

# Untersuchungen zur Umformung und Steifigkeit unterschiedlicher Sicken in gekrümmten vorverformten Blechteilen

Johannes Georg Benedikt Krönauer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann
2. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Die Dissertation wurde am 18.05.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.09.2022 angenommen.

## **Geleitwort**

Die Kombination der ersten und der zweiten Verarbeitungsstufe stellt eine seltene Ausgangsposition für eine fachübergreifende Forschung in der deutschen Hochschullandschaft dar. Für die gestiegenen Anforderungen an Produkte und den verstärkten Kostendruck ist dieses Ineinandergreifen von Fertigungsverfahren ein idealer Nährboden für Forschungsaktivitäten, denn erst die gemeinsame Betrachtungsweise dieser beiden Verfahrensgebiete erlaubt Innovationen in vielen nachgeschalteten Bereichen der Industrie.

Vor allem Neuentwicklungen, aber auch die Weiterentwicklung bestehender Fertigungsverfahren, sollen im Umfeld eines härter werdenden Wettbewerbs dazu beitragen, die Position des Standortes Deutschland zu kräftigen. Das gegenseitige Befruchten von Theorie und Praxis durch die Zusammenarbeit von Hochschule und Industrie kann als Beitrag dafür angesehen werden.

Eine enge Anlehnung der Themen an die in der betrieblichen Praxis auftretenden Probleme als ein Bindeglied zwischen Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung liegt daher im Interesse dieser Berichte. Die einzelnen Arbeiten sind folglich als Bausteine zu betrachten, die einen entscheidenden Einfluss auf die Verbesserung bisheriger Technologien besitzen.

Neben den beiden großen fertigungstechnischen Schwerpunkten Urformtechnik und Umformtechnik, bei denen der isolierte Prozess im Mittelpunkt steht, gehört die gesamtheitliche Betrachtung der Verfahren mit naturwissenschaftlichen und planerischen Themen zum Inhalt der Arbeiten des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen.

Ergebnisse und Inhalte der Forschungsberichte sollen nicht als Einbahnstraße dem Wissenstransfer von Forschungsergebnissen in der Praxis dienen, sondern sie sollen neben der Basis für weiterführende Arbeiten auch als Diskussionsgrundlage für den Dialog zwischen Hochschule und Industrie angesehen werden.

Hartmut Hoffmann

## **Vorwort**

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

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, ehemaliger Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, gilt mein Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir zugestandene Freiheit bei der Bearbeitung.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl für die Tätigkeit als Korreferent.

Allen ehemaligen Kollegen danke ich für den tollen Zusammenhalt.

Weiterhin gilt mein Dank allen Studenten des Lehrstuhls, die durch wertvolle Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Wolnzach, im Mai 2022

Benedikt Krönauer

## **Abstract (Deutsch)**

Die Versteifung von Bauteilen durch Sicken steht ganz im Sinne des konstruktiven Leichtbaus und kann enorme, nahezu gewichtsneutrale Wirkungen erreichen. Das Einbringen von Sicken wurde bisher für ebene unverformte bzw. ebene vorverformte Bleche aus fertigungstechnischer Sicht untersucht. Ebenso sind Arbeiten vorhanden, die sich mit der Gestaltung von sogenannten Sickenmustern befassen. In dieser Arbeit werden die Zusammenhänge zwischen vorverformten gekrümmten Blechstrukturen und der erreichbaren Steifigkeit untersucht. Dabei werden verschiedene Lastfälle und dafür optimierte Sickenmuster in Experiment und Simulation bewertet. Der Einfluss der Vorverformung auf die erreichbare Tiefe einer einzelnen Sicke und auf die Steifigkeit bzw. Belastbarkeit von Sickenmustern wird bewertet.

## **Abstract (English)**

The stiffening of sheet metal components by beading is in the spirit of constructive lightweight design and can reach vast, almost weight neutral effects. Until now, the use of beading was examined for flat undeformed sheet metal from a production perspective. As well, research is available dealing with the design of so-called beading patterns. This work investigates the relationship between formed curved sheet metal structures and achievable degree of stiffness. Various load cases and optimized bead patterns are evaluated in experiment and simulation. The influence of pre-deformation on attainable depth of a single bead and rigidity of beading patterns will be assessed here.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurz- und Formelzeichenverzeichnis .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Kenntnisse.....</b>	<b>4</b>
2.1 Umformen - Grundlagen .....	4
2.2 Umformverfahren.....	12
2.2.1 Tiefziehen .....	12
2.2.2 Streckziehen .....	15
2.2.3 Prägen .....	17
2.2.4 Hohlprägen .....	18
2.3 Sicken.....	22
2.3.1 Definition .....	22
2.3.2 Sickentypen .....	23
2.3.3 Versteifungswirkung und Belastbarkeit .....	23
2.3.4 Größte erreichbare Sickentiefe beim Hohlprägen .....	29
2.3.5 Gestaltung, Wirkung und Fertigung von Sicken und Sickenmustern .....	30
2.4 Zusammenfassung zum Stand der Technik .....	35
<b>3 Zielsetzung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>37</b>
<b>4 Versuchsanlagen und Messeinrichtungen .....</b>	<b>39</b>
4.1 Versuchspresse.....	39
4.2 Modulares Versuchswerkzeug zum Vorverformen und Prägen .....	39
4.3 Werkzeugeinsätze zum Hohlprägen .....	41
4.4 Entwicklung von Prüfständen zur Steifigkeitsbewertung.....	45
4.5 Messeinrichtungen.....	48
4.5.1 Photogrammetrische Formänderungsmessung .....	48
4.5.2 Zug-Druck-Prüfmaschine .....	49
4.6 Verwendete FEM-Programme .....	49

<b>5</b>	<b>Versuchswerkstoff und Vorverformungsgeometrien.....</b>	<b>50</b>
5.1	Blechwerkstoff .....	50
5.2	Vorverformungsgeometrien .....	52
<b>6</b>	<b>Versuchsplan .....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Versuchsbeschreibung und -durchführung .....</b>	<b>56</b>
7.1	Umformen.....	56
7.2	Experimentelle Steifigkeitsbestimmung .....	57
7.3	Umformsimulation.....	60
7.3.1	Inkrementelle Umformsimulation.....	60
7.3.2	Inverse Simulation .....	62
7.4	Steifigkeitssimulation .....	63
<b>8</b>	<b>Versuchsergebnisse.....</b>	<b>66</b>
8.1	Formänderungen beim Vorverformen.....	66
8.2	Maximale Sicken­tiefe in Abhängigkeit der Vorverformung.....	70
8.3	Formänderungen beim Prägen der optimierten Sickenmuster .....	73
8.3.1	Biegungsoptimiertes Muster.....	73
8.3.2	Torsionsoptimiertes Muster.....	74
8.4	Formänderungen bei der Steifigkeitsprüfung.....	76
8.4.1	Formänderung bei der Prüfung von vorverformten Blechen	76
8.4.2	Formänderung bei der Prüfung von versteiften Blechen .....	79
8.5	Einfluss der Vorverformung auf die Bauteilsteifigkeit.....	80
8.5.1	Torsionsprüfung .....	82
8.5.2	Biegeprüfung.....	85
8.6	Beurteilung der Steifigkeiten optimierter Sickenmuster .....	86
8.7	Simulationsergebnisse.....	89
8.7.1	Vergleich verschiedener Umformsimulationsansätze mit experimentellen Ergebnissen .....	89
8.7.2	Steifigkeitssimulation mit verschiedenen Eingangsdaten....	92
8.8	Bewertung der Simulationsergebnisse .....	94

---

<b>9 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>95</b>
<b>10 Verzeichnisse.....</b>	<b>99</b>
10.1 Abbildungsverzeichnis .....	99
10.2 Tabellenverzeichnis .....	103
10.3 Literaturverzeichnis.....	105
10.4 Abschlussarbeiten .....	109
<b>11 Anhang .....</b>	<b>112</b>



## Kurz- und Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a_0$	[mm]	Sickenbreite/ Gesenkweite
$a_{rM}$	[-]	Konstante abhängig von $r_M$
$A$	[-]	Bruchdehnung
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche vor der Umformung
$A_1$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche nach der Umformung
$A_G$	[-]	Gleichmaßdehnung, auch $\varepsilon_{gl}$
$A_H$	[mm <sup>2</sup> ]	Projizierte Fläche beim Hohlprägen
$\alpha$	[-]	Konstante (Berechnung Kaltverfestigung)
$b$	[mm]	Sickenbreite
$c$	[-]	Konstante
$c_{SZ}$	[-]	Korrekturfaktor für die Reibung beim Streckziehen
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
$e_1, e_2$	[mm]	Abstand zur neutralen Faser
$\varepsilon$	[-]	Dehnung
$\varepsilon_{gl}$	[-]	Gleichmaßdehnung, auch $A_G$
$F$	[N]	Kraft. Wird mit Indices versehen
$\eta_F$	[%]	Formänderungswirkungsgrad
$h$	[mm]	Sickentiefe/-höhe
$h_{max}$	[mm]	Maximale Sickentiefe
$k_f$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Formänderungsfestigkeit
$k_w$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Formänderungswiderstand
$l$ bzw. $L$	[mm]	(Sicken)Länge
$M$	[Nm]	Moment
$n$	[-]	Verfestigungsexponent
$NH$	[-]	Niederhalter
$R_{P0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Dehngrenze
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit
$r_{St}$	[mm]	Stempelradius

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$r_M (= r_z)$	[mm]	Matrizenradius (=Ziehkantenradius)
$r$	[-]	Senkrechte Anisotropie (r-Wert)
$r_0$	[-]	r-Wert ( $\propto$ Probenlängsachse - Walzrichtung: 0°)
$r_{45}$	[-]	r-Wert ( $\propto$ Probenlängsachse - Walzrichtung: 45°)
$r_{90}$	[-]	r-Wert ( $\propto$ Probenlängsachse - Walzrichtung: 90°)
$\bar{r}$	[-]	mittlere senkrechte Anisotropie
$\Delta r$	[-]	ebene Anisotropie
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung
SIM	[-]	Simulation
ST	[-]	Stempel
EXP	[-]	Experiment
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$s$	[mm]	Blechdicke
$s_0$	[mm]	Ausgangsblechdicke
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung
$\varphi$	[-]	Formänderung
$\varphi_{1/2/3}$	[-]	Haupt- und Nebenumformgrade
$\varphi_b$	[-]	Formänderung in der Blechebene
$\varphi_s$	[-]	Formänderung senkrecht zur Blechebene
$\varphi_v$	[-]	Vergleichsumformgrad

## 1 Einleitung

Politische und wirtschaftliche Zwänge erfordern immer mehr Ressourceneinsparung bei der Nutzung und Produktion von technischen Produkten, wie z.B. dem Automobil. Für das Jahr 2030 liegen etwa die zulässigen Zielwerte für die Emissionen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> von Neufahrzeugen bei 59,4 g CO<sub>2</sub>/km [EU19]. Aktuell ist mit der Änderung von 2019 ein Flottenverbrauch von 95 g/km festgesetzt. Damit muss ausgehend von diesem Wert eine Reduktion um 37,5% erreicht werden. Zur Erreichung der Zielwerte ist eine Reihe von Maßnahmen notwendig, eine davon ist die konsequente Reduktion der Fahrzeugmasse. Nach einer Studie von McKinsey [MCKI12] muss der Anteil an Leichtbauteilen im Fahrzeug von 30 auf 70% steigen, „um die Zunahme des Fahrzeuggewichts durch Elektroantrieb und kraftstoffeffiziente Motorentechnik zu kompensieren.“ Ebenso bleibt Stahl "der wichtigste Leichtbauwerkstoff". Für die im Automobilbau häufig eingesetzte Schalenbauweise ist die Sicke ein bewährtes und weitestgehend gewichtsneutrales Konstruktionselement, das die immer dünner werdenden Strukturen stabilisiert. Dies wird durch die Versteifungswirkung der Sicken gegen Biegebeanspruchung erreicht. Bisherige Arbeiten befassen sich mit der Herstellung von Einzelsicken und Sickenmustern in ebene unverformte Bleche. Dabei werden auch rechnergestützte Optimierungsmethoden eingesetzt. Die Einbringung von Sicken steht häufig am Ende eines umformenden Fertigungsprozesses, das Blech ist also zum Zeitpunkt der Sickenfertigung schon vorverformt. Da dies in der Prozessauslegung und -absicherung in der Regel nicht oder nur sehr vereinfacht berücksichtigt wird, kann es in der Fertigung zu Prozessinstabilitäten oder zu ungenutzten Potentialen führen. Darüber hinaus hängt die Versteifungswirkung von Sickenmustern neben der Bauteilgestaltung auch von der gesamten Umformgeschichte des Bauteils ab.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Herstellung von Einzelsicken bzw. von Sickenmustern in Blechen, die unter Einbeziehung von Lastfall und Geometrie rechnergestützt optimiert wurden. Der Umformprozess und die Versteifungswirkungen werden insbesondere unter Berücksichtigung der Vorverformungsgeschichte des Blechs bewertet.

## 2 Grundlagen und Stand der Kenntnisse

### 2.1 Umformen - Grundlagen

Die DIN-Norm 8580 [DIN8580] unterteilt alle Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen, wobei das Umformen eine davon ist. In dieser Norm ist der Begriff Umformen als ein „Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers“ definiert, was immer unter Beibehaltung der Masse und des Stoffzusammenhalts erfolgt. Die plastische Formänderung eines Werkstücks findet hierbei stets unter Beherrschung dessen Geometrie statt. Dieses Kriterium dient gleichzeitig als Abgrenzung des Umformens zum Verformen, bei dem die Formänderung ohne Beherrschung der Werkstückgeometrie erfolgt. [PIET00]

Ferner sind die Umformverfahren, entsprechend den jeweils unterschiedlichen wirksamen Spannungen, in Druck-, Zugdruck-, Zug-, Biege- und Schubumformen unterteilbar. Die folgende Abbildung 2-1 stellt diese Einteilungen zur besseren Übersicht graphisch dar:

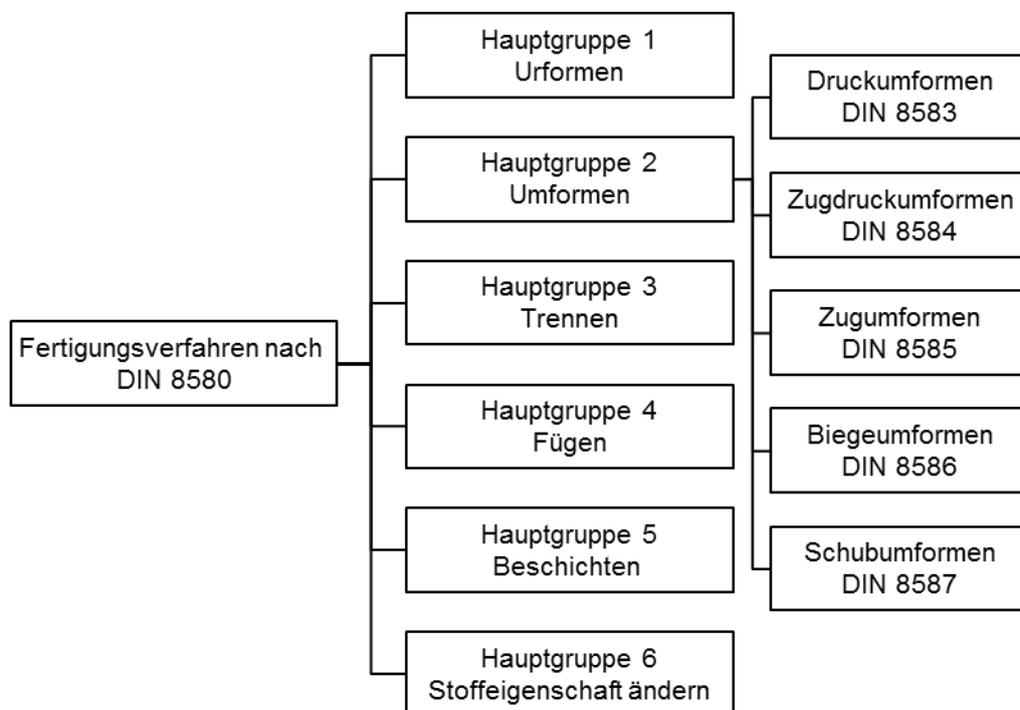


Abbildung 2-1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN8580]

### Spannungs-Dehnungs-Diagramm

In diesem Diagramm wird die während des Zugversuchs gemessene Spannung  $\sigma$  über der Werkstoffdehnung  $\varepsilon$  aufgetragen (siehe Abbildung 2-2). Die Spannung errechnet sich dabei als Quotient der aufgebrauchten Zugkraft zur anfänglichen Querschnittsfläche des Probenkörpers.

Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm können folgende charakteristische Bereiche und Kennwerte entnommen werden [PIET00]:

- Hook'sche Gerade:

Die Hook'sche Gerade kennzeichnet jenen Spannungsbereich, in welchem sich der Werkstoff lediglich elastisch verformt und nach Entlastung wieder seine Ausgangsmaße annimmt.

- Dehngrenze  $R_{P0,2}$ :

Viele metallische Werkstoffe weisen eine ausgeprägte Streckgrenze auf. Das bedeutet der Übergang zwischen elastischer und plastischer Verformung ist nicht genau abzugrenzen. In diesem Fall erfolgt die Angabe der Dehngrenze  $R_{P0,2}$ . Die Dehngrenze gibt jenen Spannungswert an, bei welchem nach Entlastung die bleibende Dehnung 0,2% beträgt.

- Zugfestigkeit  $R_m$ :

Ab dem Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$  beginnt die Probe sich einzuschnüren. Bis zu diesem Punkt erfolgt die Umformung homogen und ohne Einschnürung über der gesamten Länge.

- Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{gl}$  oder  $A_g$ :

Die Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{gl}$  bzw.  $A_g$  gibt den Dehnungswert der Probe bei Erreichen der Zugfestigkeit an. Sie stellt somit für einen Werkstoff den maximalen Dehnungswert dar, welcher ohne Einschnürung erreichbar ist.

- Bruchdehnung  $A$ :

Als Bruchdehnung  $A$  wird jene Werkstoffdehnung bezeichnet, bei dem der Werkstoff reißt.

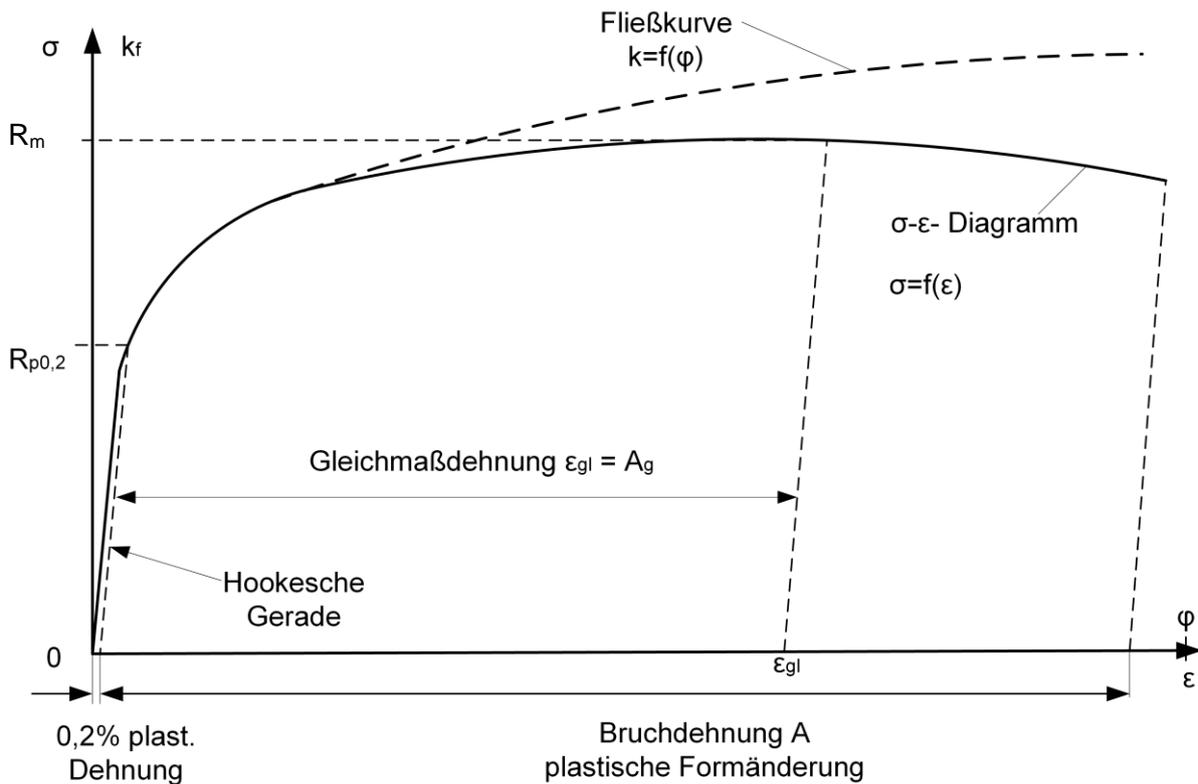


Abbildung 2-2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [PIET00]

### Fließkurve

In einer Fließkurve wird die Formänderungsfestigkeit  $k_f$  über der logarithmischen Formänderung  $\phi$  eines bestimmten Werkstoffs dargestellt (siehe Abbildung 2-2, gestrichelt).

Der Unterschied zwischen der Formänderungsfestigkeit  $k_f$  und der Spannung aus dem  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm besteht darin, dass für die Berechnung von  $k_f$  die momentane und nicht die Ausgangsquerschnittsfläche der Werkstoffprobe verwendet wird. Die Fließkurve stellt das reale Umformverhalten eines Werkstoffs genauer dar als das  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm und hat sich in der Umformtechnik durchgesetzt. Dividiert man  $k_f$  durch den Formänderungswirkungsgrad, welcher in erster Linie die Reibungseinflüsse bei Umformvorgängen berücksichtigt, so erhält man den Formänderungswiderstand  $k_w$ . Ebenso wie bei  $k_f$  unterscheidet sich die Berechnung der logarithmischen Formänderung  $\phi$  von der äquivalenten Größe aus dem  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm, der Dehnung  $\epsilon$ .

Der logarithmische Umformgrad oder auch logarithmische Formänderung  $\varphi$  berechnet sich allgemein nach folgender Formel:

$$\varphi_x = \ln \frac{x_1}{x_0} \quad \text{Formel 2.1}$$

Das „x“ in obiger Formel steht für ein durch die Umformung sich veränderndes Maß, beispielsweise die Höhe ( $x=h$ ) oder Länge ( $x=l$ ) eines Bleches. Der Index „1“ kennzeichnet das entsprechende Abmaß nach, der Index „0“ das Abmaß vor dem Umformvorgang. In der Umformtechnik gilt allgemein das Gesetz der metallischen Inkompressibilität:

$$0 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad \text{Formel 2.2}$$

Demnach kann der Umformgrad in Blechdickenrichtung  $\varphi_3$  aus  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  berechnet werden.

In seiner allgemeinen Bedeutung beinhaltet der Begriff „Anisotropie“ die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft oder eines Vorgangs. Im Bereich der Umformtechnik bezieht sich dabei die Richtungsabhängigkeit auf die Materialeigenschaften eines Werkstoffs. [LANG84]

### Elastische und plastische Anisotropie

Weiterhin erfolgt die Unterscheidung zwischen elastischer und plastischer Anisotropie. Dabei beinhaltet die elastische Anisotropie die Richtungsabhängigkeit elastischer Materialeigenschaften und die plastische Anisotropie entsprechend die Richtungsabhängigkeit der plastischen Eigenschaften [PIET00]. Für die in der Umformtechnik betrachteten Vorgänge spielt dabei in erster Linie die plastische Anisotropie eine Rolle. Plastisch anisotrope Werkstoffe sind durch die Abhängigkeit der Fließgrenze von der Belastungsrichtung gekennzeichnet [LANG84].

### Maße für die Anisotropie

Die Quantifizierung anisotropen Werkstoffverhaltens erfolgt durch die beiden Kennwerte der senkrechten Anisotropie  $r$  und der ebenen Anisotropie  $\Delta r$ . [PIET00],

[DAHL93], [LANG90], [KOPP98] Die *senkrechte Anisotropie*  $r$  beschreibt die richtungsabhängigen Verformungseigenschaften in der Blechebene relativ zur dazu senkrechten Richtung. Die Ermittlung der senkrechten Anisotropie erfolgt zumeist experimentell anhand von Zugversuchen. Dabei werden die Formänderungen sowohl in der Blechebene  $\varphi_b$  als auch in Blechdickenrichtung  $\varphi_s$  gemessen. Über den Zusammenhang nach Formel 2.3 wird der Wert der senkrechten Anisotropie berechnet.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad \text{Formel 2.3}$$

Typische Zugversuche werden in der Regel anhand von drei Blechprobentypen durchgeführt, bei denen jeweils der Winkel zwischen Probenlängsachse und Walzrichtung variiert wird. Aus den standardmäßig dafür verwendeten Winkeln von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  ergeben sich die senkrechten Anisotropiewerte  $r_0$ ,  $r_{45}$  und  $r_{90}$ . Aus diesen lässt sich die *mittlere senkrechte Anisotropie* wie folgt berechnen [PIET00], [DAHL93], [KOPP98], [LANG90]:

$$\bar{r} = \frac{1}{4} \times (r_0 + 2 \times r_{45} + r_{90}) \quad \text{Formel 2.4}$$

Die ebene Anisotropie beschreibt das richtungsabhängige Umformverhalten eines Blechs innerhalb der Blechebene. Aus den bereits oben vorgestellten Kennwerten lässt sich die *ebene Anisotropie*  $\Delta r$  über den mathematischen Zusammenhang

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} = 2 \times (\bar{r} - r_{45}) \quad \text{Formel 2.5}$$

berechnen. Dieser Wert spielt beispielsweise beim Tiefziehen eine große Rolle. Weist das Blech in der Ebene anisotropes Verhalten auf, so fließt es nicht gleichmäßig aus allen Richtungen in die Umformzone nach und es kommt zur Zipfelbildung (siehe Kapitel 2.2.1). [PIET00], [DAHL93], [KOPP98], [LANG90]

### Einfluss der Anisotropie auf Tiefziehvorgänge

Nachfolgend sind einige Beispiele angeführt, welche den Einfluss der Anisotropie auf Tiefziehvorgänge verdeutlichen:

- Zipfelbildung beim Tiefziehen rotationssymmetrischer Näpfe durch Anisotropie (siehe auch Kapitel 2.2.1) [PIET00], [LANG84]
- Unterschiedliche Kraft-Weg-Verläufe beim Tiefziehen isotroper und anisotroper Werkstoffe [PIET00]
- Nachfließen des Werkstoffs erfolgt ungleichmäßig aus der Blechebene und der Blechdicke [PIET00], [DAHL93]
- Grenzziehverhältnis hängt von mittlerer senkrechter Anisotropie ab [LANG84]

### Grenzformänderungsdiagramm

Das Grenzformänderungsdiagramm (GFD, engl.: Forming Limit Diagram FLD) dient zur Beurteilung der Umformbarkeit von Blechwerkstoffen. In diesem Diagramm wird der Hauptumformgrad  $\varphi_1$  über dem Nebenumformgrad  $\varphi_2$  dargestellt, wobei der Umformgrad in Blechdickenrichtung ( $\varphi_3$ ) nicht enthalten ist. Als Hauptumformgrad  $\varphi_1$  bezeichnet man den größten auftretenden Umformgrad, als Nebenumformgrad  $\varphi_2$  den in der Blechebene dazu senkrecht liegenden. Die Werte für  $\varphi_1$  im Forming Limit Diagram (FLD) sind stets positiv, während  $\varphi_2$  je nach Beanspruchungszustand positiv oder negativ sein kann.

Wie in Abbildung 2-3 zu sehen ist, sind folgende charakteristische Beanspruchungszustände im FLD dargestellt:

- einachsiger Druck ( $\varphi_2 = -2\varphi_1$ )
- Tiefziehen ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ )
- einachsiger Zug ( $\varphi_1 = -2\varphi_2$ )
- ebene Formänderung/einachsiger gleichmäßiger Zug/plane strain ( $\varphi_2 = 0$ )
- zweiachsiges Streckziehen ( $\varphi_1 = \varphi_2$ )

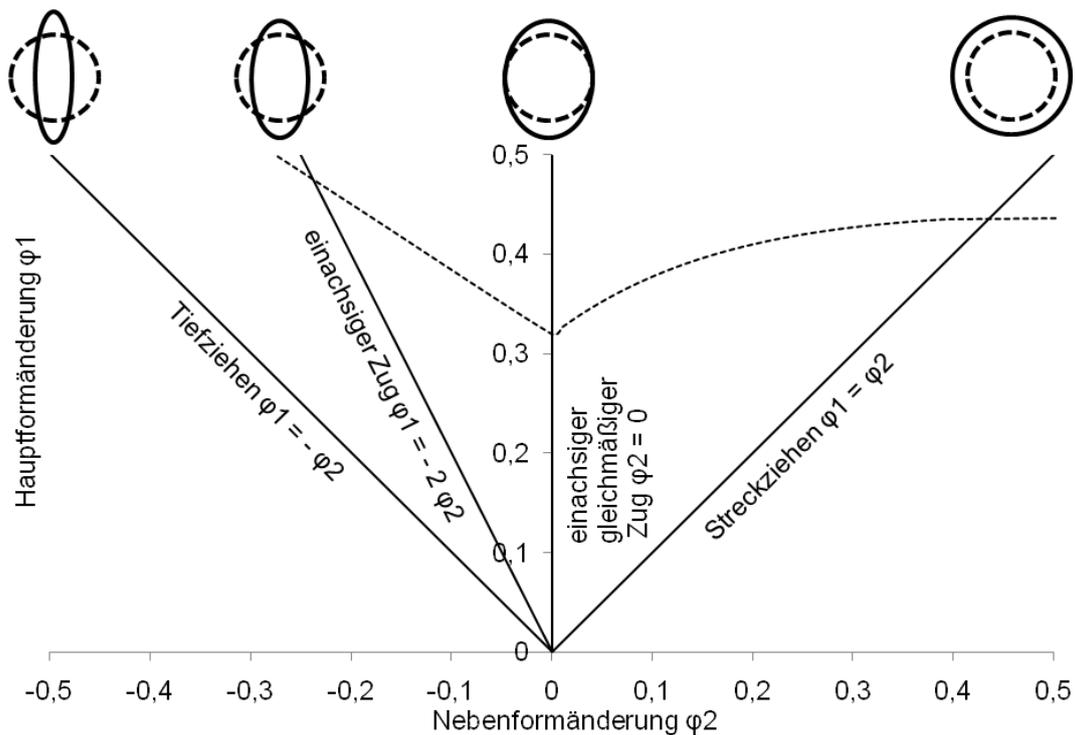


Abbildung 2-3: Grenzformänderungsdiagramm / Forming Limit Diagram [TSC08]

Zur Bewertung der Umformbarkeit eines Werkstoffs, wird eine werkstoffspezifische Grenzkurve für Materialversagen, die Grenzformänderungskurve (GFK) oder auch Forming Limit Curve (FLC) (in Abbildung 2-3 gestrichelt dargestellt), verwendet. Ist die auftretende Verformung bei konstanten Dehnungsverhältnissen während eines Umformvorgangs größer oder gleich der durch die Grenzkurve angegebenen maximalen Verformung, so führt dies zum Versagen des Werkstoffs. Dabei schnürt das Material zunächst ein, ehe es bei weiterer Belastung reißt. Somit ermöglicht die GFK eine Aussage darüber, ob ein Werkstück aus einem bestimmten Material und mit einem bestimmten Verfahren umformtechnisch ohne Materialversagen hergestellt werden kann oder nicht. Die Erhebung der werkstoffspezifischen Grenzformänderungskurven erfolgt dabei empirisch mittels Versuchen. Hierbei finden sich beispielsweise in [LANG90] mehrere Möglichkeiten, um die GFK für ein bestimmtes Material zu ermitteln. Ein sehr weit verbreitetes Verfahren stellt hierbei der Nakajima-Versuch dar [DIN EN ISO 12004-2]. Je nachdem, auf welchem Pfad (siehe Abbildung 2-3) die Umformung stattfindet, kann unterschiedlich weit umgeformt werden. Es zeigt sich, dass ein Bauteil, je nachdem welche Umformgeschichte es hat,

trotz vermeintlich gleicher Form unterschiedliche Eigenschaften haben wird. Es können lokale Blechdickenunterschiede vorliegen. Die weitere Umformbarkeit hängt davon ab, wie nahe der Umformzustand bereits an der Grenzformänderungskurve und damit am Versagen ist [LANG84].

Entscheidend für die Form der Grenzformänderungskurve ist auch der sogenannte Formänderungsweg. Abbildung 2-3 gilt nur dann, wenn die Umformung beginnend mit einer unverformten Platine ( $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ ) stetig verläuft. Der Quotient  $d\varphi_2/d\varphi_1$  muss bei der Umformung konstant sein [MUES75]. Nimmt das Verhältnis  $d\varphi_2/d\varphi_1$  bei der Umformung (beispielsweise bei Umformung in mehreren Schritten) zu, so können höhere Grenzformänderungen erreicht werden als im umgekehrten Fall. Ein Grenzformänderungsdiagramm, das die Einflüsse des Verformungsweges berücksichtigt, ist in Abbildung 2-4 zu sehen. Die höchste Überschreitung der Grenzformänderungskurve ist möglich, wenn auf Tiefziehen oder einachsigen Zug eine Streckziehumformung folgt, siehe „Maximale FLC“ in Abbildung 2-4. Wird Streckziehen mit einachsigem Zug kombiniert, entsteht die „Minimale FLC“.

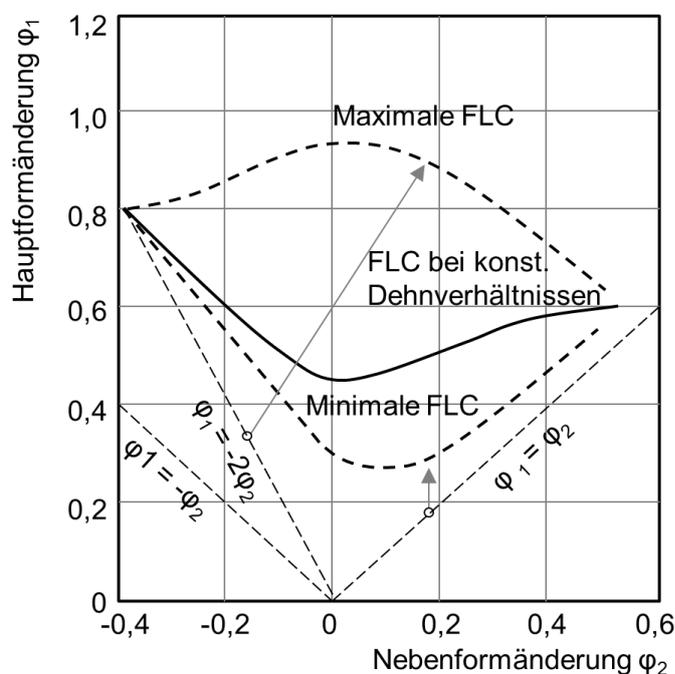


Abbildung 2-4: FLC mit Berücksichtigung der Formänderungsgeschichte [HASE78]

Für eine umfassend gültige Darstellung von nichtlinearen Dehnpfaden mit Grenzformänderungsdiagrammen müssten die möglichen Kombinationen von

Dehnpfaden experimentell abgebildet werden. In [VOLK12] wird ein neuer phänomenologischer dehnungsbasierter Ansatz zur Beschreibung des Versagensverhaltens bei nichtlinearen, zweistufigen Dehnpfaden vorgestellt. Dabei werden die Dehnverhältnisse vom ersten und zweiten Dehnpfad in Relation zur theoretisch erreichbaren Länge des jeweiligen Dehnpfads für die bei konstanten Dehnverhältnissen ermittelte Grenzformänderungskurve gesetzt. Damit kann der experimentell ermittelte Versagensort für die untersuchten Werkstoffe gut prognostiziert werden. Weiterentwickelte Verfahren wie das sog. generalisierte Grenzformänderungskonzept werden in [GABER16] vorgestellt und weiteren zeitabhängigen Auswertemethoden gegenübergestellt. Mit diesem können auch komplexere mehrstufige Dehnungsabläufe prognostiziert werden.

## **2.2 Umformverfahren**

### **2.2.1 Tiefziehen**

#### Definition und Verfahrensablauf

Gemäß DIN 8584 [DIN 8584] ist Tiefziehen definiert als Zugdruckumformen eines Blechzuschnitts (je nach Werkstoff auch Folie oder Platte, einer Tafel, eines Ausschnitts oder Abschnitts) in einen einseitig offenen Hohlkörper oder eines vorgezogenen Hohlkörpers in einen solchen mit geringerem Querschnitt ohne gewollte Veränderung der Blechdicke.

Bei der im ersten Teil der Definition beschriebenen Möglichkeit des Tiefziehens eines ebenen Ausgangsblechs spricht man vom „Tiefziehen im Anschlag“ [PIET00] oder auch „Tiefziehen im Erstzug“ [LANG90]. Die Weiterbearbeitung eines bereits vorgezogenen Hohlkörpers mittels Tiefziehen wird entsprechend als „Tiefziehen im Weiterschlag“ [PIET00] oder „Tiefziehen im Weiterzug“ [LANG90] bezeichnet.

Aufgrund des relativ niedrigen Werkzeugverschleißes, sowie einer Teilefertigung in einem engen Toleranzbereich, findet das Tiefziehen mit starrem Werkzeug am häufigsten Anwendung. [FLI96]

Die folgende Abbildung 2-5 zeigt den prinzipiellen Aufbau für das Tiefziehen eines rotationssymmetrischen Napfes im Erstzug:

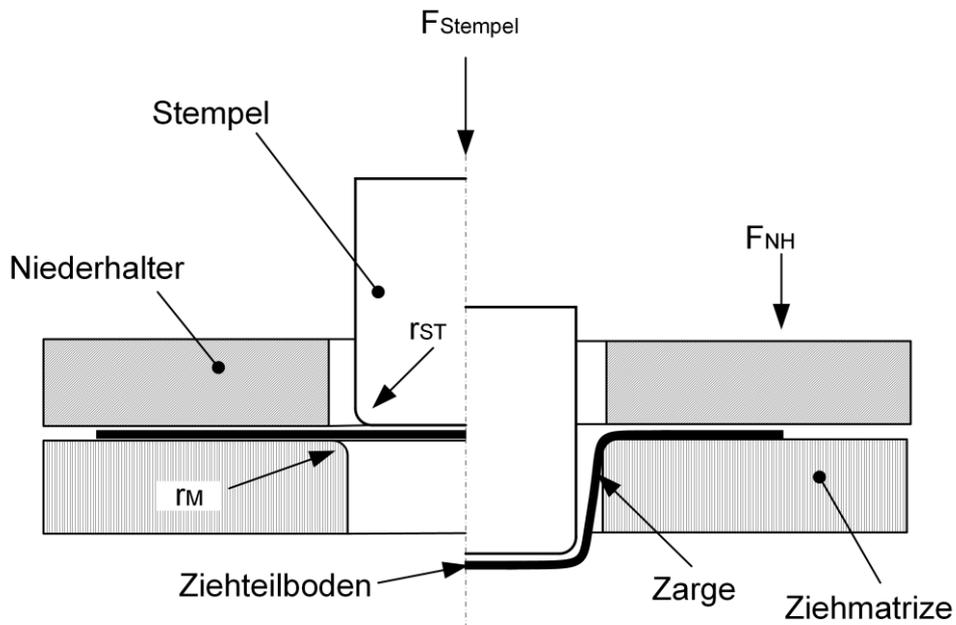


Abbildung 2-5: Tiefziehen im Erstzug [PIET00]

### Versagensarten beim Tiefziehen

Zusammengefasst können beim Tiefziehen folgende Versagens- bzw. Fehlerarten auftreten (siehe Abbildung 2-6) [PIET00],[LANG90]:

- Falten 1. Art
- Falten 2. Art
- Reißer
- Rückfederung
- Zipfelbildung

Die Ausbildung von Falten 1. Art (siehe Abbildung 2-6) hängt stark von der Höhe der Niederhalterkraft ab. Ist diese zu gering gewählt, so kommt es infolge der tangentialen Druckspannungen im Bereich des Niederhalters zu einer Materialaufwölbung, es entstehen Falten 1. Art.

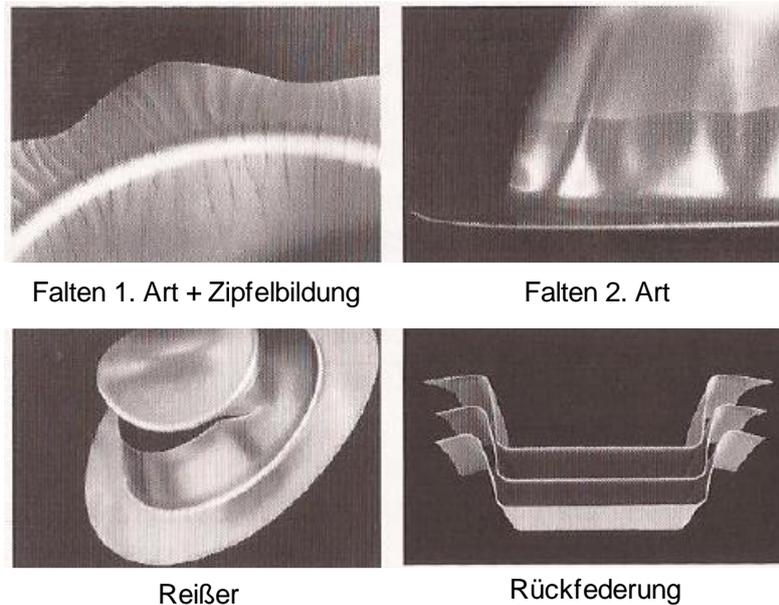


Abbildung 2-6: Versagensarten beim Tiefziehen [PIET00]

Im weiteren Verlauf des Tiefziehvorgangs besteht jedoch die Möglichkeit, dass diese Falten durch das Ziehen des Blechs über die Matrizenrundung wieder geglättet werden. Voraussetzungen hierfür sind hinreichend große radiale Zugspannungen sowie ein möglichst kleiner Radius der Matrizenrundung. Falten 2. Art entstehen in Bereichen freier Umformung, in denen das Blech keinen Kontakt zum Werkzeug besitzt und sich somit ohne geometrische Zwänge verformen kann. Ausschlaggebend für die Faltenbildung 2. Art sind Druckspannungen in Umfangsrichtung. Beim Tiefziehen tritt dieser Versagensfall in erster Linie im Bereich zwischen Matrizen- und Stempelkantenrundung ( $r_M$  bzw.  $r_{ST}$ ) auf. An Stellen mit besonders hoher Belastung kann es zu Reißern im Material kommen. Beim Tiefziehen tritt dies in der Regel im Bereich der Stempelkantenrundung auf, da dort der Werkstoff den höchsten Belastungen ausgesetzt ist. Rückfederungen sind darauf zurückzuführen, dass bei einer plastischen Umformung eines Werkstoffs immer auch elastische Anteile auftreten. Wird der Werkstoff nach der Umformung entlastet, so bilden sich die elastischen Verformungsanteile zurück, es kommt zur Rückfederung. Dies wirkt sich in erster Linie auf die Maßhaltigkeit eines Bauteils aus.

Ein weiteres typisches Fehlerbild beim Tiefziehen ist die sogenannte Zipfelbildung im Flanschbereich des Ziehteils. Die Zipfelbildung ist eine Folge eines anisotropen Werkstoffverhaltens. Dabei führen die vom Stempel verursachten radialen

Zugspannungen im Werkstoff längs und quer zur Walzrichtung zu größeren Dehnungen und verursachen somit die Ausbildung von Zipfeln. [PIET00],[LANG90]

### 2.2.2 Streckziehen

#### Definition und Verfahrensablauf

Streckziehen ist ein Verfahren des Tiefens und somit gemäß DIN 8585 [DIN 8585] dem Zugumformen zugeordnet. Mittels Streckziehen werden häufig großflächige Teile ( $\geq 50\text{m}^2$ ) mit großen Rundungsradien ( $\geq 15\text{m}$ ) bei geringer Stückzahl hergestellt. Prinzipiell sind zwei Verfahrensarten des Streckziehens zu unterscheiden, nämlich das einfache Streckziehen und das Tangentialstreckziehen. [GRUN82], [LANG90] Beim einfachen Streckziehen wird ein Blech zunächst in einer um die eigene Achse drehbaren Einspannvorrichtung fixiert. Die Umformung erfolgt durch einen vertikal verfahrenen Stempel, dessen Kontur die Negativform des herzustellenden Werkstücks abbildet. Die finale Form des Werkstücks wird im Scheitelpunkt der Stempelbewegung erreicht. Durch die rein vertikale Stempelbewegung sind jedoch keine Hinterschnitte realisierbar. [GRUN82], [LANG90]. In folgender Abbildung 2-7 ist der Verfahrensablauf des einfachen Streckziehens grafisch dargestellt:

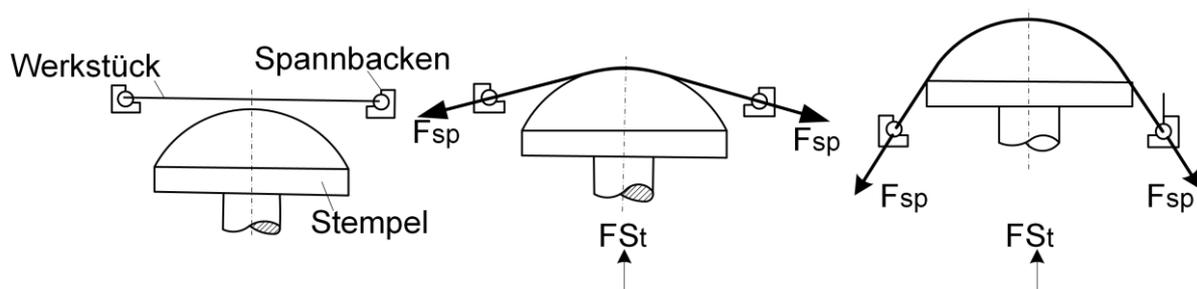


Abbildung 2-7: Prinzipdarstellung des einfachen Streckziehens [LANG90]

Die Umformung mittels Tangentialstreckziehen erfolgt in einem dreistufigen Prozess (siehe Abbildung 2-8) [GRUN82],[LANG90]:

- 1) Einspannen des Blechs in eine Spannvorrichtung und Vordehnen des Materials bis maximal zur Streckgrenze, um einen gleichmäßigen Dehnungszustand herzustellen und unebene Stellen zu glätten

- 2) Das vorgespannte Blech wird an die Kontur des Stempels angelegt. Die Spannvorrichtung ist dabei beweglich und legt das Blech an den entweder festen oder vertikal beweglichen Stempel an. Es findet kaum Relativbewegung zwischen Stempel und Blech statt, die Streckziehkraft wirkt stets tangential zur Stempelkontur.
- 3) Nach dem Anlegen des Blechs an die Formkontur und somit der Erzeugung der finalen Werkstückform erfolgt ein nochmaliges Nachstrecken des Werkstoffs. Dies dient der Minimierung von Rückfederungseffekten und somit der Maximierung von Form- und Maßgenauigkeit

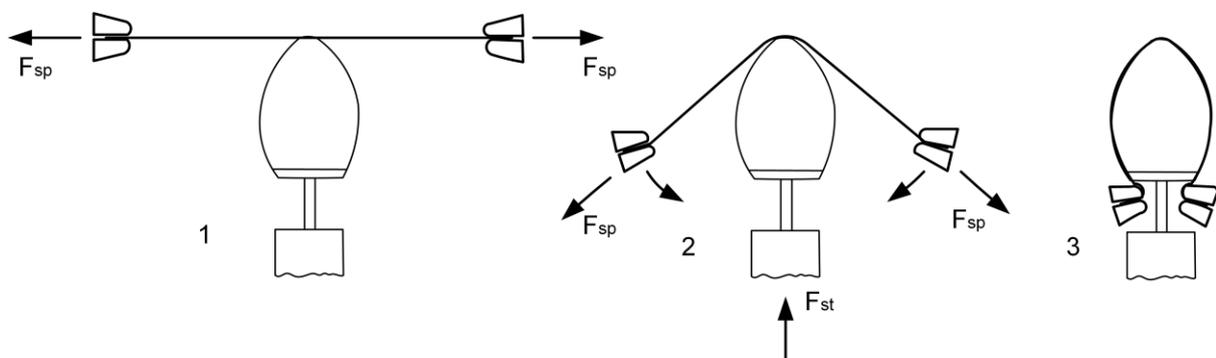


Abbildung 2-8: Prinzipdarstellung des Tangentialstreckziehens [LANG90]

Das Tangentialstreckziehen stellt das technisch komplexere Verfahren dar, bietet jedoch gegenüber dem einfachen Streckziehen zwei wesentliche Vorteile. Zum einen ist die Maß- und Formgenauigkeit höher, da aufgrund des tangentialen Anlegens des Blechs an die Stempelkontur keine Reibung auftritt. Zum anderen sind mittels Tangentialstreckziehen Hinterschneidungen in der finalen Werkstückform möglich. Als Vorteil des einfachen Streckziehens ist vor allem die einfachere Bauweise des dafür notwendigen Werkzeugs zu nennen. [GRUN82], [LANG90]

### Versagensarten beim Streckziehen

Die Verfahrensgrenze beim Streckziehen ist jene maximale Werkstoffdehnung, ab der das Material beginnt, sich einzuschnüren und anschließend zu reißen. Einschnürungen treten immer dann auf, wenn die erforderliche Dehnung für einen Streckziehvorgang größer ist als die Gleichmaßdehnung des verwendeten Werkstoffs. Reißer können beispielsweise dann entstehen, wenn die auftretenden Reibkräfte

zwischen Stempel und dem Blech zu groß sind. Prinzipiell können drei verschiedene Arten von Rissen unterschieden werden (siehe Abbildung 2-9) [LANG90]:

- Risse an Bereichen im Blech, welche noch nicht am Stempel anliegen, beispielsweise den Einspannstellen. Durch die Einspannung werden Kerbspannungen hervorgerufen, welche eine zusätzliche Beanspruchung darstellen und zu Rissen führen können. Solche Risse treten meist erst gegen Ende des Streckziehvorgangs auf. [LANG90]
- Risse im Bereich des Stempelscheitels infolge Spröbruch. Reicht die Umformbarkeit eines spröden Werkstoffs nicht aus, um sich der Stempelkontur im Scheitelbereich anzupassen, so kommt es infolge der Überbelastung zu einem Aufreißen des Blechs an dieser Stelle. [LANG90]
- Risse im Bereich des Stempelscheitels, welche bei duktilen Werkstoffen als eine Folge von Einschnürungen eintreten. Verglichen mit dem oben beschriebenen Spröbruch tritt dieses Versagen erst zu einem späteren Prozesszeitpunkt auf. [LANG90]



Abbildung 2-9: Versagensarten beim Streckziehen [LANG90]

### 2.2.3 Prägen

Das Prägen ist ein Verfahren des Druckumformens nach DIN 8583 [DIN8583-1]. Es wird auch als Eindrücken bezeichnet und ist den Massivumformverfahren zugeordnet. Beim Prägen dringt ein Werkzeug örtlich in das Werkstück ein. Ein bekanntes Anwendungsverfahren ist das Prägen von Münzen.

## 2.2.4 Hohlprägen

### Definition und Verfahrensablauf

Hohlprägen ist in die Gruppe des Zugumformens und entsprechend DIN 8585 [DIN8585] als ein Verfahren des Tiefens einzuordnen. Gemäß Definition bezeichnet Hohlprägen das Tiefen mit einem starren, beweglichen Prägestempel in ein Gegenwerkzeug (Matrize) hinein. Das Gegenwerkzeug kann dabei entweder starr oder nachgiebig ausgeführt sein. [GRUN82], [LANG90], [SPUR85], [TSCH08], [WARN06]. Ein typisches Anwendungsgebiet ist das Hohlprägen von KFZ-Schildern.

Wie bereits der obenstehenden Definition zu entnehmen ist, erfolgt die Umformung beim Hohlprägen anhand eines Stempels und einer Matrize. Im Stempel ist zumeist in Form von Erhebungen die Prägekontur abgebildet, die Matrize stellt anhand entsprechender Vertiefungen das passende Negativ dar. Das umzuformende Blech wird auf die Matrize aufgelegt und durch den Stempel vertikal in die Matrizenvertiefung gezogen oder gebogen. Eine Blechdickenänderung ist dabei nicht beabsichtigt. [GRUN82], [LANG90],[SPUR85], [TSCH08]

Werden mittels Hohlprägen rinnenartige Vertiefungen in Werkstücke eingebracht, so bezeichnet man diesen Vorgang auch als „Sicken“ bzw. „Versicken“.

### Spannungen beim Hohlprägen

Bei den während des Hohlprägens auftretenden Spannungen ist prinzipiell zwischen drei Bereichen zu differenzieren (siehe Abbildung 2-10):

- 1) Bereich der Ziehkantenrundung
- 2) Bereich freier Umformung
- 3) Bereich der Stempelkantenrundung

In den Bereichen 1 und 3 hat das Blech direkten Kontakt zu den formgebenden Werkzeugkonturen. Aufgrund der dadurch auftretenden Reibung herrscht in diesen Bereichen ein 3-achsiger Spannungszustand, wobei in Sickenlängsrichtung und quer dazu Zugspannungen sowie in Blechdickenrichtung Druckspannungen auftreten.

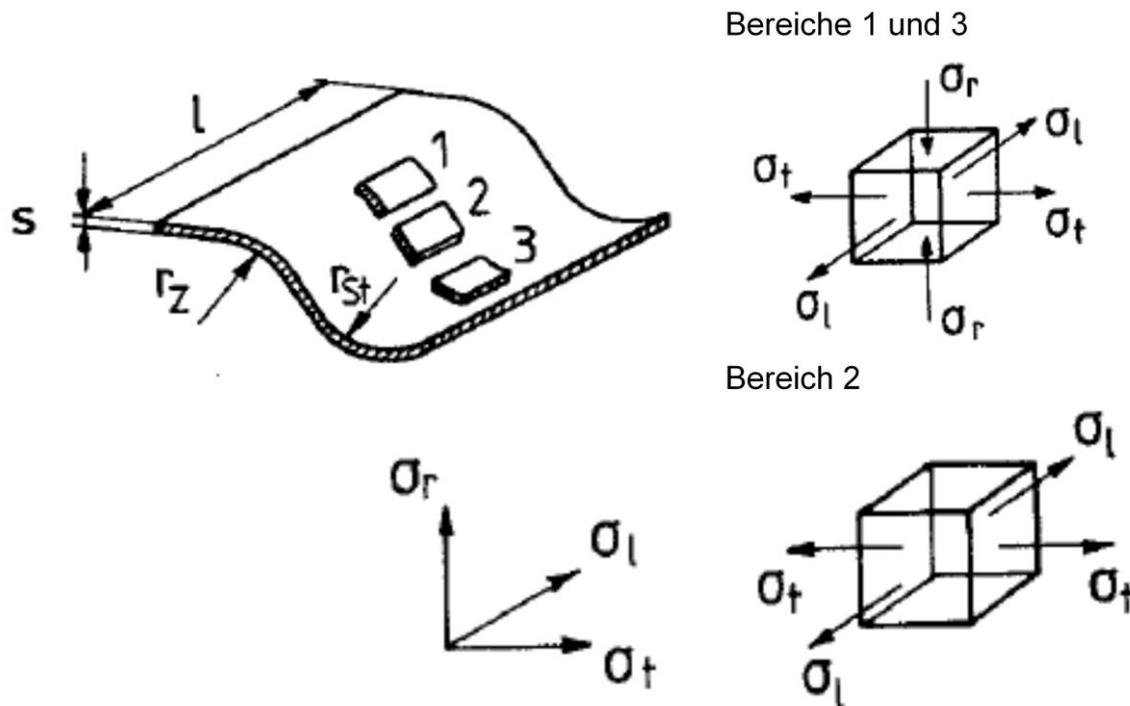


Abbildung 2-10: Auftretende Spannungen beim Hohlprägen [PETZ70]

Im Bereich 2 findet ein freier, nicht an die Werkzeugkontur zwangsgebundener Umformvorgang statt. Dadurch fallen die durch den Werkzeugkontakt in den Bereichen 1 und 3 entstandenen Druckspannungen in diesem Bereich weg und es herrscht ein 2-achsiger Spannungszustand bestehend aus Zugspannungen in Sickenlängsrichtung sowie quer dazu.

### Werkzeuge und Verfahren zum Hohlprägen

Hohlprägewerkzeuge bestehen in der Regel aus einem Prägestempel und einer Matrize. Dabei bildet der Stempel zumeist reliefartig die Prägeform ab, während die Matrize das zugehörige Negativ in Form von Vertiefungen darstellt [SPUR85], [TSCH08]. Einige Werkzeugausführungen weisen zusätzlich einen separaten Blechniederhalter auf. Prinzipiell können folgende Werkzeugausführungen und Verfahrensvarianten unterschieden werden [SPUR85], [WIDM84]:

- Werkzeug <sup>mit</sup> <sub>ohne</sub> hartsitzendem Stempel (Abbildung 2-11, links)

- Werkzeug <sup>mit</sup><sub>ohne</sub> separatem Niederhalter (Abbildung 2-11, rechts)
- Matrize <sup>starr</sup><sub>nachgiebig</sub>

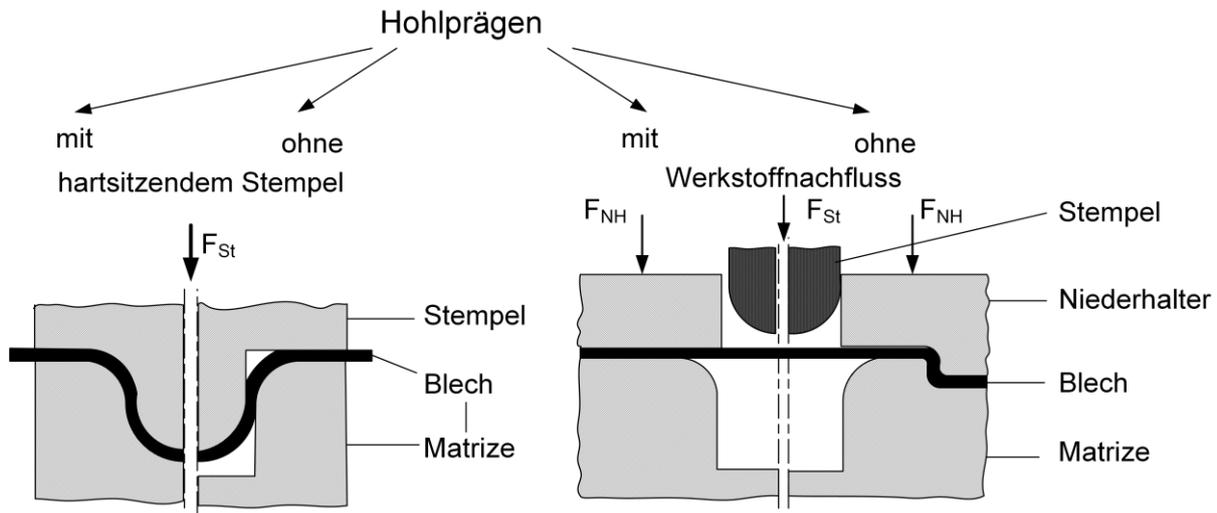


Abbildung 2-11: Hohlprägen: Werkzeugausführungen (links), Verfahrensvarianten (rechts); [WIDM84]

Häufig finden für Hohlprägevorgänge einfachwirkende, säulengeführte Pressen Verwendung. Mechanische Pressen werden dabei häufiger eingesetzt als hydraulische [TSCH08]. Die Herstellung von Sicken ist auch anhand von Fallhämmern mit Fallhammerwerkzeugen möglich. [LANG90] Beim Hohlprägen ist die wesentliche Versagensart Reißen. Während des Umformens wird das Blechmaterial zumeist ausschließlich auf Dehnung oder Biegung beansprucht. Kommen zu diesen Beanspruchungen noch Zugspannungen hinzu, so kann dies zu Rissen führen [SPUR85]. Gerade bei scharfkantigen Prägungen stellen die Prägekanten hinsichtlich Risse einen besonders gefährdeten Bereich dar. Des Weiteren erhöht sich die Rissneigung, wenn längliche Prägungen parallel zum Faserverlauf des Werkstoffs eingebracht werden. Daher ist es zu empfehlen, längliche Prägungen stets quer zum Faserverlauf des Werkstoffs anzuordnen [TSCH08]. Zur Herstellung von Sicken sind prinzipiell die beiden folgenden Verfahrensgruppen zu unterscheiden:

- *Schrittweises Umformen mit einem drehend bewegten Werkzeug:*

Die Erzeugung der Sicke erfolgt hierbei durch eine über die Sickenlänge fortlaufende Umformung. Als bekanntestes Verfahren dieser Gruppe ist das

Rollsicken, auch als Walsicken oder Walzprofilieren bezeichnet, zu nennen (siehe Abbildung 2-12 links). [PETZ70], [WIDM84]

- *Umformen mit einem geradlinig bewegten Werkzeug:*

Bei der Sickenherstellung mit einem geradlinig bewegten Werkzeug wird die Sicke über ihre gesamte Länge gleichzeitig erzeugt. Hierbei ist das Hohlprägen, auch Prägesicken genannt, als bedeutendstes Verfahren anzuführen (siehe Abbildung 2-12 rechts). Weitere Möglichkeiten sind beispielsweise von Oehler und Garbers in [OEHL68] beschrieben, die im Zuge einer Versuchsreihe Sicken sowohl durch Tiefziehen als auch durch Streckziehen und Schlagen unter der Aushauschere erzeugten. [PETZ70], [WIDM84]

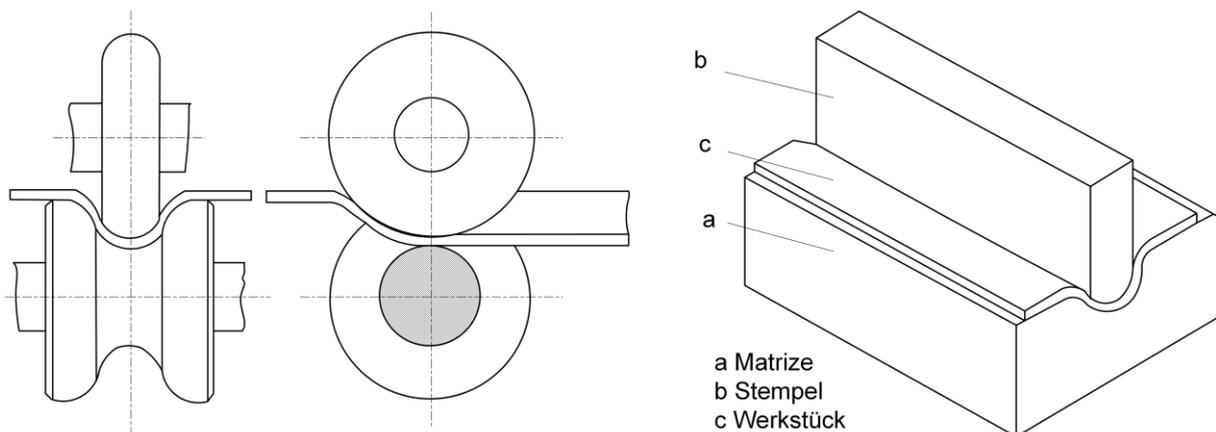


Abbildung 2-12: *Prinzipdarstellung des Rollsickens (links) und des Prägesickens (rechts)* [PETZ91]

Bei beiden oben genannten Verfahrensgruppen kann jeweils weiter differenziert werden, ob während der Umformung der Werkstoff in die Umformzone nachfließen kann oder nicht. Ist ein Blechwerkstoffnachfluss möglich, so wird das Blech im Wesentlichen nur auf Biegung beansprucht. Wird der Werkstoff am Nachfließen gehindert, so addieren sich zu den Biegespannungen noch senkrecht zur Sicke auftretende Zugspannungen. [PETZ70]

Wie in Kapitel 2.3 noch ausführlich geschildert, erhöht sich die Versteifung eines gesickten Blechs in großem Maße mit steigender Sickentiefe. Die Sickentiefe lässt sich dabei durch eine möglichst homogene Formänderungsverteilung während der Sickenherstellung maximieren. Eine homogene Formänderungsverteilung ist aus

fertigungstechnischer Sicht dadurch zu erreichen, dass sowohl der Stempelradius  $r_{st}$  als auch der Ziehkantenradius  $r_z$  möglichst groß gewählt werden sowie sich deren Verhältnis  $r_{st}/r_z$  im Bereich zwischen 1 und 2 bewegt. [MAIW92], [OEHL68], [WIDM84]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff „Prägen“ gleichbedeutend mit „Hohlprägen“ im Sinne der Blechumformung verwendet. Das Massivumformen wird nicht behandelt.

## 2.3 Sicken

### 2.3.1 Definition

Gemäß DIN 8585 [DIN8585] sind Sicken definiert als „rinnenartige Vertiefungen in ebenen oder gekrümmten Blechflächen, wobei die Tiefe gegenüber der Länge klein ist“. Die geometrischen Bezeichnungen einer Sicke sind in folgender Abbildung 2-13 am Beispiel einer Sicke mit einem einfachen rechteckigen Querschnitt aufgezeigt:

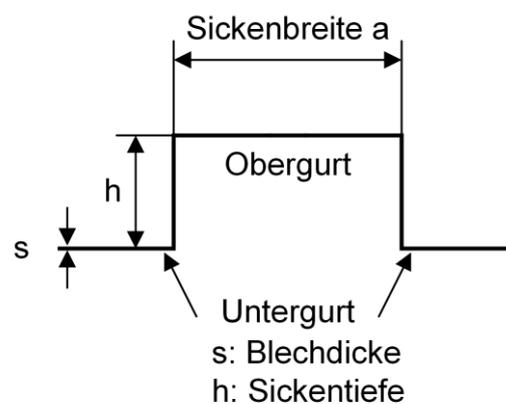


Abbildung 2-13: Geometrische Bezeichnungen an einer Trapezsicke [EMMR05]

Als Untergurt wird der Bereich des ebenen, nicht umgeformten Blechs bezeichnet. Der Obergurt beinhaltet die Flächen, die aus der ursprünglichen Blechebene durch Umformung verschoben sind. [MAIW92], [OEHL72], [PETZ70]. Weitere mögliche Anwendungen sind beispielsweise die Verwendung von Sicken als Designelemente, zur Festlegung einer Sollknickstelle [MAIW92], als Leitbahnen für Flüssigkeiten [PETZ70] oder als Entlastungssicken [OEHL72].

### 2.3.2 Sickentypen

Eine Einteilung verschiedener Sickentypen kann nach [LANG90] anhand folgender Kriterien erfolgen Sickenquerschnitt, Sickenanordnung und Sickenart (siehe Abbildung 2-14). Diese Einteilung basiert auf der Betrachtung und Anordnung von Einzelsicken. Weitergehende, komplexere Strukturen, die sogenannten Sickenmuster, sind z.B. erst in [SCHW02] aufgezeigt. Die wesentliche Basis dafür sind die immer mächtigeren Berechnungs- und Optimierungsmöglichkeiten.

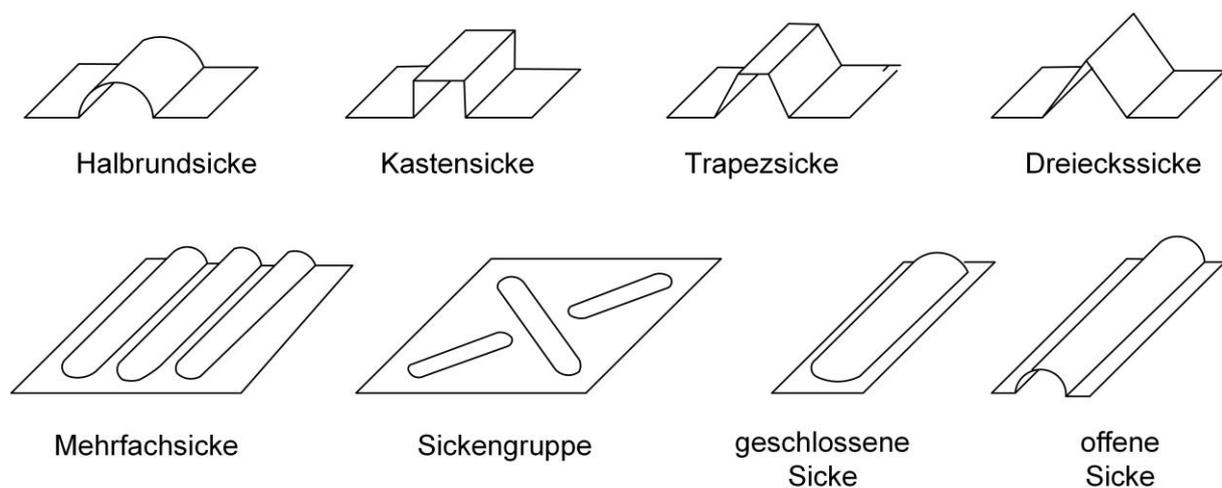


Abbildung 2-14: Verschiedene Sickentypen [LANG90]

### 2.3.3 Versteifungswirkung und Belastbarkeit

Der Sinn und Zweck des Einprägens von Sicken in Blechbauteile liegt zumeist in der damit verbundenen Erhöhung der Blechsteifigkeit. Das Trägheits- bzw. Widerstandsmoment wird vergrößert und dadurch der Widerstand des Blechs gegen elastische und plastische Verformung gesteigert. [MAIW92], [PETZ70], [WIDM84]

Zur Beurteilung der Wirkung von Sicken werden zwei verschiedene Messgrößen betrachtet:

1) Versteifungswirkung:

Die Versteifung bezeichnet den Widerstand eines Blechs gegen elastische Verformung bzw. Durchbiegung. Als zugehörige Berechnungsgröße dient hierbei das Trägheitsmoment des belasteten Sickenquerschnitts. Dabei ist

ferner zwischen der Versteifungswirkung bezüglich Normallast, Schub- und Torsionsbeanspruchung zu unterscheiden. [MAIW92], [PETZ70], [WIDM84]

## 2) Belastbarkeit:

Die Belastbarkeit eines Werkstoffs ist begrenzt durch jene maximal aufbringbare Kraft, ab welcher plastische Formänderung auftritt. Bei dieser Belastung ist die Streckgrenze des Werkstoffs erreicht. Die zugehörige charakteristische Kenngröße ist das Widerstandsmoment. [MAIW92], [PETZ70], [WIDM84]

Die versteifende Wirkung einer Sicke wird dabei von folgenden Faktoren beeinflusst [LANG90], [OEHL72], [PETZ70], [WIDM84]:

- Sickenquerschnittsform
- Sickentiefe
- Blechdicke
- Lage der Sickenlängsachse zur Belastungsrichtung
- Sickenanordnung
- Sickengestaltung
- Werkstoff

Die folgenden Absätze stellen auf die Einflüsse der oben genannten Faktoren bezüglich der Versteifungswirkung von Sicken dar.

### Sickenquerschnitt, Sickentiefe, Blechdicke

Die Einflüsse der Sickenquerschnittsform, der Sickentiefe und der Blechdicke auf die Versteifungswirkung lassen sich anhand der Biegesteifigkeit anschaulich erläutern. Die Biegesteifigkeit  $EI$  errechnet sich aus dem Produkt von E-Modul und Trägheitsmoment  $I$ . Die Höhe des Trägheitsmoments  $I$  bezüglich einer bestimmten Achse hängt dabei von den geometrischen Daten des betrachteten Werkstücks sowie von dessen Blechdicke ab. Die Berechnung des Trägheitsmoments sowie deren Erhöhung durch eine Sicke seien im Folgenden am Beispiel einer Rechtecksicke, welche eine Biegebelastung um die neutrale Faser (siehe Abbildung 2-15) erfährt,

erläutert. Das Flächenträgheitsmoment bezüglich der x-Achse berechnet sich allgemein durch Lösen des Integrals, siehe Formel 2.6:

$$I_x = \int z^2 dA. \quad \text{Formel 2.6}$$

Im Falle eines unversickten Blechquerschnitts ergibt sich das Trägheitsmoment I zu:

$$I = s \times \frac{L^3}{12} \quad \text{Formel 2.7}$$

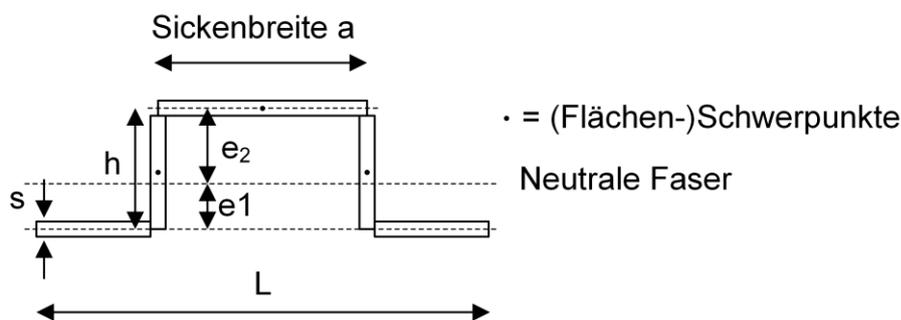


Abbildung 2-15: Geometrische Grundlagen zur Berechnung des Flächenträgheitsmoments einer Rechtecksicke

Im versickten Blech gemäß Abbildung 2-15 verschiebt sich der Massenschwerpunkt des Querschnitts und folglich auch die neutrale Faser aus der Blechebene heraus. Die Abstände  $e_1$  und  $e_2$  bezeichnen die Entfernung von Unter- bzw. Obergurt von der neutralen Faser. In der Berechnung des Flächenträgheitsmoments ist dies anhand der sogenannten Steiner-Anteile als zusätzliche Terme zu berücksichtigen. Der Steiner-Anteil muss für jede Teilfläche berücksichtigt werden, deren Schwerpunkt allgemein einen Abstand  $z$  von der neutralen Faser aufweist. Die entsprechende Formel zur Berechnung des Trägheitsmoments mit Steiner-Anteil lautet wie folgt:

$$I_{\text{versickt}} = I + z^2 \times A \quad \text{Formel 2.8}$$

$\Downarrow$   
 Steiner-Anteil

Bezogen auf das Beispiel der Rechtecksicke berechnet sich das Trägheitsmoment unter Vernachlässigung des Steiner-Anteils der beiden Sickenflanken zu:

$$I_{ges} = \left[ \frac{s^3(L-a)}{12} + e_1^2 s \cdot (L-a) \right] + 2 \frac{s \cdot h^3}{12} + \left[ \frac{s^3 a}{12} + e_2^2 s \cdot a \right] \quad \text{Formel 2.9}$$

$\Downarrow$   
 Untergurt

$\Downarrow$   
 2 Flanken

$\Downarrow$   
 Obergurt

Aus der Formel ist der überragende Einfluss der Sicken­tiefe  $h$  auf das Trägheitsmoment zu erkennen, da sie in der dritten Potenz in die Berechnung eingeht. Die Blechdicke besitzt nur einen proportionalen Einfluss auf das Trägheitsmoment. Dabei ist zu beachten, dass eine Blechdickenerhöhung zur Steigerung der Versteifungswirkung auch immer eine Massenerhöhung mit sich bringt.

Die real gemessenen Steifigkeitswerte fallen im Vergleich zur Berechnung bei [GAR­B58], [OEHL72] und [WIDM84] stets etwas geringer aus. [GAR­B58] führt dazu einen Korrekturfaktor zum Ausgleich dieser Differenz ein, welcher im Wesentlichen vom Sickenquerschnitt, der Belastungsgröße, der Kraftverteilung und der Auflagerbedingungen abhängt. Widmann führt in [WIDM84] Abweichungsdiagramme an, um die Differenz zwischen der Berechnung und der Realität auszugleichen. In der Regel bewegt sich die Abweichung der realen Werte von den errechneten Werten im Bereich von etwa 10% [KIEN55]. Die Autoren nennen keine Gründe für die Abweichungen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die Versteifungswirkung von Sicken überproportional mit steigender Sicken­tiefe und proportional mit der Erhöhung der Blechdicke erhöht. Die Form des Sickenquerschnitts legt die zu berücksichtigenden Steiner-Anteile fest und nimmt dadurch Einfluss auf die Versteifungswirkung.

### Lage der Sicken­längsachse zur Belastungsrichtung

Die versteifende Wirkung einer Sicke hängt wesentlich von der Lage der Sicken­längsachse zur Belastungsrichtung ab.

Die folgende Abbildung 2-16 zeigt verschiedene Belastungen an einer Kastensicke auf. An dem gezeigten Beispiel in Abbildung 2-16 erhöht sich sowohl die Biegesteifigkeit für den Belastungsfall „C“ als auch die Knicksteifigkeit in Sicken­längsrichtung bei der Belastung „A“. Wirken jedoch Kräfte quer zur

Sickenlängsachse in der Blechebene gemäß Belastungsfall „B“, so bewirkt die Sicke eine Reduzierung sowohl der Biege- als auch der Knicksteifigkeit. [OEHL72]

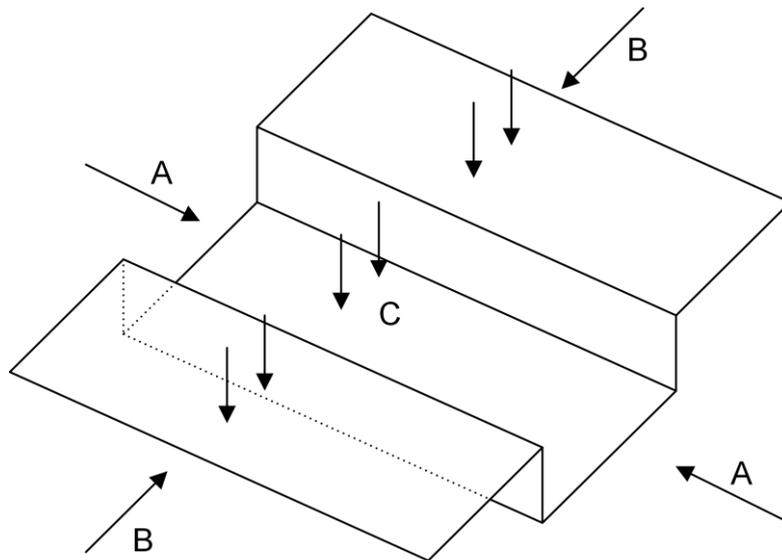


Abbildung 2-16: *Verschiedene Belastungsrichtungen an einer offenen Halbrundsicke*  
[OEHL72]

In weiteren Experimenten untersucht Oehler in [OEHL72] die Knicksteifigkeit bei einer Belastung in der Blechebene abhängig vom Winkel der Belastungs- zur Sickenlängsrichtung. Dabei wird ein starker Abfall des Knickwiderstands bereits bei geringer Abweichung der Belastungsrichtung von der Sickenlängsachse aufgezeigt. [OEHL72]

Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass für eine gewünschte Versteifungswirkung die Lage der Sickenlängsachse stets an die Richtung der voraussichtlichen Belastung angepasst sein muss.

### Sickenanordnung

Bei der Anordnung von Sicken hinsichtlich deren Position und Orientierung auf einem Blech ist vor allem darauf zu achten, trägheitsbevorzugte Achsen zu vermeiden. Somit soll ein Knicken um diese Achsen verhindert werden. Hierbei gilt es beispielsweise, geradlinige Sicken nicht in den Symmetrieachsen eines Blechs anzuordnen. Bei Mehrfachsicken ist darauf zu achten, dass keine geraden Linien durch das Blech

verlaufen ohne von Sicken unterbrochen zu werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 2-17 zu sehen. [MAIW92], [OEHL68], [OEHL72]

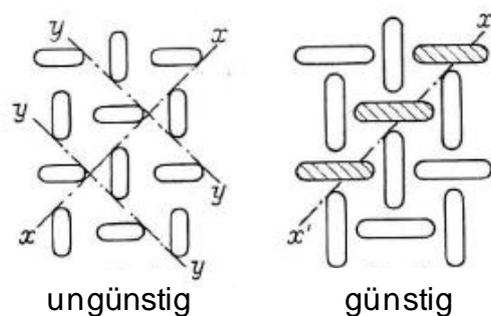


Abbildung 2-17: Beispiel für die Vermeidung trägheitsbevorzugter Achsen [OEHL72]

### Sickengestaltung

Auch die Gestaltung von Sickenbildern bezüglich Sickenform und -verlauf im Blech hat einen Einfluss auf die versteifende Wirkung. Anhand von Versuchen konnten beispielsweise von Kienzle, Oehler und Widmann Gestaltungsparameter festgelegt werden. Die wichtigsten Parameter hinsichtlich maximaler Versteifungswirkung sind:

- Das Sickenbild sollte unregelmäßig und mit veränderlichem Querschnitt gestaltet werden [MAIW92], [OEHL72]
- Das Sickenbild sollte möglichst stark von der äußeren Kontur des Blechs abweichen [OEHL68]
- Die Sickenausläufe sollten versetzt zu den Symmetrieachsen des Blechs verlaufen [MAIW92]
- Die Sickenausläufe sollten über Blechkanten hinweg weiterlaufen [MAIW92], [OEHL68]
- Knotenpunkte sich kreuzender Sicken sind zu vermeiden, da sonst unter Last Spannungsspitzen entstehen [MAIW92], [OEHL72]
- Das Sickenbild sollte einen Versickungsgrad im Bereich des Wertes 1 aufweisen. Der Versickungsgrad bezeichnet den flächenmäßigen Anteil der Bereiche maximaler Sickentiefe bezogen auf den Anteil des unversickten Bleches [KIEN55]

### Werkstoff

Jeder Werkstoff besitzt einen spezifischen, nahezu konstanten E-Modul. Durch die Auswahl eines Werkstoffs mit einem größeren E-Modul lässt sich somit die bereits erwähnte Biegesteifigkeit  $EI$  proportional erhöhen.

### 2.3.4 Größte erreichbare Sickentiefe beim Hohlprägen

Sind sowohl der Blechwerkstoff, die Blechstärke als auch die Sickenform vorgegeben, so ist für die Versteifungswirkung überwiegend nur noch die Sickentiefe entscheidend. [WIDM84]

Die Versagensgrenze für die maximale Sickentiefe einer einzelnen Sicke ist die Gleichmaßdehnung des Werkstoffs in Normalenrichtung. Mit Erreichen dieser Dehnung beginnt der Werkstoff sich einzuschnüren und bei weiterer Umformung zu reißen [PETZ70]. Damit die maximal erreichbare Sickentiefe durch Werkstoffversagen und nicht durch die Werkzeuggeometrie begrenzt ist, muss bei Halbrundsicken folgende Bedingung erfüllt sein (geometrische Maße siehe Abbildung 2-18) [LANG90]:

$$a_0 \geq 2 \cdot (r_{st} + r_z + s) \quad \text{Formel 2.10}$$

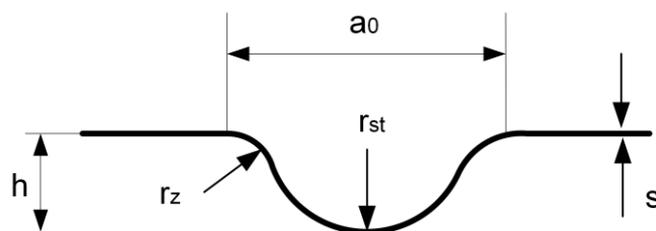


Abbildung 2-18: Querschnitt einer Halbrundsicke [LANG90]

Unter Einhaltung dieser Bedingung lässt sich die maximal einprägbare Sickentiefe nach [PETZ70] anhand folgender Formel abschätzen:

$$h_{max} = c \cdot n \cdot a_0, \quad \text{Formel 2.11}$$

mit  $h_{max}$  der maximal erreichbaren Sickentiefe,  $c$  einem vom Werkstoff und dem Sickenquerschnitt abhängigen Faktor,  $n$  dem Verfestigungsexponenten und  $a_0$  der Gesenkweite. Experimentell ermittelte Werte des Faktors „c“ für verschiedene Werkstoffe und Sickenarten sind in [LANG90] angegeben. So wurde beispielsweise für die

Verwendung eines Tiefziehstahlblechs bei einer geschlossenen Halbrundsicke ein Wert von  $c = 1,3$  ermittelt.

Aus Experimenten an Stahlblechen sowie mit den Werkstoffen Kupfer (Cu) und Aluminium (Al) ermittelt Petzold speziell für diese Werkstoffe die folgenden funktionalen Zusammenhänge bezüglich der maximal erreichbaren Sicken tiefe [PETZ70]:

$$\text{für Stahlbleche:} \quad h_{max} = 1,5 \times \varepsilon_{gl} \times a_0 \times a_{rM} \times r_Z \quad \text{Formel 2.12}$$

$$\text{für Kupfer, Aluminium:} \quad h_{max} = 1,2 \times \varepsilon_{gl} \times a_0 \times a_{rM} \times r_Z \quad \text{Formel 2.13}$$

wobei  $\varepsilon_{gl}$  die Gleichmaßdehnung des jeweils betrachteten Werkstoffs,  $a_0$  die Gesenkweite,  $a_{rM}$  eine vom Matrizenradius  $r_M$  abhängige Konstante und  $r_Z$  den Ziehkantenradius bezeichnen. Die oben angeführten Formeln dienen ausschließlich der näherungsweise Berechnung der maximal erreichbaren Sicken tiefe.

Grundsätzlich lässt sich die erreichbare Sicken tiefe beim Hohlprägen maximieren, wenn die Formänderungen während der Sicken herstellung geringe Werte aufweisen und sich möglichst homogen verteilen [WIDM84]. Dies ist das Hauptziel bei der Optimierung aller oben erwähnten Einflusskriterien.

### 2.3.5 Gestaltung, Wirkung und Fertigung von Sicken und Sickenmustern

Im Folgenden werden einige Arbeiten, die sich im Schwerpunkt mit Sicken und Sickenmustern befassen, detaillierter vorgestellt.

**[OEHL72]:**

*Oehler, G.; Weber, A.: Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen, 1972.*

Die Arbeit [OEHL72] gliedert sich inhaltlich in zwei Teile: Im ersten Teil beschäftigt sich Oehler mit sickenversteiften Blechkonstruktionen.

Der zweite Teil von Weber behandelt Möglichkeiten zur Versteifung von Kunststoffteilen. Für die vorliegende Arbeit ist jedoch ausschließlich der Teil von

Oehler relevant. Hierbei sind sämtliche bis dahin gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Versteifungswirkung von Sicken überblicksmäßig zusammengetragen. Wichtig ist vor allem der von Oehler selbst erstellte Katalog ([OEHL70]) an Sickenbildern für ebene runde, rechteckige und quadratische Bleche. Die von ihm erarbeiteten Sickenbilder sind in folgender Abbildung 2-19 dargestellt, wobei die Steifigkeit je Blechform von links nach rechts zunimmt.

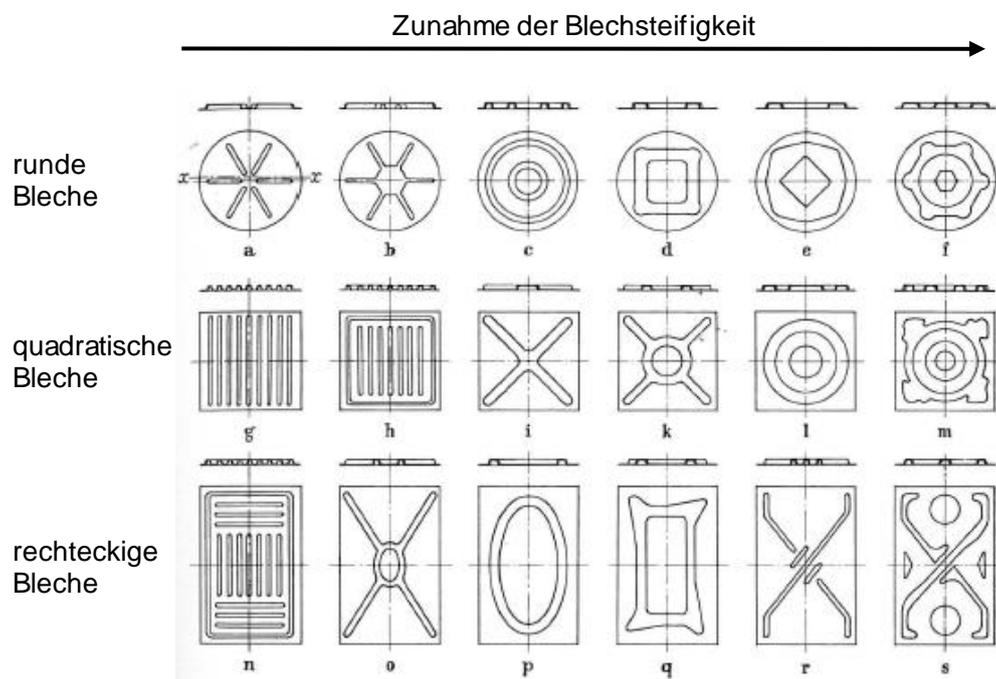


Abbildung 2-19: Sickenbilder nach Oehler [OEHL70]

Oehler weist darauf hin, dass sich Sicken nicht kreuzen sollen sowie bevorzugte Trägheitsachsen durch alle möglichen auftretenden Schnittebenen zu vermeiden sind (siehe Abbildung 2-20). Neben den Sickenbildern geht Oehler auch auf die Querschnittsform von Sicken hinsichtlich eines größtmöglichen Widerstandsmoments ein. Anhand von Ähnlichkeitsbetrachtungen sowie durch Verifikation im Versuch überträgt Oehler die Gültigkeit und Übertragbarkeit der gefundenen Zusammenhänge auch auf Trapezsicken. Die meisten der Sickenbilder sind als Entwürfe für ebene unverformte Bleche zu verstehen und wurden nicht experimentell untersucht. Als Fertigungsverfahren sollen Hohlprägen bzw. Tiefziehen zum Einsatz kommen.

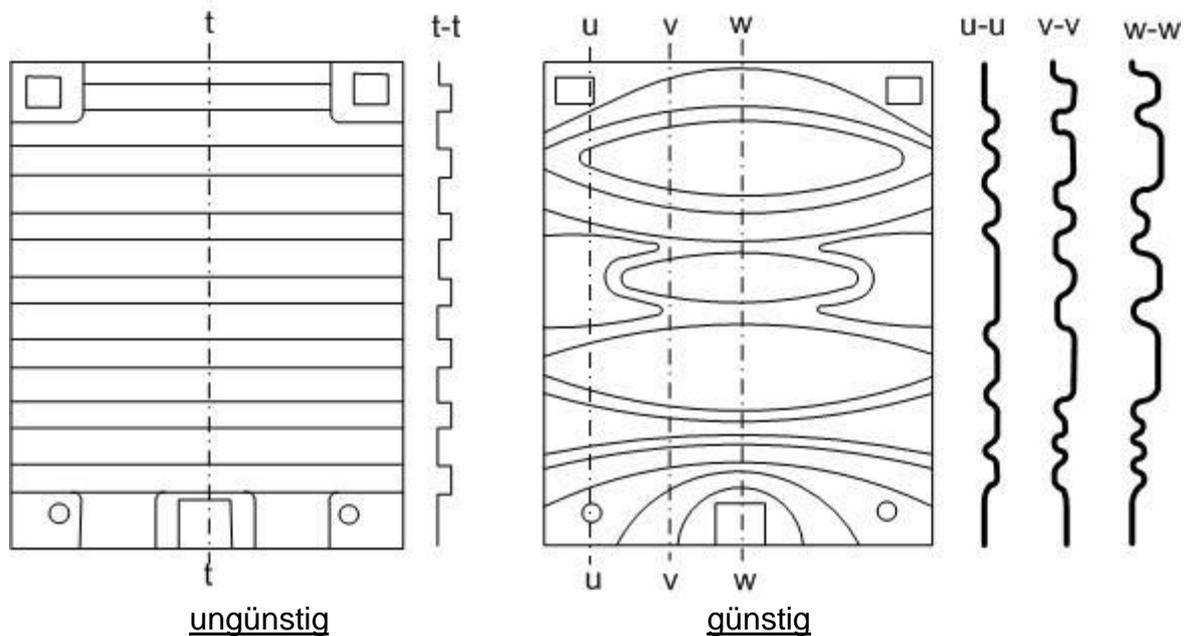


Abbildung 2-20: Vermeidung bevorzugter Trägheitsachsen am Beispiel der Rückwandversteifung von Containern [OEHL72]

#### [SCHW02]:

Schwarz, D.: Auslegung von Blechen mit Sicken (Sickenatlas), 2002.

Die Arbeit von Schwarz stellt den Abschluss des Projektes „Bleche mit Sicken“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. dar und beinhaltet die dabei gewonnenen Erkenntnisse. Schwarz beschreibt darin seine Untersuchungen an ebenen, rechtwinkligen Blechen mit dem Ziel einer optimal an die Belastung angepassten Gestaltung von Sickenbildern. Als Sickenrundform betrachtet er eine geschlossene Trapezsicke. Folgende Parameter werden in den Versuchen variiert:

- Blechgröße (eingeteilt nach Blechkantenverhältnissen)
- Blechstärke
- Sickentiefe
- Einspannbedingungen

Schwarz arbeitet dabei mit dem Optimierungstool *OptiStruct*® der Fa. Altair Engineering, und berechnet steifigkeitsoptimierte Sickenbilder. Zur Beurteilung der Bleche mit den optimierten Sickenbildern werden die Bodensteifigkeit bei Normallast, die Schubsteifigkeit und die Eigenfrequenz herangezogen. Als Ergebnis der

Untersuchungen steht ein Katalog verschiedener Sickenbilder für ebene Bleche in Abhängigkeit der Blechgröße (Kantenverhältnisse), der Blechstärke und der Sickentiefe zur Verfügung. Ein Abgleich mit Experimenten bzw. eine reale Umsetzung finden nicht statt. Die Vorverformung ist nicht berücksichtigt.

**[WIDM84]:**

Widmann, M.: Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen Halbrundsicken, 1984.

Widmann betrachtet in seiner Arbeit geschlossene Halbrundsicken in Anordnung als Einzelsicken vor allem bezüglich fertigungstechnischer Aspekte sowie deren versteifender Wirkung. Bei seinen Untersuchungen erfolgt die Sickenherstellung durch Hohlprägen in den Varianten mit und ohne Werkstoffnachfluss. Konkret wurden folgende Inhalte an geschlossenen Halbrundsicken untersucht:

- größte erreichbare Sickentiefe
- Formänderungsverlauf bei der Herstellung
- Stempelkraft
- Versteifungswirkung

Als Einflussfaktoren auf die größte erreichbare Sickentiefe werden die Radien  $r_M$  und  $r_{ST}$ , der verwendete Werkstoff identifiziert. Die Untersuchung wird mit ebenen unverformten Blechen durchgeführt. Ein Transfer auf komplexere Strukturen findet nicht statt.

**[MAJI14]:**

Majic, N.: Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur fertigungsorientierten Sickenmustergestaltung für biegebeanspruchte Tragstrukturen, 2014

Diese Arbeit befasst sich mit einer neuen rechnergestützten Methode der virtuellen Produktentwicklung zur fertigungsorientierten Sickengestaltung von dünnwandigen Bauteilen auf Basis der optimalitätsbasierten Sickenoptimierung. Diese Sickenoptimierung wird mit einer Umformsimulation gekoppelt, um das umformtechnische Verhalten von versickten Blechbauteilen effizient zu bewerten.

Dabei werden keine Vorverformungen berücksichtigt. Im Fokus stehen die Gestaltung der einzelnen Sicke und die Verteilung von einzelnen Sicken. Komplexe Sickenmuster werden mit dem vorgestellten Ansatz nicht umgesetzt.

**[CHA16]:**

Cha, W. et al.: Determination of the bead geometry considering formability and stiffness effect using generalized forming limit concept (GFLC), 2016

Die vorgestellten Arbeiten von Cha befassen sich mit zweistufigen Umformprozessen: Das Einbringen von Vorverformungen und ein nachfolgendes Sickenprägen. Sie stehen im Kontext zu Arbeiten zum generalisierten Grenzformänderungskonzept [VOLK12], [GABER16]. Zusammenhänge zwischen möglichen Sickengeometrien und Vorverformungen werden simulativ erarbeitet und teilweise validiert. Als wesentliche Sickenparameter mit Bezug auf Umformbarkeit und Steifigkeit werden die Kopf- und Fußradien sowie die Sickentiefen identifiziert. Dies deckt sich mit bekannten Untersuchungen. Die erreichbaren Tiefen werden in einen linearen Zusammenhang mit der Hauptdehnung aus der Streckzieh-Vorverformung gebracht: mit zunehmender Hauptdehnung sinkt die erreichbare Tiefe. Für Radien wird erarbeitet: mit zunehmender Hauptdehnung aus der Vorverformung müssen größere Sickenradien verwendet werden. Damit werden Hauptparameter der Gestaltung von Einzelsicken als Funktion des generalisierten Grenzformänderungskonzepts definiert. Dies ermöglicht die Weiterentwicklung von gekoppelten Umform- und Sickenoptimierungssimulationen unter Berücksichtigung dieses Konzepts.

**[CHA17]:**

Cha, W. et al.: Influence of process parameters on the formability of bead stamping part using advanced models, 2017

Cha erarbeitet ein validiertes Simulationsmodell für das Vorverformen und anschließende Sickenprägen für einen Aluminium- und einen Stahlwerkstoff unter Verwendung eines fortschrittlichen Materialmodells. Die Genauigkeit des Simulationsmodells wird nachgewiesen. Die simulativ ermittelte Versteifungswirkung

des verwendeten Sickenmusters beträgt ca. 30%. Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation wird für die Prozessparameter Blechhalterkraft und Reibung der Schädigungswert des generalisierten Grenzformänderungskonzepts als Ergebnisgröße bewertet. Zwischen Blechhalterkraft und Reibung bzw. zwischen Blechhalterkraft und Schädigungswert wird eine nur geringe gegenseitige Beeinflussung ermittelt. Die ist vor dem Hintergrund der verwendeten Sperrsicke beim Vorverformen und prägen nachvollziehbar. Für den untersuchten Stahlwerkstoff wird jedoch eine starke negative Korrelation zwischen Reibung und Schädigungswert beim Prägeprozess ermittelt, d.h., bei geringen Reibwerten (hier ca.  $\mu = 0,05$ ) wird ein Schädigungswert von 1,0 überschritten. Für den verwendeten Aluminiumwerkstoff wird eine hohe Korrelation aufgezeigt, da bei Reibwerten  $\mu > 0,15$  der Schädigungswert von 1,0 überschritten wird und damit Versagen auftritt.

#### **[CHA19]:**

CHA, W.: Formability consideration in bead optimization to stiffen deep drawn parts, 2019

Im Schwerpunkt dieser Dissertation steht die Verifizierung eines Optimierungsalgorithmus zur Bauteilversteifung unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen. Dafür wird das sogenannte Generalized Forming Limit Concept (GFLC) mit einem fortgeschrittenen Materialmodell zur Versagensvorhersage verwendet. Darauf basierend kann der Algorithmus eine zum Lastfall und Dehnpfad passende Sicke mit entsprechender Sickenhöhe vorschlagen. Die Umform- und Steifigkeitsprüfergebnisse aus Simulation und Experiment für den ebenen Blechanschnitt werden abgeglichen. Aufgrund hinreichender Konsistenz der Ergebnisse kann der Optimierungsalgorithmus verifiziert werden.

## **2.4 Zusammenfassung zum Stand der Technik**

Die vorgestellten Untersuchungen befassen sich im Wesentlichen mit folgenden Themen:

- die Gestaltung von Einzelsicken

- die Gestaltung von Sickenmustern in ebenen Blechen
- Fertigungstechnische Aspekte beim Umformen von Einzelsicken
- die maximal erreichbare Sickentiefe in ebenen Blechen mit/ohne Vorverformung

Jüngere Arbeiten befassen sich meist simulativ mit zweistufigen nichtlinearen Umformprozessen. Die Wirksamkeit des generalisierten Grenzformänderungskonzepts wird aufgezeigt. Eine übergreifende Betrachtung ausgehend von der Lastfalldefinition für komplexere z.B. kugelförmige Strukturen über die Umsetzung bis hin zu experimenteller und simulationsgestützter Bewertung unter Berücksichtigung von Vorverformungen und Steifigkeiten existiert bisher nicht. Der Einfluss der Vorverformung auf die erreichbare Steifigkeit mit und ohne versteifende Sicken ist bisher nicht erfasst. Die erreichbaren Belastbarkeiten in Abhängigkeit von Vorverformung und nachgelagertem Sickenformprozess sind bisher nicht bewertet.

### 3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ein wesentliches Thema in der Entwicklung von Gütern ist heutzutage die Umsetzung von Leichtbau, also z.B. die passende Wahl von Material und Struktur, mit der ein Optimum von Gewicht und Anforderungserfüllung erreicht werden kann. Die zunehmende öffentliche Diskussion von Umweltaspekten wie beispielsweise CO<sub>2</sub>-Emissionen, Kraftstoffverbrauch und e-Mobilität, besonders im Automobilbau, verpflichten Hersteller in diesem Bereich große Anstrengungen zu unternehmen, oft auch um gesetzliche Grenzwerte einzuhalten.

Für viele Anwendungen eignet sich die Verwendung von dünnwandigen Stahlblechen, beispielsweise für selbsttragende Automobilkarosserien. Um den Widerstand derartiger Strukturen gegen die auftretenden Belastungsarten zu erhöhen, werden gezielt rinnenartige Vertiefungen, sogenannte Sicken ([DIN 8585], [LANG84]), in die Bleche hohlgeprägt. Diese Vorgehensweise hat gegenüber Verstrebungen oder Ähnlichem den Vorteil, dass die Steifigkeit nahezu gewichtsneutral erhöht wird und keine weiteren Montageschritte notwendig sind. Für die sinnvolle Gestaltung ebener Bleche unter definierten Lastfällen existieren sogenannte Sickenkataloge, die basierend auf empirischer Forschung, Sickenstrukturen in Anlehnung an Halbrund- und Trapezsicken empfehlen. Mittlerweile sind Optimierungsalgorithmen vorhanden, welche unter Berücksichtigung von Geometrie und Lastfall ein Bauteil hinsichtlich verschiedener Größen optimieren können, zum Beispiel Steifigkeit oder Eigenfrequenz. Die Ergebnisse dieser Algorithmen müssen im Allgemeinen durch Konstrukteure in eine fertigbare Form überführt werden. Keine der genannten Versteifungsmöglichkeiten berücksichtigt die Umformeigenschaften des Blechs oder etwa die Umformgeschichte eines Bauteils.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Untersuchung des Einflusses der Vorverformung auf die weiteren Umformeigenschaften im Prozess sowie insbesondere auf Steifigkeit und Belastbarkeit von Bauteilen.

Hierzu werden folgende Aufgabenfelder definiert:

- Entwicklung, Auslegung und Fertigung eines modularen Umformwerkzeugs zum Vorverformen und Sickenprägen
- Entwicklung, Auslegung und Fertigung von Steifigkeitsprüfständen
- Entwicklung von Prägeeinheiten, die die Ergebnisse von Optimierungsalgorithmen umsetzen und das Prägen in vorverformte Bleche erlauben
- Entwicklung einer Prägeeinheit, mit der Einflüsse der Vorverformung auf nachgelagerte Prägeprozesse untersucht werden können
- Erzeugen von Vorverformungen
- Durchführung von Prägeoperationen in vorverformte Bleche
- Ermittlung der Steifigkeit und Belastbarkeit von vorverformten und durch optimierte Sickenmuster versteifte Bleche in Prüfständen
- Ermittlung der Umformeigenschaften im Prägeprozess von vorverformten Blechen
- Simulation der Umformprozesse und Steifigkeitsprüfungen mit verschiedenen Ansätzen, Bewertung des Einflusses der Umformsimulation auf die Steifigkeitssimulation

Ein Flussdiagramm in Form eines Versuchsplans zur Beschreibung des Vorgehens ist in Kapitel 6 hinterlegt.

## 4 Versuchsanlagen und Messeinrichtungen

### 4.1 Versuchspresse

Zur Durchführung von Umformversuchen steht die hydraulische Zweiständerpresse DXU 320 B der Firma Dieffenbacher GmbH + Co. KG, Eppingen, zur Verfügung. Die Prozesskraft wird bei dieser Presse mit Hilfe eines Oberantriebs über einen hydraulischen Zylinder in Einpunktanordnung auf den Stößel übertragen. Die Führung des kastenförmigen, geschweißten Stößels im Pressenkörper erfolgt über eine Achtfachführung. Die Presse ist mit hydraulischen Schnittschlagdämpfern versehen, die im eingefahrenen Zustand als Anschläge für die Einstellung der Vorverformungstiefe dienen. Die Prozessparameter können über die Pressensteuerung eingestellt und über einen weiten Bereich variiert werden. Beispielsweise kann der Verlauf der Stößelgeschwindigkeit definiert werden. In Tabelle 4-1 sind ausgewählte technische Daten der hydraulischen Presse dargestellt.

<b><i>Kennzeichen</i></b>	<b><i>Wert</i></b>
<i>Maximale Presskraft</i>	<i>3200 kN</i>
<i>Maximale Ziehkissenkraft</i>	<i>1200 kN</i>
<i>Maximale Stößelgeschwindigkeit</i>	<i>53 mm/s</i>
<i>Maximaler Stößelhub</i>	<i>600 mm</i>
<i>Nutzbare Arbeitsfläche</i>	<i>1600 x 1300 mm</i>

Tabelle 4-1: Technische Daten der hydraulischen Presse

### 4.2 Modulares Versuchswerkzeug zum Vorverformen und Prägen

Entsprechend der Zielsetzung wird ein modulares Versuchswerkzeug zum Vorverformen (Abbildung 4-1) und Sickenprägen (Abbildung 4-2) entwickelt, das auf dem Nakajimaversuch [DIN EN ISO 12004-2] basiert. Das Werkzeug besteht im Wesentlichen aus drei Baugruppen (siehe Abbildung 4-1):

- Unterwerkzeug mit Führungseinrichtung, Nakajima-Kugelstempel und Prägematrizen, siehe (1) in Abbildung 4-1: Der Stempel ist eine auf einen Schaft

aufgesetzte Kugelkalotte mit dem Radius  $r_s = 200$  mm. An seiner Oberseite ist eine quadratische, an den Ecken verrundete Tasche mit den Kantenlängen 160 mm eingelassen. In diese Tasche können passende Einsätze montiert werden.

- Blechhalter mit Sperrsicke, siehe (2) in Abbildung 4-1
- Oberwerkzeug mit Sperrsicke, Niederhalter und Prägestempeln, siehe (3) in Abbildung 4-1: Beim Vorverformen wirkt im Oberwerkzeug nur die Sperrsicke. Zum Prägen erfolgt ein Umbau.

Das Werkzeug kann in zwei Konfigurationen, Vorverformen und Prägen, verwendet werden. Zum Vorverformen wird ein Blech auf den in maximaler Höhe ausgefahrenen Blechhalter gelegt. Durch Verfahren des Pressenstößels nach unten und Aufbringen einer Ziehkissenkraft wird das Blech in der Sperrsicke geklemmt und über den Kugelstempel gezogen. Die Breite des Blechzuschnitts im Polbereich des Kugelstempels bestimmt den dort vorherrschenden Spannungszustand. Die Verteilung ist stark an den Nakajimaversuch angelehnt.

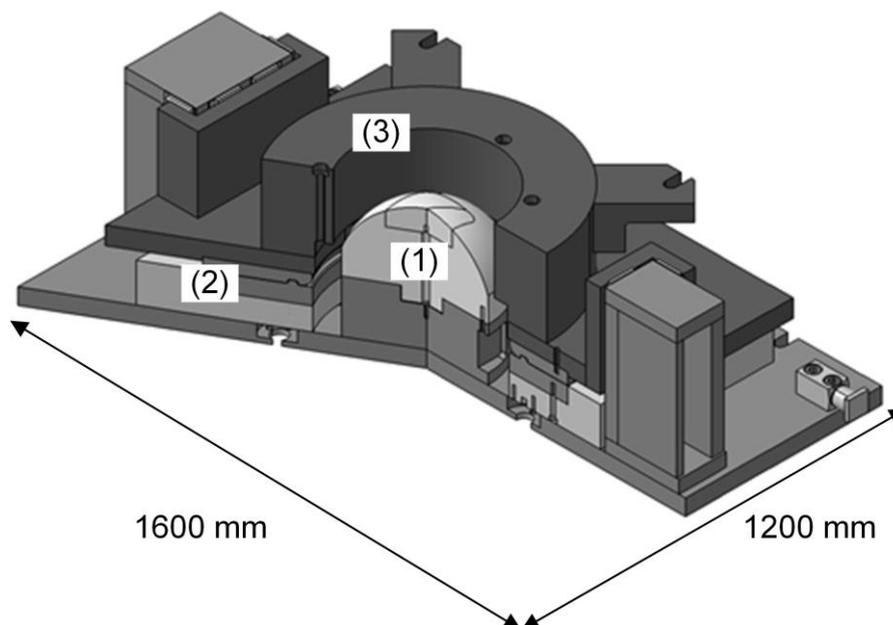


Abbildung 4-1: Werkzeug zum Vorverformen

Beim Prägen wird im Oberwerkzeug eine Aufnahmeplatte (siehe Abbildung 4-2) eingesetzt, welche die obere Prägeeinheit, den Stempel, positioniert. Das Gegenstück, die Prägematrize, wird in die Tasche im Kugelstempel eingebaut. Für die

Prägeoperation wird ein vorverformtes Blech auf dem Blechhalter positioniert und auf die Prägematrize abgesenkt. Die Prägung erfolgt durch Zusammenfahren des Oberwerkzeugs. Die Niederhaltekraft erzeugen durch die Verfahrbewegung verdrängte Elastomerfedern.

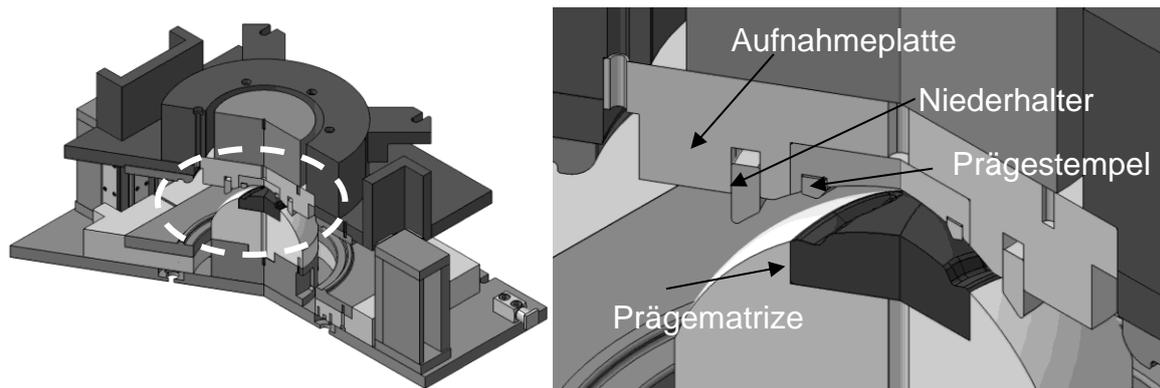


Abbildung 4-2: links: Gesamtansicht Werkzeug zum Prägen, rechts: Detail

### 4.3 Werkzeugeinsätze zum Hohlprägen

Für verschiedene Prägeoperationen sind in dieser Arbeit drei Prägeeinheiten in Verwendung:

- Einzelsicke
- Biegungsmuster
- Torsionsmuster

Die Grundabmessungen sind jeweils 160 x 160 mm.

#### Prägeeinheit „Einzelsicke“

Diese modular aufgebaute, für das Projekt entwickelte Einheit, ist für das Prägen von ein bis drei halbrunden Einzelsicken vorgesehen. Der Einsatzzweck ist die Ermittlung der maximalen Prägertiefe in Abhängigkeit der Vorverformung. Die Prägertiefe ist in Millimeterschritten durch Unterlegplatten einstellbar. Die maximale Prägertiefe beträgt 13 mm. Die drei an den Wirkflächen polierten Stempelinleger bilden die Form der drei parallelen Halbrundsicken mit Radius acht 8 mm ab und können einzeln in den

Grundkörper eingelegt werden. Aufgrund der Kavität des Kugelstempelgrundkörpers im Unterwerkzeug unterscheiden sich die beiden äußeren Stempelinleger von dem inneren. Die geometrischen Maße des mittleren Stempelinlegers sind in folgender Abbildung 4-3 dargestellt:

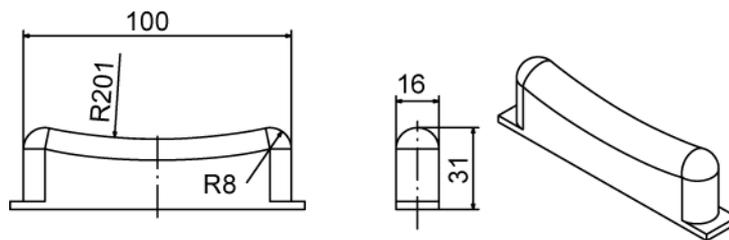


Abbildung 4-3: Konturen des mittleren Stempelinleger des Prägewerkzeugs

Die Prägematrize besteht aus dem Matrizengrundkörper mit der Grundfläche 160 x 160 mm sowie je drei Blindstopfen und Matrizeneinlegern. Der Grundkörper verfügt über drei Taschen, in welche die Blindstopfen bzw. der Matrizeneinleger aufgenommen und anschließend verschraubt werden können, siehe Abbildung 4-4.

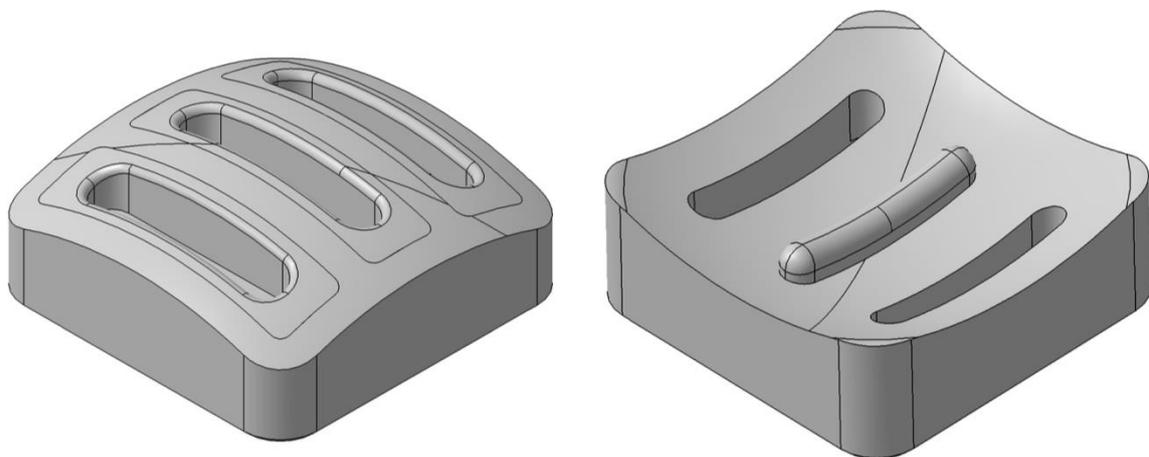


Abbildung 4-4: Prägeinheit "Einzelsicke"; links: Matrize mit drei Einlegern; rechts: Prägestempelstempel mit einem Prägeelement. Abmessungen je 160x160 mm

Die Blindstopfen bestehen aus Vollmaterial und führen die Form des Grundkörpers kontinuierlich fort. Sie kommen zum Einsatz, wenn nicht alle drei Sicken gleichzeitig geprägt werden sollen. An Stellen, an denen Sicken vorgesehen sind, werden die Matrizeneinleger mit ihren gefrästen Langlöchern eingelegt. Die Langlöcher sind

102,8 mm lang und 18,8 mm breit, die polierten Ziehkantenradien betragen umlaufend sechs mm. Eine Explosionszeichnung ist im Anhang in Abbildung 11-1 dargestellt.

### Prägeeinheit „Biegungsmuster“

Dieses Muster (Abbildung 4-5) stellt das Ergebnis der Topografieoptimierung im Modul Optistruct © der Firma Altair dar.

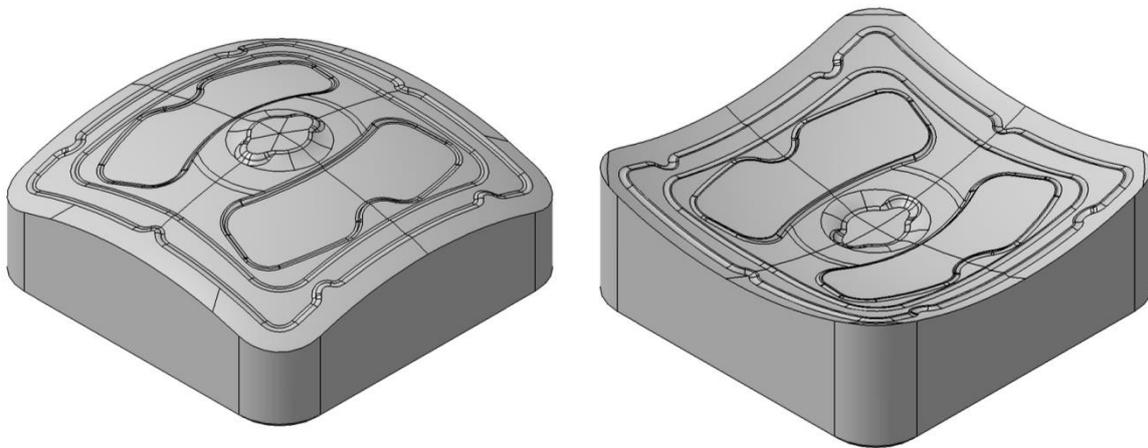


Abbildung 4-5: Pragemuster „Biegung“, optimiert in Optistruct; Abmessungen je 160x160 mm

Die Optimierung erfolgt unter folgenden Randbedingungen:

Die runde Krafteinleitungsfläche (Abbildung 4-6, mittig), welche nicht versickt wird, hat einen Durchmesser von 30 mm und wird mit einer Flächenlast von 5 N / mm<sup>2</sup> belastet. Die Einspannung des Bleches erfolgt am 25 mm breiten Randbereich, alle Freiheitsgrade sind gesperrt. Dies entspricht der festen Einspannung des in der Arbeit verwendeten Prüfstands, siehe Kapitel 4.4. Folgende Parameter beschreiben den Optimierungslastfall: Das Blech ist mit vierknotigen Elementen der Seitenlänge ein Millimeter vernetzt. Die minimale Sickenbreite beträgt 10 mm, der maximale Auszugswinkel 60° und die maximale Sickentiefe 10 mm. Als Symmetrievorgabe ist doppelt symmetrisch definiert. Die Optimierung erfolgt hinsichtlich der Steifigkeit des Blechs.

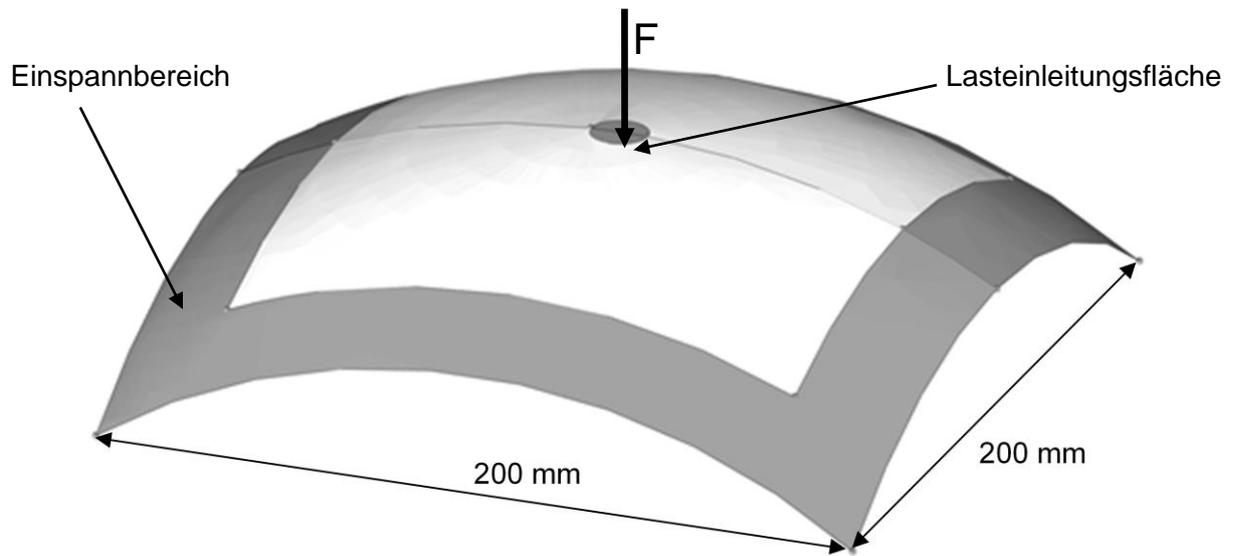


Abbildung 4-6: Modellaufbau OptiStruct, Lastfall Biegung

### Prägeeinheit „Torsionsmuster“

Dieses Muster, siehe Abbildung 4-7, stellt das Ergebnis der Optimierung im Programm Tosca.Structure.Bead© dar. Die Optimierung führte Herr Dr.-Ing. Neven Majic vom Institut für Produktentwicklung (IPEK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durch. Die Optimierung erfolgt unter folgenden Randbedingungen:

Die Einspannung des Bleches erfolgt in Analogie zum Lastfall Biegung am 25 mm breiten Randbereich zweier gegenüberliegenden Seiten. Eine Seite ist fest fixiert. An der gegenüberliegenden Seite wird ein Moment von 80 Nm eingeleitet. Das Blech ist mit vierknotigen Elementen der Seitenlänge ein Millimeter vernetzt. Die minimale Sickenbreite beträgt 10 mm.

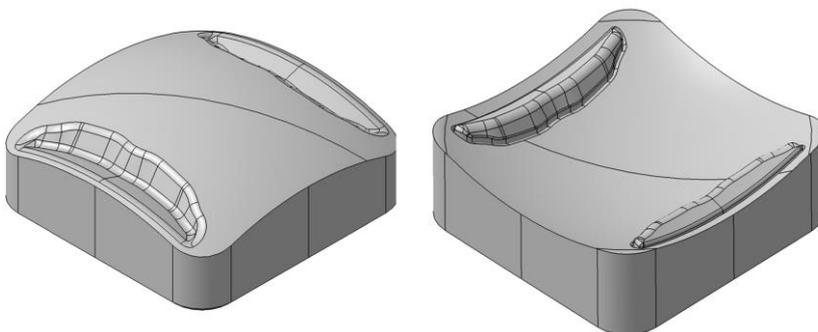


Abbildung 4-7: Prägemuster „Torsion“, optimiert in Tosca.Structure.Bead

#### 4.4 Entwicklung von Prüfständen zur Steifigkeitsbewertung

Für die Prüfung der Bleche werden Prüfstände konzipiert, konstruiert und gefertigt. Jeweils eine Ausführung für Biegung (Abbildung 4-8) und Torsion (Abbildung 4-10) wird aufgebaut. Alle Prüfstände werden auf eine einheitliche Grundplatte mit den Abmessungen 350 x 450 mm montiert. Diese bildet die untere Schnittstelle zur Prüfmaschine. Die eingespannten Proben werden wie in den Grafiken gezeigt belastet. Die Krafteinleitung erfolgt beim Biegeprüfstand über einen Belastungskörper (Abbildung 4-9). Der Belastungskörper des Biegeprüfstands ist an der Druckfläche mit einem konkaven Radius versehen, der an die Form im Mittelbereich der Probe angepasst ist (Abbildung 4-9). Die Druckfläche hat einen Durchmesser von 30 mm und entspricht damit den Randbedingungen aus Optimierung und Steifigkeitssimulation.

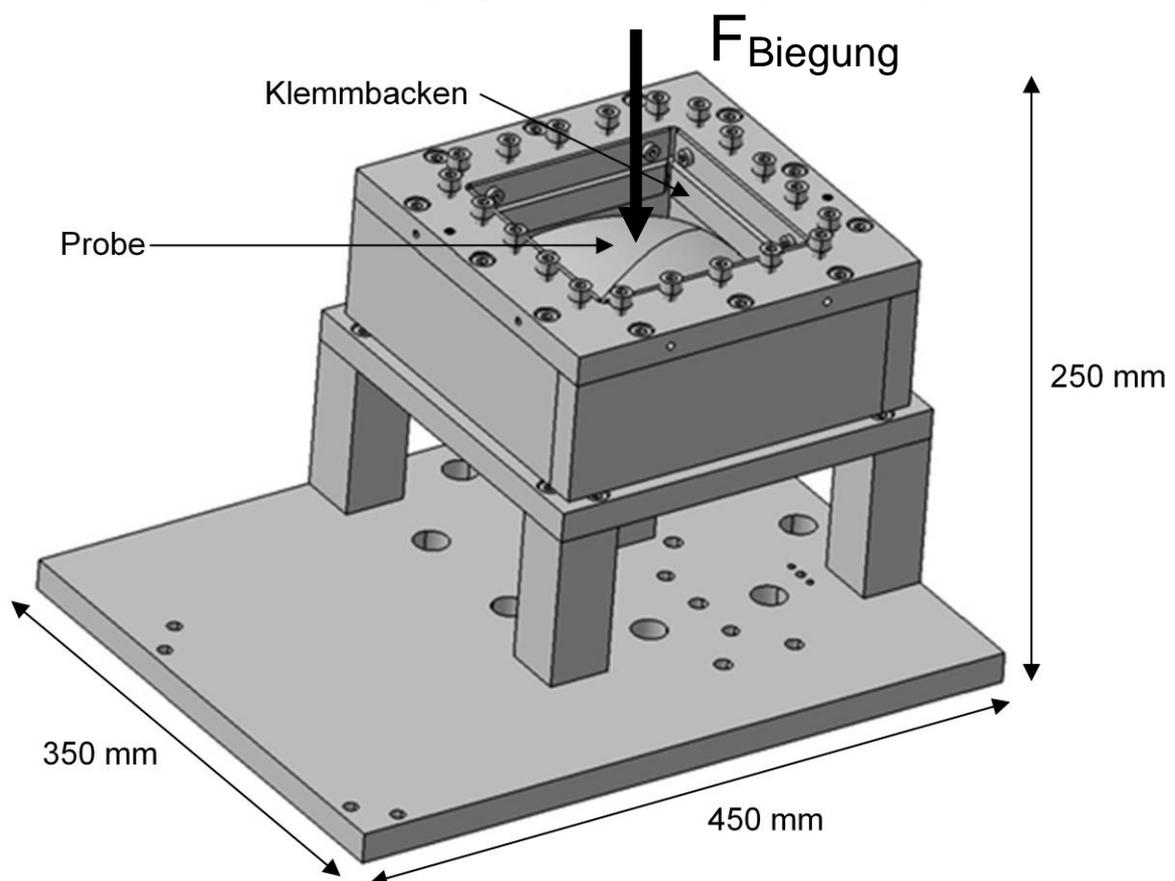


Abbildung 4-8: Prüfstand Biegung

Für den Torsionstest kommt eine mittels Aufnahmebolzen an die Prüfmaschine gekoppelte Zugstange zum Einsatz. Über die Zugstange erfolgt die Krafteinleitung in den Torsionsprüfstand (siehe Abbildung 4-10). Im Torsionsprüfstand ist zur Aufzeichnung des Verdrehwinkels ein Posirot PRAS1 Winkelsensor (Firma ASM Automation Sensorik, Moosinning, Deutschland) in Verbindung mit einem PRMAG1 Positionsmagneten im Einsatz. Dieser Sensor wird für die Überprüfung der kinematischen Zusammenhänge der Prüfstandsgestaltung und der Verfahrbewegung der Universalprüfmaschine eingesetzt.

Adaption zur  
Prüfmaschine

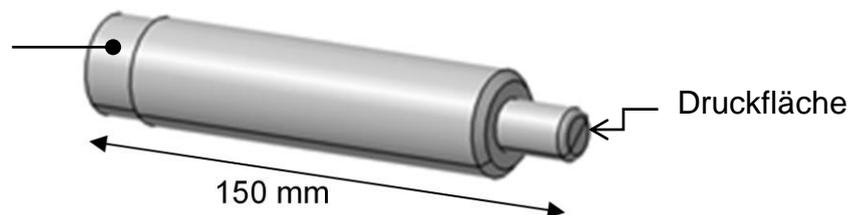


Abbildung 4-9: Belastungskörper Biegung

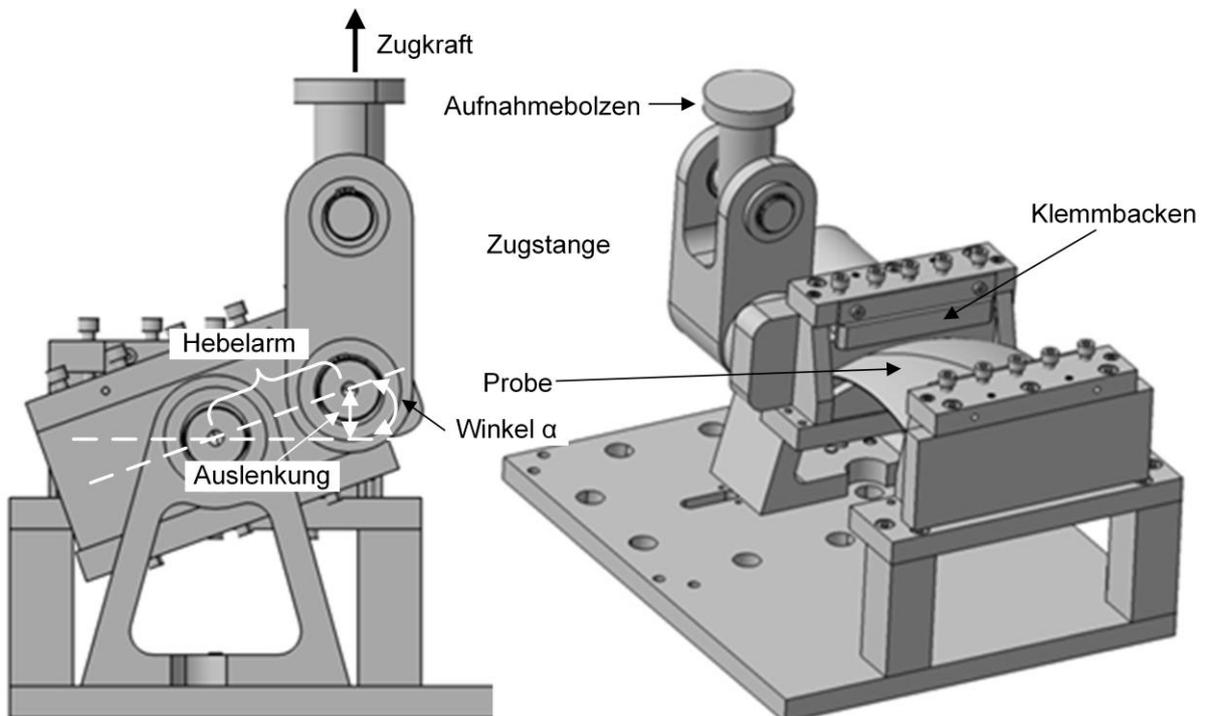


Abbildung 4-10: Torsionsprüfstand

Die Umrechnung zwischen dem Winkel  $\alpha$  und dem Weg  $s$  erfolgt trigonometrisch nach Formel 4.1. Der Hebelarm beträgt laut Fertigungszeichnungen 90mm. Die

Umrechnung des Weges in einen Winkel ermöglicht einen Vergleich mit dem Winkelsensor. Über eine Cosinus-Funktion lässt sich die Kraft  $F$  der Universalprüfmaschine in ein Torsionsmoment  $T$  umrechnen (Formel 4.2). Den Winkelunterschied zwischen errechnetem Winkel aus Weg und dem ASM Winkelsensor zeigt Abbildung 4-11. Im für die Steifigkeitsbestimmung relevanten Bereich bis etwa fünf Grad liegt eine sehr gute Übereinstimmung mit einer Abweichung von max.  $0,03^\circ$  zwischen dem gemessenen und dem berechneten Winkel vor. Für die weitere Prüfung wird daher der aus der Prüfmaschinenbewegung berechnete Wert verwendet

$$\sin \alpha = \frac{s}{\text{Hebelarm}} \rightarrow \alpha = \arcsin \frac{s}{\text{Hebelarm}} \quad \text{Formel 4.1}$$

$$T = F \times \text{Hebelarm} \times \cos \alpha \quad \text{Formel 4.2}$$

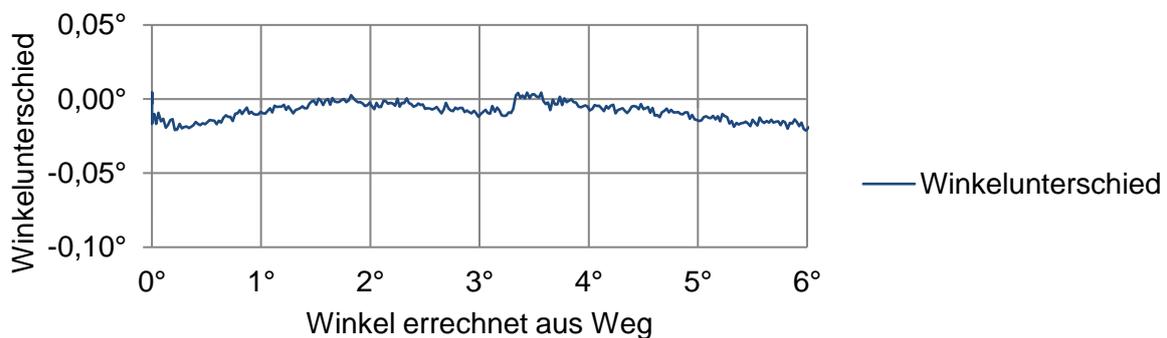


Abbildung 4-11: Winkelunterschied Universalprüfmaschine – Winkelsensor

Die Fixierung der Proben in den Prüfständen wird mit Klemmbacken (Abbildung 4-12) vorgenommen. Durch das Anzugsmoment der Spansschrauben wird die nötige Flächenpressung erreicht. Die Klemmbacken sind an der Kontaktfläche zur Probe sphärisch gefräst und somit an die vorverformten Proben angepasst. Für die Prüfstände sind folgende Probenausschnitte definiert:

- Biegung: 200 x 200 mm
- Torsion: 200 x 150 mm

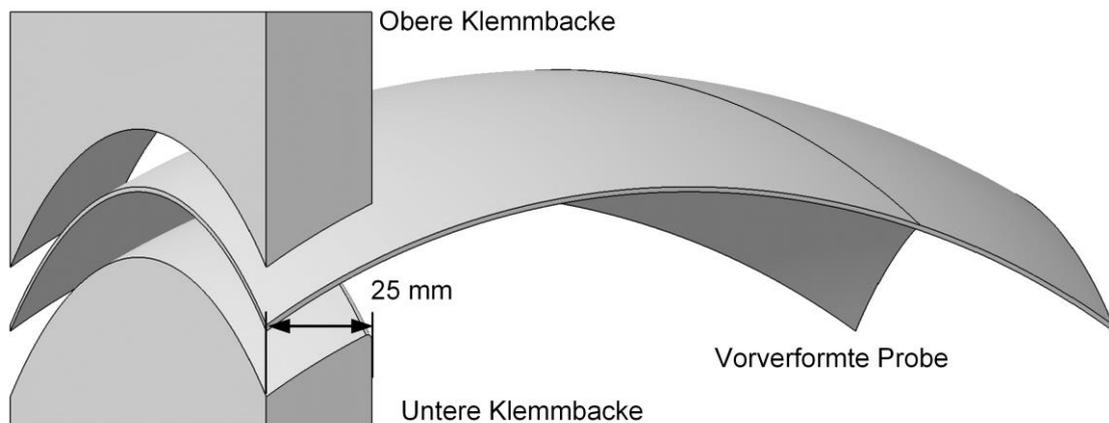


Abbildung 4-12: Klemmbacken und vorverformte Probe

Die Prüffläche beträgt bei allen Proben 150 x 150 mm. Somit werden die Biegungsproben allseitig 25 mm eingespannt, die Torsionsproben nur an den kurzen Seiten.

## 4.5 Messeinrichtungen

### 4.5.1 Photogrammetrische Formänderungsmessung

Für die Umsetzung der Formänderungsanalysen wird das photogrammetrische System Argus der GOM mbH, Braunschweig, eingesetzt. Zur Aufnahme wird eine digitale Spiegelreflexkamera Canon 5D mit 21 Megapixel und 50 mm Objektiv verwendet. Codierte Referenzpunkte, die während der Aufnahmen um das zu prüfende Objekt angeordnet sind, dienen als fixe Anhalts- und Orientierungspunkte für das System. Dadurch ist das Vernetzen mehrerer Einzelbilder aus verschiedenen Kameraperspektiven und daraus die automatische Berechnung der 3-D Koordinaten sowie der Dehnungen des Bauteils möglich. Das System erfordert ein regelmäßiges Punktmuster auf dem zu untersuchenden Blech. Die folgende Abbildung 4-13 zeigt dazu einige standardmäßige Ausführungen von Punktmustern. Das Aufbringen des Punktmusters erfolgt mittels elektrolytischem Verfahren. Für die in dieser Arbeit gezeigten Formänderungsanalysen wird das in Abbildung 4-13 rechts gezeigte Muster mit 0,5 mm Punktdurchmesser verwendet. So wird eine hohe lokale Auflösung der

Umformgrade erreicht. Dies ist insbesondere für die Analyse im Bereich der Radien wichtig.

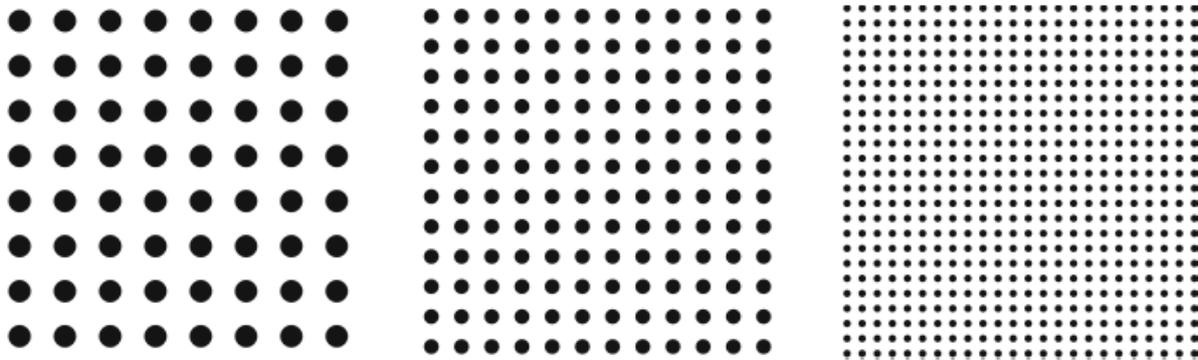


Abbildung 4-13: Standard-Punktmuster mit Zwischenabständen von 3 mm, 2 mm und 1 mm bei Punktdurchmessern von 1,5 mm, 1,0 mm und 0,5 mm (v.l.n.r)

#### 4.5.2 Zug-Druck-Prüfmaschine

Die Untersuchungen zur Steifigkeit und die Werkstoffkennwertermittlung werden an der lehrstuhleigenen Universalprüfmaschine Typ 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co. (Zwick), Ulm, durchgeführt. Die Anlage verfügt über zwei separate Prüfräume, die die Durchführung von Zug- und Druckprüfungen erlauben. Die Prüfräume sind durch eine verfahrbare Traverse getrennt. Im unteren Prüfraum steht ein Kraftaufnehmer für Zug- und Druckkräfte bis zu 200 kN zur Verfügung. Der obere Prüfraum ist mit einem Kraftaufnehmer für den Messbereich bis 20 kN ausgestattet.

#### 4.6 Verwendete FEM-Programme

Begleitend zu den Versuchen werden Umform- und Steifigkeitssimulationen durchgeführt. Dafür kommen folgende Programme zum Einsatz (siehe Tabelle 4-2):

<b>Programm</b>	<b>Verwendung</b>
<i>PAM-STAMP 2G 2009 ©(ESI)</i>	<i>Umformsimulationen</i>
<i>Abaqus © (Dassault Systèmes)</i>	<i>Steifigkeitssimulationen</i>
<i>Optistruct ©(Altair)</i>	<i>Optimierungsaufgaben</i>

Tabelle 4-2: Eingesetzte FEM-Programme

## 5 Versuchswerkstoff und Vorverformungsgeometrien

### 5.1 Blechwerkstoff

Der verwendete Werkstoff zur Durchführung der Umformversuche ist ein konventioneller Tiefziehstahl mit dem Kürzel DC04. Gemäß [DIN10130] weist der Werkstoff DC04 folgende chemische Zusammensetzung auf:

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
<i>max %</i>	<i>max %</i>	<i>max %</i>	<i>max %</i>
0,08	0,4	0,03	0,03

Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs DC04, Massenanteile

Das Werkstoffgefüge weist geringe Anteile an Perlit bzw. Zementit sowie weitere Begleitelemente auf [KIM02]. Die folgende Abbildung 5-1 zeigt das Gefüge des DC04 sowohl im Längs- als auch im Querschliff bei 500-facher Vergrößerung:

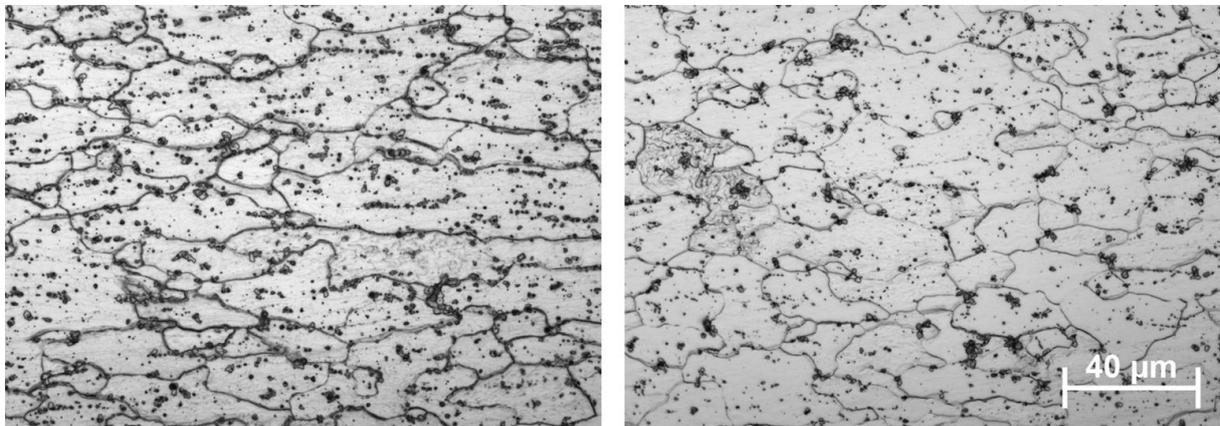


Abbildung 5-1: Schliffbilder des Werkstoffs DC04

Die mechanischen Eigenschaften des DC04 hängen vorrangig von folgenden Faktoren ab [KIM02]:

- Korngröße des Ferrits
- Ausscheidungshärtung durch Karbide und Nitride
- Mischkristallhärtung durch Begleitelemente

Der verwendete Werkstoff DC04 weist die in Tabelle 5-2 gezeigten mechanischen Kennwerte auf. Diese Größen werden auch für die Umformsimulation verwendet. Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte erfolgt in der lehrstuhleigenen Prüfmaschine (siehe Kapitel 4.5.2).

<b>R<sub>m</sub></b>	<b>R<sub>p0,2</sub> 0°</b>	<b>R<sub>p0,2</sub> 45°</b>	<b>R<sub>p0,2</sub> 90°</b>	<b>r<sub>0</sub></b>	<b>r<sub>45</sub></b>	<b>r<sub>90</sub></b>	<b>r<sub>m</sub></b>	<b>n</b>	<b>A<sub>80mm</sub></b>
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	-	-	-	-	-	%
309	172	184	178	2,2	1,52	2,66	1,98	0,2	41

Tabelle 5-2: *mechanische Kennwerte des verwendeten Werkstoffs DC04*

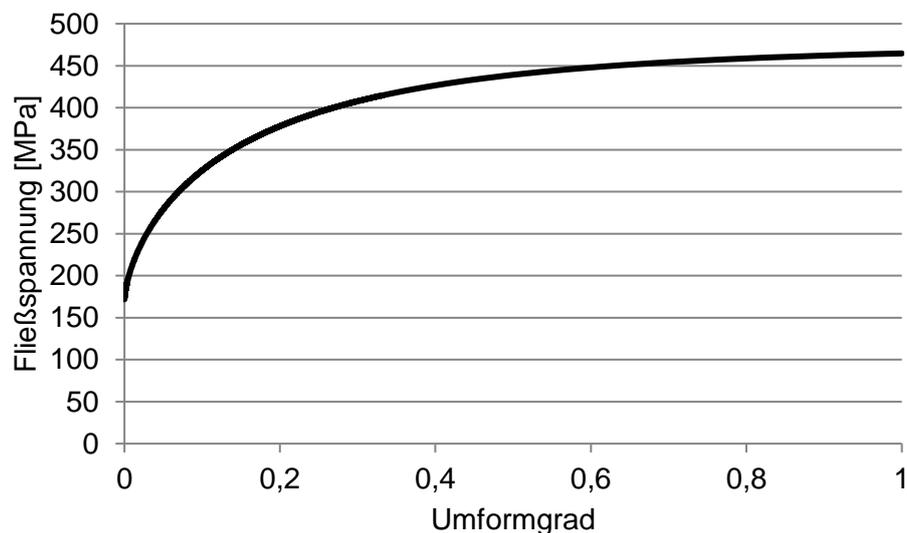


Abbildung 5-2: *Fließkurve des Werkstoffs DC04, extrapoliert mit Kombination aus Hocket-Sherby und Hollomon*

Abbildung 5-2 zeigt die nach Hocket-Sherby und Hollomon extrapolierte Fließkurve des Werkstoffs DC04.

Abbildung 5-3 zeigt die Grenzformänderungskurve dieses Werkstoff. Die Kurve wird vom Labor Werkstofftechnik der BMW Group unter Verwendung eines VIALUX Autogrid®-Systems nach der Norm [DIN EN ISO 12004-2] für Nakajima-Versuche ermittelt.

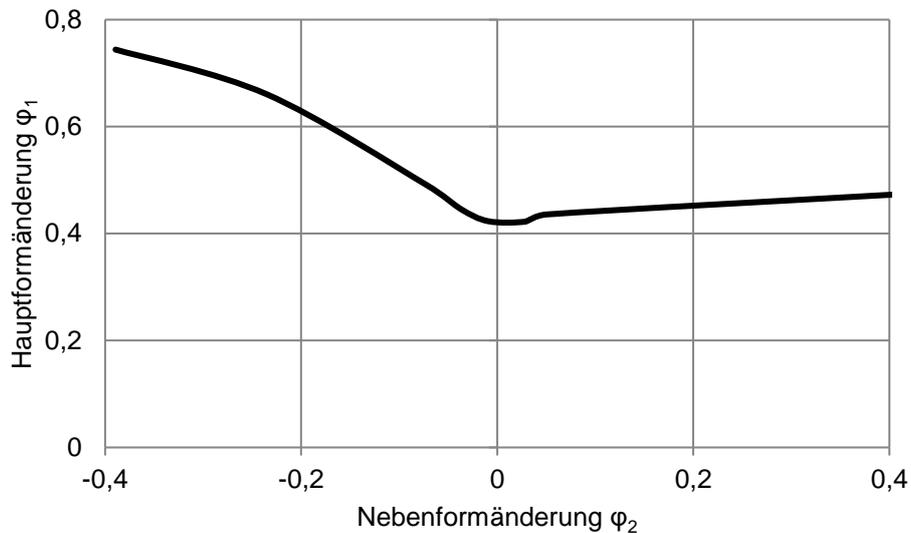


Abbildung 5-3: Grenzformänderungskurve des verwendeten Werkstoffs DC04

## 5.2 Vorverformungsgeometrien

Der Dehnungszustand im Polbereich der Proben wird über die Breite der Probe in diesem Bereich und über die Umformtiefe eingestellt. In Abbildung 5-4 ist das verwendete Konzept zur Erstellung der verschiedenen Vorverformungen dargestellt. Eingezeichnet sind zwei Halbkreise mit einem Radius von 0,07 bzw. 0,15, gemessen als logarithmische Formänderung. Die Radien setzen sich aus den Haupt- und Nebenumformgraden nach Formel 5.1 zusammen:

$$\varphi = \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \quad \text{Formel 5.1}$$

Die Schnittpunkte der Dehnpfade mit den Dehnkreisen 0,07 und 0,15 sind markiert. Die Dehnungswerte dieser Punkte werden in der Vorverformung gezielt eingestellt. Der zurückgelegte Weg (= der Radius) im Schaubild ist somit immer gleich groß, die Ausdünnung variiert. Für die Dehnkreise 0,07 und 0,15 werden im weiteren Verlauf die Bezeichnungen „@0,07“ bzw. „@0,15“ verwendet.

Nach dem Vorverformen der Proben werde diese entweder zum Prägen weiterverwendet oder für die Prüfung in unversicktem Zustand mittels

Wasserstrahlschneidverfahren herausgetrennt. Proben mit Sicken werden nach dem letzten Umformschritt herausgetrennt.

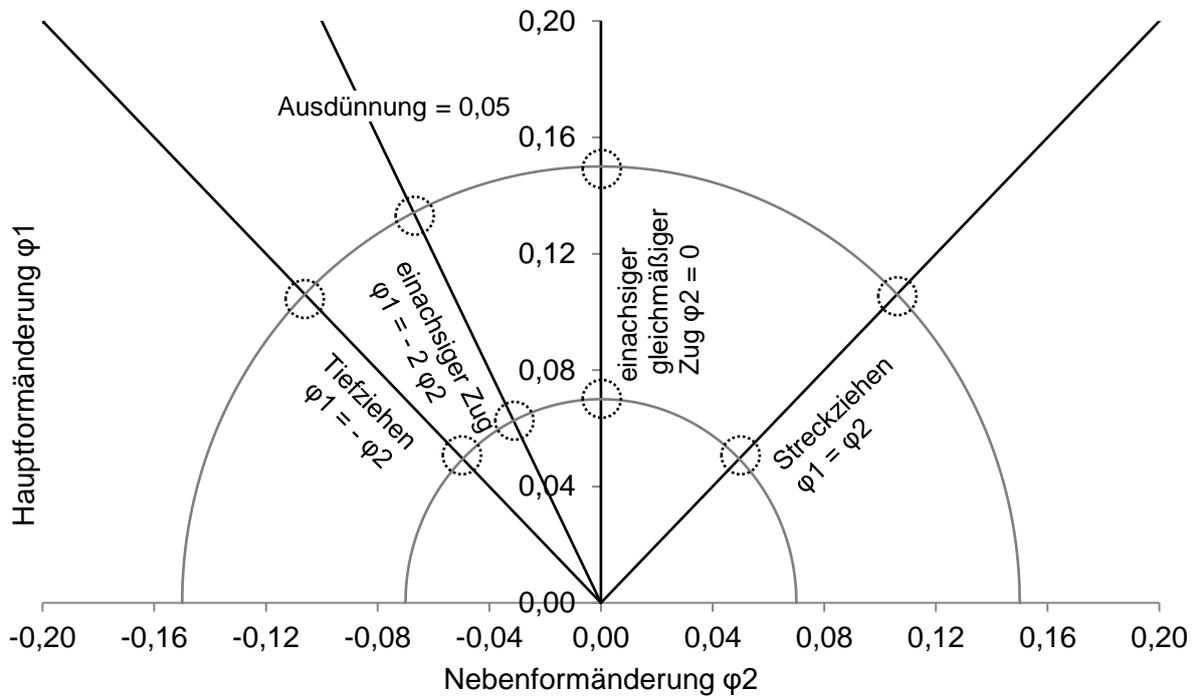


Abbildung 5-4: Vorverformungskonzept

## 6 Versuchsplan

Die durchzuführenden Untersuchungen orientieren an Abbildung 6-1.

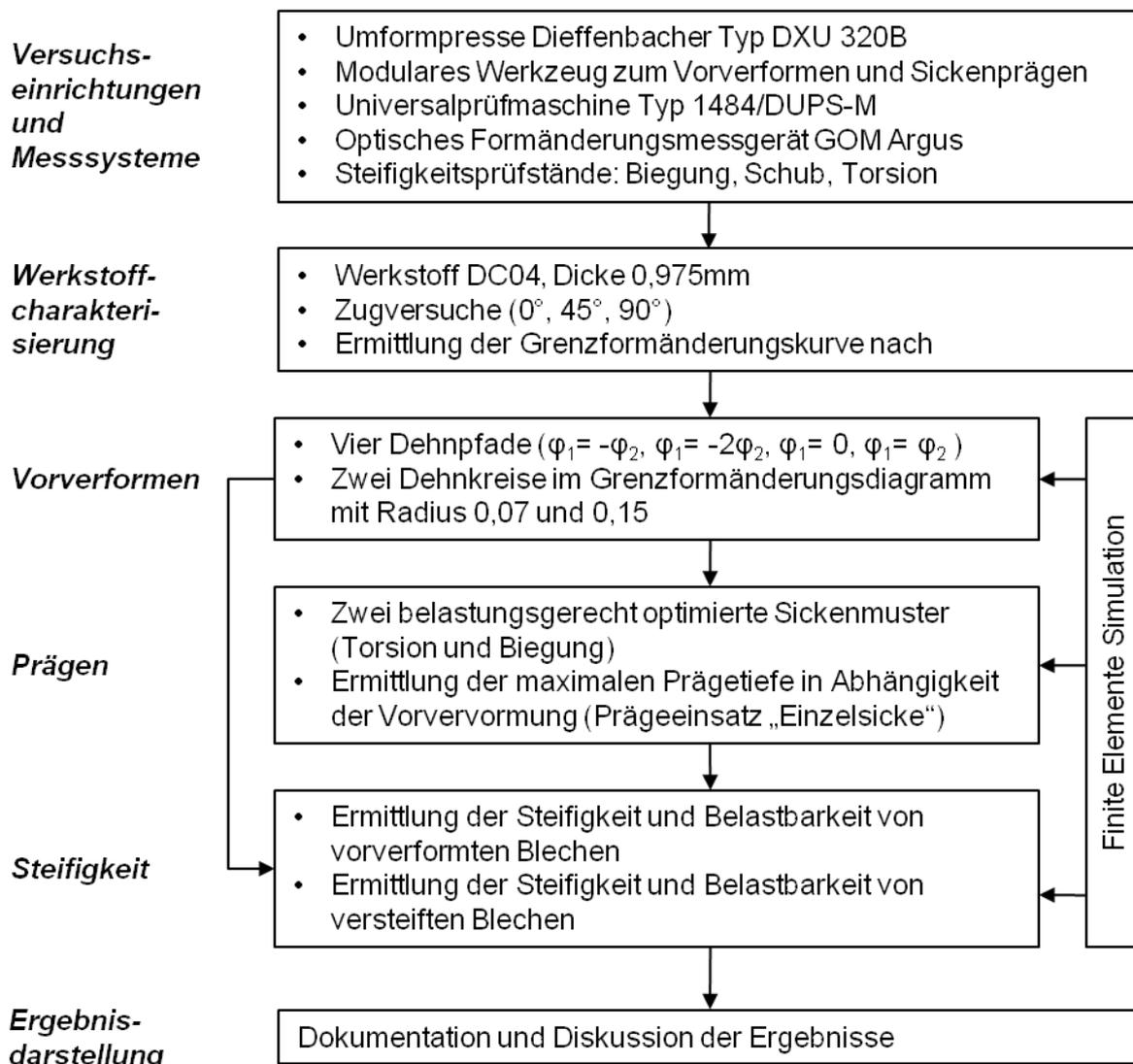


Abbildung 6-1: Versuchsplan

Die Grundlage für die Untersuchungen bilden die mittels des skalierten Nakajima-Werkzeugs erzeugten Vorverformungen. Auf Basis der vorverformten Bleche erfolgen Prägeoperationen. Hierfür sind drei Prägeeinsätze in Verwendung:

- Prägeeinheit „Biegunsmuster“
- Prägeeinheit „Torsionsmuster“
- Prägeeinheit „Einzelsicke“

Die beiden ersten Muster werden mittels kommerzieller Optimierungsalgorithmen hinsichtlich der jeweiligen Lastfälle auf Steifigkeit hin optimiert. Das Werkzeug „Einzelsicke“ dient der Ermittlung der maximalen Prägetiefe in Abhängigkeit der Vorverformung. Alle Umformvorgänge werden durch optische Formänderungsmessung aufgezeichnet.

Die Steifigkeitsprüfung der vorverformten und geprägten Bleche erfolgt in neu entwickelten Prüfständen, die in einer Universalprüfmaschine betrieben werden.

Die Umformungen und Steifigkeitsprüfungen werden durch FE-Simulationen begleitet.

## 7 Versuchsbeschreibung und -durchführung

### 7.1 Umformen

#### Versuchsdurchführung

Nach dem Probenschnitt werden die Bleche mit dem Markierungsgerät EU-Classic 300 der Firma Östling Markiersysteme GmbH berastert. Zum Einsatz kommt dabei ein Punktraster mit einem Punktdurchmesser von 0,5 mm. Alle berasterten Proben werden mit dem Formänderungsmesssystem Argus der GOM mbH (siehe auch Kapitel 4.5.1) eingelesen und in unverformtem Zustand als Referenzstufe definiert.

Für die Vorverformung werden die Proben auf den auf maximale Höhe ausgefahrenen Blechhalter mit Sperrstufe aufgelegt und mittig durch Anschläge positioniert. Zur Reduktion der Reibung im Polbereich ist ein Mehrschichtsystem aus Ziehfolien und Ziehöl auf dem Blech aufgebracht. Die Walzrichtung ist in Anlehnung an den Nakajimaversuch immer senkrecht zur langen Seite der Probe. Durch eine vertikale Abwärtsbewegung des Pressenstößels und Gegendruck am Blechhalter wird zunächst die Sperrsicke umgeformt. Sodann erfolgt durch weiteres Verfahren des Oberwerkzeugs die Umformung der Probe. Die Ziehtiefe wird über die verstellbaren Spindeln des Schnittschlagdämpfersystems definiert. Nach der Umformung erfolgt das Einlesen dieser Stufe im Messsystem Argus. Für die Steifigkeitsprüfung vorverformte Proben werden mittels Wasserstahlschneiden aus dem Polbereich herausgetrennt.

Die Prägeproben werden auf der Ober- und Unterseite mit Ziehfolie versehen. Beide Folien sind mit Ziehöl benetzt. Je Dehnkreis, Dehnpfad und Prüfungsfall (Biegung, Torsion) werden von den optimierten Mustern mindestens fünf Proben angefertigt, im Messsystem Argus eingelesen und mittels Wasserstrahlschneiden für die Steifigkeitsprüfung ausgeschnitten. Ein an der Schneidanlage angebrachter Kreuzlaser ermöglicht die genaue Ausrichtung der Proben.

Die maximale Prägetiefe bei Verwendung der Prägeeinheit „Einzelsicke“ wird iterativ durch werkzeugseitige Anpassung in Einmillimeterschritten ermittelt. Die Walzrichtung ist immer senkrecht zur Längsachse der Sicke. Die Proben werden im

Formänderungsmesssystem eingelesen. Als Versagenspunkt wird der Beginn der Einschnürung definiert. Die Einschnürung wird sowohl optisch als auch durch Schnittdiagramme, welche die Ausdünnungsentwicklung zwischen einzelnen Prägetiefen zeigen, bewertet. Die Einschnürung lässt sich an stark ansteigenden Ausdünnungswerten erkennen.

### **Formänderungsanalyse**

In der Formänderungsanalyse werden die durch die Umformung bzw. Prüfung erzeugten Dehnungen ermittelt. Für die Bestimmung der Vorverformungen der Proben wird im Polbereich ein Quadrat der Größe 150 x 150 mm ausgewählt. Die Fläche entspricht dem Prägebereich bzw. der Prüffläche. In diesem Quadrat werden die Werte der Haupt- und Nebenformänderung sowie Ausdünnung als arithmetische Mittelwerte dargestellt (siehe Kapitel 8.1). Zur Darstellung von Formänderungen werden für vorverformte und geprägte Proben Abwicklungsschnitte erstellt. Das Koordinatensystem sitzt immer auf dem Pol der Prägeprobe, die z-Achse entspricht der Umformrichtung. Das Ergebnis dieses Auswertevorgehens ist am Beispiel eines geprägten Blechs in Abbildung 7-5, Seite 62, gezeigt.

## **7.2 Experimentelle Steifigkeitsbestimmung**

### **Versuchsdurchführung**

Die ausgeschnittenen Proben werden durch die Klemmbacken in den Prüfständen fixiert. Um eine Relativbewegung zwischen Klemmbacken und Probe zu verhindern, werden die Kontaktflächen mit reibungserhöhender Paste bestrichen und zusätzlich Schleifleinen der Körnung 80 eingelegt. Abbildung 7-1 zeigt exemplarisch die Torsionsprüfung einer Probe, die ohne diese Vorkehrungen geprüft wurde. Markiert ist der Bereich, in dem die Probe leicht rutscht. Für weitere Auswertungen ist diese Kurve nicht geeignet. Durch die beschriebenen Maßnahmen wird das Rutschen wirkungsvoll verhindert. Die Verfahrensgeschwindigkeit der Universalprüfmaschine beträgt 10 mm/min. Nach Erreichen einer Maximalkraft bzw. eines Maximalwegs verfährt die Prüfmaschine bei der Biegeprüfung auf den geometrischen Startpunkt der Prüfung zurück, bei der Torsionsprüfung werden die Prüfstände bis auf 50 N entlastet, um die plastische

Verformung der Proben zu erhalten und so nahezu spannungsfrei ausbauen zu können.

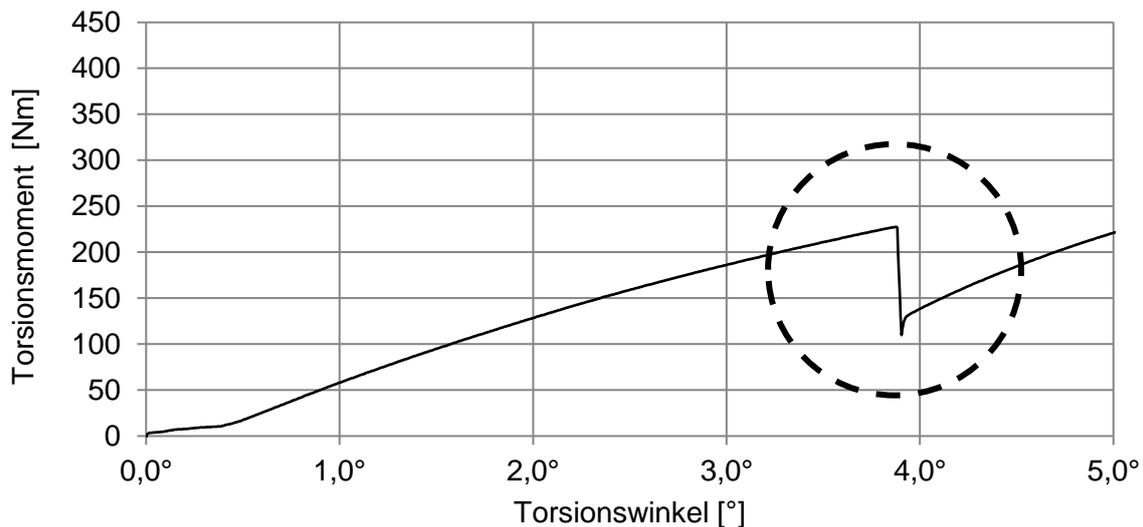


Abbildung 7-1: Probenrutschen (Markierung) während der Prüfung

### Auswertemethode

Die für die Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe wesentlichen Größen sind Steifigkeit und Belastbarkeit.

Als Steifigkeit wird bei der Biegeprüfung die aufzubringende Kraft pro zurückgelegten Weg in N/mm angegeben, bei der Torsionsprüfung handelt es sich um das wirkende Torsionsmoment bezogen auf den Torsionswinkel, also  $\text{Nm}/^\circ$ . Die Steifigkeit wird jeweils im elastischen Bereich der Prüfkurve ermittelt.

Die Belastbarkeit bezeichnet den Punkt (Kraft bei Biegung bzw. Torsionsmoment bei Torsion), ab dem die Probe im Versuch plastifiziert. Zur Analyse der Kurven wird eine manuelle, grafische Methode gewählt. Hierzu wird eine Gerade in die Grafik gelegt und mit dieser der lineare Bereich identifiziert. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 7-2 schematisch dargestellt. Die Ausgleichsgerade liegt deckend auf der Messkurve. Durch Ablesen der Koordinaten am Koordinatensystem kann die Steigung ermittelt werden, sie entspricht der Steifigkeit (Formel 7.1). Der Punkt, an dem die Kurve die lineare Steigung wieder verlässt, stellt das Ende des elastischen Bereichs dar, er

entspricht der Belastbarkeit. Im Beispiel errechnen sich die Kenngrößen wie in Tabelle 7-1 gezeigt.

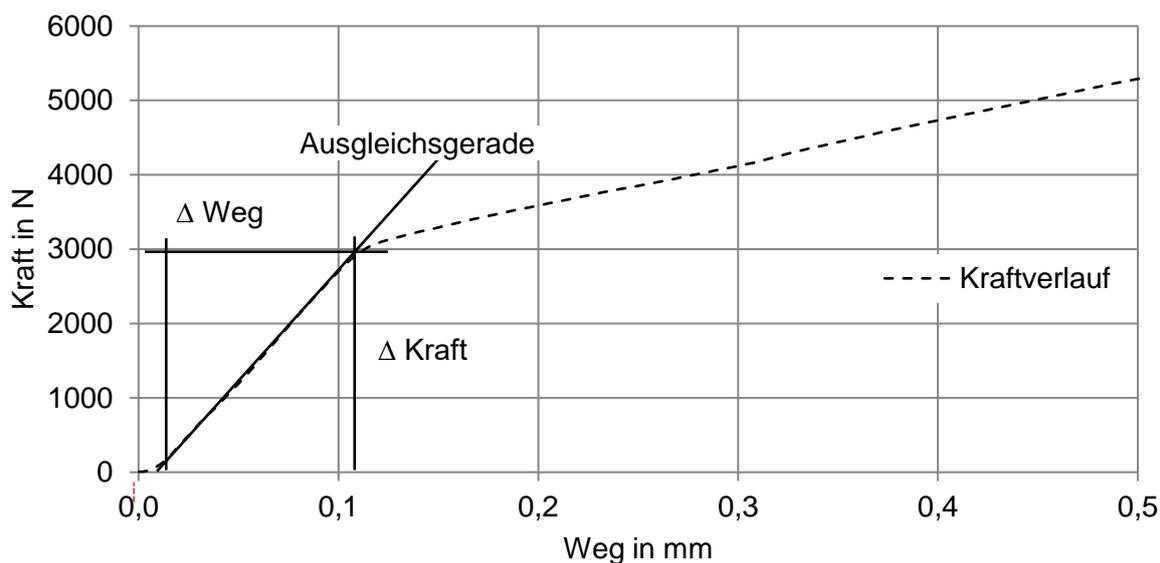


Abbildung 7-2: Darstellung der grafischen Auswertemethode zur Ermittlung von Steifigkeit und Belastbarkeit

$$\text{Steifigkeit} = \frac{|\Delta \text{Kraft}|}{|\Delta \text{Weg}|} \quad \text{Formel 7.1}$$

	<b>Weg in mm</b>	<b>Kraft in N</b>
Startpunkt	0,015	155
Endpunkt	0,110	2950
Steifigkeit in N/mm		29.400
Belastbarkeit in N		2.950

Tabelle 7-1: berechnete Kenngrößen Steifigkeit und Belastbarkeit

## Nachweis der Auswertemethode

Um das gewählte Verfahren auf Korrektheit zu prüfen, werden exemplarisch zusätzlich Proben passend zum in Abbildung 7-2 gezeigten Versuch bis zur definierten Belastbarkeitsgrenze geprüft. Dafür wird in der Universalprüfmaschine die Kraftabschaltschwelle auf diesen Wert gesetzt. Abbildung 7-3 zeigt die auf das vorverformte ausgeschnittene Blech referenzierten Dehnungswerte für eine Probe im Schnitt. Die logarithmischen Dehnungswerte, dargestellt auf der primären Ordinate, bewegen sich im Bereich von  $\pm 0,002$ . Die Blechkontur ist auf der sekundären Ordinate angetragen. Somit kann angenommen werden, dass durch die Belastung während der Prüfung bis zur Belastbarkeitsgrenze keine messbaren plastischen Formänderungen entstehen.

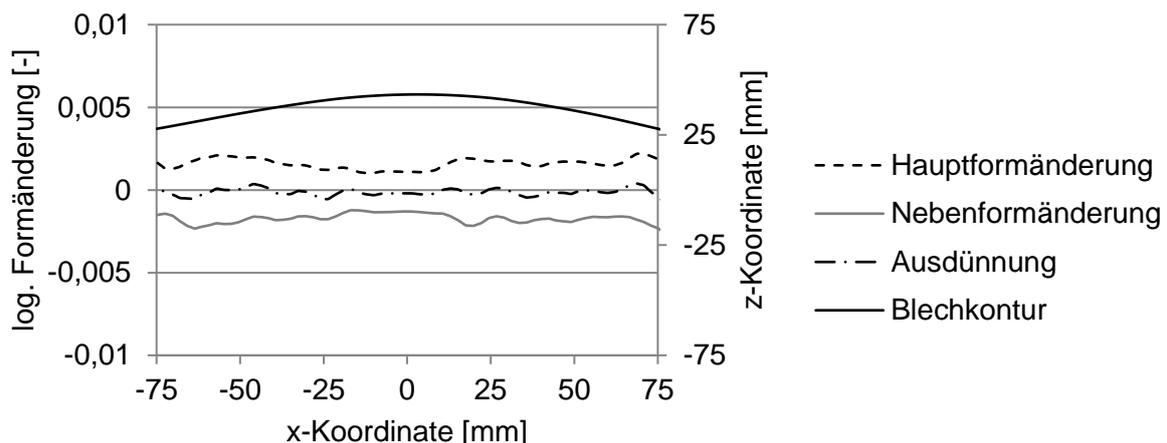


Abbildung 7-3: Formänderungswerte nach Prüfen bis zur Belastbarkeitsgrenze

## 7.3 Umformsimulation

### 7.3.1 Inkrementelle Umformsimulation

Für die Umformsimulation der Vorverformungen und Prägeoperationen kommt das Programm Pam-Stamp 2G der Firma ESI in der Version 2009 zum Einsatz. In Abbildung 7-4 ist der prinzipielle Aufbau beim Vorverformen (A) und Prägen (B) gezeigt. Die Vorgehensweise entspricht dem experimentellen Aufbau. Die Modellierungen erfolgen als Vollmodelle.

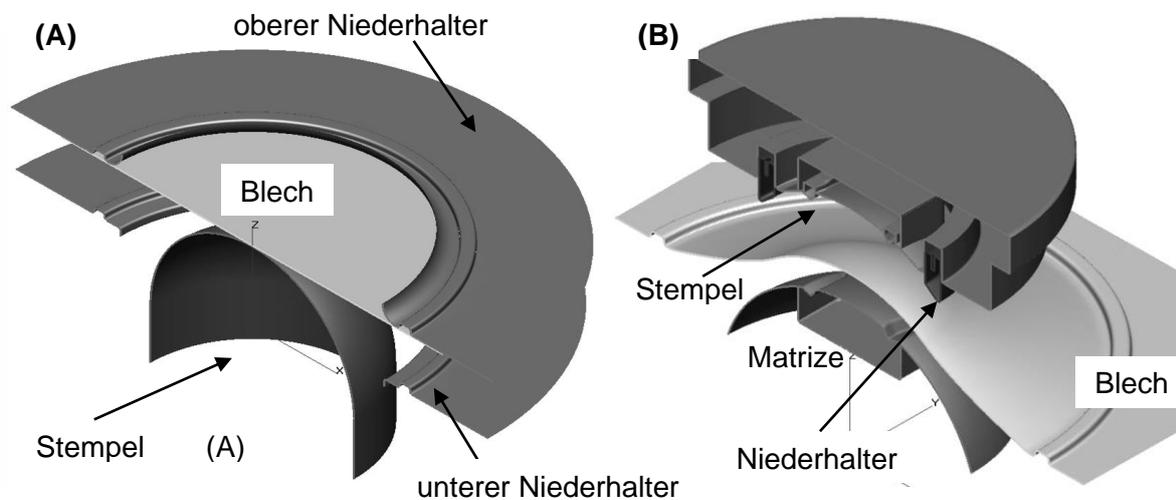


Abbildung 7-4: Modellaufbau für Vorverformen und Prägen

### Vorverformen

Der obere Niederhalter ist ortsfest definiert. In der Stufe „Halten“ verfährt der untere Niederhalter und formt so die Sperrsicke ein. In der Stufe „Umformen“ bewegt sich der Stempel und führt die Umformung der Kugelgeometrie durch. Die Werkzeuge werden auf Basis von IGES-Flächendaten im Modus „High Quality“ für die Rückfederungsberechnung vernetzt. Als Abbruchkriterium der Berechnung wird die eingestellte Ziehtiefe verwendet. Der Geschwindigkeitsverlauf folgt einer Rampenfunktion, um das Einbringen von Schwingungen zu vermeiden. Tabelle 11-1 im Anhang zeigt die wichtigsten Parameter der Simulation des Vorverformungsprozesses. Die Bewertung der Simulationsgenauigkeit erfolgt durch schnittbasierte Gegenüberstellung von experimentell und simulativ ermittelten Formänderungswerten in Diagrammen.

### Prägen

Für die Simulation des Prägens werden die umgeformten Blechgeometrien aus der Vorverformungsstufe importiert. Die Niederhalterfedern des Prüfaufbaus werden in Pam-Stamp als Gasdruckfedern modelliert. Die Vernetzung erfolgt wie beim Vorverformen. Als Abbruchkriterium wird der „Pinch-Test“ eingesetzt. Hierbei überprüft ein Algorithmus die Einklemmung von Blechknoten zwischen den Wirkflächen der Werkzeuge. Sobald diese auftritt, wird die Simulation beendet. Der

Geschwindigkeitsverlauf folgt einer Rampenfunktion, um das Einbringen von Schwingungen zu reduzieren. Tabelle 11-2 im Anhang zeigt die wichtigsten Parameter der Simulation des Vorverformungsprozesses.

Die adaptive Vernetzung wird bis auf minimale Werte von 0,8 mm Kantenlänge zugelassen, um die kleinen Prägeradien abbilden zu können. Die Bewertung der Simulationsgenauigkeit erfolgt durch schnittbasierte Gegenüberstellung von experimentell und simulativ ermittelten Dehnungswerten (siehe Abbildung 7-5). Diese Abbildung enthält die log. Haupt- und Nebenformänderungen sowie die Ausdünnungen. Zur geometrischen Zuordnung ist ein Konturschnitt beigefügt. Der Schnitt folgt der Sickenlängsachse.

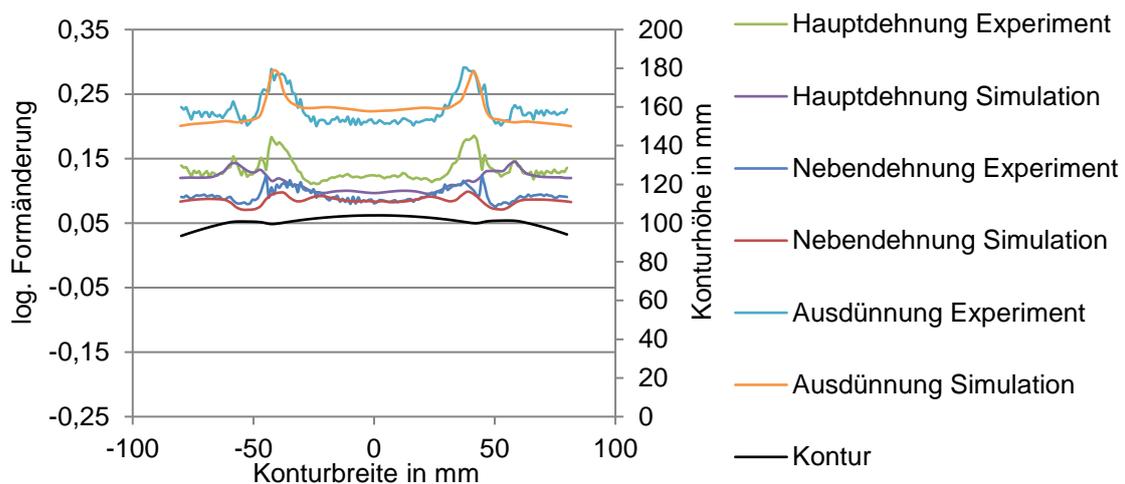


Abbildung 7-5: exemplarische Darstellung des schnittbasierten Dehnungsvergleichs zwischen Experiment und Simulation

### 7.3.2 Inverse Simulation

Für die inverse Umformsimulation der Vorverformungen und Prägeoperationen kommt das Programm Pam-Stamp 2G © der Firma ESI in der Version 2009 zum Einsatz. Der inverse Simulationsansatz berücksichtigt zwei Zustände: die Endgeometrie des zu berechnenden Bauteils und die Startgeometrie. Der wesentliche Vorteil dieses Ansatzes sind die sehr kurzen Rechenzeiten. Allerdings wird aufgrund der reduzierten

Anzahl von Zuständen die erreichbare Genauigkeit geringer als die der inkrementellen Umformsimulation eingeschätzt.

### **Vorverformen**

Für die Simulation der Vorverformungen wird zunächst die in der inkrementellen Simulation entstandene Geometrie exportiert und in Hypermesh neu vernetzt. Die Berechnung erfolgt in einem Schritt auf das ebene Ausgangsblech. Im gesamten Bereich ab der inneren Flanke der Sperrsicke nach außen hin wird die Bewegung in der Blechebene gesperrt. So wird die Rückhaltewirkung der Sperrsicke modelliert. Die Bewertung der Simulationsgenauigkeit erfolgt durch schnittbasierte Gegenüberstellung von experimentell und simulativ ermittelten Dehnungswerten.

### **Prägen**

Die Erstellung der zu berechnenden Geometrien erfolgt analog zur Vorverformung. Für die Berechnung der Dehnungen werden verschiedene Vorgehensweisen ausgewählt:

- Die Berechnung der gesamten Geometrie (Vorverformen und Prägen) in einem Schritt auf das ebene Blech
- Die Berechnung der Prägegeometrie auf die Kugelfläche des Vorverformungsstempels

Die Sperrwirkung des federgesteuerten Niederhalters während des Prägeprozesses wird wie bei der Simulation des Vorverformungsprozesses umgesetzt. Die Bewertung der Simulationsgenauigkeit erfolgt durch schnittbasierte Gegenüberstellung von experimentell und simulativ ermittelten Formänderungswerten. Tabelle 11-3 im Anhang zeigt als Übersicht die wichtigsten Parameter der inversen Modelle.

## **7.4 Steifigkeitssimulation**

Die Simulation der Steifigkeiten erfolgt im Programm Abaqus, Version 6.9. Für die simulationsbasierte Bewertung der Steifigkeiten werden folgende Vorgehensweisen verwendet:

- Simulation auf Basis der idealen CAD-Geometrie aus dem Konstruktionsmodell
- Simulation auf Basis der importierten Dehnungen und Geometrien aus der Umformsimulation mit und ohne Rückfederung
- Vollständige Simulation der Umformung und Steifigkeit innerhalb des Programms Abaqus; somit Beibehaltung aller Dehnungen und Spannungen aus dem Umformprozess

Für alle Lastfälle wird die Rückhaltewirkung der Prüfstandsklemmbacken über die Sperrung von Freiheitsgraden im relevanten Blechbereich modelliert. Beim Lastfall „Biegung“ wird die Prüflast über das CAD-Modell des im Experiment eingesetzten Körpers (siehe Abbildung 4-9) eingeleitet. Die Belastung „Torsion“ wird über die Beaufschlagung von Knoten modelliert.

Die Bewertung der Ergebnisse Steifigkeit und Belastbarkeit erfolgt anhand des Vergleichs mit experimentell ermittelten Werten.

### **Modellierung**

Alle Bleche werden mit linearen Schalenelementen S4 diskretisiert. Die Vernetzung wird in Pam-Stamp und Hypermesh durchgeführt. Die Werkstoffmodellierung basiert auf den in Kapitel 5.1 gezeigten Parametern. Die Blechdicke wird bei Simulation der Idealgeometrie auf den Wert des nicht verformten Blechs (0,975 mm) gesetzt, ansonsten basiert die flächenhafte Dickenverteilung auf der Umformsimulation.

Für die Biegeprüfung wird das zu prüfende Blech (Abmessungen: 200 mm x 200 mm) allseitig in einem Randbereich von 25 mm eingespannt, siehe auch Kapitel 4.4. In Abaqus wird dies durch Festhalten aller 6 Freiheitsgrade von Knoten in diesem Bereich erreicht. Ein Stempel mit 30 mm Durchmesser drückt mittig auf das Blech, siehe Abbildung 7-6.

Der Kontakt wird durch ein „Node-to-Surface“ Kontaktpaar mit „small sliding“ Parameter realisiert, der Reibungsbeiwert wird aufgrund kleiner Relativbewegung zwischen Stempel und Blech zu Null gesetzt. Die Blechdicke wird ignoriert, somit liegt der Stempel direkt auf dem Blech.

Bei der Torsionsprüfung (Abbildung 7-7) wird das zu prüfende Blech (Abmessungen: 200 mm x 150 mm) in einem Randstreifen von 25 mm eingespannt: im Prüfstand wird dafür ein Klemmbackenpaar zusammengepresst. Dieses Vorgehen wird in der Simulation vereinfacht modelliert: die Knoten im linken Randbereich der Probe werden an die Knoten der Klemmbacken starr gekoppelt. Knoten im rechten Randbereich von 25 mm werden eingespannt.

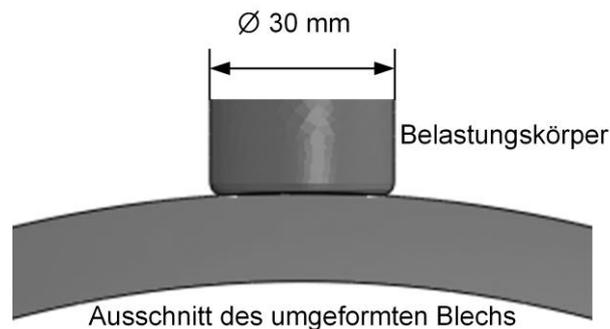


Abbildung 7-6: Abaqus: Modellierung der Biegeprüfung

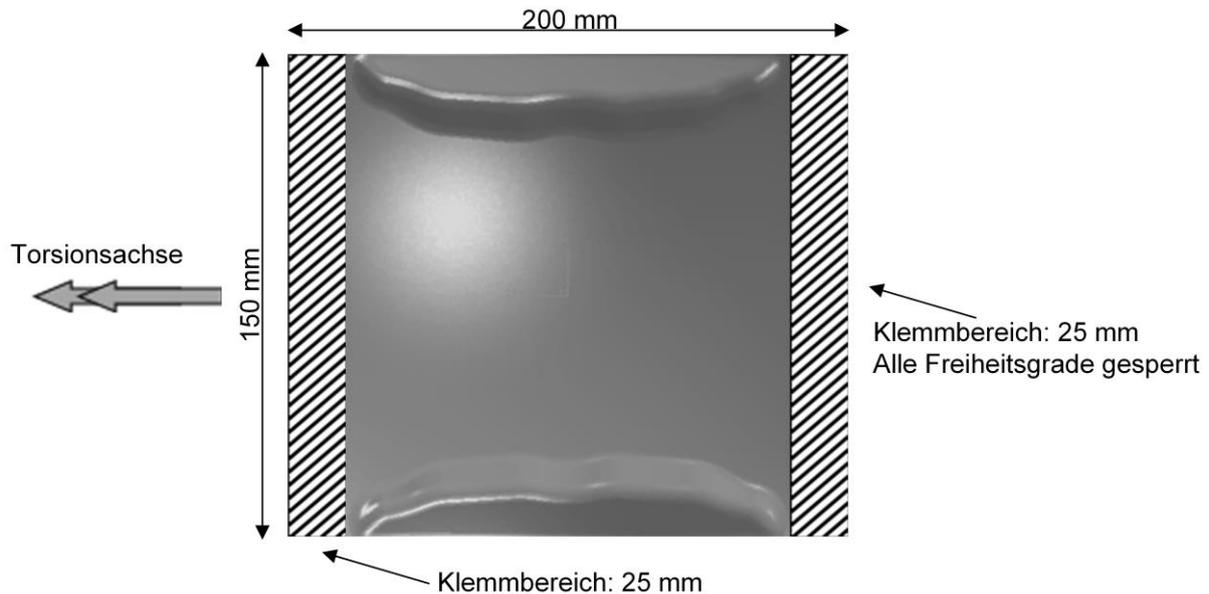


Abbildung 7-7: Abaqus: Modellierung der Torsionsprüfung

## 8 Versuchsergebnisse

### 8.1 Formänderungen beim Vorverformen

Die Auswertung der Vorverformungsexperimente erfolgt in einem Quadrat der Seitenlänge 150 mm auf dem Pol der Proben durch arithmetische Mittelung. Diese Fläche entspricht dem Prüfbereich in der Steifigkeitsuntersuchung. Folgende Abbildung 8-1 zeigt exemplarisch für eine streckgezogene Probe die log. Ausdünnung im Polbereich mit der dunkel markierten Auswertefläche:

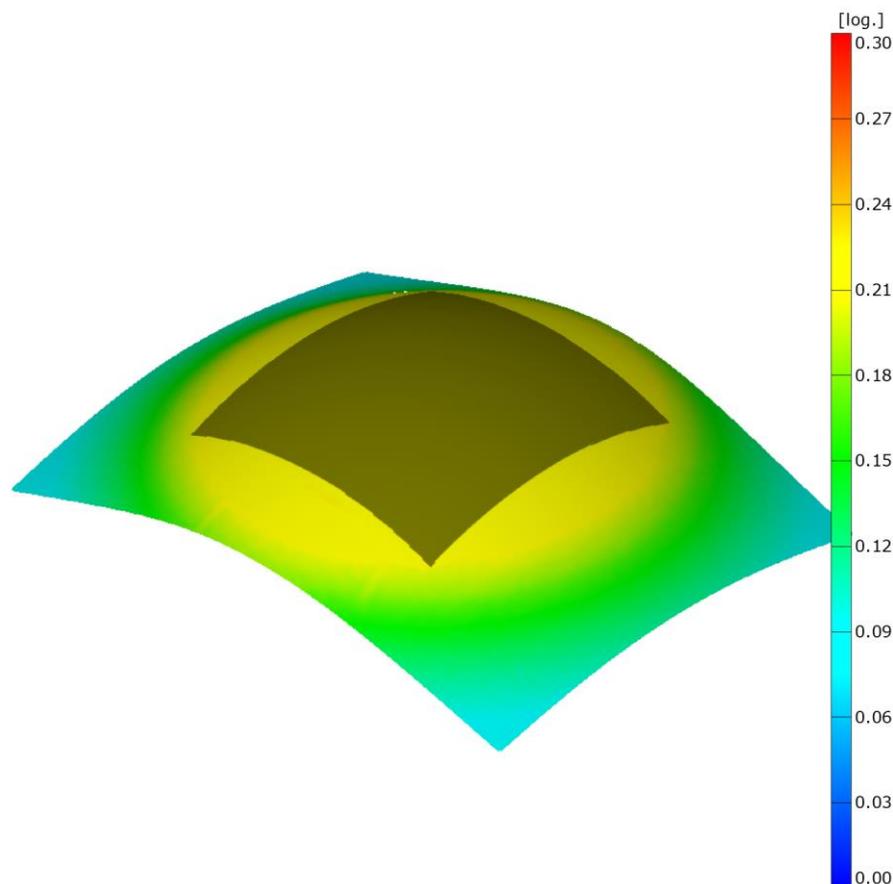


Abbildung 8-1: Exemplarische Darstellung des Auswertebereichs, log. Ausdünnung

In Abbildung 8-2 sind die Ergebnisse der Vorverformungen auf zwei Dehnkreisen und verschiedenen Probenbreiten gezeigt (siehe auch Kapitel 5.2). Die effektive Dehnung, auch Vergleichsumformgrad, berechnet sich aus Haupt-, Neben- und Dickenumformgrad nach folgender Formel, auf deren Basis z.B. die Verfestigung bzw. die elastischen und plastischen Anteile beurteilt werden können:

$$\varphi_V = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)}$$

Formel 8.1

Aus den Abbildungen lassen sich die höhere Nebenformänderung, Dickenabnahme und Vergleichsumformung bei den Proben mit einem Umformgrad von 0,15 im Vergleich zu den Proben @0,07 erkennen. Mit steigender Probenbreite ist die Zunahme von Ausdünnung, Nebenumformung und Vergleichsumformgrad erkennbar.

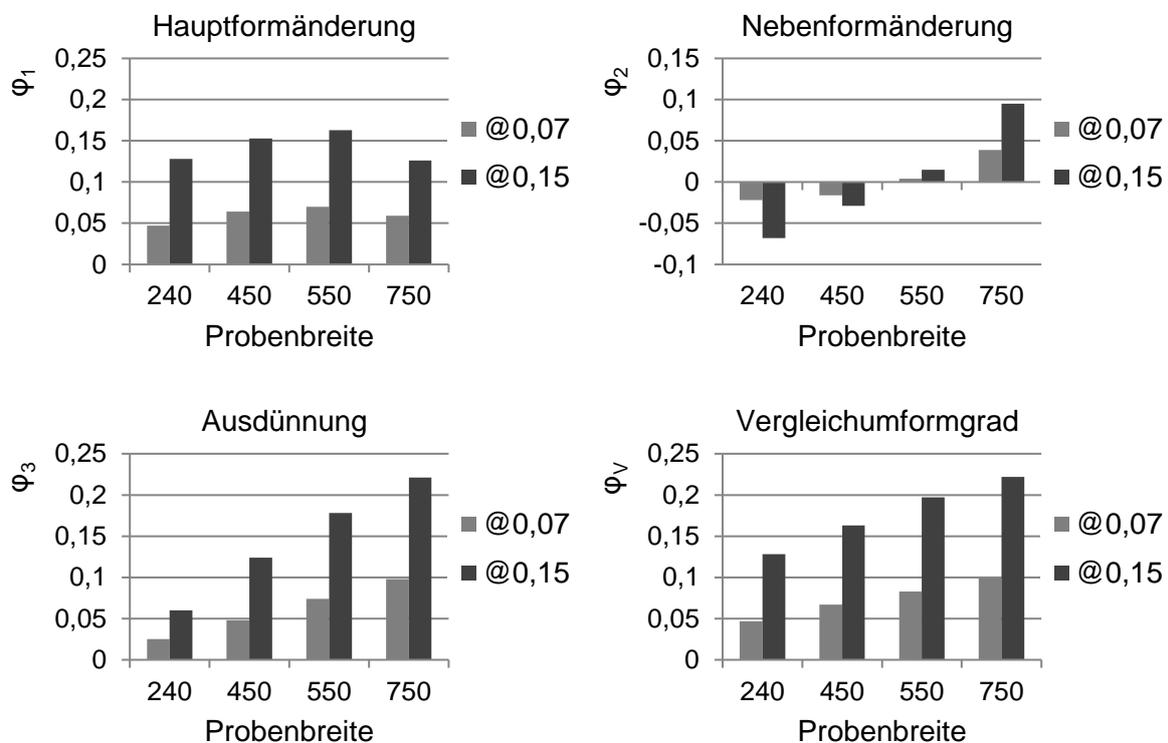


Abbildung 8-2: Dehnungen beim Vorverformen (@0,07=Dehnungswert am Dehnkreis 0,07)

Die Hauptformänderung ist beim einachsigen gleichmäßigen Zug (Proben 550) am höchsten. Die Proben „240“ liegen mit den gezeigten Haupt- und Nebenformänderungen nicht auf der idealen Tiefziehgerade, sondern bewegen sich im Bereich Tiefziehen – einachsiger Zug (siehe Abbildung 2-3). Die Probenbreiten 450 und 550 sind am kleinen Dehnkreis mit identischer Ziehtiefe vorverformt. Die Unterschiede im GFD sind durch die Probenbreite bedingt. Die Position der gemittelten

Dehnungen im Grenzformänderungsdiagramm sind in Abbildung 8-3 gezeigt.

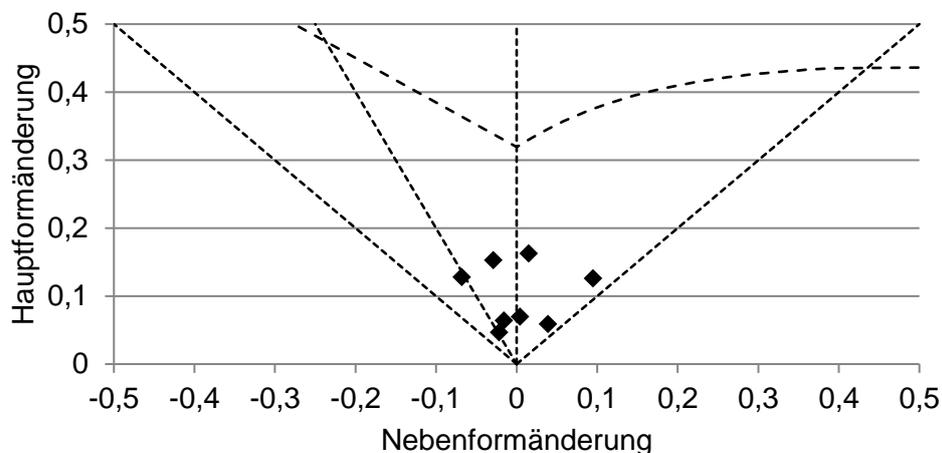


Abbildung 8-3: Ergebnis der Vorverformungen

Zu Charakterisierung der Probenform wird der Wert der gemittelten Geometrieabweichung eingeführt. Diese Abweichung beinhaltet die Rückfederung aufgrund der Umformung und die Unterschiede aus den für jeden Dehnpfad und Dehnkreis eingestellten Ziehtiefen. Dazu werden die ausgeschnittenen Proben im Argus-System eingelesen, im Modul „Sview“ des Systems diese Geometrien auf die Kugeloberfläche des Nakajimastempels referenziert und anschließend die flächenhafte Abweichung berechnet. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich die in Abbildung 8-4 gezeigten Abweichungswerte, die für die Biegeproben ermittelt werden.

Die Proben am Dehnkreis 0,15 sind alle etwa 1,5 – 2-mal tiefer gezogen als die am kleinen Dehnkreis. Die geometrischen Abweichungen zur idealen Kugel sind deshalb sehr viel geringer als bei den Proben des Dehnkreises 0,07. Dies äußert sich in kleineren Abweichungskennwerten. Die Probe 240 ist die am tiefsten vorverformte Variante und weist deshalb auch die geringsten Geometrieabweichungen auf (siehe auch Abbildung 8-6). Die Abweichung zu Kugelform konzentrieren sich allen Probenbreiten im Wesentlichen auf die Ecken. Ein Quervergleich auf Basis der Geometrieabweichung zwischen den Proben 450, 550 und 750 am Dehnkreis 0,07 zeigt beispielhaft den Einfluss der Rückfederung (Abbildung 8-5) auf die

Grundgeometrie: Die Proben 450 und 550 sind gleich tief gezogen (75 mm), die Probe 750 ist 70 mm tief.

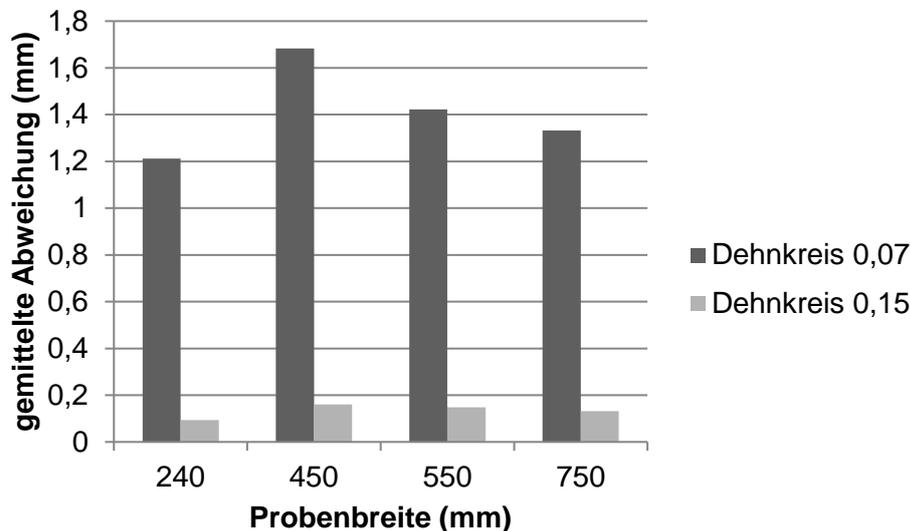


Abbildung 8-4: Geometrische Abweichungswerte von Idealgeometrie am Dehnkreis 0,07 und 0,15.

Die Probe 450 federt beim Freischneiden weiter von der idealen Kugelform zurück, hat deshalb die höhere Abweichung. Die Probe 550 erreicht annähernd denselben Kennwert wie die 750er Probe, die aufgrund der symmetrischen Form und gleichmäßigen Spannungsverteilung geringe Rückfederungen zeigt.

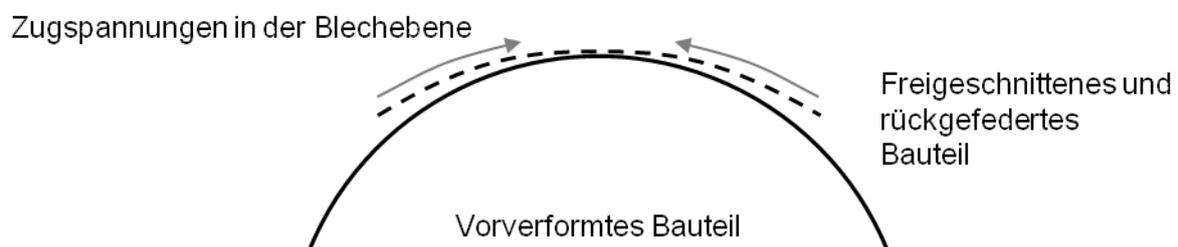


Abbildung 8-5: schematische Darstellung von Rückfederung und Spannungen im Blech

In Abbildung 8-6 sind die geometrischen Abweichungen als flächenhafte Falschfarbenbilder dargestellt. Rote Bereiche sind die mit der größten Abweichung von der Kugelform des Nakajima-Stempels. Mit zunehmender Probenbreite zeigt sich die

zunehmend symmetrische Gestalt der Proben(abweichung). Das bedeutet, dass die Geometrie der 750er Proben am ehesten einer Kugel entspricht.

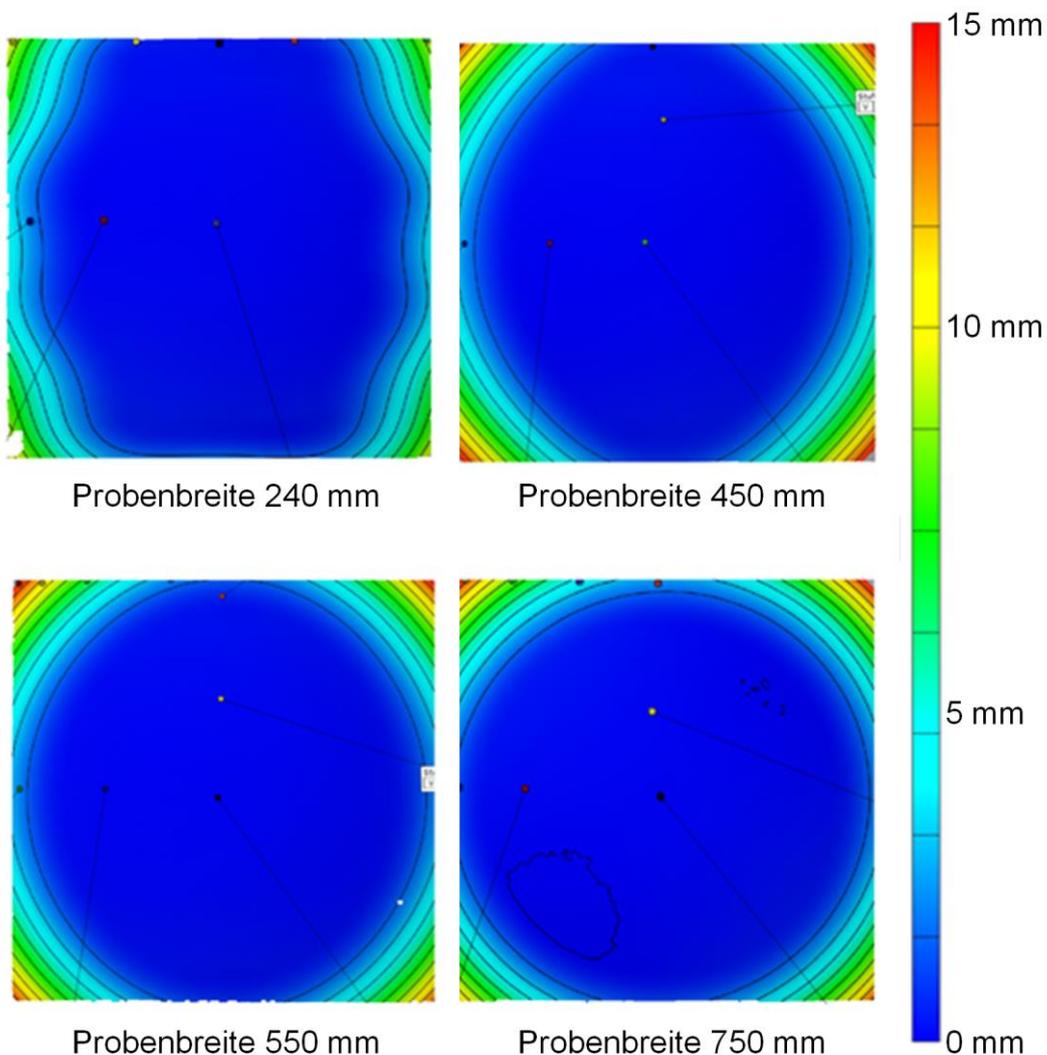


Abbildung 8-6: Abweichung vorverformter Proben von Idealgeometrie, Dehnkreis 0,07

## 8.2 Maximale Sickentiefe in Abhängigkeit der Vorverformung

Abbildung 8-7 zeigt eine typische Formänderungsverteilung für das Prägen der Einzelsicke. Die Hauptbelastungsart ist einachsiger gleichmäßiger Zug, gemischt mit Streckziehanteilen. Die höchst beanspruchten Stellen sind die Bereiche der Matrizenradien (1) sowie der Stempelradien (2) im Übergang zu den Flanken. Die maximale Prägetiefe in Abhängigkeit der Vorverformung wird durch iterative Erhöhung

der Prägetiefe im Erstzug ermittelt. Als Schadenskriterium ist der Beginn der Einschnürung definiert.

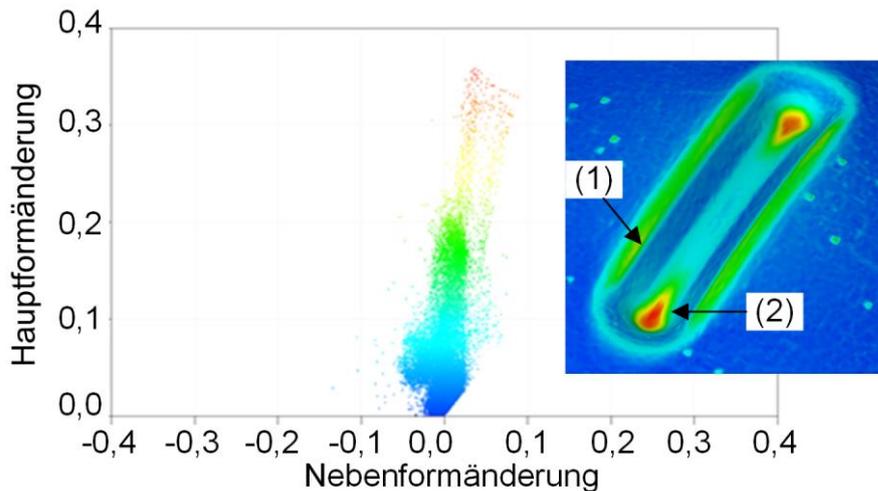


Abbildung 8-7: Typische Dehnungsentwicklung des Prägens mit Einzelsicke

Für die Prägeproben auf Basis der Vorverformung mit 240 mm Streifenbreite (Tiefziehen) konnte die Versagensgrenze mit der maximal einstellbaren Prägetiefe nicht erreicht werden. Diese Probenart wird im Folgenden nicht dargestellt.

Abbildung 8-8 zeigt die erreichten Sicken-tiefen und die dabei entstehenden Ausdünnungen auf Basis der Formänderungsanalyse.

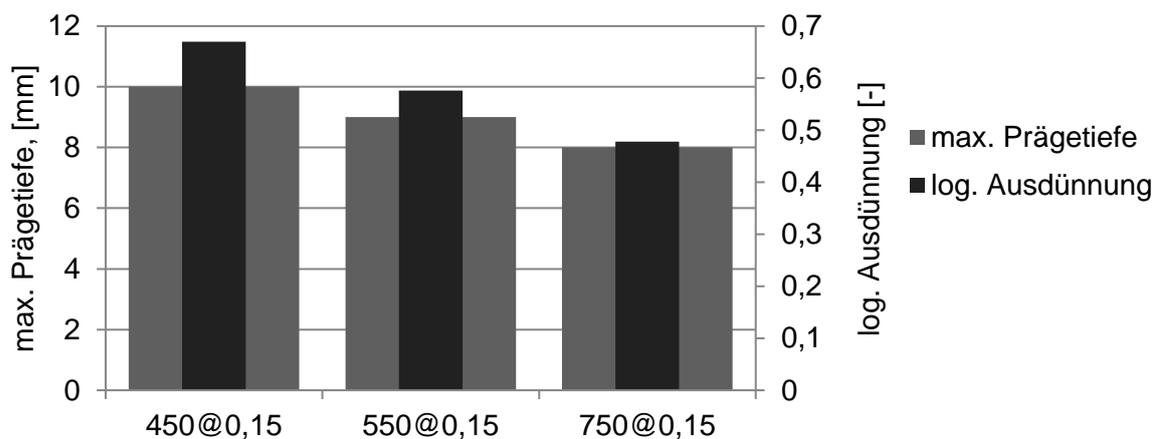


Abbildung 8-8: Prägen Einzelsicke: Tiefe und Ausdünnungen

Die Ausdünnung, die während des Prägens bis zur Einschnürung erreicht werden kann nimmt mit zunehmender Probenbreite ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass für eine Maximierung der Bauteilsteifigkeit durch nachgelagerte Prägeprozesse möglichst Tiefziehprozesse im ersten Umformschritt anzustreben sind. In Abbildung 8-9 sind die nichtlinearen Dehnpfade aus der Vorverformung und der nachfolgenden Prägeoperation gezeigt.

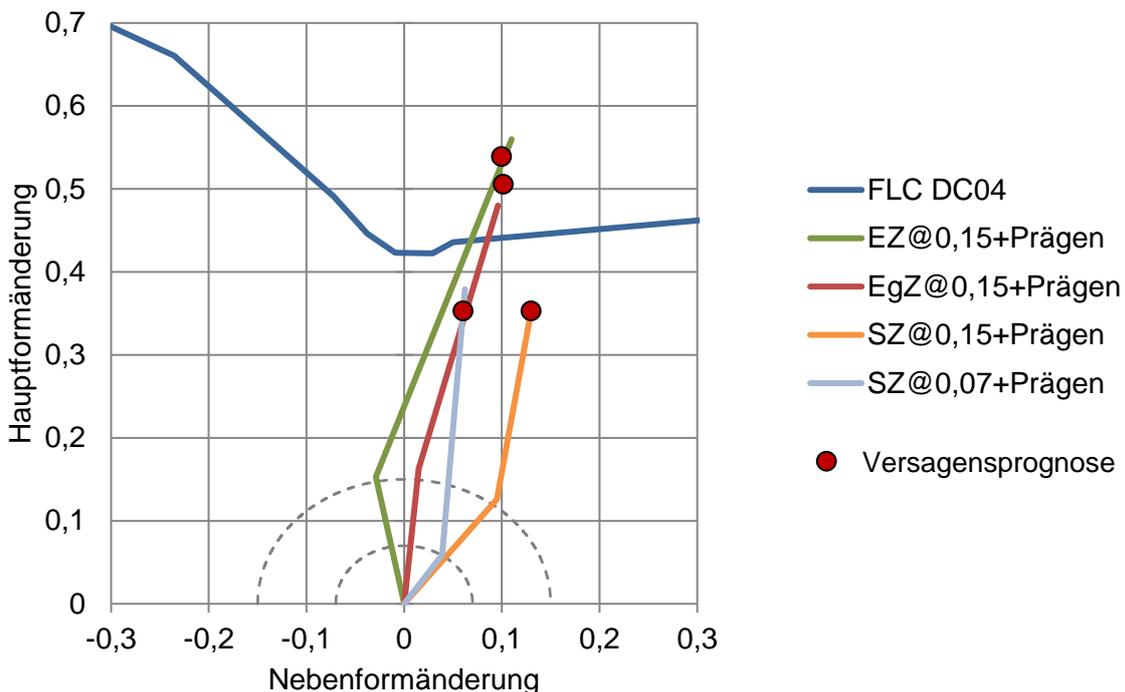


Abbildung 8-9: Nichtlineare Dehnpfade aus Vorverformung und Prägen. Versagensprognosen sind eingezeichnet

Diese führen zu folgendem Verhalten:

- Eine Kombination aus Vorverformung im linken Bereich der Grenzformänderungskurve mit nachfolgender Prägeoperation führt hinsichtlich maximal erreichbarer Umformgrade zu einer deutlichen Überschreitung der Grenzformänderungskurve. Es können also höhere Ausdünnungswerte erreicht werden. Damit können tiefere Sicken umgeformt werden, wodurch letztliche höhere Versteifungswirkungen erzielbar sind.

- Eine Kombination aus Vorverformung im rechten Bereich der Grenzformänderungskurve mit nachfolgender Prägeoperation führt hinsichtlich maximal erreichbarer Umformgrade zu einer Nichterreicherung der Grenzformänderungskurve. Das Bauteilversagen wird also vor der für lineare Dehnungspfade ermittelten Grenzformänderungskurve einsetzen.
- Beide Verhaltensweisen lassen sich mit einer konventionellen Beschreibung des Werkstoffverhaltens durch die Grenzformänderungskurve nicht erfassen.

In Abbildung 8-9 sind zusätzlich die prognostizierten Versagensgrenzen auf Basis des in [VOLK12] vorgestellten Ansatzes markiert. Obwohl die in [VOLK12] vorgestellten Berechnungen auf Versuchsdaten für den Werkstoff HC300X basieren, können gute Übereinstimmungen zwischen Berechnungen und Experiment erreicht werden. Deshalb sollte eine Gestaltung und Bewertung des Umformprozesses von Bauteilen, die mit nichtlinearen Dehnpfaden gefertigt werden immer mit wie in [VOLK12] gezeigten Methoden oder mit nichtlinear ermittelten Grenzformänderungskurven erfolgen.

### **8.3 Formänderungen beim Prägen der optimierten Sickenmuster**

#### **8.3.1 Biegungsoptimiertes Muster**

Die beim Prägen des biegunsoptimierten Musters entstehenden Formänderungen sind für alle Vorverformungen sehr ähnlich und in Abbildung 8-10 am Beispiel einer Tiefziehprobe gezeigt. Die höchsten Ausdünnungen treten an den rechts im Bild markierten Radien (2) durch einachsigen ausgeglichenen Zug (egZ) auf. Die im Formänderungsdiagramm zu erkennenden Druckbelastungen (1) entstehen an den Übergängen der Prägeradien in die Kugelform der Grundstruktur. Die aus Vorverformen und Prägen resultierenden Formänderungen sowie die Endkontur sind auf Basis eines Abwicklungsschnittes in Abbildung 8-11 gezeigt (die Position des Schnittes ist in Abbildung 8-10 dargestellt). Die Geometrie wird auf der sekundären Ordinate zur besseren Erkennbarkeit der Prägegeometrie überhöht dargestellt. Der Nullpunkt in x-Richtung befindet sich im Pol der Probe. Die Ausdünnungen steigen bei jedem Prägeradius deutlich an. Deutlich erkennbar sind die Orte höchster

Ausdünnungen bei  $\pm 20$  mm im Mittelbereich der Probe, der Lasteinleitungstelle. Die Ausdünnungen von nicht geprägten Bereichen bewegen sich auf dem Niveau der Vorverformungen. Die Formänderungen der Prägeoperation sind somit lokal begrenzt.

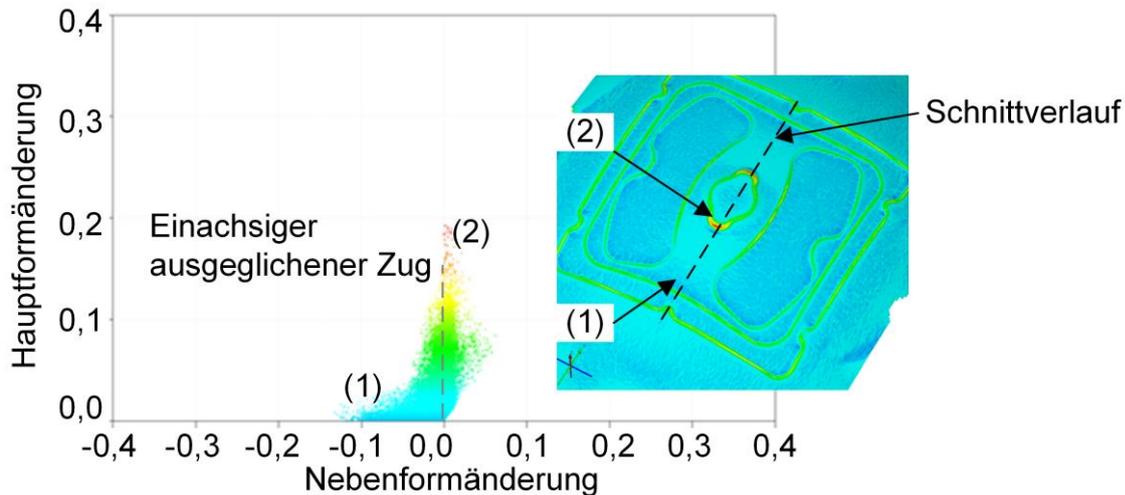


Abbildung 8-10: links: Formänderungsdiagramm der Prägeoperation "Biegemuster" (Farben gemäß Hauptformänderung); rechts im Bild 3D-Darstellung der Hauptformänderung des Prägens

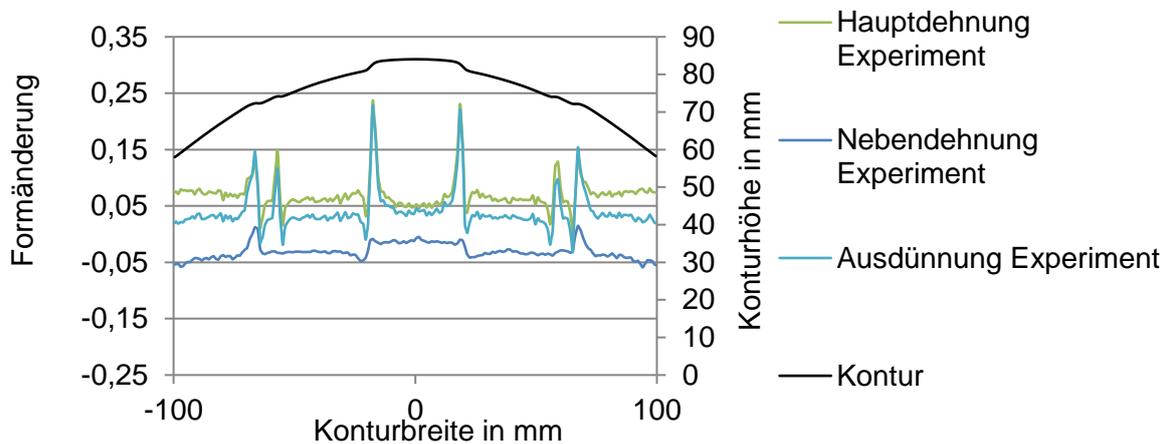


Abbildung 8-11: Formänderungen des Biegemusters im Schnitt dargestellt

### 8.3.2 Torsionsoptimiertes Muster

Die Formänderungen beim Prägen der torsionsoptimierten Muster sind für alle Probenbreiten qualitativ und quantitativ nahezu identisch. In Abbildung 8-12 sind exemplarisch ein Formänderungsdiagramm sowie die Hauptformänderungen in 3D-

Darstellung einer geprägten Tiefziehprobe gezeigt. Im Diagramm sind die Formänderungen für den Prägeprozess dargestellt. Die höchsten Ausdünnungen treten an den rechts im Bild markierten Radien (1) durch einachsigen ausgeglichenen Zug (egZ) auf. Die aus Vorverformen und Prägen resultierenden Formänderungen sowie die Endkontur sind auf Basis eines Abwicklungsschnittes in Abbildung 8-13 gezeigt. Die Geometrie wird auf der sekundären Ordinate zur besseren Erkennbarkeit der Prägegeometrie überhöht dargestellt. Die Ausdünnungen von Bereichen, die nicht unmittelbar zur Sickengeometrie gehören, bewegen sich auf dem Niveau der Vorverformungen. Die Formänderungen der Prägeoperation sind lokal begrenzt.

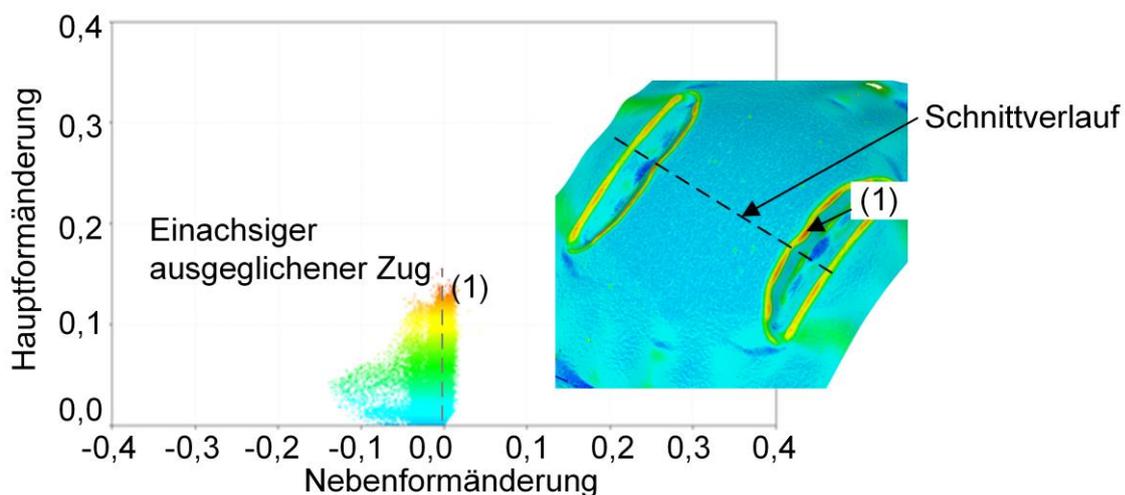


Abbildung 8-12: links: Formänderungsdiagramm der Prägeoperation "Torsionsmuster" (Farben gemäß Hauptformänderung); rechts im Bild 3D-Darstellung der Hauptformänderung des Prägens

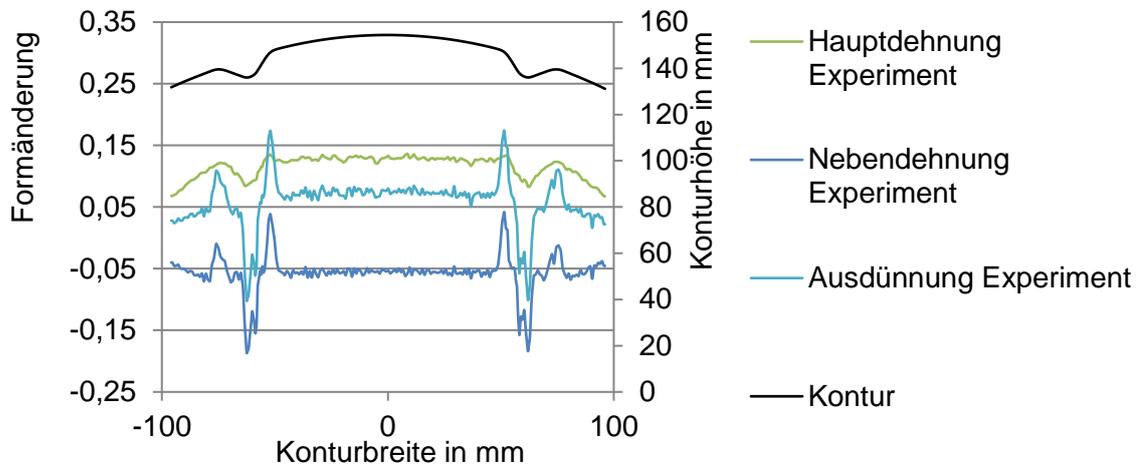


Abbildung 8-13: abgewickelte Formänderungen des Torsionsmusters (y-Schnitt)

## 8.4 Formänderungen bei der Steifigkeitsprüfung

Im Folgenden werden die durch die Steifigkeitsprüfungen erzeugten Formänderungen an vorverformten bzw. versteiften Bauteilen dargestellt.

### 8.4.1 Formänderung bei der Prüfung von vorverformten Blechen

#### Torsion

Die Bleche werden in den beschriebenen Prüfständen in den Lastfällen Torsion und Biegung geprüft. Abbildung 8-14 zeigt in überzeichneter Form die Geometrie und die logarithmische Blechdickenänderung, die durch die Torsionsprüfung verursacht werden, sowie ein Foto einer geprüften Probe. Für die Ergebnisdarstellung werden die Prüfungsergebnisse auf die ausgeschnittene vorverformte Stufe referenziert.

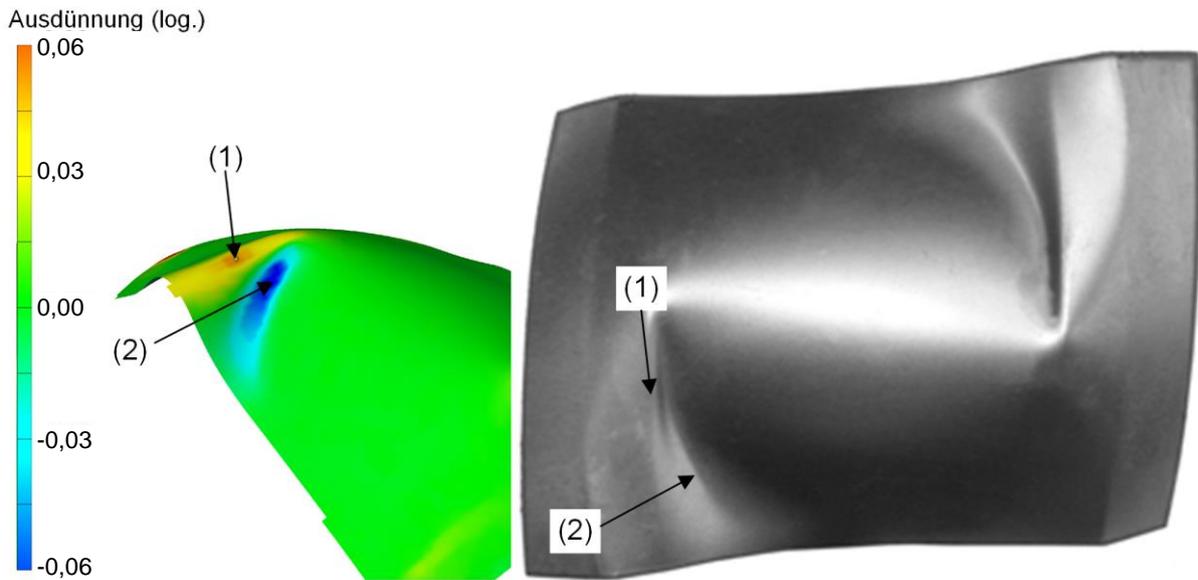


Abbildung 8-14: überzeichnete Darstellung der Probengeometrie nach der Torsionsprüfung (links,; Foto (rechts)

Es zeigt sich, dass im Großteil der Probe während der Prüfung keine oder nur sehr geringe Dehnungsänderungen auftreten (in Abbildung 8-14 grün dargestellt). Die wesentlichen Formänderungen treten in den Bereichen (1) bzw. (2) auf. Das bedeutet, dass das Bauteilversagen lokal eingeleitet und weiterentwickelt wird. In diesen Bereichen muss bei einem für diesen Lastfall optimierten Muster die Versteifungswirkung ansetzen. Abbildung 8-15 zeigt die durch die Torsionsprüfung hervorgerufene log. Dehnungsentwicklung am Beispiel der vorverformten Probenbreite 550. In der Abbildung sind zur Orientierung die Standarddehnpfade gemäß Abbildung 2-3 eingezeichnet.

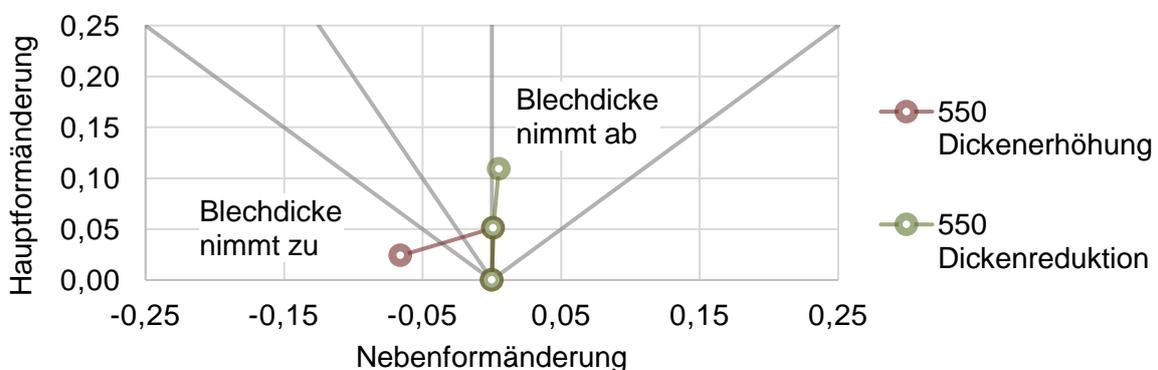


Abbildung 8-15: Dehnungsentwicklung bei der Torsionsprüfung vorverformter Bleche

In den markanten Probenbereichen sind zwei Tendenzen zu erkennen:

- Im Bereich (1), siehe Abbildung 8-14, findet aufgrund der nahezu reinen einachsigen ausgeglichenen Belastung, siehe Abbildung 8-15, eine deutliche Blechausdünnung statt.
- Im Bereich (2), siehe Abbildung 8-14, zeigt sich eine deutliche Blechdickenzunahme aufgrund der Reduktion der Nebenformänderung, siehe Abbildung 8-15.

Der Schadensort ist für alle torsionsgeprüften vorverformten Proben identisch und damit unabhängig von der Vorverformung.

### **Biegung**

Abbildung 8-16 zeigt die Ausdünnung einer vorverformten nicht zusätzlich versteiften Biegeprobe nach der Prüfstrecke von 20 mm. Das Einklappen der Probe erfolgt ringförmig. Vier Punkte sind stellvertretend für markante Probenbereiche markiert. Im Inneren der Probe kommt es an den Punkten 0 und 1 bezogen auf das vorverformte nicht geprüfte Blech zu minimalen Blechausdünnungen. Im Abknickbereich (Punkt 2) sind Ausdünnungen (ca. 0,12) zu erkennen. Die Eindringtiefe des Prüfkörpers von 20 mm führt also zu nur geringen Dehnungen im Bauteil. Durch die Prüfung wird zunächst eine Druckbeanspruchung in der Blechebene (Membranspannung) erzeugt, wie bei Gewölben [ISSL97]. Überschreitet die Prüflast den kritischen Wert, kommt es zum Einknicken des Gewölbes. Plastische Dehnungen werden nur lokal erzeugt. Am Rand der Einspannung (Punkt 3) treten ebenfalls geringe Ausdünnungen wie in den Bereichen (0) und (1) auf.

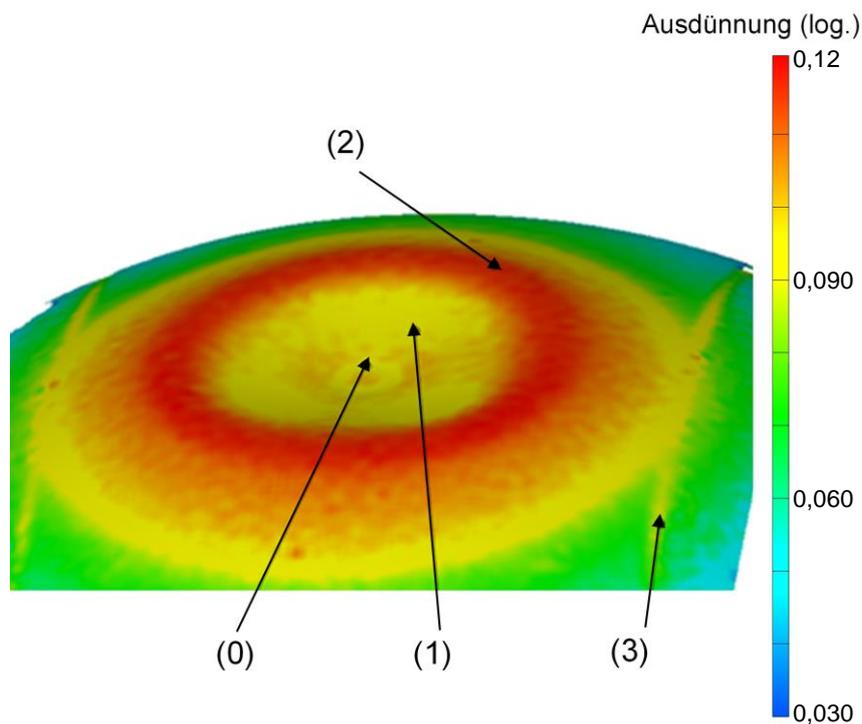


Abbildung 8-16: Ausdünnung einer vorverformten Biegeprobe (Vorverformen + Prüfen)

#### 8.4.2 Formänderung bei der Prüfung von versteiften Blechen

Die Formänderungen beim Prüfen der mit optimierten Sickenmustern versteiften Bleche sind qualitativ sehr ähnlich zu denen aus Kapitel 8.4.1. In Abbildung 8-17 sind exemplarisch die Ausdünnungsverteilung einer geprüften Torsionsprobe in überzeichneter Darstellung sowie der Dehnungsverlauf exemplarisch gezeigt. Auch hier sind zwei markante Bereiche zu identifizieren, jeweils im Bild markiert: Blechdickenreduktion bzw. -erhöhung. Durch die Prüfung kommt es zu Oberflächenvergrößerungen, die zum Einklappen der Probe führen, ähnlich wie bei den vorverformten Torsionsproben.

Der Abbildung 8-17 gezeigten Dehnungspfad für den Bereich der Blechdickenerhöhung in der Steifigkeitsprüfung wird im Folgenden erklärt: Position 1 entspricht der Dehnung nach der Vorverformung. Durch den Prägeprozess wird dieser Bereich auf Position 2 verschoben, das Blech wird ausgedünnt. Durch die Prüfung wird das Blech dort wieder dicker, siehe Position 3. Das Verhalten entspricht dem der nicht

versteiften Torsionsproben. Der Bereich, der während der Prüfung ausdünt und nach oben ausknickt, liegt nicht in der Beeinflussungszone des Prägeprozesses. Das Bauteilversagen wird analog zur nicht versteiften Probe lokal eingeleitet. Die durch die Prüfung verformten Proben weisen eine hohe Ähnlichkeit mit den geprüften nicht versickten Proben auf. Durch eine bessere Gestaltung der Sicken in diesem Bereich könnte das Ergebnis der Steifigkeitsprüfung noch weiter verbessert werden. Der Sickenbereich müsste bis direkt in den Einspannbereich hineinreichen.

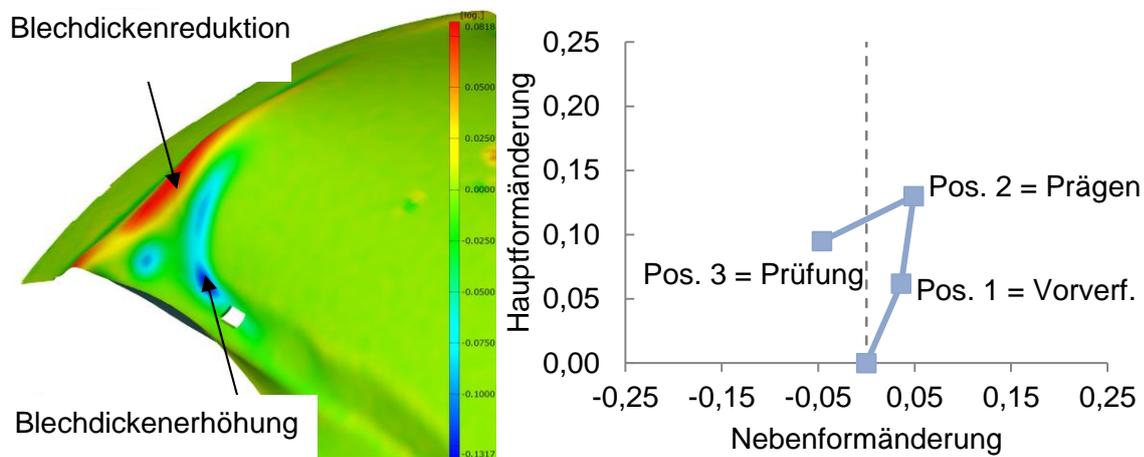


Abbildung 8-17: links: Ausdünnung beim Prüfen einer versteiften Torsionsprobe (überzeichnet); rechts: Dehnungen markanter Punkte nach der Prüfung

### 8.5 Einfluss der Vorverformung auf die Bauteilsteifigkeit

Vor der Ergebnisdiskussion werden mögliche Ursachen für Unterschiede in Steifigkeit und Belastbarkeit zusammengefasst. Potentielle Einflüsse sind in Tabelle 8-1 dargestellt.

<b><i>Einflussgröße</i></b>	<b><i>Einfluss auf</i></b>	
	<b><i>Steifigkeit</i></b>	<b><i>Belastbarkeit</i></b>
<i>E-Modul</i>	X	
<i>Formänderungsweg</i>		X

---

<i>Geometrie</i>	X	X
<i>Blechdicke</i>	X	X
<i>Verfestigung</i>		X
<i>Eigenspannungen</i>	X	X

---

*Tabelle 8-1: potentielle Einflussgrößen auf Steifigkeit und Belastbarkeit*

Nachfolgend werden die genannten Einflussgrößen im Einzelnen beschrieben.

### **E-Modul**

Wie in den Grundlagen beschrieben, ist der E-Modul die Werkstoffgröße, welche die Steigung der Kraft-Dehnungskurve beschreibt und somit von zentraler Bedeutung für die Steifigkeit ist. Bei zwei identischen Versuchskörpern wird der mit höherem E-Modul auch die höhere Steifigkeit aufweisen. Ein direkter Zusammenhang zur Belastbarkeit besteht nicht. Durch den Einfluss der Vorverformung auf den E-Modul werden keine Einflüsse auf den Unterschied zwischen einzelnen Proben erwartet. Dies begründet sich darin, dass der E-Modul zwar bereits bei kleinen Umformungen um etwa 10 % abfallen kann, dann allerdings nur noch sehr gering auf weitere Umformungen reagiert [BLEC03].

### **Formänderungsweg**

Dadurch, dass sich durch ein im Umformprozess steigendes Verhältnis von  $d\varphi_2/d\varphi_1$  die Grenzformänderung erhöht (Kapitel 2) können sich positive Effekte für die Belastbarkeit ergeben. In idealen Fällen kann weiter umgeformt werden.

### **Geometrie**

Die Geometrie hat großen Einfluss auf Steifigkeit und Belastbarkeit. Besonders die Erhöhung des Abstands zwischen Flächenschwerpunkt und der neutralen Faser bzw. der Achse des Momentenangriffs verbessert die Werte. Siehe dazu die Kapitel zum Stand der Technik. Mit den optimierten Mustern werden höhere Steifigkeiten und Belastbarkeiten der Proben erwartet.

## **Blechdicke**

Auch die Blechdicke ist eine wichtige Stellgröße für die Steifigkeit und Belastbarkeit eines Bauteils. Mit den abnehmenden Wandstärken sinken auch Steifigkeit und Belastbarkeit. Diese Abhängigkeit ist für den einfachen Fall der Biegebelastung bereits in Formel 2.9 dargestellt, bei der die Blechdicke in dritter Potenz in das Flächenträgheitsmoment eingeht. Somit ist davon auszugehen, dass die Tiefziehprobe des kleinen Dehnkreises aufgrund der geringsten Ausdünnungen die besten Voraussetzungen hat und steigende Nebenformänderung wie auch der größere Dehnkreis sich negativ auswirken werden.

## **Verfestigung**

Zunehmende Verfestigung erhöht die Fließgrenze, weshalb sie sich auf die Belastbarkeit positiv auswirkt. Allerdings geht sie mit steigender Ausdünnung und damit mit geringeren Blechdicken einher – letztlich mit geringerer Steifigkeit. Weil die Fließkurve nur für den einachsigen Zug gültig ist, muss der Vergleichsumformgrad  $\varphi_V$  verwendet werden, welche dreiachsige Verformungen betrachtet. Diese steigt mit zunehmender Blechbreite und höherem Dehnkreis, wie in Abbildung 8-2 gezeigt. Vergleichsumformgrad und Verfestigung korrespondieren: mit einem hohen  $\varphi_V$ -Wert geht auch eine hohe Verfestigung einher.

## **Eigenspannungen/Rückfederungen**

Durch die Umformung werden elastische Spannungen im Bauteil erzeugt, die nach Umformende zum Teil durch Rückfederung (=Geometrieänderung) abgebaut werden können, soweit dies die Bauteilgeometrie zulässt. Nicht freigesetzte Spannungen können die Belastbarkeit eines Bauteils verändern. Allerdings wird kein Einfluss auf die Bauteilsteifigkeit erwartet.

### **8.5.1 Torsionsprüfung**

Abbildung 8-18 zeigt die aus der Torsionsprüfung der unversickten vorverformten Proben resultierenden Kurven. Als Referenz ist eine ebene unverformte Probe gezeigt. Für diese Darstellung sind die Achsen auf die für die Auswertung relevanten Bereiche

beschränkt. Ein Diagramm mit den vollständigen Kurvenverläufen ist im Anhang (Abbildung 11-2, Abbildung 11-3) hinterlegt. In Relation zur ebenen Probe sind die Vorverformungsgeometrien ca. 2000% steifer. Die Kurven zeigen sehr starke Ähnlichkeit. Die Tiefziehproben 240 weisen im Versuch höhere Prüflasten als Reaktion auf die eingebrachten Winkel auf. Diese Proben sind aufgrund der höheren Blechdicken etwas steifer.

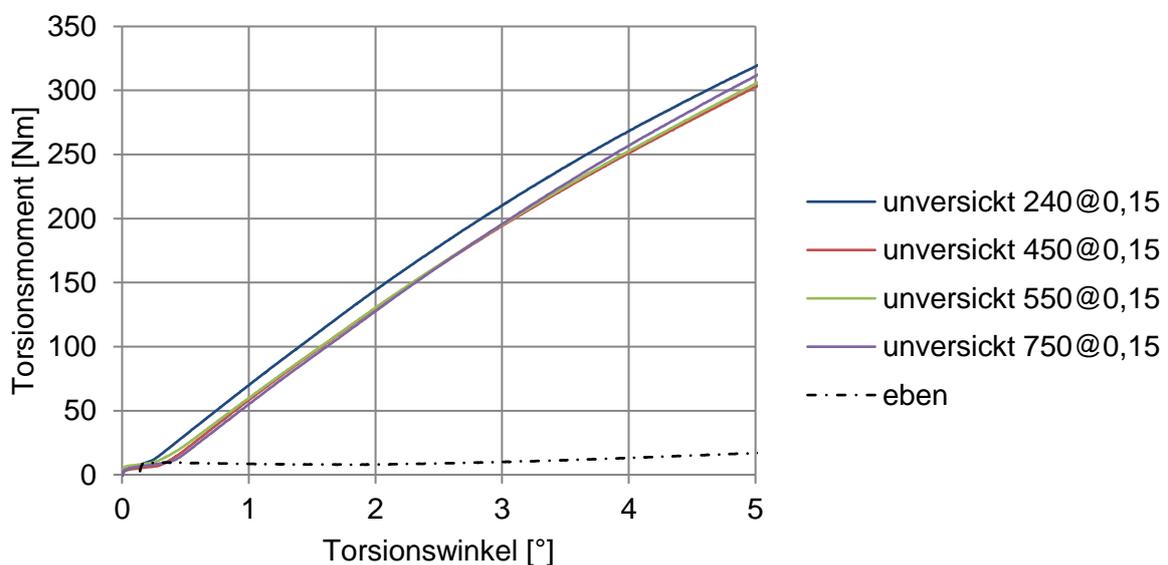


Abbildung 8-18: Prüfkurven vorverformter Torsionsproben

### Steifigkeit

Die folgende Abbildung 8-19 links zeigt die Steifigkeitskennwerte der torsionsgeprüften vorverformten Blechproben.

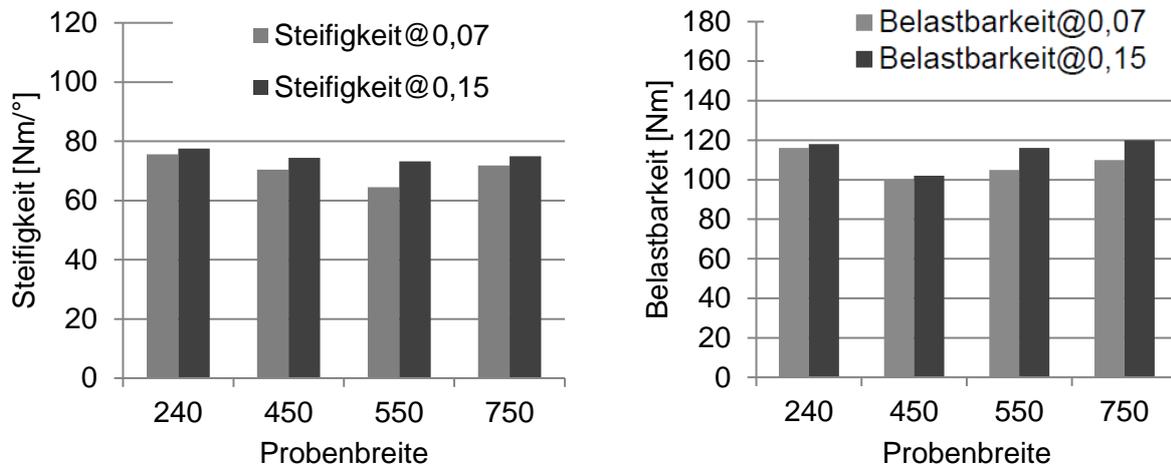


Abbildung 8-19: links: Torsionssteifigkeit; rechts: Torsionsbelastbarkeit

Die Steifigkeitswerte liegen im Bereich von 65 – 75 Nm/°. Die Absolutwerte nehmen von der Probenbreite 240 auf 750 ab. Dies ist durch die abnehmende Blechdicke bedingt und entspricht den Erwartungen. Ein höherer Hauptumformgrad beeinflusst die Steifigkeit negativ, da dadurch die Blechdicke reduziert wird. Ein höherer Nebenumformgrad beeinflusst die Steifigkeit positiv, obwohl die Blechdicke reduziert wird. Durch eine Zunahme des Nebenumformgrades wird im Prüfbereich die Dehnungsverteilung homogener, die Geometrie ist also symmetrischer vorverformt. Auftretende Rückfederungen verteilen sich dadurch gleichmäßiger.

### Belastbarkeit

Die Abbildung 8-19 rechts zeigt die Belastbarkeitskennwerte der torsionsgeprüften vorverformten Blechproben. Die Werte aller Proben liegen zwischen ca. 100 Nm und 120 Nm. Alle Proben des großen Dehnkreises sind durch höhere Kennwerte gekennzeichnet als die des niedrigen.

Mit größerer Blechdicke nimmt die Belastbarkeit des Gesamtbauteils zu, da der belastbare Querschnitt größer wird. Mit zunehmenden Haupt- und Nebenumformgraden wird die Belastbarkeit positiv beeinflusst, da die Streckgrenze durch die höhere plastische Umformung weiter nach oben verschoben wird. Bei der Probenbreite 240 überwiegt der Effekt der höheren Blechdicke. Für die Probenbreiten

450-750 liegt aufgrund der Vorverformung eine geringere Blechdicke bei zunehmender Verfestigung vor. Letztere kompensiert bei den Proben 750 die Ausdünnung.

### 8.5.2 Biegeprüfung

Abbildung 8-20 zeigt die aus der Biegeprüfung der unversickten vorverformten Proben resultierenden Kurven des Dehnkreises 0,15. Als Referenz ist eine ebene unverformte Probe gezeigt, deren Steifigkeit deutlich geringer ist. Für die Darstellung sind die Achsen auf die für die Auswertung relevanten Bereiche beschränkt. Ein Diagramm mit den vollständigen Kurvenverläufen ist im Anhang (Abbildung 11-4, Abbildung 11-5) hinterlegt.

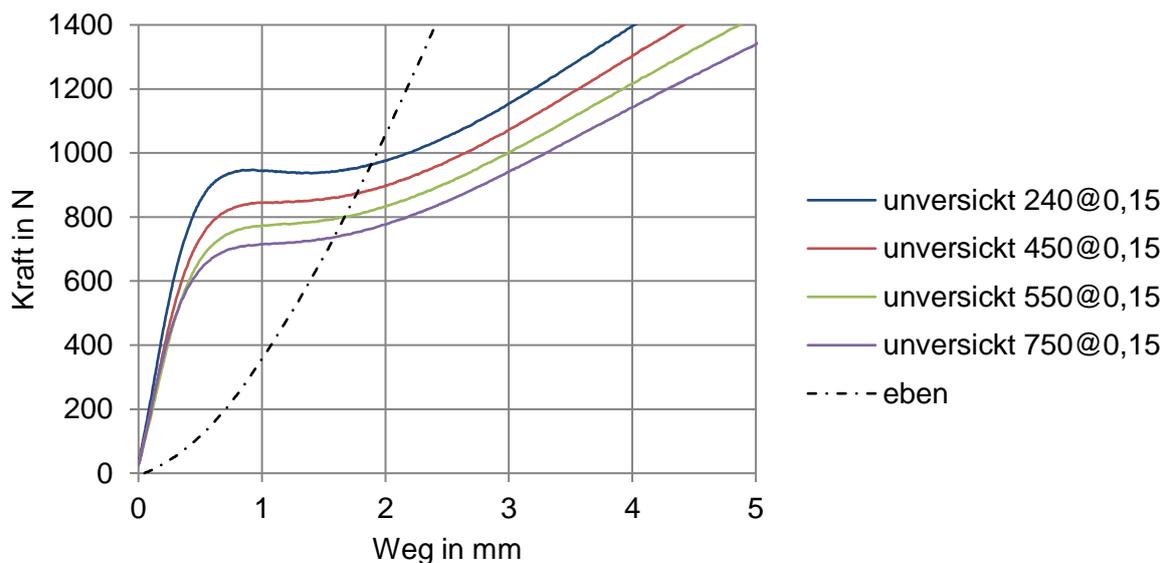


Abbildung 8-20: Prüfkurven vorverformter Biegeproben des Dehnkreises 0,15

### Steifigkeit

Die folgende Abbildung 8-21 links zeigt die Steifigkeitskennwerte der biegegeprüften vorverformten Proben. Die steifsten Proben sind immer die tiefgezogenen 240 mm breiten Bleche. Die Tendenz abnehmender Steifigkeitskennwerte mit steigender Probenbreite ist für beide Dehnkreise sehr ähnlich. Die Proben des großen Dehnkreises sind weniger steif als die des kleinen Dehnkreises. Mit steigenden Haupt-

und Nebendehnungen, also kleiner werdender Blechdicke, wird die Steifigkeit negativ beeinflusst. Die Reduktion der Blechdicke hat hier einen überragenden Einfluss. Die Zusammenhänge zwischen den im Abschnitt Steifigkeit gezeigten Faktoren sind für die Betrachtung der Belastbarkeit (siehe Abbildung 8-21 rechts) ebenso gültig. Die wesentliche Beeinflussung der vorverformten Biegeproben kommt also aus der Blechdicke, welche die Membranspannungen aufnehmen muss. Die Verschiebung der Streckgrenze, die sich in einer höheren Belastbarkeit äußern müsste, wird durch die Blechdickenabnahme überkompensiert.

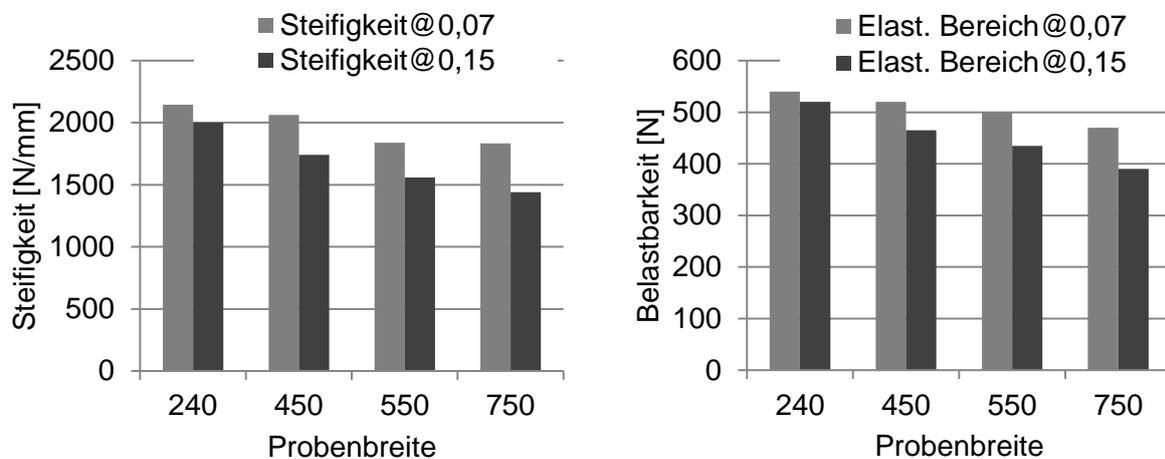


Abbildung 8-21: links: Biegesteifigkeit; rechts: Biegebelastbarkeit

## 8.6 Beurteilung der Steifigkeiten optimierter Sickenmuster

### Biegung

Abbildung 8-22 zeigt exemplarisch an tiefgezogenen vorverformten und versickten Proben des Dehnkreises 0,07 die Versteifungswirkung des optimierten Sickenmusters. Als Referenz ist die Prüfkurve der ebenen unverformten Probe eingezeichnet. Diagramme mit den Prüfkurven von vorverformen bzw. versteiften Proben beider Dehnkreise und aller Dehnpfade sind im Anhang in Abbildung 11-4 und Abbildung 11-5 abgelegt. Zu erkennen sind die deutlich unterschiedlichen Kraftniveaus der Proben, die Versteifungswirkung durch die Vorverformung mit der Kugelgeometrie des Nakajima-Stempels sowie die Versteifungswirkung des Sickenmusters. Die Auswertung der Kennwerte ist in Abbildung 8-23 dargestellt. Die Kennwerte resultieren

aus der grafischen Auswertung der im Anhang gezeigten Prüfkurven. Beide Kennwerte sind durch die Versteifung mit dem optimierten Muster für alle Probengeometrien mehr als verdoppelt, obwohl die Ausgangsgeometrie als druckbelastete Kuppel bereits für den Lastfall gut aufgebaut ist. Das optimierte Versteifungsmuster zeigt also den gewünschten Effekt. Die Proben geringer Blechdicke (großer Dehnkreis bzw. größere Probenbreite) sind durch etwas geringere Kennwerte gekennzeichnet. Auch hier überwiegt die Ausdünnung die Wirkung der Verfestigung.

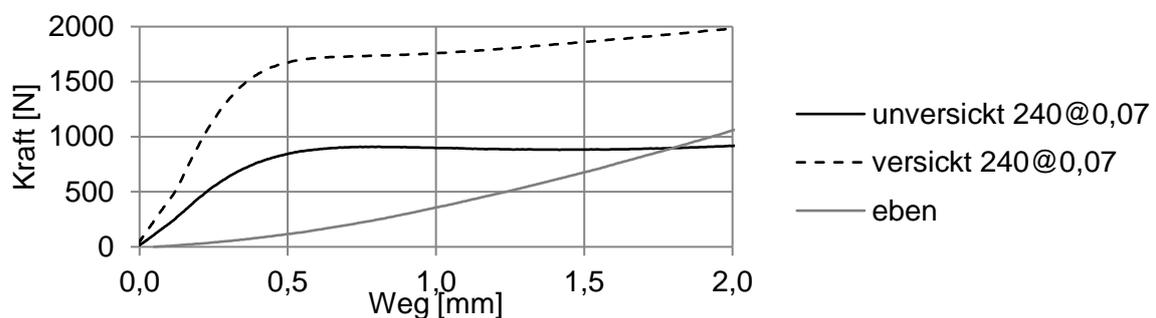


Abbildung 8-22: Kraft-Weg-Verläufe vorverformter bzw. versickter Biegeproben

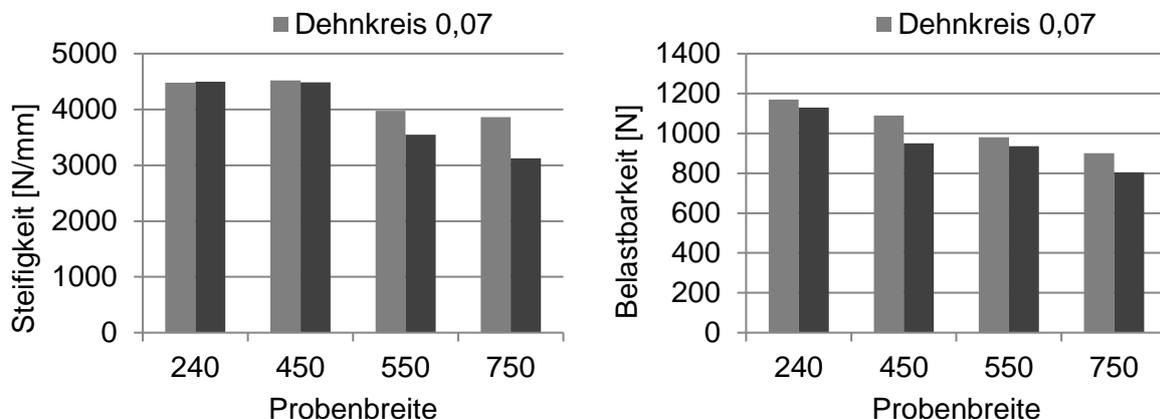


Abbildung 8-23: Steifigkeit (links) und Belastbarkeit (rechts) versickter Biegeproben

## Torsion

Abbildung 8-24 zeigt exemplarisch an tiefgezogenen vorverformten und versickten Proben des Dehnkreises 0,15 die Versteifungswirkung. Als Referenz ist die Prüfkurve der ebenen unverformten Probe eingezeichnet. Diagramme mit den Prüfkurven von

vorverformten bzw. versteiften Proben beider Dehnkreise und aller Dehnpfade sind im Anhang in Abbildung 11-2 und Abbildung 11-3 abgelegt.

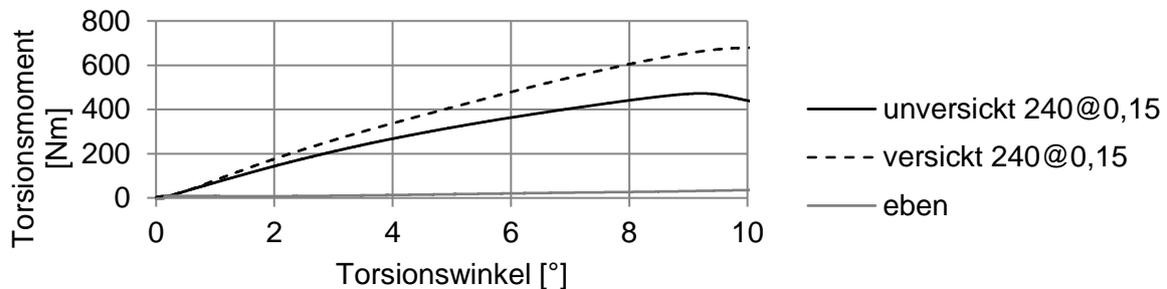


Abbildung 8-24: Moment-Winkel-Verläufe vorverformter bzw. versickter Torsionsproben

Zu erkennen sind die deutlich unterschiedlichen Momentenverläufe während der Prüfung der Proben, die Versteifungswirkung durch die Vorverformung mit der Kugelgeometrie des Nakajima-Stempels im Vergleich zur ebenen Probe sowie die Versteifungswirkung des Sickenmusters. Durch die Kugelgeometrie der vorverformten Proben wird bereits eine deutliche Versteifung erreicht. Die versickten Proben sind belastbarer und steifer (Abbildung 8-25).

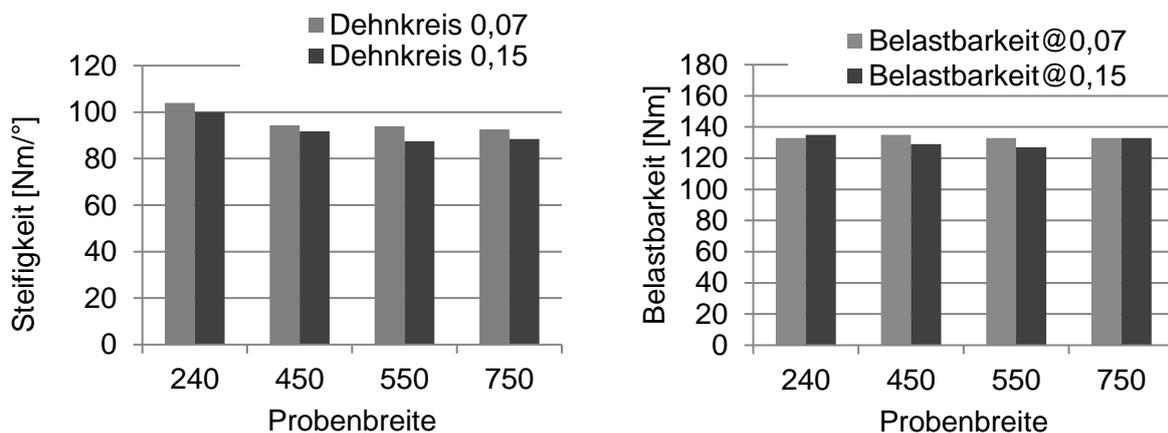


Abbildung 8-25: Steifigkeit (links) und Belastbarkeit (rechts) versickter Torsionsproben

Mit geringerer Blechdicke (großer Dehnkreis bzw. größere Probenbreite) nehmen die Steifigkeitskennwerte ab. Die Proben des großen Dehnkreises sind gleich oder etwas weniger belastbar als die des kleinen Dehnkreises. Die Unterschiede sind sehr gering. Die Verbesserungen durch die Versickungen liegen für die Steifigkeit zwischen 120

und 145 % bezogen auf die vorverformten Proben. Das optimierte Sickenmuster kann das Bauteil nicht in vergleichbarer Höhe wie das Biegemuster versteifen. Hauptursache dafür ist das in Kapitel 8.4.2 beschriebene Verhalten beim lokalen Versagen des Prüfkörpers im nicht versickten Bereich. Der Versagensbereich liegt knapp am Ende des Sickenmusters. Dieser Bereich wird durch den Sickenumformprozess gering beeinflusst, hier treten auch nur geringe Verfestigungseffekte auf. Das Versagensverhalten und die geringeren Versteifungseffekte zeigen auf, dass durch eine suboptimale Umsetzung von Optimierungsergebnissen Leichtbaupotentiale nicht gehoben werden.

## **8.7 Simulationsergebnisse**

### **8.7.1 Vergleich verschiedener Umformsimulationsansätze mit experimentellen Ergebnissen**

#### **Inkrementelle Simulation**

Die inkrementelle Simulation bildet den Prozessablauf sehr stark angelehnt an das Experiment ab. Zunächst wird das Vorverformen inkl. des Umformens der Sperrsicke simuliert. Die berechnete Vorverformungsgeometrie wird unter Beibehaltung aller Ergebnisse in die Prägesimulation importiert. Die folgenden Abbildung 8-26 und Abbildung 8-27 zeigen exemplarisch für die Blechbreiten 240 und 750 des kleinen Dehnkreises die Simulationsergebnisse der Vorverformung im Vergleich mit den experimentell ermittelten Werten auf der Blechoberfläche. Die in der Simulation berechneten Vorverformungen stimmen für Proben am Dehnkreis 0,07 gut mit den Ergebnissen der Experimente überein. Bei höhere Vorverformung wird die Ausdünnung in Abhängigkeit von Haupt- und Nebenumformgrad etwas zu gering berechnet. Beim Prägeprozess werden die Orte höchster Ausdünnungen in der Simulation gut wiedergegeben. Die Ausdünnungswerte sind etwas zu gering wiedergegeben siehe linkes Diagramm.

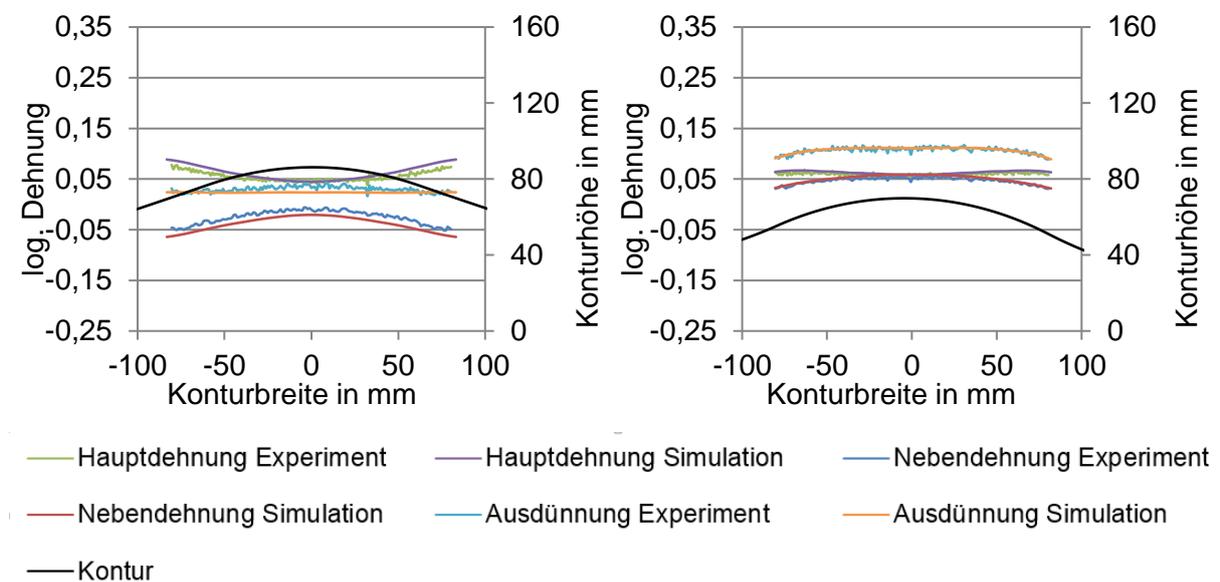


Abbildung 8-26: Vorverformen: Abgleich zwischen Experiment und inkrementeller Simulation (links: Tiefziehprobe 240; rechts Streckziehprobe 750)

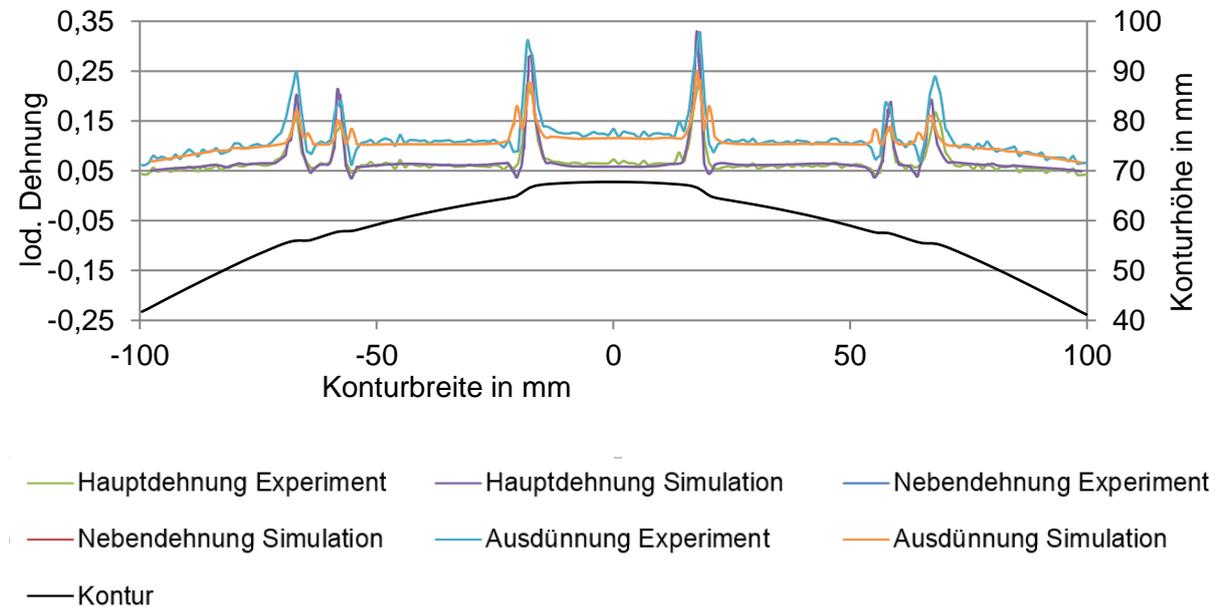


Abbildung 8-27: Prägen: Abgleich zwischen Experiment und inkrementeller Simulation (Streckziehprobe, Prägung Biegunsmuster)

## Inverse Simulation

Die Ergebnisse der inversen Simulationen zeigt Abbildung 8-28 an den Beispielen der Vorverformung (links: Tiefziehen; rechts: Streckziehen) und der Prägung des Biegungsmusters in eine streckgezogene Probe.

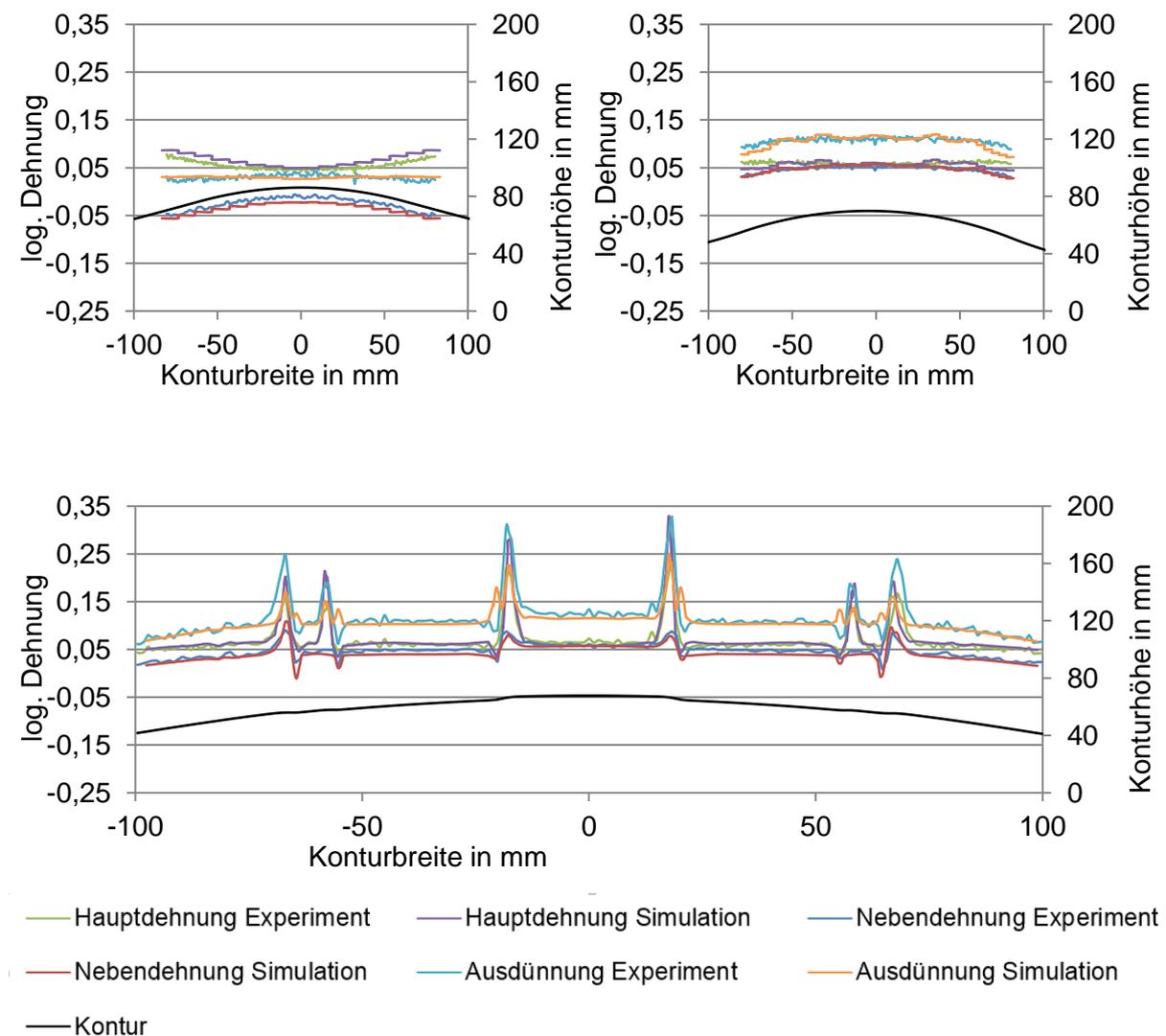


Abbildung 8-28: oben: Vorverformen: Abgleich zwischen Experiment und inverser Simulation (links: Tiefziehprobe 240; rechts Streckziehprobe 750); unten: Prägen: Streckziehen + Prägung des Biegemusters

Der inverse Solver von Pam-Stamp berechnet Dehnungen ausschließlich auf Blechebene. Für den Vergleich der beim Prägen auftretenden Dehnungen sind deshalb die experimentellen Werte im Formänderungsanalysesystem auf die

Blechmitte projiziert. Die in den inversen Simulationen berechneten Vorverformungen stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Experimente überein. Bei der inversen Berechnung der Prägung und Vorverformung in einem Schritt werden die Hauptdehnungen an Prägeradien zu hoch und die Ausdünnungen zu niedrig berechnet. Zwischen experimentell und simulativ ermittelten Ausdünnungswerten ist an den Prägeradien ein konstanter Versatz von etwa  $\varphi_3 = 0,06 - 0,08$  vorhanden. Die Steifigkeitsbewertung müsste auf Basis dieser Simulationen zu hoch ausfallen.

### 8.7.2 Steifigkeitssimulation mit verschiedenen Eingangsdaten

Auf Basis der in Kapitel 8.7.1 vorgestellten Simulationsergebnisse werden ausgewählte Steifigkeitssimulationen dargestellt. Abbildung 8-29 zeigt am Beispiel der versteiften streckgezogenen Biegeprobe den Einfluss der Modellierung und Umformsimulation auf die Berechnung der Kraft-Weg-Kurven. Die Steifigkeitsberechnungen sind mit dem Simulationsprogramm Abaqus unter Modellierung der Werkstoffeigenschaften erstellt. Die Abbildung beinhaltet:

- die experimentell ermittelte Steifigkeitskurve („EXP“)
- drei simulativ ermittelte Kurven für
  - o die ideale CAD Geometrie mit konstanter Ausgangsblechdicke („SIM\_ideal“)
  - o die auf Basis inkrementeller Umformsimulation ermittelter Geometrie inkl. Blechdicken und Dehnungsverteilung („SIM\_inkrementell“)
  - o die auf Basis inverser Umformsimulation ermittelter Geometrie inkl. Blechdicken und Dehnungsverteilung („SIM\_invers“)

Keine der simulierten Kurven trifft den experimentell ermittelten Kurvenverlauf exakt. Die höchste Steifigkeit erreicht das auf Basis der idealen CAD-Daten mit der Dicke des unverformten Blechs berechnete Modell. Die inverse Simulation liefert etwas niedrigere Steifigkeitswerte als das Idealmodell mit konstanter Blechdicke, allerdings zu hohe im Vergleich zur Realität. Die Steifigkeitsbewertung auf Basis der inkrementellen Simulationsergebnisse trifft die Steifigkeit des Experiments sehr gut.

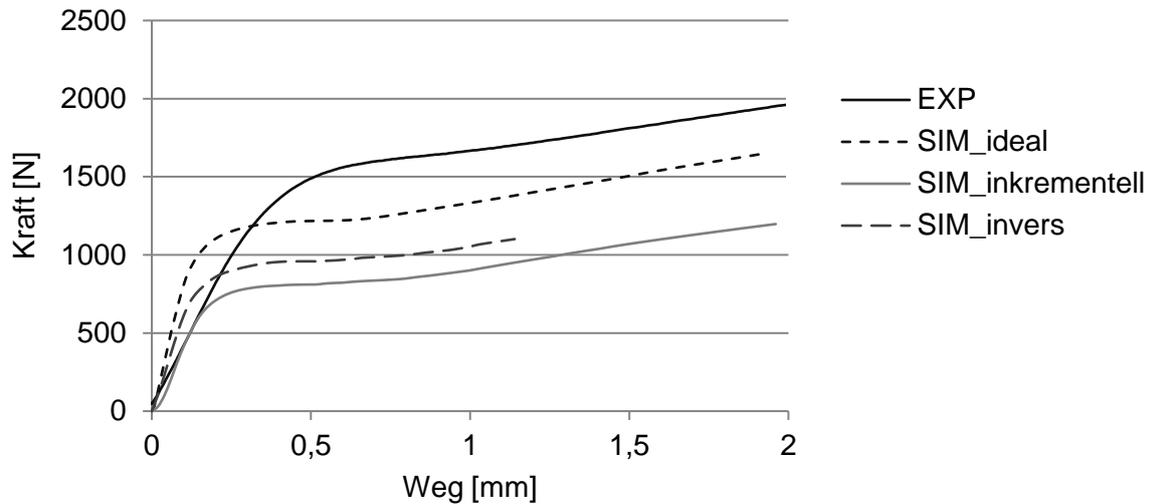


Abbildung 8-29: Kraft-Weg-Kurven von Biegeexperiment und Simulationen für Probe 750@0,07, versteift (SIM\_ideal: auf Basis der CAD-Geometrie; SIM\_inkrementell: auf Basis von Geometrie und Dehnungen aus inkrementeller Sim.; SIM\_invers: auf Basis von Geometrie und Dehnungen aus inverser Sim.)

Die Belastbarkeiten geben alle Modelle als zu gering an. Dafür sind folgende Einflüsse zu nennen:

- Umformgrade werden zu gering berechnet. Dadurch liegt eine geringere Vergleichsumformung und Verfestigung vor. Die Streckgrenze wird weniger weit nach oben verschoben.
- Durch das vorbereitende Freischneiden der Prüfkörper werden Spannungen freigesetzt, die in Auffederung der Bauteile resultieren. Beim Einspannen der Prüfkörper in die Prüfstände werden die Bleche durch die Form der Klemmbacken in die Kugelgeometrie der ursprünglichen Vorverformung gezwungen. Dadurch werden Spannungen (wieder) eingebracht.

Dieses Phänomen wird exemplarisch an einer Streckzieh-Probe simuliert: Dafür wird nach der Vorverformungsberechnung in einem Abaqus-Modell das Blech auf den Prüfkörper ohne Spannungsabbau reduziert. Dieser Prüfkörper wird dann der in der Arbeit verwendeten Steifigkeitssimulation unterzogen. Die Abbildung 8-30 zeigt gegenüberstellend, dass durch Berücksichtigung der Spannungen aus dem Umformprozess offensichtlich deutlich höhere Kurvenverläufe in der Steifigkeitsprüfung zu erwarten sind. Für die Auslegung

und Prognose von Bauteilen bzgl. realem Lastverhalten bzw. Prognose bzgl. Belastbarkeit ist dieser Zusammenhang relevant.

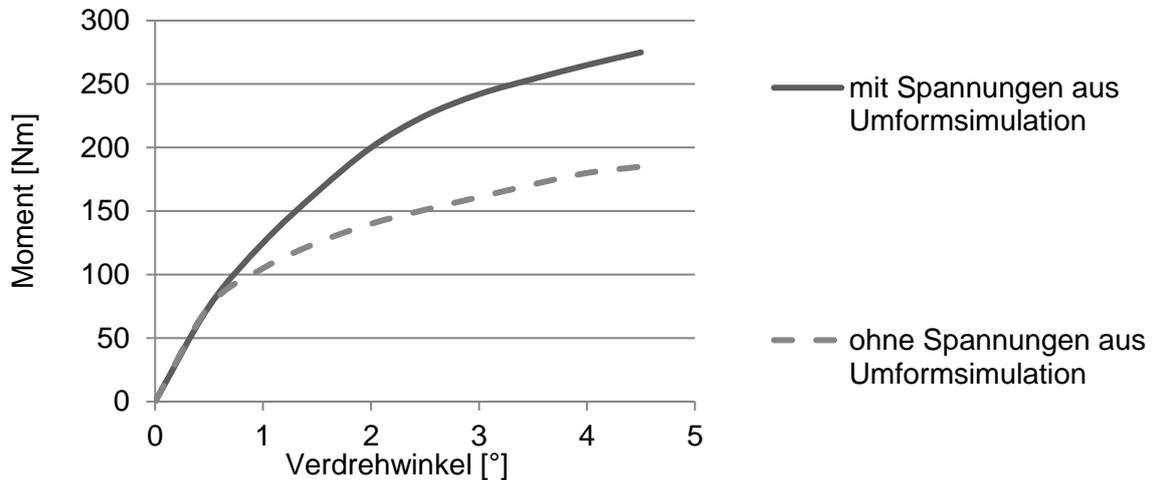


Abbildung 8-30: Gegenüberstellung von Steifigkeitsprüfung mit und ohne Rückfederung/Eigenspannung

### 8.8 Bewertung der Simulationsergebnisse

Die Umformsimulation kann für den verwendeten Werkstoff gute Ergebnisse hinsichtlich der Dehnungsprognose liefern. Die in der Simulation verwendete unter konstanten Dehnungsverhältnissen ermittelte Grenzformänderungskurve kann für die Bewertung des Versagens nicht herangezogen werden.

Die Bewertung der Steifigkeit führt hinsichtlich der qualitativen Bewertbarkeit zu guten Ergebnissen. Die Steifigkeitsbewertung kann sehr gut auf Basis der inkrementellen Simulationen durchgeführt werden. Die Belastbarkeit wird generell für die vorgestellten Beispiele zu gering wiedergegeben.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde die Versteifungswirkung von Sickenmustern in Bezug auf die Vorverformungsgeschichte von Blechbauteilen untersucht. Ebenso wurden die maximal erreichbaren Tiefen von Einzelsicken in unterschiedlich vorverformten Blechen bewertet. Dazu wurden konzipiert und umgesetzt:

- ein modulares Werkzeug zum Vorverformen mit Nakajima-Geometrien
- mehrere Prägeeinheiten zum Umformen von Einzelsicken und Sickenmustern
- optimierte Sickenmuster für die Lastfälle Biegung und Torsion
- Prüfstände zur experimentellen Ermittlung von Steifigkeit und Belastbarkeit in den Lastfällen Biegung und Torsion

Es konnte gezeigt werden, dass die Umformgeschichte von Bauteilen deutlichen Einfluss auf die Steifigkeit und auf weitere Umformprozesse hat. Mit zunehmendem Vergleichsumformgrad sinkt meist die Steifigkeit von Bauteilen, die Belastbarkeit kann ansteigen, sofern der Effekt der Blechdickenreduktion den der Streckgrenzenschiebung nicht dominiert. Beim Prägen von Sicken liegen überwiegende „plane-strain“-Beanspruchungen vor. Wird dem Prägevorgang ein Umformprozess mit Dehnpfaden im Bereich des Tiefziehens oder des einachsigen Zuges vorgelagert, kann in dem nachgelagerten Prozessschritt ein Versagenspunkt weit jenseits der konventionell ermittelten Grenzformänderungskurve erreicht werden. Für vorgelagerte Streckziehbeanspruchung tritt das Versagen vor dem Erreichen der konventionellen FLC auf. Damit können bekannte Phänomene auch für den Prägevorgang bestätigt werden. Die Bewertung der Umformvorgänge mit der konventionellen Grenzformänderungskurve ist nicht zielführend. Ansätze wie in [VOLK12] beschrieben liefern hier gute Unterstützung bei einer verbesserten Bewertung und Potentialausnutzung. Wird bei der Auslegung des Bauteils hinsichtlich Geometrie und Umformprozess der meist nichtlineare Dehnverlauf aus Vorverformen und Sickenprägen berücksichtigt, können bei optimaler Auslegung tiefere Sickenstrukturen geprägt werden. Dadurch kann eine bessere Versteifungswirkung erreicht werden. Da gegenwärtig im industriellen Alltag die Prozessbewertung und Bauteilauslegung meist

noch auf Basis von einfachen Grenzformänderungsdiagrammen erfolgt, wird Leichtbaupotential nicht genutzt.

Die Gegenüberstellung von Versuch und Simulation im Hinblick auf Bauteileigenschaften zeigt, dass Bauteilsteifigkeiten simulativ gut abgebildet werden können. Die Übereinstimmung mit den gemessenen Werten ist hinreichend genau. Die experimentell ermittelten Bauteilbelastbarkeiten sind deutlich höher als die auf Basis der Simulationen ermittelten Eigenschaften. Dies ist auf die hinterlegten Werkstoffmodelle und Abbildung der Rückfederung zurückzuführen. Bei einer exakteren Prognose der Versagensgrenzen und der Rückfederung wäre eine optimale Bauteilauslegung möglich. Mit den verwendeten Ansätzen bleiben Leichtbaupotentiale hinsichtlich Belastbarkeit ungenutzt. Grundsätzlich ist das Umformen von Sickenmustern immer in Bauteilbereiche anzustreben, die nicht durch Streckziehen oder einachsigen gleichmäßigen Zug vorverformt sind, damit dann die Sickenmuster zum Zwecke höherer Steifigkeit mit größeren Sickentiefen gestaltet werden können.

Die Ergebnisse der verwendeten Umformsimulationen können in Hinblick auf die gesamte Prozesskette wie folgt zusammengefasst werden: je genauer das Ergebnis der Umformsimulation, desto besser die nachfolgende simulative Bewertung der Bauteileigenschaften. Der auch verwendete inverse Simulationsansatz liefert vor dem Hintergrund der kurzen Rechenzeiten im Vergleich zu der konventionellen Umformsimulation gute Ergebnisse hinsichtlich Steifigkeitsbewertung. Diese Vorgehensweise kann im Prozess der Bauteilauslegung und –gestaltung in den frühen Phasen gut eingesetzt werden. Für die genaue Abbildung von Versagensgrenzen im Umformprozess und des Bauteilversagens liefert der inverse Ansatz allerdings schlechtere Ergebnisse als eine aufwendigere inkrementelle Simulation. Letztere sollte immer Basis für nachfolgende Bewertungsschritte sein.

Die Grundgeometrie des Kugelausschnittes weist hohe Steifigkeits- und Belastbarkeitskennwerte auf. Die umgesetzten optimierten Geometrien versteifen die Kugelgeometrie des Vorverformungsprozesses in den zu Grunde gelegten Lastfällen deutlich. Dies zeigt das Potential für Steifigkeitserhöhungen im Sinne des

Leichtbaugedankens. Abbildung 9-1 zeigt Wirksamkeit des Sickenmusters „Biegung“. Die Steifigkeiten der Proben werden mehr als verdoppelt.

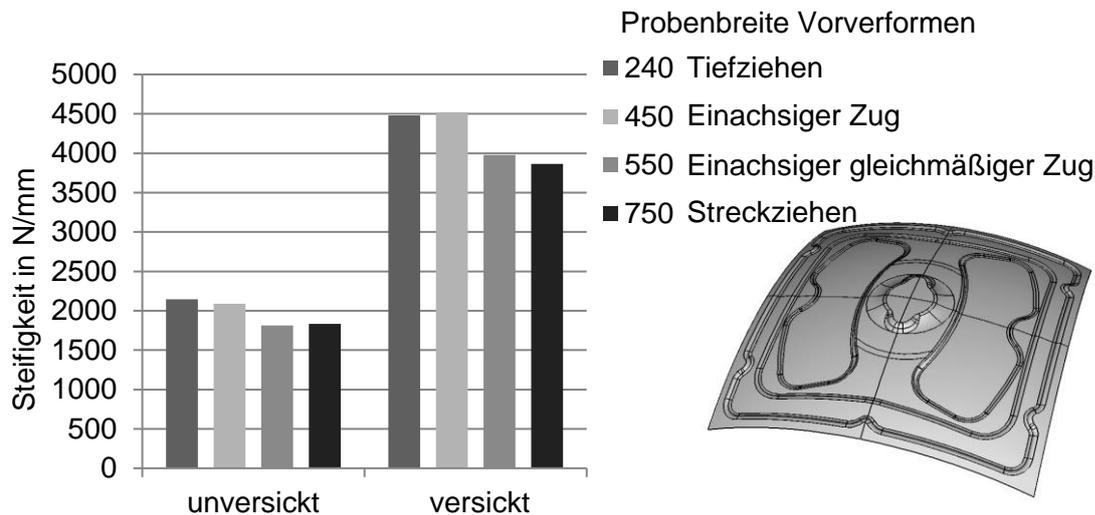


Abbildung 9-1: links: Wirksamkeit des Sickenmusters „Biegung“ im Vergleich zu unversickter Kugelgeometrie; rechts: Sickenmuster „Biegung“

Bei der Prüfung der Torsionsproben zeigt sich, dass das Bauteilversagen lokal im Bereich neben dem Sickenmuster stattfindet. Dieses Muster bewirkt auch hier eine enorme Versteifungswirkung. Durch eine verbesserte Gestaltung des Sickenmusters bis in den Spannbereich des Prüfstandes hinein könnten deutlich bessere Kennwerte erreicht werden. Letztlich gilt auch für Sickenmuster die bei [OEHL72] beschriebene Erkenntnis: passen Sicke und Belastungsrichtung nicht optimal zusammen, fallen die Steifigkeitswerte ab. Für die praktische Anwendung der Optimierungsverfahren und Umsetzung in Bauteilen deshalb sind folgende Grundsätze einzuhalten:

- genaue Kenntnis der zu berücksichtigenden Lastfälle
- korrekte Abstraktion der Lastfälle für die Optimierungssimulation
- konsequentes und genaues Vorgehen bei der Umsetzung der Optimierungsergebnisse in Bauteilgeometrien
- vollständige virtuelle Prüfung vor Abbildung in der Praxis
- bei virtueller Bauteilbewertung führt eine Verwendung von Idealgeometrien mit konstanter Blechdicke zu überhöhten Kennwerten

Als weiterführender Schritt sollte die Dauerbelastbarkeit von mit Sickenmustern versteiften Bauteilen, bei denen mit nichtlinearen Dehnpfaden die konventionellen Versagensgrenzen deutlich überschritten wurden, bewertet werden.

Grundsätzlich sollte die Vorhersage des Versagens für nichtlineare Dehnpfade deutlich stärker in den Vordergrund treten und in gängige Simulationsprogramme integriert werden. Dabei sollte eine ganzheitliche und durchgängige Simulationskette beginnend bei der Umformsimulation bis hin zur Simulation von Bauteileigenschaften entwickelt werden.

## 10 Verzeichnisse

### 10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN8580] .....	4
Abbildung 2-2:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm [PIET00].....	6
Abbildung 2-3:	Grenzformänderungsdiagramm / Forming Limit Diagram [TSCH08] .....	10
Abbildung 2-4:	FLC mit Berücksichtigung der Formänderungsgeschichte [HASE78] .....	11
Abbildung 2-5:	Tiefziehen im Erstzug [PIET00].....	13
Abbildung 2-6:	Versagensarten beim Tiefziehen [PIET00].....	14
Abbildung 2-7:	Prinzipdarstellung des einfachen Streckziehens [LANG90]	15
Abbildung 2-8:	Prinzipdarstellung des Tangentialstreckziehens [LANG90].	16
Abbildung 2-9:	Versagensarten beim Streckziehen [LANG90].....	17
Abbildung 2-10:	Auftretende Spannungen beim Hohlprägen [PETZ70].....	19
Abbildung 2-11:	Hohlprägen: Werkzeugausführungen (links), Verfahrensvarianten (rechts); [WIDM84].....	20
Abbildung 2-12:	Prinzipdarstellung des Rollsickens (links) und des Prägesickens (rechts) [PETZ91] .....	21
Abbildung 2-13:	Geometrische Bezeichnungen an einer Trapezsicke [EMMR05] .....	22
Abbildung 2-14:	Verschiedene Sickentypen [LANG90].....	23
Abbildung 2-15:	Geometrische Grundlagen zur Berechnung des Flächenträgheitsmoments einer Rechtecksicke .....	25
Abbildung 2-16:	Verschiedene Belastungsrichtungen an einer offenen Halbrundsicke [OEHL72].....	27
Abbildung 2-17:	Beispiel für die Vermeidung trägheitsbevorzugter Achsen [OEHL72] .....	28
Abbildung 2-18:	Querschnitt einer Halbrundsicke [LANG90] .....	29

Abbildung 2-19:	Sickenbilder nach Oehler [OEHL70] .....	31
Abbildung 2-20:	Vermeidung bevorzugter Trägheitsachsen am Beispiel der Rückwandversteifung von Containern [OEHL72] .....	32
Abbildung 4-1:	Werkzeug zum Vorverformen .....	40
Abbildung 4-2:	links: Gesamtansicht Werkzeug zum Prägen, rechts: Detail .....	41
Abbildung 4-3:	Konturen des mittleren Stempelinleger des Prägewerkzeugs .....	42
Abbildung 4-4:	Prägeinheit "Einzelsicke"; links: Matrize mit drei Einlegern; rechts: Prägestempelstempel mit einem Prägeelement. Abmessungen je 160x160 mm.....	42
Abbildung 4-5:	Prägemuster „Biegung“, optimiert in Optistruct; Abmessungen je 160x160 mm.....	43
Abbildung 4-6:	Modellaufbau OptiStruct, Lastfall Biegung .....	44
Abbildung 4-7:	Prägemuster „Torsion“, optimiert in Tosca.Structure.Bead .	44
Abbildung 4-8:	Prüfstand Biegung .....	45
Abbildung 4-9:	Belastungskörper Biegung .....	46
Abbildung 4-10:	Torsionsprüfstand .....	46
Abbildung 4-11:	Winkelunterschied Universalprüfmaschine – Winkelsensor	47
Abbildung 4-12:	Klemmbacken und vorverformte Probe.....	48
Abbildung 4-13:	Standard-Punktmuster mit Zwischenabständen von 3 mm, 2 mm und 1 mm bei Punktdurchmessern von 1,5 mm, 1,0 mm und 0,5 mm (v.l.n.r) .....	49
Abbildung 5-1:	Schliffbilder des Werkstoffs DC04.....	50
Abbildung 5-2:	Fließkurve des Werkstoffs DC04, extrapoliert mit Kombination aus Hocket-Sherby und Hollomon.....	51
Abbildung 5-3:	Grenzformänderungskurve des verwendeten Werkstoffs DC04.....	52
Abbildung 5-4:	Vorverformungskonzept .....	53
Abbildung 6-1:	Versuchsplan .....	54

Abbildung 7-1:	Probenrutschen (Markierung) während der Prüfung .....	58
Abbildung 7-2:	Darstellung der grafischen Auswertemethode zur Ermittlung von Steifigkeit und Belastbarkeit .....	59
Abbildung 7-3:	Formänderungswerte nach Prüfen bis zur Belastbarkeitsgrenze.....	60
Abbildung 7-4:	Modellaufbau für Vorverformen und Prägen .....	61
Abbildung 7-5:	exemplarische Darstellung des schnittbasierten Dehnungsvergleichs zwischen Experiment und Simulation	62
Abbildung 7-6:	Abaqus: Modellierung der Biegeprüfung .....	65
Abbildung 7-7:	Abaqus: Modellierung der Torsionsprüfung .....	65
Abbildung 8-1:	Exemplarische Darstellung des Auswertebereichs, log. Ausdünnung.....	66
Abbildung 8-2:	Dehnungen beim Vorverformen (@0,07=Dehnungswert am Dehnkreis 0,07).....	67
Abbildung 8-3:	Ergebnis der Vorverformungen .....	68
Abbildung 8-4:	Geometrische Abweichungswerte von Idealgeometrie am Dehnkreis 0,07 und 0,15. ....	69
Abbildung 8-5:	schematische Darstellung von Rückfederung und Spannungen im Blech.....	69
Abbildung 8-6:	Abweichung vorverformter Proben von Idealgeometrie, Dehnkreis 0,07 .....	70
Abbildung 8-7:	Typische Dehnungsentwicklung des Prägens mit Einzelsicke .....	71
Abbildung 8-8:	Prägen Einzelsicke: Tiefe und Ausdünnungen.....	71
Abbildung 8-9:	Nichtlineare Dehnpfade aus Vorverformung und Prägen. Versagensprognosen sind eingezeichnet .....	72
Abbildung 8-10:	links: Formänderungsdiagramm der Prägeoperation "Biegemuster" (Farben gemäß Hauptformänderung); rechts im Bild 3D-Darstellung der Hauptformänderung des Prägens .....	74
Abbildung 8-11:	Formänderungen des Biegemusters im Schnitt dargestellt .....	74

Abbildung 8-12:	links: Formänderungsdiagramm der Prägeoperation "Torsionsmuster" (Farben gemäß Hauptformänderung); rechts im Bild 3D-Darstellung der Hauptformänderung des Prägens.....	75
Abbildung 8-13:	abgewickelte Formänderungen des Torsionsmusters (y-Schnitt).....	76
Abbildung 8-14:	überzeichnete Darstellung der Probengeometrie nach der Torsionsprüfung (links; Foto (rechts).....	77
Abbildung 8-15:	Dehnungsentwicklung bei der Torsionsprüfung vorverformter Bleche .....	77
Abbildung 8-16:	Ausdünnung einer vorverformten Biegeprobe (Vorverformen + Prüfen) .....	79
Abbildung 8-17:	links: Ausdünnung beim Prüfen einer versteiften Torsionsprobe (überzeichnet); rechts: Dehnungen markanter Punkte nach der Prüfung .....	80
Abbildung 8-18:	Prüfkurven vorverformter Torsionproben .....	83
Abbildung 8-19:	links: Torsionssteifigkeit; rechts: Torsionsbelastbarkeit.....	84
Abbildung 8-20:	Prüfkurven vorverformter Biegeproben des Dehnkreises 0,15 .....	85
Abbildung 8-21:	links: Biegesteifigkeit; rechts: Biegebelastbarkeit.....	86
Abbildung 8-22:	Kraft-Weg-Verläufe vorverformter bzw. versickter Biegeproben.....	87
Abbildung 8-23:	Steifigkeit (links) und Belastbarkeit (rechts) versickter Biegeproben.....	87
Abbildung 8-24:	Moment-Winkel-Verläufe vorverformter bzw. versickter Torsionsproben .....	88
Abbildung 8-25:	Steifigkeit (links) und Belastbarkeit (rechts) versickter Torsionsproben .....	88
Abbildung 8-26:	Vorverformen: Abgleich zwischen Experiment und inkrementeller Simulation (links: Tiefziehprobe 240; rechts Streckziehprobe 750) .....	90
Abbildung 8-27:	Prägen: Abgleich zwischen Experiment und inkrementeller Simulation (Streckziehprobe, Prägung Biegungsmuster)....	90

Abbildung 8-28:	oben: Vorverformen: Abgleich zwischen Experiment und inverser Simulation (links: Tiefziehprobe 240; rechts Streckziehprobe 750); unten: Prägen: Streckziehen + Prägung des Biegemusters.....	91
Abbildung 8-29:	Kraft-Weg-Kurven von Biegeexperiment und Simulationen für Probe 750@0,07, versteift (SIM_ideal: auf Basis der CAD-Geometrie; SIM_inkrementell: auf Basis von Geometrie und Dehnungen aus inkrementeller Sim.; SIM_invers: auf Basis von Geometrie und Dehnungen aus inverser Sim.) .....	93
Abbildung 8-30:	Gegenüberstellung von Steifigkeitsprüfung mit und ohne Rückfederung/Eigenspannung .....	94
Abbildung 9-1:	links: Wirksamkeit des Sickenmusters „Biegung“ im Vergleich zu unversickerter Kugelgeometrie; rechts: Sickenmuster „Biegung“ .....	97
Abbildung 11-1:	Explosionszeichnung der Einzelsickenprägeeinheit.....	112
Abbildung 11-2:	Torsionsprüfung: Ergebnisse ebener vorverformter bzw. versteifter Proben; Vorverformung Dehnkreis 0,07 .....	113
Abbildung 11-3:	Torsionsprüfung: Ergebnisse ebener, vorverformter bzw. versteifter Proben, Vorverformung Dehnkreis 0,15 .....	113
Abbildung 11-4:	Biegeprüfung: Ergebnisse ebener, vorverformter bzw. versteifter Proben, Vorverformung Dehnkreis 0,07 .....	114
Abbildung 11-5:	Biegeprüfung: Ergebnisse ebener, vorverformter bzw. versteifter Proben, Vorverformung Dehnkreis 0,15 .....	115
Abbildung 11-6:	Prägen: angepasste Ausdünnungsberechnung .....	115

## 10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Technische Daten der hydraulischen Presse.....	39
Tabelle 4-2:	Eingesetzte FEM-Programme.....	49
Tabelle 5-1:	Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs DC04, Massenanteile .....	50
Tabelle 5-2:	mechanische Kennwerte des verwendeten Werkstoffs DC04 .....	51
Tabelle 7-1:	berechnete Kenngrößen Steifigkeit und Belastbarkeit .....	59

Tabelle 8-1:	potentielle Einflussgrößen auf Steifigkeit und Belastbarkeit	81
Tabelle 11-1:	Parameter der Umformsimulation: Vorverformen.....	116
Tabelle 11-2:	Parameter der Umformsimulation:Prägen.....	116
Tabelle 11-3:	Parameter der inversen Berechnungmodelle.....	116

### 10.3 Literaturverzeichnis

- [CHA16] Cha, W. et al.:  
Determination of the bead geometry considering formability and stiffness effect using generalized forming limit concept (GFLC), Journal of Physics (Conference Series), Vol. 734, 2016
- [CHA17] Cha, W. et al.:  
Influence of process parameters on the formability of bead stamping part using advanced models, Journal of Physics (Conference Series), Vol. 896, 2017
- [CHA19] Cha, W.:  
Formability consideration in bead optimization to stiffen deep drawn parts; Dissertation, München, Technische Universität München, 2019
- [DIN EN ISO 12004-2] DIN EN ISO 12004-2  
Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve – Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor (ISO 12004-2:2008), Beuth, Berlin 2008
- [DIN8580] DIN 8580, Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003
- [DIN8583-1] DIN 8583-1, Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003
- [DIN8584] DIN 8584, Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003
- [DIN8585] DIN 8585, Fertigungsverfahren Zugumformen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2003
- [DIN10139] DIN EN 10139, Kaltband ohne Überzug aus weichen Stählen zum Kaltumformen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2016

- 
- [DAHL93] Dahl, W.:  
Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde, Düsseldorf,  
1993.
- [EMMR05] Emmrich, D.:  
Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur Gestaltung von  
Sicken für biegebeanspruchte Leitstützstrukturen im  
Konstruktionsprozess, Karlsruhe, 2005.
- [EU19] n.n.:  
Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des  
Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO<sub>2</sub>-  
Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte  
Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr.  
443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 vom 25. April 2019 (ABl. L 111, S.  
13–53), geändert mit Verordnung (EU) 2020/22 vom 31. Oktober  
2019 (ABl. L 8, S. 2–7) Link: [EUR-Lex - 02019R0631-20211202 - DE  
- EUR-Lex \(europa.eu\)](#)
- [FLI96] Flimm, J.:  
Spanlose Formgebung. München u.a., 1996
- [GARB58] Garbers, F.:  
Biegesteifigkeit verschiedener Sickenformen. In: Mitteilungen der  
Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, H. 10/11, S. 101–112,  
1958.
- [GRÜ82] Grüning, K.:  
Umformtechnik .Braunschweig, 1982
- [HASE78] Hasek, V.:  
Untersuchung und theoretische Beschreibung wichtiger Einfluss-  
größen auf das Grenzformänderungsschaubild. In: Blech Rohre  
Profile, Jg. 25, H. 6,8,101978.

- 
- [ISSL97] Issler, L.; Ruoss, H.; Häfele, P.:  
Festigkeitslehre – Grundlagen, Springer, Berlin, 1997.
- [KIEN55] Kienzle, O.:  
Die Versteifung ebener Böden und Wände aus Blech. In:  
Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, H. 7, S.  
77–83, 1955.
- [KIM02] Kim, I.:  
Einfluss des Spannungszustandes während des hydraulischen  
Tiefungsversuchs auf das Umformverhalten von Blechwerkstoffen,  
Shaker, Aachen, 2002.
- [KOPP98]: Kopp, R.; Wiegels, H.:  
Einführung in die Umformtechnik. Verlag der Augustinus  
Buchhandlung, Aachen, 1998
- [LANG84] Lange, K.:  
Umformtechnik. Grundlagen. Springer, Berlin, 1984.
- [LANG90] Lange, K.:  
Umformtechnik. Bechbearbeitung. Springer, Berlin, 1990.
- [MAIW92] Maiwald, J.:  
Auslegungskriterien für Sicken in dünnen Karosserieblechen,  
Aachen, 1992.
- [MAJIC14] Majic, N.:  
Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur fertigungsorientierten  
Sickenmustergestaltung für biegebeanspruchte Tragstrukturen.  
Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Dissertation,  
Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie  
(KIT). 2014
- [MCKI12] n.n.:  
CO<sub>2</sub>-Regulierung sorgt bis 2030 für dreistelliges Milliardenwachstum  
im Leichtbau. Studie. McKinsey & Company, 2012. Zuletzt

abgerufen: 08/2016. Link: <https://www.mckinsey.de/co2-regulierung-sorgt-bis-2030-für-dreistelliges-milliardenwachstum-im-leichtbau>

- [MUES75] Müschenborn, W.; Sonne, H.-M.:  
Einfluss des Formänderungsweges auf die Grenzformänderungen des Feinblechs. In: Archiv Eisenhüttenwesen [, 46], S. 597–602, 1975
- [OEHL70] Oehler, G.:  
Sickenversteifte Blechkonstruktionen. In: Konstruktion, Jg. 22, H. 12, S. 481–487, 1970.
- [OEHL68] Oehler, G.; Garbers, F.:  
Untersuchung der Steifigkeit und Tragfähigkeit von Sicken, Westdeutscher Verl., Köln, 1968.
- [OEHL72] Oehler, G.; Weber, A.:  
Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen, Springer, Berlin u.a., 1972.
- [PETZ70] Petzold, W.:  
Untersuchung des Werkstoffflusses und der Umformkraft Herstellung Sicken, Magdeburg, 1970.
- [PETZ91] Petzold, W.:  
Werkzeuge zum Fertigen von Versteifungssicken. In: Bänder Bleche Rohre, H. 4, S. 37–40, 1991.
- [PIET00] Pietrzyk, M.:  
Metal forming 2000. Proceedings of the 8th International Conference on Metal Forming, Kraków, Poland, 3 - 7 September 2000, Balkema, Rotterdam, 2000.
- [SPUR85] Spur, G.; Stöferle, T.:  
Handbuch der Fertigungstechnik. Band 2: Umformen, Zerteilen. München u.a., 1985

- [TSCH08] Tschätsch, H.; Dietrich, J.:  
Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen,  
Werkzeuge. Wiesbaden, 2008
- [VOLK12] Volk, W., Hoffmann, H., Suh, J., Kim, J.:  
Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming.  
CIRP Annals. Amsterdam, 2012
- [GABER16] Gaber, Ch., Jocham, D., Weiss H., Böttcher, O, Volk, W.:  
Evaluation of non-linear strain paths using Generalized Forming  
Limit Concept and a modification of the Time Dependent Evaluation  
Method. In: International Journal of Material Forming. Springer, 2016
- [WARN06] Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.:  
Einführung in die Fertigungstechnik. Wiesbaden, 2006
- [WIDM84] Widmann, M.:  
Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen  
Halbrundsicken. Springer, Berlin, 1984.

#### 10.4 Abschlussarbeiten

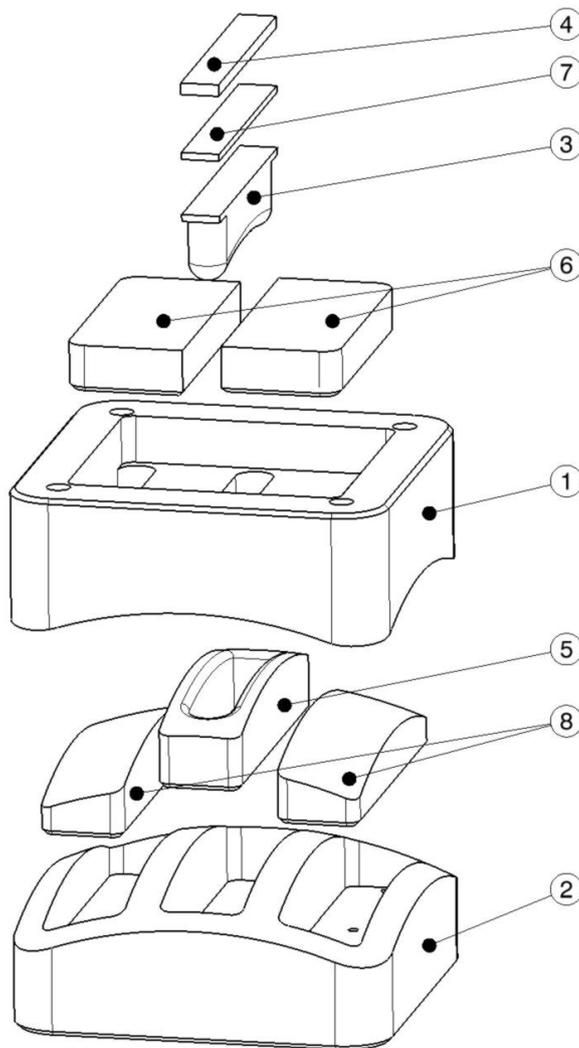
Nachfolgend aufgeführte Abschluss- und Studienarbeiten wurden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München von mir betreut und wissenschaftlich angeleitet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen direkt oder indirekt in die vorliegende Arbeit ein.

- [A\_DOBL10] Dobler, A.:  
Konstruktion eines Sickenprägewerkzeuges sowie Vergleich von  
Experiment und Umformsimulation hinsichtlich der Formänderungen  
beim Sickenprägen. Semesterarbeit, Technische Universität  
München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2010
- [A\_GOTT08] Gottstein, S.:  
Literaturrecherche zum Thema Sickenstrukturen und  
Sickengestaltung in Blechbauteilen. Semesterarbeit, Technische

- Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2008
- [A\_KRIN10] Krinninger, M.:  
Vergleich von inverser und inkrementeller Simulation in der Blechumformung. Semesterarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2010
- [A\_SCHE09] Scheib, S.:  
Entwicklung und Konstruktion von Prüfständen zur Messung und Optimierung von Eigenschaften von Sickengeometrien. Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2009
- [A\_STEIN10] Steiner, M.:  
Simulation der Umformung von Sicken in Blechbauteilen. Semesterarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2010
- [A\_STOC11] Stocker, M.:  
Ermittlung der Steifigkeiten von Sickenstrukturen unter Berücksichtigung der Umformgeschichte. Semesterarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2011
- [A\_OBER10] Oberaigner, P. R.:  
Platinengeometrien zum Abbilden von definierten Umformwegen. Semesterarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2010
- [A\_WEIS10] Weisensee, P.:  
Untersuchung verschiedener Sickenquerschnitte hinsichtlich Steifigkeit und Umformbarkeit. Semesterarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2010

- [A\_ZHAN09] Zhang, O.B.:  
Simulation der Umformung und Steifigkeitswirkung von Sicken in  
Blechstrukturen. Semesterarbeit, Technische Universität München,  
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, 2009

## 11 Anhang



Ref.	Bezeichnung
1	Stempelkörper
2	Matrizenkörper
3	Stempeleinleger Mitte
4	Anschlag Klein
5	Matrizeneinleger Mitte
6	Führungsklotz
7	Deckplatte klein
8	Matrizenstopfen Aussen

Abbildung 11-1: Explosionszeichnung der Einzelsickenprägeeinheit

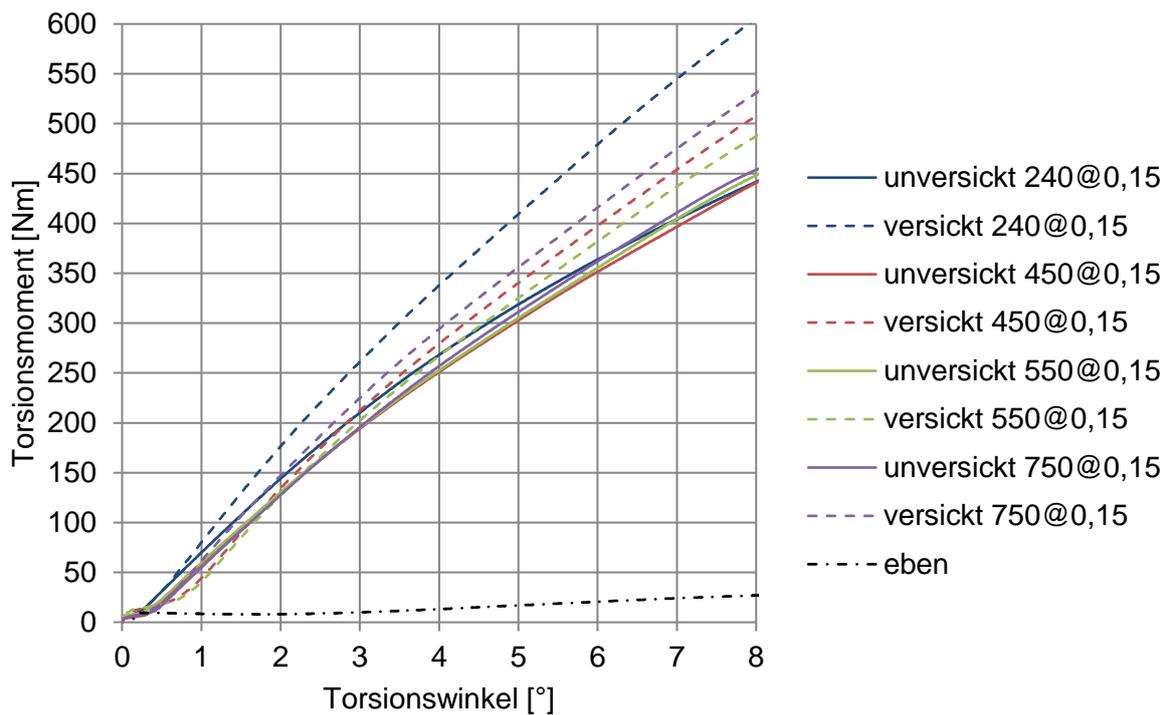


Abbildung 11-2: Torsionsprüfung: Ergebnisse ebener vorverformter bzw. versteifter Proben; Vorverformung Dehnkreis 0,07

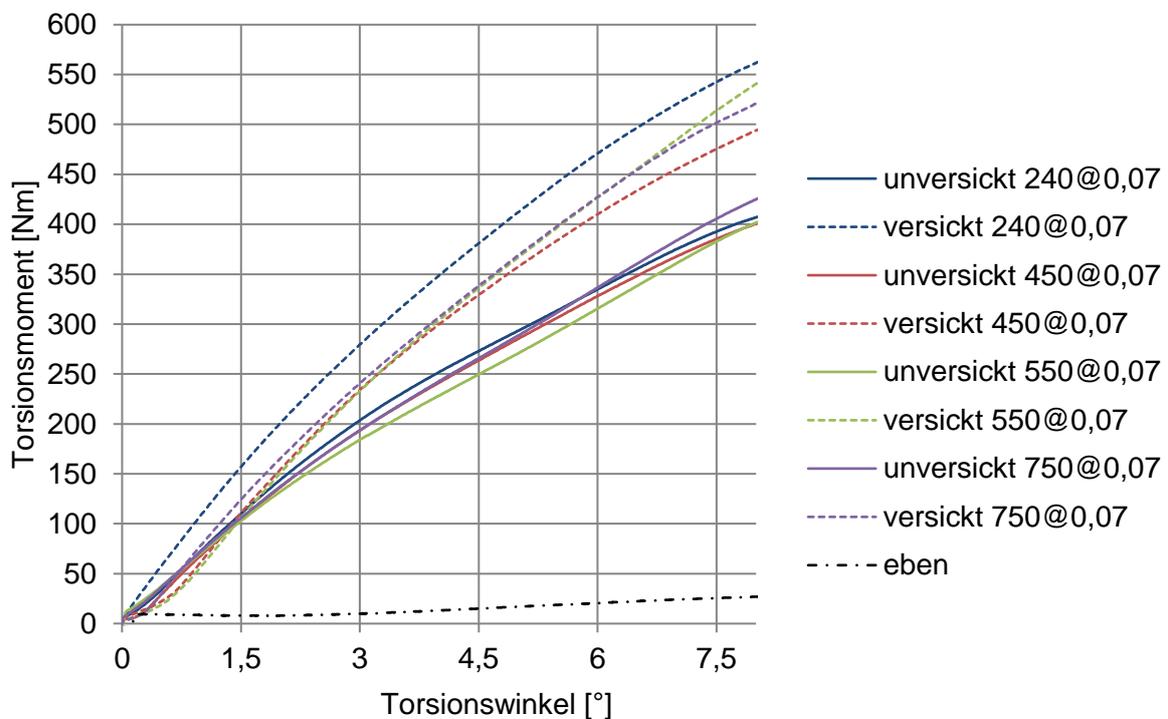


Abbildung 11-3: Torsionsprüfung: Ergebnisse ebener, vorverformter bzw. versteifter Proben, Vorverformung Dehnkreis 0,15

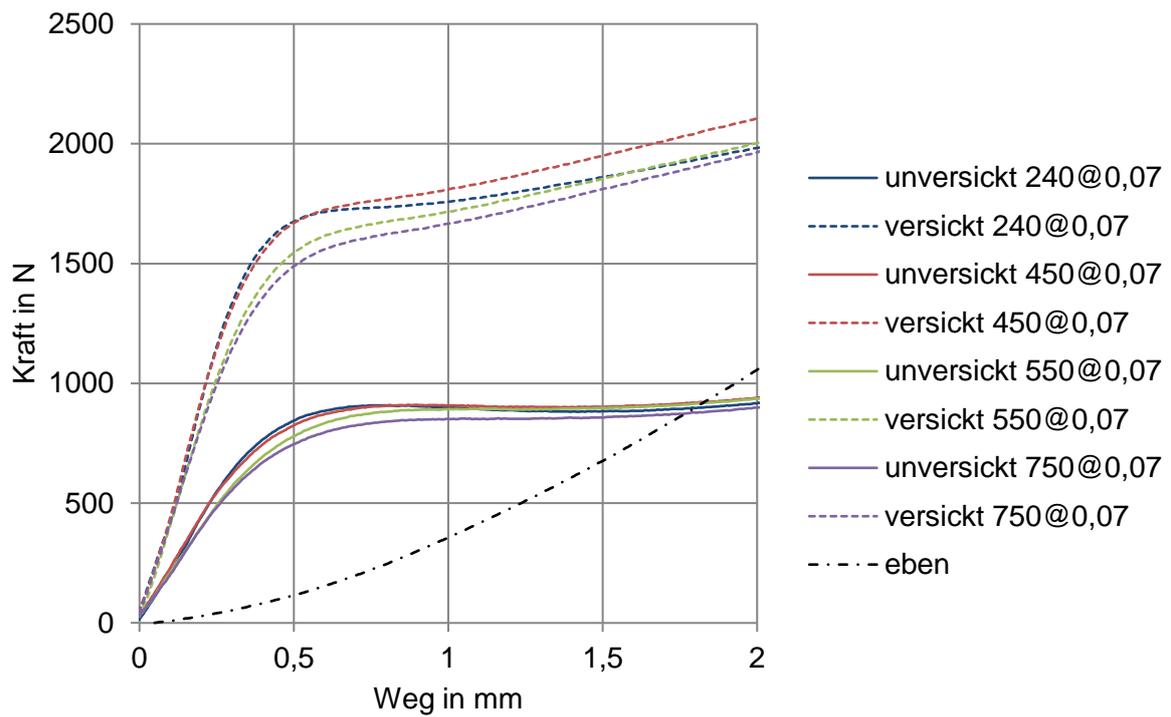


Abbildung 11-4: Biegeprüfung: Ergebnisse ebener, vorverformter bzw. versteifter Proben, Vorverformung Dehnkreis 0,07

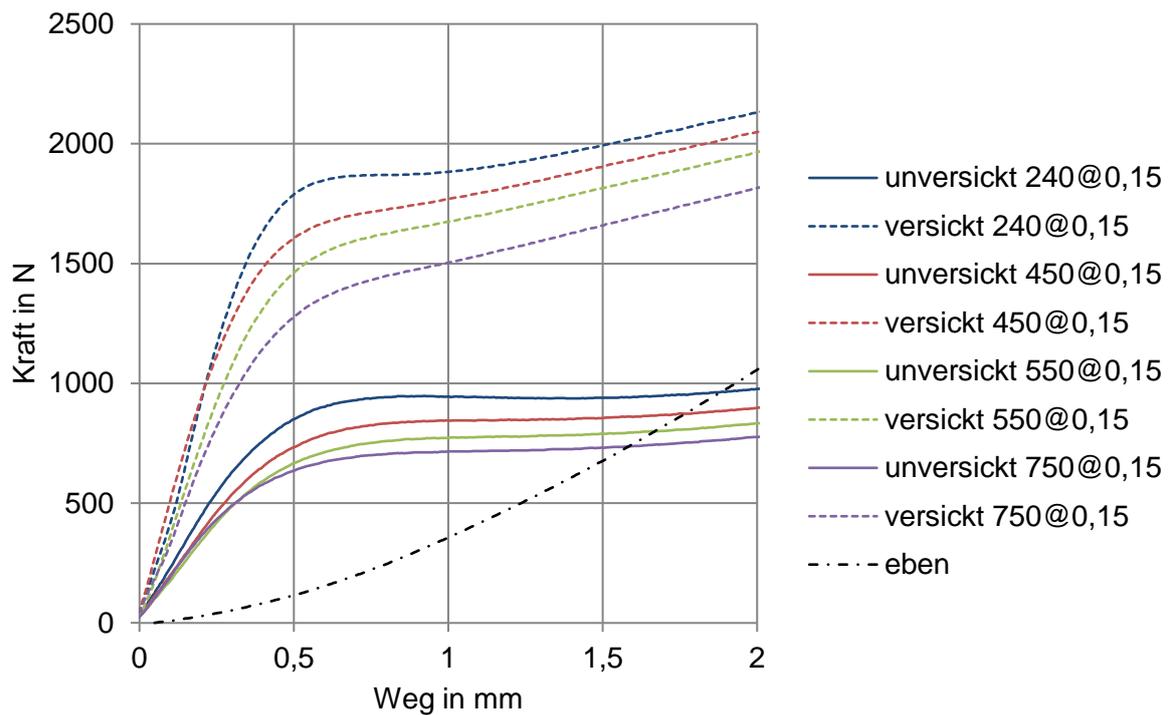


Abbildung 11-5: Biegeprüfung: Ergebnisse ebener, vorverformter bzw. versteifter Proben, Vorverformung Dehnkreis 0,15

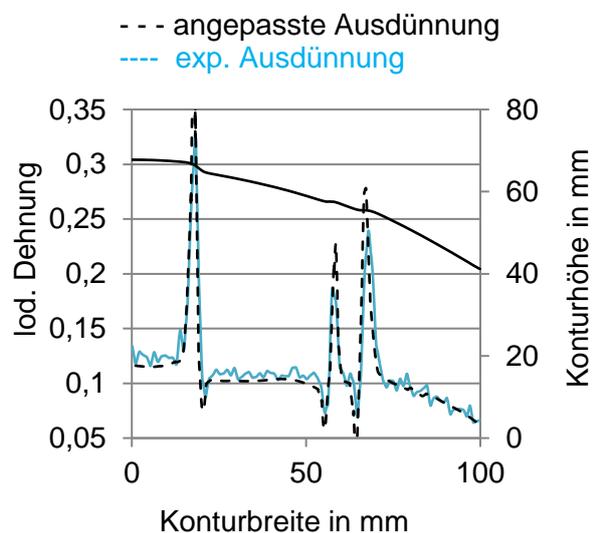


Abbildung 11-6: Prägen: angepasste Ausdünnungsberechnung

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
<i>Blechdicke</i>	<i>0,975 mm</i>
<i>Reibzahl <math>\mu</math> Blech-Stempel</i>	<i>0,03</i>
<i>Reibzahl <math>\mu</math> Blech Niederhalterflächen</i>	<i>0,1</i>
<i>Geschwindigkeit Prozessstufe „Halten“</i>	<i>2 mm/ms</i>
<i>Geschwindigkeit Prozessstufe „Vorverformen“</i>	<i>5 mm/ms</i>
<i>Massenskalierung</i>	<i>Ein</i>
<i>Adaptive Vernetzung</i>	<i>Ein, &gt; 5mm</i>
<i>Werkstoffmodell</i>	<i>Hill 48</i>

*Tabelle 11-1: Parameter der Umformsimulation: Vorverformen*

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
<i>Blechdicke</i>	<i>Aus Vorverformung</i>
<i>Reibzahl <math>\mu</math></i>	<i>0,08</i>
<i>Geschwindigkeit</i>	<i>2 mm/ms</i>
<i>Massenskalierung</i>	<i>Ein</i>
<i>Adaptive Vernetzung</i>	<i>Ein, &gt;0,8 mm</i>
<i>Werkstoffmodell</i>	<i>Hill 48</i>

*Tabelle 11-2: Parameter der Umformsimulation:Prägen*

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
<i>Blechdicke</i>	<i>0,975</i>
<i>Vorverformen Reibzahl <math>\mu</math></i>	<i>0,03</i>
<i>Prägen Reibzahl <math>\mu</math></i>	<i>0,08</i>
<i>Werkstoffmodell</i>	<i>Hill 48</i>

*Tabelle 11-3: Parameter der inversen Berechnungmodelle*