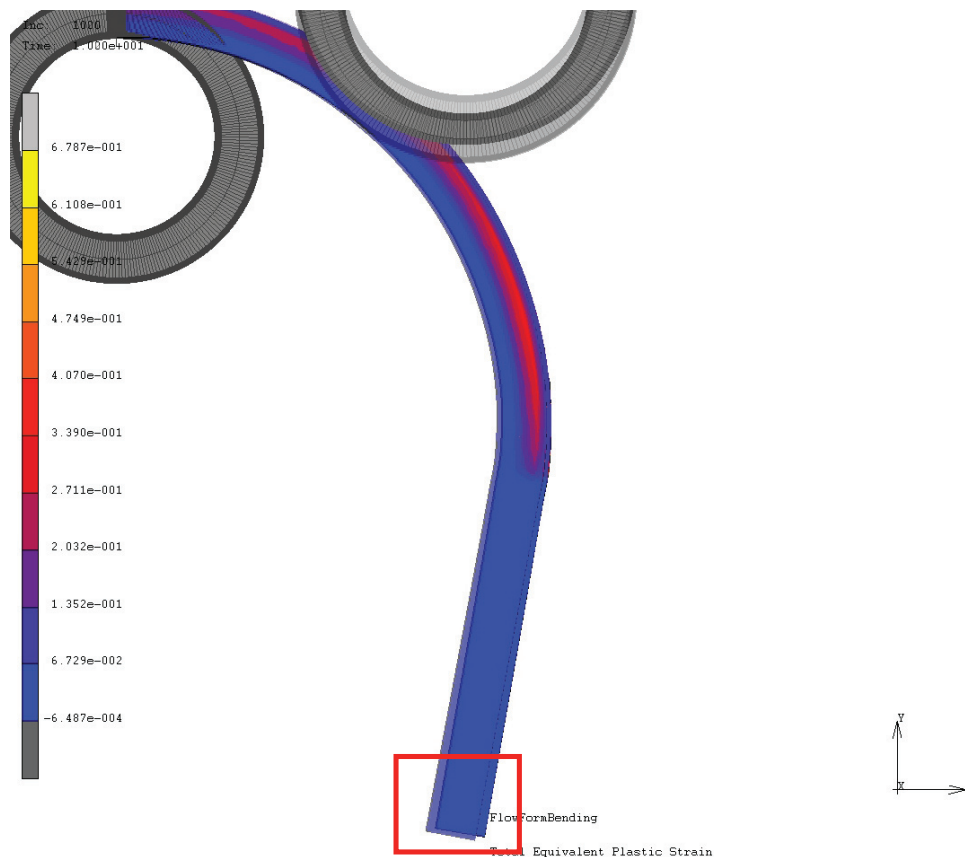


Abbildung 4.42 Messen der Rückfederung - Übersicht

Als einfache Grösse für die Messung der Rückfederung zwischen Inkrement 1000 und 1020 dienen die Y- und Z-Koordinaten eines Punktes im Bauteil. Die Länge des Vektors vom Punkt A bei Inkrement 1000 zum Punkt A bei Inkrement 1020 wird als Mass für die Rückfederung verwendet. Als Messpunkt dient ein Punkt am Anfang des Profils (siehe Abbildung 4.43).

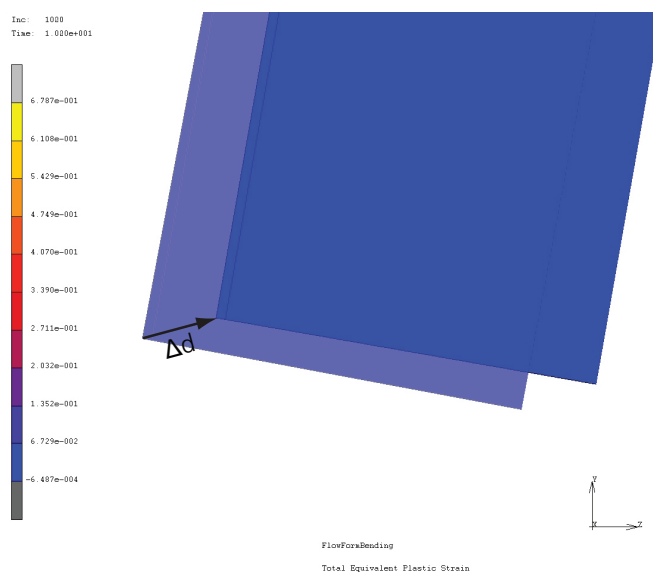


Abbildung 4.43 Messen der Rückfederung - Detailansicht

### Ausdünnung

Als letzter Parameter wird die Ausdünnung gemessen. Dabei wird jeweils ein Mittelwert aus fünf Messungen berechnet. Die Messungen werden über das Profil verteilt vorgenommen. Es gibt eine Messung für den Flansch und eine für den Bodenbereich. Das Messen in MSC Marc geschieht manuell mit der Funktion "dist". Die Ausdünnung wird nicht für alle Versuche ermittelt.

Die Auswertung der Resultate wird nun für die in der Parameterstudie in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Versuche durchgeführt. Dabei wird zuerst der Einfluss der Reibung, dann der Einfluss der Wandstärke und zuletzt der Einfluss des Materials untersucht.

#### 4.3.4 Einfluss der Reibung

Wie bereits in den Grundlagenversuchen zur Reibung in Abschnitt 4.2.3 aufgezeigt wird, ist der Einfluss der Reibung auf den Fließformbiegeprozess nicht vollständig bekannt. Die Auswertung der Versuche soll zeigen, wie sich die Reibung auf die Kräfte, die Rückfederung und die Ausdünnung auswirkt.

### Kräfte

Das in Abschnitt 4.3.3 erwähnte Kontaktproblem wirkt sich auf den Verlauf der Schubkräfte aus. In Abbildung 4.44 und Abbildung 4.45 sind die in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Mittelwerte der Maximalwerte für die Walzkräfte und die Schubkräfte abgebildet.

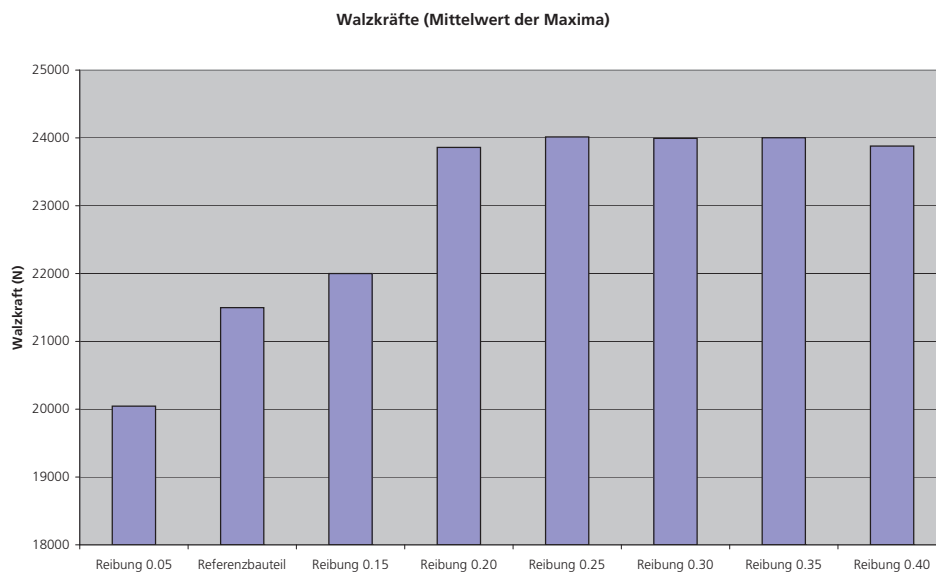


Abbildung 4.44 Hutprofil - Walzkräfte bei unterschiedlicher Reibung

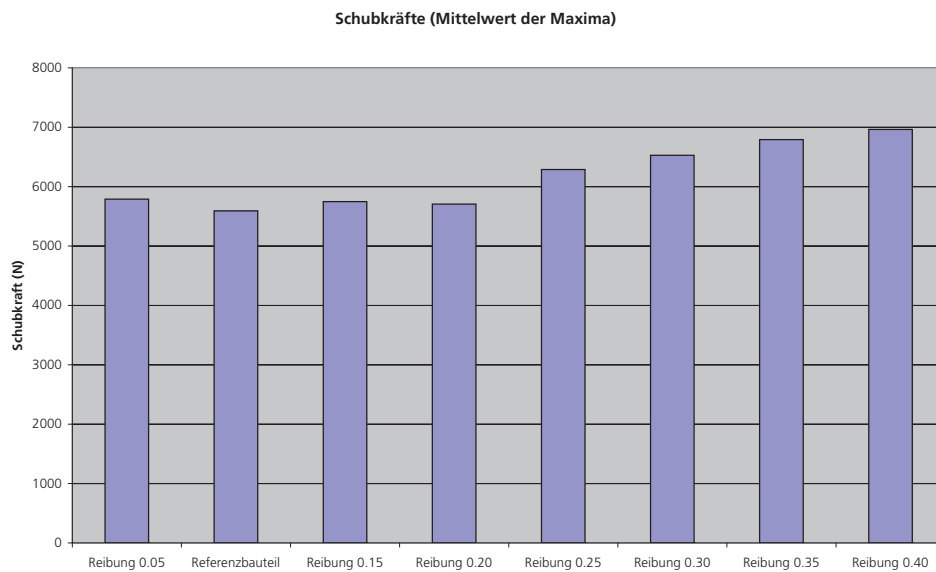


Abbildung 4.45 Hutprofil - Schubkräfte bei unterschiedlicher Reibung

Der Verlauf der Schubkraft in Abbildung 4.39 (Referenzsimulation) zeigt, dass eine Auswertung schwierig und auch heikel ist, da die Resultate nicht eindeutig sind. Aus Abbildung 4.44 und Abbildung 4.45 kann zumindest eine Tendenz erkannt werden. Bei steigender Reibung nehmen die Kräfte eher zu. Um Schlussfolgerungen zu ziehen, sind die Ergebnisse aber ungenügend. Von der Walztheorie ist bekannt, dass zumindest der Walzprozess auf die Walz- und dementsprechend auch Schubkräfte einen Einfluss hat. Wie stark die Biegerolle diese Kräfte beeinflusst, ist jedoch nicht ersichtlich.

#### Rückfederung

Betrachtet man die Rückfederung in Abbildung 4.46, ist eindeutig eine Abhängigkeit von der Reibung festzustellen. Durch die Erhöhung der Reibung wird die Rückfederung geringer.

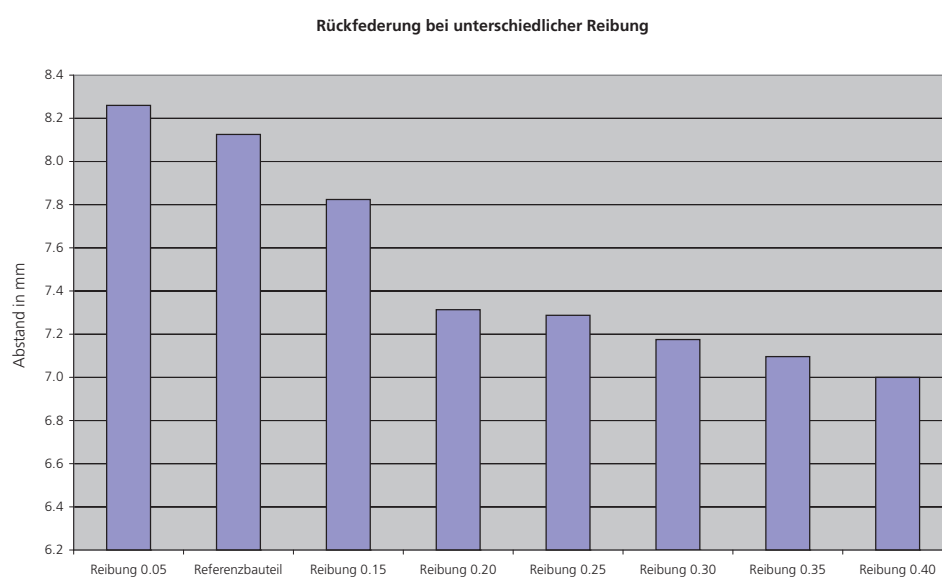


Abbildung 4.46 Hutprofil - Rückfederung bei unterschiedlicher Reibung

Die Rückfederung bei Fließformbiege-Simulationen hängt vorwiegend vom Umformverhalten durch den Walzprozess ab, d.h. wird durch das Walzen bereits die vorgegebene Krümmung erreicht, greift die Biegerolle nicht mehr ein und somit wird das Profil auch nicht zurückfedern. Je stärker jedoch die Biegerolle eingreift, also je höher die Kräfte auf der Biegerolle sind, umso grösser wird die Rückfederung ausfallen. Die Versuche aus Kapitel 4.2.3 zeigen, dass sich das modellierte Blech beim Auswalzen mit zwei unterschiedlich grossen Rollen abhängig von der Reibung verbiegt. Man kann davon ausgehen, dass die Krümmung durch Walzen beim Erhöhen der Reibung sich positiv auf die Gesamtkrümmung des Profils auswirkt und somit weniger Rückfederung entsteht.

#### *Fazit*

Im aktuellen Abschnitt konnte gezeigt werden, dass der Reibkoeffizient einen Einfluss auf den gesamten Fließformbiegeprozess hat. Konstante Verhältnisse bei der Reibung sind folglich beim Fließformbiegen mit den verwendeten Werkzeugen wichtig für die Reproduzierbarkeit des Prozesses.

Es konnte auch gezeigt werden, dass die Reibung einen Einfluss auf die Walzkräfte hat. Für die Walzkraftmessung und -regelung in der realen Biegemaschine bedeutet das, dass beim Wechsel eines Schmiermittels, also bei der Veränderung der Reibverhältnisse, die Walzkraft auch angepasst werden muss, damit eine gleich starke Ausdünnung erreicht werden kann.

#### **4.3.5 Einfluss der Wandstärke**

Die Toleranzen der Blechdicken bei offenen Profilen führt dazu, dass bei gleichbleibendem Walzspalt nicht dieselbe Ausdünnung erreicht werden kann. Wie sich Unterschiede in der Wandstärke auf den Prozess auswirken, wird in der folgenden Untersuchung gezeigt.

#### *Kräfte*

Die Walzkräfte (Abbildung 4.47) und Schubkräfte (Abbildung 4.48) nehmen mit zunehmender Wanddicke zu. Aus der Walztheorie ist bekannt, dass die Ausdünnung einen Einfluss auf die Walz- und somit auch auf die Schubkraft hat. Bei 0.2 mm vorgegebener Ausdünnung beim Referenzprofil, wird dieselbe beim 0.95 mm Profil auf 0.15 mm reduziert und beim Grössten dementsprechend erhöht. Damit ist der Verlauf der Walz- und Schubkräfte nachvollziehbar.



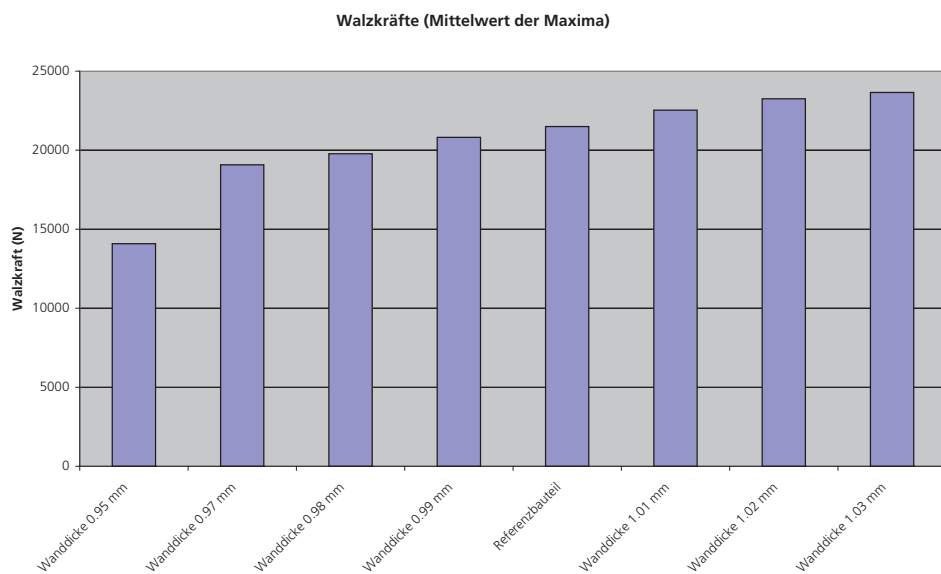


Abbildung 4.47 Hutprofil - Walzkraft bei unterschiedlicher Wandstärke

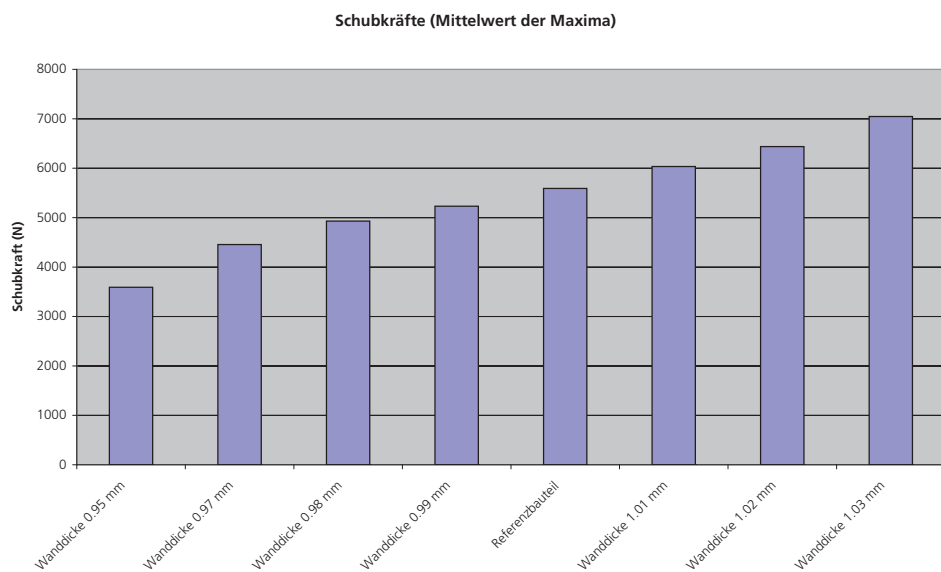


Abbildung 4.48 Hutprofil - Schubkräfte bei unterschiedlicher Wandstärke

### Rückfederung

In Abbildung 4.49 ist die gemessene Rückfederung bei unterschiedlichen Wanddicken dargestellt.

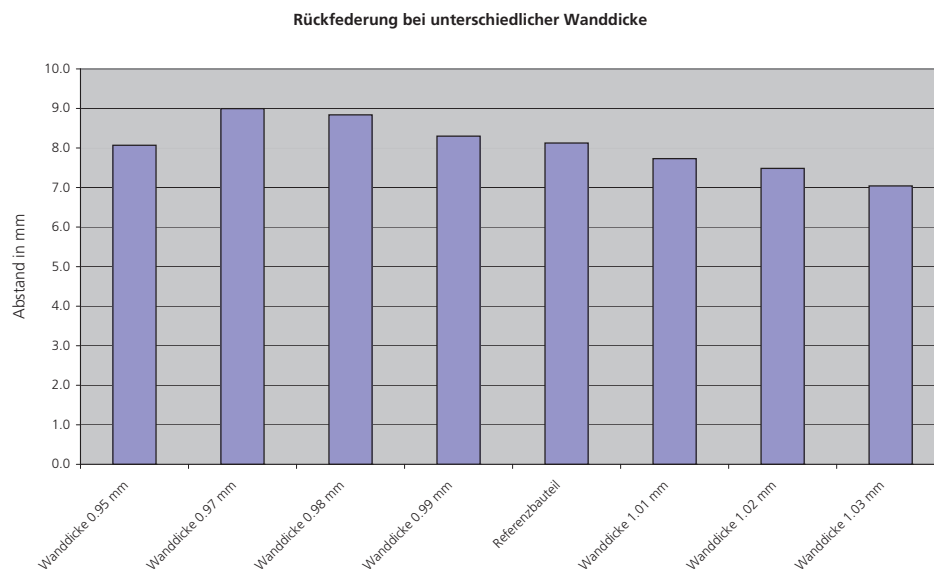


Abbildung 4.49 Hutprofil - Rückfederung bei unterschiedlicher Wanddicke

Auf der Abbildung fehlt der Versuch mit 1.05 mm (vergleiche Abschnitt 4.3.2). Das Profil versagt bei diesem Versuch, d.h. es staucht und wird nicht gebogen. Zudem bilden sich beim Versuch mit 0.95 mm Wandstärke Falten im Bodenbereich, was die Rückfederungscharakteristik beeinflusst.

Die Biegung beim Fließformbiegeprozess wird über die Auswalzung im Aussenradius und der Biegung der Biegerolle realisiert. Je stärker der Aussenradius ausgewalzt wird, umso stärker ist der Anteil des Walzens am Biegeradius, d.h. der Anteil der Biegung durch die Biegerolle nimmt ab. Damit wird auch die Rückfederung des Bauteils kleiner. Da der Walzspalt jeweils gleich bleibt, nimmt die absolute Ausdünnung mit der Blechdicke zu bzw. ab. Ein dickeres Blech wird somit stärker ausgewalzt und federt dadurch weniger stark zurück. Ein dünneres Blech wird dementsprechend weniger ausgewalzt und federt somit stärker zurück, da der Anteil der Biegeoperation grösser wird.

### Ausdünnung

Da die Werkzeugeinstellungen und damit auch der vorgegebene Walzspalt sich nicht verändern, ist zu erwarten, dass die Ausdünnung bei zunehmender Wandstärke zunimmt und bei abnehmender Wandstärke abnimmt. Die Auswertung der Ausdünnung im Flanschbereich (siehe Abbildung 4.50) zeigt, dass sich die Ausdünnung wie erwartet verhält.

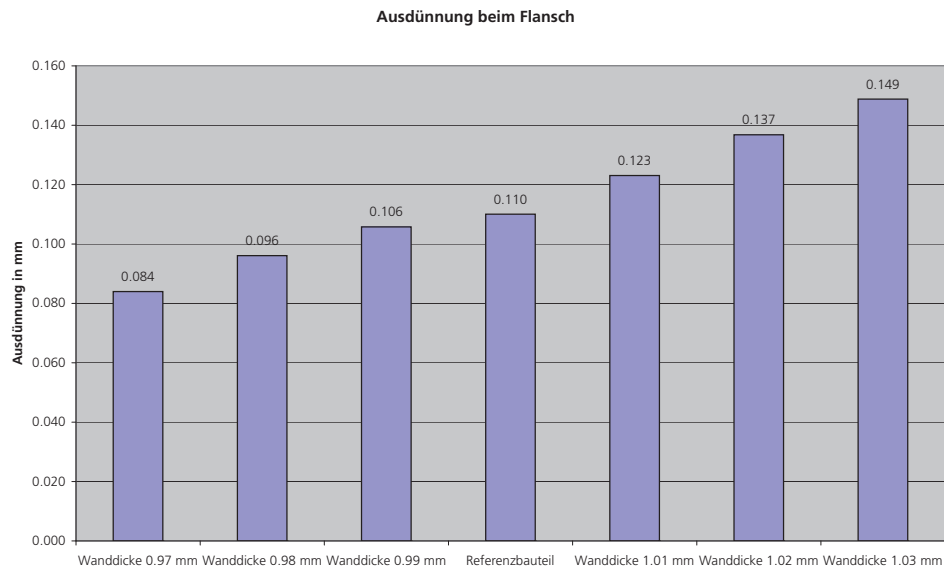


Abbildung 4.50 Ausdünnung beim Flansch bei verschiedenen Blechdicken

Die Verdickungen im Bodenbereich nehmen mit zunehmender Wanddicke ab (siehe Abbildung 4.51). Das rührt daher, dass sich durch die stärkere Ausdünnung bei zunehmender Blechdicke die neutrale Faser weiter zum Innenradius verschiebt und sich damit in diesem Bereich geringere Druckspannungen ergeben (siehe Kapitel 3.1.3).

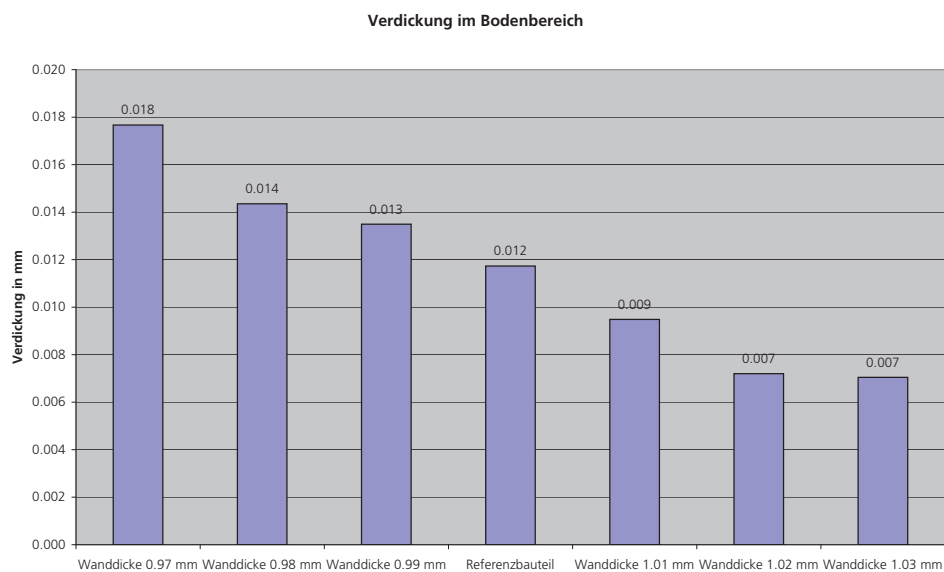


Abbildung 4.51 Verdickung im Bodenbereich bei verschiedenen Blechdicken

### Fazit

Die Dicke des umzuformenden Blechs verändert bei gleichbleibenden Werkzeugeinstellungen die Ausdünnung. Somit wird die neutrale Faser verschoben bzw. der durch Walzen vorgegebene Radius wird verändert. Mit einer adaptiven Regelung des Walzspaltes kann die Fließformbiegemaschine diese Wanddicken-Toleranzen ausgleichen. Bei Klingelberg wird dies mit einer Walzkraftmessung und -regelung umgesetzt.

4.3.6 Einfluss des Materials

Abschnitt 4.2.4 zeigt, dass sich das verwendete Material sowohl auf die Walz- und Schubkräfte, als auch auf die Krümmung beim Walzen auswirkt. Die folgenden Untersuchungen sollen zeigen, was eine Änderung des Materials beim Fließformbiegen zur Folge hat.

Kräfte

Die gemessenen Walz- und Schubkräfte in Abbildung 4.52 und Abbildung 4.53 hängen ebenfalls mit der Fließkurve des jeweiligen Materials zusammen. Die Fließgrenzen in Abbildung 4.52 zeigen einen fast linearen Zusammenhang zwischen Walzkraft und Streckgrenze. Eine höhere Streckgrenze bedeutet, dass eine höhere Spannung nötig ist, um das Bauteil plastisch zu verformen. Dementsprechend sind auch die benötigten Kräfte höher, sowohl die Walz- als auch die Schubkräfte.

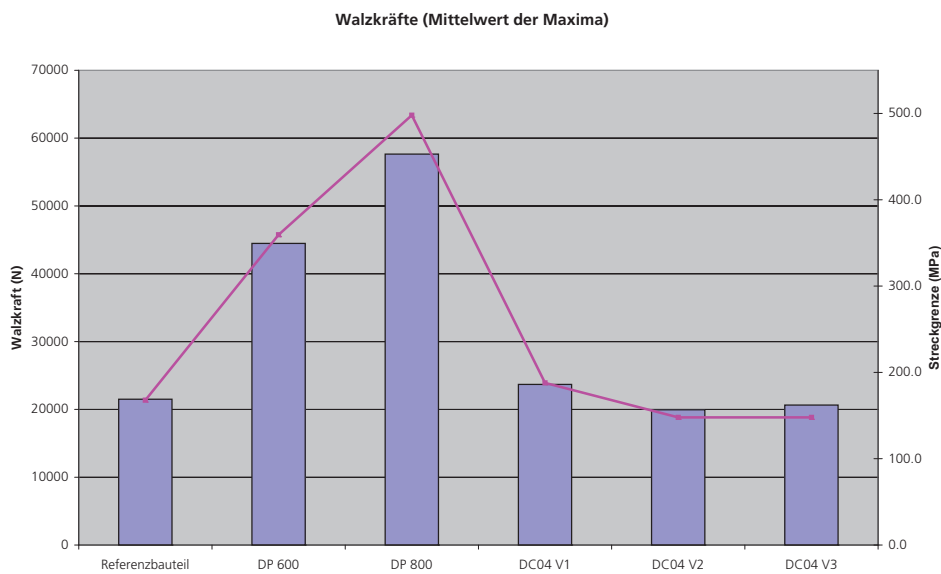


Abbildung 4.52 Hutprofil - Walzkraften bei unterschiedlichen Materialien

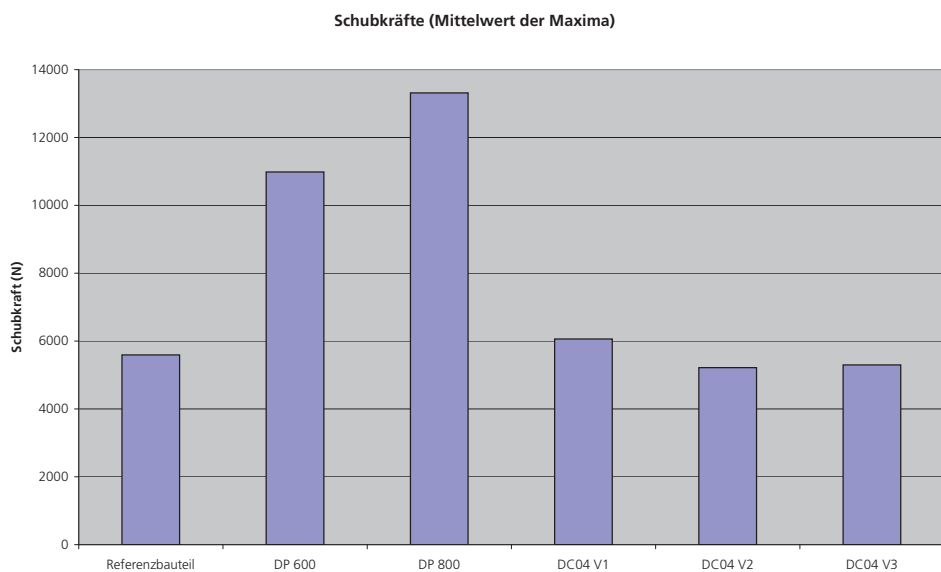


Abbildung 4.53 Hutprofil - Schubkräften bei unterschiedlichen Materialien

Der Vergleich zwischen Walz- und Schubkraft zeigt, dass die beiden Grössen miteinander zusammenhängen. Das Verhältnis von Walzkraft zur Schubkraft liegt für die verschiedenen Materialien zwischen 3.8 und 4.3.

### Rückfederung

In Abbildung 4.54 sind die Rückfederung und die dazugehörigen Streckgrenzen bei unterschiedlichen Materialien dargestellt. Vergleicht man die Fließgrenzen und die Rückfederung ist ein fast linearer Zusammenhang zu erkennen.

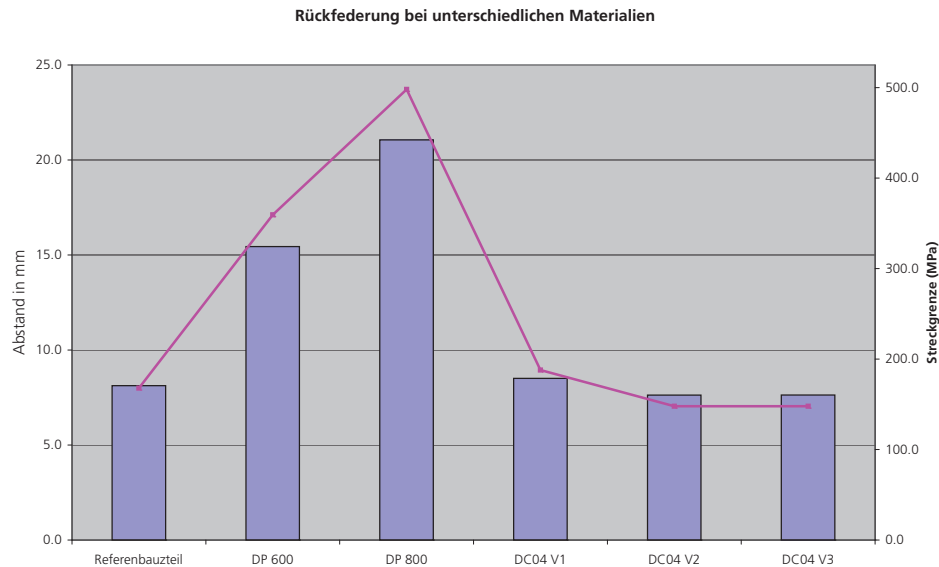


Abbildung 4.54 Hutprofil - Rückfederung bei unterschiedlichen Materialkennwerten

Die Rückfederung ist abhängig von der Höhe der Streckgrenze bzw. dem elastischen Anteil des Umformprozesses (vergleiche Kapitel 3.1.2 zum Biegeprozess). Bei einem Material mit einer höheren Streckgrenze, vorausgesetzt der E-Modul ist derselbe, ist dieser elastische Bereich grösser und dementsprechend die Rückfederung auch.

### Ausdünnung

Die Ausdünnung bei verschiedenen Materialien zeigt wie bei den Versuchen mit Reibung keine klare Tendenz (siehe Abbildung 4.55).

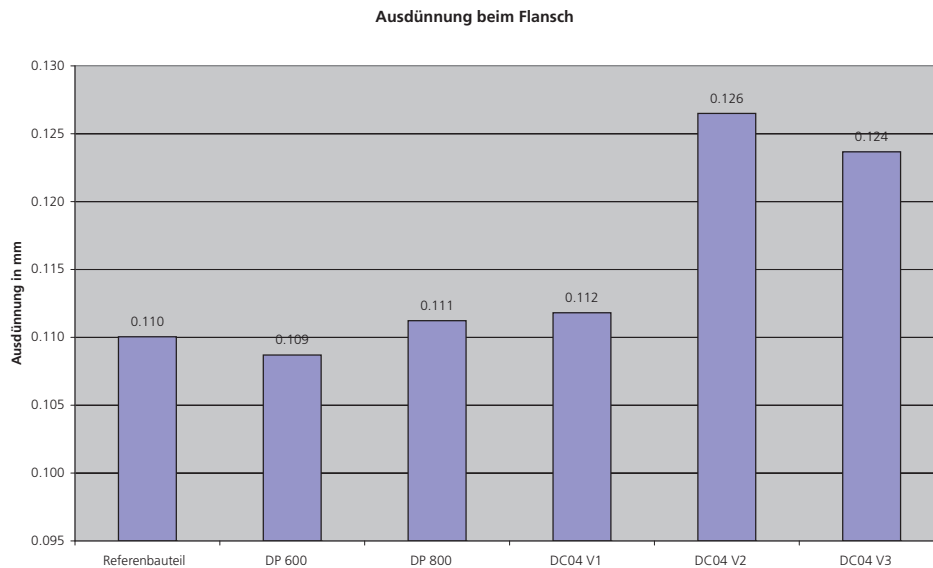


Abbildung 4.55 Ausdünnung beim Flansch bei unterschiedlichen Materialien

### Fazit

Die Untersuchungen mit verschiedenen Materialien zeigen, dass die Fließkurve, vor allem aber die Fließgrenze eines Materials sowohl auf die Walz- und Schubkräfte, als auch auf die Rückfederung einen starken und etwa linearen Einfluss haben. Durch das fast lineare Verhalten kann somit die Walzkraftregelung der Biegemaschine beim Wechsel des Materials angepasst werden.

### 4.3.7 Stauchversuche

Sowohl bei praktischen als auch virtuellen Versuchen (z.B. Wandstärke 1.05 mm) stellt sich oft das Problem, dass Profile beim Umformen knicken oder stauchen. Die Ursache für das Versagen eines Bauteils sind Instabilitäten. Diese Instabilität können in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Zum einen sind dies geometrische Instabilitäten, zum anderen Instabilitäten des Materials. Eine Abschätzung, welcher Fall von Instabilität wahrscheinlicher eintritt, kann relativ einfach gemacht werden. Mithilfe der Eulerschen Knicklast (geometrische Instabilität) kann für den Querschnitt und die Länge des Profils eine kritische Last berechnet werden (siehe Abschnitt 3.1.3). Aus dieser Kraft kann für den gegebenen Querschnitt eine kritische Druckspannung berechnet werden. Ist diese Druckspannung wesentlich kleiner als die Fließspannung des Werkstückwerkstoffes, kann davon ausgegangen werden, dass als Versagenskriterium des Bauteils eine geometrische Instabilität auftreten wird. Im umgekehrten Fall wird eine materielle Instabilität zum Versagen führen. Die Euler Knicklast ist in dem Moment nicht mehr relevant.

Am Beispiel des Hutprofils soll die Berechnung durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass es sich um die Einspannung (2) handelt (eingespannt/gelenkig). Folgende Größen sind bereits bekannt:

$$E\text{-Modul} = 210000\text{N/mm}^2$$

$$s = \beta \cdot L = 1 \cdot 840\text{mm}$$

Das Flächenträgheitsmoment wird mithilfe des CAD Programms berechnet und ergibt sich zu  $I_y = 47511.5 \text{ mm}^4$ . Das Trägheitsmoment bezüglich der Y-Achse ist wesentlich kleiner als das bezüglich der X-Achse und ist in diesem Fall kritisch für Knicken.

Daraus ergibt sich die kritische Eulerlast zu:

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 47511.5 \text{ mm}^4}{(840 \text{ mm})^2} = 139560 \text{ N} = 140 \text{ kN} \quad (4.2)$$

Für die kritische Eulerlast kann nun die Druckspannung auf den Profilquerschnitt berechnet werden. Für das Hutprofil mit Querschnittsfläche  $A = 173.5 \text{ mm}^2$  ergibt sich die Druckspannung zu:

$$\sigma_{\text{Hutprofil}} = \frac{F}{A} = \frac{139560 \text{ N}}{173.5 \text{ mm}^2} = 804 \text{ N/mm}^2 \quad (4.3)$$

Für das Hutprofil liegt diese Druckspannung weit oberhalb der Streckgrenze von üblicherweise verwendeter Materialien. Somit wird bei reiner Druckbelastung das Profil durch materielle Instabilitäten versagen, d.h. es staucht.

Mit einem einfachen Stauchversuch soll gezeigt werden, dass beim Hutprofil bei reiner Druckbelastung materielles Versagen auftreten wird. Der Simulationsaufbau ist in Abbildung 4.56 am Beispiel des Hutprofils abgebildet. Der Grundaufbau der Simulation ist aus Abschnitt 4.3.1 zu entnehmen. Das Profil ist zwischen zwei Platten eingespannt (Kontaktbedingung "glue"), wobei eine Platte weggesteuert ist und während der simulierten Zeit in der Schubrichtung einen Weg von 10 mm zurücklegt und somit das Profil staucht.

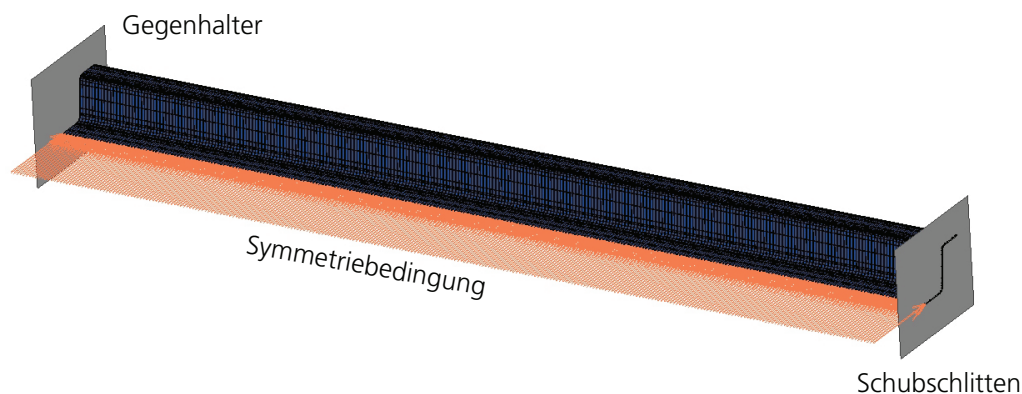


Abbildung 4.56 Aufbau Stauchversuch

Der Verlauf der Schubkräfte für verschiedene Materialien in Abbildung 4.57 zeigt, bei welchen Kräften das Profil instabil wird und somit sich plastisch verformt.

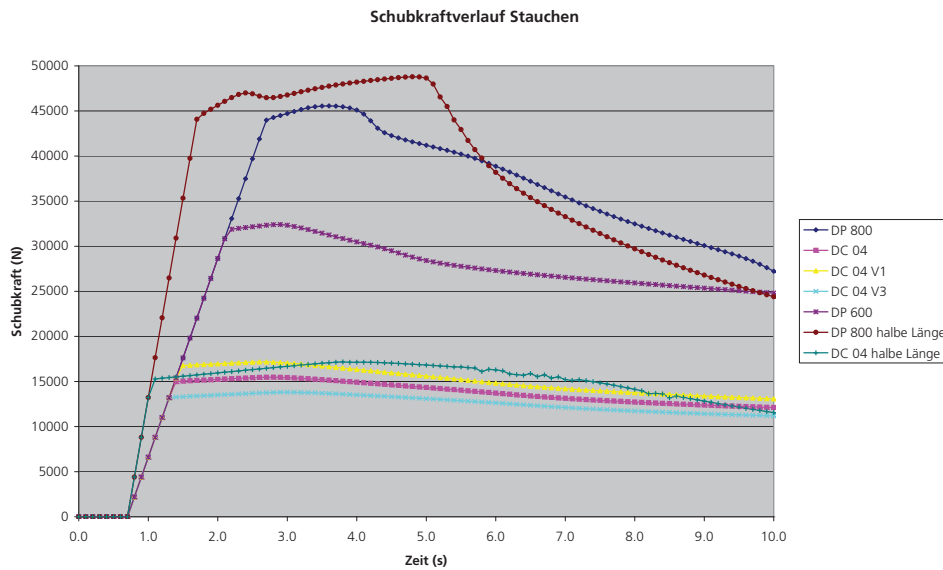


Abbildung 4.57 Schubkraftverlauf beim Stauchen für das Hutprofil

Das Profil ist jeweils nur zur Hälfte modelliert und mit einer Symmetriebedingung (siehe Abbildung 4.56) versehen, die angegebenen Kräfte müssen also noch mit Faktor zwei multipliziert werden.

Für DC 04 und DP 800 ist zusätzlich zu den 840 mm langen Profilen ein jeweils halb so langes Profil virtuell gestaucht worden. Es ist zu sehen, dass das Versagen vom jeweiligen Werkstoff und nicht von der Länge abhängt. Die Steigung im linearen Bereich hängt von der Länge des Profils ab. Der elastische Bereich ist bei einem halb so langen Profil auch halb so gross, d.h. die Steigung ist doppelt so steil.

Aus Abbildung 4.57 kann die Kraft beim Versagen herausgelesen werden (Punkt am Ende des linearen Teils). Daraus kann für diesen Punkt mit der Querschnittsfläche des jeweiligen Profils (siehe Abschnitt 3.1.3) die Druckspannung berechnet werden. Betrachtet man das Verhältnis dieser Druckspannung zur Streckgrenze beim jeweiligen Material, fällt auf, dass diese Verhältnisse immer im Bereich zwischen 1.02 und 1.05 liegen (siehe Abbildung 4.58).

Werkstoff	Druckspannung	Streckgrenze	Druckspannung/Streckgrenze
DC 04	172.8	167.9	1.03
DC 04 V1	193.5	187.9	1.03
DC 04 V3	152.2	147.9	1.03
DP 600	367.6	359.5	1.02
DP 800	507.1	498.0	1.02
DC 04 halbe Länge	176.2	167.9	1.05
DP 800 halbe Länge	508.1	498.0	1.02

Abbildung 4.58 Verhältnisse zwischen Druckspannung und Streckgrenze (Spannungen in N/mm<sup>2</sup>)



Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das gestauchte Hutprofil.

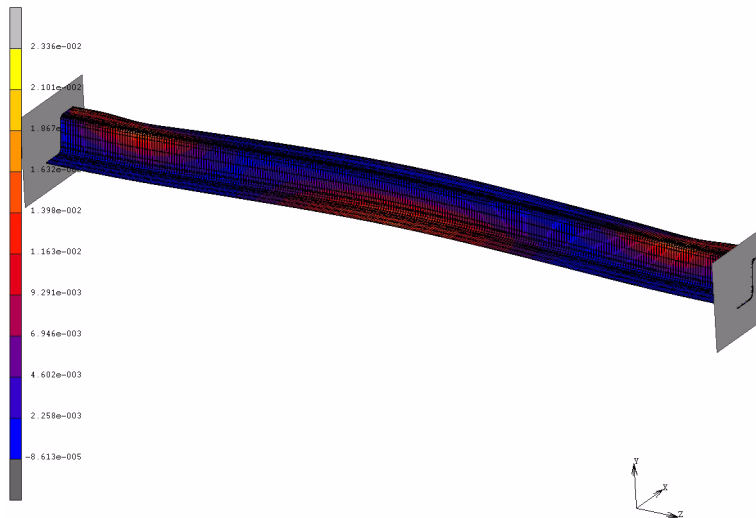


Abbildung 4.59 Gestauchtes Hutprofil

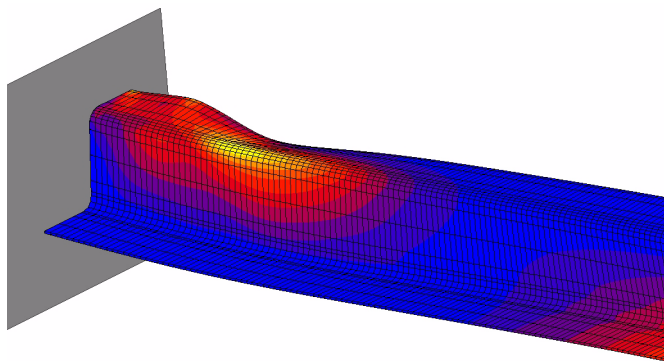


Abbildung 4.60 Gestauchtes Hutprofil - Detailansicht

Bei diesen Versuchen wird davon ausgegangen, dass es sich um reine Druckbelastung handelt. Im Fließformbiegeprozess wird über die Biegerolle noch zusätzlich ein Biegemoment aufgebracht. Obwohl diese Biegebelastung durch eine Stützrolle teilweise kompensiert wird, kann sie dazu führen, dass das Bauteil bereits früher staucht oder knickt.

Die Versuche zu den offenen Profilen haben anhand des Hutprofils gezeigt, dass sämtliche der drei untersuchten Parameter (Reibung, Wanddicke und Material) einen Einfluss auf die Walz- und Schubkräfte haben. Besonders der Einfluss der Streckgrenze des Materials spielt dabei eine grosse Rolle. Reibung und Wanddicke, vor allem aber das Material, beeinflussen die Rückfederung. Bei den Stauchversuchen konnte zudem gezeigt werden, dass das untersuchte Profil bei reiner Druckbelastung durch materielle Instabilität versagen wird.

## 4.4 Biegen geschlossener Profile

Bei geschlossenen Profilen wird, im Unterschied zu den offenen Profilen, ein Innendorn als Werkzeug verwendet. Zudem wird das Profil in zwei miteinander gekoppelten Umformstellen gewalzt. In den Untersuchungen soll unter anderem der Einfluss des Innendorns auf den Umformprozess genauer betrachtet werden. Als Referenzbauteil für das Biegen von geschlossenen Profilen dient ein Aluminium-Hohlprofil von einem Kunden der Klingelberg AG. Die Firma Klingelberg hat zu einem früheren Zeitpunkt virtuelle und praktische Versuche mit diesem Profil durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird zuerst der Aufbau der Referenzsimulation beschrieben und danach eine Parameterstudie durchgeführt.

### 4.4.1 Referenzbauteil/Referenzsimulation

In den folgenden zwei Abschnitten wird zuerst das Referenzbauteil für die geschlossenen Profile beschrieben. Anschliessend wird der Aufbau der FE Simulation erläutert.

#### Referenzbauteil

Der Querschnitt des Referenzbauteils ist in Abbildung 4.61 abgebildet. Die Länge des simulierten Profils beträgt 600 mm. Das Profil stammt von einem Kunden von Klingelberg. Im Jahr 2005 machte die Klingelberg AG Versuche mit diesem Profil. Zur Zeit wird mit dem Profil bei Klingelberg nicht mehr gearbeitet, aber es handelt sich dabei um einen einfachen Fall eines typischen Aluminium Strangpressprofils, wie es in der Automobilindustrie verwendet wird.

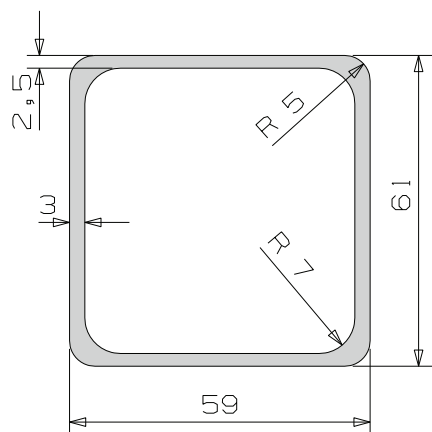


Abbildung 4.61 Querschnitt Hohlprofil

#### Simulationsaufbau

Grundlage für die Simulation des Hohlprofils ist wie beim Hutprofil eine Simulationsreihe von Dr. C. Karadogan. Die Resultate der Simulation wurden im Dezember 2005 präsentiert. Das Minirollenkonzept war damals noch nicht aktuell, wird hier aber verwendet.

In Abbildung 4.62 ist der Aufbau der walzenden Werkzeuge dargestellt. Der Werkzeugsatz besteht aus einer Walzrolle, zwei Z-Rollen und einer Mittelrolle. Um die Simualtionszeit zu verkürzen wird wie beim Hutprofil nur die Hälfte des Aufbaus simuliert. Die Walz- und Z-Rollen haben einen Radius von 8 mm, die Mittelrolle einen Radius von 90 mm. Die Grösse des Innendorns entspricht gerade den Innenmassen des Referenzprofils. Die Biegerolle ist 135 mm im Durchmesser (Abbildung 4.63).

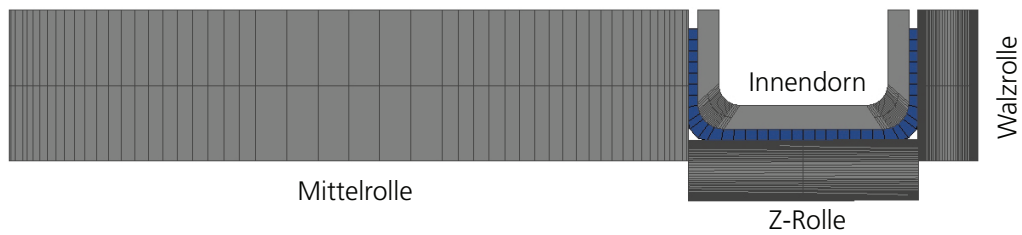


Abbildung 4.62 Werkzeugaufbau in der Walzebene - Hohlprofil

Der vorgegebene Innenradius beträgt 550 mm. Die durch die Walzrolle vorgegebene Ausdünnung beträgt somit 0.3 mm. Die Z-Rolle ist schräg gestellt und walzt das Profil vom Innen zum Aussenradius linear von 0 bis 0.3 mm zunehmend aus. Der Ausgangszustand der Werkzeuge ist in Abbildung 4.63 ersichtlich. Das Profil wird bereits nach kurzer Anlaufzeit ausgewalzt, die Biegerolle nähert sich an das Profil an und erreicht bei 4.5 Sekunden die endgültige Position (Abbildung 4.64).

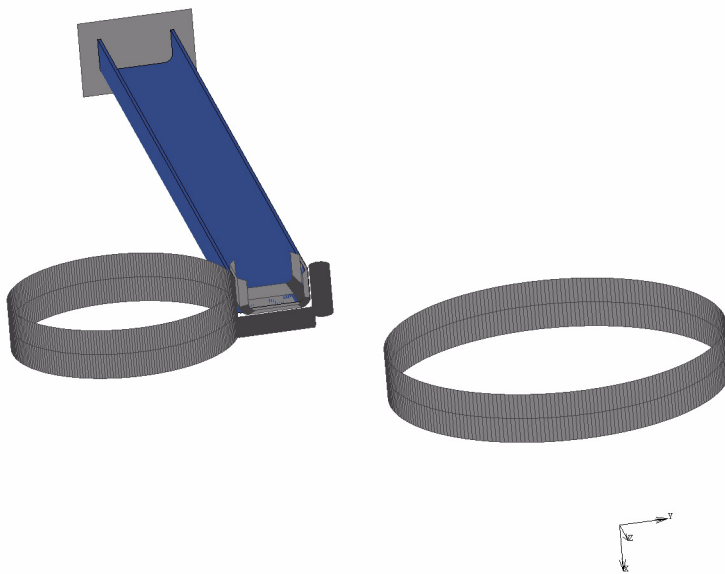


Abbildung 4.63 Simulationsaufbau Hohlprofil - Ausgangszustand

Wie in der Bewegungstabelle (Abbildung 4.64) zu erkennen ist, fährt die Biegerolle am Ende des Prozesses leicht zurück, damit die Rückfederung ermittelt werden kann.

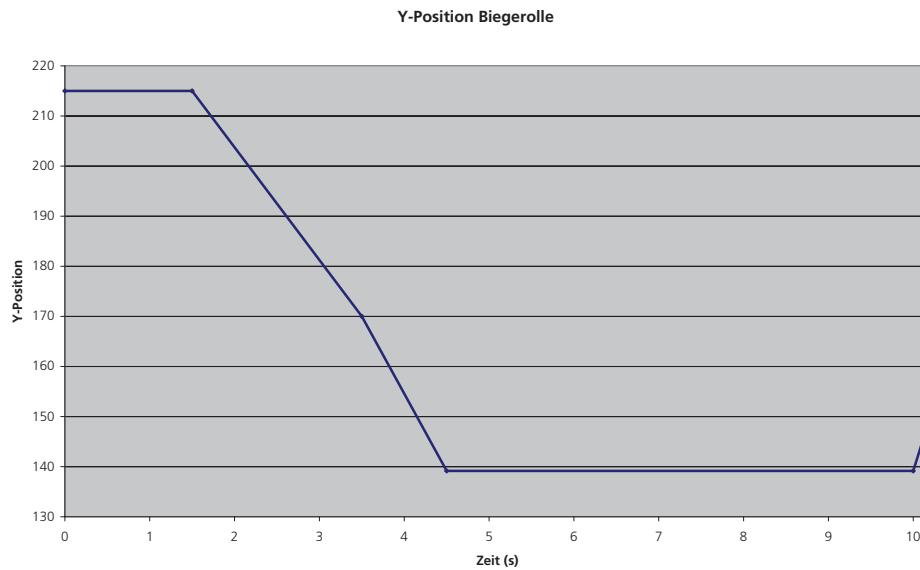


Abbildung 4.64 Bewegungstabelle der Biegerolle - Hohlprofil

Im Unterschied zur Simulation von Dr. C. Karadogan, welche ohne Reibung berechnet wurde, wird hier das Coulomb'sche Reibmodell verwendet. Deshalb werden neu auch sämtliche Rollen in der Simulation angetrieben und haben jeweils im Kontaktpunkt mit dem Profil dieselbe Geschwindigkeit. Der Reibkoeffizient der Referenzsimulation beträgt 0.1. Der Vorschub wird analog zur Simulation des Hutprofils mithilfe eines virtuellen Schubschlittens realisiert.

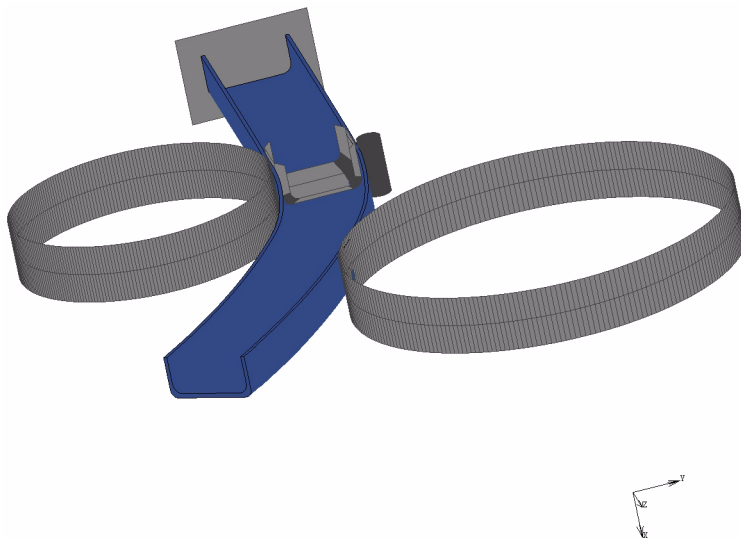


Abbildung 4.65 Rollenaufbau Hohlprofil

Die Materialdaten (AA6060) werden aus der Ausgangssimulation übernommen. Die Fließkurve ist in Abbildung 4.66 dargestellt.

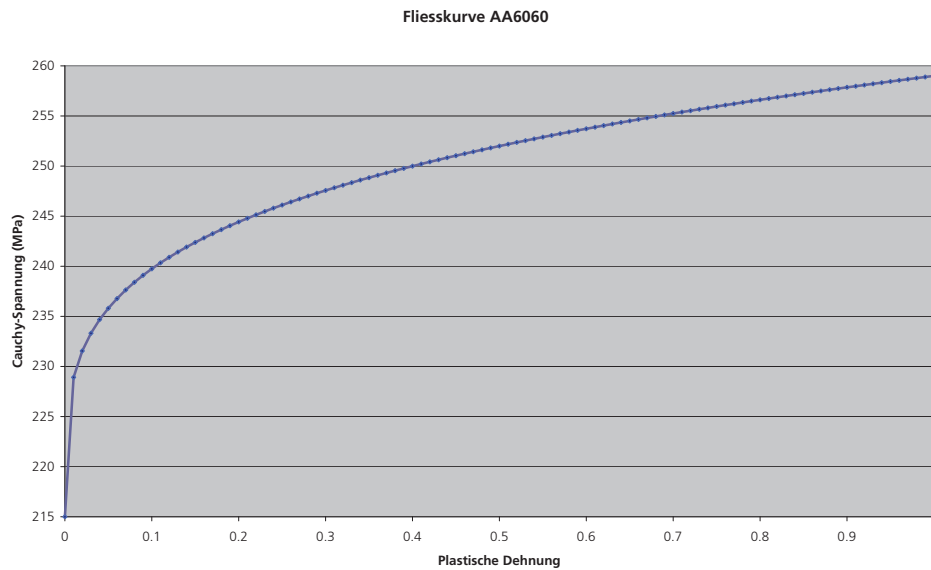


Abbildung 4.66 Fließkurve AA6060

Die Vernetzung des Bauteils wird beibehalten. Das Profil ist in 5700 Elemente aufgeteilt und wie bereits erwähnt nur zur Hälfte abgebildet. Die Dauer der gesamten Simulation beträgt 10.2 Sekunden, wobei der Umformprozess selber 10 Sekunden und die Simulation der Rückfederung 0.2 Sekunden dauern (bei der Simulation von C. Karadogan war die Dauer 10 Sekunden). Es werden 1020 Inkremente berechnet und jedes zwanzigste davon für die Auswertung abgespeichert.

Die Rechenzeit der Hohlprofil-Simulationen ist etwas länger als die der Hutsimulationen und liegt im Bereich zwischen 30 und 40 Stunden.

Als Überblick wird nachstehend eine Zusammenfassung der Änderungen zur ursprünglichen Simulation von Dr. C. Karadogan aufgeführt:

- Anstatt dem alten Rollenkonzept werden neu Minirollenwerkzeuge eingesetzt
- Der Vorschub wird über einen Schubschlitten realisiert
- Die Simulationsdauer wurde von 1 auf 10.2 Sekunden angepasst, es werden neu 1020 anstatt 400 Inkremente gerechnet
- Die Biegerolle fährt am Ende der Simulation wieder zurück
- Sämtliche Rollen werden angetrieben
- Die Simulation wird neu mit Reibung simuliert

#### 4.4.2 Aufbau der Parameterstudie

In der Parameterstudie zum geschlossenen Profil steht der Einfluss des Innendorns im Zentrum. Offene und geschlossene Profile unterscheiden sich beim Werkzeugaufbau darin, dass bei geschlossenen Profilen ein Innendorn verwendet wird. Dieser Dorn bringt Probleme mit sich, welche beim offenen Profil nicht auftreten können. Die Parameterstudie ist auch in "Biegen mit flexiblem Innendorn" und "Biegen mit festem Innendorn" unterteilt. Das wird deshalb gemacht, weil der Innenquerschnitt bei geschlossenen Profilen variieren kann. Somit kann bei einem festen Innendorn eine Lücke zwischen Werkzeug und Blech entstehen.

Für die Parameterstudie wird wiederum eine Referenzsimulation erstellt. Für den Teil mit

flexiblem Innendorn wird wie beim Hutprofil eine Parameterstudie zur Reibung durchgeführt, beim festen Innendorn wird der Parameter Innendorngrösse verändert.

#### Parameter Reibung

Der Aufbau der Parameterstudie zur Reibung ist gleich aufgebaut wie bei den Simulationen des Hutprofils. Da das Bauteil ab Reibwert  $\mu = 0.25$  staucht, wird der Parameter zwischen 0.05 und 0.2 im Abstand von 0.05 variiert.

#### Parameter Innendorngrösse

Durch die Toleranzen bei der Herstellung von Strangpressprofilen variieren bei geschlossenen Profilen sowohl die Wandstärken als auch die Innen- und Aussenmasse der Querschnitte. Ein Innendorn muss also so gestaltet werden, dass er in den kleinst möglichen Querschnitt hinein passt. Das hat zur Folge, dass zwischen Innendorn und Profil Hohlräume entstehen, die einen Einfluss auf die Produktion haben. Deshalb sind die Simulationen der geschlossenen Profile in zwei Kategorien aufgeteilt: Biegen mit festem Innendorn und Biegen mit flexiblem Innendorn. Flexibler Innendorn bedeutet, dass der Innendorn sich an die benötigte Grösse anpassen kann. Im Fall des festen Innendorns wird der Dorn nicht ans Profil angepasst.

Anstatt die Grösse des Profils zu verändern, wird die Innendorngrösse verändert und so die entstehenden Hohlräume erzeugt. Der Effekt entspricht einer Veränderung des Innenmasses, ist jedoch in der Simulation mit wesentlich geringerem Aufwand zu realisieren.

Der Innendorn wird folgendermassen angepasst: Der Dorn wird mit der "scale" Funktion verkleinert und zwar in Y-Richtung um  $\Delta d_1$  und in X-Richtung um  $\Delta d_2$ . Der Dorn wird dann in Y-Richtung ans Profil anliegend auf der Seite der Mittelrolle verschoben (linke Seite in Abbildung 4.67). In X-Richtung wird der Dorn nicht verschoben. Die X und Y Anpassungen verhalten sich wie folgt:  $\Delta d_1 / \Delta d_2 = 2$ . Es wird angenommen, dass der Innendorn ganz auf die Seite der Mittelrolle gedrückt wird und sich die Differenz in der Höhe wegen der Symmetrie auf beide Z-Rollen gleichmässig verteilt. Der Dorn wird also auf X- und Y-Richtung um gleichviel verkleinert. Nebst dem Referenzversuch werden Versuche mit  $\Delta d_1$  gleich 0.1, 0.2, 0.3 und 0.4 mm durchgeführt.

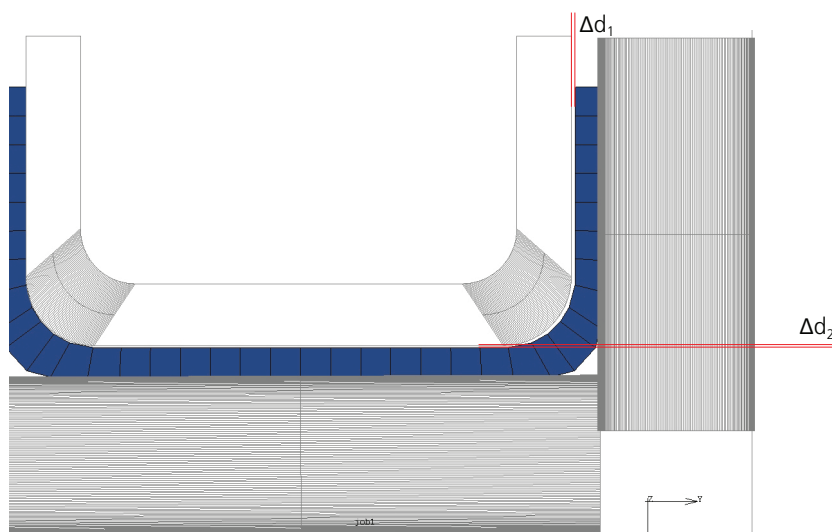


Abbildung 4.67 Anpassung des Innendorn beim geschlossenen Profil

#### 4.4.3 Vorgehen bei der Auswertung

Die Auswertung der Simulationen der geschlossenen Profile erfolgt analog zu derjenigen der offenen Profile, wie sie in Kapitel 4.3.3 beschrieben ist. Die Kontaktprobleme, wie sie dort beschrieben werden, treten auch beim Hohlprofil auf. Da das Profil eine ähnliche Anzahl Elemente besitzt, ist auch hier mit der vorhandenen Software/Hardware keine Verfeinerung des Netzes möglich. Für die Auswertung der Kräfte werden die Kraftverläufe über die gesamte Simulationszeit verwendet.

#### 4.4.4 Biegen mit flexiblem Innendorn

Biegen mit flexiblem Innendorn bedeutet, dass der Innendorn sich ideal an der Innenkontur anpassen kann. In der Untersuchung wird die Blechdicke und die Innen- bzw. Aussenkontur nicht angepasst, daher bleibt auch der Innendorn gleich. Für den passgenauen Innendorn wird untersucht, wie sich eine Änderung der Reibung auf die Bauteile auswirkt.

##### Kräfte

Der Kraftverlauf der Z-Walzrolle in Abbildung 4.68 zeigt, dass für die Reibwerte 0.15 und 0.2 die Walzkraft extrem ansteigt. Ab ungefähr 5 Sekunden pendelt sich der Verlauf bei Reibkoeffizient 0.15 wieder auf das Niveau der Referenzsimulation ein. Zu diesem Zeitpunkt greift die Biegerolle in den Prozess ein. Der Verlauf von Reibwert 0.2 bleibt relativ lange allerdings auf dem hohem Level stehen. Die Schubkraftverläufe in Abbildung 4.69 zeigen ein ähnliches Bild wie die Walzkraften. Aus den Kraftmessungen ist nicht zu schliessen, worauf der plötzliche Anstieg bei Reibwert 0.15 und 0.2 zurück zu führen ist. Der Verlauf der Kräfte ist, im Unterschied zum Kraftverlauf beim Hutprofil (Referenzsimulation) in Abbildung 4.39, weitgehend stetig. Da bei diesen Simulationen wiederum nur jedes zwanzigste Inkrement abgespeichert wird, könnte sich eine leichte Verschiebung der Messstellen ergeben haben. Möglicherweise haben die Messpunkte von Reibwert 0.05 und 0.1 jeweils nicht richtig Kontakt zum Werkzeug. Daher wären auch die verhältnismässig tiefen Werte zu erklären. Bei Reibwert 0.15 und 0.2 ist der Kontakt zum Werkzeug dann hergestellt und die Kräfte nehmen zu.

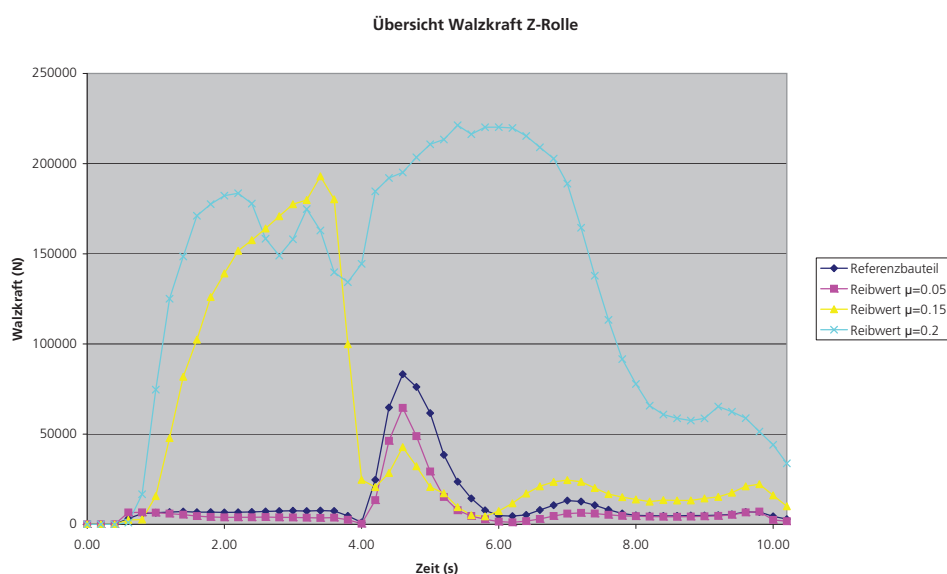


Abbildung 4.68 Hohlprofil - Walzkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten

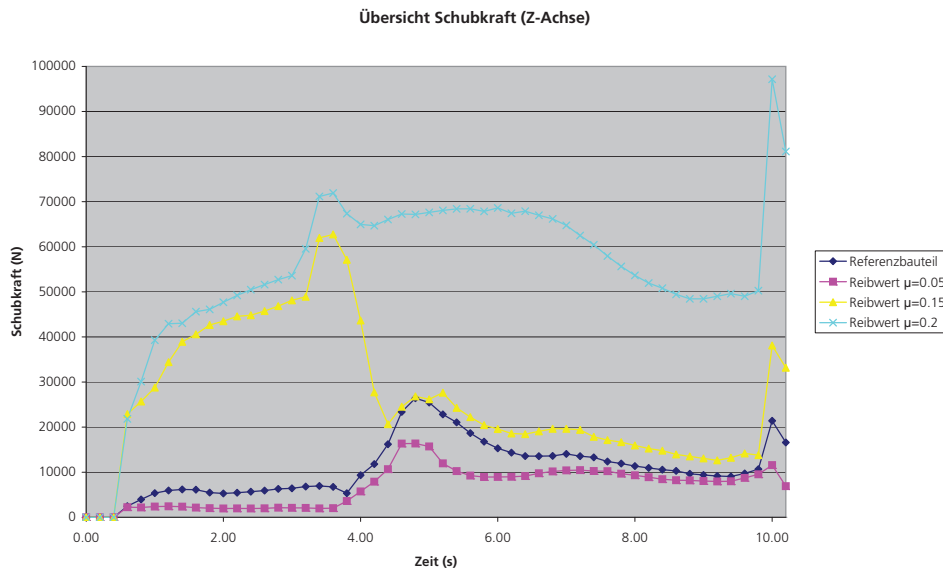


Abbildung 4.69 Hohlprofil - Schubkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten

Rückfederung

Die Grafik in Abbildung 4.70 zeigt, dass Reibung in der Simulation einen Einfluss auf das Rückfederverhalten hat. Wie schon bei den Versuchen mit Reibkoeffizienten beim Hutprofil, zeigt sich, dass ein höherer Reibkoeffizient eine geringere Rückfederung zur Folge hat. Das beobachtete Verhalten lässt sich wie bereits beim Hutprofil in Abschnitt 4.3.4 mit den Resultaten aus den Grundlagenversuchen in Kapitel 4.2.3 erklären. Wiederum muss davon ausgegangen werden, dass die Simulationen möglicherweise nicht mit der Realität übereinstimmen, da die Vernetzung in der Dickenrichtung zuwenig fein ist.

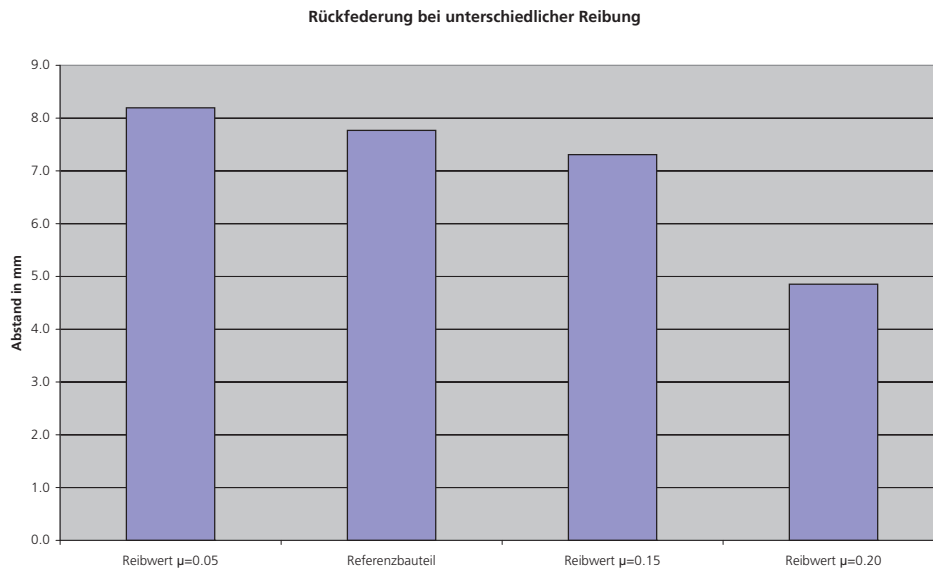


Abbildung 4.70 Hohlprofil - Rückfederung bei unterschiedlichen Reibwerten



### Ausdünnung

Die Ausdünnung in Abbildung 4.71 zeigt, dass die Werte mit zunehmender Reibung abnehmen, d.h. es wird weniger stark ausgedünnt. Die Unterschiede in der Ausdünnung von Reibwert 0.05 zu 0.2 betragen ca. 0.05 mm. Die Verdickungen beim Innenradius bewegen sich im Bereich 0.03 bis 0.05 mm. Es wäre zu erwarten, dass durch die geringere Rückfederung bei höherer Reibung auch die Ausdünnung grösser wird. Dies ist jedoch hier nicht der Fall.

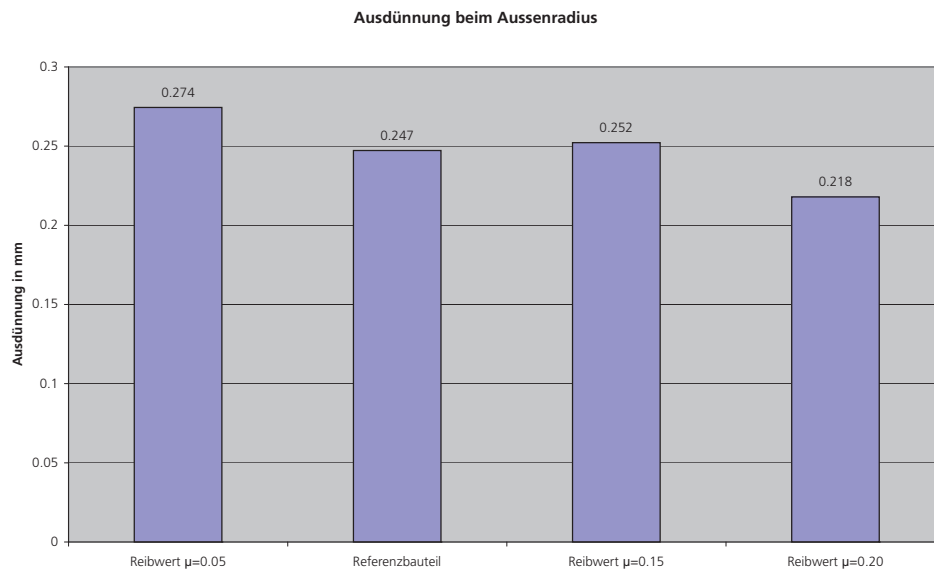


Abbildung 4.71 Ausdünnung beim Aussenradius

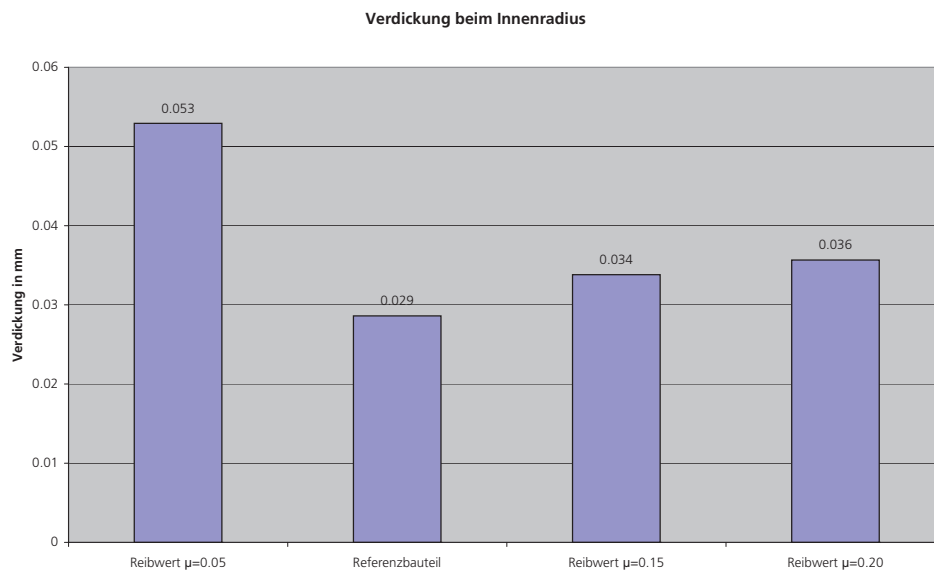


Abbildung 4.72 Verdickung beim Innenradius

### Fazit

Die Ergebnisse der Reibwertversuche zeigen, wie schon beim Hutprofil in Abschnitt 4.3.4, dass die Reibung sowohl auf die Rückfederung, als auch auf die Ausdünnung, einen Einfluss hat. Eine höhere Reibung wirkt sich positiv auf das Rückfederverhalten. Die Messungen der Kräfte können aufgrund der Kontaktprobleme nicht verwertet werden.

#### 4.4.5 Biegen mit festem Innendorn

Toleranzen bei Strangpressprofilen führen dazu, dass ein fester Innendorn bei Hohlprofilen an den kleinsten Querschnitt angepasst werden muss und bei grösseren Innenquerschnitten dadurch eine Lücke zwischen Dorn und Profil entstehen kann. Dieser Vorgang soll anhand von Simulationen untersucht werden.

##### Kräfte

Die Walzkräfte sind bis ca. 4 Sekunden relativ klein, nehmen dann aber beim Eingreifen der Biegerolle rasch zu (siehe Abbildung 4.73). Ähnlich verhalten sich die Schubkräfte (Abbildung 4.74), allerdings nehmen diese weniger stark zu. Wiederum muss angenommen werden, dass bis zum Eingreifen der Biegerolle bei ca. 4.5 Sekunden die Knoten jeweils nur ungenügend in Kontakt mit den Werkzeugen sind. Durch die veränderten Verhältnisse nach dem Eingreifen der Biegerolle verschiebt sich die Messposition und höhere Kräfte werden gemessen.

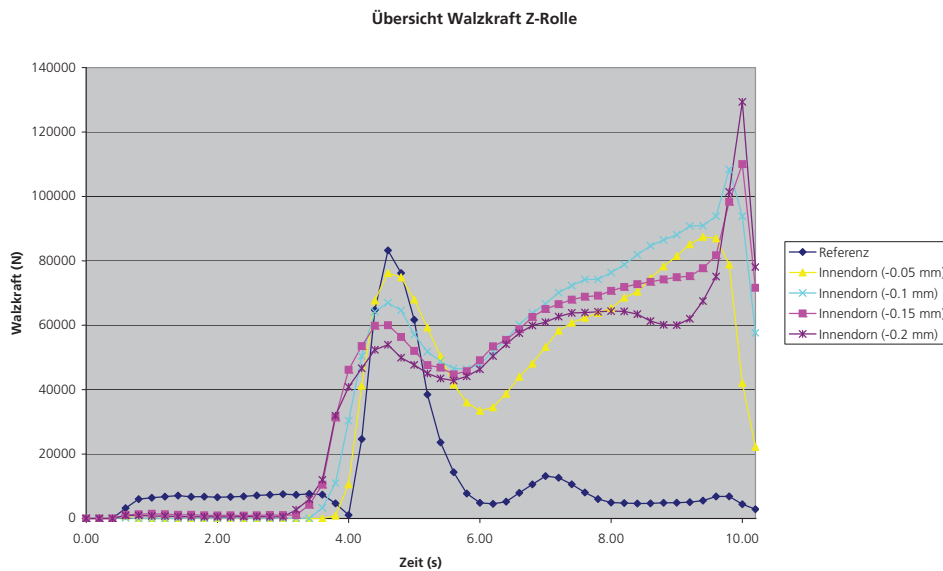


Abbildung 4.73 Hohlprofil - Walzkraftverlauf bei unterschiedlichen Innendorngrössen

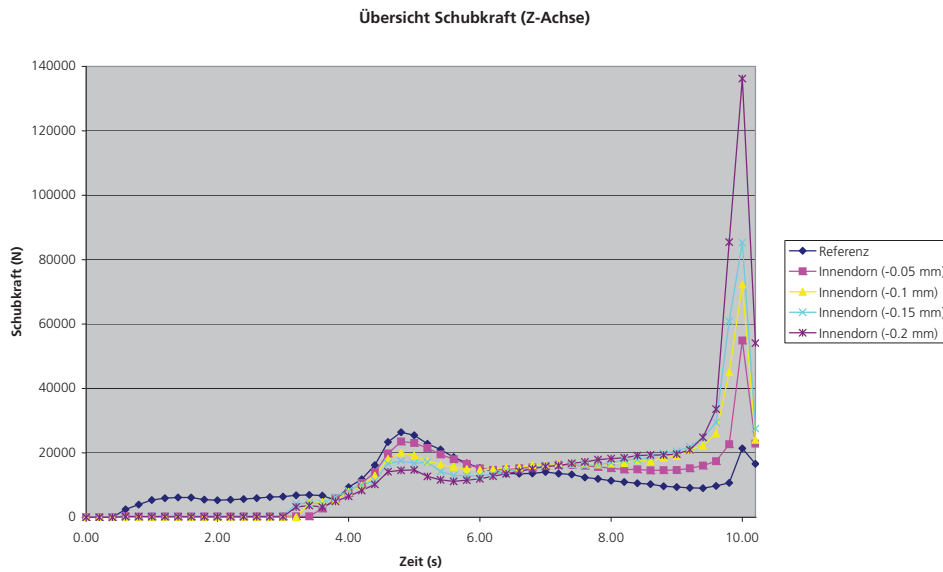


Abbildung 4.74 Hohlprofil - Schubkraftverlauf bei unterschiedlichen Innendorngrößen

Rückfederung

Die Messungen der Rückfederung zeigt, dass mit Ausnahme von "Innendorn (-0.2 mm)" die Rückfederung mit Abnahme der Innendorngröße zunimmt (siehe Abbildung 4.75).

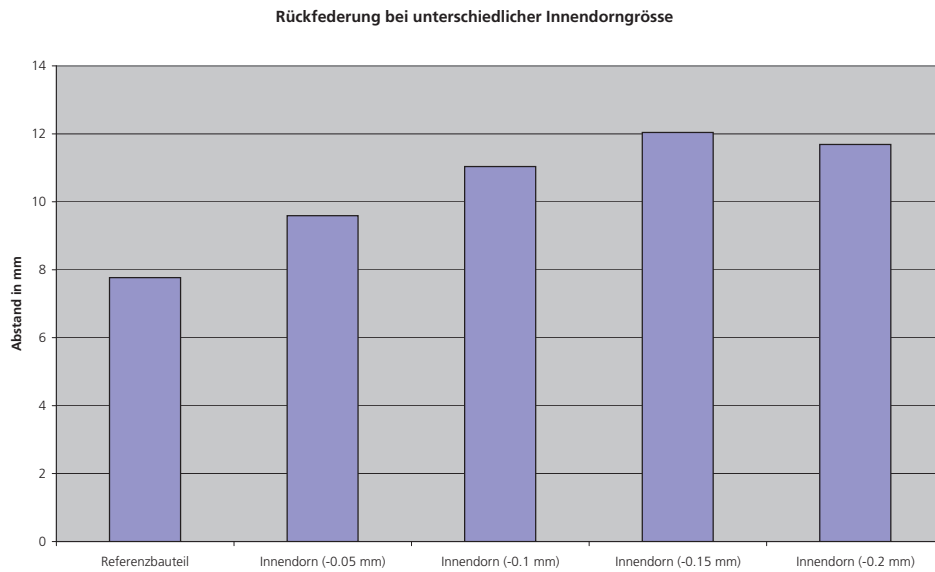


Abbildung 4.75 Hohlprofil - Rückfederung bei unterschiedlichen Innendorngrößen

Mit abnehmendem Innendorn wird auch die Ausdünnung bei der Walz- und der Z-Rolle geringer. Aus den Grundlagen des Fließformbiegens in Kapitel 3.1.3 ist bekannt, dass eine geringere Auswalzung einen grösseren Biegeradius zur Folge hat und dementsprechend bei gleicher Biegeeinstellung die Rückfederung erhöht.

Ausdünnung

Da der Innendorn kleiner wird und nicht mehr am Profil anliegt, ist bei gleichen Walzrollenpositionen eine geringere Ausdünnung zu erwarten. Die Diagramme in Abbildung 4.76 und Abbildung 4.77 zeigen, dass wie bei der Variation der Wanddicke beim Hutprofil bei abnehmender Ausdünnung die Verdickung beim Innenradius zunimmt. Wiederum ist die Verschiebung der neutralen Faser dafür verantwortlich, dass sich die Druckspannungen beim Innenradius verändern.

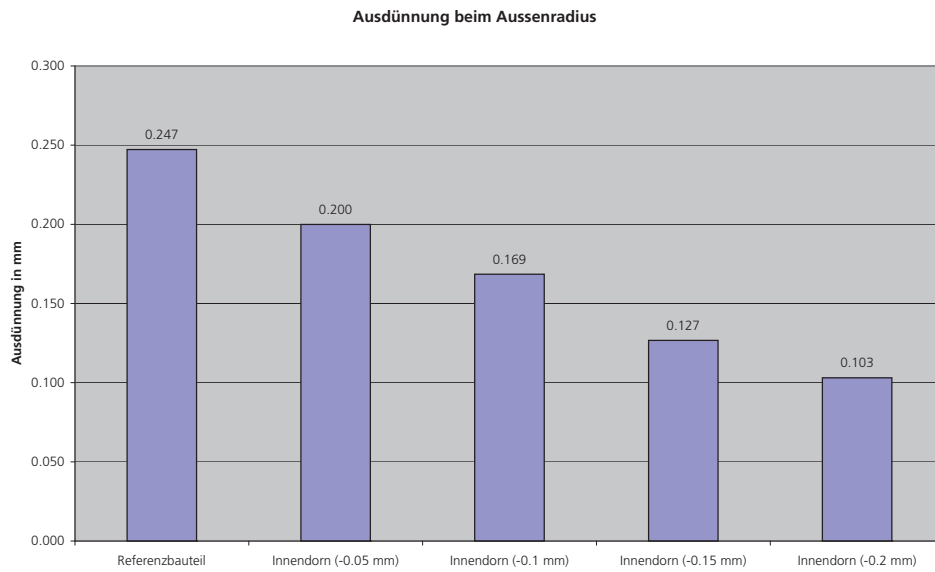


Abbildung 4.76 Ausdünnung beim Aussenradius

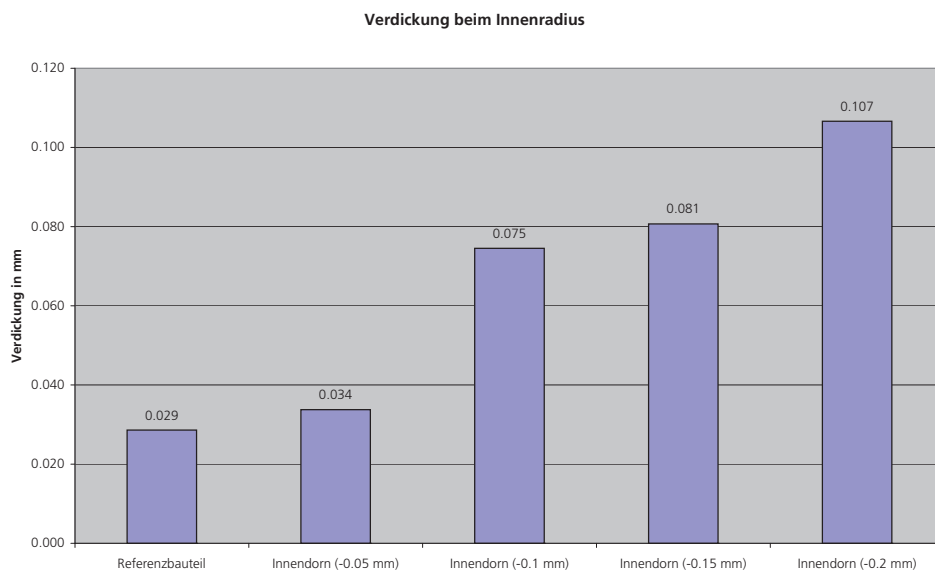


Abbildung 4.77 Verdickung beim Innenradius

### Fazit

Da der Aufbau dieser Simulationen mit vielen Vereinfachungen versehen ist, sind die Resultate für eine Auswertung bzw. Analyse der Vorgänge bei geschlossenen Profilen nur von geringem Nutzen. Da die Modellierung als Festkörper Randbedingungen benötigt, kann ein in X- und Y-Richtung frei beweglicher Dorn nicht simuliert werden. Deshalb wird die Abbildung der Realität massiv vereinfacht.

Mit der Studie zum festen Innendorn bei geschlossenen Profilen sind die virtuellen Versuche abgeschlossen. Im Anschluss werden die Resultate aus sämtlichen Simulationen diskutiert.

## 4.5 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den Simulationen

Die Grundlagenversuche in Abschnitt 4.2 und die Fließformbiegesimulationen in den Abschnitten 4.3 und 4.4 zeigen einerseits interessante Effekte wie z.B. die Krümmung des Blechs bei unterschiedlich grossen Walz- und Mittelrollen, andererseits werden auch Probleme der FE Simulationen für das Fließformbiegen offensichtlich. Die Erkenntnisse für Fließformbiege-Simulationen und umformtechnische Aspekte werden nachfolgend aufgezeigt.

### 4.5.1 FE Simulation

In Abschnitt 4.2.2 wird gezeigt, dass für die durchgeführten Grundlagensimulationen die Resultate sehr stark von der Vernetzung abhängig sind. Wird bei einer Kombination Walzrolle 16 mm und Mittelrolle 200 mm das gewalzte Blech bei einer groben Vernetzung in der Dickenrichtung auf die Seite der Walzrolle gebogen, verhält sich das Bauteil bei einer feineren Vernetzung mit fünf Layern gerade umgekehrt. Der Vergleich zwischen den Minirollenoptimierungs-Simulationen mit einem Layer und mit fünf Layern zeigt, dass sich die Kräfte zwar gleich verhalten, d.h. bei kleineren Rollen die Kräfte auch kleiner werden. Jedoch sind die Kräfte bei gleich grossen Rollenkombinationen für einen und fünf Layer unterschiedlich gross. Die Feinheit der Vernetzung ist daher nicht nur für die Krümmung, sondern auch für die Messung der Kräfte entscheidend.

Die Simulationen in den Abschnitten 4.3 und 4.4 zeigen, dass die gewählte Vernetzung in der Schubrichtung entscheidend für die Ermittlung der Walz- und Schubkraftverläufe ist. Die dort verwendete Vernetzung ist zu grob, da der Kontakt zu den Minirollen teilweise abreißt und sich dadurch ein unstetiger Verlauf der Kräfte ergibt. Mit den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2.2 muss zudem angenommen werden, dass sich der Verlauf bzw. das Niveau der Kräfte bei einer feineren Vernetzung in der Dickenrichtung auch verändern wird.

Die Simulationen mit dem veränderten Innendorn in Abschnitt 4.4 sind eine zu grobe Vereinfachung des Problems und liefern dadurch keine neuen Erkenntnisse. Das Problem des Innendorns kann mit dem verwendeten Aufbau nicht genügend exakt abgebildet werden. Der Innendorn müsste als deformierbarer Körper und nicht als Festkörper simuliert werden, damit die nötigen Randbedingungen (feste Einspannung in Z-Richtung, in X- und Y-Richtung verschiebbar) definiert werden können und sich der Dorn zumindest in zwei Richtungen frei bewegen kann.

Weiter ist bei den Simulationen der beiden Profile in den Abschnitten 4.3 und 4.4 das Blech in der Dickenrichtung mit nur einem Element modelliert. Der Vergleich der beiden Minirollenoptimierungen (ein Layer und fünf Layer) zeigt, dass die Vernetzung auf den Walzprozess

einen grossen Einfluss hat. Daher muss davon ausgegangen werden, dass dies auch bei den Profilen der Fall sein wird. Da dort die Biegerolle jedoch wesentlichen Anteil an der Umformung hat, ist die Höhe des Einflusses der Vernetzung auf den gesamten Prozess nicht bekannt.

Die Grundlagenversuche aus Abschnitt 4.2 mit 800 bzw. 2000 Elementen sind im Vergleich zu den Fließformbiegesimulationen mit ungefähr 6000 Elementen viel kleiner. Eine Fließformbiegesimulation dauert zwischen 22 und 35 Stunden, eine Grundlagensimulation etwa 5 Stunden, jeweils auf einem Desktop PC lokal gerechnet. Am Institut für virtuelle Produktion (IVP) ist es möglich, auf einem Unix-Cluster mehrere Simulationen mit MSC Marc gleichzeitig zu berechnen. Da die lokalen Prozessoren wesentlich schneller als diejenigen des Clusters sind, dauert eine einzelne Rechnung länger. Da über das Cluster jedoch mehrere Simulationen gleichzeitig gemacht werden können, ist die Berechnungsdauer für eine grössere Anzahl von Simulationen viel kürzer. Die meisten Grundlagenversuche wurden mit diesem Cluster berechnet. Bei der Berechnung der Fließformbiegesimulationen mit dem Cluster traten unerwartete Fehler auf, für die keine Erklärung gefunden werden konnte. Die Berechnung konnte deshalb nicht zu Ende geführt werden. Deshalb wurden diese Berechnungen alle lokal durchgeführt.

Um eine exaktere Abbildung des Fließformbiegeprozesses zu erreichen, ist eine Verfeinerung des FE Netzes nötig. Eine Verfeinerung des für die Versuche verwendeten FE Netzes sowohl in Schub- als auch in der Dickenrichtung bedeutet jedoch, dass die Anzahl der Elemente um ein vielfaches grösser sein müsste. Die Berechnung mit einer sehr grossen Zahl von Elementen ist mit der verwendeten Software und Hardware nicht möglich (siehe Abschnitt 4.3).

Eine Möglichkeit, die Vernetzung ohne die vorhandene Remeshing Funktion von Marc zu verfeinern, ist eine eigene Remeshing Funktion für MSC Marc zu programmieren. Damit könnte die Vernetzung in der Dickenrichtung im Bereich des Walzspaltes angepasst werden. Das durch die grobe Vernetzung bedingte Kontaktproblem zwischen Werkzeug und Werkstück in der Schubrichtung könnte ebenfalls mit einer programmierten Subroutine in Marc oder allenfalls mit einer alternativen Modellierung der Werkzeuge verbessert werden. Dabei würden die Werkzeuge anstatt als Starrkörper als deformierbare Körper modelliert werden. Dies würde allerdings eine Erhöhung der Anzahl Elemente bedeuten.

Die Kontakt- und Vernetzungsprobleme könnten gemäss Professor Hora allenfalls gelöst werden, indem die Berechnungen mit einer andere Simulationssoftware durchgeführt werden. FE Pakete wie LS-Dyna sind bezüglich Kontaktbedingungen vorteilhafter als MSC Marc. Ebenfalls geprüft werden müsste ein Wechsel von impliziter Berechnung auf ein explizites Verfahren.

#### 4.5.2 Umformtechnische Mechanismen

Aus umformtechnischer Sicht sind die Grundlagenversuche aus Abschnitt 4.2 sehr interessant. Die Simulationen zeigen, dass die Grösse der Walzrolle einen massiven Einfluss auf den Walzprozess hat. Eine Kombination aus einer relativ kleinen Walzrolle und einer grossen Mittelrolle bewirkt, dass sich ein Blech durch den Walzprozess krümmt. Abhängig von der Grösse der Walzrolle oder auch vom Verhältnis der beiden Rollen, wird das Blech stärker oder weniger stark gebogen. Bei einer Kombination einer kleinen Walzrolle mit einer grossen Mittelrolle, wie sie für reale Werkzeuge bei Klingelberg oft verwendet wird, wirkt dieser Effekt in die Biege-

richtung und scheint den Prozess nicht direkt zu beeinträchtigen. Der Effekt ist aber trotzdem als Schmutzeffekt zu betrachten. Denn die Versuche mit unterschiedlichen Reibkoeffizienten zeigen klar, dass der Effekt nicht immer gleich stark wirkt. Eine Veränderung der Reibung, z.B. ein Wechseln des Schmiermittels, kann bedeuten, dass sich das Profil bei gleichen Einstellungen unterschiedlich stark krümmt, bzw. die Rückfederung und somit die endgültige Biegekontur nicht gleich ist.

Der von der Reibung abhängige Krümmungseffekt kann minimiert bzw. eliminiert werden, wenn zur Auswalzung zwei gleich grosse Rollen verwendet werden (vorausgesetzt die Reibung ändert sich global). Wird die Walzrolle jedoch grösser, werden auch Walz- und Schubkräfte höher und die Gefahr des Stauchens oder Knickens erhöht sich. Die Anpassung der Rollen grösser, falls sie überhaupt möglich ist, müsste bei beiden Rollen gemacht werden, wobei die Schubkräfte dabei betrachtet werden müssen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zusammengefasst und ein Ausblick auf ein mögliches weiteres Vorgehen gegeben.

### 5.1 Zusammenfassung

Nach einer Darstellung der Grundlagen des Fließformbiegens in Kapitel 2 wurden in Kapitel 3 theoretische Ansätze des Biegens, Walzens und Fließformbiegens sowie die Grundlagen der FE Simulation beschrieben.

In Kapitel 4 wurde zuerst ein Referenzprozess "Fließformbiegen" definiert. Ausgehend davon wurden verschiedene Untersuchungen zum Prozess durchgeführt. Die Grundlagenversuche (Walzversuche) haben gezeigt, dass die Vernetzung der Bauteile ein zentraler Aspekt in der Simulation des Walzprozesses darstellt und sich die Ergebnisse abhängig von der Feinheit des FE Netzes entscheidend verändern können. Zudem wurde gezeigt, dass das Walzen mit zwei unterschiedlich grossen Walzrollen (bzw. Walz- und Mittelrolle) ein Blech verkrümmen kann. Diese Krümmung ist einerseits abhängig von der Grösse der Walzrolle, bzw. dem Verhältnis der beiden Rollen, andererseits hängt sie von der vorhandenen Reibung ab. Weiter haben die Versuche mit verschiedenen Materialdaten gezeigt, dass bei der verwendeten Werkzeugkonfiguration (kleine Walzrolle, grosse Mittelrolle) das Blech sich abhängig von der Fließkurve des jeweiligen Materials unterschiedlich stark krümmt. Anhand von verschiedenen Versuchen zur kinematischen Gestaltung des Walzkontakts konnten verschiedene Effekte gezeigt werden, die möglicherweise für den Umformprozess genutzt werden könnten.

Aus den Versuchen zu offenen und geschlossenen Profilen lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die verwendete Vernetzung der Bauteile für die Fließformbiegesimulationen nicht optimal ist und verbessert werden sollte. Einerseits entstehen durch die grobe Vernetzung in Längsrichtung Kontaktprobleme für die kleinen Walzrollen, andererseits haben die Grundlagenversuche gezeigt, dass sich die Vernetzung in der Dickenrichtung auf die Ergebnisse beim Walzprozess stark auswirkten. Es wurde auch aufgezeigt, dass eine Verfeinerung des FE Netzes für die durchgeführten Simulationen mit den vorhandenen Informatikmitteln nicht realisierbar war.

Bringt man die untersuchten Einflussparameter in Zusammenhang mit der Robustheit des Prozesses, kann festgehalten werden, dass die Reibung einen Einfluss auf die Walzkräfte hat und auch den Krümmungsradius und somit die Rückfederung beeinflusst. Dasselbe gilt für die Parameter Wanddicke und Material. Beim Material wurde ein etwa lineares Verhältnis von Streckgrenze zu Walzkraft und Ausdünnung aufgezeigt. Die Versagensgrenze für Stauchen bei reiner Druckbelastung kann ebenfalls direkt auf die Streckgrenze zurück geführt werden. Für den realen Prozess bedeutet dies, dass bei der verwendeten Walzkraftregelung die Walzkräfte bei Änderung der Reibung und beim Wechseln des Materials angepasst werden müssen, da mit denselben Walzkräften nicht dieselbe Ausdünnung erzielt werden kann. Für Profile kann vor Versuchen festgelegt werden, ob geometrische (Euler-Knicken) oder materielle Instabilitäten wahrscheinlicher sind und in welchem Kraftbereich materielles Versagen auftreten wird.

Die Ergebnisse der Simulationen zu den geschlossenen Profilen sind für eine aussagekräftige Auswertung unzureichend. Einerseits ist die Vernetzung zu grob, um valide Kraftverläufe zu erhalten, andererseits ist die Simulation des Innendorns als Starrkörper ungünstig.



## 5.2 Ausblick

In der Arbeit konnten mithilfe virtueller Versuche die Einflüsse verschiedener Parameter auf den Walz- und den Fließformbiegeprozess gezeigt werden. Jedoch wurde auch ersichtlich, dass gerade beim Fließformbiegeprozess die verwendete Vernetzung nicht optimal ist und sowohl in Schub-, als auch in der Dickenrichtung angepasst werden müsste. Damit könnte einerseits das Kontaktproblem in der Längsrichtung behoben werden und andererseits der Walzprozess mit Minirollen genauer abgebildet werden. Da eine Verfeinerung des FE Netzes mit der vorgegebenen Remeshing Funktion von Marc das Problem nicht lösen konnte, müsste eine auf die Bedürfnisse angepasste Remeshingfunktion für MSC Marc programmiert werden. Ein weiteres Problem stellt die Modellierung des Innendorns dar. Diese Problematik könnte mit einer alternativen Modellierung des Werkzeugs bewerkstelligt werden. Anstatt des jetzt verwendeten Starrkörpers kann der Dorn als deformierbarer Körper modelliert werden.

Bei den vorgestellten Resultaten ist zu beachten, dass sämtliche Versuche rein virtuell durchgeführt worden sind. Die in den Walzsimulationen beobachteten Effekte sind zwar vereinzelt in realen Versuchen mit ähnlichem Aufbau aufgetreten. Eine Verifikation der Ergebnisse ist jedoch ohnehin notwendig. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Versuche zu verifizieren. Um das Auftreten von Krümmungseffekten beim Walzen nach zu prüfen, könnten ähnliche Walzversuche mit der Fließformbiegemaschine durchgeführt werden. Die Versuchsaufbauten müssen jedoch auf die Biegemaschine angepasst werden. Um die Kraftverläufe zu überprüfen, könnten die Aufzeichnungen der Motorenströme der Maschine (PIP) mit den Werten aus den Simulationen verglichen werden.

Als weitere Möglichkeit könnte in Betracht gezogen werden, die bestehenden Simulationen, idealerweise bereits mit der Remeshingfunktion, auszubauen. Viele Effekte, die beim realen Prozess durch die Maschine beeinflusst werden, wurden bisher vernachlässigt. Als erster Schritt wäre denkbar, die Walzrollen so abzubilden, dass sie nicht mehr angetrieben sind, sondern durch den Kontakt mit dem Blech in Bewegung gesetzt werden. Als weiterer Schritt könnte die Steifigkeit und die Dynamik der Werkzeuge, allenfalls auch einem Teil der Maschine, in die Simulationen mit einfließen. Wie bereits beim Innendorn wäre auch bei den Werkzeugen bzw. Walz- und Mittelrollen die Modellierung als deformierbare Körper ein denkbarer Ansatz.

Es zeigt sich, dass die Simulation des Fließformbiegens auch mit ausgereifter FE Software schwierig ist, da der Prozess eine hohe Komplexität aufweist und dass in diesem Bereich künftig noch erheblicher Forschungsbedarf vorhanden ist.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Quellenverzeichnis

- [1] Lange, Kurt:  
Umformtechnik: Umformtechnik II. Massivumformung. Handbuch für Industrie und Wissenschaft: 2. Band.  
Berlin: Springer, Auflage: 2., völlig Neubearb. u. erw. A. (Januar 1999)
- [2] Hora, P, Prof. Dr.:  
Umformtechnik III, Skript zur Vorlesung 2006.
- [3] Schuler Hydroform  
Innenhochdruck-Umformung von Rohren.  
URL: [http://www.schulergroup.com/de/10\\_Anlagen\\_Verfahren/06\\_Hydroforming/01\\_Verfahren/01\\_Innenhochdruckumformung\\_Rohre/index.html](http://www.schulergroup.com/de/10_Anlagen_Verfahren/06_Hydroforming/01_Verfahren/01_Innenhochdruckumformung_Rohre/index.html) (Stand: 7.10.2007)
- [4] Meier, H.; Gänsicke, B.:  
Verbesserung des Umformvermögens beim Walzrundbiegen mittels partieller Drucküberlagerung  
URL: [http://www.ibf.rwth-aachen.de/Ww/forsch/dfg\\_vortraege/doc03.pdf](http://www.ibf.rwth-aachen.de/Ww/forsch/dfg_vortraege/doc03.pdf) (Stand: 7.10.2007)
- [5] Michaelis, Mark, Dr.:  
Technische Mechanik.  
URL: [http://www.ique.de/theor/tm\\_tabellen/reibko.html](http://www.ique.de/theor/tm_tabellen/reibko.html) (Stand: 7.10.2007)
- [6] Stöcker, Horst, Prof. Dr.:  
Taschenbuch der Physik.  
Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2004.
- [7] Wikipedia.org:  
Stichwort Knicken.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Knicken> (Stand: 7.10.2007)
- [8] Paland, Ernst-Günter, Prof. em. Dr.-Ing., Universität Hannover:  
Technisches Taschenbuch.  
Herzogenaurach: INA-Schaeffler KG, 2002.

### 6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Aufbau Walzbiegen.....	3
Abbildung 2.2 Drei-Rollen-Biegen aus [2] .....	4
Abbildung 2.3 Innenhochdruckumformen von Rohren aus [3] .....	5
Abbildung 2.4 Reduziertes Ursache-Wirkungs-Diagramm .....	6
Abbildung 3.1 Einteilung der Biegeverfahren nach DIN 8586 aus [2].....	7
Abbildung 3.2 Spannungs- und Dehnungsverteilung beim Biegen .....	8
Abbildung 3.3 Spannungen und Dehnungen vor und nach der Entlastung .....	9
Abbildung 3.4 Ordnungssystem der Walzverfahren nach DIN 8583, Bl.2 .....	10
Abbildung 3.5 Bezeichnungen beim Flach-Längswalzen .....	10
Abbildung 3.6 Geschwindigkeiten im Walzspalt .....	11
Abbildung 3.7 Drehmoment und Walzkraft beim Walzen .....	13
Abbildung 3.8 Verschiebung der neutralen Faser.....	14
Abbildung 3.9 Kräftemodell Fließformbiegen.....	15
Abbildung 3.10 Rollenanordnung geschlossenes Profil .....	15
Abbildung 3.11 Schema der Ausdünnung .....	16

Abbildung 3.12 Kräftemodell im Walzspalt.....	17
Abbildung 3.13 Eulerfälle aus [7].....	18
Abbildung 3.14 Printscreen MSC Marc .....	19
Abbildung 4.1 Referenzprozess mit Input- und Outputparametern .....	22
Abbildung 4.2 Fließkurven .....	24
Abbildung 4.3 Simulationsaufbau Grundlagenversuche 2D.....	25
Abbildung 4.4 Simulationsaufbau Grundlagenversuche 3D.....	25
Abbildung 4.5 Walzkraftverlauf bei Walzrollendurchmesser 100 mm.....	27
Abbildung 4.6 Durchschnittliche Walzkraft in Abhängigkeit des Walzrollendurchmessers ...	27
Abbildung 4.7 Durchschnittliche Schubkraft in Abhängigkeit des Walzrollendurchmessers .	28
Abbildung 4.8 Biegeradius bei unterschiedlichen Walzrollendurchmessern .....	28
Abbildung 4.9 Krümmung bei Walzrollendurchmessern von 16 mm, 56 mm und 104 mm.	29
Abbildung 4.10 Detailansicht - Krümmung durch Walzen.....	29
Abbildung 4.11 Krümmungsradien bei verschiedenen Walzrollendurchmessern.....	30
Abbildung 4.12 Krümmungen bei Walzrollendurchmesser 16 mm (rot), 40 mm (grün) und 100 mm (blau) .....	31
Abbildung 4.13 Druckspannungen im Walzspalt .....	31
Abbildung 4.14 Durchschnittliche Walzkraft bei unterschiedlichen Walzrollen für 1 und 5 Layer	32
Abbildung 4.15 Durchschnittliche Schubkraft bei unterschiedlichen Walzrollen für 1 und 5 Layer .....	32
Abbildung 4.16 Walzsimulation ohne Reibung .....	33
Abbildung 4.17 Krümmungsradien bei global geänderten Reibkoeffizienten .....	34
Abbildung 4.18 Krümmungsradien bei unterschiedlichen Reibkoeffizienten für WR/MR.....	34
Abbildung 4.19 Walzrollenkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten (globaler Reibwert) .	35
Abbildung 4.20 Walzrollenkraften bei unterschiedlichen Reibwerten (Reibwerte für WR/MR)	35
Abbildung 4.21 Walzkraftverlauf bei verschiedenen Materialkennwerten .....	36
Abbildung 4.22 Schubkraftverlauf bei verschiedenen Materialkennwerten.....	37
Abbildung 4.23 Krümmungsradius bei verschiedenen Materialkennwerten.....	37
Abbildung 4.24 Vergleich der durchschnittlichen Walzkraft zur Fließgrenze des Materials..	38
Abbildung 4.25 Kombinationen von Walz- und Mittelrollen .....	39
Abbildung 4.26 Querrolle/Querrolle - Frontansicht (oben) und Draufsicht (unten) .....	40
Abbildung 4.27 Minirolle/Querrolle - Seitenansicht .....	41
Abbildung 4.28 Minirolle/Querrolle - Totale plastische Dehnung (links) und plastische Dehnung in Z-Richtung.....	41
Abbildung 4.29 Normalrolle/Querrolle - 3D-Ansicht und Frontansicht (Displacement Z).....	42
Abbildung 4.30 Normalrolle/Querrolle - Total Equivalent Plastic Strain .....	43
Abbildung 4.31 Minirolle/Dorn (Fläche) - Seitenansicht (oben) und 3D-Ansicht (unten) .....	43
Abbildung 4.32 Minirolle/Dorn (grosse stehende Rolle) - Seitenansicht (oben) und 3D-Ansicht (unten) .....	44
Abbildung 4.33 Querschnitt Hutprofil.....	46
Abbildung 4.34 Aufbau der Walzrollen und der Mittelrolle Hutprofil .....	47
Abbildung 4.35 Hutprofil - Faltenbildung im Bodenbereich.....	47
Abbildung 4.36 Bewegungstabelle Biegerolle (Y-Position).....	48
Abbildung 4.37 Simulationsaufbau mit Schubschlitten, Walz-, Mittel- und Biegerollen, Ausgangszustand .....	48
Abbildung 4.38 Rollenordnung Hutprofil, deformierter Zustand.....	49
Abbildung 4.39 Hutprofil - Schubkraftverlauf beim Referenzprofil .....	51
Abbildung 4.40 Kontaktstatus bei den Inkrementen 500, 520, 540 und 560 (Draufsicht) ...	52
Abbildung 4.41 Hutprofil - Schubkraftverlauf beim Referenzprofil .....	52
Abbildung 4.42 Messen der Rückfederung - Übersicht .....	54
Abbildung 4.43 Messen der Rückfederung - Detailansicht .....	54
Abbildung 4.44 Hutprofil - Walzkraften bei unterschiedlicher Reibung .....	55
Abbildung 4.45 Hutprofil - Schubkräfte bei unterschiedlicher Reibung.....	56
Abbildung 4.46 Hutprofil - Rückfederung bei unterschiedlicher Reibung.....	56

Abbildung 4.47 Hutprofil - Walzkkräfte bei unterschiedlicher Wandstärke.....	58
Abbildung 4.48 Hutprofil - Schubkräfte bei unterschiedlicher Wandstärke.....	58
Abbildung 4.49 Hutprofil - Rückfederung bei unterschiedlicher Wanddicke.....	59
Abbildung 4.50 Ausdünnung beim Flansch bei verschiedenen Blechdicken.....	60
Abbildung 4.51 Verdickung im Bodenbereich bei verschiedenen Blechdicken.....	60
Abbildung 4.52 Hutprofil - Walzkkräfte bei unterschiedlichen Materialien.....	61
Abbildung 4.53 Hutprofil - Schubkräfte bei unterschiedlichen Materialien.....	61
Abbildung 4.54 Hutprofil - Rückfederung bei unterschiedlichen Materialkennwerten.....	62
Abbildung 4.55 Ausdünnung beim Flansch bei unterschiedlichen Materialien.....	63
Abbildung 4.56 Aufbau Stauchversuch.....	64
Abbildung 4.57 Schubkraftverlauf beim Stauchen für das Hutprofil.....	65
Abbildung 4.58 Verhältnisse zwischen Druckspannung und Streckgrenze (Spannungen in N/mm <sup>2</sup> ).....	65
Abbildung 4.59 Gestauchtes Hutprofil.....	66
Abbildung 4.60 Gestauchtes Hutprofil - Detailansicht.....	66
Abbildung 4.61 Querschnitt Hohlprofil.....	67
Abbildung 4.62 Werkzeugaufbau in der Walzebene - Hohlprofil.....	68
Abbildung 4.63 Simulationsaufbau Hohlprofil - Ausgangszustand.....	68
Abbildung 4.64 Bewegungstabelle der Biegerolle - Hohlprofil.....	69
Abbildung 4.65 Rollenaufbau Hohlprofil.....	69
Abbildung 4.66 Fliesskurve AA6060.....	70
Abbildung 4.67 Anpassung des Innendorn beim geschlossenen Profil.....	71
Abbildung 4.68 Hohlprofil - Walzkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten.....	72
Abbildung 4.69 Hohlprofil - Schubkraftverlauf bei unterschiedlichen Reibwerten.....	73
Abbildung 4.70 Hohlprofil - Rückfederung bei unterschiedlichen Reibwerten.....	73
Abbildung 4.71 Ausdünnung beim Aussenradius.....	74
Abbildung 4.72 Verdickung beim Innenradius.....	74
Abbildung 4.73 Hohlprofil - Walzkraftverlauf bei unterschiedlichen Innendorngrössen.....	75
Abbildung 4.74 Hohlprofil - Schubkraftverlauf bei unterschiedlichen Innendorngrössen.....	76
Abbildung 4.75 Hohlprofil - Rückfederung bei unterschiedlichen Innendorngrössen.....	76
Abbildung 4.76 Ausdünnung beim Aussenradius.....	77
Abbildung 4.77 Verdickung beim Innenradius.....	77
Abbildung 7.1 Ursache-Wirkungs-Diagramm.....	87



# 7 Anhang

## A Ursache-Wirkungs-Diagramm

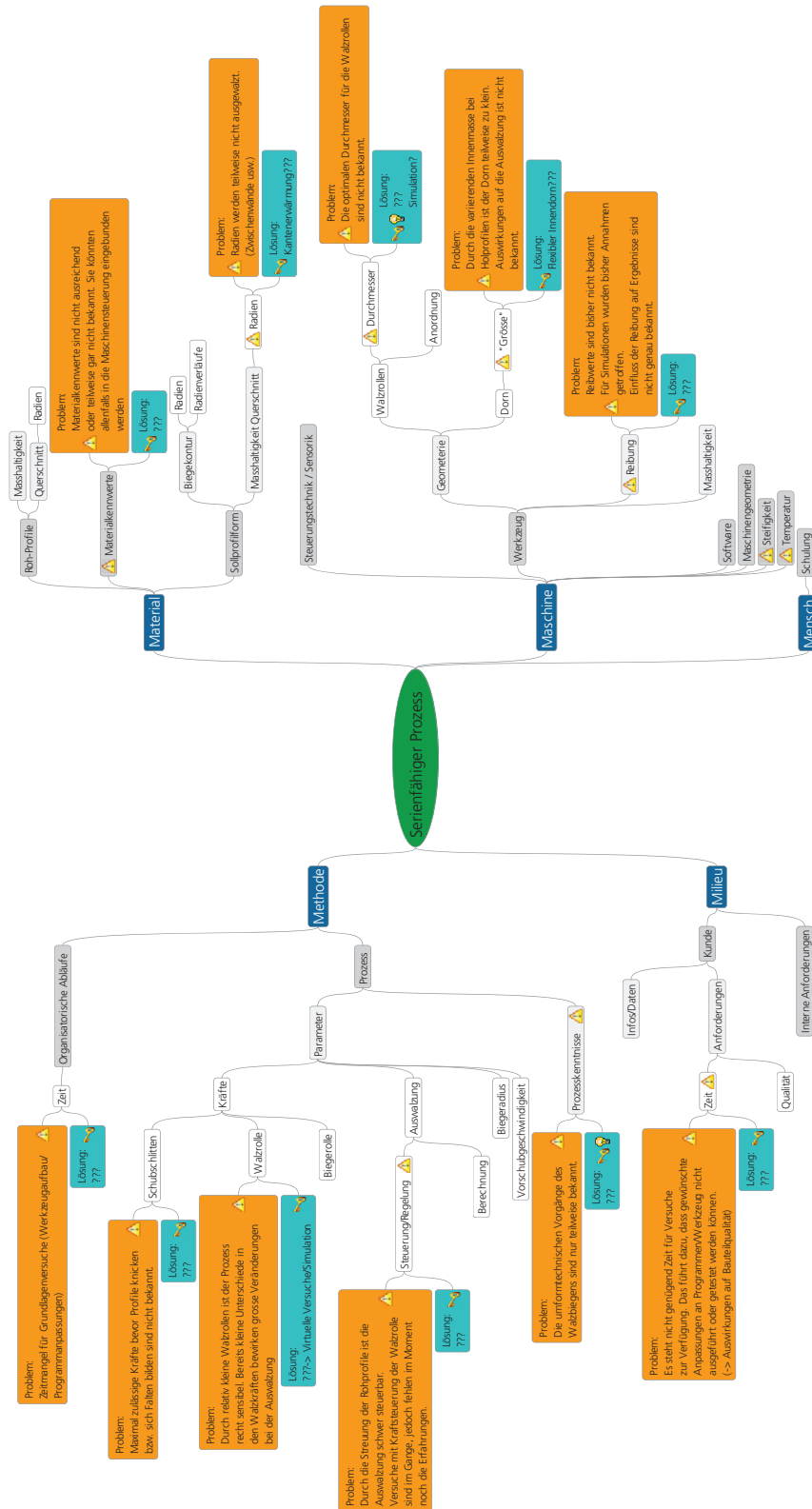


Abbildung 7.1 Ursache-Wirkungs-Diagramm

## B Matlab Funktion für Radiusermittlung

### Hauptfunktion: main.m

```
clear all;
close all;
clc;

x0 = [250; 0; 250];      % Make a starting guess at the solution
options=optimset('Display','iter'); % Option to display output
[x,fval] = fsolve(@myfun,x0,options); % Call optimizer
radius = x(3)
a = x(1)
b = x(2)
```

### Unterfunktion: myfun.m

```
function F = myfun(x)
n1 = [-43.2872, 172.641];
n2 = [-80.6371, 235.564];
n3 = [-113.801, 272.9488];

F = [
    (n1(1) - x(1))^2 + (n1(2) - x(2))^2-x(3)^2;
    (n2(1) - x(1))^2 + (n2(2) - x(2))^2-x(3)^2;
    (n3(1) - x(1))^2 + (n3(2) - x(2))^2-x(3)^2];
```