



Lehrstuhl für Umformtechnik

Masterarbeit



Numerische Analyse der Wirkung der
Einflussgrößen beim Tiefziehen

Markus Kastner, BSc

Februar 2019



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 21.02.2019

Markus Kastner

Unterschrift Verfasser/in
Markus, Kastner
Matrikelnummer: 01235241

Danksagung

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben, gilt mein Besonderer Dank für die Betrauung dieser Arbeit und die hervorragende und kompetente Betreuung derselben.

Auch bei allen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Umformtechnik möchte ich mich für die Unterstützung, Hilfsbereitschaft und das stets gute Arbeitsklima bedanken. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Martin Schoiswohl, der jederzeit mit Rat und Tat hinter mir stand und maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beitrug.

Schließlich gilt mein Dank auch allen mir nahestehenden Menschen wie meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben.

Kurzfassung

Numerische Analyse der Wirkung der Einflussgrößen beim Tiefziehen

Durch die großen und schnellen Entwicklungsschritte in den letzten Jahren in der Computertechnik und deren Komponenten, wird auch die Simulation, welche hohe Rechenleistung erfordert, immer lukrativer für die Kunden. Während in den Anfängen der numerischen Analyse für kleine Simulationen große und teure Rechenzentren teils mehrere Tage für ein Ergebnis brauchten, schafft es heute ein moderner Server oder Computer in wenigen Stunden komplexe Aufgaben zu berechnen. Derzeit gibt es nur mehr sehr selten Unternehmen, die auf eine Computerunterstützte Berechnung eines Fertigungsschrittes oder Prozesses verzichten. Der große Vorteil einer numerischen Simulation ist ein frühzeitiges Erkennen von Fehlern und dadurch eine Zeit- und vor allem Kostenersparnis. Auch können beliebig viele Proben unterschiedlichster Materialien getestet werden, ohne diese herstellen zu müssen.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Vorteile einer numerischen Simulation auszunutzen, um die Wirkung der Einflussgrößen und deren Schwankungen beim Tiefziehen zu analysieren. Verschiedene Materialien und Schwankungen von deren Kennwerten, welche für den Tiefziehprozess wichtig sind, sollen auch simuliert werden. Vor allem soll auf die benötigte Tiefziehkraft und auf die Materialdicken- sowie Dehnungsverteilung während und nach dem Tiefziehprozess eingegangen werden. Die Rückfederung spielt eine große Rolle in der Blechumformung und wird ebenfalls analysiert. Die Ergebnisse sind klar und anschaulich zu dokumentieren, um dem Leser/ der Leserin zu zeigen welche Einflussgröße sich wie auf den Prozess auswirkt.

Abstract

Numerical analysis of the impact of the parameters at deep drawing

Because of the huge and rapid development in the last years in the area of computer technology and its components, the numerical simulation, which requires much computing power, is getting more and more profitable for customers. While in the beginning of simulation primitive tasks required big and expensive computing centers to get a result in some days, today modern servers or computers can solve complex problems in a few hours. Currently most of the companies run simulations for a stage of production or an entire process. The advantage of a numerical analysis is an early recognition of failures and through this a saving of time and overall costs. Also, any number of samples out of various materials can be tested, without having to produce them.

The aim of this master thesis is, to take advantage of the numerical analysis, to investigate the impact of the parameters and its variation at the deep drawing process. Different materials and variations of its properties, which are important for deep drawing, should also be simulated. Especially the required force for the process and the thickness- as well as the strain distribution during and after the process should be analyzed. The spring back of the material after deep drawing is a very important field in sheet metal forming and has also to be analyzed. The results should be documented clearly to show the reader how the parameters impact the deep drawing process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung.....	2
2	Stand der Technik (Literaturteil).....	3
2.1	Grundlagen der Blechumformung.....	3
2.1.1	Senkrechte Anisotropie (r -Wert) und Kaltverfestigung (n -Wert).....	3
2.1.1.1	r -Wert	3
2.1.1.2	n -Wert.....	5
2.1.2	Grenzformänderungsschaubild	6
2.1.3	Fließkurven	9
2.1.3.1	Fließspannung.....	9
2.1.3.2	Fließkurvenaufnahme.....	12
2.1.3.3	Mathematische Beschreibung der Fließkurve	17
2.1.3.3.1	Fließkurve nach Ludwik-Hollomon und nach Swift	17
2.1.3.3.2	Fließkurve nach Hockett-Sherby	19
2.1.3.3.3	Fließkurve nach kombiniertem Ansatz von Swift und Hockett-Sherby	20
2.1.3.4	Auswirkung des Fließkurvenmodells auf die Simulationsergebnisse	21
2.2	Grundlagen des Tiefziehens.....	23
2.2.1	Prozessablauf beim Tiefziehen von rotationssymmetrischen Bauteilen	23
2.2.2	Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen	25
2.2.2.1	Spannungen beim Tiefziehen.....	25
2.2.2.2	Umformgrade	27
2.2.2.3	Zulässiges Ziehverhältnis, Grenzziehverhältnis	29
2.2.3	Fehler und Versagensmöglichkeiten beim Tiefziehen.....	33
2.2.4	Kräfte beim Tiefziehen	38
2.2.4.1	Ziehkraft	38
2.2.4.2	Niederhalterkraft.....	40
2.2.5	Reibung und Schmierung.....	41

2.2.6	Rückfederung beim Tiefziehen	43
2.2.6.1	Rückfederungsarten	44
2.2.6.2	Einfluss des Werkstoffes auf die Rückfederung	45
2.2.6.3	Einfluss der Bauteil- und Werkstückgeometrie auf die Rückfederung	45
2.2.6.4	Rückfederkompensation.....	46
2.3	Zusammenfassung der Einflussgrößen beim Tiefziehen.....	47
2.3.1	Werkstoff.....	47
2.3.2	Werkzeuggestaltung	49
2.3.3	Einflüsse auf die Steuerung des Werkstoffflusses	50
2.3.3.1	Platinenform	50
2.3.3.2	Reibungseinfluss durch Schmierstoffe	50
2.3.3.3	Tiefziehen über Wulste/Sicken	51
2.3.4	Einfluss der Temperatur der Platine.....	52
3	Simulationsstudie	54
3.1	Beschreibung der Simulationssoftware Autoform	54
3.2	Werkstoffe der Studie	55
3.2.1	Werkstoff 1: DC04.....	56
3.2.2	Werkstoff 2: DX2304	56
3.2.3	Werkstoff 3: Aluminiumlegierung 6016	56
3.3	Napfgeometrie und Aufbau der Simulation.....	57
3.4	Einflussparameter und deren Schwankungen	59
3.5	Auswertung der Simulationsergebnisse	61
3.5.1	Auswertung bei gleicher Ziehtiefe ohne Parameterschwankungen.....	61
3.5.1.1	Ziehtiefe.....	62
3.5.1.2	Tiefziehkraft.....	63
3.5.1.3	Materialausdünnung.....	64
3.5.1.4	Rückfederung	65
3.5.1.5	Hauptdehnungen	67
3.5.2	Auswertung bei unterschiedlicher Ziehtiefe mit Parameterschwankungen	69
3.5.2.1	Ziehtiefe.....	70
3.5.2.2	Tiefziehkraft.....	71
3.5.2.3	Materialausdünnung.....	76

3.5.2.4	Rückfederung	84
3.5.2.5	Hauptdehnungen	93
4	Zusammenfassung und Ausblick	100
5	Schlussfolgerung	101
6	Abbildungsverzeichnis	102
7	Tabellenverzeichnis	105
8	Literaturverzeichnis	105

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wir befinden uns heute in einer Zeit, in der fast alle Neuerungen und Innovationen von Ingenieuren in der Entwicklungsphase einer numerischen Analyse oder Simulation unterzogen werden. Die Erkenntnisse aus diesen Methoden schaffen einen höheren Grad an Verständnis für ein oft komplexes System und führen zu frühzeitiger Fehlererkennung in der Entwicklungsphase eines Produktes. Die Software für diese numerischen Analysen bieten benutzerfreundliche Oberflächen, sodass der Anwender keine detaillierten Kenntnisse in der physikalischen Disziplin oder in der Programmierung benötigt. Einzig bei der Auswertung der Ergebnisse ist das Fachwissen des Ingenieurs unumgänglich, da diese ansonsten nicht oder falsch ausgewertet und interpretiert werden. Die Anwendungsgebiete der Simulation erstrecken sich über die Bereiche der Wissenschaft (Theorien entwickeln und verfeinern), der Technik (Strömungssimulation, FEM Simulation Umformsimulation, etc.), dem Training (zum Beispiel Flugsimulatoren), der Unterhaltung (Filmanimationen, Computerspiele) und der Gesellschaft (Katastrophenvorhersagen, Wettervorhersage).

Aufwendige Simulationen erfordern eine hohe Rechenleistung, um wirtschaftlich zu sein. Durch die ständige Weiterentwicklung der benötigten Hardware wird dies von Tag zu Tag vorangetrieben. Somit werden Hochleistungsrechner oder -server auch immer lukrativer für den Anwender. Eine hohe Rechenleistung ist wichtig für die Effizienz der Simulation, weil dadurch die von der Software verwendeten Algorithmen und Gleichungen schneller berechnet werden. Durch eine geringe Rechenzeit können in kurzer Zeit eine große Menge an Daten, zum Beispiel einer Messreihe, gewonnen werden.

Des Weiteren werden Energie und Ressourcen durch die numerische Analyse eingespart, da weniger Versuchsaufbauten oder Prototypen erzeugt werden müssen oder nachträgliche Änderungsarbeit entfällt. Ein weiterer Vorteil ist es, ohne Risiko, Änderungen an einem Prozess oder einem Produkt durchführen und die Auswirkung der Änderung voraussagen zu können. Ein weiteres Argument für den Einsatz von Numerischer Analyse ist die Visualisierung und Animation des Prozesses durch die Simulation, was zu schnellem und hohem Verständnis führt.

1.2 Aufgabenstellung

Die Vorteile der numerischen Simulation sollen nun in dieser Arbeit zur Anwendung gebracht werden. Das soll im Falle der Umformsimulation, genauer der Blechumformsimulation, geschehen. Wie zuvor beschrieben gelingt es mit Hilfe einer Simulationssoftware sehr einfach und kostengünstig, eine große Anzahl an Tiefziehversuchen durchzuführen, ohne dabei ein einziges Blech zu kaufen oder zu verschwenden, geschweige denn ein Werkzeug für dieses Teil herstellen zu müssen. Dieser Vorteil soll sich in dieser Arbeit zu Nutze gemacht werden, um für ein gegebenes Teil die vielen Einflussgrößen auf den Tiefziehprozess zu analysieren. Auch verschiedene Materialien und deren Parameterschwankungen sollen berücksichtigt werden.

Die Studie soll mit Hilfe der Software AutoForm durchgeführt werden. Die Software wird vom Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben zur Verfügung gestellt.

2 Stand der Technik (Literaturteil)

Die Literaturrecherche dient der Einarbeitung in das Thema der Blechumformung, speziell in das Tiefziehen, und ist für die Bewerkstelligung der Aufgabenstellung unumgänglich, um das Verhalten der Werkstoffe in der späteren Simulationsstudie besser verstehen und interpretieren zu können.

2.1 Grundlagen der Blechumformung

In diesem Kapitel wird auf werkstoffspezifische Kenngrößen wie der senkrechten Anisotropie und die Kaltverfestigung eingegangen. Des Weiteren werden Themen wie das Grenzformänderungsschaubild sowie Fließkurven und deren Ermittlung aufgegriffen.

2.1.1 Senkrechte Anisotropie (r -Wert) und Kaltverfestigung (n -Wert)

Der r -Wert und der n -Wert sind sehr wichtige Kenngrößen für die Beurteilung der Tiefziehbarkeit von Blechwerkstoffen. Beide Kennwerte werden mittels Flachzugproben ermittelt. Welche Größenordnung diese beiden Werte für ein gutes Tiefziehverhalten von Blechen haben sollen, wird in diesem Kapitel erläutert.

2.1.1.1 r -Wert

Der r -Wert beschreibt den Einfluss der Anisotropie des Werkstoffes auf das Tiefziehverhalten. Er errechnet sich aus dem Verhältnis der Breitenänderung zur Dickenänderung einer Flachzugprobe. Die Variablen mit dem Index 1 sind die Breite und Dicke nach der Umformung, die mit Index 0 jene vor der Umformung.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_d} = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)}$$

Auf Grund der Abhängigkeit der Orientierung der Flachzugprobe zur Walzrichtung, wurde die mittlere senkrechte Anisotropie r_m eingeführt. Hierzu werden Flachzugproben mit unterschiedlichen Mittelachsen zur Walzrichtung (üblicherweise 0° , 45° und 90°) aus dem Blech entnommen und daraus der r -Wert ermittelt. Eine Probe mit der Mittelachse 135° zur Walzrichtung liefert dieselben Ergebnisse wie jene Probe 45° zur Walzrichtung. Deshalb wird diese doppelt gewichtet.

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}$$

Auf Grund der unterschiedlich verteilten r -Werte über das Blech, fließt das Material an manchen Stellen leichter und an anderen Stellen schlechter. Das kann zu Materialanhäufungen an den Stellen führen, die sich schlechter umformen lassen. Diese Anhäufungen bilden dann sogenannte Zipfel, die sich negativ auf das Tiefziehergebnis auswirken. Ein Maß zur Beschreibung dieses Verhaltens, der ebenen Anisotropie in der Blechebene, ist der ebene Anisotropiewert Δr .

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2 * r_{45^\circ}}{2}$$

Weil sich die 0° - und 90° Richtung in Zusammenhang mit der Zipfelbildung gleich verhalten, und die 45° Richtung genau gegengleich, wird von den beiden die Differenz gebildet. Die Werte für 0° und 90° sind zumeist größer als die der 45° Richtung. Je größer die Abweichung der Werte, desto eher kommt es zur Zipfelbildung. Der Δr Wert kann als ein Maß für die Größe der Abweichung der r -Werte der verschiedenen Richtungen gesehen werden.

Für ein gutes Tiefziehverhalten sollte der r -Wert größer als eins sein. Das bedeutet, dass die Längenänderung in der Breite größer ist als die in der Dickenrichtung. Beim Tiefziehen wird ein solches Verhalten angestrebt, da somit ein Ausdünnen und dadurch Fehler wie Reißen vermieden werden. Generell kann gesagt werden, dass Materialien mit einem hohen r - oder r_m -Wert, größere Ziehtiefen erreichen können. Der Δr Wert soll für beste Tiefziehergebnisse gegen null gehen. In der unteren **Tabelle 2.1** sind charakteristische r_m -Werte für verschiedene Werkstoffe angeführt. [1]

Tabelle 2.1: r_m -Werte für gängige Werkstoffe [2]

Werkstoff	r_m
Zinklegierungen	0,4-0,6
Warmgewalzter Stahl	0,8-1,0
Kaltgewalzter unberuhigter Stahl	1,0-1,4
Kaltgewalzter AL-beruhigter Stahl	1,4-1,8
Aluminiumlegierungen	0,6-0,8
Kupfer und Messing	0,6-0,9
Titanlegierungen (α)	3,0-5,0
Rostfreier Stahl	0,9-1,2
Hochfeste, niedrig legierte Stähle	0,9-1,2

2.1.1.2 n -Wert

Der n -Wert beschreibt die Verfestigung eines Werkstoffes während der Umformung. Der n -Wert ist die Steigung einer im doppelt logarithmischen Maßstab aufgetragenen Fließkurve. Eine rechnerische Bestimmung des n -Wertes ist durch die Ludwik-Gleichung ebenfalls möglich. Je steiler die Fließkurve ansteigt, desto höher ist der n -Wert und desto höher ist die Kaltverfestigung des Werkstoffes, was für den Tiefziehprozess von Vorteil ist. In Bereichen, die beim Ziehprozess als erstes umgeformt werden, entsteht die Verfestigung zuerst. In weiterer Folge werden die umgebenden weicheren Bereiche zur Umformung herangezogen, was zu einer ausgeglichenen und nur geringfügig veränderten Bauteildicke führt. Wie vorhin schon erwähnt ist dies von Vorteil, da das Risiko von Reißern dadurch verringert wird. Die Meisten Metalle haben einen n -Wert von 0,1 bis 0,5. [1]

In **Abbildung 2.1** sind einige r_m - und n -Werte für wichtige Blechwerkstoffe dargestellt. Die Zahlen 1 bis 11 in der Abbildung stehen für folgende Werkstoffe:

- 1 Spezialtiefziehstahl (DC06 oder DX56D+...)
- 2 Sondertiefziehgüte (DX57D+... ähnlich DC05)
- 3 besonders beruhigter, kaltgewalzter Tiefziehstahl (DC04)
- 4 beruhigt vergossener, kaltgewalzter Tiefziehstahl (DC03)
- 5 TRIP-Stähle: HXT600T bis HXT1000T
- 6 IF-Stähle (interstitial free): HX180YD, HX220YD, HX260YD
- 7 BH-Stähle (Bake-Hardening): HX180BD, HX220BD

8 DP-Stähle (Dual-Phasen): HXT450X, HXT500X, HXT600X

9 kaltgewalztes Feinblech zum Kaltumformen aus mikrolegierten Feinkornstählen

10 mikrolegierte, thermomechanisch behandelte Feinkornstähle zum Kaltumformen

11 Warmband zum Kaltwalzen aus weichen, unlegierten Stählen mit $C \leq 0,08\%$

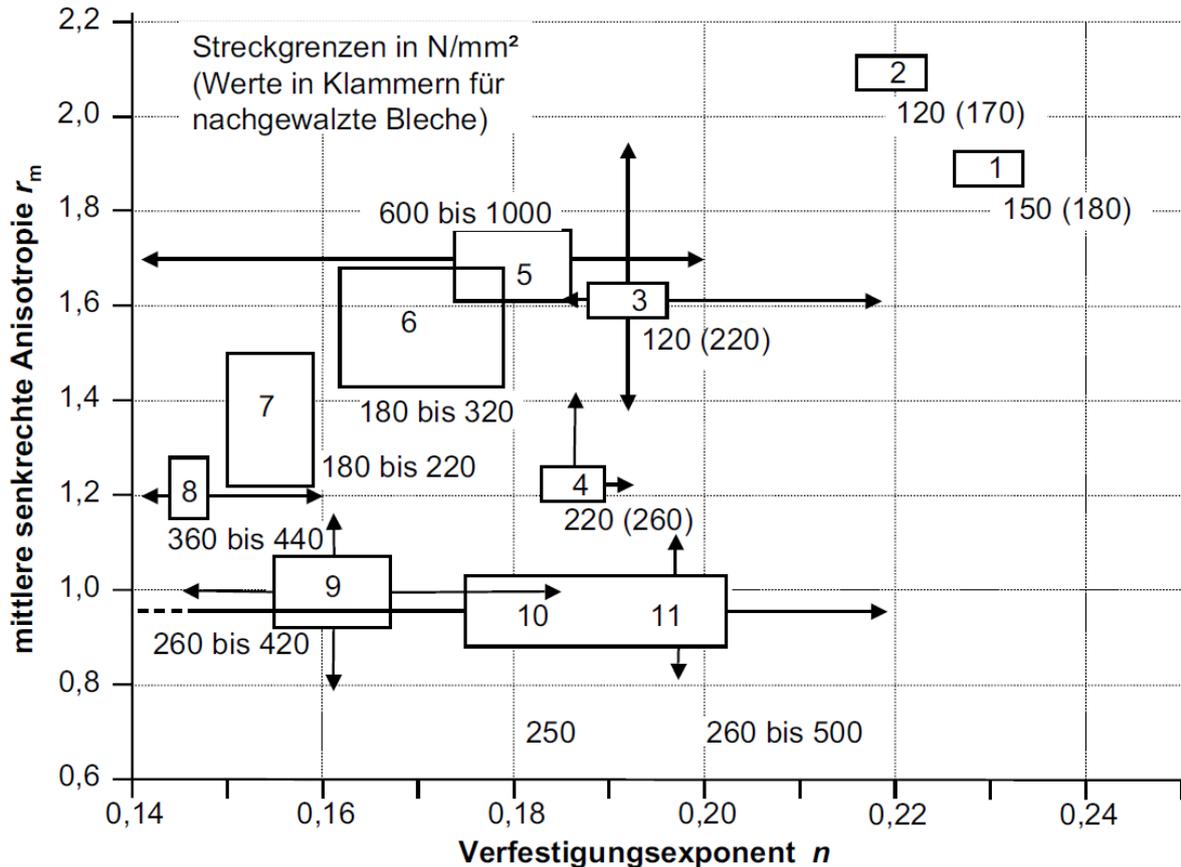


Abbildung 2.1: r_m - und n -Werte wichtiger Blechwerkstoffe [1]

2.1.2 Grenzformänderungsschaubild

Ein Grenzformänderungsschaubild oder -diagramm zeigt den Zusammenhang des Spannungszustandes mit den dazugehörigen Formänderungsverhältnissen für das Tiefziehen. Ebenfalls können die Grenzen bis zum Bruch des Bleches in diesem Diagramm abgelesen werden. Im Schaubild werden die beiden Umformgrade der Hauptrichtungen in der Blechebene aufgetragen. Bestimmen lassen sich die Umformgrade mit Hilfe des Messrasterverfahrens. Dabei wird ein Muster mit gleich großen und regelmäßig verteilten Kreisen mit Durchmesser d auf das Blech aufgedruckt. Nach der Umformung sind diese Kreise Ellipsen mit den Hauptachsen a und b . Wobei a die längere Hauptachse und b die Nebenachse ist. Aus den

Verhältnissen der Achsen der Ellipse zum Anfangsdurchmesser der Kreise werden die Umformgrade mit den Formeln $\varphi_1 = \ln(a/d)$ und $\varphi_2 = \ln(b/d)$ berechnet. Index 1 steht für den Hauptumformgrad, Index 2 für den Nebenumformgrad, wobei φ_1 immer positiv ist, da a definitionsgemäß größer ist als b . [1]

In der Blechebene sind, wie in der unteren **Abbildung 2.2** zu sehen, für die Formänderung drei Fälle zu unterscheiden:

1. Beide Hauptachsen werden gleichmäßig gedehnt und größer während der Umformung. Dieser Fall wird zweiachsiges, gleichmäßiges Streckziehen genannt. Linie a ($\varphi_1 = \varphi_2$) in **Abbildung 2.2**.
2. Eine Achse der Ellipse wird größer, die andere bleibt gleich dem Durchmesser des Kreises. Dieser Fall heißt einachsiges Streckziehen und wird in **Abbildung 2.2** durch die Linie b ($\varphi_2 = 0$) dargestellt.
3. Die Hauptachse der Ellipse a wird größer, während die Nebenachse b kleiner wird als der Ausgangsdurchmesser. Somit wird der Werkstoff in eine Richtung gestreckt und in die andere Richtung gestaucht. Hier spricht man von Tiefziehen (Linie c, $\varphi_1 = -2 \varphi_2$), beziehungsweise von reinem Tiefziehen (Linie d, $\varphi_1 = -\varphi_2$)

Ein weiterer Fall wäre, dass die beiden Achsen der Ellipse während der Umformung kleiner werden, dieser Fall hat allerdings keine praktische Bedeutung. [1]

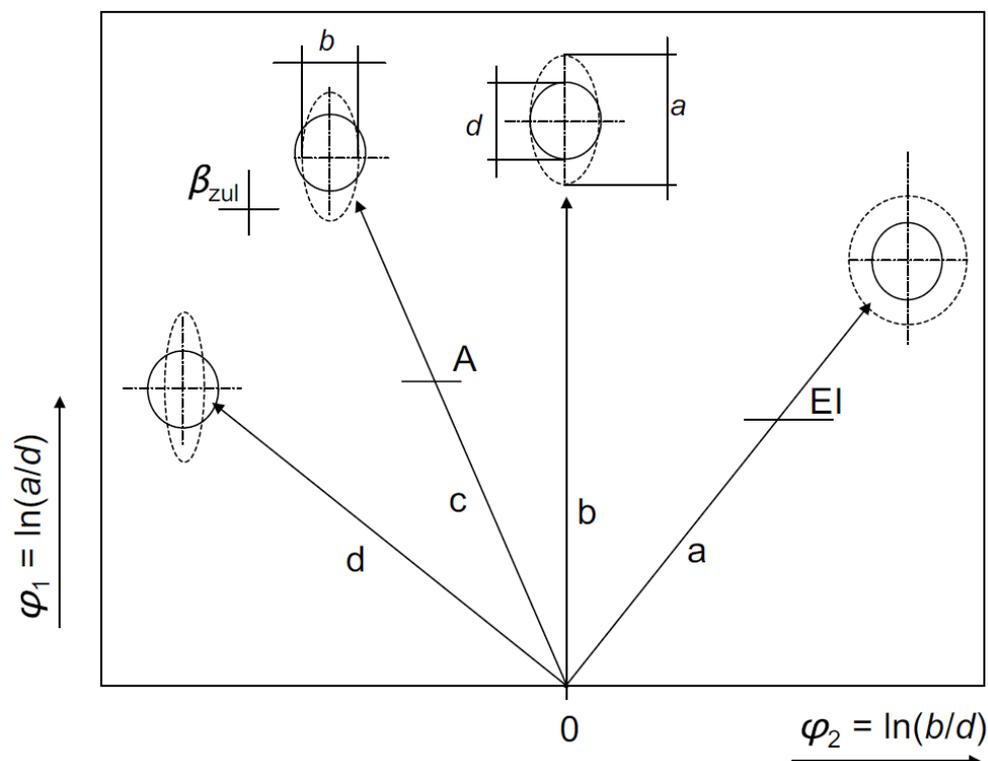


Abbildung 2.2: Grenzformänderungsschaubild [1]

Um die Verfahrensgrenzen bezüglich der Rissbildung im Grenzformänderungsschaubild eintragen zu können, müssen insgesamt drei Versuche, je einer pro Fall (**Abbildung 2.2**), durchgeführt werden. Für die Linie a wird der Werkstoff einer gleichmäßigen, zweiachsigen plastischen Dehnung bis zum Bruch unterzogen. Die erreichbaren Umformgrade werden somit ermittelt, der Kennwert für diesen Versuch ist EI und wird auf der Linie a eingetragen. Zugversuche an Flachzugproben, bei denen die Probe einem einachsigen Zug unterzogen wird, dienen der Ermittlung der Bruchdehnung A für den jeweiligen Werkstoff. Die Bruchdehnung A wird auf der Geraden c aufgetragen. Napfzugversuche dienen der Ermittlung des maximal zulässigen Ziehverhältnisses β_{zul} , welches die Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen (Rissbildung) beschreibt. Es wird zwischen den Geraden c und d aufgetragen. Auf das Ziehverhältnis β wird später noch näher eingegangen. Verbindet man nun die drei Kennwerte, erhält man die Kurve der Verfahrensgrenze. In **Abbildung 2.3** ist ein Grenzformänderungsschaubild für verschiedene Tiefziehwerkstoffe dargestellt. Für Umformgrade über der Kurve können schadhafte Teile erwartet werden, unterhalb der Kurve sind Gutteile zu erwarten. Nimmt die Festigkeit des Werkstoffes zu, verschiebt sich die Kurve nach unten, nimmt die Blechdicke zu, wandert die Kurve nach oben. Die Grenzformänderungsschaubilder werden sehr häufig bei der Tiefziehsimulation verwendet, um vorausszusagen, in welchen Bereichen die Gefahr von Rissen herrscht. Das Programm berechnet für jeden Punkt lokal die Umformgrade φ_1 und φ_2 und trägt diese in das Schaubild ein, so kann eine gute Voraussage über das Werkstoffverhalten beim Tiefziehen getroffen werden. [1]

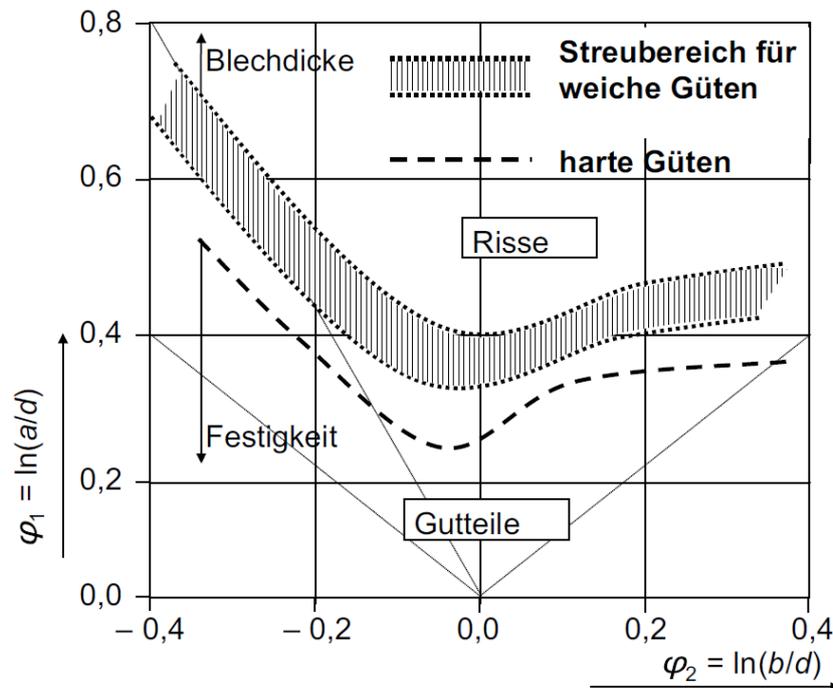


Abbildung 2.3: Verfahrensgrenzen im Grenzformänderungsschaubild [1]

2.1.3 Fließkurven

Bei der Fließkurve handelt es sich um eine Darstellung der Fließspannung k_f über den Umformgrad φ und beschreibt somit das Verfestigungsverhalten von metallischen Werkstoffen beim Umformen. Deshalb ist diese Kurve charakteristisch für das Umformverhalten und wird unter anderem herangezogen, um Umformkräfte und Belastungen auf das Werkzeug zu berechnen. Die Fließspannung eines Materials wird auch zur Bestimmung der benötigten Umformarbeit benötigt, die Kenntnis dieser Arbeit beeinflusst die Auswahl des Werkstoffes und gibt Aufschluss über die Verfahrensgrenzen sowie die Verfahrensauswahl. [2]

2.1.3.1 Fließspannung

Die Fließspannung k_f ist definiert als diejenige Spannung, die bei homogenem einachsigen Spannungszustand in einem Werkstück erzeugt werden muss, um Fließen einzuleiten oder aufrecht zu erhalten. [3]

Beeinflusst wird die Fließspannung oder auch Formänderungsfestigkeit unter anderem:

- vom Werkstoff (Kristallstruktur, Legierungsbestandteile, Aufbau des Gefüges)
- vom Umformgrad φ (**Abbildung 2.4**)
- von der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ (**Abbildung 2.4**)
- und von der Temperatur ϑ (**Abbildung 2.4**)

Für eine Formänderung des Werkstoffes ist vor allem die Bewegung der Versetzungen von Gitterbaufehlern verantwortlich. Wird also die Versetzungsbewegung durch einen oben genannten Einfluss erleichtert, so sinkt die nötige Fließspannung. Somit steigt sie, wenn ein Einfluss die Bewegung der Versetzungen erschwert. [2]

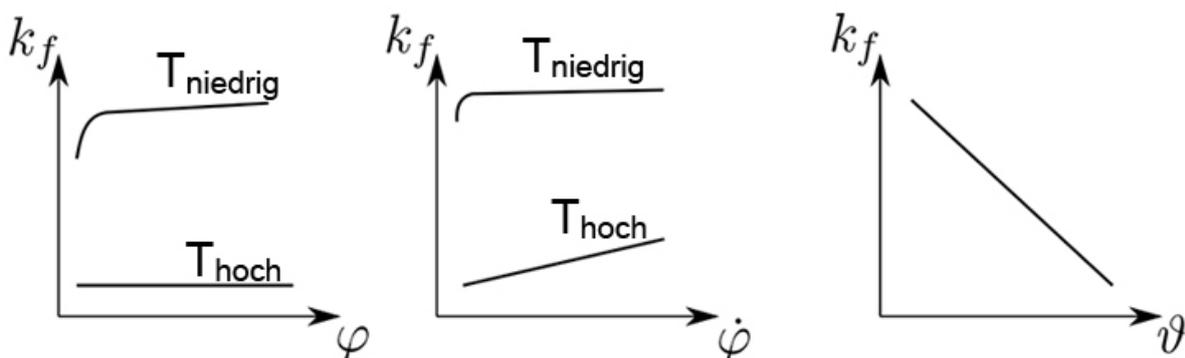


Abbildung 2.4: Einflussgrößen auf die Fließspannung [4]

Einfluss des Werkstoffes: Die Kristallstruktur des Werkstoffes hat dahingehend einen Einfluss, als dass die Bewegung der Versetzungen am leichtesten an bestehenden Gleitebenen passiert. Liegt also eine Gleitebene günstig zu der dort wirkenden Spannung, wird das Abgleiten und somit die Versetzungsbewegung erleichtert. Legierungsbestandteile weisen andere Atomradien als das Basismaterial auf, diese verzerren somit das bestehende Kristallgitter, was zu einer erschwerten Versetzungsbewegung führt. Auch das Gefüge des Werkstoffes hat einen Einfluss auf die Fließspannung. Unterschiedliche Phasen (Ferrit, Austenit, Perlit, Bainit, Martensit, etc.) weisen unterschiedliche Festigkeiten auf, was zu einer unterschiedlichen Versetzungsbewegung führt. Grundsätzlich ist die Fließspannung höher, je fester der Werkstoff ist. Auch Korngrenzen wirken sich hemmend auf die Versetzungsbewegung aus. Je feinkörniger das Gefüge, desto höher ist auch die Fließspannung, bei chemisch gleicher Zusammensetzung eines Werkstoffes. [2]

Einfluss des Umformgrades (Abbildung 2.4, links): Bei niedriger Temperatur und zunehmender plastischer Verformung nimmt auch die Versetzungsdichte zu, was zu erschwerter weiterer Umformung und damit zu einer Erhöhung der Fließspannung führt. Man spricht dabei von der so genannten Kaltverfestigung, welche durch den n -Wert beschrieben wird. Bei hohen Temperaturen können Effekte auftreten, die die Versetzungen wieder abbauen und somit das Umformen wieder erleichtern. [2]

Einfluss der Umformgeschwindigkeit (Abbildung 2.4, Mitte): Bei niedrigen Temperaturen spielt die Umformgeschwindigkeit nur eine Untergeordnete Rolle, da eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit um den Faktor 10 nur eine etwa 8% höhere Fließspannung ergibt. Bei höheren Temperaturen wirkt sich die Geschwindigkeit stärker aus, da hier Prozesse wie Rekristallisation oder Diffusion stattfinden. [2]

Einfluss der Temperatur (Abbildung 2.4, rechts): Die Fließspannung verringert sich mit steigender Temperatur bei allen wichtigen Werkstoffen des Maschinenbaus. Das ist auf die bessere Beweglichkeit und teilweise der Auflösung der Versetzungen bei erhöhter Temperatur zurückzuführen. Dieser Effekt tritt bereits bei Temperaturen von 25 bis 35% der Schmelztemperatur auf und wird Erholung des Werkstoffes genannt. Die Erholung verändert das Gefüge des Werkstoffes nicht, im Gegensatz zur Rekristallisation, und tritt bereits bei sehr kurzen Glühzeiten auf. Bei der Rekristallisation (etwa 40% der Schmelztemperatur) wird das ursprüngliche Gefüge wiederhergestellt und die Dichte der Versetzungen nimmt dabei stark ab. Da die Temperatur großen Einfluss auf die Fließspannung hat, kann das Umformverhalten in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Kaltumformung: Der Rohteil wird vor der Umformung nicht aufgewärmt und hat somit Raumtemperatur. Dadurch sind hohe Umformkräfte nötig.
- Halbwarmumformung: Der Rohteil wird angewärmt (bei Stahl auf etwa 650 °C bis 900 °C). Dadurch erreicht man eine höhere Maßgenauigkeit als beim Warmumformen und benötigt geringere Umformkräfte als beim Kaltumformen.
- Warmumformen: Der Rohteil wird erwärmt (bei Stahl auf 1000°C bis 1250°C). Im Vergleich zum Kaltumformen ist die Maßgenauigkeit, dafür aber auch der Kraftbedarf um den Faktor 8 bis 10, wesentlich geringer.

Allgemein spricht man oberhalb der Rekristallisationstemperatur von Warmumformung und unterhalb von Kaltumformung. Über der Rekristallisationstemperatur überwiegen die Entfestigungsprozesse, unterhalb die Verfestigungsprozesse.

2.1.3.2 Fließkurvenaufnahme

Zugversuch

Der Zugversuch dient unter anderem zur Aufnahme der Fließkurve, die die wahre Spannung und die Formänderung im einachsigen Spannungszustand darstellt. Für den Zugversuch werden Flachzugproben (siehe **Abbildung 2.5** unterhalb) verwendet, die an den beiden Enden in die Zugprüfmaschine eingespannt und danach gezogen werden. Während des Auseinanderziehens wird die benötigte Kraft und die Längenänderung der Probe aufgezeichnet. Die Darstellung erfolgt üblicherweise in einem Spannungs- Dehnungsdiagramm, indem man Kraft und Längenänderung auf Spannung und Dehnung umrechnet. Die aufgetragene Spannung ist die Nennspannung σ_0 und definiert als das Verhältnis von wirklicher Kraft F zu Ausgangsquerschnitt A_0 . Somit ist diese Spannung keine wirkliche Spannung, da sich der Querschnitt laut Gesetz der Volumenkonstanz, mit Fortdauer des Versuches, ändert. Da in der Umformtechnik große Formänderungen erreicht werden können, wird hier nicht mit der Nennspannung σ_0 , sondern mit der wahren Spannung σ gerechnet. Erreicht die wahre Spannung σ die Fließgrenze des Werkstoffes, spricht man auch von der Fließspannung k_f , unter der Voraussetzung, dass der Spannungszustand weiterhin einachsig ist, das heißt die Gleichmaßdehnung noch nicht erreicht ist und keine Einschnürung stattfindet. [3]

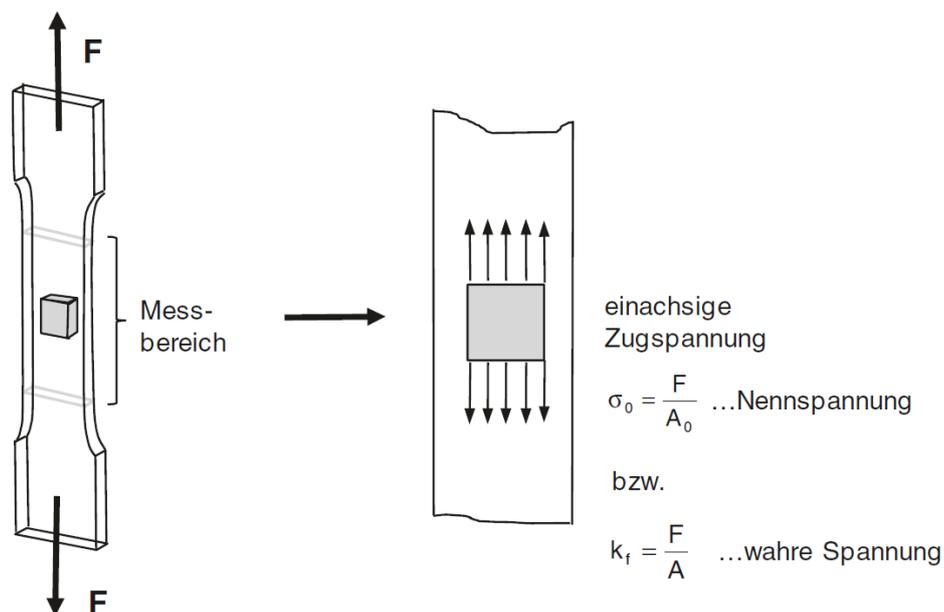
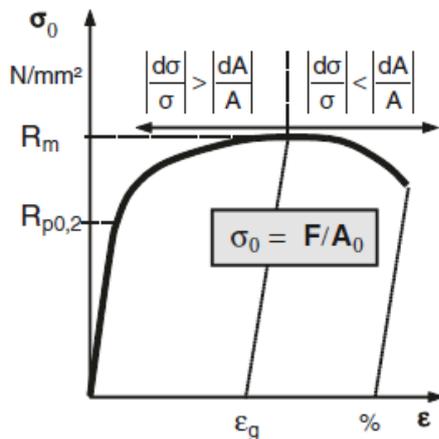


Abbildung 2.5: Flachzugproben zur Fließkurvenaufnahme [3]

In **Abbildung 2.6** ist oben die Nennspannung σ_0 , bezogen auf den Ausgangsquerschnitt, über die prozentuale Dehnung ε aufgetragen. In der Mitte die wahre Spannung σ über die prozentuale Dehnung ε und unten ist die Fließkurve (Fließspannung k_f über logarithmische Dehnung, sprich Umformgrad φ) zu sehen. [3]

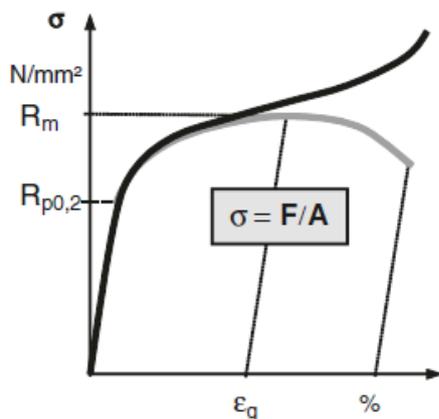


Spannungs-Dehnungs-Diagramm auf Basis von Nennspannung und prozentualer Dehnung:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Bei kontinuierlich verfestigendem Werkstoff ergibt sich ein zunächst steigender und ab ε_g fallender Kurvenverlauf.

Bis ε_g überwiegt der Effekt der Verfestigung den der Querschnittsabnahme, ab der Gleichmaßdehnung ε_g (Einschnürbeginn) überwiegt der Effekt der Querschnittsabnahme den der Verfestigung.

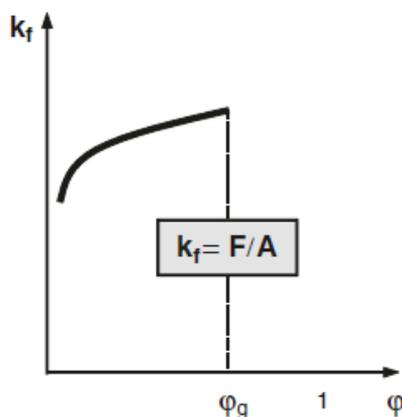


Spannungs-Dehnungs-Diagramm auf Basis von wahrer Spannung und prozentualer Dehnung:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \sigma_0(1+\varepsilon) \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Da die Kraft F auf den wirklichen Querschnitt A bezogen wird, erhält man nun einen kontinuierlich steigenden Kurvenverlauf.

Die ab ε_g deutliche Zunahme der Steigung beruht auf einer schnell stattfindenden lokal konzentrierten Querschnittsabnahme (Einschnürung) bei gleichzeitig weiterer Verfestigung.



Fließkurve auf Basis von wahrer Spannung und logarithmischer Dehnung:

$$k_f = \frac{F}{A} = \sigma(1+\varepsilon) \quad \varphi = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1+\varepsilon)$$

Dadurch dass die wahre Spannung auf die logarithmische Formänderung bezogen ist, erhält die Fließkurve ihren für starrplastisches Werkstoffverhalten typischen monoton steigenden Verlauf, wobei die Steigung mit zunehmender Umformung abnimmt.

Abbildung 2.6: Vorgehensweise zur Fließkurvenaufnahme [3]

Der Grund für die Arbeit mit logarithmischer Formänderung, im Gegensatz zu prozentualer Dehnung, ist jener, dass sich logarithmische Formänderungen fehlerfrei addieren lassen, was bei der prozentualen Dehnung, auf Grund der sich ändernden Bezugsgröße, nicht möglich ist. Ein Beispiel ist in **Abbildung 2.7** zu sehen. Staucht man einen Zylinder in zwei Schritten von einer Ausgangshöhe von 100mm zu einer Höhe von 50mm ergibt das eine prozentuale Stauchung von -50% . Addiert man jedoch die prozentualen Stauchungen der einzelnen Schritte, kommt man auf ein falsches Ergebnis. Nämlich auf eine Stauchung von $-58,6\%$. Addiert man die logarithmische Stauchung der beiden Umformstufen, so ist dies dasselbe Ergebnis wie bei einer einstufigen Stauchung ($\varphi_{\text{ges}}=-0,693$). [3]

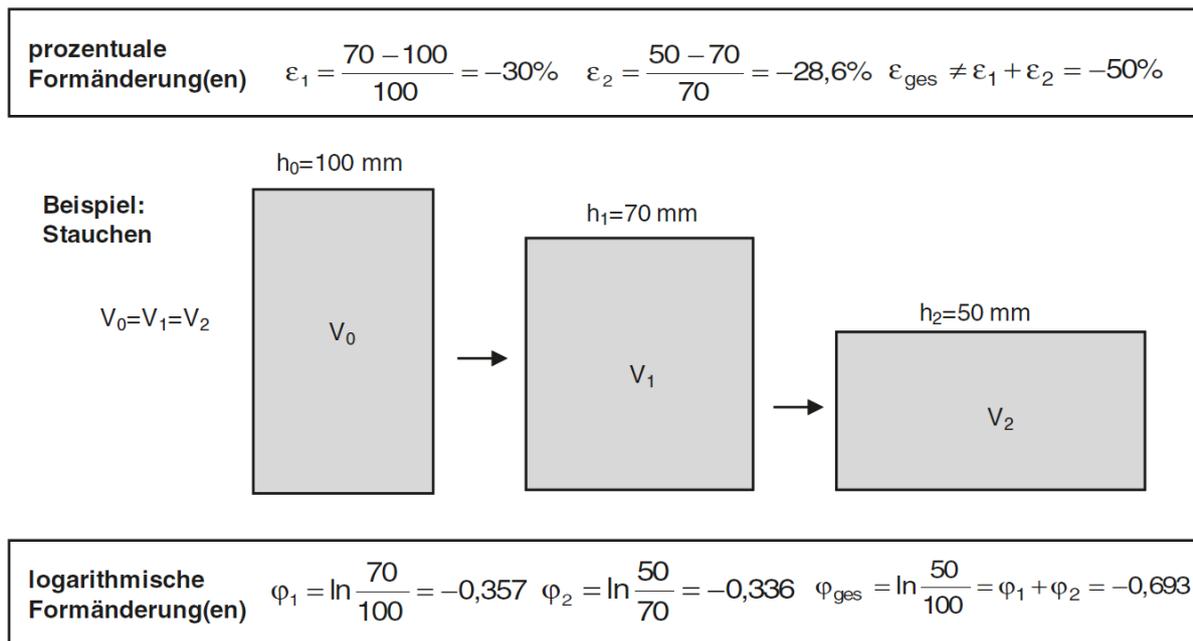


Abbildung 2.7: Rechenbeispiel logarithmische Formänderung [3]

Bulgetest

Ein weiteres Verfahren zur Fließkurvenaufnahme ist der Bulgetest. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass größere Umformungen bis zur Einschnürung und somit höhere Umformgrade erreicht werden können. Wie in **Abbildung 2.8** zu sehen, wird bei diesem Test eine runde Blechplatine zwischen Matrize und Blechhalter fest eingespannt, wobei diese eine ringförmige Geometrie aufweisen. Durch ein flüssiges Medium wird jetzt ein Druck von unten aufgebaut und die Blechrunde (Blechplatine) beginnt sich annähernd kugelförmig auszubeulen (Beule = bulge). Mit höher werdendem Druck schnürt die Platine, je nach Material, bei einer gewissen Höhe ein und im Weiteren kommt es zur Rissbildung. Zur Ermittlung der Spannung wird der Flüssigkeitsdruck während des gesamten Versuches gemessen. Die Dehnungen werden von optischen Sensoren, die die Veränderung der Geometrie sowie die Umformgrade in der Blechebene über ein Messraster aufnehmen, gemessen. Aus den beiden Umformgraden in der Blechebene lässt sich, über die Volumenkonstanz, die Blechdicke an dem zugehörigen momentanen Krümmungsradius und zugehörigem Druck berechnen. Der Ort an der Ausbeulung, welcher zur Bestimmung der Fließkurve herangezogen wird ist jener, an der das Blech kurz vor dem ersten Riss die größte Formänderung in Dickenrichtung aufweist. Die Berechnung der Spannung erfolgt über die Kesselformel. [3]

Wegen der veränderten Spannungs- und Formänderungszustände können, wie bereits erwähnt, deutlich höhere Formänderungen, im Gegensatz zum Zugversuch, erreicht werden. Dadurch kann die Fließkurve auch weit über die Gleichmaßformänderung hinaus aufgenommen werden, was ein Vorteil ist. Jedoch ist es problematisch, dass sich die Fließkurven aus Zugversuch und Bulgetest auch schon bei kleinen Formänderungen unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass beim Zugversuch die einachsige Spannung über Längenformänderung und beim Bulgetest die biaxiale Spannung über die Dickenformänderung, zur Bestimmung der Fließkurve, aufgetragen wird. Um den Fließbeginn mittels gängiger Vergleichsspannungshypothesen eines Materials zu ermitteln, bedarf es der einachsigen Fließkurve, also jener des Zugversuches. Der Bulgetest hat aber dennoch seine Berechtigung, nämlich dahingehend, dass mittels mathematischer Ansätze die Kurve aus dem Bulgetest jener aus dem Zugversuch angeglichen und über die Gleichmaßformänderung hinaus angenähert werden kann. [3]

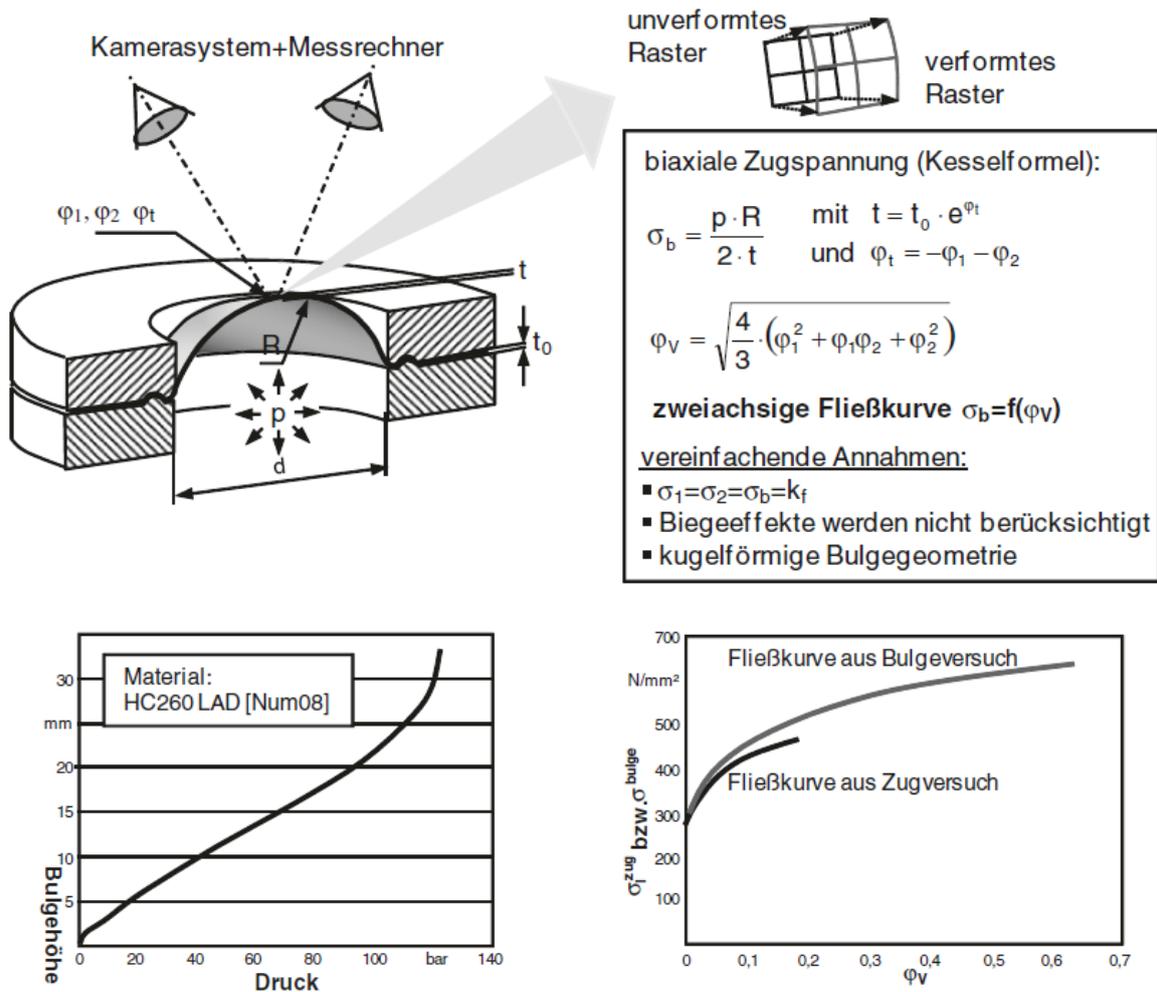


Abbildung 2.8: Ermittlung der Fließkurve aus dem Bulgetest [3]

In **Abbildung 2.9** sind Fließkurven bei unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}$ sowie verschiedenen Temperaturen des Werkstoffes C15 zu sehen. Es ist zu sehen, dass, wie zuvor erwähnt, die Fließspannung mit höherer Temperatur deutlich abnimmt und die Umformgeschwindigkeit bei niedrigen Temperaturen weniger Einfluss hat als bei hohen Temperaturen.

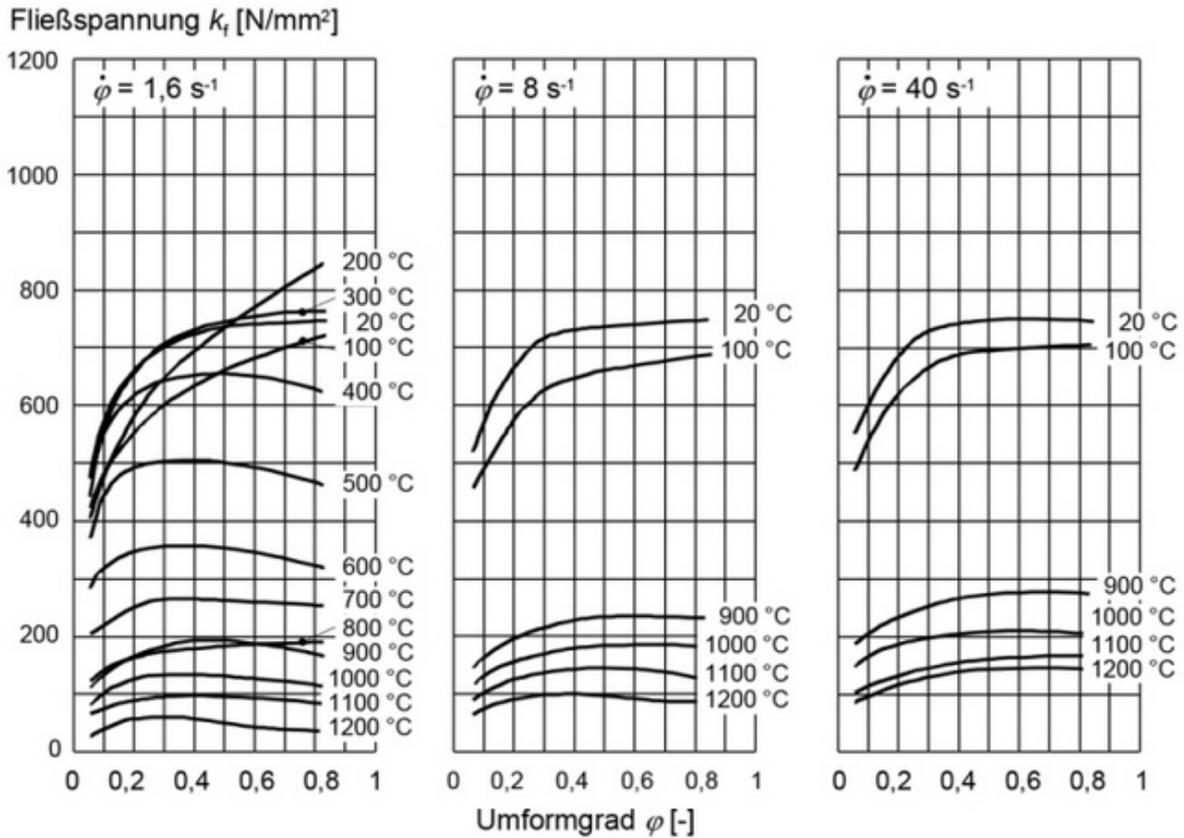


Abbildung 2.9: Fließkurven von C15 bei verschiedenen Umformgeschwindigkeiten [4]

2.1.3.3 Mathematische Beschreibung der Fließkurve

Da in der Blechumformung Formänderungen weit über die Gleichmaßformänderung des einachsigen Zugversuchs vorkommen, muss auch dieser Bereich in der Fließkurve abgebildet werden, um Umformvorgänge berechnen zu können. Dies gilt vor allem für die Umformsimulation. Hier benötigt das Programm Fließkurven und dazugehörige mathematische Beschreibungen weit über der Gleichmaßformänderung, um realitätsnahe Ergebnisse darstellen zu können. Um die Fließkurve des Zugversuches erweitern zu können, bedient man sich der Kurvenextrapolation über die bestehende Kurve hinaus. Im Folgenden werden Modelle zur mathematischen Beschreibung der Fließkurve kurz erläutert. [3]

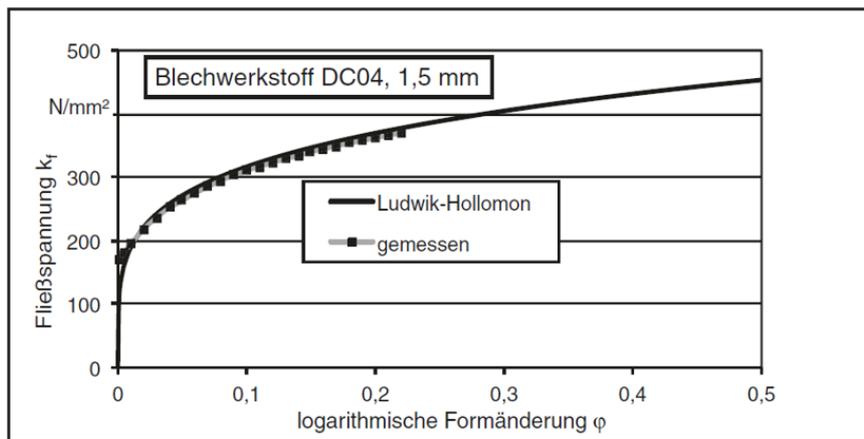
2.1.3.3.1 Fließkurve nach Ludwik-Hollomon und nach Swift

Die Ludwik-Hollomon und Swift Ansätze sind sehr ähnlich, wobei jener von Swift auf den Ludwik-Hollomon Ansatz zurückgeht.

Die Formel des Ludwik-Hollomon Ansatzes für die Beschreibung der Fließkurve lautet:

$$k_f(\varphi) = a * \varphi^n$$

Dabei ist k_f die Fließspannung, φ die logarithmische Formänderung (Umformgrad), n der Verfestigungsexponent und a ist die Werkstoffkonstante und entspricht der Fließspannung bei $\varphi=1$. Mit diesem Ansatz lässt sich die Fließkurve aus dem Zugversuch sehr gut annähern und über die Gleichmaßformänderung mathematisch hinaus extrapolieren (siehe **Abbildung 2.10**). Im Bereich von hohen Formänderungen nimmt die Übereinstimmung der berechneten und der realistischen Kurve immer weiter ab, sodass für die Simulation meist andere Ansätze verwendet werden. Diese Abweichung ist unter anderem der Annahme eines konstanten Verfestigungsexponenten n geschuldet, was in der Realität nicht der Fall ist. Eine weitere Abweichung von der Realität besteht darin, dass die Kurve bei einer Spannung von Null beginnt. Da das Material aber erst nach anlegen einer gewissen Spannung zu fließen beginnt, kann die Fließspannung nicht null sein. [3]



$$k_f(\varphi) = a \cdot \varphi^n$$

$n \approx \varphi_g$
 $\varphi_g = \ln(1 + \varepsilon_g)$
 (n: Verfestigungsexponent)

$$a = R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n = 528 \text{ N/mm}^2$$

Messwerte aus dem Zugversuch:
 $R_m = 303 \text{ N/mm}^2$
 $\varepsilon_g = 24,6\% \rightarrow \varphi_g = 0,222$
 e: Euler'sche Zahl (Basis d. natürlichen Logarithmus)

Abbildung 2.10: Fließkurve nach Ludwik-Hollomon [3]

Swift begegnet der Problematik der von Null beginnenden Kurve dadurch, dass er der Gleichung von Ludwik-Hollomon den Summanden φ_0 hinzufügt, der eine Horizontalverschiebung der Fließkurve bewirkt. Die Formel nach Swift sieht dann folgendermaßen aus:

$$k_f(\varphi) = a * (\varphi_0 + \varphi)^n$$

Der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen zeigt die **Abbildung 2.11**. Versuche aus dem Bulgetest zeigen, dass die Fließkurve im Bereich hoher Formänderungen sehr flach werden, da hier der Werkstoff weniger stark verfestigt und somit der Verfestigungsexponent abnimmt. Die Ansätze nach Ludwik-Hollomon und Swift rechnen jedoch mit konstantem Verfestigungsexponent, was bei einer Simulation, vor allem bei hochfesten Stählen und Aluminiumlegierungen, zu falschen Ergebnissen führt. [3]

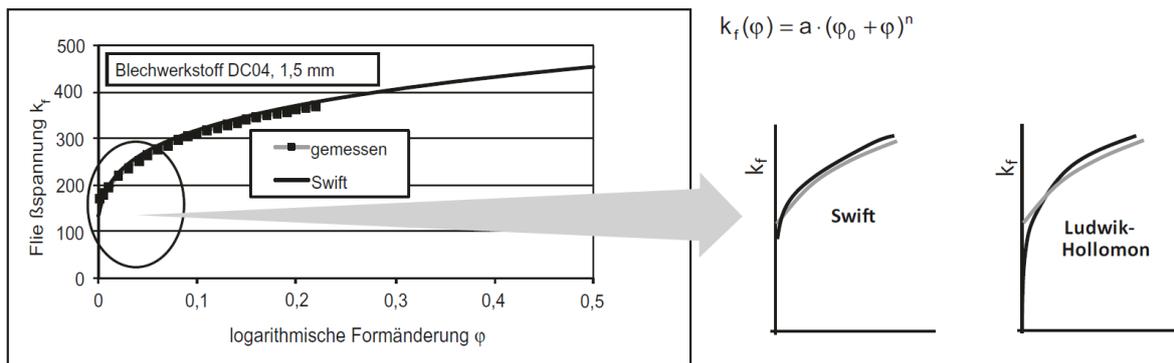


Abbildung 2.11: Fließkurve nach Swift [3]

2.1.3.3.2 Fließkurve nach Hockett-Sherby

Der Ansatz nach Hockett-Sherby berücksichtigt die Abflachung der Fließkurve bei sehr hohen Formänderungen. Hockett und Sherby haben anhand von Stauchversuchen gesehen, dass die Kurve nahezu horizontal ausläuft. In ihre Gleichung haben sie einen sogenannten Sättigungsterm, nämlich die Sättigungsfließspannung $k_{f,s}$, eingebaut, um diesen sehr flachen Verlauf bei hohen Formänderungen gut abzubilden. Die Formel lautet folgendermaßen:

$$k_f(\varphi) = k_{f,s} - (k_{f,s} - k_{f,0}) * e^{-m\varphi^P}$$

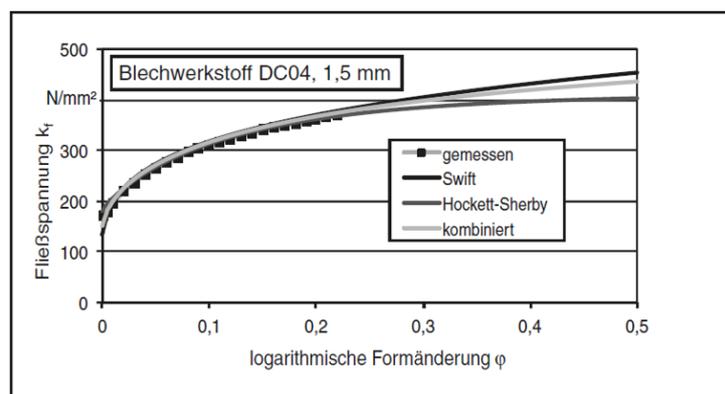
Wobei $k_{f,s}$ wie erwähnt die Sättigungsfließspannung darstellt, $k_{f,0}$ die Anfangsfließspannung (ungefähr gleich der Zugfestigkeit des Werkstoffes). Der freie Parameter p nimmt in den Versuchen von Hockett und Sherby den einheitlichen Wert von $p=0,58$ an. Der Kennwert m nimmt werkstoffabhängig Werte von circa 0,5 bis 4,4. [3]

2.1.3.3 Fließkurve nach kombiniertem Ansatz von Swift und Hockett-Sherby

Der Ansatz von Swift beschreibt die Fließkurve wie erwähnt bei hohen Formänderungen in jener Hinsicht falsch, als dass die Kurve einen zu steilen Verlauf hat. Deswegen kann angenommen werden, dass die reale Kurve unterhalb der von Swift liegt. Der Ansatz von Hockett-Sherby führt die Sättigungsspannung ein, die den Kurvenverlauf flacher werden lässt und in einen horizontalen Verlauf zwingt. Somit kann angenommen werden, dass die reale Kurve oberhalb der Hockett-Sherby Kurve und unterhalb der Swift Kurve liegt. Der kombinierte Ansatz der beiden Ansätze liefert eine gute Annäherung an den realen Kurvenverlauf und lautet wie folgt:

$$k_{f,komb} = \alpha * k_{f,Swift} + (1 - \alpha) * k_{f,Hockett-Sherby}$$

Wobei α einen Gewichtungsfaktor darstellt, der für verschiedene Werkstoffgruppen bei zusätzlichen Versuchen (Bulgeversuch) ermittelt werden muss. **Abbildung 2.12** unterhalb zeigt ein Beispiel für diesen kombinierten Ansatz anhand eines 1,5mm dicken DC04 Blechwerkstoffes, im Vergleich zur Swift und Hockett-Sherby Kurve. [3]



$$k_f(\varphi) = \alpha \cdot k_{f,Swift} + (1 - \alpha) k_{f,Hockett-Sherby}$$

$\alpha_{DC04} = 0,65$
 $1 - \alpha_{DC04} = 0,35$

Abbildung 2.12: Vergleich der mathematischen Fließkurvenbeschreibungen [3]

2.1.3.4 Auswirkung des Fließkurvenmodells auf die Simulationsergebnisse

Anhand eines Kotflügels haben Fehler, Fels und Hub den Unterschied der Ergebnisse einer Umformsimulation, auf Grund der verschiedenen mathematischen Ansätze der Fließkurvenmodellierung, untersucht. Zuerst wurde mit dem Ansatz von Swift, auf Basis der Fließkurve aus einem Zugversuch, ein Simulationsmodell erstellt, welches sehr gute Ergebnisse, sprich keine Reißen oder Faltenbildung, liefert. Danach wurde dasselbe Modell mit dem Ansatz von Hockett-Sherby und dem kombinierten Ansatz (Swift und Hockett-Sherby) durchsimuliert. Das Ergebnis ist in **Abbildung 2.13** unterhalb zu sehen. Bei Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass die Wahl der verwendeten Fließkurve einen erheblichen Einfluss hat. Während beim Ansatz von Swift ein sehr gutes Ergebnis erzielt wird, kommt es beim Ansatz von Hockett-Sherby zu Reißen an der oberen rechten Kante des Kotflügels, da die Grenzformänderungskurve deutlich überschritten wird. Die Simulation, die den kombinierten Ansatz verwendet, liefert, wie zu erwarten, ein Ergebnis zwischen den beiden anderen Ansätzen. Jedoch sind einige Bereiche schon näher an der Grenzformänderungskurve als beim Ansatz von Swift.

Der Grund für die variierenden Ergebnisse ist das unterschiedliche Verfestigungsverhalten des Materials. Beim Ansatz von Swift verfestigt der Werkstoff mehr, da die Fließkurve in Bereichen hoher Formänderung steiler ansteigt. Dadurch werden Bereiche, die bereits einer hohen Formänderung unterliegen, nicht mehr umgeformt, sondern das Material in den Umliegenden Bereichen wird für das weitere Tiefziehen herangezogen. Das ist auch zu sehen im Bereich der Reißen. Beim Ansatz von Hockett-Sherby wird auf Grund der nicht sehr starken Verfestigung im Bereich der Kante, diese weiter umgeformt, anstatt dass das Material aus dem Flansch nachfließt und somit die Reißen verhindert. Beim Ansatz von Swift ist in **Abbildung 2.13** auch zu erkennen, dass der Flansch im oberen rechten Bereich deutlich schmaler ausfällt, da hier Material nachgezogen wurde, bevor andere Bereiche stark ausdünnen.

Die Höhe des Einflusses der verwendeten Fließkurve auf das Simulationsergebnis hängt auch immer von der Bauteilgeometrie, dem Werkstoff, der Ziehanlage und den Prozessgrößen ab. [3]

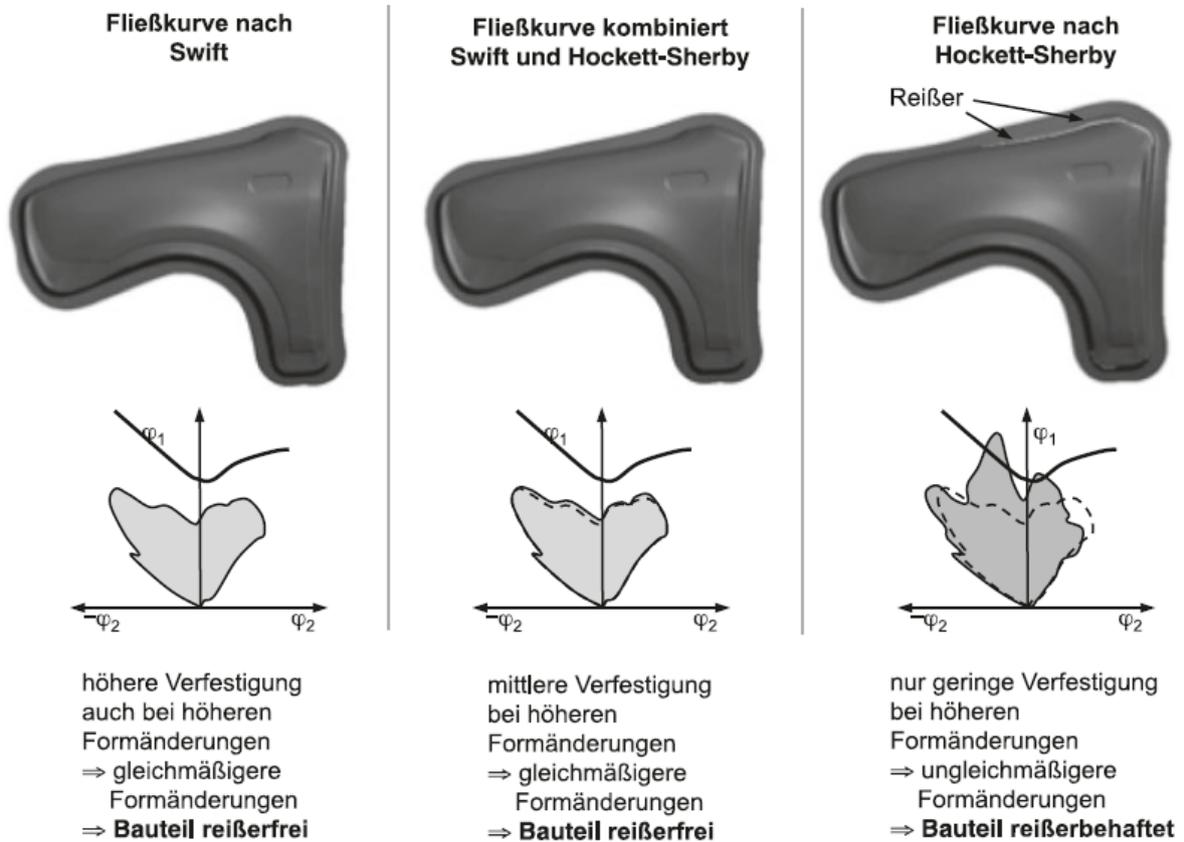
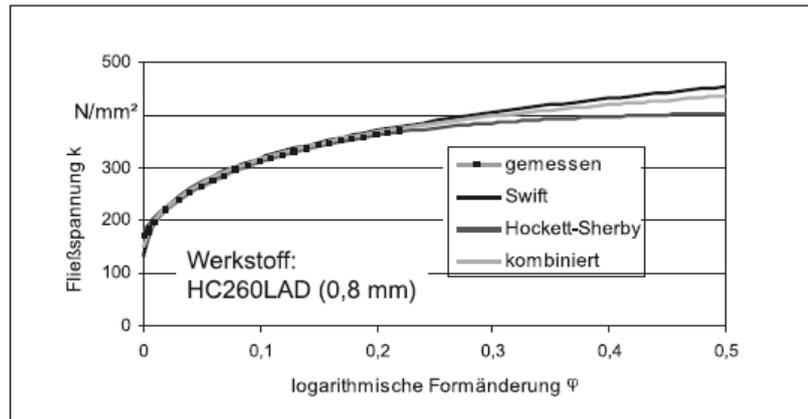


Abbildung 2.13: Simulationsergebnisse basierend auf verschiedenen Fließkurvenmodellen [3]

2.2 Grundlagen des Tiefziehens

Tiefziehen ist eines der Verfahren, das am häufigsten zur Blechumformung herangezogen wird. Ob in der Großserie in Automobil- oder Verpackungsindustrie oder in Kleinserie in der Flugzeugindustrie, tiefgezogene Bauteile finden sich in fast allen Bereichen wieder. Als Beispiel kann die Karosserie eines Automobils herangezogen werden. Diese wird zu einem großen Teil aus tiefgezogenen Blechen zusammengesetzt. Andere Bereiche, in denen tiefgezogene Teile zur Anwendung kommen sind die vielen weiteren Gebiete der Technik, in der Medizin oder im Haushalt (z.B.: Spülbecken).

Die Definition des Tiefziehens ist nach DIN 8584 das Zugdruckumformen eines Blechzuschnittes zu einem einseitig offenen Hohlkörper oder Zugdruckumformen eines Hohlkörpers zu einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang ohne beabsichtigte Änderung der Blechdicke. [3]

2.2.1 Prozessablauf beim Tiefziehen von rotationssymmetrischen Bauteilen

Der Prozessablauf in **Abbildung 2.14** zeigt, wie sich ein runder Blechzuschnitt mit einem Durchmesser D zu einem Hohlgefäß formt.

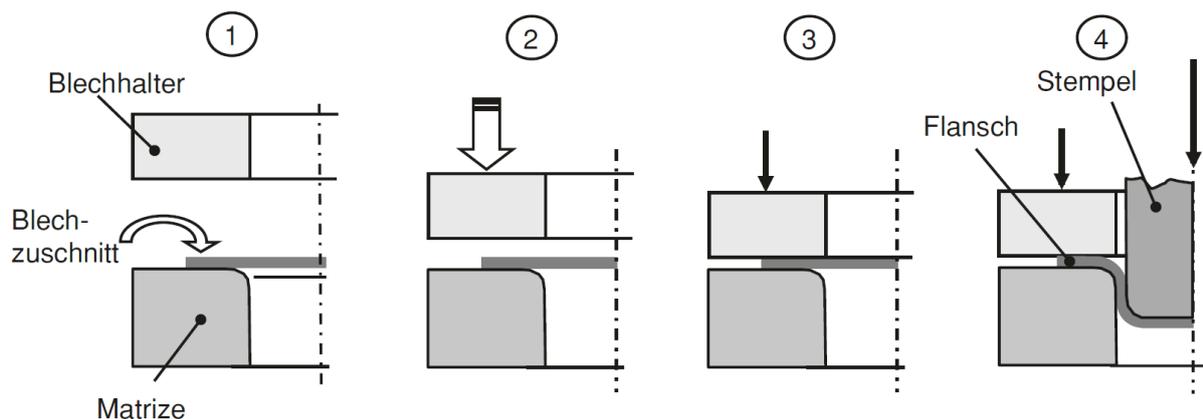


Abbildung 2.14: Tiefziehprozess eines runden Blechzuschnittes [3]

Die folgenden Punkte 1 bis 4 beziehen sich auf die obige **Abbildung 2.14**.

- 1 Als erstes wird der Blechzuschnitt (Platine) in das Werkzeug eingelegt.
- 2 Als nächstes fährt der Blechhalter, auch Niederhalter genannt, und Matrize zusammen und klemmt die dazwischen liegende Platine ein.
- 3 Dadurch wird auf die Platine eine Normalkraft (Blechhalter- oder Niederhalterkraft genannt) ausgeübt, die zur Vermeidung von Falten im Flansch dient.
- 4 Tiefziehen der Platine durch die Bewegung des Stempels relativ zu Blechhalter und Matrize nach unten.

Ohne den Niederhalter würden die Tangentialspannungen im Flansch zu einer Faltenbildung führen, welche sich bei weiterer Umformung überlappen. Diese Überlappung kann dazu führen, dass die Platine nicht mehr durch den Ziehspalt zwischen Stempel und Matrize passt. Dadurch können Schädigungen, wie zum Beispiel ein Abreißen des Flansches, entstehen. Bei Tiefziehteilen mit großen Ziehtiefen kann es unter Umständen nötig sein, eine zweite oder mehrere Ziehstufen in Betracht zu ziehen. Da in diesem Fall das Teil kein ebener Blechzuschnitt mehr ist, sondern bereits ein Hohlkörper, ist es nötig den Blechhalter an diese Gegebenheit anzupassen (siehe **Abbildung 2.15** unterhalb). [3]

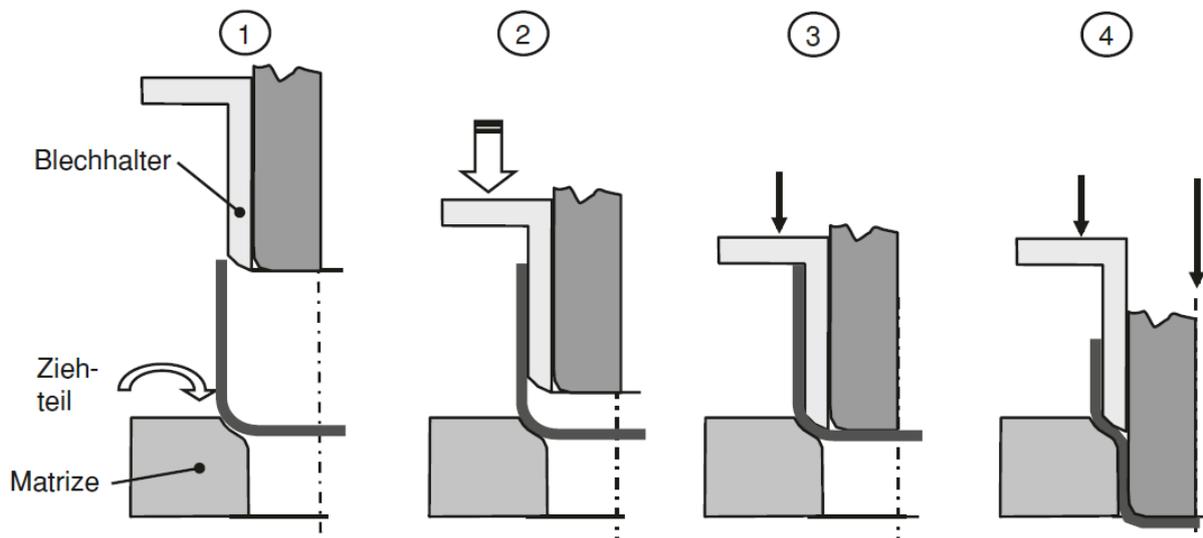


Abbildung 2.15: Tiefziehprozess in zwei Stufen [3]

2.2.2 Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen

2.2.2.1 Spannungen beim Tiefziehen

Die Spannungsverhältnisse beim Tiefziehen werden anhand eines tiefgezogenen Napfes, wie eines solchen aus dem vorherigen Kapitel, erklärt. Während der Umformung wird das Blech an manchen Stellen gestaucht und an anderen Stellen gedehnt. Während der Boden des Napfes nur wenig umgeformt wird, treten in der späteren Wand des Napfes Radial- und Tangentialspannungen auf. Diese entstehen dadurch, dass im ebenen Blechzuschnitt mehr Material vorhanden ist, als für die Wand des Napfes benötigt wird. Wie in **Abbildung 2.16** zu sehen, stellen die Dreiecke b das Material dar, welches während der Umformung verdrängt werden muss. Die Segmente a und b' (Flächengleich mit b) ergeben aufaddiert die endgültige Höhe h des Napfes. Dem ist eine unveränderte Blechdicke vorausgesetzt. [5]

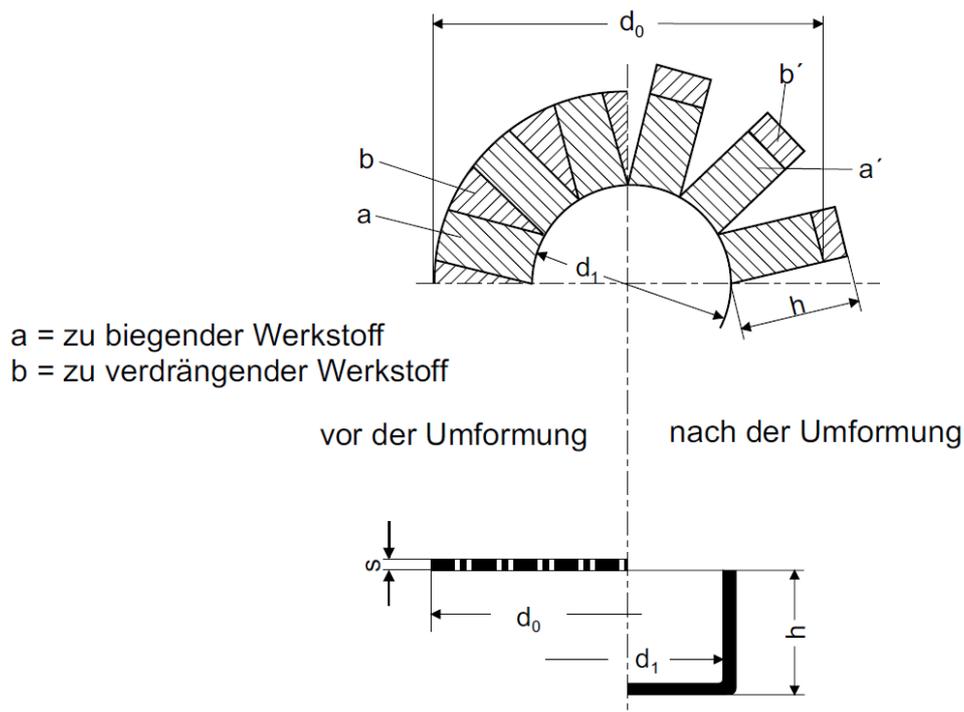


Abbildung 2.16: zu biegendes und zu verdrängendes Material [5]

Die Abmessungen des Blechzuschnittes sind abhängig vom Endprodukt nach dem Tiefziehen. Bei kreisrunden Teilen lässt sich der Rohteildurchmesser sehr leicht berechnen, wenn man von Volumenkonstanz und einer unveränderten Blechdicke

während der Umformung ausgeht. Es ergibt sich für den Blechzuschnitt, aus der Oberfläche des Fertigteiltes A_z , ein Durchmesser d_0 von:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} * A_z}$$

Die Berechnung von komplexeren Teilen, wie unregelmäßige Geometrien oder Karosserieteilen, gestaltet sich sehr viel schwieriger. Hier muss eine Abwicklung der Fertigteilgeometrie erfolgen, um auf den Zuschnitt für das Blechrohteil zu gelangen. [5]

Die Kraft für die Umformung wirkt nur mittelbar auf die Bereiche, die die Größten Verformungen erfahren, ein. Diese Bereiche nennt man Umformzonen. Im Falle des Napfes befinden sich diese hauptsächlich im Flansch und in der Ziehringrundung. Die Ziehringrundung ist jener Bereich der Matrize, wo das Blech vom Flansch in die Wand des Napfes übergeht. Die Kraft wird jedoch vom Stempel in den Napfboden eingeleitet und über die Wand weiter an den Flansch gegeben. Die größten Zugspannungen treten in der Wand und in der Stempelrundung auf, dadurch kommt es in diesen Bereichen zur größten Wandschwächung, was im schlimmsten Fall zu Reißern führen kann. [5]

In **Abbildung 2.17** wird ein Volumenelement vom Flansch bis in die Napfwand betrachtet. Im Flansch wirken auf das Element tangentielle Druckspannungen (σ_t), radiale Zugspannungen (σ_r) und normale Druckspannungen (σ_z). Die tangentialen Spannungen werden durch das überschüssige Material, welches, wie vorhin erwähnt, gestaucht werden muss, erzeugt. Die Radialspannungen werden über den Stempel indirekt in den Flansch übertragen. Die normalen Druckspannungen werden vom Niederhalter erzeugt, welcher der Faltenbildung im Flansch vorbeugt. Die Niederhalterkraft erzeugt jedoch zusätzliche Reibung zwischen Niederhalter, Blech und Matrize, dies muss auch in der Stempelkraft berücksichtigt werden. Somit wird das Volumenelement im Flansch radial gezogen und tangential gestaucht. [5]

Im Übergang vom Flansch zur Wand unterliegt das Blech einer zweifachen Biegung. Die erste Biegung entsteht am Einlauf in den Ziehringradius, die zweite Biegung passiert beim Rückbiegen in die zylindrische Wand des Napfes. [5]

In der Napfwand liegen vorwiegend axiale Zugspannungen vor, welche ihren Ursprung in den Radialspannungen im Flansch, der Biegung im Radius und den Reibeinflüssen haben. Tangentialspannungen in der Wand sind sehr klein und somit zu vernachlässigen. [5]

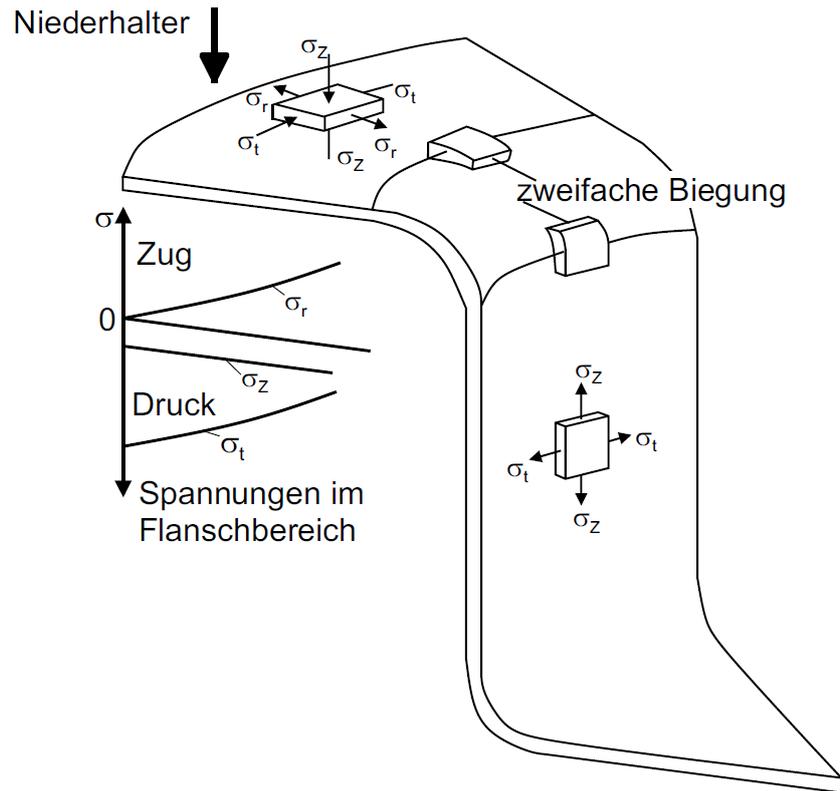


Abbildung 2.17: Spannungsverhältnisse im Napf beim Tiefziehen [5]

2.2.2.2 Umformgrade

Je nach Spannungszustand in den einzelnen Bereichen, ändert sich die Form des Bleches in der Länge, der Breite oder der Dicke. Ändert sich die Länge des Elements in **Abbildung 2.18** so, dass das neue Element länger ist ($l_1 > l_0$), dann nimmt die Breite und die Dicke des Elements, auf Grund der Volumenkonstanz, ab. Diese Änderung in den drei Richtungen wird durch den Umformgrad φ beschrieben. Die Summe aller Umformgrade ergibt immer Null. Um die Umformgrade bestimmen zu können, wird, wie bereits zuvor erwähnt, auf dem ebenen Rohteil ein Ringmuster aufgedruckt. Die Ringe verzerren sich während der Umformung zu Ellipsen. Danach wird die Änderung der Länge und Breite vom Kreis zur Ellipse gemessen und in die unteren Formeln eingesetzt. So lassen sich die Umformgrade in axialer (φ_1) und tangentialer (φ_2) Richtung bestimmen. Der Umformgrad in Blechdickenrichtung (φ_3) lässt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung, oder durch messen der Blechdicke mittels Mikrometerschraube, ermitteln. In dem in der **Abbildung 2.18** dargestellten Fall ist die Formänderung φ_1 positiv und φ_2 und φ_3 negativ. [5]

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{l_0}, \text{ in Längsrichtung}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b_1}{b_0}, \text{ in Breitenrichtung}$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0}, \text{ in Dickenrichtung}$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0, \text{ Kontinuitätsgleichung}$$

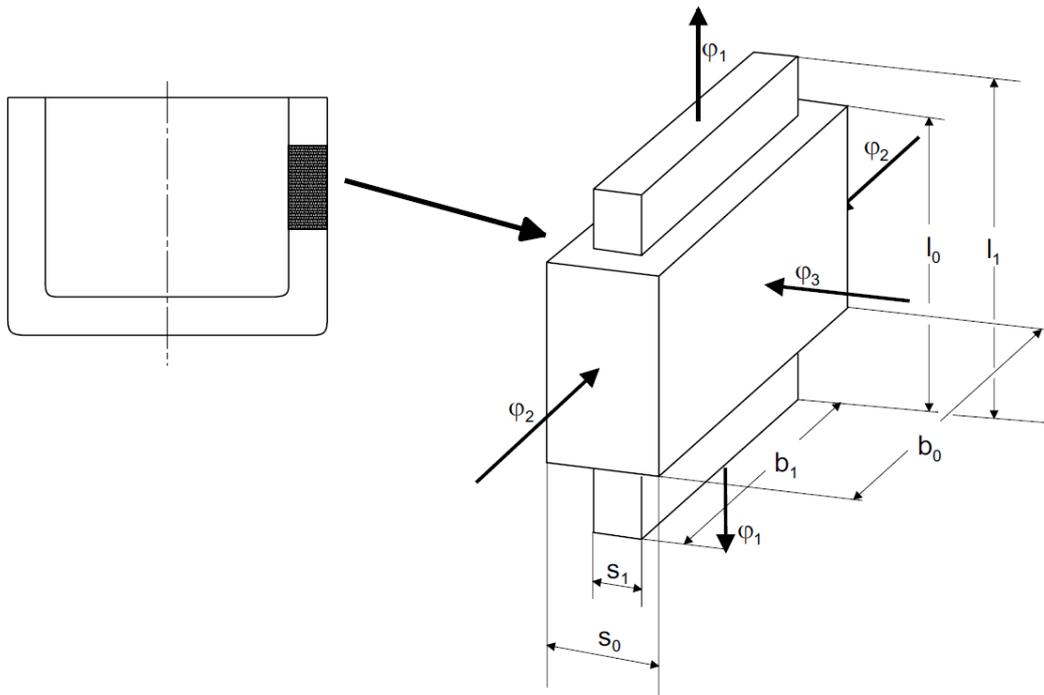


Abbildung 2.18: Umformgrade an einem Volumenelement [5]

Die Umformgrade sind, auf Grund der unterschiedlichen Spannungszustände während des Tiefziehvorganges, sehr unterschiedlich im fertigen Bauteil verteilt. Beim Aufsetzen des Stempels auf den Blechzuschnitt tritt ein rein zweiachsiger Spannungszustand auf, der sich mit zunehmenden Stempelweg mit den Biegespannungen um Stempel- und Ziehkantenrundung überlagert. Die anfängliche Blechdicke s_0 bleibt somit nur in der Bodenmitte erhalten. Zum Stempelradius hin nimmt sie auf Grund der dort herrschenden großen Zugspannung und der damit verbundenen Dehnung ab. In der Napfwand nimmt die Blechdicke wegen der im Flansch herrschenden Tangentialspannungen wieder zu und ist im oberen Wandbereich größer als die Ausgangsblechdicke s_0 . Deshalb muss der Ziehspalt zwischen Stempel und Matrize auch größer als die Ausgangsblechdicke sein. Die **Abbildung 2.19** zeigt den Verlauf der Umformgrade über die Abwicklung eines gezogenen Napfes. Negative Umformgrade bedeuten eine Verringerung der Ausgangsgröße, positive Umformgrade eine Vergrößerung der Ausgangsgröße. [5]

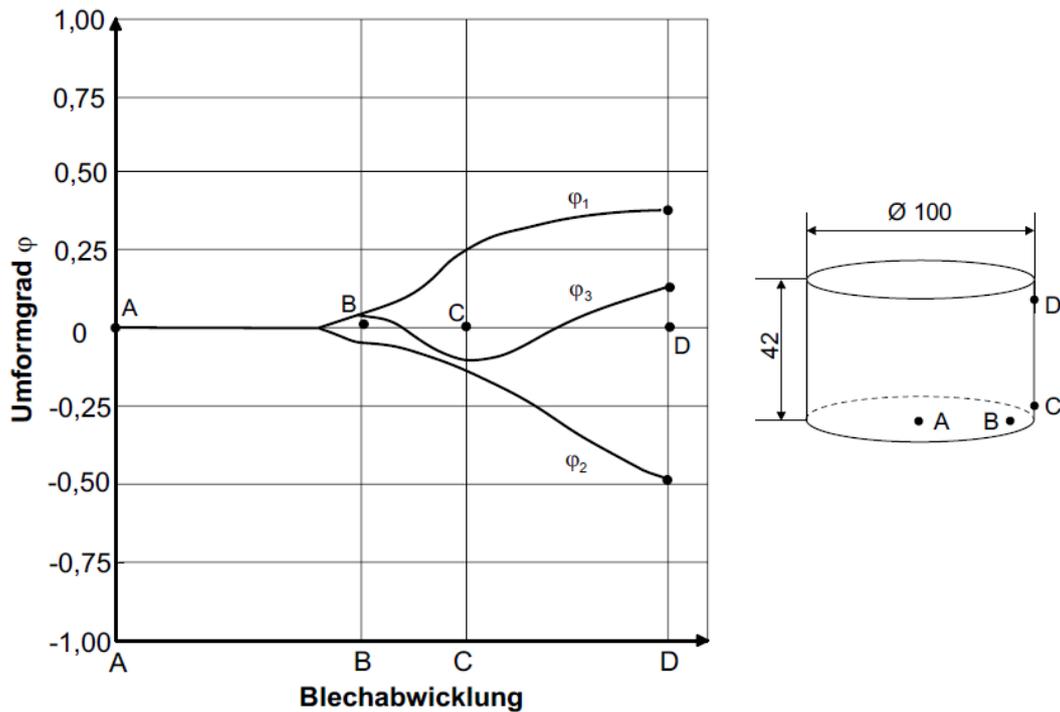


Abbildung 2.19: Verteilung des Umformgrades über den Napf [5]

2.2.2.3 Zulässiges Ziehverhältnis, Grenzziehverhältnis

Mit Hilfe des zulässigen Ziehverhältnisses (β_{zul}) oder Grenzziehverhältnis kann man den maximalen Rondendurchmesser, zum Beispiel beim Napfziehen, ermitteln. Ein größerer Durchmesser führt unweigerlich zu Bodenreißen, da mit größer werdender Ziehtiefe die Stempelkraft exponentiell zunimmt und an der Stempelrundung wie vorhin erwähnt die größten Zugspannungen herrschen sowie das Blech hier am dünnsten ist. [1]

Zur Bestimmung des Grenzziehverhältnisses werden drei Ronden zugeschnitten, wobei zwei einen kleineren Durchmesser als den erwarteten maximalen Durchmesser haben. Die dritte Ronde soll einen größeren als den erwarteten maximalen Durchmesser haben. Alle Ronden werden mit demselben Stempeldurchmesser tiefgezogen, und die Ziehkraftmaxima (F_1 , F_2 und F_3) werden ermittelt. Jetzt werden die Kräfte über den Rondendurchmesser aufgetragen, F_1 und F_2 werden mit einer Geraden verbunden und durch den Punkt von F_3 wird eine waagrechte Linie gelegt. Der Schnittpunkt dieser Geraden ergibt den maximalen Rondendurchmesser. Jetzt kann das Grenzziehverhältnis folgendermaßen bestimmt werden:

$$\beta_{zul,1} = \frac{D_{grenz}}{d_1}$$

Wobei d_1 der Stempeldurchmesser und D_{grenz} der maximale Rondendurchmesser ist. [1]

In **Abbildung 2.20** wird der vorhin beschriebene Vorgang zur Ermittlung des Grenzziehverhältnisses für den Erstzug und anhand von drei verschiedenen Blechdicken gezeigt. Das Blechmaterial ist DC04, die Blechdicken sind $1,0\text{mm}$, $1,6\text{mm}$ und $2,0\text{mm}$. Der Stempeldurchmesser beträgt 100mm .

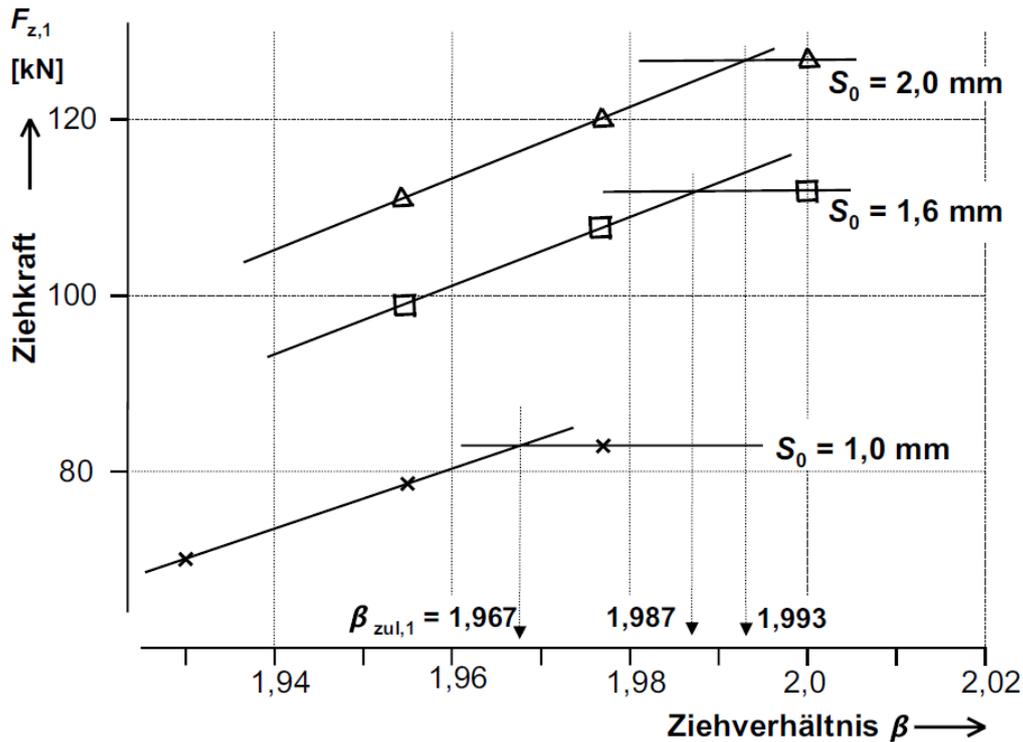


Abbildung 2.20: Ermittlung des Grenzziehverhältnisses [1]

Das zulässige Ziehverhältnis hängt weiters von der Zugfestigkeit R_m des Werkstoffes, von der bezogenen Blechdicke $\beta_s = d_1/s_0$ (Stempeldurchmesser zu Blechdicke) und vom r_m -Wert ab. Der r_m -Wert ist ein Werkstoffkennwert für die senkrechte Anisotropie. In **Abbildung 2.21** ist die Abhängigkeit des Grenzziehverhältnisses vom r_m -Wert zu sehen. Auch die Ziehhöhen sind durch die Bauteilskizzen im Bild dargestellt. Bei nicht rotationssymmetrischen Bauteilen werden runde Ersatzflächen gleichen Flächeninhaltes für den Stempel und den Blechzuschnitt berechnet, aus dessen Durchmesser dann wiederum das Grenzziehverhältnis berechnet wird. In der unteren **Tabelle 2.2** sind einige Werkstoffe und deren Grenzziehverhältnisse aufgelistet. Die β -Werte mit dem Index 1 sind jene für den ersten Zug, für den zweiten Zug wird der Index 2 verwendet. Der Wert $\beta_{zul,2}$ wird ähnlich wie $\beta_{zul,1}$ bestimmt und kann durch ein Zwischenglühen noch deutlich erhöht werden. [1]

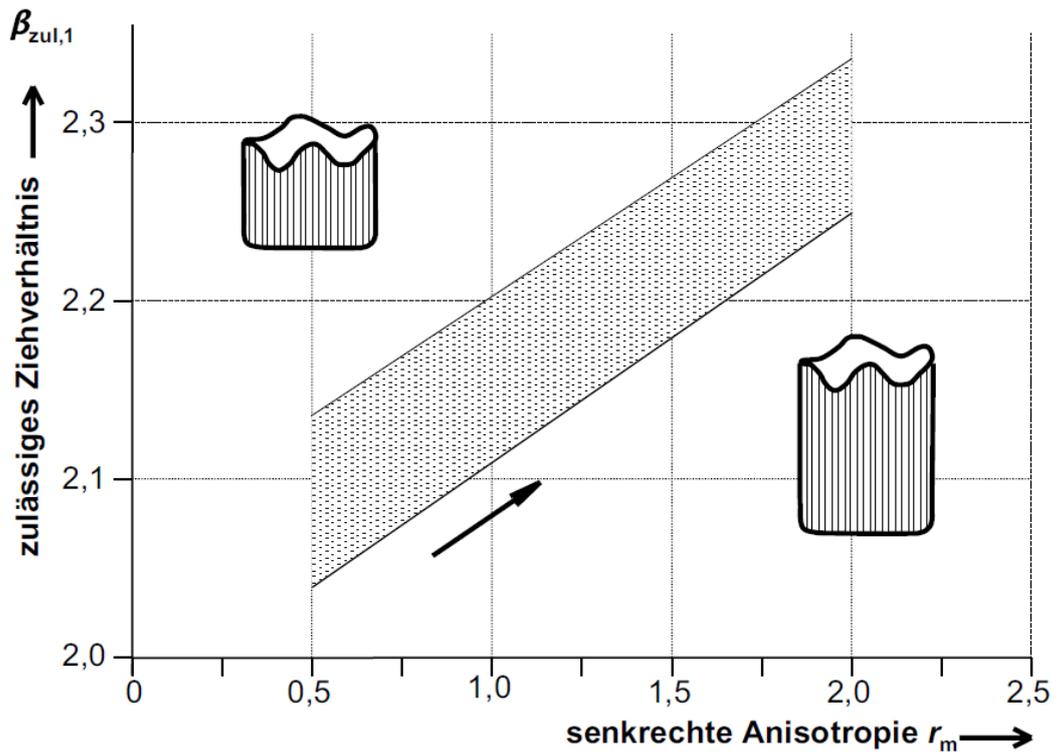


Abbildung 2.21: Zulässiges Ziehverhältnis in Abhängigkeit von der senkrechten Anisotropie [1]

Tabelle 2.2: Grenzziehverhältnisse wichtiger Werkstoffe [1]

Werkstoffe	Zugfestigkeit R_m in N/mm^2	Bruchdehnung A in %	1. Zug $\beta_{zul,1}$	2. Zug $\beta_{zul,2}$ ohne Zwischen-glühen	2. Zug $\beta_{zul,2}$ mit Zwischen-glühen
Tiefziehbleche					
DC 01	270...410	28	1,8	1,25	1,6
DC 03	270...370	34	1,9	1,25	1,65
DC 04	270...350	38	2,0	1,33	1,7
DC 05	270...330	40	2,1	1,35	1,75
Bleche aus Feinkornstahl	370	24			
mikroleg. Feinkornstahlblech	750	17	1,6...2,0		
hochfester Warmbandstahl	800...1100	6	1,5...1,9		

rost- und säurebeständige Stahlbleche					
ferritisch 12% bis 14% Chrom	400...630	20	1,9	1,2	
austenitisch 18% Cr, 8% Ni	500...700	40	2,0	1,2	
austenitisch 18% Cr, 13% Ni	500...700	40	2,1	1,2	
hitzebeständige Stahlbleche					
18% Chrom, 1% Aluminium	500...650	1,7	1,2	1,6	
25% Chrom, 20% Nickel	600...750	2,0	1,2	1,8	
NE-Schwermetalle					
Nimonic		1,7	1,2	1,6	
Nickel weich		2,2	1,7		
Neusilber		1,9	1,3		
Cu Zn 28 weich		2,2	1,4	2,0	
Cu Zn 37 weich		2,1	1,4	2,0	
Cu Zn 37 halbhart		1,9	1,2	1,7	
Kupfer		2,1	1,3	1,9	
Zinkblech weich		1,55	1,25		
NE-Leichtmetalle					
Al Mg 1 weich	200...300	25	1,85	1,3	1,75
Al Mg 2 halbhart	250...350	20	2,0	1,5	1,9

2.2.3 Fehler und Versagensmöglichkeiten beim Tiefziehen

Beim Tiefziehen werden drei wesentliche Versagensvarianten beziehungsweise Ziehfehler unterschieden. In diesem Kapitel werden diese anhand von rotationssymmetrischen Tiefziehteilen erklärt (Napfzugversuch). Die drei Fehler sind:

- Reier in den Bereichen der größten Ausdünnung des Bleches in Folge von zu großen Zugkräften (Bodenreißer)
- Faltenbildung im Ziehteilflansch auf Grund von zu niedriger Niederhalterkraft (Falten 1. Ordnung)
- Faltenbildung in der Wand, auch Zarge genannt, des Tiefziehteiles wegen zu hoher tangentialer Druckspannungen (Falten 2. Ordnung)

Reier (Bodenreißer): Wie bereits zuvor schon erwähnt, wird die Kraft beim Tiefziehen indirekt vom Stempel über die Wand auf den Flansch übertragen. Dadurch entstehen an der Stempelrundung sehr hohe Zugkräfte, welche zur Ausdünnung und schlussendlich zu Reißern im Übergang von Napfboden zu Napfwand führen, wenn die Zugfestigkeit des Werkstoffes überschritten wird.

In **Abbildung 2.22** ist die Ausdünnung beziehungsweise Aufdickung über die Napfwand während des Tiefziehprozesses dargestellt. Oberhalb des Punktes ohne Dickenänderung überwiegt die Aufdickung des Bleches, unterhalb dieses Punktes ist die Blechdicke geringer als jene zu Beginn des Prozesses. [3]

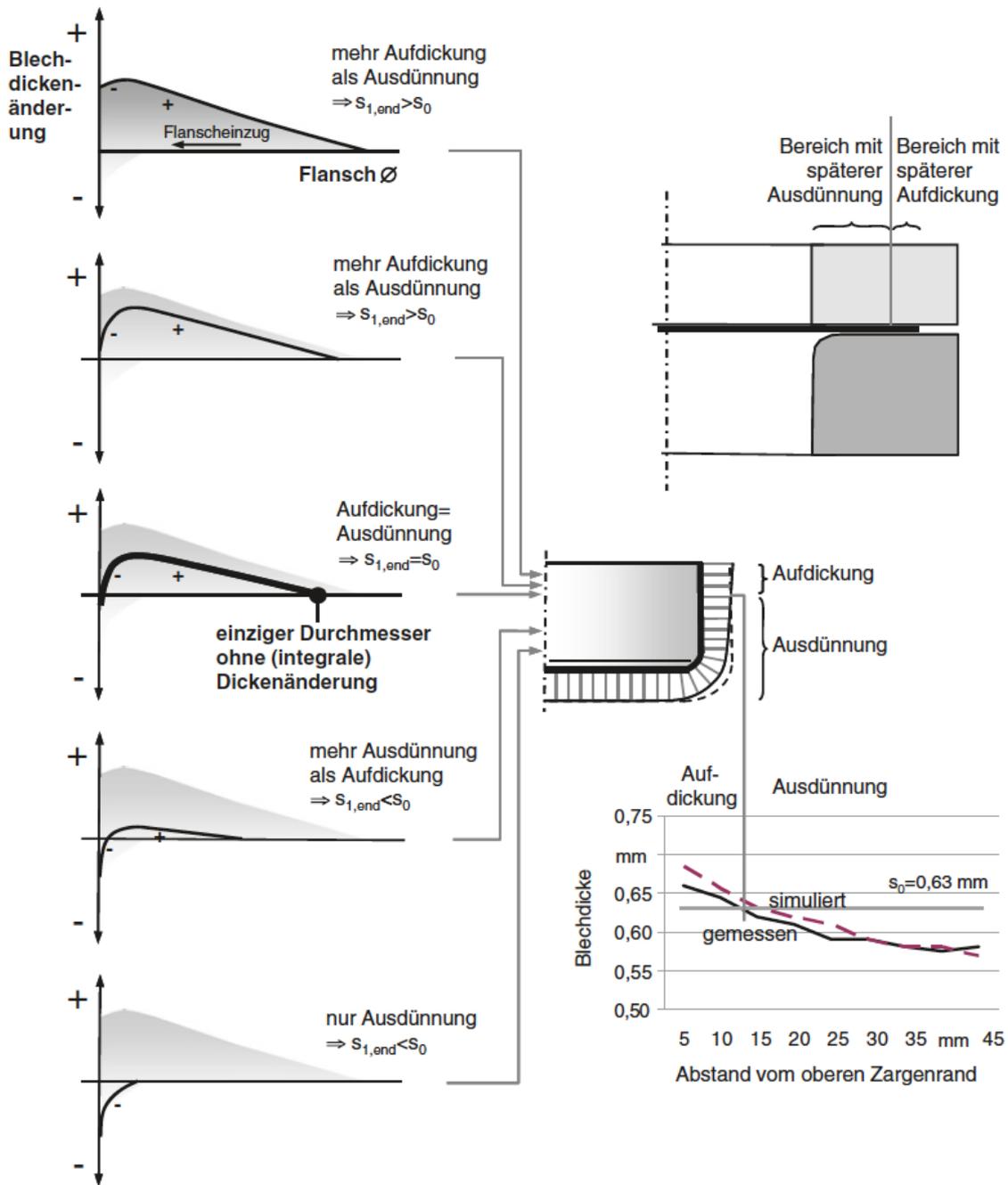


Abbildung 2.22: Aufdickung bzw. Ausdünnung über die Napfwand [3]

In **Abbildung 2.23** sind typische Bodenreißer an Tiefziehteilen dargestellt.

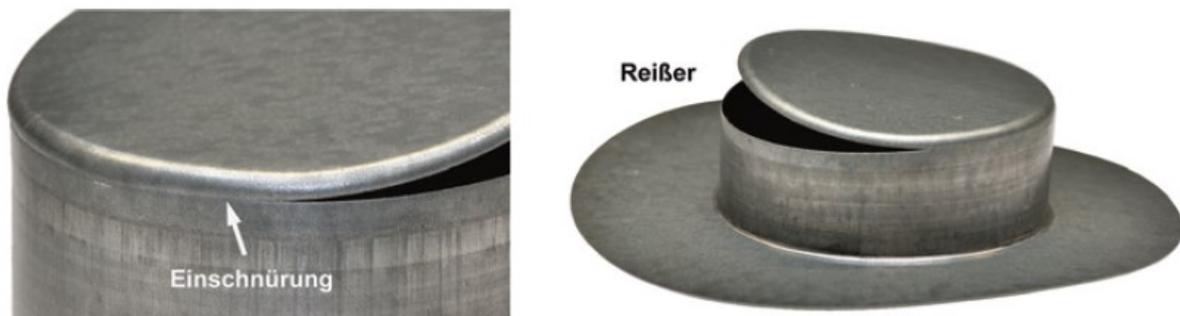


Abbildung 2.23: Bodenreißer an Tiefziehteilen [3]

Falten 1. Ordnung: Falten 1. Ordnung sind jene im Flansch des Ziehteiles, die entstehen, wenn die tangentielle Druckspannung die Knickgrenze des Werkstoffes überschreitet. Das nicht Vorhandensein eines Niederhalters oder eine zu geringe Kraft desjenigen, kann ebenfalls zu Falten 1. Ordnung führen. Auch die daraus folgende mögliche Überlappung der Falten zählt zu dieser Fehlerart. In **Abbildung 2.24** ist die Faltenbildung 1. Ordnung dargestellt. [3]

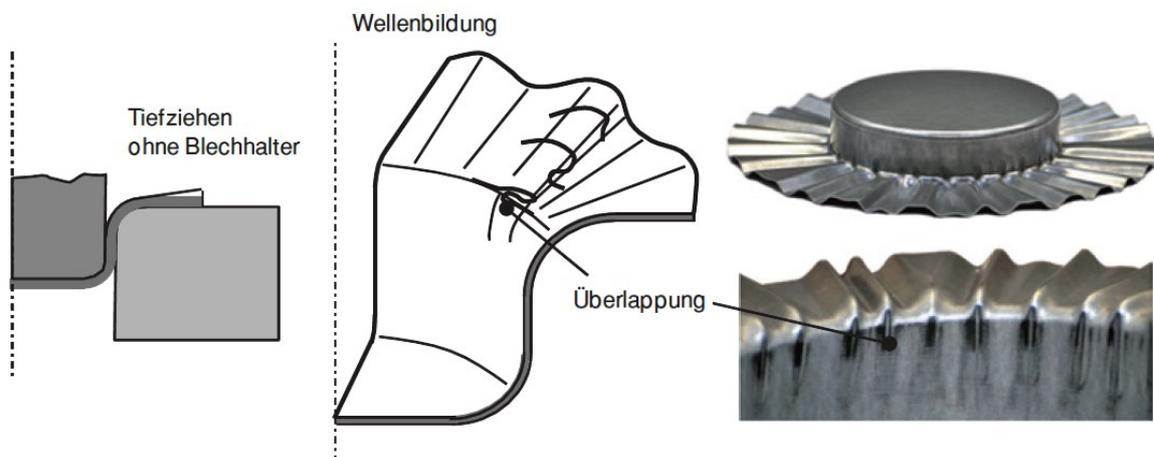


Abbildung 2.24: Faltenbildung 1. Ordnung [3]

Um die Faltenbildung durch einen Niederhalter zu verhindern, muss dieser einen Druck auf den Blechzuschnitt ausüben. Diese nötigen Druckspannungen sind jedoch sehr gering im Vergleich zu den im Flansch herrschenden radialen Zug- und tangentialen Druckspannungen, welche den Fließvorgang bewirken. In **Abbildung 2.25** kann abgelesen werden, welcher Niederhaltedruck in Abhängigkeit von der

bezogenen Blechdicke s_0/d_0 nötig ist, damit keine Falten im Flansch entstehen. Auch die Zugfestigkeit des Werkstoffes spielt eine Rolle in der Wahl des Niederhaltdruckes, wie in **Abbildung 2.25** zu sehen ist. Für Werkstoffe mit höherer Zugfestigkeit sind größere Niederhaltdrucke erforderlich, als für solche mit geringerer Zugfestigkeit. Die Werkstoffsteifigkeit, welche durch den E -Modul ausgedrückt wird, wird im unteren Bild nicht berücksichtigt. Es kann jedoch allgemein gesagt werden, dass Werkstoffe mit geringeren E -Modul, wie Aluminium gegenüber Stahl, größere Niederhaltdrucke benötigen, um nicht auszuknicken. Weiters kann in der unteren **Abbildung 2.25** abgelesen werden, dass dünnere Bleche bei gleichem Platinendurchmesser einen größeren Niederhaltdruck benötigen, um nicht auszuknicken. Bleche mit einem Durchmesser zu Blechdickenverhältnis d_0/s_0 kleiner als 25 bis 40 haben eine so hohe Knickstabilität, dass sogar auf einen Niederhalter verzichtet werden kann. [3]

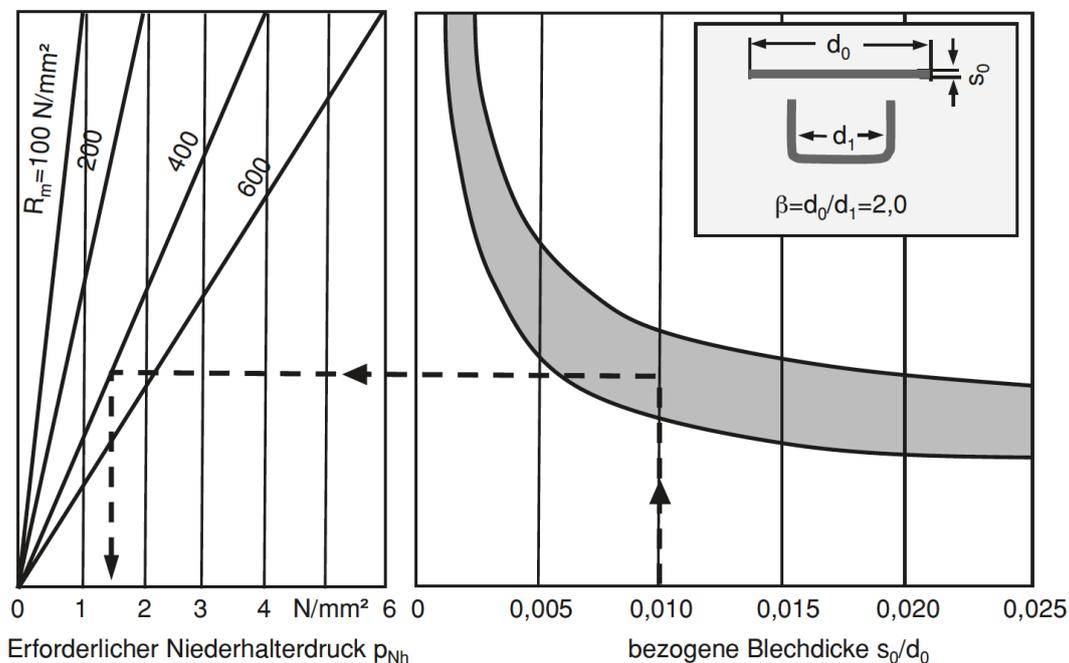


Abbildung 2.25: Diagramm zum Ablesen der benötigten Niederhaltdrucke [3]

Falten 2. Ordnung: Falten 2. Ordnung sind jene, die in der Zarge auf Grund von zu hohen tangentialen Druckspannungen auftreten. In **Abbildung 2.26** (unteres Foto) ist dieser Fehler, welcher sich als radial verlaufende Wellen zeigt, abgebildet. Ob und wie stark sich diese Wellen ausbilden, hängt von den folgenden Parametern ab:

- Ausmaß der Konizität
- Blechdicke
- Werkstückwerkstoff
- Spannungszustand (auch vom Niederhalterkraft abhängig)

Die Gefahr der Faltenbildung in der Zarge nimmt auch zu, je größer der frei überspannte Bereich und je kleiner der Zargenwinkel ψ ist, da unter diesen Bedingungen ein großer Materialüberschuss in tangentialer Richtung vorhanden ist. [3]

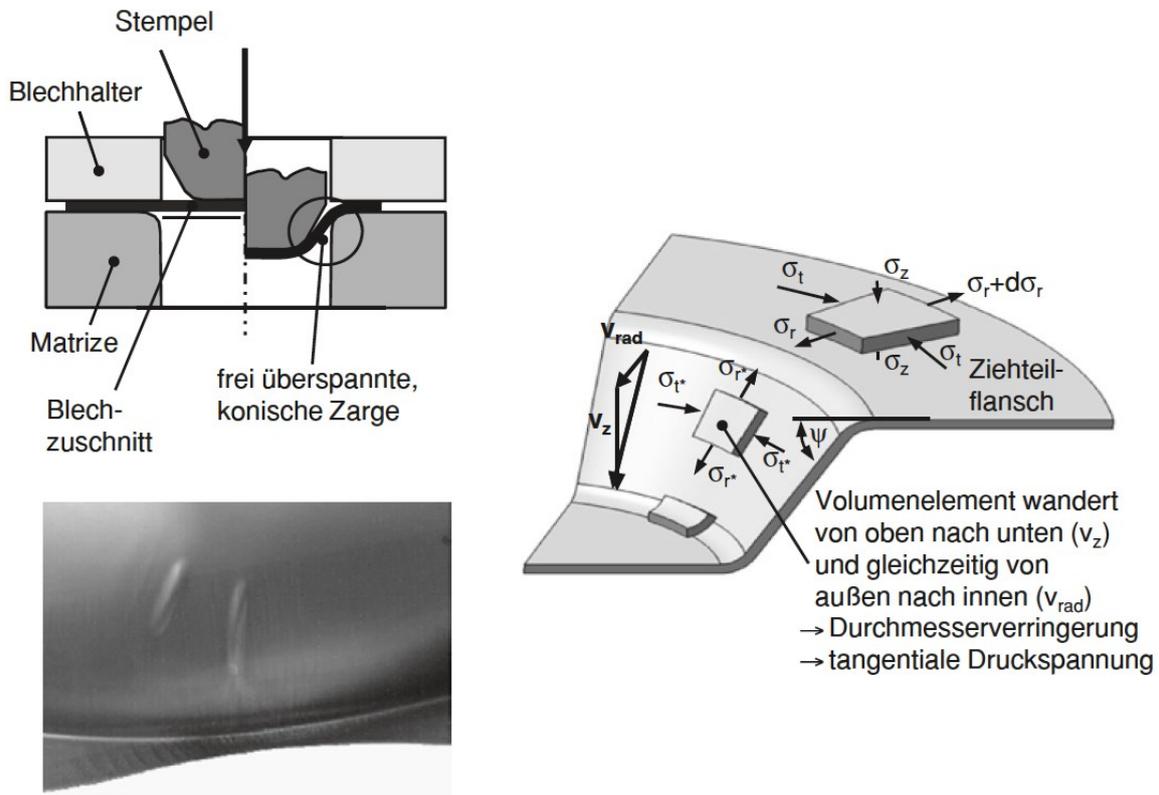


Abbildung 2.26: Falten 2. Ordnung [3]

Diese Falten oder Wellen 2. Ordnung spielen bei der Herstellung von Karosserieteilen eine wesentliche Rolle. Außenhautteile haben häufig große schräge Zargenbereiche, die zur Faltenbildung 2. Ordnung neigen. Das kann jedoch nicht akzeptiert werden, da sich diese dann später im Sichtbereich befinden. Ein Hilfsmittel gegen die Falten kann eine Erhöhung der Niederhalte kraft sein, da dadurch die radialen Spannungen in der Zarge erhöht werden und die dadurch entstehende Querkontraktion Falten entgegenwirken. Das ist jedoch nur möglich, wenn der Prozess eine hohe Absicherung gegen Rußbildung aufweist. [3]

2.2.4 Kräfte beim Tiefziehen

Um für einen Tiefziehprozess die geeignete Maschine oder Presse auswählen zu können und die Werkzeuge richtig auslegen zu können ist es unumgänglich, die während des Tiefziehens wirkenden Kräfte berechnen zu können. Dafür stehen dem Anwender empirische Formeln zur Verfügung, um diese Kräfte abschätzen zu können. Wie in den vorherigen Kapiteln werden die Kräfte anhand eines rotationssymmetrischen Bauteiles erklärt. [5]

2.2.4.1 Ziehkraft

Die maximale Gesamtziehkraft F_{Zmax} setzt sich zusammen aus der ideellen Ziehkraft, welche für die Umformung des Werkstoffes benötigt wird, aus der Kraft, die für das Biegen und Rückbiegen im Bereich des Ziehradius aufgewandt werden muss, und aus den Reibkräften zwischen Niederhalter und Blech, zwischen Blech und Matrize und zwischen Blech und Ziehradius. Die Reibungsanteile können durch entsprechende Schmiermittel reduziert werden, dazu folgt später noch genaueres. In der folgenden Formel werden die Krafterhöhenden Anteile (Biegekraft, Reibkraft) durch den Umformwirkungsgrad η_F berücksichtigt:

$$F_{Zmax} = \pi * d_m * s_0 \left[1,1 * \frac{k_{fm}}{\eta_F} * \left(\ln \frac{d_0}{d_1} - 0,25 \right) \right]$$

In der Gleichung ist d_m der mittlere Zargendurchmesser:

$$d_m = d_1 + s_0,$$

k_{fm} die mittlere Fließspannung im Flansch, s_0 die Anfangsdicke und d_0 der Anfangsdurchmesser des Blechzuschnittes, d_1 der spätere Napfdurchmesser und η_F , wie erwähnt, der Umformwirkungsgrad. Dieser liegt in etwa bei 0,5 bis 0,7 und errechnet sich aus dem Verhältnis von ideeller Umformarbeit zu tatsächlich verbrauchter Umformarbeit. Die höheren Werte gelten für dickere Bleche, die niedrigeren für dünnwandigere Bleche. Für die mittlere Fließspannung im Flansch kann folgende Beziehung für die Berechnung herangezogen werden:

$$k_{fm} \approx 1,3 * R_m,$$

wobei R_m die Zugfestigkeit des Blechwerkstoffes ist.

Ziehkraftdiagramme dienen der Darstellung der Ziehkraft über den Stempelweg. In **Abbildung 2.27** ist so eine Kurve abgebildet. Beim Aufsetzen des Stempels auf den Blechzuschnitt nimmt die Kraft, auf Grund der Verfestigung des Werkstoffes, stark zu. Bei etwa 25% der Formänderung ist die Maximalkraft erreicht. Wenn der Ziehspalt zu eng ist (siehe **Abbildung 2.27**, rechte Kurve), nimmt die Kraft noch einmal zu, was zu einem Abstreckziehen führt, dies bedeutet eine Abnahme der Blechdicke in der Napfwand. Wenn der Stempelweg zu gering ist und dadurch der Napf nicht vollständig durchgezogen wird, fällt die Ziehkraft steil auf null ab. Wird der Napf vollständig durchgezogen und der Ziehspalt ist nicht zu eng, fällt die Kraft nur langsam ab, da verfestigte Bereiche am Napfrand zusätzliche Kraft benötigen. Den gesamten Arbeitsaufwand des Tiefziehprozesses stellt die Fläche unterhalb der Kurve dar. [5]

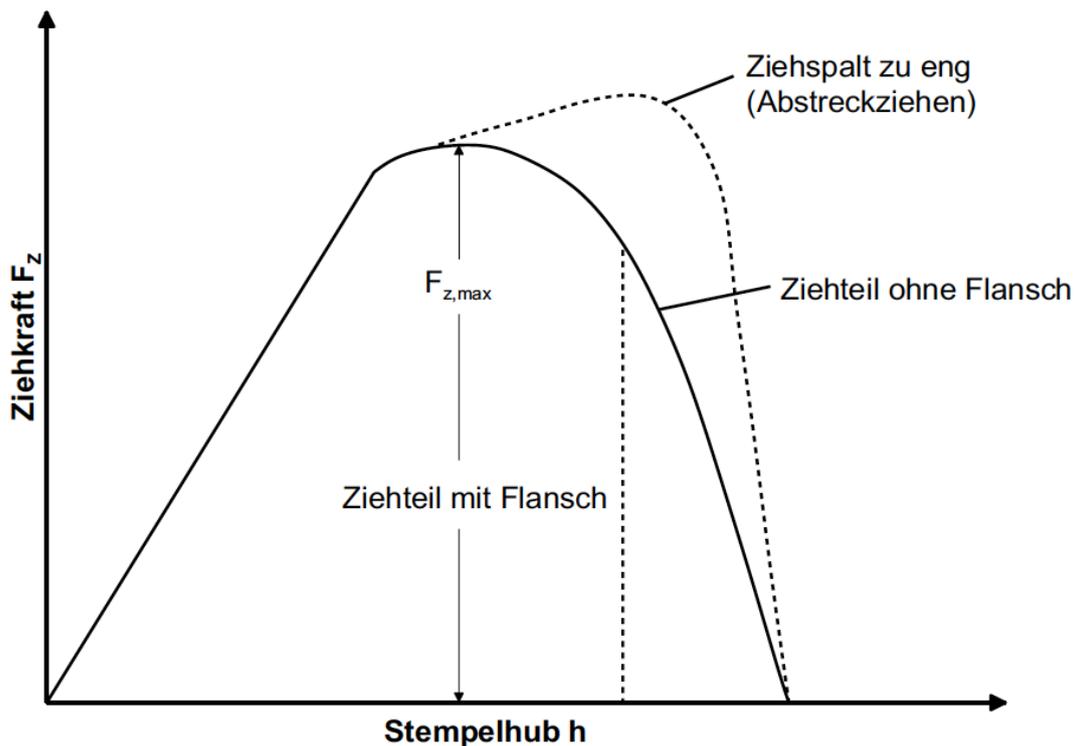


Abbildung 2.27: Ziehkraft über Stempelhub [5]

2.2.4.2 Niederhalterkraft

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, dient der Niederhalter der Vermeidung von Falten im Flansch des Ziehteiles. Durch die Druckausübung auf den Flansch wird ein Ausknicken verhindert. Der Druck darf aber auch nicht zu hoch sein, da so das Nachfließen verhindert wird und dadurch Reißer entstehen können. Mit der folgenden Formel kann der richtige Niederhaltedruck errechnet werden:

$$p_n = 0,002 \dots 0,003 * \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0,5 * d_1}{100 * s_0} \right] * R_m$$

Der Niederhaltedruck ist somit abhängig von Ziehverhältnis β , dem Stempeldurchmesser d_1 und der Anfangsblechdicke s_0 sowie der Zugfestigkeit R_m . Zu erwähnen ist, dass sich die obere Gleichung wieder auf rotationssymmetrische Ziehteile angewandt wird. Für eine kompliziertere und komplexere Geometrie sind Probenzüge beziehungsweise eine Tiefziehsimulation unumgänglich. Aus dem Niederhaltedruck kann aus der Niederhalterfläche die Niederhalterkraft berechnet werden:

$$F_N = p_N * A_N$$

Die Niederhalterkraft beziehungsweise der Niederhalterdruck kann auch über Diagramme wie jenes in **Abbildung 2.25** bestimmt werden.

Da sich die Blechrunde im Zuge der Umformung verkleinert, erhöht sich der Druck bei gleichbleibender Niederhalterkraft. Daher gibt es Werkzeuge, die den Niederhaltedruck an den Stempelweg anpassen, sodass dieser während des gesamten Vorganges gleichbleibt.

In **Abbildung 2.28** ist ein Arbeitsdiagramm für ein rechteckiges Tiefziehteil dargestellt. Dieses ähnelt jedoch sehr stark jenem für rotationssymmetrische Bauteile. Es sagt aus, dass, wenn die Blechhalterkraft zu niedrig gewählt wurde, Falten im Flansch entstehen. Ist die Kraft zu groß, kommt es zur Rissbildung. [5]

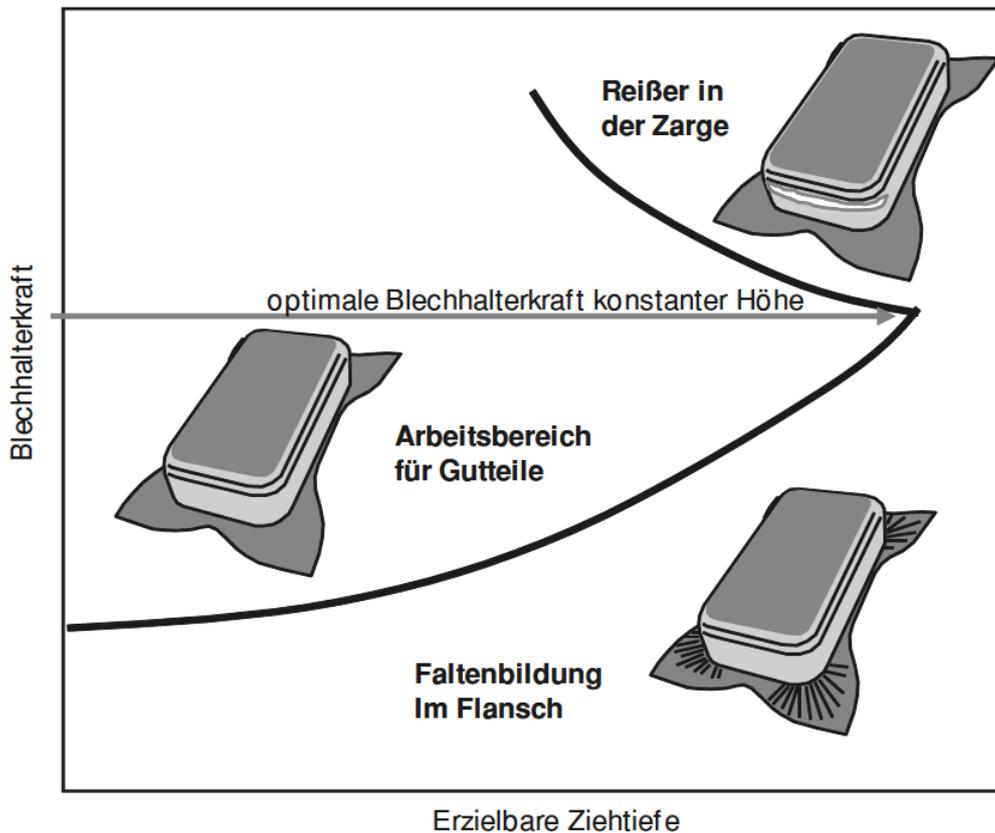


Abbildung 2.28: Arbeitsdiagramm für rechteckige Tiefziehteile [3]

2.2.5 Reibung und Schmierung

Die beim Tiefziehen entstehende Reibung beeinflusst das Ergebnis in einem hohen Grad. Besonders bei großen (Automobil) oder sehr dünnen Bauteilen haben die Reibungsverhältnisse große Bedeutung. Die drei Zonen in denen Reibung entsteht sind:

1. Zwischen Blechoberfläche und Ziehring/Matrize beziehungsweise zwischen Blechoberfläche und Niederhalter
2. Zwischen Blech und Ziehkantenrundung
3. Zwischen Blech und Stempelkantenrundung

Die entstehende Reibung in den Zonen 1 und 2 erhöhen die aufzubringende Ziehkraft. Daher ist eine niedrige Reibung an diesen Stellen gewünscht, was zu einer niedrigeren maximalen Ziehkraft führt. Eine Reduktion der Reibung in diesen Bereichen wird erreicht durch geeignete Schmierstoffe oder dem Einsatz von kunststoffbeschichteten Blechen. Durch eine niedrigere maximale Zugkraft können die Umformgrade und auch das Grenzziehverhältnis $\beta_{max} (d_0/s_0)$ erhöht werden.

In **Abbildung 2.29** ist der Anteil der Reibungskräfte an der Gesamtziehkraft in Abhängigkeit vom Stempeldurchmesser zu sehen. Wie bereits erwähnt nimmt die Reibkraft mit größer werdendem Stempeldurchmesser deutlich zu. Auch die drei Reibungszonen sind in **Abbildung 2.29** beschrieben. [5]

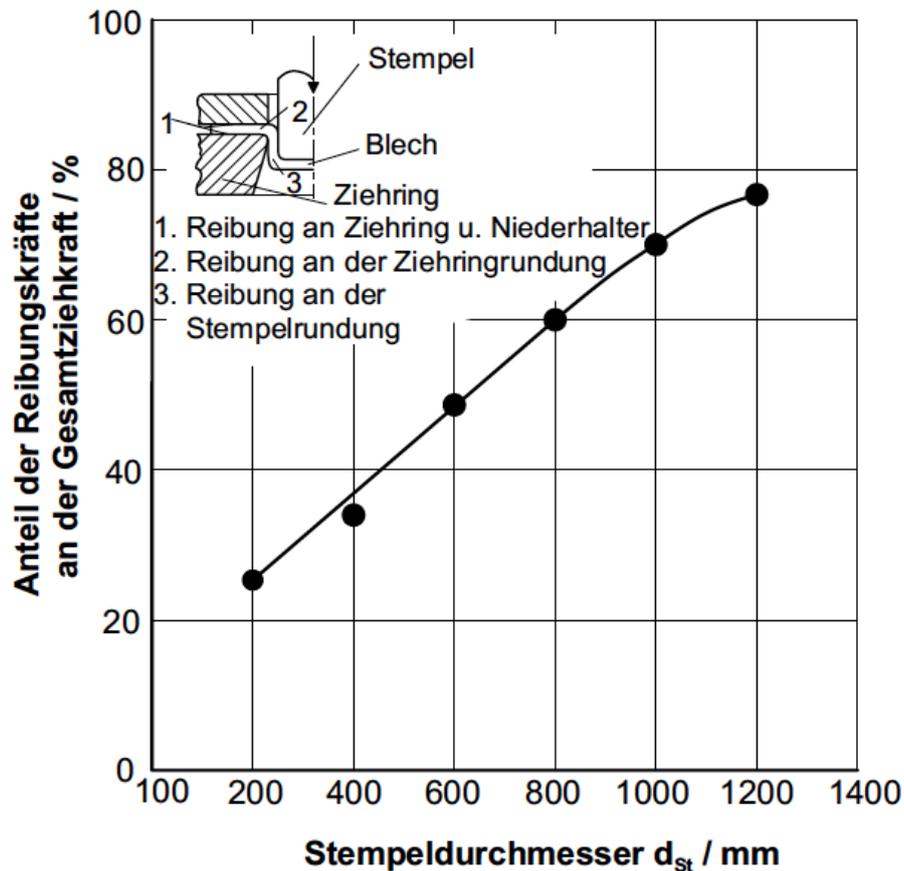


Abbildung 2.29: Reibkraft in Abhängigkeit vom Stempeldurchmesser [5]

In der Zone 3 ist im Gegensatz zu Zone 1 und 2 die Reibung erwünscht, da sie die zu übertragende Stempelkraft auf die Zarge und in weiterer Folge auf den Flansch, wo die eigentliche Umformung stattfindet, erhöht. Damit wird auch das Grenzziehverhältnis erhöht, weil eine höhere Kraft zur Verformung zur Verfügung steht.

Schmiermittel und Beschichtungen werden nicht nur eingesetzt, um die Reibung zu vermindern. Sie dienen auch der Minderung vom Werkstückverschleiß, der Vermeidung von Fehlern wie Reißen und einer verbesserten Oberflächenqualität des Werkstückes. Für die verschiedenen Werkstoffklassen werden verschiedene Schmierstoffe vorgeschlagen. Für die gewöhnlichen Tiefziehstähle, wie kohlenstoffarme Fein- und Feinstbleche, werden zumeist flüssige, manchmal auf feste oder pastöse Schmiermittel (auf Fett- oder Mineralölbasis) verwendet.

Eine weitere Möglichkeit die Reibung zu vermindern sind aufspritzbare oder einlegbare plastische Folien. Durch diese Folien entsteht kein metallischer Kontakt zwischen Blech und Werkzeug, was die Lebensdauer des Werkzeuges deutlich erhöht und die Oberflächenqualität des Bauteils steigert. Verwendung finden diese Folien zumeist bei austenitischen, rostfreien Stählen. Eine sehr seltene Art die Reibverhältnisse positiv zu verändern besteht darin, die Bleche vor der Umformung zu phosphatieren oder zu verkupfern. Anwendung finden diese Verfahren nur bei den kompliziertesten und schwersten Umformbedingungen, da es sehr aufwendig und teuer ist.

Zur Rauigkeit des Werkstoffes ist zu sagen, dass diese Möglichst nicht zu gering sein soll, da sich ansonsten keine Schmiermittelreservoirs bilden können und somit die Reibung wieder zunimmt. Auch eine gleichmäßige Rauigkeit über die gesamte Blechoberfläche sollte angestrebt werden, um zu vermeiden, dass einzelne Bereiche besser geschmiert werden als andere. [5]

2.2.6 Rückfederung beim Tiefziehen

Die Rückfederung des Tiefziehteiles nach öffnen des Werkzeuges ist ein sehr komplexes Verhalten und ist abhängig von vielen Faktoren. Da die Form- und Maßgenauigkeit, zum Beispiel von Karosserieteilen, sehr wichtig ist, ist es essentiell diese Vorgänge zu verstehen und ihnen entgegenzuwirken. Im Vergleich zu Reißern und Falten ist die Rückfederung nur sehr schwer vorauszusagen, wobei die Simulationstechnik in Bezug auf Rückfederung große Fortschritte macht. In **Abbildung 2.30** sind die verschiedenen Einflussfaktoren, wie Werkstoffeigenschaften (E -Modul, Verfestigung oder Streckgrenze), Prozessführung oder Bauteilgeometrie, auf das Rückfederungsverhalten abgebildet. [3]

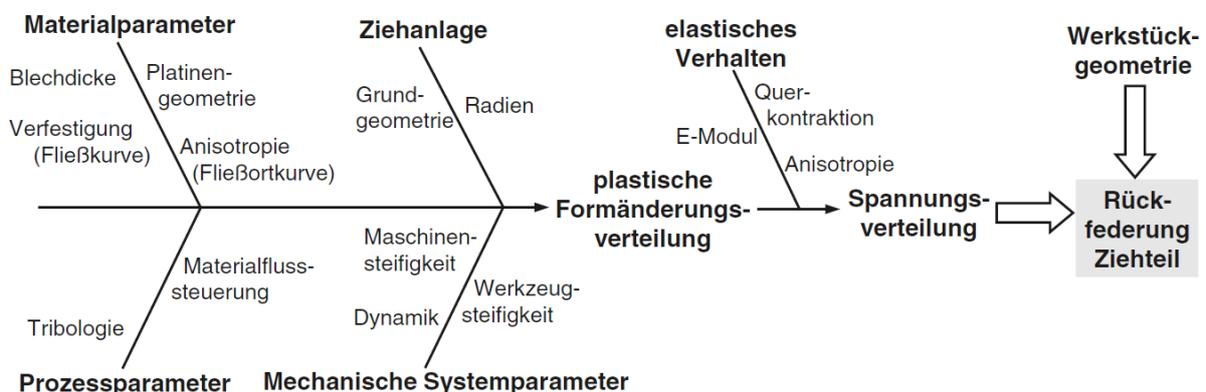


Abbildung 2.30: Einflüsse auf die Rückfederung [3]

2.2.6.1 Rückfederungsarten

Grundsätzlich ist die Art der Rückfederung von den im Bauteil wirkenden Spannungen abhängig. Zum einen herrschen in fertigen Ziehteilen Membran- und Biegespannungen. Nach diesen Spannungen werden die Rückfederungsarten folgendermaßen eingeteilt:

- Membranrückfederung
- Biegerückfederung an Biegekanten
- Rückbiegerückfederung in Zargen

Ist das Tiefziehwerkzeug geschlossen, ist das Werkstück im Gleichgewicht mit den äußeren Kräften, es herrscht eine sogenannte Zwangslage. Durch die Formänderung während des Prozesses nimmt das Werkstück plastische Energie auf, die gespeichert wird. Je höher die Formänderung, desto höher ist die gespeicherte Energie. Wird das Werkzeug geöffnet wird diese Energie frei und das Bauteil nimmt die energetisch günstigste Form an, was die Geometrie verändert. Diese elastische Formänderung ist die Rückfederung und kann mehrere Millimeter betragen. Das sich neu eingestellte Gleichgewicht befindet sich immer noch unter Spannung, welche Eigenspannungen genannt werden. Wird das Werkstück durch nachfolgende Bearbeitungsstufen beschnitten oder gelocht, führen die Eigenspannungen zu einer nochmaligen Änderung der Geometrie. In der unteren **Abbildung 2.31** sind die drei Rückfederungsarten beschrieben. [3]

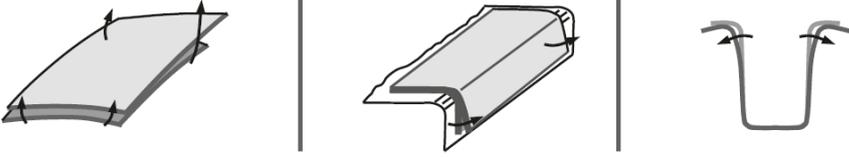
Art der Rückfederung	Membranrückfederung	Biegerückfederung	Rückbiegerückfederung
Ort der Rückfederung	elastische Formänderungen schalenförmiger Werkstückbereiche	elastische Formänderungen im Bereich von Biegekanten	elastische Formänderungen im Bereich von Ziehteilzargen
Ausprägung der Rückfederung	Aufbiegung Verdrehung	Aufbiegung entlang einer Werkstückkante	Verwölbung der Zarge nach innen oder nach außen (Hohlzug)
Ursache der Rückfederung	Membranspannungen	Biegespannungen	zugüberlagerte Biegespannungen
Dimensionalität der Rückfederung	3-dimensional	überwiegend 2-dimensional	überwiegend 2-dimensional
			
in komplexen Bauteilen kommen alle Rückfederungsarten auch in beliebiger Kombination vor			

Abbildung 2.31: Rückfederungsarten [3]

2.2.6.2 Einfluss des Werkstoffes auf die Rückfederung

Der E -Modul eines Werkstoffes wirkt sich dahingehend auf die Rückfederung aus, als dass die Rückfederung größer ausfällt, je kleiner der E -Modul ist. Zum Beispiel weisen Aluminiumbauteile eine höhere Rückfederung auf als Tiefziehteile aus Stahl. Ist der E -Modul gleich, haben Werkstoffe mit einer höheren Festigkeit größere Rückfederwege. Auch die Größe der Formänderung nimmt Einfluss auf das Rückfederverhalten. Demnach nimmt die Rückfederung mit höher werdender Formänderung zu. In **Abbildung 2.32** ist das Simulationsergebnis von drei verschiedenen Werkstoffen zu sehen. Der Stahl DC04 weist die geringste Rückfederung auf, da er einen höheren E -Modul als Aluminium und niedriger als Edelstahl ist. Aluminium hat einen geringeren E -Modul und federt deshalb stärker zurück als der DC04 Stahl. Der Edelstahl hat die höchste Streckgrenze und weist deshalb die größte Rückfederung auf. [3]

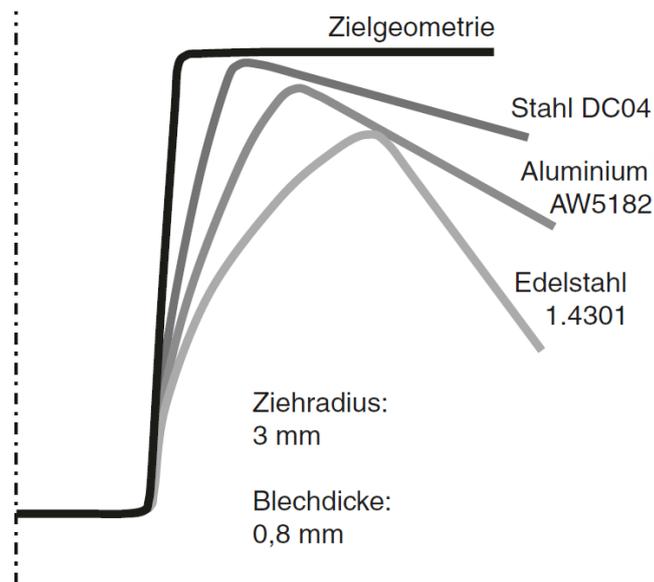


Abbildung 2.32: Einfluss des Werkstoffes auf die Rückfederung [3]

2.2.6.3 Einfluss der Bauteil- und Werkstückgeometrie auf die Rückfederung

Die Blechdicke und die Oberflächengeometrie sind maßgeblich für den Geometrieinfluss auf das Rückfederverhalten verantwortlich. Der Blechdickeneinfluss kann gut analytisch beschrieben werden, im Gegensatz zum sehr komplexen und schwer zu verstehendem Einfluss der Oberflächengeometrie

unregelmäßiger Ziehteile. Dieser ist kaum quantitativ oder analytisch beschreibbar, was an der Vielzahl der untereinander abhängigen Einflussfaktoren liegt. [3]

2.2.6.4 Rückfederkompensation

Rückfederkompensation ist der Vorgang, bei dem alle Maßnahmen ausgeschöpft werden, um den Anforderungen bezüglich Maß- und Formtoleranzen gerecht zu werden. Diese Kompensation erfolgt entweder proaktiv mit Hilfe einer Simulation, wobei alle Belastungen und nachfolgende Operationen simuliert werden, oder reaktiv. Reaktiv bedeutet, dass auf ein fertiges Bauteil reagiert wird, indem zum Beispiel Korrekturen am Werkzeug vorgenommen werden, um die gewünschte Endgeometrie zu erreichen. Durch die Rückfederkompensation mit Hilfe von Simulationssoftware kann sehr früh im Werkzeugherstellungsprozess der Rückfederung entgegengewirkt werden, was geringe Kosten bedeutet und für jeden Werkzeugbauer erstrebenswert ist. Jedoch ist auf Grund der Komplexität des Rückfedervorganges nicht garantiert, dass nur Korrekturen am fertigen Werkzeug nötig sind, um die Maß- und Formgenauigkeit des Bauteiles zu gewährleisten. Die Schwächen der Simulation liegen zurzeit noch in unzureichenden mathematischen Beschreibungen der Werkstoffmodelle, unzureichende Modelle in Hinsicht auf Parameterschwankungen, ungenaue Reibmodelle und unzureichende Werkzeugmodelle (kein Verschleiß, starr). Jedoch kann gesagt werden, dass im Sektor der Simulation sehr schnell Fortschritte gemacht werden, was die Nachbearbeitungskosten weiter senken wird. [3]

2.3 Zusammenfassung der Einflussgrößen beim Tiefziehen

Im folgenden Kapitel werden die Einflussgrößen auf das Tiefziehen, welche auch bei der späteren numerischen Analyse berücksichtigt werden, zusammengefasst.

2.3.1 Werkstoff

In diesem Abschnitt werden zum Großteil metallische Werkstoffe besprochen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass sich auch andere Materialien wie Kunststoffe zum Tiefziehen eignen. Grundsätzlich hat der Werkstoff einen sehr hohen Einfluss auf das Ergebnis des Tiefziehprozesses. Es gibt eine Vielzahl von Metallen, die gute Tiefzieheigenschaften aufweisen, andere hingegen lassen sich nicht tiefziehen. Auf Grund der hohen Nachfrage von Leichten Bauteilen, die aber auch hochfest sein sollen, geht die Entwicklung in Richtung stark verfestigenden Blechen, welche aber trotzdem noch eine hohe Bruchdehnung besitzen, um ein Tiefziehen zu ermöglichen. Mechanische Eigenschaften wie Streckgrenze, Zugfestigkeit, Gleichmaßdehnung oder Bruchdehnung beeinflussen die Tiefzieheigenschaften ebenso wie Kennwerte oder Kurven aus Prüfverfahren wie der r -Wert, Umformgrade, Grenzformänderungskurve oder die Fließkurve.

In **Abbildung 2.33** unterhalb ist der Bereich der gängigen Stahlbleche markiert, welche zum Tiefziehen herangezogen werden. Darunter fallen die IF (interstitial free) Stähle, die sich durch sehr wenige Fremdatome auszeichnen. Dadurch kann sich der Werkstoff ohne viel Widerstand leicht verformen. Die Gruppe der HSZ (hochfester Streckziehstahl) Stähle haben ähnliche Eigenschaften. BH (bake hardening) Stähle sind sehr gut kalt umformbar und weisen einen hohen Festigkeitszuwachs nach anschließender Wärmebehandlung auf. [5]

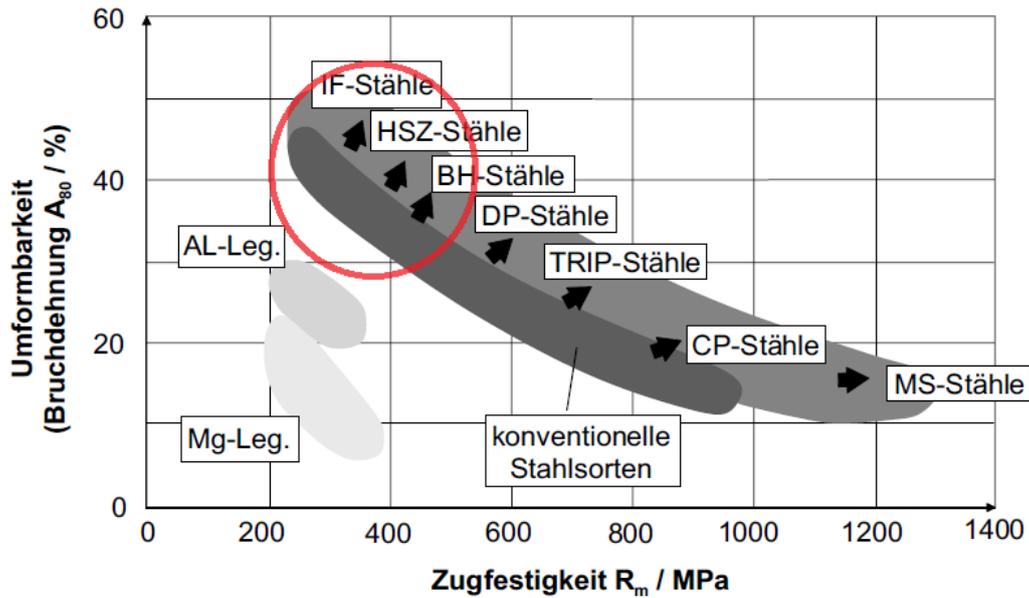


Abbildung 2.33: Bereich der Tiefziehstähle (rote Markierung) [5]

Der r - und n -Wert und deren Einfluss auf das Tiefziehen wurde in den vorherigen Kapiteln bereits besprochen. Grundsätzlich gilt für den r -Wert, der die Anisotropie des Werkstoffes beschreibt, dass dieser für ein gutes Tiefziehergebnis über eins sein sollte. Der Δr Wert, der die r -Werte aus Proben unterschiedlich zur Walzrichtung zusammenfasst, soll möglichst gegen null gehen. Ansonsten besteht die Gefahr der Zipfelbildung wie in **Abbildung 2.34** zu sehen.

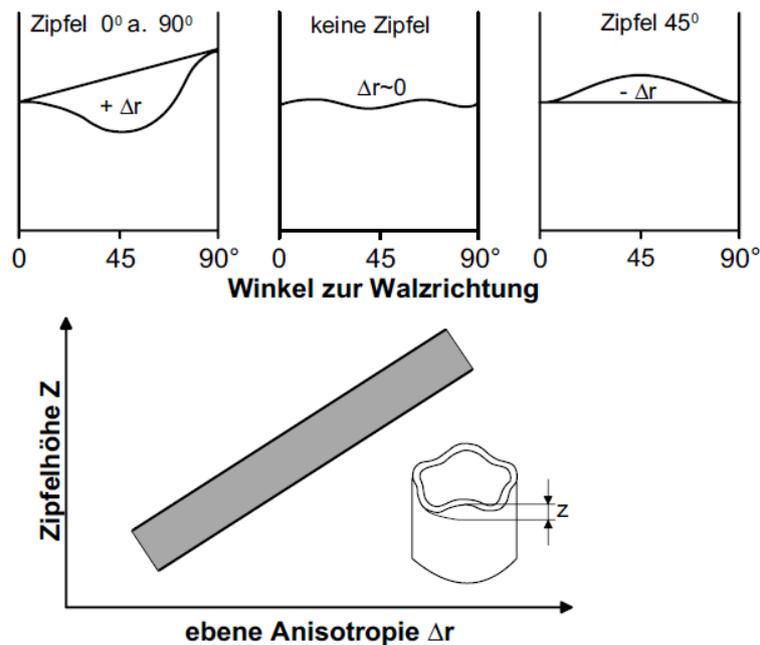


Abbildung 2.34: Zipfelbildung bei verschiedenen Δr Werten [5]

Eine weitere Möglichkeit, um Leichtbau voran zu treiben, ist der Einsatz von Aluminiumwerkstoffen anstatt von Stahlblechen (niedrigere spezifische Dichte). Reines Aluminium lässt sich sehr gut tiefziehen, jedoch hat es eine geringe Festigkeit und Härte. Höherfeste Aluminiumlegierungen weisen dagegen nur ein geringes Formänderungsverhalten auf, was jedoch für das Tiefziehen wichtig ist. Zumeist wird Aluminium daher für Verkleidungen, Abdeckungen oder Gehäuse verwendet. [5]

2.3.2 Werkzeuggestaltung

Die Gestaltung der Werkzeuge haben wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis des Tiefziehprozesses. Die Hauptbestandteile eines Tiefziehwerkzeuges sind Stempel, Matrize beziehungsweise Ziehring, Niederhalter und Führungselemente. Wie die Werkzeuge gestaltet sind hängt von Faktoren wie die Stückzahl, vom Werkstoff und von der Form und Größe des Teiles ab. Bei komplexen Bauteilen kann die Geometrie der Werkzeuge, trotz Berechnungen und Simulation, nicht im Vorhinein bestimmt werden. In diesem Fall sind Probezüge unumgänglich.

Ziehkantenrundung: Die Ziehkantenrundung ist maßgeblich an dem Ergebnis der Endgeometrie beteiligt. Sie ist abhängig von der Bauteilgröße und der Blechdicke. Ist die Rundung zu klein, kommt es zu einem Schneideeffekt, welcher häufig in Bodenreißen resultiert. Bei möglichst hoher Ziehkantenrundung erhöht sich das Grenzziehverhältnis und die maximale Zugkraft wird verringert. Dieser Zustand ist anzustreben. Mit größer werdender Rundung verringert sich jedoch die Fläche an der der Niederhalter wirkt, dies ist auch zu berücksichtigen.

Stempelkantenrundung: Die Stempelkantenrundung muss größer sein als die entsprechende Ziehkantenrundung. Ansonsten kann es zum Einschneiden des Stempels in das Blech kommen. Grundsätzlich sollte der Stempelradius etwa drei bis fünffach größer als der Ziehkantenradius sein.

Ziehspalt: Der Ziehspalt befindet sich zwischen dem Stempel und der Matrize. Die Wandstärke der Zarge nimmt wie bereits erwähnt mit zunehmender Höhe zu, daher wird ein größerer Ziehspalt benötigt, wenn tiefer gezogen wird. Ist der Ziehspalt zu groß, ist das Ergebnis eines Napfzuges nicht zylindrisch und es besteht die Gefahr von Faltenbildung. Wenn der Ziehspalt zu klein gewählt wird, kommt es zum Abstreckziehen, was zu einer Erhöhung der Zugkraft und in weiterer Folge zu Bodenreißen führen kann.

Niederhalter: Die Auswirkung eines zu geringen oder zu hohen Niederhalterdruckes wurde bereits in den Kapiteln Fehler beim Tiefziehen und Kräfte beim Tiefziehen erklärt. Grundsätzlich ist zu sagen, dass der Niederhalter der Vermeidung von Falten dient. Ist die Kraft, die der Niederhalter auf das Blech ausübt, zu groß, kommt es zur Ausdünnung des Bleches, was die Rissgefahr erhöht. [5]

2.3.3 Einflüsse auf die Steuerung des Werkstoffflusses

Abbildung 2.35 zeigt, welche Möglichkeiten zur Beeinflussung des Einziehverhaltens des Bleches bestehen.

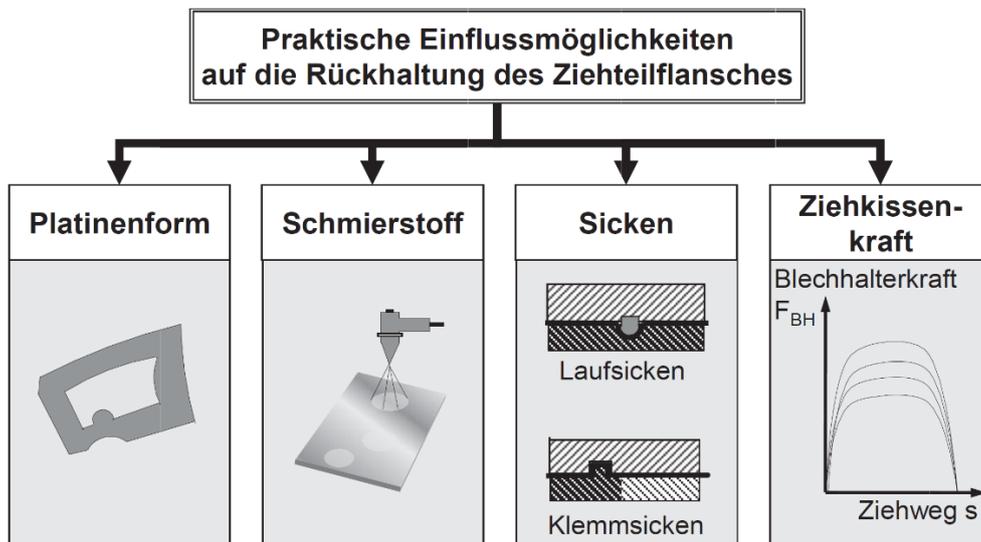


Abbildung 2.35: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Einziehverhaltens [6]

2.3.3.1 Platinenform

Durch örtliche Vergrößerung der Platine erhöhen sich hier die Reibungskräfte als auch die Ziehkraft und somit wird dem Einzug des Werkstoffes ein größerer Widerstand entgegengesetzt. Andererseits bewirkt ein Verkleinern der Platine ein begünstigtes Einfließen des Materials. [6]

2.3.3.2 Reibungseinfluss durch Schmierstoffe

Wie bereits in Kapitel Reibung und Schmierung beschrieben ist die Reibung zwischen Blech und Niederhalter beziehungsweise Blech und Matrize und Blech und Ziehkantenrundung durch Schmiermittel möglichst gering zu halten, um die Ziehkraft zu verringern. Andererseits soll die Reibung zwischen Stempelradius und Blech hoch sein, da sie die benötigte Ziehkraft verringert.

Der verwendete Schmierstoff beeinflusst die Reibverhältnisse je nach Art, Menge und Verteilung desselben am Niederhalter und Matrize. Dabei kann auch örtlich verschieden geschmiert werden, um den Einzug des Materials örtlich zu verändern.

Auch der Einfluss von Wulsten beim Tiefziehen kann auf Reibung zurückgeführt werden, da hier der Werkstofffluss auf Grund der veränderten Reibungsverhältnisse beeinflusst wird.

2.3.3.3 Tiefziehen über Wulste/Sicken

Ziehwalste, auch Ziehsicken oder Ziehleisten genannt, werden beim Tiefziehen zur Beeinflussung des Werkstoffflusses eingesetzt. Es gibt Einfließwalste und Bremswalste.

Einfließwalste: Der Einfließwalst befindet sich umlaufend anstelle der Ziehkante, wie in **Abbildung 2.36** zu sehen ist. Er dient der Vermeidung von Falten bei konischen, parabolischen oder kugeligen Ziehtteilen. Der Walst beeinflusst die Spannungsverhältnisse so, dass die für die Faltenbildung verantwortlichen tangentialen Druckspannungen möglichst klein gehalten werden. Dadurch, dass der Spalt zwischen Niederhalter und Walst kleiner als die Blechdicke ist und das Blech über den Walst gebogen wird, wird das Material an dieser Stelle gestaucht. Wegen der Erhöhung der Radialspannungen, werden die Tangentialspannungen verkleinert und die Gefahr der Faltenbildung ist vermindert. [5]

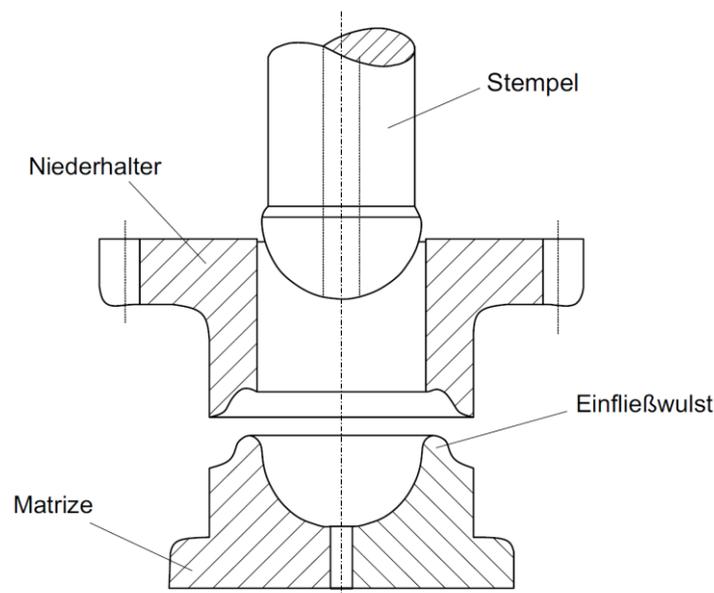


Abbildung 2.36: Einfließwalst anstelle der Ziehkante [5]

Bremswulste: Bei großen, unregelmäßig geformten Bauteilen wie Karosserieteile sind Bremswulste von Bedeutung. Sie dienen der Steuerung des Werkstoffflusses im Bereich des Flansches des Zieheteiles. An Stellen wo das Blech zu schnell eingezogen wird, werden diese Bremswulste angebracht, um dem Blech in diesen Bereichen einen örtlichen Widerstand entgegenzusetzen. Wie in **Abbildung 2.37** zu sehen, befinden sich die Bremswulste im Niederhalter. Gut gesetzte Bremswulste bewirken einen gleichmäßigen Blecheinzug über den gesamten Flansch des Teiles. An rechteckigen Tiefziehteilen werden zum Beispiel nur an den Seitenmitten ein oder mehrere Bremswulste angebracht, um einen möglichst gleichmäßigen Einzug zu gewährleisten. Auch die Höhe und die Abrundung der Bremswulste sind neben der Anzahl und Länge ein beeinflussender Faktor auf das Endergebnis, das sie die Reibung und damit den Werkstofffluss maßgeblich verändern können. Bei der Anbringung des Wulsts sollte auf Austauschbarkeit geachtet werden, da oft erst im Laufe der Probezüge über ein einsetzen oder weglassen des Wulsts entschieden wird. [5]

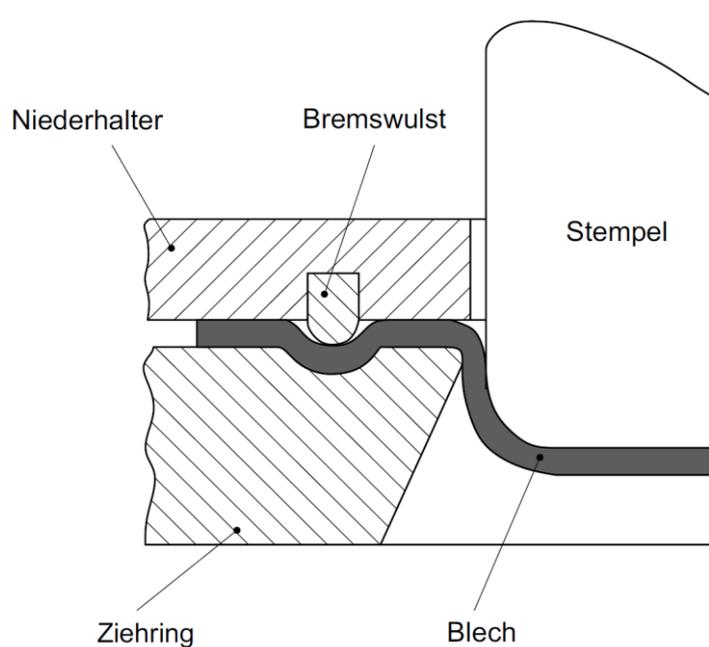


Abbildung 2.37: Bremswulst im Niederhalter [5]

2.3.4 Einfluss der Temperatur der Platine

Wie bereits zuvor erwähnt hat die Temperatur der tiefziehenden Platine einen wesentlichen Einfluss auf das Tiefziehen, insbesondere auf die benötigten Kräfte. Wie beschrieben, wird Tiefziehen grob in Kaltumformung und Warmumformung eingeteilt, wobei die Grenze die Rekristallisationstemperatur des Werkstoffes ist. Dazwischen liegt das Halbwarmumformen. Während bei der Kaltumformung hohe Kräfte benötigt werden, sind diese bei der Warmumformung um einen hohen Faktor geringer, da die

Fließspannung bei hoher Temperatur sinkt. Dagegen nimmt die Maßgenauigkeit ab, je höher die Platine vor der Umformung erhitzt wird.

Zu erwähnen ist, dass in der nachfolgenden Simulationsstudie nur im Bereich der Kaltumformung simuliert wird.

3 Simulationsstudie

In diesem Kapitel wird auf die numerische Analyse des Tiefziehprozesses eingegangen. Ziel ist es, Einflussgrößen und deren Wirkung beziehungsweise die Größe des Einflusses auf eine Zielgröße, wie zum Beispiel Tiefziehkraft oder Rückfederung, zu bestimmen. Die Studie wird mit der Software Autoform, welche auch kurz in diesem Kapitel beschrieben wird, durchgeführt. Die numerische Analyse wird anhand eines Tiefziehteiles in Form eines Kreuznapfes durchgeführt. Die Geometrie des Napfes, sowie der Aufbau der Simulation, werden weiter unten noch genauer beschrieben.

3.1 Beschreibung der Simulationssoftware Autoform

Wie bereits erwähnt wird für die Simulationsstudie die Software Autoform, die vom Institut für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben zur Verfügung gestellt wird, verwendet. Grundsätzlich umfasst die Software den gesamten Prozess für die Herstellung eines Tiefziehbauteiles, angefangen von der Machbarkeitsanalyse des Teiles über die Berechnung der Kosten von Werkzeug und Material, zum Werkzeugdesign und der Prozessoptimierung. Des Weiteren zeichnet sich Autoform durch kurze Rechenzeiten und präzise Ergebnisse aus. Auch ist die Softwareoberfläche sehr anwenderfreundlich, sodass nach kurzem Einarbeiten bereits aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können.

Im Folgenden werden einige wichtige Module der Software beschrieben:

Machbarkeitsanalyse: In den ersten Schritten der Prozessplanung muss das Bauteil hinsichtlich der Machbarkeit analysiert werden. Mit diesem Tool werden die ersten Simulationen durchgeführt und Zonen in denen es zu Fehlern wie Reißen oder unzulässiger Materialausdünnung kommen kann aufgedeckt. Auch die Platinenform, die Materialausnutzung und Platinenkosten können hier berechnet werden. Somit kann in einem frühen Stadium im Prozess bereits eingegriffen werden, um nötige Verbesserungsmaßnahmen einleiten zu können. Für diese Analyse wird nur die Bauteilgeometrie benötigt, aus der ein vorläufiges Werkzeug abgeleitet werden kann. Der Anwender kann den Prozess optimieren, durch Einfügen von Niederhaltern oder Ziehsicken, um auf ein optimales Ergebnis zu kommen. [7]

Prozessplanung: Nicht nur der Tiefziehprozess kann mit der Software simuliert werden. Auch die Bearbeitungsschritte vor und nach dem Tiefziehen werden realitätsnahe berechnet. Diese sind zum Beispiel der Platinenschnitt, das Beschneiden und Lochen des Bauteiles oder eine zweite Ziehstufe. Durch das Abbilden des

gesamten Prozesses können wiederum Optimierungen vorgenommen und dadurch Kosten und Zeit eingespart werden. [7]

Kostenabschätzung: Dieses Feature ermöglicht in der frühen Phase eines Projektes die Kosten für das Tiefziehwerkzeug zu ermitteln. Dafür ist nur die 3D Geometrie des Bauteiles und der verwendete Umformprozess nötig. Jedes Merkmal am Bauteil wird automatisch mit einem Bearbeitungsschritt des Fertigungsprozesses verknüpft, welcher Einfluss auf die Werkzeugkosten hat. Somit kann innerhalb kurzer Zeit ein Angebot für den Kunden erstellt werden. [7]

Werkzeugoptimierung: Dieses Tool wird eingesetzt, um die Langlebigkeit der Werkzeuge zu verbessern. Durch die Anforderungen immer höher fester Blechwerkstoffe müssen auch die Werkzeuge eine höhere Verschleißfestigkeit aufweisen. Autoform ermittelt auf Grund der Bauteilgeometrie jene Stellen am Werkzeug, welche hohen Belastungen und somit hohem Verschleiß ausgesetzt sind. Gleichzeitig wird die geeignete Kombination aus Werkstoff, Härteverfahren und Oberflächenbehandlung für diese Stellen berechnet und vorgeschlagen. [7]

Dies ist nur ein kleiner Auszug aus den wichtigsten Tools der Software Autoform. Für Interessierte wird auf die Homepage von Autoform (www.autoform.com) hingewiesen. Dort sind alle Tools und zusätzliche Informationen zur Software einsehbar.

3.2 Werkstoffe der Studie

Die Analyse wird mit drei verschiedenen Materialien durchgeführt, siehe **Tabelle 3.1** unten. Bei den Nummern eins und zwei handelt es sich um Stahlwerkstoffe, während Nummer drei eine Aluminiumlegierung ist. Die Studie betrachtet die Auswirkungen einer Schwankung von r -Wert, n -Wert, Fließspannung und dem Reibungskoeffizienten, zwischen Niederhalter, Stempel, Gesenk und Blech, auf das Simulationsergebnis. Die Werte in **Tabelle 3.1** wurden den in der Software hinterlegten Materialien entnommen und sind für die weitere Analyse die Standardwerte.

Tabelle 3.1: Werkstoffe der Simulationsstudie

Nr.	Werkstoff	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Gleichmaßdehnung A_g [%]	Fließspannung k_f [MPa]	r_m -Wert	n -Wert	Reibkoeffizient
1	DC04	303,5	25,3	167,9	1,65	0,211	0,15
2	DX2304	803,5	20,9	607	0,736	0,14	0,15
3	6016	241,4	22,3	127,4	0,588	0,241	0,15

Im folgenden Abschnitt werden die Werkstoffe und deren Eigenschaften genauer beschrieben.

3.2.1 Werkstoff 1: DC04

Der Tiefziehstahl DC04 ist, wie der Name schon sagt, bestens für den Tiefziehprozess geeignet und wird kalt gewalzt. Die Mikrolegierung besteht zu 99,5 bis 100% aus Eisen. Es können geringe Mengen an Carbon (0-0,08%), Mangan (0-0,4%), Phosphor (0-0,03%) oder Sulfur (0-0,03%) enthalten sein. Die Reinheit des Werkstoffes ist ein großer Vorteil für den Tiefziehprozess, da somit wenige Atome anderer Größe oder Art die Versetzungsbewegung der Gleitebenen behindert. Das resultiert in großen Ziehtiefen, bevor das Material versagt. Tiefziehstähle weisen ein rein ferritisches Gefüge auf, in das vereinzelt Karbide eingelagert sind. Auch der hohe r -Wert, der besagt, dass das Material eher in Breitenrichtung als in Dickenrichtung fließt, trägt zu einem guten Tiefziehergebnis bei. Anwendungsgebiet im Automobilbau sind Karosserie- Struktur- oder Fahrwerksteile, wie zum Beispiel Kotflügel, Seitenwandrahmen, Bodenbleche, Reserveradmulden oder Türaußen- sowie -innenbleche. [8]

3.2.2 Werkstoff 2: DX2304

Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen hochfesten, nichtrostenden Duplexstahl. Die Europäische Bezeichnung für diesen Stahlwerkstoff ist X2CrNiN23-4 beziehungsweise 1.4362. Das entspricht einer Zusammensetzung von 0,02% Kohlenstoff, 1,8% Mangan, 22,8% Chrom, 3,8% Nickel, 0,4% Molybdän und 0,13% Stickstoff. Der Stahl weist eine hohe Beständigkeit gegen allgemeine Korrosion auf und hat eine hohe mechanische Festigkeit, was in einer geringeren Dehnbarkeit resultiert. Das Gefüge besteht aus ferritischen und austenitischen Phasen. Dadurch werden hohe Streckgrenzen bei gleichzeitig akzeptabler Verformbarkeit erreicht. Die ferritischen Phasen sind für die Härte verantwortlich, die weicheren austenitischen Phasen für die Zähigkeit und Verformbarkeit. Anwendung findet dieser Werkstoff in Entsalzungsanlagen, im Bauwesen (Leitplanken, Fußgängerbrücken), bei Rohren, in der Öl- und Gasindustrie, im Bergbau oder bei Druckgefäßen. [9]

3.2.3 Werkstoff 3: Aluminiumlegierung 6016

Die 6016er Legierung ist eine Aluminium Magnesium Silizium Knetlegierung. Neben Aluminium (96,4-98,8%), Magnesium (0,25-0,6%) und Silizium (1-1,5%) kann die Legierung noch geringe Mengen an Fremdbestandteilen wie Chrom, Kupfer, Eisen,

Mangan, Titan und Zink (alle <0,5%) enthalten. Die geringere Festigkeit des Aluminiums gegenüber dem Stahl hat zur Folge, dass die erreichbaren Ziehtiefen geringer sind als bei Stahlwerkstoffen, obwohl es sich bei der 6016 Legierung um einen sehr weichen, gut umformbaren Werkstoff handelt. Auch die Oberflächenqualität und Biegefähigkeit der 6016er Legierung ist sehr hoch. Aufgrund des Leichtbaugedankens findet die Legierung immer häufiger Anwendung im Automobilbau, wo auch die gute Korrosionsbeständigkeit des Materials von Vorteil ist. Besonders für die Außenhaut eines Autos werden Aluminiumwerkstoffe verwendet. [10]

In **Abbildung 3.1** sind die Fließkurven und Grenzformänderungsschaubilder der Werkstoffe eins bis drei dargestellt.

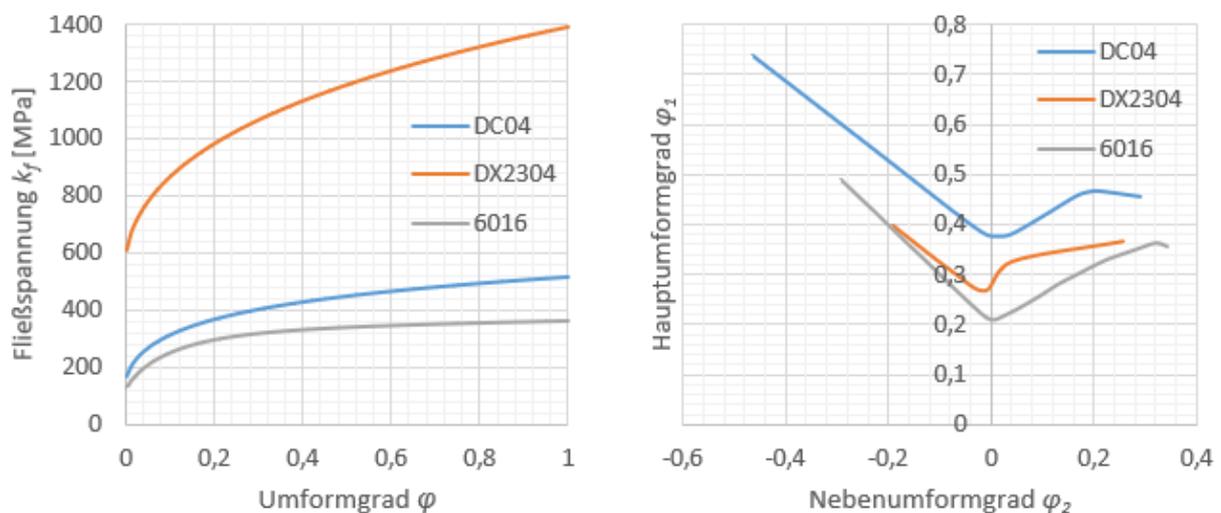


Abbildung 3.1: Fließkurven (links), Grenzformänderungsdiagramm (rechts)

3.3 Napfgeometrie und Aufbau der Simulation

Die Studie befasst sich wie erwähnt mit einem Tiefziehteil in Kreuzform. Diese Geometrie wurde gewählt, da sie das Einzugs- und Tiefziehverhalten vieler größerer Teile, wie etwa jene im Automobilsektor, im Kleinen gut widerspiegelt. Durch die größeren und kleineren Rundungen werden sowohl kreisförmige, als auch annähernd rechteckige Bauteile simuliert. Dadurch sollen die Unterschiede auf Grund von den verschiedenen Materialien und deren Schwankungen gezeigt werden. Die Dicke der Platine beträgt in allen Fällen 1mm.

Die Geometrie des Teiles wurde mit Hilfe einer CAD Software erstellt. In **Abbildung 3.2** ist die Geometrie dargestellt, wobei zu sagen ist, dass die Höhe von 40mm später

bei den Ergebnissen, auf Grund der verschiedenen Werkstoffe, von der dargestellten Geometrie abweichen wird. Auch die Orientierung der quadratischen Platine für den Tiefziehprozess ist in der Abbildung angedeutet.

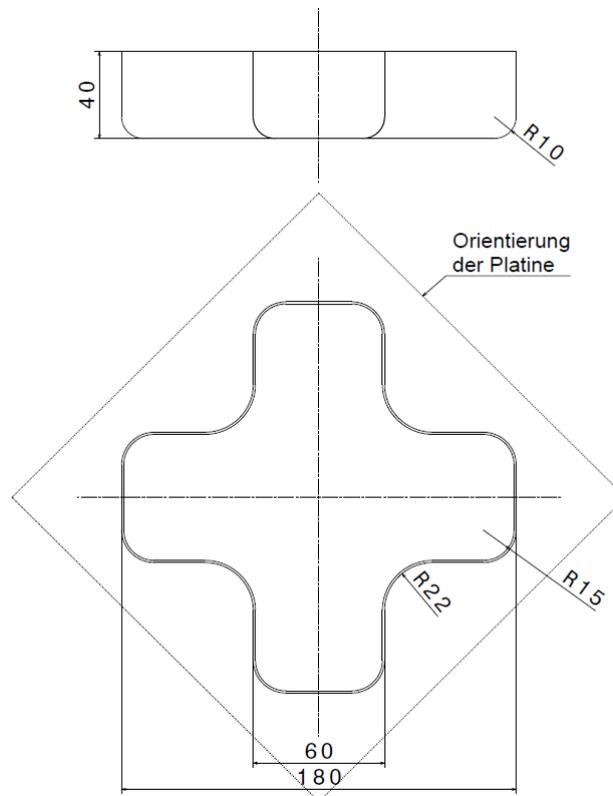


Abbildung 3.2: Geometrie des Napfes und Orientierung der Platine, Maße in *mm*

Durch die Geometrie, welche in die Software importiert wird, erstellt Autoform die passende Matrize und den Stempel. Zusätzlich wurde ein Niederhalter erstellt. In **Abbildung 3.3** ist die Anordnung von Matrize, Stempel, Niederhalter und Blech für den Tiefziehvorgang schematisch abgebildet. Der Niederhalter drückt konstant bei allen Simulationen der verschiedenen Werkstoffe mit einer Kraft von 50kN auf das Blech.

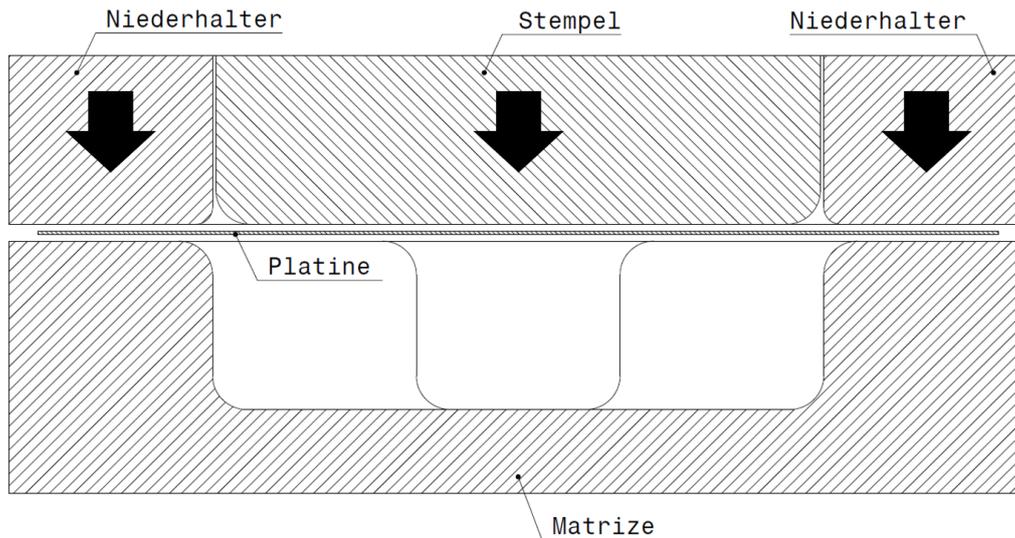


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Simulationsaufbaus

3.4 Einflussparameter und deren Schwankungen

Die Schwankungen der Material- und Prozessparameter zeigen die **Tabellen 3.2 bis 3.4** unten. Dabei ist zu erwähnen, dass die Schwankungen für die Fließspannung des Tiefziehstahls DC04 aus dem Datenblatt der Firma Thyssenkrupp stammen. Die Spannweite für den r - und den n -Wert, wurde aus der **Abbildung 2.1** entnommen. Für den Reibkoeffizienten wurde eine Schwankungsbreite von plus minus 20% angenommen. Die Schwankungsbreite für alle Werte der beiden anderen Materialien (DX2304, 6016) beträgt rund 10% in beide Richtungen. Der Grund für die Annahme der Schwankungsbreite von 10% für die Werte von Material zwei und drei liegt darin, dass diese keine typischen Tiefziehstähle sind und dadurch in der Literatur keine Schwankungsbreiten für zum Beispiel r - oder n -Wert gefunden wurden. Die größeren Schwankungen für den Stahl DC04 sind auch darauf zurückzuführen, dass dieser auf Grund seiner sehr guten Tiefzieheigenschaften, Abweichungen besser kompensiert als die anderen Materialien.

Tabelle 3.2: Parameterschwankungen DC04

Stahl, DC04	niedrig	Standard	hoch
r -Wert	1,4	1,65	1,9
n -Wert	0,18	0,211	0,22
Fließspannung [MPa]	140	167,9	210
Reibkoeffizient	0,12	0,15	0,18

Tabelle 3.3: Parameterschwankungen DX2304

Stahl, DX2304	niedrig	Standard	hoch
<i>r</i> -Wert	0,66	0,736	0,81
<i>n</i> -Wert	0,12	0,14	0,16
Fließspannung [MPa]	546	607	668
Reibkoeffizient	0,13	0,15	0,17

Tabelle 3.4: Parameterschwankungen 6016

Aluminium, 6016	niedrig	Standard	hoch
<i>r</i> -Wert	0,53	0,588	0,65
<i>n</i> -Wert	0,22	0,241	0,27
Fließspannung [MPa]	114	127,4	140
Reibkoeffizient	0,13	0,15	0,16

In **Abbildungen 3.4** sind die Fließkurven der Materialien mit abgeänderten Parametern dargestellt. Einfluss auf die Fließkurve haben der *n*-Wert und die Fließspannung. Der *n*-Wert bestimmt die Steigung der Kurve. Bei hohem *n*-Wert ist die Kurve steiler, je niedriger der Wert, desto flacher fällt die Kurve aus. Die Fließspannung beeinflusst die Kurve dahingehend, als dass sich der Startpunkt der Kurve, sprich die Spannung, ab der sich das Material verformt, ändert.

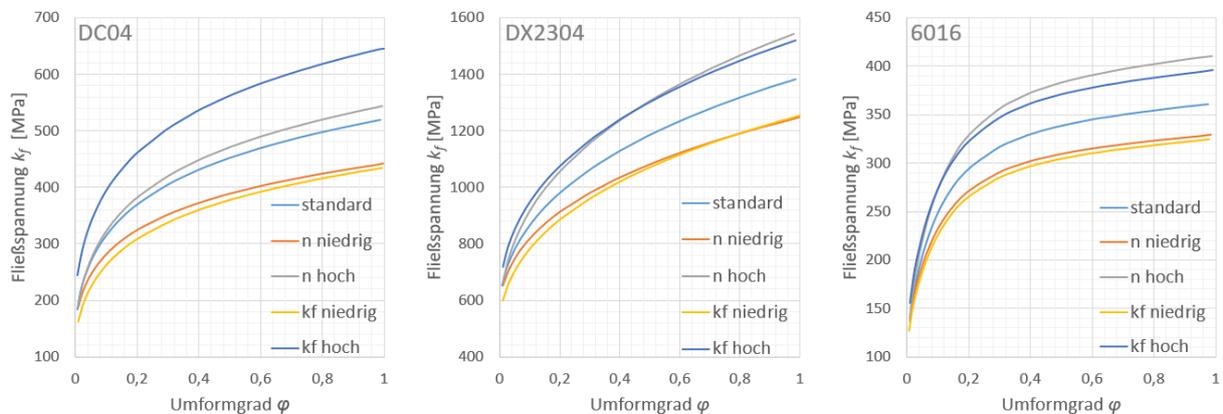


Abbildung 3.4: Fließkurven der Werkstoffe DC04 (links), DX2304 (Mitte) und 6016 (rechts) mit geänderten Parametern

3.5 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Auswertung der Studie ist so aufgebaut, dass zuerst die drei Werkstoffe bei gleicher Ziehtiefe ohne Parameterschwankungen, sprich mit den Standardwerten, verglichen werden. Für die Analyse der Parameterschwankungen werden die Ziehtiefen bei jedem Werkstoff voll ausgereizt, damit sich die Schwankungen größtmöglich auswirken und um diese bestmöglich aufzeigen zu können.

Die Walzrichtung (WR) des Bleches zur Stempelform ist in **Abbildung 3.5** zu sehen. Des Weiteren wurden die Querrichtung (QR) und die Diagonalrichtung (DR) definiert. Entlang dieser Richtungen werden später auch die Ergebnisse, wie zum Beispiel der Dicken- oder Dehnungsverlauf, ausgewertet. Es ist zu erwarten, dass die Struktur des Bleches nach dem Walzen einen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

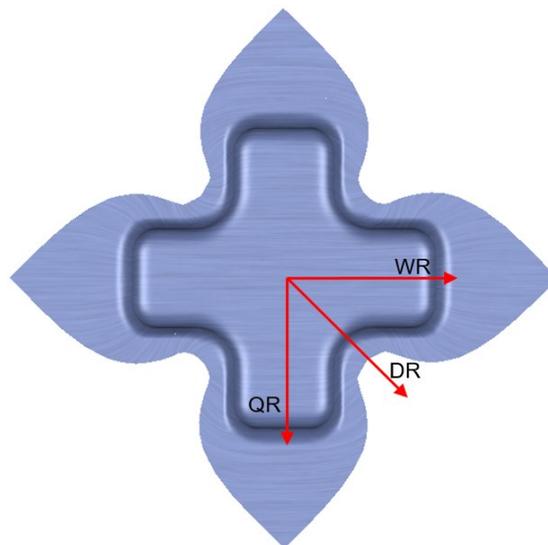


Abbildung 3.5: Definition von Walz- Quer- und Diagonalrichtung

3.5.1 Auswertung bei gleicher Ziehtiefe ohne Parameterschwankungen

Wie bereits erwähnt, werden in diesem Kapitel nur die drei Werkstoffe bei gleicher Ziehtiefe und den Standardwerten miteinander verglichen. Durch diesen Vergleich soll verdeutlicht werden, welcher Werkstoff die besten Tiefzieheigenschaften bezüglich Ausdünnung, Rückfederung und Dehnung aufweist.

Die **Abbildung 3.6** zeigt die vorhin erwähnten Auswertungsrichtungen (WR, QR und DR) mit den Längenangaben (alle in *mm*) entlang dieser Richtungen von Nullpunkt im

Napfboden über die beiden Rundungen bis zum Ende des Bleches. Die Abstände sind wichtig, um in den folgenden Diagrammen zu wissen an welcher Stelle des Napfes sich Maxima, Minima oder andere interessante Punkte befinden.

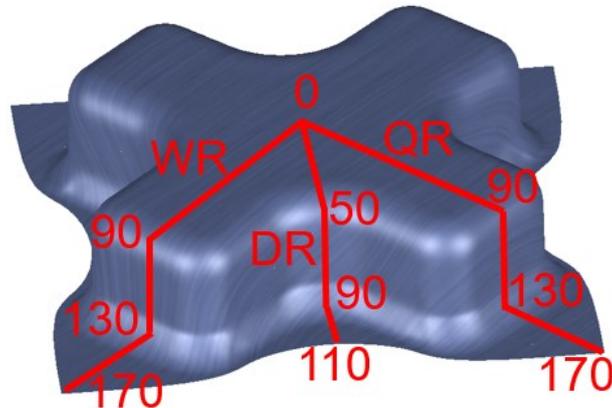


Abbildung 3.6: Längen entlang der Auswertungsrichtungen

3.5.1.1 Ziehtiefe

Die Ziehtiefe beträgt bei allen Werkstoffen 40mm und die Platinenabmessung 215x215mm, bei konstantem Niederhaltedruck von 50kN. Diese Ziehtiefe resultiert aus dem Ergebnis der 6016er Aluminiumlegierung, da diese bei 40mm Ziehtiefe und der gegebenen Platinengröße sowie dem Niederhaltedruck, an ihre Grenzen stößt. Bei geringen Weiterzug würden sich die ersten Reißer bei den roten Bereichen, in **Abbildung 3.7** rechts, einstellen. Beim hochfesten Stahl DX2304 sind bei dieser Ziehtiefe nur sehr kleine Bereiche rot, und somit Rissgefährdet. Der Napf aus dem Tiefziehstahl DC04 befindet sich zur Gänze im sicheren Bereich, was Reißer betrifft. Auch sind die Grenzformänderungsdiagramme in **Abbildung 3.7** dargestellt. Hier ist auch deutlich zu erkennen, dass sich beim Aluminium sehr viele Punkte über der Schadenslinie befinden. Beim DX2304 sind es nur einige wenige und beim DC04 sind alle Punkte weit unterhalb der Linie.

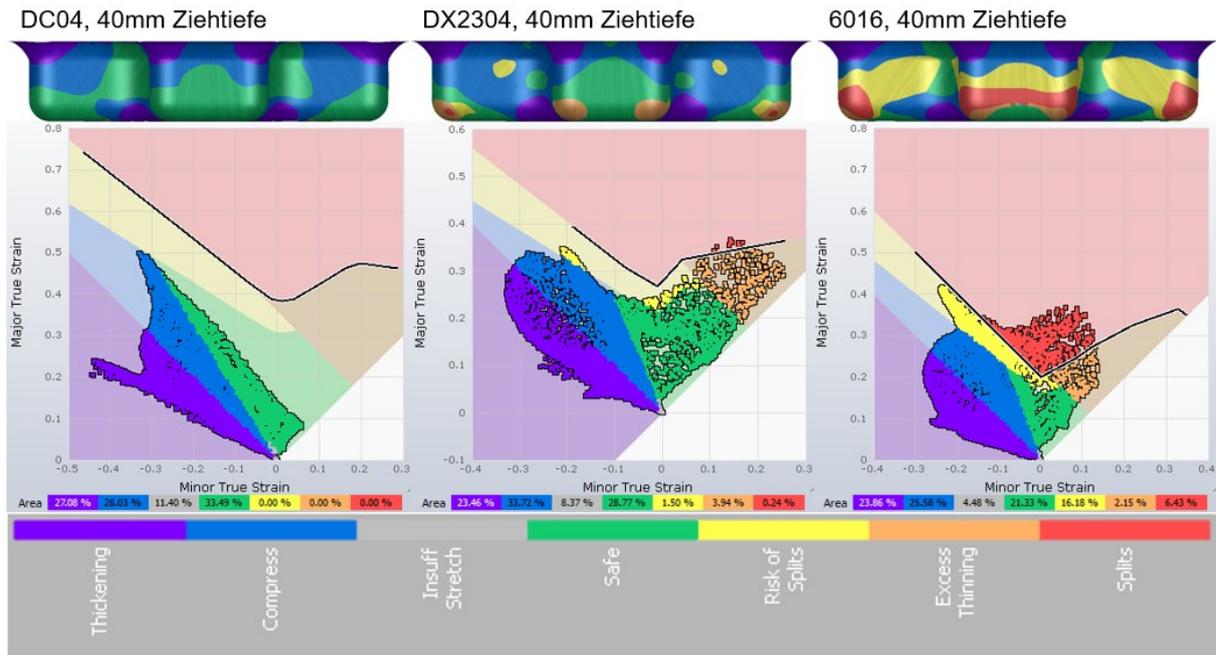


Abbildung 3.7: Ziehtiefe und Grenzformänderungsschaubilder der drei Werkstoffe

3.5.1.2 Tiefziehkraft

Die maximale Tiefziehkraft liegt beim hochfesten DX2304 wie zu erwarten am höchsten (456kN). In der Mitte der drei Werkstoffen liegt, wie in **Abbildung 3.8** zu sehen, der Tiefziehstahl DC04 mit einem Höchstwert von 180kN. Die geringste maximale Tiefziehkraft (143kN) muss bei der Aluminiumlegierung aufgewendet werden.

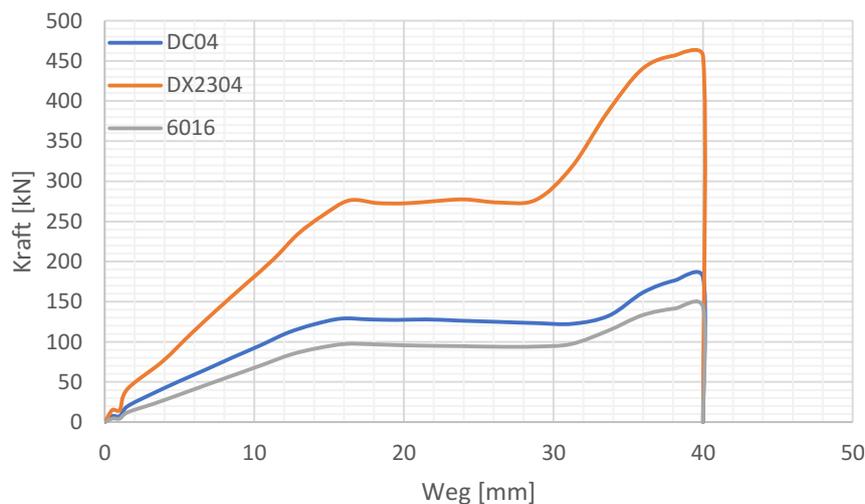


Abbildung 3.8: Vergleich der Tiefziehkraften über den Weg

3.5.1.3 Materialausdünnung

In diesem Kapitel wird die Ausdünnung des Materials der drei Werkstoffe gegenübergestellt. In **Abbildung 3.9** ist die Materialdicke in 10mm Schritten des Tiefziehvorganges dargestellt. Die roten Bereiche bedeuten eine Dicke von 0,7mm. Blau bedeutet keine Änderung der Materialstärke und die violetten Stellen erfahren eine Aufdickung auf etwa 1,1mm. Man kann bereits in den Bildern erkennen, dass in den Stempelradien die Ausdünnung beim hochfesten Stahl am kritischsten ist, da hier die roten Bereiche am ausgeprägtesten sind. Auch die Aluminiumlegierung steht kurz vor der Rissinitiierung an den Stempelradien. Der DC04 dünnt hingegen nur sehr gering aus.

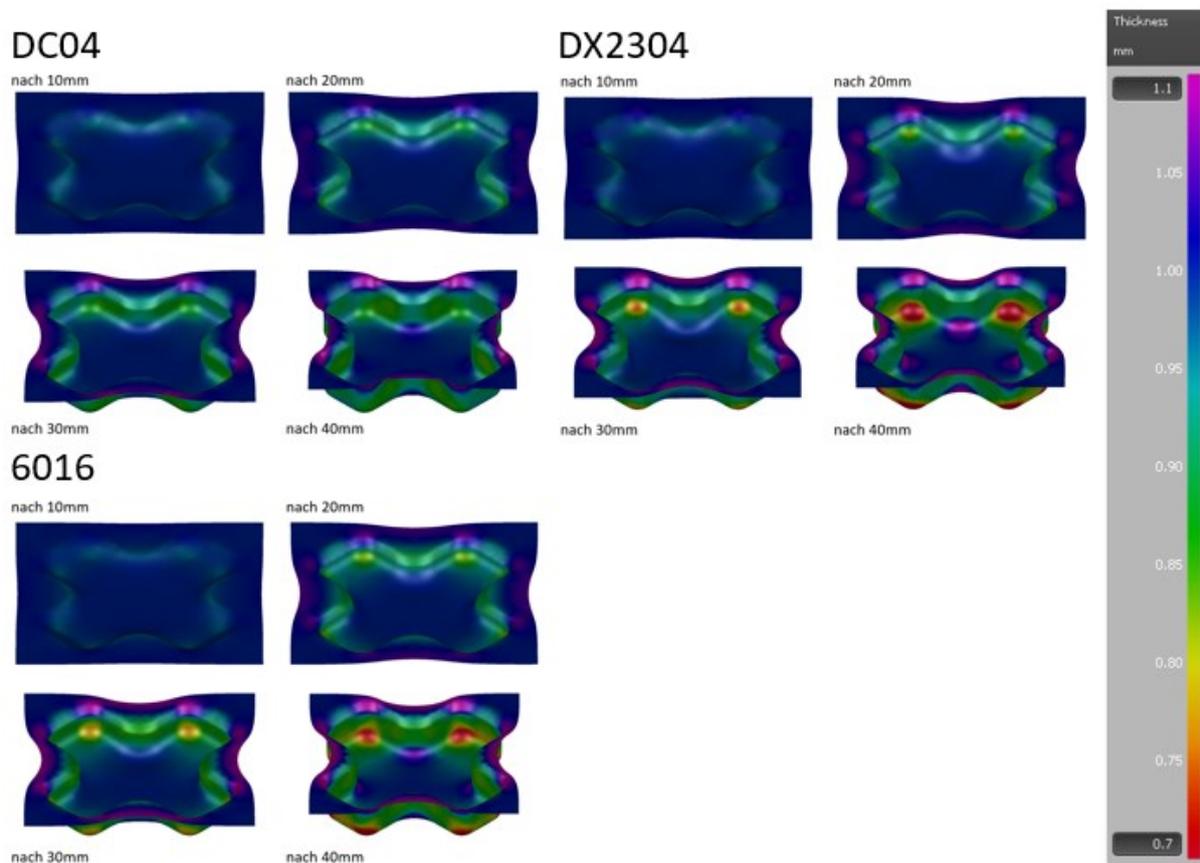


Abbildung 3.9: Materialausdünnung während des Tiefziehvorganges

Die in **Abbildung 3.10** dargestellten Diagramme bestätigen die vorherigen Aussagen mit Zahlen. In Walz und Querrichtung dünnt der DX2304 Stahl etwas mehr aus als die Aluminiumlegierung. Der DC04 Stahl dünnt dagegen nur sehr wenig aus. Der Vergleich von Walrichtung zu Querrichtung zeigt, dass die Dicke in Querrichtung bei

allen Materialien weniger abnimmt als in Walzrichtung. Dieser Zusammenhang ist auf die Struktur des Materials nach dem Walzen zurückzuführen.

In Diagonalrichtung ist zu erkennen, dass die Aluminiumlegierung die größte Ausdünnung erfährt, hingegen die maximale Aufdickung wiederum beim DX2304 vorliegt.

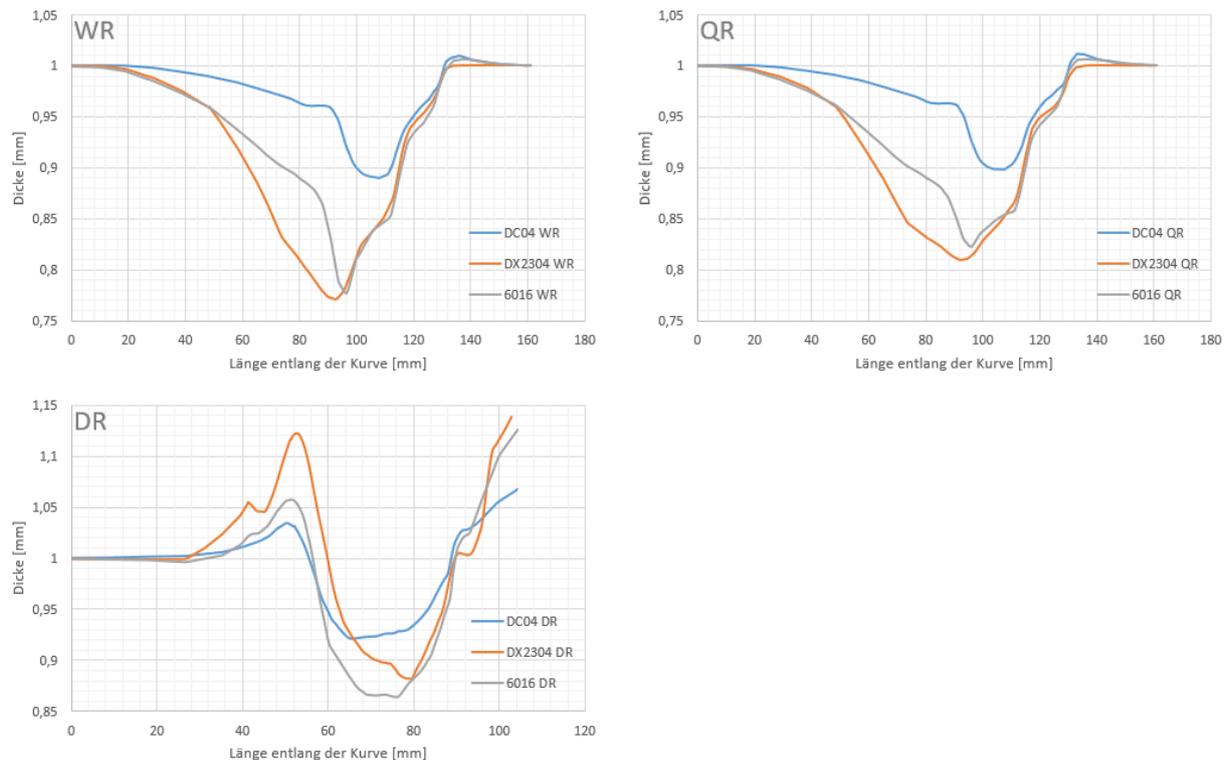


Abbildung 3.10: Dickenverläufe über die Auswertungsrichtungen

3.5.1.4 Rückfederung

In diesem Kapitel wird die Rückfederung des Kreuznapfes nach Beseitigung der Werkzeuge, sprich nach Beendigung des Tiefziehprozesses, analysiert. In **Abbildung 3.11** sind die drei fertig gezogenen Näpfe aus den verschiedenen Materialien dargestellt. Die Werte gehen von -0,5mm (violett) bis 0,3mm (rote Bereiche), grüne Stellen bedeuten keine Rückfederung. Die Werte im negativen Bereich deuten eine Rückfederung nach oben in **Abbildung 3.11** an, die positiven Werte eine Rückfederung nach unten beziehungsweise in den Hohlraum des Napfes. Die Werte bezeichnen die Rückfederung in normaler Richtung auf die Bauteiloberfläche.

Gut zu erkennen ist, dass der Tiefziehstahl DC04 die geringste Rückfederung über das gesamte Bauteil aufweist. Die Werkstoffe DX2304 und 6016 weisen eine relativ

ähnliche Rückfederungsverteilung auf, wobei jene Werte des hochfesten Stahles noch etwas höher sind.

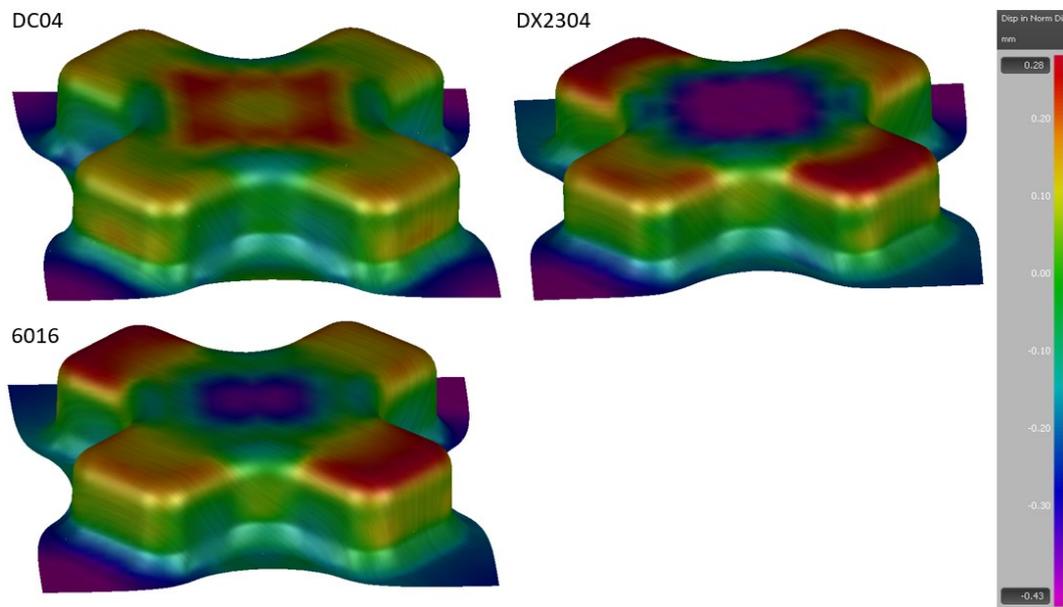


Abbildung 3.11: Rückfederungsverteilung nach dem Tiefziehprozess

Die Diagramme in **Abbildung 3.12** bestätigen wiederum die Aussagen, welche anhand der obigen Abbildung getroffen wurden. Wie auch schon im Literaturteil beschrieben, federt der Werkstoff DC04 am wenigsten zurück. Die höchste Rückfederung von bis zu -0,5mm am Flanschende ist beim DX2304 in Querrichtung zu erkennen. Interessant ist der eklatante Unterschied, von bis zu 0,3mm, am Flansch zwischen Walz- und Querrichtung. In den restlichen Abschnitten dieser beiden Richtungen sind die Werte in Walzrichtung etwas höher. Auch in Diagonalrichtung federt der hochfeste DX2304 Stahl am höchsten zurück.

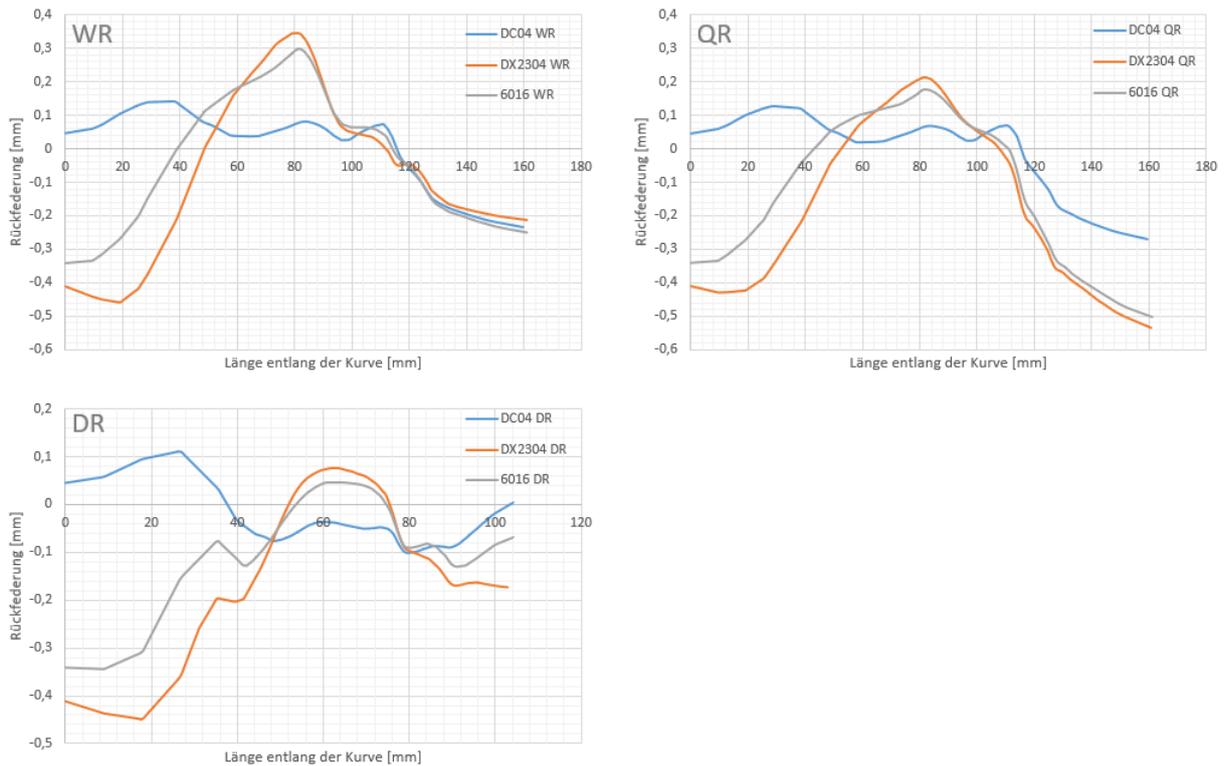


Abbildung 3.12: Rückfederungsverlauf in WR, QR und DR

3.5.1.5 Hauptdehnungen

Die Hauptdehnungen sind jene in Richtung des Stempelhubes. **Abbildung 3.13** zeigt diese für die drei Werkstoffe während des Tiefziehvorganges. Die Werte für die Dehnung reichen von 0 (violette Bereiche) bis 40% (rote Bereiche). Der DC04 Werkstoff weist die größten roten Stellen auf, dünnt jedoch, wie zuvor gesehen, am wenigsten aus. Das ist die Folge des hohen r -Wertes des Materials. Hingegen wird der hochfeste Stahl am wenigsten gedehnt, verliert aber deutlich an Wandstärke, weil der DX2304 einen niedrigen r -Wert hat. Anders verhält sich die Aluminiumlegierung, diese wird relativ stark gedehnt und verliert viel an Wandstärke, wie zuvor gesehen.

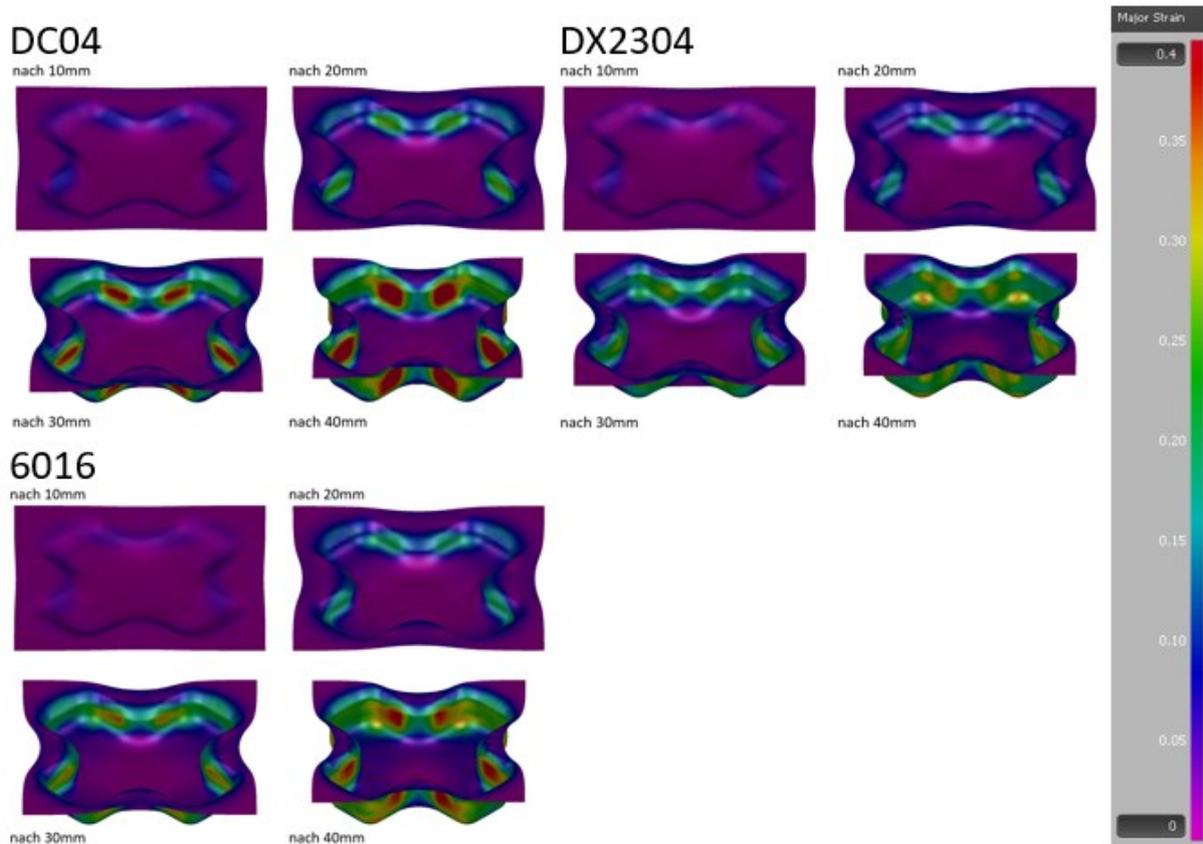


Abbildung 3.13: Dehnungsverteilung der drei Werkstoffe während des Prozesses

Die Diagramme in **Abbildung 3.14** zeigen die Dehnungsverläufe über die zuvor definierten Richtungen (WR, QR und DR). In Walz- und Querrichtung dehnt sich der DC04 und die 6016er Legierung am meisten (bis zu 25%). Die roten Bereiche der Dehnung von bis zu 40% aus der vorherigen Abbildung liegen nicht in den drei Auswertungsrichtungen, daher die geringere Dehnung in den Diagrammen. In Walzrichtung werden die Materialien leicht mehr gedehnt als in Querrichtung.

In Diagonalrichtung liegt eine umgekehrte Reihenfolge der meist gedehnten Materialien vor. Hier wird der DX2304 Stahl am höchsten (bis 23%), vor der Aluminiumlegierung (20%) und dem Tiefziehstahl (16%), gedehnt.

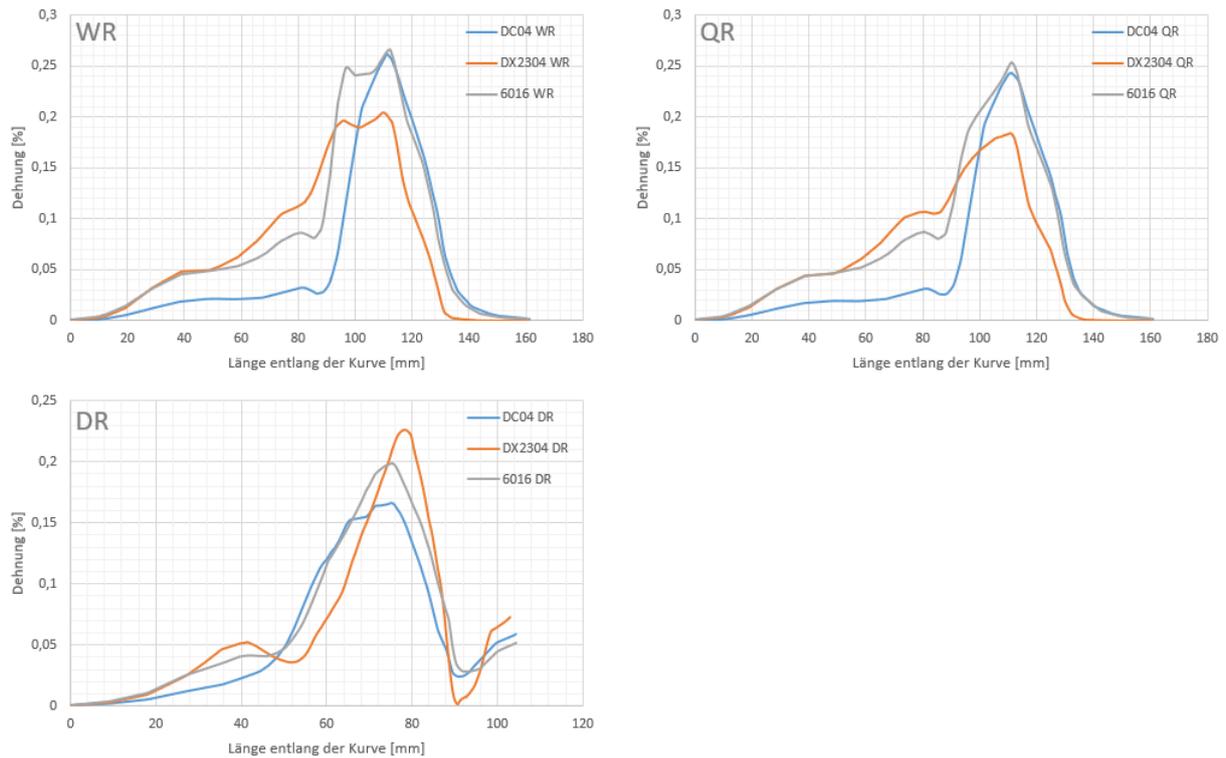


Abbildung 3.14: Dehnungsverläufe in den drei Auswertungsrichtungen

3.5.2 Auswertung bei unterschiedlicher Ziehtiefe mit Parameterschwankungen

Wegen der verschiedenen Ziehtiefen der drei Werkstoffe, wurden auch die Abmessungen der Platinen unterschiedlich gewählt. Grundsätzlich gilt, je größer die Platine, desto mehr Reibfläche. Deshalb wurde für den höher festen Stahl DX2304 und der Aluminiumlegierung eine kleinere Platine als für den Tiefziehstahl DC04 gewählt. Diese Auswahl wurde auch auf Grund der zu erreichenden Ziehtiefen gewählt. Da sich für den Tiefziehwerkstoff DC04 wesentlich größere Ziehhöhen wegen der guten Tiefzieheigenschaften ergeben, ist hier die Platine mit einer Größe von 290x290mm am größten. Eine Platine in der Größe hätte bei den beiden anderen Werkstoffen mit wesentlich schlechteren Tiefzieheigenschaften eine sehr geringe Ziehtiefe, auf Grund der hohen Reibkräfte, zur Folge. Somit wurde die Platine für den Aluminiumwerkstoff (215x215mm) und den DX2304 Stahl (220x220mm) verkleinert, um auch hier akzeptable Ziehhöhen erreichen zu können.

In **Abbildung 3.15** sind die drei Richtungen (Walzrichtung WR, Diagonalrichtung DR und Querrichtung QR) in denen die Auswertungen durchgeführt werden noch einmal dargestellt. Auch die Abstände (in mm), welche jetzt auf Grund der unterschiedlichen Napfhöhen von vorhin abweichen, vom Nullpunkt in der Mitte des Napfbodens entlang

der Kurven über die Radien bis zum Ende der Platine sind eingezeichnet, um sich in den Diagrammen der Materialausdünnung, Rückfederung und Dehnung in den folgenden Abschnitten der Studie orientieren zu können.

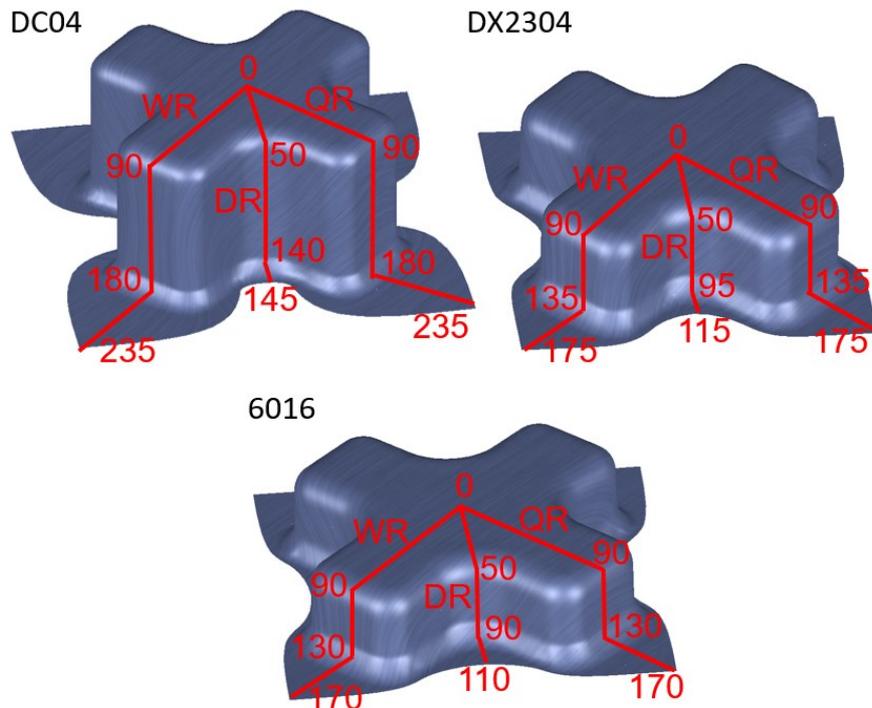


Abbildung 3.15: Längen entlang der Auswertungsrichtungen

3.5.2.1 Ziehtiefe

Die Ziehtiefe hängt grundsätzlich sehr stark vom Werkstoff ab. In **Abbildung 3.16** sind die maximalen Tiefen der drei Materialien mit ihren Standardwerten bis kurz vor die Initiierung von Rissen dargestellt. Die größten Tiefen (90mm) sind wie erwartet mit dem Tiefziehwerkstoff DC04 erreichbar. Der DX2304 Werkstoff und die Aluminiumlegierung erreichen bei gleichem Niederhaltedruck und verkleinerter Platine Tiefen von 45 beziehungsweise 40mm. Die **Abbildung 3.16** zeigt auch das Grenzformänderungsdiagramm der Tiefziehergebnisse. Wie im Literaturteil bereits beschrieben, gibt dieses Diagramm Auskunft über die Verfahrensgrenzen. Wie auf Grund der Einfärbung der Bereiche zu erkennen ist, wurde der DC04 Werkstoff nur bis in den Bereich der Gefahr von Rissen (gelb, 7,53%) tiefgezogen. Der Aluminiumwerkstoff hingegen wurde voll ausgereizt und 6,43% des Ergebnisses liegen im Bereich der Risse (rot), wo bei geringem Weiterzug der Werkstoff gerissen wäre.

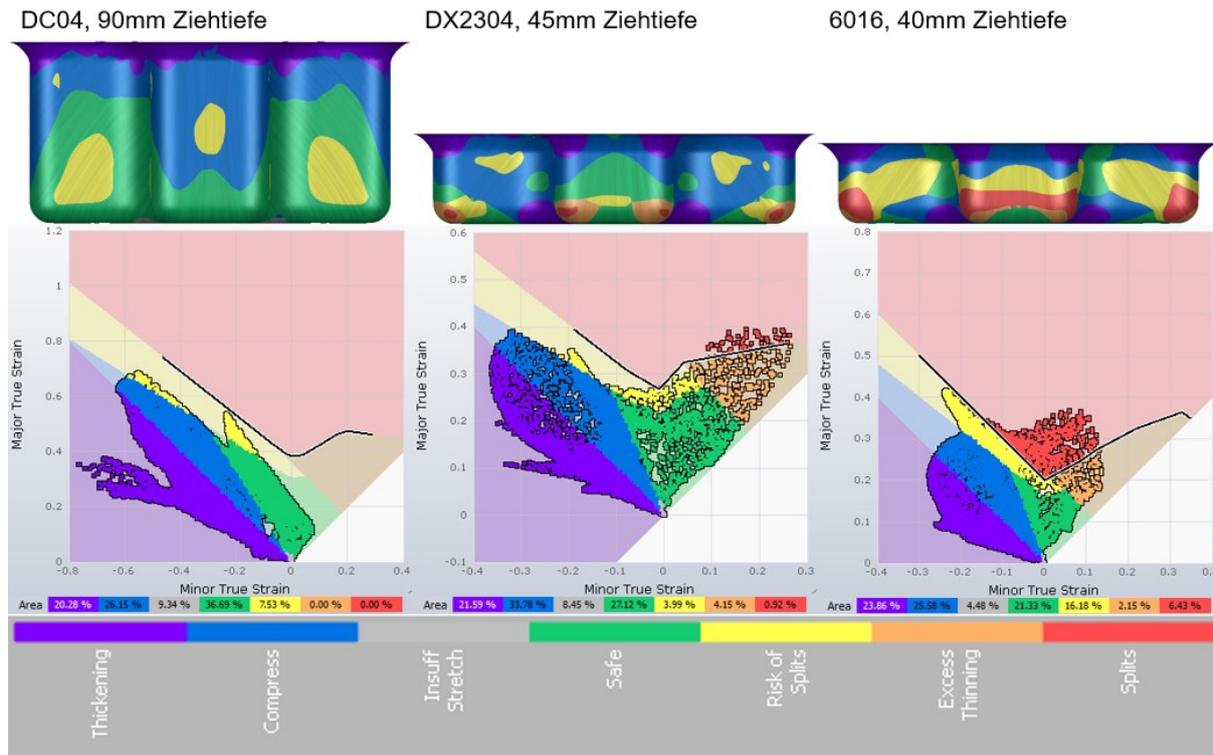


Abbildung 3.16: Vergleich der Ziehtiefen bis kurz vor die Rissbildung

3.5.2.2 Tiefziehkraft

In **Abbildung 3.17** ist das Ziehkraftdiagramm der drei Materialien mit deren Standardwerten dargestellt. Wie zu erwarten ist die benötigte Kraft für den höher festen Stahl deutlich am höchsten (463kN) und für die Aluminiumlegierung am geringsten (143kN). Der Höchstwert des Tiefziehstahles liegt bei 193kN. Zu erwähnen ist, dass durch die kleinere Platine beim DX2304 und 6016 Werkstoff ein größerer Weg und eine geringere Tiefziehkraft erreicht wird.

Im Vergleich zum vorherigen Kapitel der Tiefziehkräfte (**Abbildung 3.8**) ist zu sehen, dass die kleinere Platine vorhin im Fall des DC04 und DX2304 zu einer geringeren maximal benötigten Tiefziehkraft führt, da hier durch die geringere Fläche auch weniger Reibungswiderstand herrscht.

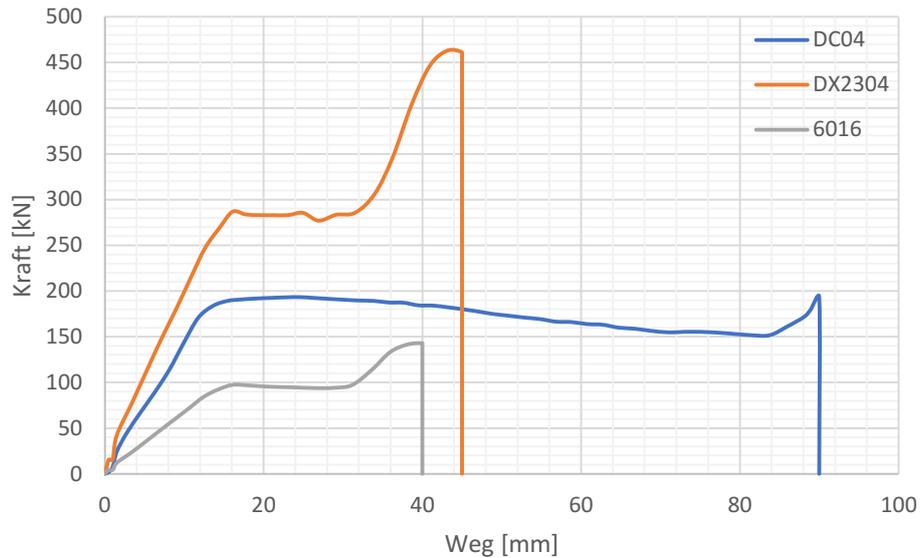


Abbildung 3.17: Ziehkraftdiagramm der Simulationen mit den Standardwerten

Die Schwankungen in Materialparametern und im Reibungskoeffizienten haben einen großen Einfluss auf die benötigte Tiefziehkraft. In den folgenden Diagrammen unterhalb sind die aufzubringenden Kräfte des Stempels bei einer konstanten Niederhaltekraft von 50kN ab dem Aufsetzen auf die Platine bis zum Gesenkboden zu sehen.

DC04

In **Abbildung 3.18** ist der Kraftverlauf während des Tiefziehvorganges des Tiefziehstahles DC04 dargestellt. Die Kraft steigt zunächst schnell bis zum maximum an, nimmt dann im Verlauf des Ziehens leicht ab und steigt gegen Ende des Vorganges noch einmal an.

Die Schwankung der Fließspannung in beide Richtungen hat den größten Einfluss auf die Tiefziehkraft beim Tiefziehstahl. Der Maximalwert bei hoher Fließspannung liegt bei 238kN, wobei die höchste Kraft für den Standardwert bei 193kN liegt. Eine niedrigere Fließspannung bewirkt kleinere Kräfte, da hier das Material sich früher verformt, wie im obigen Kapitel bereits beschrieben.

Der n -Wert, also der Verfestigungsexponent, bewirkt ebenfalls eine höhere Tiefziehkraft, wenn dieser hoch ist, da hier das Material stärker verfestigt und somit mehr Kraft nötig ist.

Beim Reibkoeffizienten ist der Verlauf der Tiefziehkraft gut nachvollziehbar, da mit kleinerem Koeffizienten, sprich weniger Reibung, weniger Kraft notwendig ist, als bei einem hohen Reibungskoeffizienten.

Die Schwankung des r -Wertes hat nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Tiefziehkraft und weicht kaum vom Standardwert ab, deshalb ist sie in **Abbildung 3.18** nicht dargestellt.

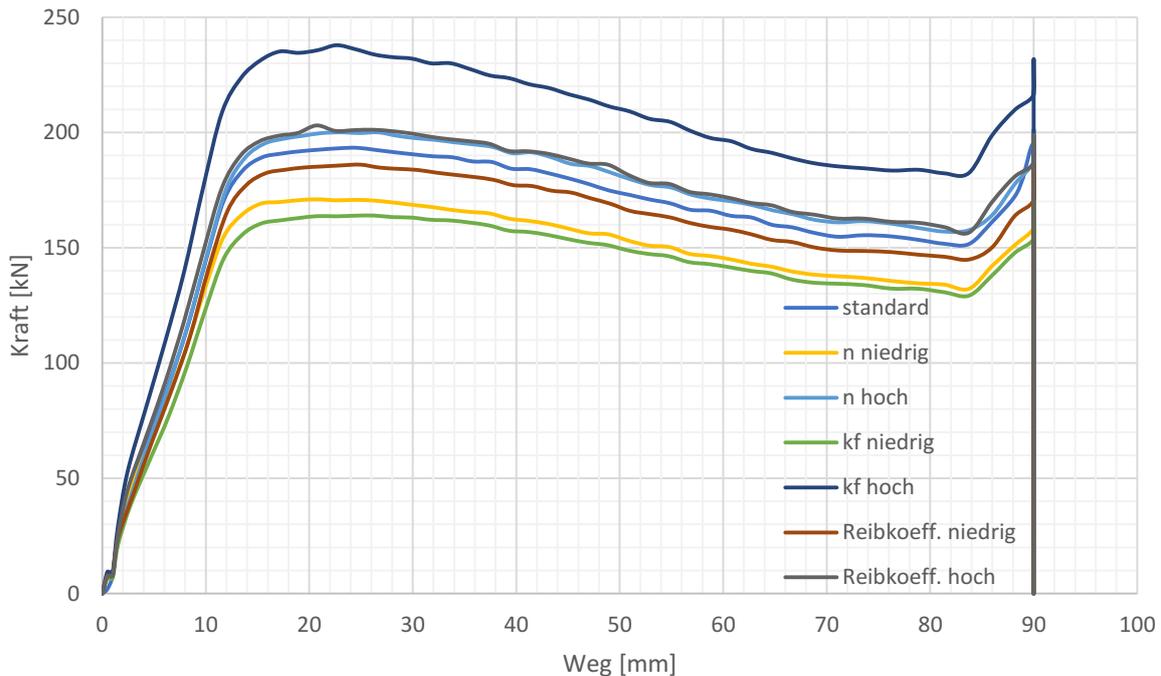


Abbildung 3.18: Kraftverlauf DC04

DX2304

In **Abbildung 3.19** ist der Verlauf der Tiefziehkraft über den Stempelweg für den DX2304 Werkstoff dargestellt. Die Simulation mit den Standardwerten gibt eine maximale Kraft von etwa 463kN aus. Diese ist mehr als doppelt so hoch als jene beim Tiefziehstahl DC04. Nach circa 15mm Ziehweg stellt sich eine nahezu konstante Kraft ein, die 10mm vor dem Gesenkboden noch einmal ansteigt und den Maximalwert am Ende des Tiefziehvorganges erreicht.

Die Schwankung der Fließspannung hat wie vorhin den größten Einfluss auf die Tiefziehkraft. Der Maximalwert der Kraft bei der erhöhten Fließspannung beträgt 507kN, was eine deutliche Erhöhung im Gegensatz zum Standardwert ist. Eine niedrigere Fließspannung wirkt sich hingegen in die andere Richtung aus, sodass hier die maximale Tiefziehkraft nur bei 419kN liegt.

Der Verfestigungsexponent hat beim hochfesten DX2304 Stahl auch einen sehr hohen Einfluss auf das Ergebnis bezüglich der benötigten Tiefziehkraft. Bei hohem n -Wert verfestigt das Material stark, sodass die Fließkurve steiler ist und somit mehr Kraft benötigt wird, um das Material zu verformen. Umgekehrt verhält sich das Material bei geringerem n -Wert. Im Fall der Tiefziehsimulation liegt der Wert für einen hohen n -Wert bei 499kN und beim niedrigen n -Wert bei 429kN.

Die Schwankungen des r -Wertes und des Reibungskoeffizienten haben keinen großen Einfluss auf die maximal benötigte Kraft für den Tiefziehvorgang. Daher sind die Verläufe in **Abbildung 3.19** nicht dargestellt.

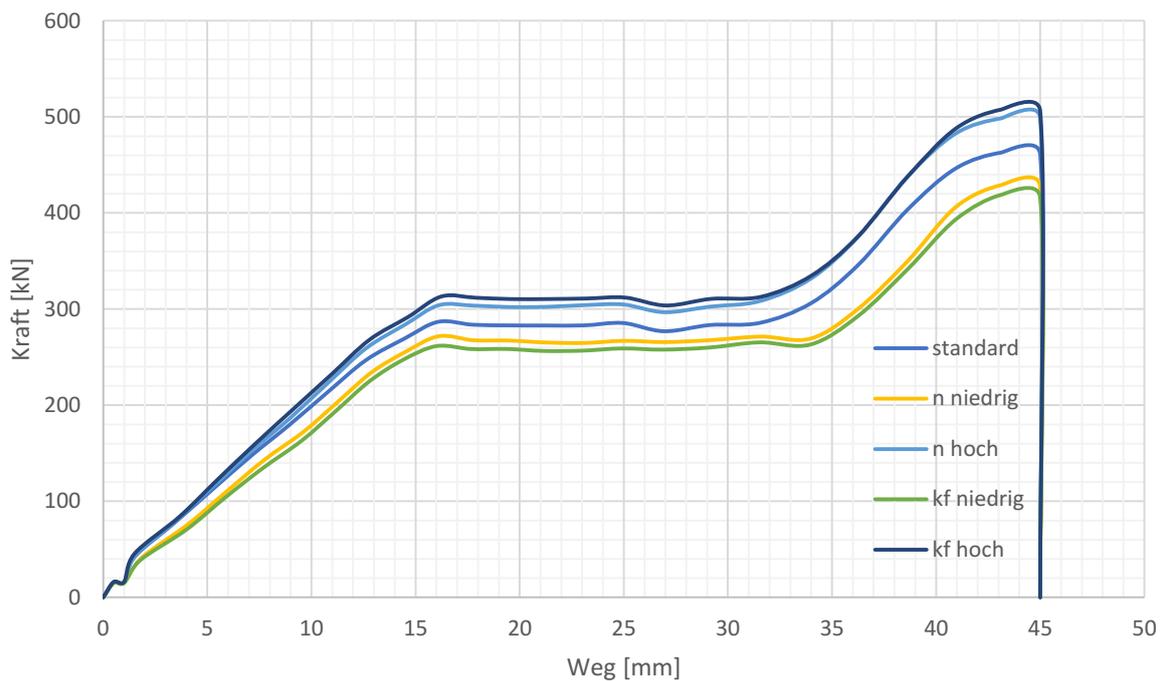


Abbildung 3.19: Kraftverlauf DX2304

6016

Bei der Aluminiumlegierung stellt sich ein ähnlicher Kraftverlauf wie beim hochfesten Stahl ein, wie in **Abbildung 3.20** zu sehen ist. Bis zu einer Ziehtiefe von etwa 15mm steigt die Kraft an, danach bleibt sie konstant und ab einer Ziehtiefe von 30mm steigt sie noch einmal an und erreicht das Maximum am Ende des Vorganges.

Die Veränderung der Parameter wirkt sich sehr ähnlich wie bei den anderen beiden Werkstoffen auf die Tiefziehkraft aus. Die Veränderungen des n -Wertes und der Fließspannung haben eine nahezu idente Auswirkung auf die maximale Kraft, wie in **Abbildung 3.20** zu sehen ist. Eine Erhöhung der beiden Werte führt zu einer größeren

benötigten Kraft, eine Erniedrigung zu einer geringeren Kraft. Die höchste Maximalkraft wird bei einem erhöhten n -Wert mit 159,5kN benötigt, was der einzige Unterschied zu den beiden vorherigen Materialien ist. Die niedrigste Maximalkraft wird bei niedriger Fließspannung (128kN) benötigt. Der Wert für die Maximalkraft bei der Simulation mit den Standardwerten liegt bei 143kN.

Eine Veränderung vom r -Wert oder dem Reibungskoeffizienten hat keine großen Auswirkungen auf die Tiefziehkraft.

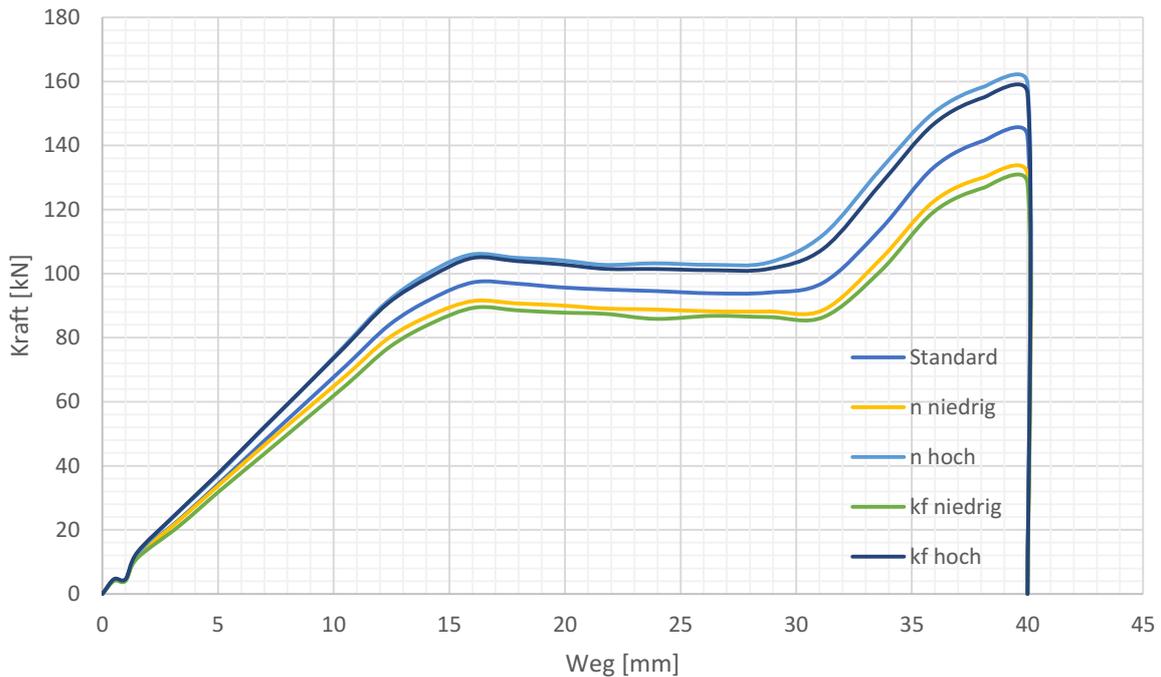


Abbildung 3.20: Kraftverlauf 6016

Abbildung 3.21 zeigt, wie stark die Maximalkraft, der Kraftverläufe der Simulationen mit abgeänderten Parametern, von der Maximalkraft, des Verlaufes der Simulation mit den Standardwerten, abweicht. In anderen Worten ist zu sehen welche Einflussgröße sich wie stark auf die maximale Tiefziehkraft auswirkt. Als Basis für dieses Diagramm wurden die maximalen Abweichungen von den Standardwerten herangezogen und aliquot auf 100% aufgeteilt.

Es ist klar zu sehen, dass, wie bereits vorhin gesagt und in den Diagrammen gezeigt, der n -Wert und die Fließspannung die größten Abweichungen verursachen, während der r -Wert und der Reibungskoeffizient sich nur minimal von den Standardwerten abheben.

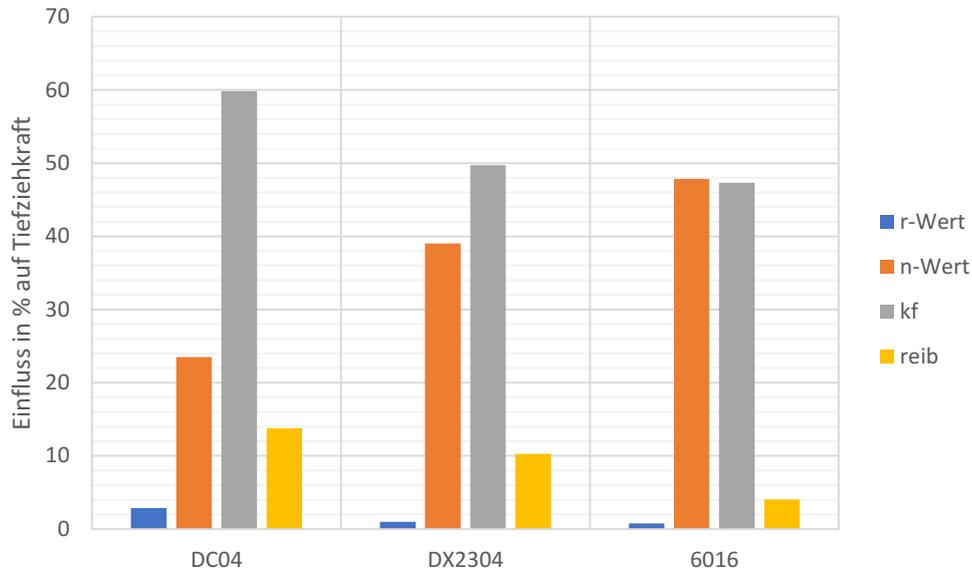


Abbildung 3.21: Einfluss der Parameter auf die maximale Tiefziehkraft

3.5.2.3 Materialausdünnung

Die Ausdünnung des Materials nach und während dem Tiefziehprozess wird in diesem Kapitel analysiert. Die Auswertung der Ausdünnung gibt Aufschluss darüber, in welchen Bereichen des Teiles ein kritischer Wert über- oder unterschritten wird. Auch kann gut vorausgesagt werden, in welchen Gebieten es bei einem möglichen Weiterzug zu Fehlern wie Reißen kommen kann.

DC04

In **Abbildung 3.22** ist die Materialdickenverteilung des Tiefziehstahles DC04 alle 15mm des Ziehweges der Simulation mit den Standardwerten dargestellt. Die Werte reichen von 1,1mm (violette Bereiche) bis 0,7 mm (rote Bereiche). Es ist gut zu erkennen, dass wie zuvor im Literaturteil beschrieben, die Dicke im Napfboden konstant bleibt, im Bodenradius und in der Wand das Material ausdünn und im Flansch die Dicke zunimmt.

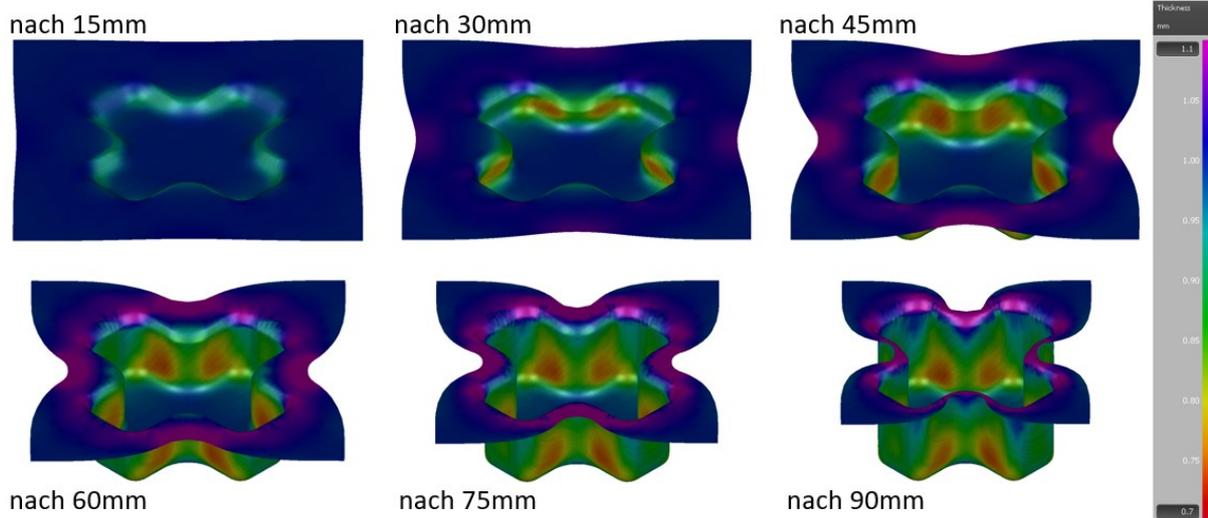


Abbildung 3.22: Materialausdünnung alle 15mm des Tiefziehvorganges

Die sich am meisten auswirkenden Parameter auf die Ausdünnung des Materials sind der r -Wert und der Reibkoeffizient. Die Größe der Einflüsse der anderen Parameter wie n -Wert oder die Fließspannung liegen alle innerhalb der Kurven vom hohen und niedrigen r -Wert, sowie der Kurven des Reibungskoeffizienten.

Wie in **Abbildung 3.23** dargestellt, variiert die Ausdünnung am stärksten in den Bereichen des Stempelradius und in den Wandbereichen. Gut zu erkennen ist auch, dass sich ein höherer r -Wert, wie im Literaturteil beschrieben, positiv auf das Endergebnis auswirkt, da das Material mit dem höheren r -Wert geringere Abweichungen von der Ausgangsmaterialdicke von 1mm aufweist. Im Diagramm der Querrichtung rechts oben in **Abbildung 3.23** sind die Kurven bei verändertem Reibungskoeffizienten dargestellt.

Die Diagramme der restlichen Parameter wurden auf Grund der besseren Übersicht nicht hinzugefügt, aber auch ein höherer n -Wert, sowie ein geringerer Reibungskoeffizient, wirken sich positiv auf das Endergebnis im Bereich des Stempelradius und der anschließenden Wand aus. Beim n -Wert ist das auf die höhere Verfestigung des Materials zurückzuführen. Bei geringeren Reibungsverhältnissen ist die geringere Ausdünnung das Resultat davon, dass das Material leichter nachfließen kann.

Eine Änderung der Fließspannung führt zu vernachlässigbaren Änderungen der Dicke des fertigen Tiefziehteiles. In **Abbildung 3.23** unten rechts stehen die Walzrichtung und Querrichtung miteinander im Vergleich. Hier ist zu erkennen, dass die Ausdünnung quer zur Walzrichtung geringer ist als in Walzrichtung. Grund dafür ist die Textur des Bleches nach dem Walzen.

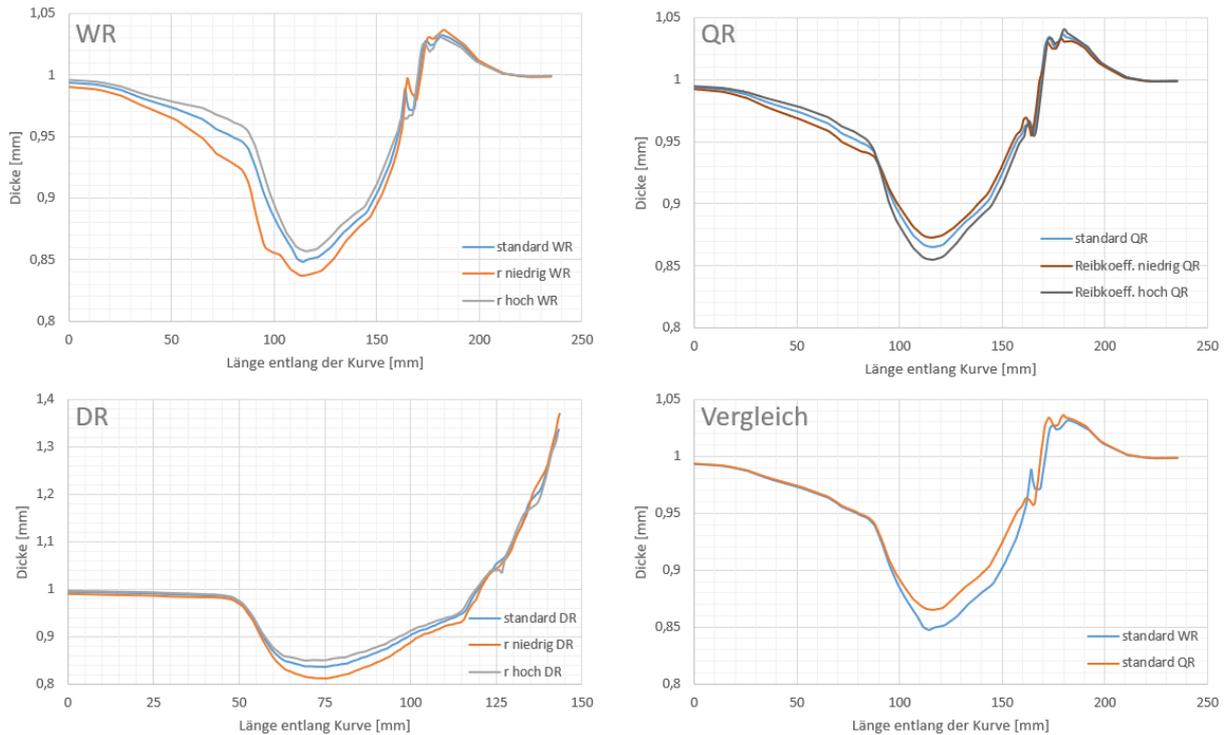


Abbildung 3.23: Materialdickenverlauf DC04

In **Abbildung 3.24** ist dargestellt, welchen Einfluss die verschiedenen Parameter auf die maximale Dickenänderung haben und wie hoch dieser ist. In WR und QR liegt die Stelle der maximalen Dickenänderung beim Stempelradius (90mm Länge im Diagramm), in DR am Ende des Flansches (bei 145mm im Diagramm).

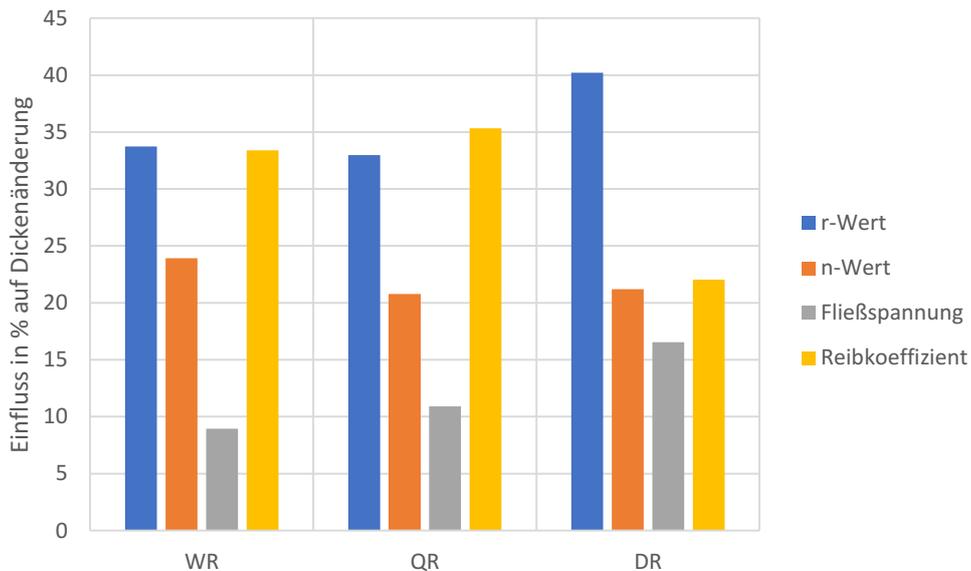


Abbildung 3.24: Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung

DX2304

Die Materialdickenverteilung der Simulation mit dem hochfesten Stahl ist in **Abbildung 3.25** über das gesamte Bauteil dargestellt. In Walzrichtung (verläuft diagonal von links unten nach rechts oben) ist beim fertig gezogenen Teil nach 45mm Ziehweg zu erkennen, dass das Blech an den Radien dünner ist als in Querrichtung. Die roten Bereiche stellen die maximale Ausdünnung mit etwa 0,3mm Dickenabnahme dar. Hingegen werden die violetten Bereiche während der Umformung auf 1,1mm aufgedickt.

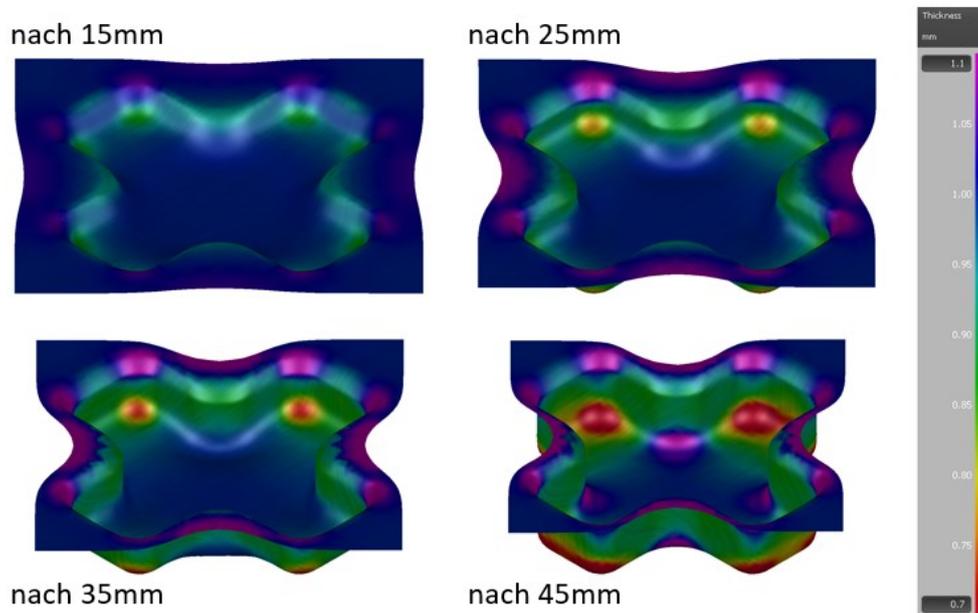


Abbildung 3.25: Materialausdünnung während des Tiefziehvorganges

In **Abbildung 3.26** sind die Dickenverläufe des hochfesten DX2304 Stahls über die vorhin definierten Längen dargestellt. Im Gegensatz zum Tiefziehstahl DC04 spielt hier in Walz- und Querrichtung nur die Schwankung des r -Wertes eine nennenswerte Rolle. Es ist zu erkennen, dass sich ein hoher r -Wert positiv auf die Materialausdünnung auswirkt. Das deckt sich wiederum mit der Aussage im Literaturteil, dass bei hohem r -Wert das Blech seine Dicke eher konstant hält. In den Diagrammen sind die dünnsten Stellen an den Radien bei etwa 90mm Kurvenlänge gut zu erkennen.

In Diagonalrichtung hingegen wirkt sich neben dem r -Wert auch der n -Wert auf die Ausdünnung aus, vor allem im Bereich der Wand des Tiefziehteiles. Die anderen Parameterschwankungen haben in Diagonalrichtung ebenso nur einen geringen Einfluss auf die Blechdicke.

Rechts unten in der **Abbildung 3.26** sieht man den Unterschied zwischen WR und QR. Wie beim DC04 zuvor, ist die Ausdünnung in Querrichtung geringer als in Walzrichtung.

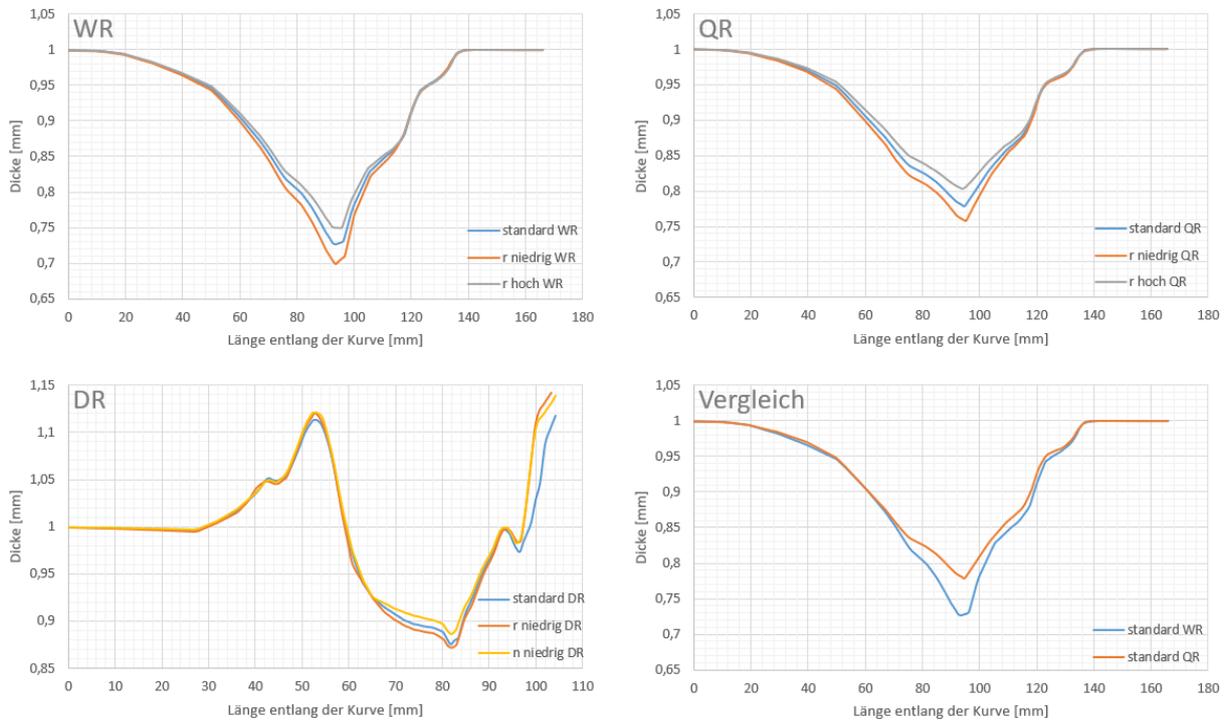


Abbildung 3.26: Materialdickenverlauf DX2304

In **Abbildung 3.27** wurden die maximalen Abweichungen der Parameter mit den Werten aus der Simulation mit den Standardwerten verglichen. Es wurde jeweils die Stelle mit der größten Materialausdünnung für diese Berechnung herangezogen (Stempelradius in WR und QR, Wandbereich bei circa 82mm in DR). Das Ergebnis liefert eine Erkenntnis darüber, wie stark der Einfluss der jeweiligen Parameter auf die Dickenänderung im Vergleich zu den Standardwerten ist.

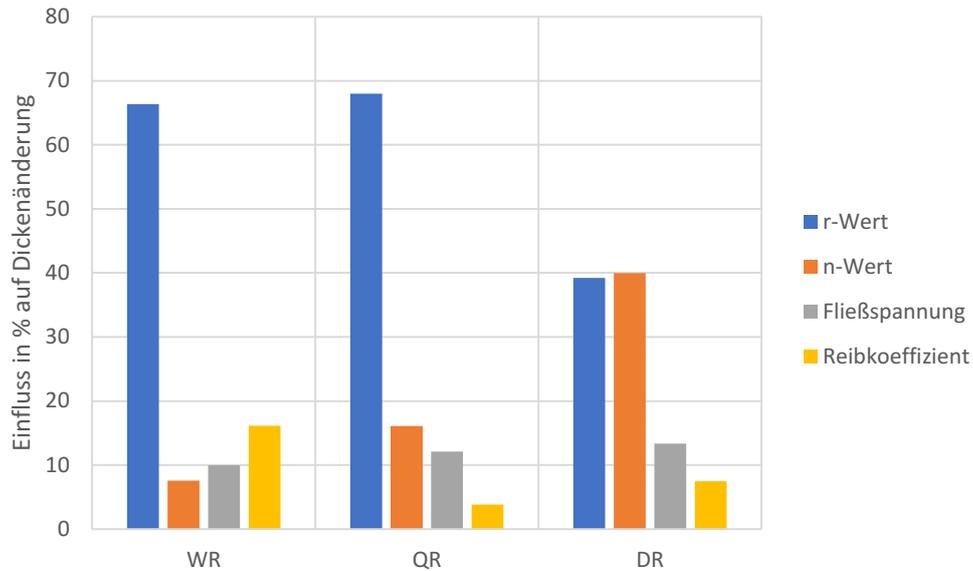


Abbildung 3.27: Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung

6016

Die Ausdünnung beziehungsweise der Dickenverlauf der Aluminiumlegierung 6016 ist in **Abbildung 3.28** über das Gesamte Bauteil in 10mm Schritten bis zum Ende des Tiefziehvorganges dargestellt. An den roten Bereichen in den Ecken der Geometrie ist die Ausdünnung am größten, die Werte liegen hier um 0,7mm Blechdicke. Hier würden bei größerer Ziehtiefe auch die ersten Reißer entstehen. Die violetten Stellen weisen eine Blechdicke von etwa 1,1mm auf, diese sind also jene Bereiche der Aufdickung. Wie auch beim Werkstoff zuvor ist zu erkennen, dass die Ausdünnung im Bereich des Stempelradius in Walzrichtung größer ist als in Querrichtung.

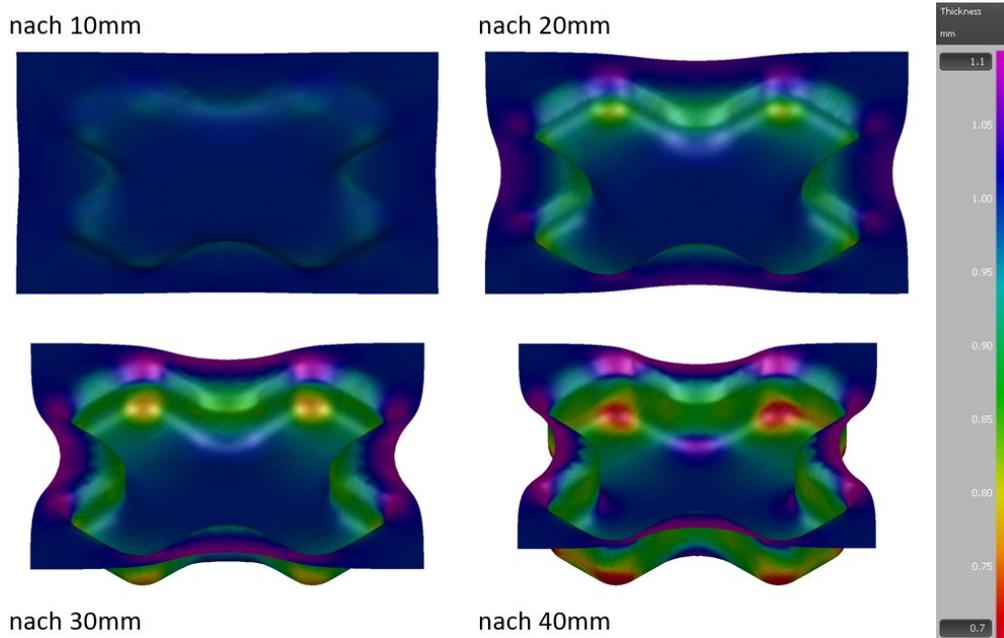


Abbildung 3.28: Materialausdünnung während des Tiefziehvorganges

In **Abbildung 3.29** sind die Diagramme der Dicke über die Länge in WR QR und DR dargestellt. Unten rechts werden die Dickenverläufe der Simulation mit den Standardwerten von WR und QR miteinander verglichen. Es ist zu erkennen, dass sich in Walzrichtung eine geringere Dicke ab dem Stempelradius über die Wand einstellt. Das ist auf die Textur des gewalzten Werkstoffes zurückzuführen.

In Walzrichtung hat bei der Aluminiumlegierung, im Gegensatz zu den anderen beiden Werkstoffen, der Reibungskoeffizient den größten Einfluss auf die minimale Dicke. Bei hohem Koeffizienten wird die geringste Blechdicke im fertigen Teil erreicht, während bei geringer Reibung das Material nicht so stark ausdünn. Grund dafür ist, dass bei hoher Reibung der Einzug der Platine erschwert wird und somit das Blech stärker ausdünn.

In Querrichtung hingegen hat wieder der r -Wert den größten Einfluss auf die minimale Dicke des Tiefziehteiles. Bei niedrigem r -Wert dünnt das Material stärker aus als bei hohem r -Wert, was auch die Aussage im Theorieteil bestätigt, dass ein hoher r -Wert für ein besseres Tiefziehverhalten sorgt.

In Diagonalrichtung haben die Parameterschwankungen nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis, verglichen mit der Simulation mit den Standardwerten.

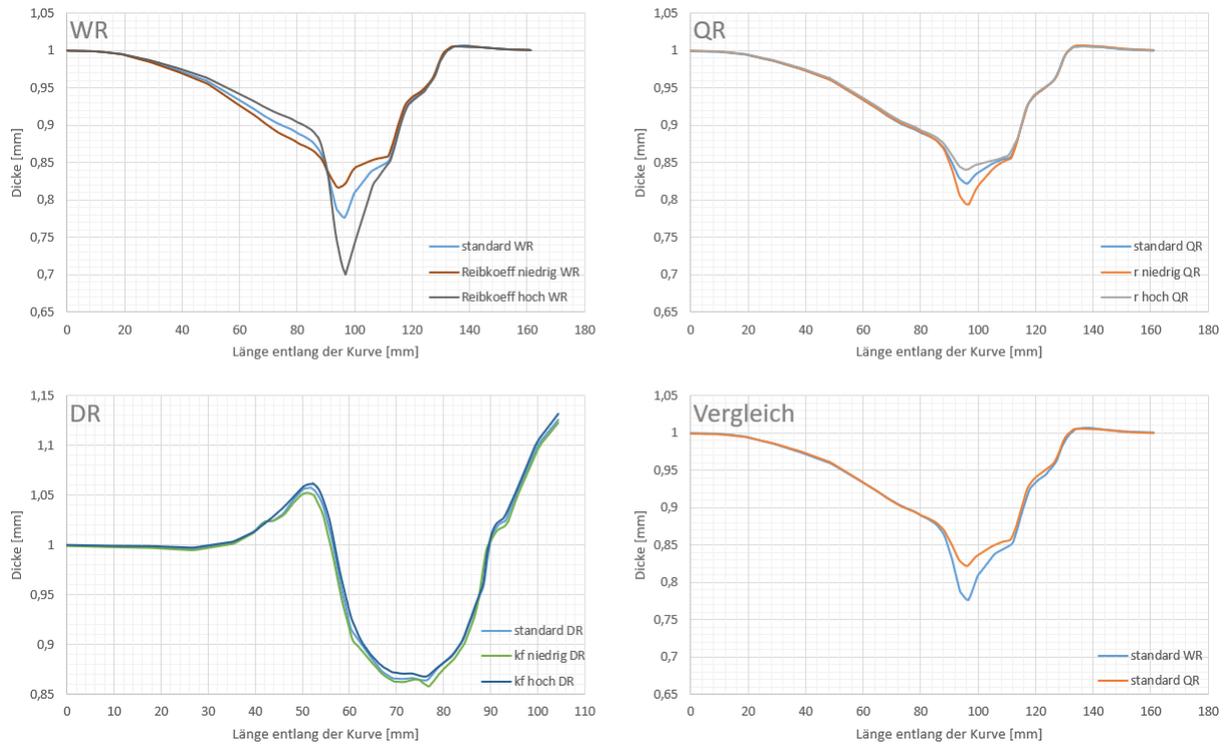


Abbildung 3.29: Materialdickenverlauf 6016

Das Balkendiagramm in **Abbildung 3.30** zeigt wiederum den Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung an den Stellen in WR, QR und DR mit den geringsten Blechdicken. Es ist zu erwähnen, dass in Diagonalrichtung, auf Grund der geringen Abweichung von dem Ergebnis mit den Standardwerten, die Balken keine große Aussagekraft haben.

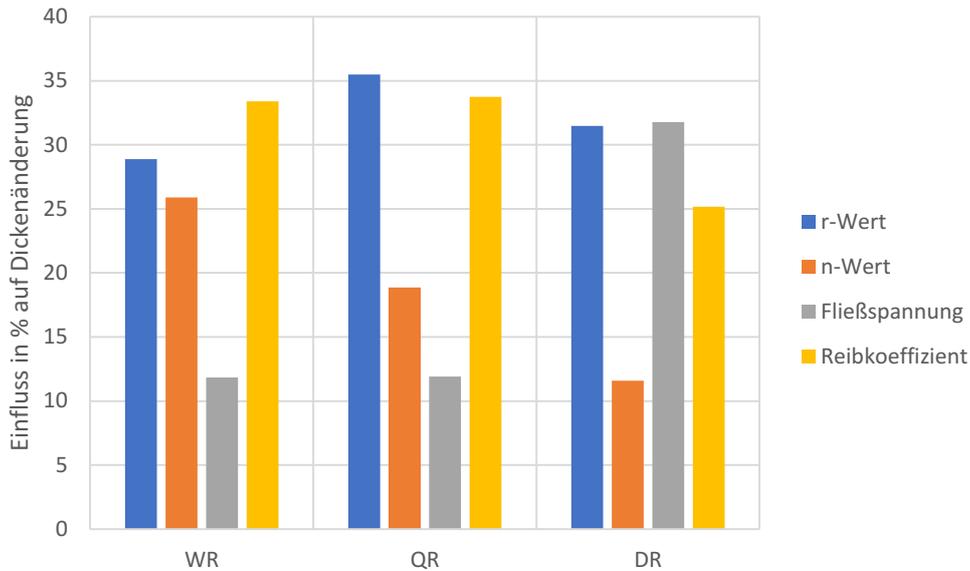


Abbildung 3.30: Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung

3.5.2.4 Rückfederung

Die Rückfederung spielt in der Blechumformung eine wesentliche Rolle, da in der Industrie eine sehr hohe Präzision gefordert wird und dadurch nur geringe Toleranzen gegeben sind. In dieser Hinsicht ist es bei der Simulation unumgänglich auch die Rückfederung nach Entfernung der Werkzeuge zu analysieren, um gegebenenfalls die Werkzeuggeometrie anzupassen, um die geforderten Toleranzen einzuhalten.

DC04

In **Abbildung 3.31** ist für den Tiefziehstahl DC04 mit den Standardwerten die Rückfederung in normaler Richtung von der Oberfläche dargestellt. Die positiven Wertebereiche (grün bis rot) bedeuten wie zuvor eine Rückfederung nach innen in den tiefgezogenen Hohlbereich, mit Höchstwerten bis 0,22mm. Die negativen Bereiche (grün bis violett) bedeuten eine Rückfederung nach außen, zum Beispiel bildet der Boden des Teiles eine bauchige Rundung nach außen nach Wegnahme der Tiefziehwerkzeuge.

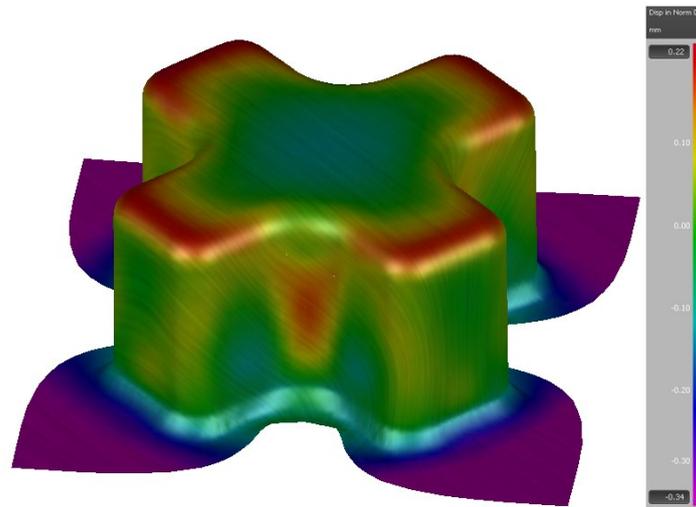


Abbildung 3.31: Rückfederung DC04

Bei der Studie der Abweichungen der Werte von den Standardwerten, kommt man zu dem Schluss, dass die Streuung der Fließspannung und des n -Wertes die größten Abweichungen in Bezug auf das Ergebnis mit den Standardwerten, in Walz- und Querrichtung, verursachen. In Diagonalrichtung ist es neben der Fließspannung der Reibungskoeffizient, der das Ergebnis beeinflusst.

In den **Abbildungen 3.32** und **3.33** sind links die Querschnitte des tiefgezogenen Napfes mit den Standardwerten in Walzrichtung, Querrichtung und Diagonalrichtung abgebildet, rechts dazu die Höhe der Rückfederung in mm. Zu den Querschnitten ist zu sagen, dass hier zur besseren Veranschaulichung die Rückfederung um den Faktor 10 erhöht wurde. Die graue Linie stellt das Tiefziehteil ohne Rückfederung dar. In Walz- und Querrichtung treten grundsätzlich große Abweichungen von der Zielgeometrie im Bereich des Stempelradius (bis 0,22mm) und im Bereich des Flansches (bis 0,6mm) auf. In Diagonalrichtung tritt die größte Rückfederung im Wandbereich (0,15mm) auf.

Wie zuvor beschrieben weisen Tiefziehstähle, wie der DC04 eher geringe Rückfederungswege auf. Die **Abbildungen 3.32** und **3.33** zeigen, je höher die Fließspannung, desto größer ist auch die Rückfederung. Der Grund ist die höhere Festigkeit, welche mit höherer Fließspannung einhergeht. Bei einer Änderung des n -Wertes sieht man, dass ein höherer n -Wert größere Rückfederungen verursacht. Die Kurven der anderen abgeänderten Werte wie r -Wert oder der Reibungskoeffizient weichen von der Kurve der Standardwerte nur sehr gering ab, deshalb sind sie in den Diagrammen nicht abgebildet.

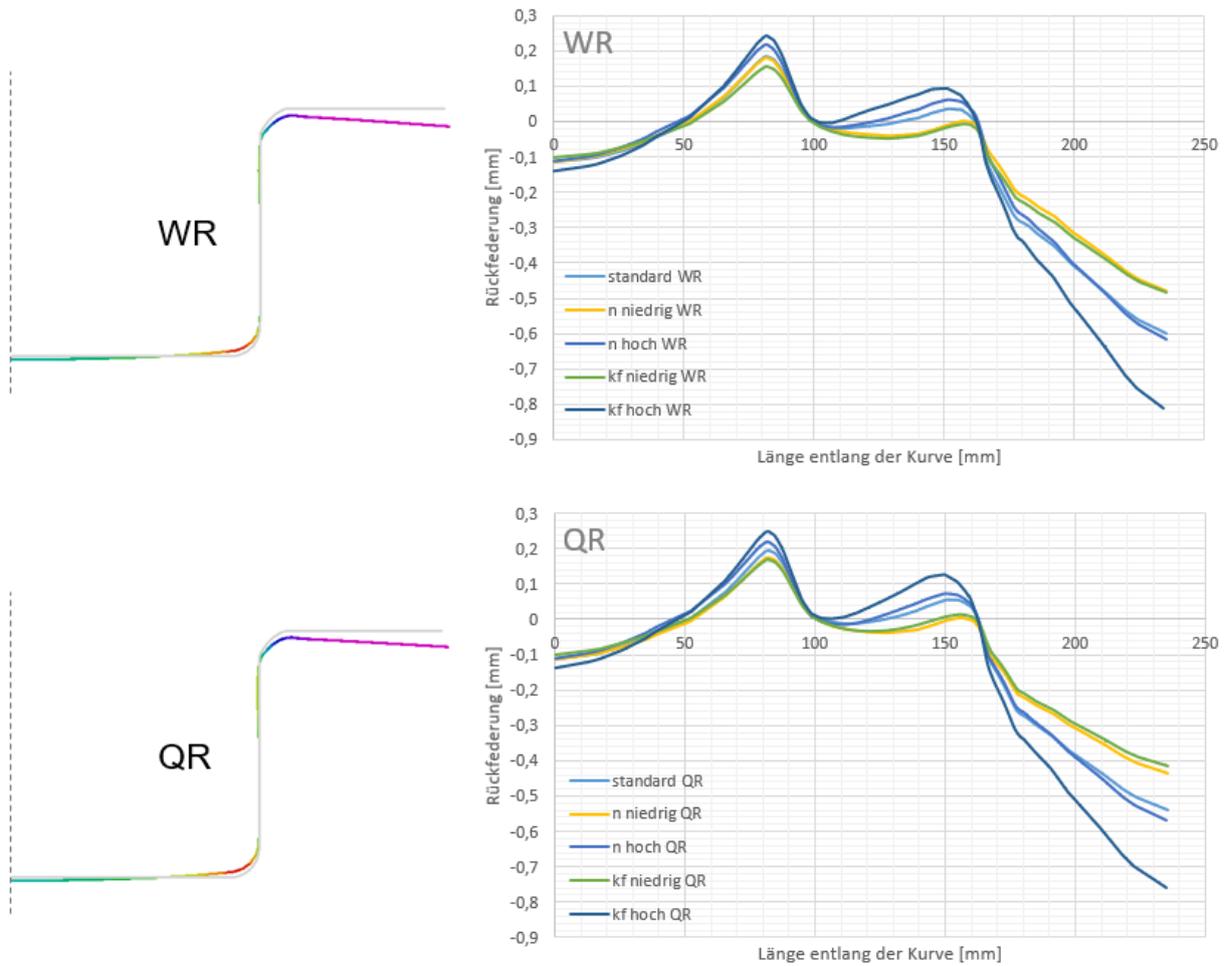


Abbildung 3.32: Rückfederungsverlauf in WR und QR

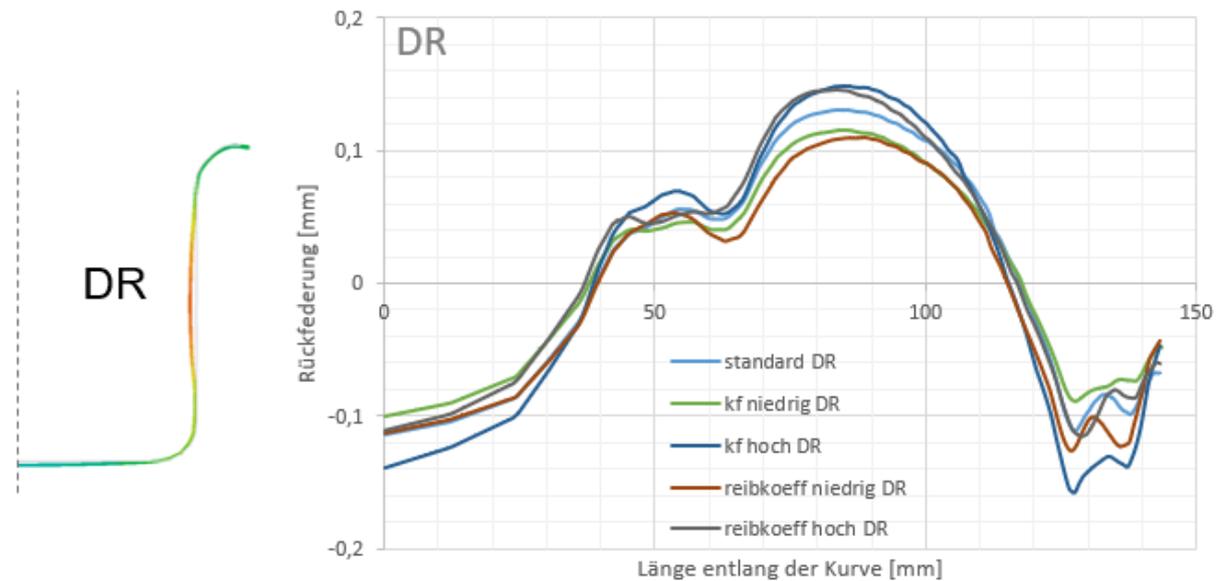


Abbildung 3.33: Rückfederungsverlauf in DR

In **Abbildung 3.34** sind die Einflüsse der Parameterschwankung auf das Ergebnis in Prozent dargestellt. Für die Berechnung der Balken wurde für WR und QR die größte Rückfederung in negativer Richtung, und in DR die größte Rückfederung in positiver Richtung herangezogen. Hervorzuheben ist der Einfluss des Reibungskoeffizienten. In Walzrichtung und Querrichtung beeinflusst er das Ergebnis kaum im Vergleich zum Standardergebnis. Während in Diagonalrichtung die Reibung das Ergebnis am höchsten beeinflusst.

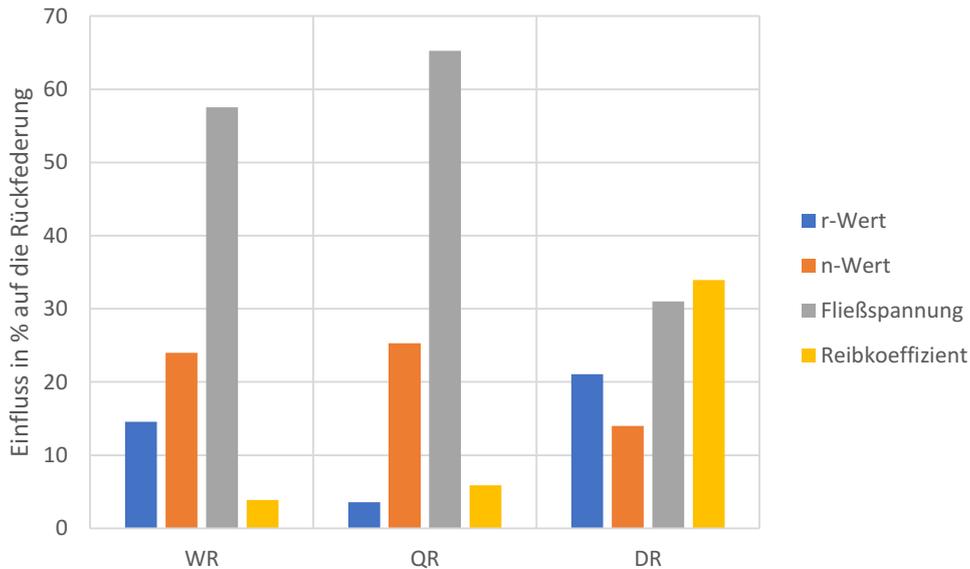


Abbildung 3.34: Einfluss auf die maximale Rückfederung

DX2304

In **Abbildung 3.35** ist die Rückfederung in normaler Richtung auf die Blechoberfläche des gesamten Bauteiles des DX2304 Werkstoffes mit den Standardwerten dargestellt. Wieder bedeuten die Farben Rot bis Grün eine Rückfederung nach innen in den tiefgezogenen Hohlkörper und die Farben Grün bis Violett eine Rückfederung nach außen. Wie im Literaturteil zuvor bereits erwähnt nimmt die Rückfederung nach Beseitigung der Werkzeuge zu, je höherfest der Werkstoff ist. Das stimmt auch mit den Ergebnissen der Simulationen überein. Während die Rückfederung beim DC04 Werkstoff von -0,6 bis 0,22mm schwankt, ändern sich diese Werte beim DX2304 auf -0,7 bis 0,35mm.

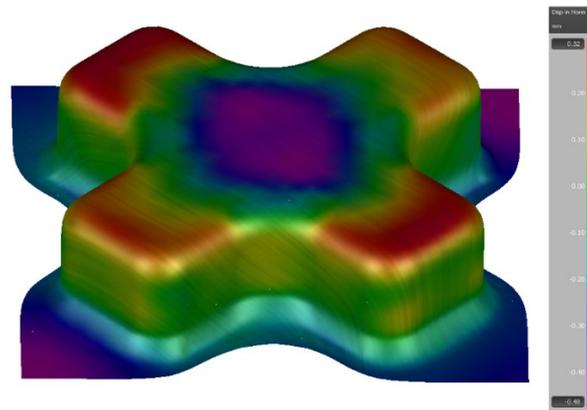


Abbildung 3.35: Rückfederung DX2304

Die **Abbildungen 3.36** und **3.37** zeigen die Werte der Rückfederung entlang den drei Richtungen (WR, QR, DR). Der Boden des Tiefziehteiles federt sehr stark zurück (bis -0,5mm). Auch der Stempelradiusbereich federt sehr stark nach innen nach Wegnahme der Werkzeuge (bis 0,35mm). Der zurückbleibende Zipfel in Querrichtung weist die höchste Rückfederung von bis zu -0,7mm auf. Die Parameterschwankungen, vor allem die Schwankung des r -Wertes, verändern die Rückfederung ebenfalls. Die größten Schwankungen treten im Bereich vom Stempelradius und an den Enden der Platine auf. Interessant zu beobachten ist, dass sich die Verläufe von r niedrig und r hoch in Walz- und Querrichtung in den Diagrammen gegenläufig verhalten.

In Diagonalrichtung weichen die Ergebnisse bei veränderteter Fließspannung am meisten von den Standardwerten ab. Jedoch sind hier die Ergebnisse relativ ausgeglichen.

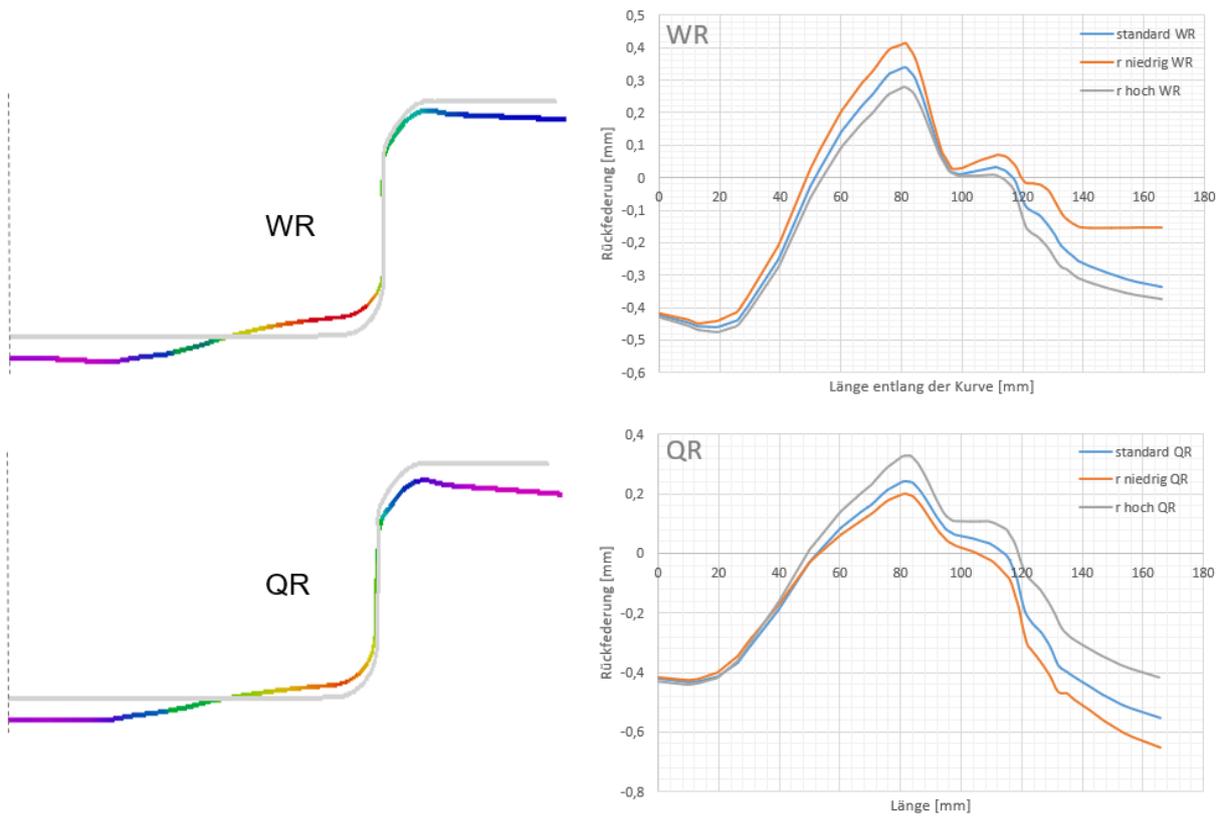


Abbildung 3.36: Rückfederungsverlauf in WR und QR

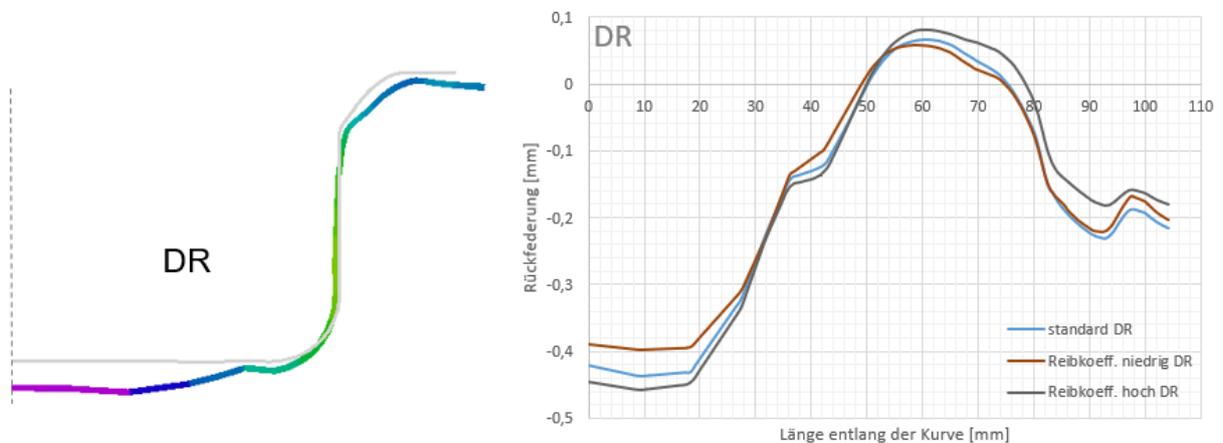


Abbildung 3.37: Rückfederungsverlauf in DR

In **Abbildung 3.38** kann abgelesen werden, welcher Parameter wie hoch vom Ergebnis der Standardwerte abweicht. Wie bereits erwähnt ist es in Walz- und Querrichtung der r -Wert, der das Ergebnis am meisten beeinflusst, in Diagonalrichtung der Reibkoeffizient. Für diese Auswertung wurde in Walz- und Querrichtung die maximale positive Rückfederung (beim Stempelradius) und in Querrichtung die größte negative Rückfederung (im Napfboden) berücksichtigt.

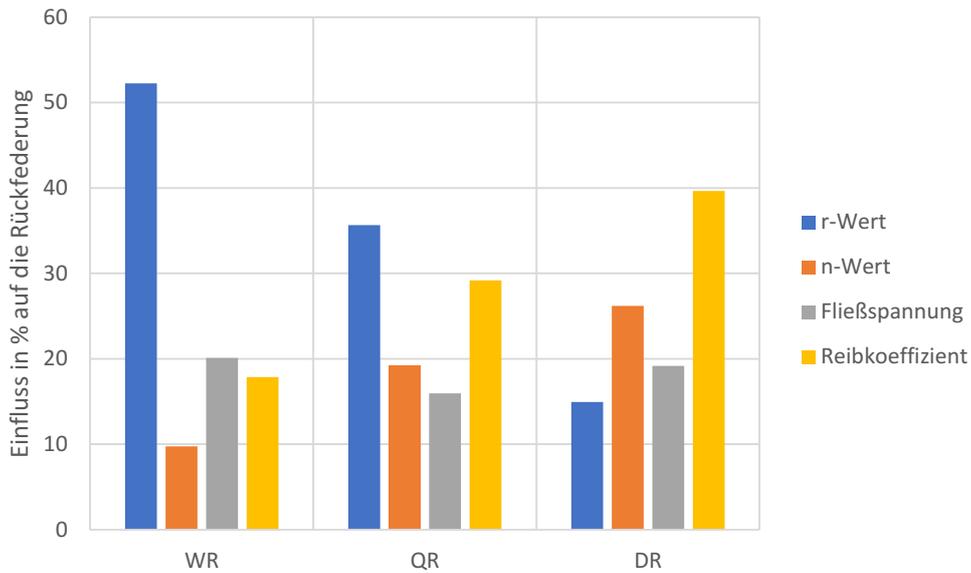


Abbildung 3.38: Einfluss auf die maximale Rückfederung

6016

In **Abbildung 3.39** ist die Rückfederung in normaler Richtung zur Blechoberfläche für das fertige Teil nach Wegnahme der Werkzeuge abgebildet. Wieder bedeuten die negativen Werte (violett bis grün) eine Rückfederung nach außen und die positiven Werte (grün bis rot) eine Rückfederung nach innen in den Hohlraum des Kreuznapfes. Generell liegen die Werte der Rückfederung wie im Literaturteil bereits beschrieben zwischen jenen des Tiefziehstahls und des hochfesten Stahls. In der **Abbildung 3.39** ist auch zu erkennen, dass die Rückfederung im Boden, am Radius und in der Wand in Walzrichtung größer ist als quer zur Walzrichtung.

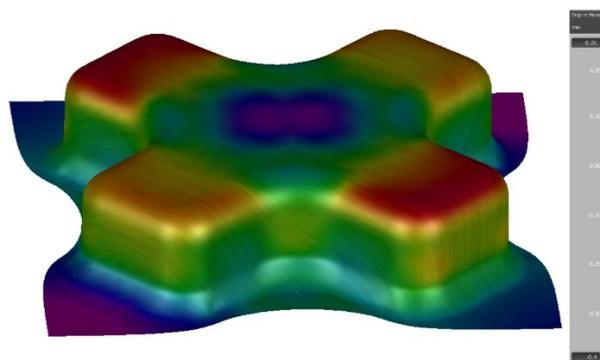


Abbildung 3.39: Rückfederung 6016

Abbildungen 3.40 und **3.41** unten zeigen, wie zuvor, die Rückfederung der Geometrie um den Faktor 10 erhöht im Gegensatz zu der nicht Rückgefederten Form (graue Linie). Die Querschnitte entsprechen dem Ergebnis mit den Standardwerten.

In den Diagrammen daneben kann der Rückfederungsverlauf zu den Schnittbildern abgelesen werden. Eine Erhöhung oder Erniedrigung des Reibungskoeffizienten bewirkt beim Aluminium die größten Abweichungen vom Ergebnis mit den Standardwerten. In Walzrichtung bewirkt ein hoher Reibkoeffizient eine größere Rückfederung nach innen und eine niedrigere Rückfederung nach außen, im Gegensatz zu einem niedrigen Reibungskoeffizienten. In Querrichtung wirkt sich ein hoher Reibungskoeffizient, vom Boden über die Wand, positiv auf das Bauteil aus. Nur im abschließenden Flansch federt das Material bei hoher Reibung stark zurück.

Auch in Diagonalrichtung spielt der Reibungskoeffizient bei der Abweichung zu den Standardwerten die größte Rolle aller Parameter. Hier verhält sich das Tiefziehteil nach entfernen der Werkzeuge ähnlich wie in Querrichtung bei Veränderung des Reibungskoeffizienten. Bei hoher Reibung federt das Material weniger zurück als bei niedrigeren Reibungsverhältnissen. Ein umgekehrtes Verhalten zeigt sich wie zuvor im letzten auslaufenden Teil der Geometrie.

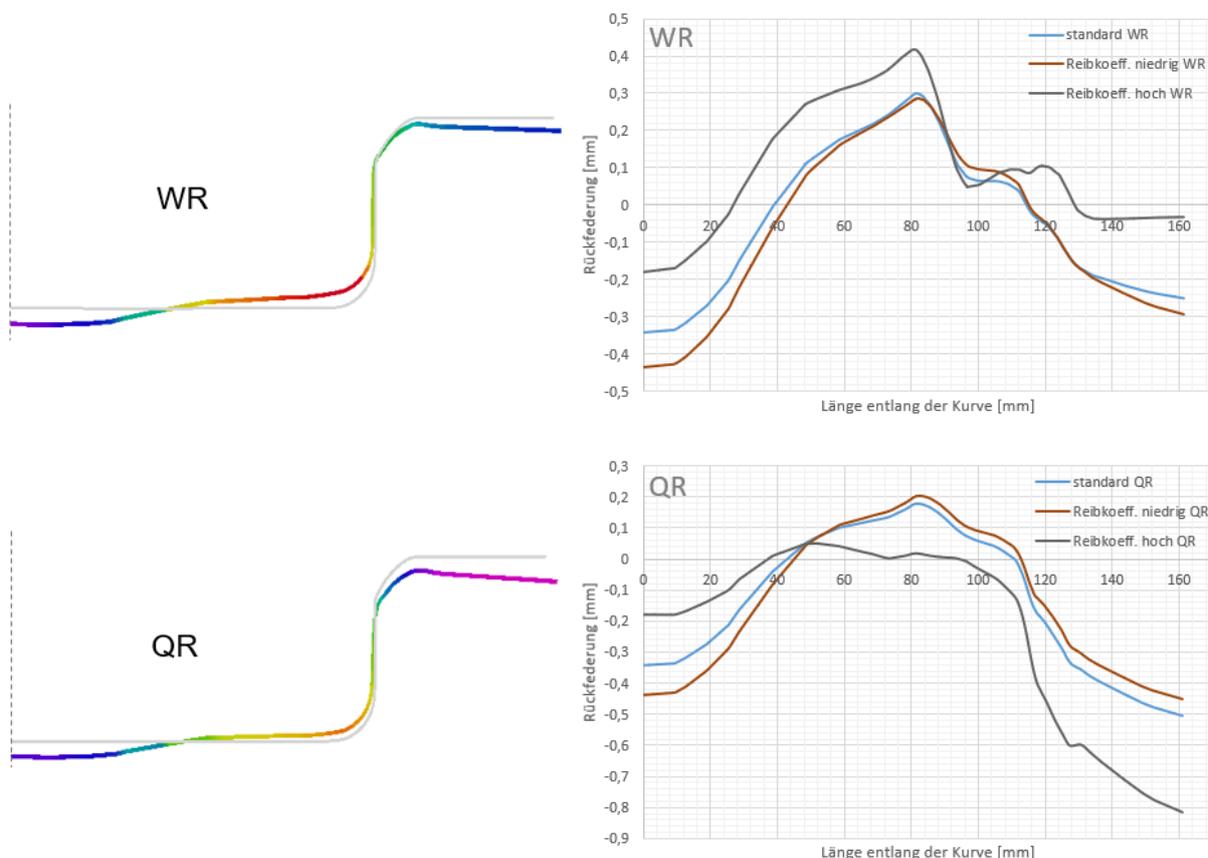


Abbildung 3.40: Rückfederungsverläufe in WR und QR

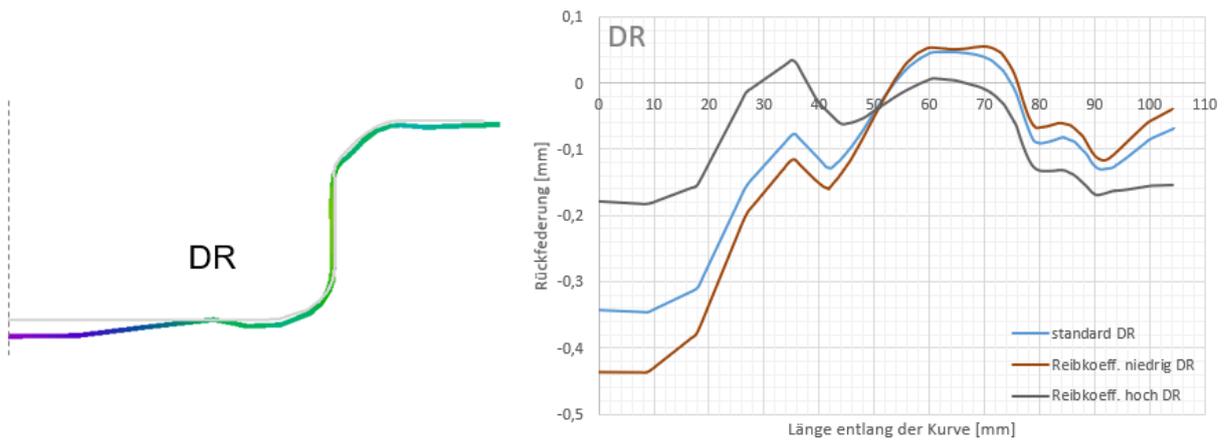


Abbildung 3.41: Rückfederungsverläufe in DR

In **Abbildung 3.42** ist wiederum ein Balkendiagramm dargestellt, welches den Einfluss der einzelnen Parameter auf die maximale Rückfederung darstellt.

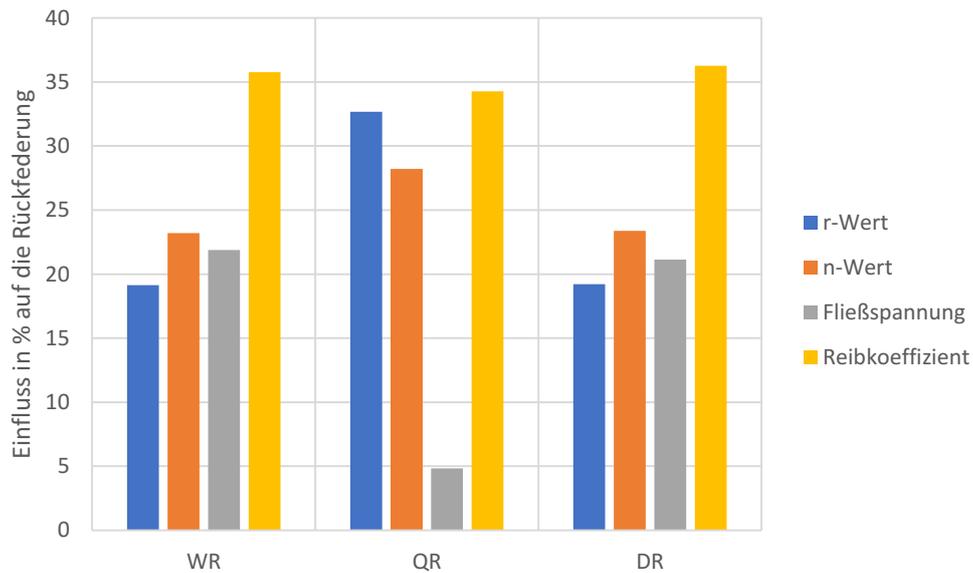


Abbildung 3.42: Einfluss der Parameter auf die Rückfederung

3.5.2.5 Hauptdehnungen

Die Hauptdehnungen sind jene in Richtung des Tiefziehvorganges, sprich in Richtung des Stempelhubes. Sie sind wichtig zu analysieren, um Bereiche ausfindig zu machen, welche sehr hohen Dehnungen erfahren und deshalb der Gefahr von Reißen ausgesetzt sind.

DC04

In **Abbildung 3.43** ist die Hauptdehnungsverteilung des Tiefziehstahles DC04 während des Tiefziehprozesses der Standardwerte dargestellt. In den roten Bereichen, also an den Wandbereichen, ist das Material am höchsten gedehnt (bis 60%). Das deckt sich auch mit den vorherigen Aussagen, dass die Wandstärke in diesen Bereichen am geringsten ist.

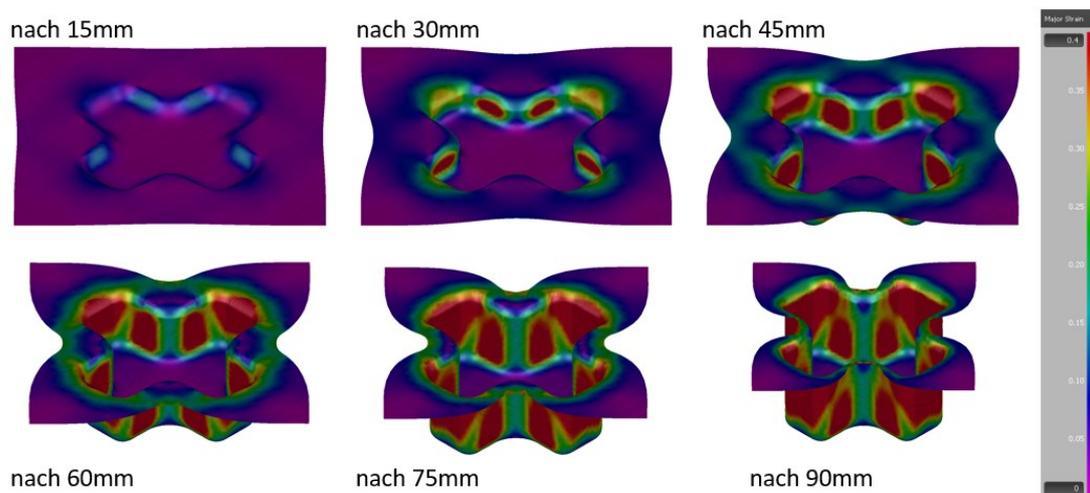


Abbildung 3.43: Dehnung am Napf während des Prozesses

Die Analyse der Parameterstudie zeigt, dass der Reibkoeffizient den größten Einfluss auf die Dehnung hat. Das kommt davon, dass bei hoher Reibung, wie zuvor gezeigt, mehr Kraft nötig ist, um die Platine zu ziehen. Dadurch wird das Material stärker gedehnt. Hingegen bei geringer Reibung wird weniger Kraft benötigt und die Platine wird weniger gedehnt. In Walzrichtung zeigt auch ein niedriger n -Wert größere Abweichungen von den Ergebnissen der Standardwerte. Ein niedriger n -Wert führt dazu, dass das Material weniger stark verfestigt. Somit ist die Dehnung des Materials auch größer. In Querrichtung zeigt sich, dass eine niedrige Fließspannung größere

Dehnungen verursacht als der n -Wert. Generell sind die Abweichungen aller Parameter in Walz- und Querrichtung sehr gering. **Abbildung 3.44** zeigt die Diagramme der Dehnung über die Länge der Walzrichtung, Diagonalrichtung und Querrichtung.

Eine Abweichung der vorherigen Aussage ist in Diagonalrichtung zu erkennen. Hier resultiert ein niedriger n -Wert in kleineren Dehnungen als beim Ergebnis mit dem Standardwert. Auch entstehen in Diagonalrichtung keine nennenswerten Schwankungen bei unterschiedlichen Reibkoeffizienten, das hängt mit der Orientierung der Platine zum Stempel zusammen. In Diagonalrichtung wird das Material sehr schnell in die Matrize gezogen, dadurch ist in dieser Richtung weniger Material zwischen Matrize und Niederhalter. Weniger Blech bedeutet weniger Fläche wo die Reibung wirken kann, somit hat hier der Reibkoeffizient wenig Einfluss auf das Ergebnis.

Der Vergleich von Walzrichtung zu Querrichtung zeigt, dass in Walzrichtung größere Dehnungen entstehen als quer zu dieser. Alle anderen Werteänderungen wie die des r -Wertes oder der Fließspannung haben einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis und sind deshalb in den Diagrammen nicht berücksichtigt.

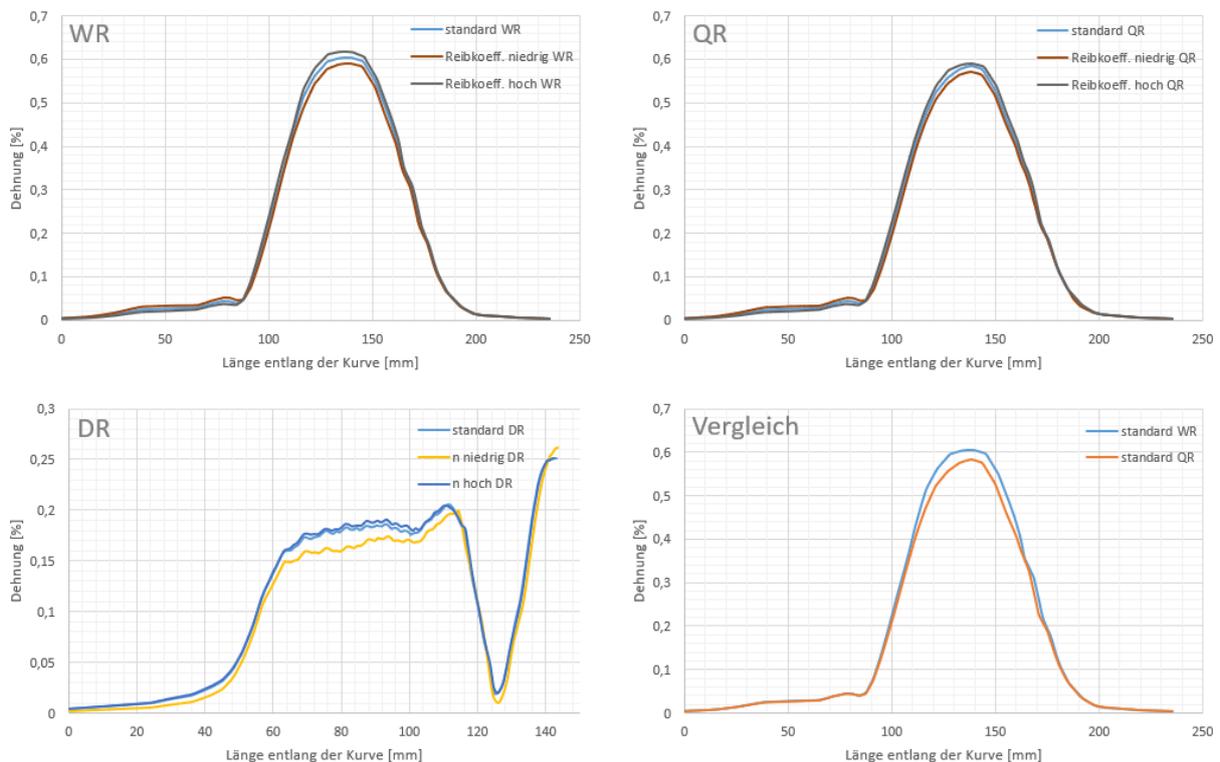


Abbildung 3.44: Dehnungsverläufe über die Länge der Auswertungsrichtungen

Abbildung 3.45 zeigt den Einfluss des r -Wertes, des n -Wertes, der Fließspannung und des Reibkoeffizienten auf die maximale Dehnung des Tiefziehteiles.

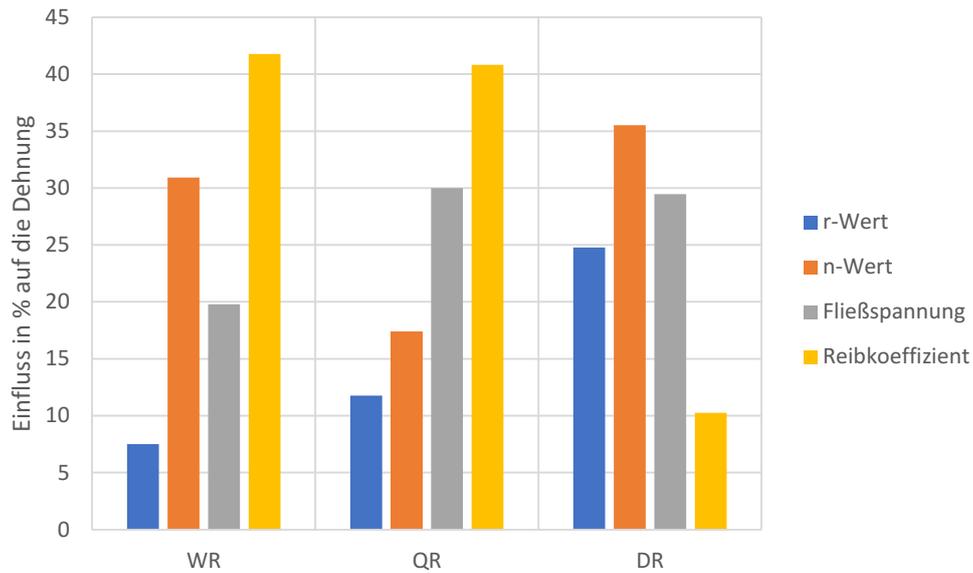


Abbildung 3.45: Einfluss der Parameter auf die Dehnung

DX2304

Abbildung 3.46 zeigt die Hauptdehnungsverteilung des DX2306 Stahls über das gesamte Bauteil in vier Schritten des Tiefziehvorganges. Die violetten Bereiche werden nicht gedehnt, während die roten Bereiche jene mit maximaler Dehnung darstellen. Wie aus der Farbverteilung zu erkennen, wird das Material im Gegensatz zum DC04 Stahl nicht stark gedehnt, jedoch ist hier die Grenze zu ersten Reißern schon erreicht, da das Material eine höhere Härte besitzt und sich nicht so stark dehnen lässt.

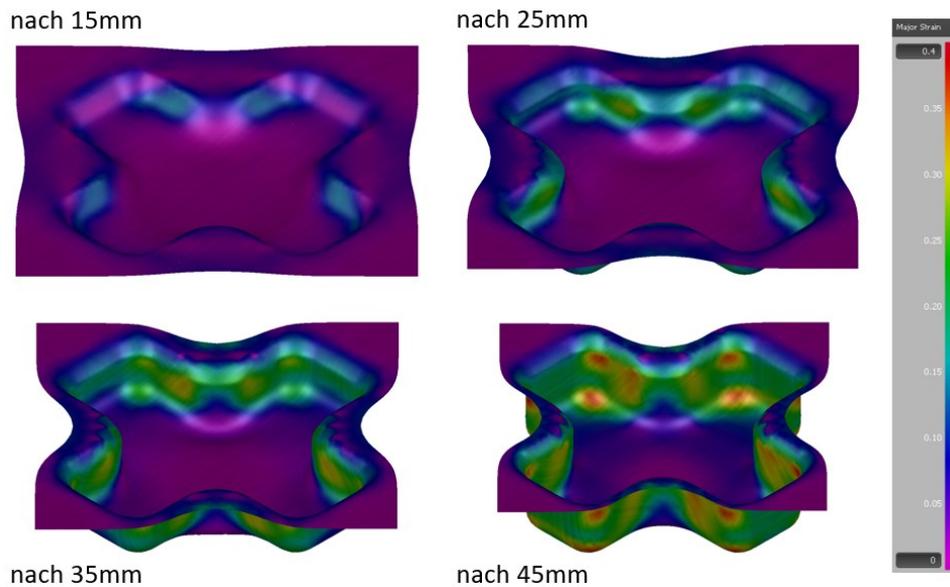


Abbildung 3.46: Dehnung am Napf während des Tiefziehprozesses

Abbildung 3.47 zeigt die Dehnungen entlang der Walz- Quer- und Diagonalrichtung. Bei der Analyse der Parameteränderung zeigt sich, dass sich in WR und QR die Änderung des Reibungskoeffizienten am meisten auf das Endergebnis auswirkt. Die Diagramme zeigen deutlich, je höher die Reibung, desto größer ist auch die Dehnung. Des Weiteren ist auch gut zu erkennen, dass sich die höchsten Dehnungen im Wandbereich des Teils befinden.

So ist es auch in Diagonalrichtung. Hier ändert sich das Ergebnis am größten durch eine Veränderung des n -Wertes, wenn auch nur sehr gering. Das Blech dehnt sich hier stärker, je größer der n -Wert ist. Im Vergleich von Walz- und Querrichtung zeigt das Diagramm unten rechts, dass sich das Material in Walzrichtung stärker dehnt als in Querrichtung.

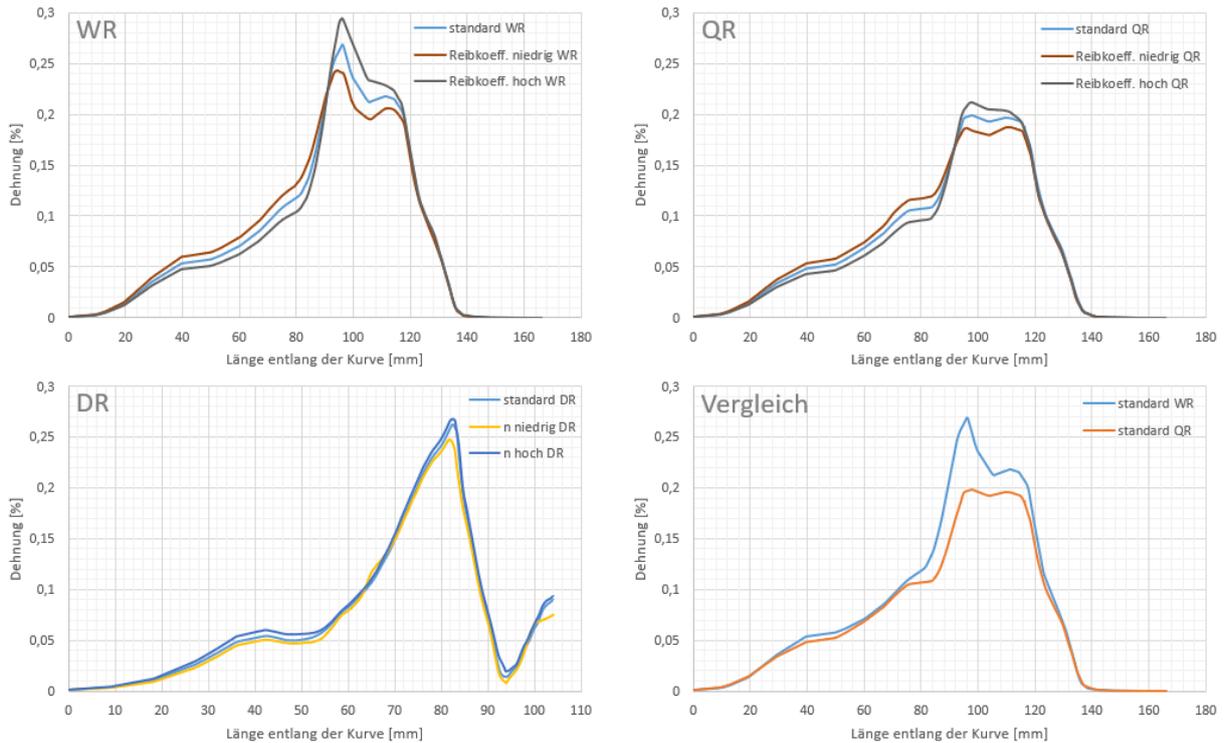


Abbildung 3.47: Dehnungsverläufe über die Länge der Auswertungsrichtungen

In **Abbildung 3.48** ist dargestellt, wie stark sich die Änderungen der einzelnen Parameter auf das Ergebnis mit den Standardwerten auswirkt. Hier wurden für die Auswertung die maximalen Dehnungen in den drei Richtungen herangezogen.

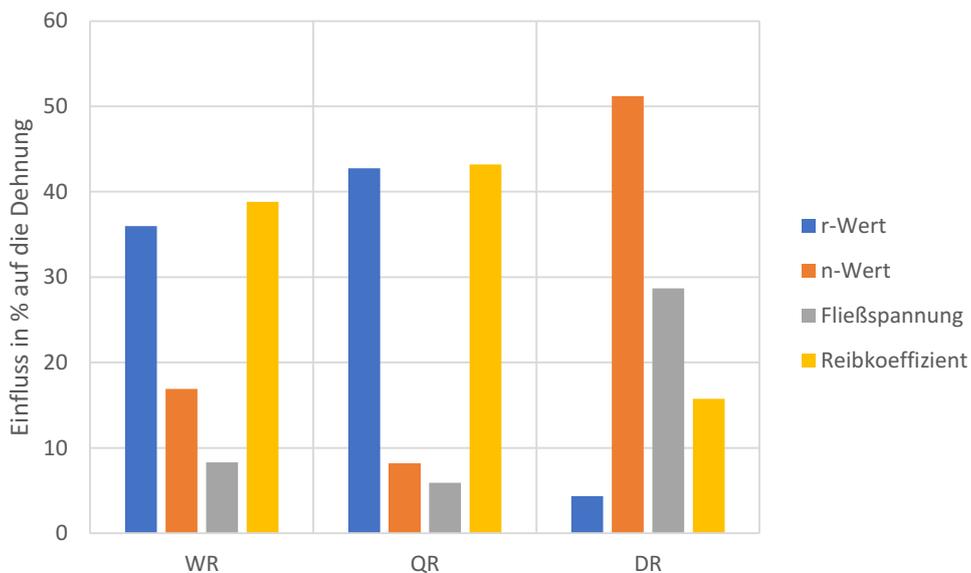


Abbildung 3.48: Einfluss der Parameter auf die Dehnung

6016

Die Hauptdehnungen, die die Aluminiumlegierung 6016 während der Umformung erfährt, sind in **Abbildung 3.49**, nach jeweils 10mm Ziehweg, dargestellt. Wie in der Abbildung zu erkennen, wird der Boden des Napfes sowie die Enden der Platine nicht gedehnt. Nur in den Wand- und Radienbereichen, kommt es zu einer Dehnung in Zugrichtung.

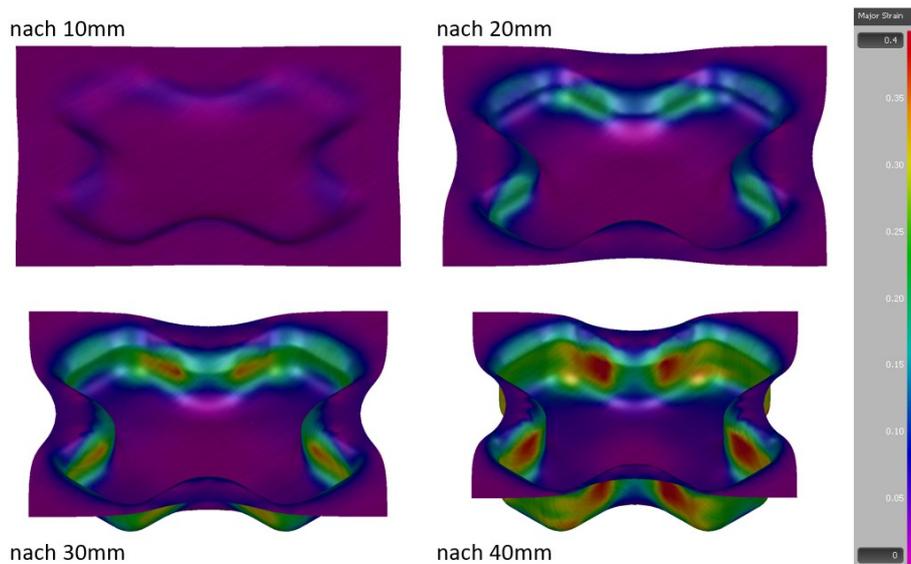


Abbildung 3.49: Dehnung am Napf während des Tiefziehprozesses

Die Diagramme in **Abbildung 3.50** zeigen den Dehnungsverlauf über die Längen der Walz- Quer- und Diagonalrichtung. Eine Veränderung des Reibungskoeffizienten bewirkt in Walzrichtung die größten Abweichungen vom Standardsimulationsergebnis. Eine hohe Reibung wirkt sich in größeren Dehnungen aus als eine geringere Reibung. Grund dafür ist, dass das Material bei hoher Reibung am Nachfließen gehindert wird und somit die Wandbereiche stärker gedehnt werden.

In Querrichtung hingegen resultiert die Änderung des n -Wertes in der größten Abweichung vom Standardergebnis. Ein niedriger n -Wert, sprich eine geringere Verfestigung des Materials, hat zur Folge, dass sich das Blech stärker dehnt als bei höherem n -Wert.

Im Diagramm rechts unten der **Abbildung 3.50** sieht man die Ergebnisse der Standardwerte in Walz- und Querrichtung gegenübergestellt. In Walzrichtung entsteht eine leicht höhere Dehnung als in QR im Bereich nach dem Stempelradius.

In Diagonalrichtung hat eine Veränderung der Parameter nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis. Am meisten Einfluss hat noch der n -Wert im Bereich der Napfwand.

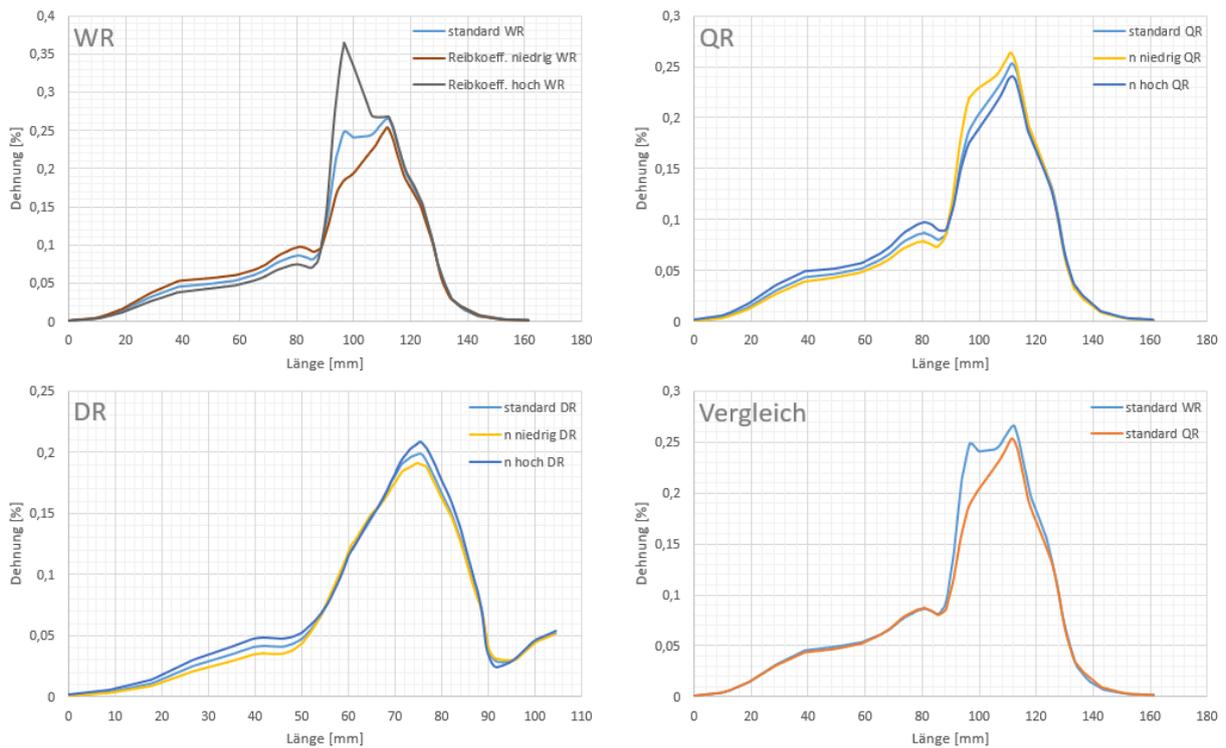


Abbildung 3.50: Dehnungsverlauf über die Länge der Auswertungsrichtungen

Das Balkendiagramm in **Abbildung 3.51** zeigt den Einfluss der einzelnen Parameterschwankungen auf die maximale Dehnung im Vergleich zum Simulationsergebnis mit den Standardwerten.

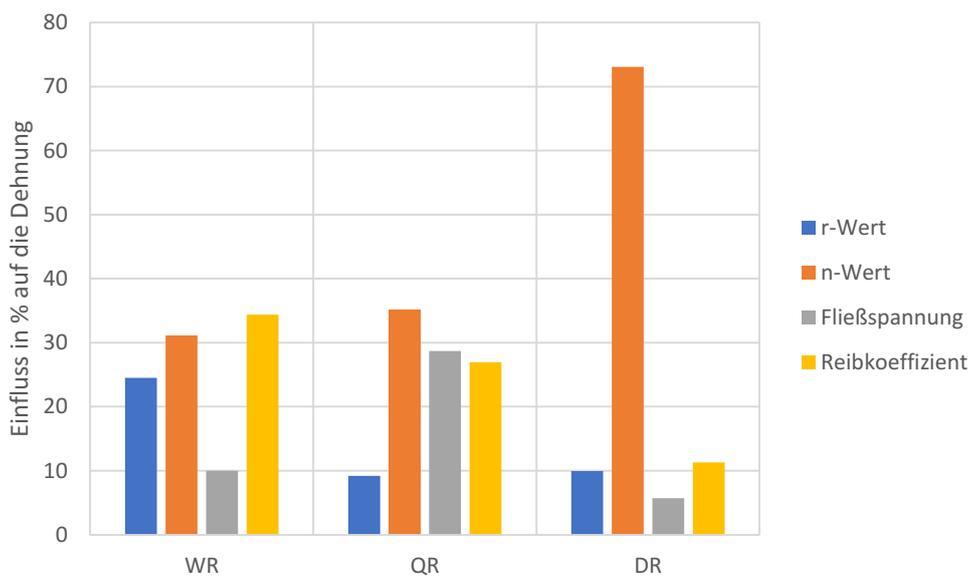


Abbildung 3.51: Einfluss der Parameter auf die Dehnung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden die Aussagen und Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf eine mögliche Weiterführung einer solchen Studie gegeben.

Die maßgeblich für die Eignung eines Werkstoffes für den Tiefziehprozess verantwortlichen Parameter wie r -Wert, n -Wert und Fließspannung wurden im theoretischen Teil der Arbeit von Grund auf erklärt, um in der späteren Simulationsstudie die Ergebnisse besser verstehen und interpretieren zu können. Auch ist auf die experimentelle Erfassung von Fließkurven, deren mathematischen Beschreibungsmöglichkeiten, sowie auf den Tiefziehprozess selbst eingegangen worden.

Die Studie umfasst die Ergebnisse der Simulationen dreier verschiedener Werkstoffe. Einerseits wurde ein Tiefziehstahl (DC04) gewählt, um zu sehen, wie dieser Schwankungen der Materialkennwerte kompensiert. Weiters wurden Studien mit einem hochfesten Stahl (DX2304) und einer Aluminiumlegierung durchgeführt (6016). Als repräsentatives Bauteil wurde die Geometrie eines Kreuznapfes gewählt. Im ersten Teil der Studie sind die Werkstoffe bei gleicher Ziehtiefe miteinander verglichen worden, in Hinsicht auf erforderliche Tiefziehkraft, Ausdünnung, Rückfederung und Dehnung des Materials. Im zweiten Teil sind die Parameter der Materialien (r -Wert, n -Wert, Fließspannung) sowie des Prozesses (Reibkoeffizient) verändert worden, um zu sehen wie sich diese Schwankungen auf das Ergebnis auswirken.

Vorausblickend für eine weitere Studie wäre noch interessant, wie sich diese Parameterschwankungen auf ein größeres, in der Industrie gefertigtes, Tiefziehteil, wie zum Beispiel einen Kotflügel, auswirken. Ein Vergleich von mehreren Bauteilen derselben Materialien würde dieser Studie noch mehr Aussagekraft geben.

5 Schlussfolgerung

Eine wesentliche Erkenntnis aus dieser Arbeit ist, dass kleine Parameterschwankungen des Materials oder der Reibungsverhältnisse zum Teil große Auswirkung auf die Ergebnisse haben. Zum Beispiel führt eine Erhöhung der Reibungsverhältnisse von nur 10% zu einer 0,1mm dünneren Platine, was bei einer Ausgangsdicke von 1mm sehr viel ist und ein Faktor zur Schädigung des Bauteiles sein kann.

Aus der Studie ist auch klar zu erkennen, dass wie zu erwarten der Tiefziehstahl die besten Eigenschaften für das Tiefziehen aufweist. Interessant ist zum Beispiel, dass er die größten Dehnungen aufweist, aber am wenigsten von allen Werkstoffen ausdünnert, trotz deutlich größerer Ziehtiefe. Es ist keine große Erkenntnis, dass der Tiefziehstahl am besten zum Tiefziehen geeignet ist, jedoch ist erstaunlich, dass der DC04 trotz höherer Parameterschwankungen (größer als plus minus 10%) diese noch immer am besten kompensiert.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: r_m - und n -Werte wichtiger Blechwerkstoffe [1]	6
Abbildung 2.2: Grenzformänderungsschaubild [1]	7
Abbildung 2.3: Verfahrensgrenzen im Grenzformänderungsschaubild [1]	8
Abbildung 2.4: Einflussgrößen auf die Fließspannung [4]	9
Abbildung 2.5: Flachzugproben zur Fließkurvenaufnahme [3]	12
Abbildung 2.6: Vorgehensweise zur Fließkurvenaufnahme [3]	13
Abbildung 2.7: Rechenbeispiel logarithmische Formänderung [3]	14
Abbildung 2.8: Ermittlung der Fließkurve aus dem Bulgetest [3]	16
Abbildung 2.9: Fließkurven von C15 bei verschiedenen Umformgeschwindigkeiten [4]	17
Abbildung 2.10: Fließkurve nach Ludwik-Hollomon [3]	18
Abbildung 2.11: Fließkurve nach Swift [3]	19
Abbildung 2.12: Vergleich der mathematischen Fließkurvenbeschreibungen [3] ...	20
Abbildung 2.13: Simulationsergebnisse basierend auf verschiedenen Fließkurvenmodellen [3]	22
Abbildung 2.14: Tiefziehprozess eines runden Blechzuschnittes [3]	23
Abbildung 2.15: Tiefziehprozess in zwei Stufen [3]	24
Abbildung 2.16: zu biegendes und zu verdrängendes Material [5]	25
Abbildung 2.17: Spannungsverhältnisse im Napf beim Tiefziehen [5]	27
Abbildung 2.18: Umformgrade an einem Volumenelement [5]	28
Abbildung 2.19: Verteilung des Umformgrades über den Napf [5]	29
Abbildung 2.20: Ermittlung des Grenzziehverhältnisses [1]	30
Abbildung 2.21: Zulässiges Ziehverhältnis in Abhängigkeit von der senkrechten Anisotropie [1]	31
Abbildung 2.22: Aufdickung bzw. Ausdünnung über die Napfwand [3]	34
Abbildung 2.23: Bodenreißer an Tiefziehteilen [3]	35
Abbildung 2.24: Faltenbildung 1. Ordnung [3]	35
Abbildung 2.25: Diagramm zum Ablesen der benötigten Niederhaltedrucke [3]	36
Abbildung 2.26: Falten 2. Ordnung [3]	37
Abbildung 2.27: Ziehkraft über Stempelhub [5]	39
Abbildung 2.28: Arbeitsdiagramm für rechteckige Tiefziehteile [3]	41
Abbildung 2.29: Reibkraft in Abhängigkeit vom Stempeldurchmesser [5]	42
Abbildung 2.30: Einflüsse auf die Rückfederung [3]	43
Abbildung 2.31: Rückfederungsarten [3]	44
Abbildung 2.32: Einfluss des Werkstoffes auf die Rückfederung [3]	45
Abbildung 2.33: Bereich der Tiefziehstähle (rote Markierung) [5]	48
Abbildung 2.34: Zipfelbildung bei verschiedenen Δr Werten [5]	48
Abbildung 2.35: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Einziehverhaltens [6]	50
Abbildung 2.36: Einfließwulst anstelle der Ziehkante [5]	51

Abbildung 2.37: Bremswulst im Niederhalter [5]	52
Abbildung 3.1: Fließkurven (links), Grenzformänderungsdiagramm (rechts).....	57
Abbildung 3.2: Geometrie des Napfes und Orientierung der Platine, Maße in mm	58
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Simulationsaufbaus	59
Abbildung 3.4: Fließkurven der Werkstoffe DC04 (links), DX2304 (Mitte) und 6016 (rechts) mit geänderten Parametern.....	60
Abbildung 3.5: Definition von Walz- Quer- und Diagonalrichtung	61
Abbildung 3.6: Längen entlang der Auswertungsrichtungen.....	62
Abbildung 3.7: Ziehtiefe und Grenzformänderungsschaubilder der drei Werkstoffe	63
Abbildung 3.8: Vergleich der Tiefziehkräfte über den Weg.....	63
Abbildung 3.9: Materialausdünnung während des Tiefziehvorganges.....	64
Abbildung 3.10: Dickenverläufe über die Auswertungsrichtungen	65
Abbildung 3.11: Rückfederungsverteilung nach dem Tiefziehprozess	66
Abbildung 3.12: Rückfederungsverlauf in WR, QR und DR.....	67
Abbildung 3.13: Dehnungsverteilung der drei Werkstoffe während des Prozesses	68
Abbildung 3.14: Dehnungsverläufe in den drei Auswertungsrichtungen.....	69
Abbildung 3.15: Längen entlang der Auswertungsrichtungen.....	70
Abbildung 3.16: Vergleich der Ziehtiefen bis kurz vor die Rissbildung	71
Abbildung 3.17: Ziehkraftdiagramm der Simulationen mit den Standardwerten	72
Abbildung 3.18: Kraftverlauf DC04	73
Abbildung 3.19: Kraftverlauf DX2304.....	74
Abbildung 3.20: Kraftverlauf 6016	75
Abbildung 3.21: Einfluss der Parameter auf die maximale Tiefziehkraft.....	76
Abbildung 3.22: Materialausdünnung alle 15mm des Tiefziehvorganges	77
Abbildung 3.23: Materialdickenverlauf DC04.....	78
Abbildung 3.24: Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung.....	78
Abbildung 3.25: Materialausdünnung während des Tiefziehvorganges.....	79
Abbildung 3.26: Materialdickenverlauf DX2304	80
Abbildung 3.27: Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung.....	81
Abbildung 3.28: Materialausdünnung während des Tiefziehvorganges.....	82
Abbildung 3.29: Materialdickenverlauf 6016	83
Abbildung 3.30: Einfluss der Parameter auf die Dickenänderung.....	84
Abbildung 3.31: Rückfederung DC04	85
Abbildung 3.32: Rückfederungsverlauf in WR und QR.....	86
Abbildung 3.33: Rückfederungsverlauf in DR.....	86
Abbildung 3.34: Einfluss auf die maximale Rückfederung	87
Abbildung 3.35: Rückfederung DX2304.....	88
Abbildung 3.36: Rückfederungsverlauf in WR und QR.....	89
Abbildung 3.37: Rückfederungsverlauf in DR.....	89
Abbildung 3.38: Einfluss auf die maximale Rückfederung	90
Abbildung 3.39: Rückfederung 6016	90
Abbildung 3.40: Rückfederungsverläufe in WR und QR.....	91
Abbildung 3.41: Rückfederungsverläufe in DR.....	92

Abbildung 3.42: Einfluss der Parameter auf die Rückfederung	92
Abbildung 3.43: Dehnung am Napf während des Prozesses.....	93
Abbildung 3.44: Dehnungsverläufe über die Länge der Auswertungsrichtungen ...	94
Abbildung 3.45: Einfluss der Parameter auf die Dehnung	95
Abbildung 3.46: Dehnung am Napf während des Tiefziehprozesses	96
Abbildung 3.47: Dehnungsverläufe über die Länge der Auswertungsrichtungen ...	97
Abbildung 3.48: Einfluss der Parameter auf die Dehnung	97
Abbildung 3.49: Dehnung am Napf während des Tiefziehprozesses	98
Abbildung 3.50: Dehnungsverlauf über die Länge der Auswertungsrichtungen	99
Abbildung 3.51: Einfluss der Parameter auf die Dehnung	99

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: r_m -Werte für gängige Werkstoffe [2]	5
Tabelle 2.2: Grenzziehverhältnisse wichtiger Werkstoffe [1].....	31
Tabelle 3.1: Werkstoffe der Simulationsstudie.....	55
Tabelle 3.2: Parameterschwankungen DC04	59
Tabelle 3.3: Parameterschwankungen DX2304.....	60
Tabelle 3.4: Parameterschwankungen 6016.....	60

8 Literaturverzeichnis

- [1] Kugler H *Umformtechnik: Umformen metallischer Konstruktionswerkstoffe*
- [2] Fritz R and Stix G 2015/16 *Skriptum zu Übung zu Umformtechnik: Zugversuch und Reibversuch*
- [3] Birkert A, Haage S and Straub M *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*
- [4] Institut für Integrierte Produktion Hannover Abrufdatum 2018 *Warmumformung als Verfahren der Umformtechnik* www.iph-hannover.de/de/information/umformtechnik/warmumformung/
- [5] Klocke F and König W *Fertigungsverfahren 4: Umformen*
- [6] Siegert K *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*
- [7] Homepage der Simulationssoftware AutoForm www.autoform.com (accessed Abrufdatum: 8 Jan 2019)
- [8] thyssenkrupp Steel Europe AG 2018 *Tiefziehstähle DD, DC und DX: Produktinformation*
- [9] Aperam Stainless Europe *Nichtrostender Duplexstahl: DX2304*
- [10] AMAG Austria Metall AG 2015 *AluReport: Eigenschaftskriterien von Al-Mg-Si Knetlegierungen für Automobilanwendungen*