



Dipl. Ing. Christian Gasser

**BEITRAG ZUR ERWEITERUNG DER
ANWENDUNGSGEBIETE DES FREIBIEGENS AM
BEISPIEL DER SUBSTITUTION VON
FUNKTIONELLEN SCHALENBAUTEILEN**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer und Erstbegutachtung

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Zweitbegutachtung

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Graz, Juli 2016

Leerseite

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG / AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.

Graz, am

.....

Christian Gasser, e.h.

Leerseite

VORWORT

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Universitäts- Projektassistent am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion an der Technischen Universität Graz entstanden.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck, der Führungspersönlichkeit dieses Institutes, möchte ich hiermit ganz herzlich für das Vertrauen und die hilfsbereite Förderung danken. Diese Rahmenbedingungen trugen wesentlich zum Abschluss meiner Arbeit bei. Leider konnte unser geschätzter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck die fertige Arbeit nicht lesen. Ralf Kolleck verstarb in der Nacht von 4. auf 5. Januar 2016 unerwartet nach kurzer Krankheit im 47. Lebensjahr und hinterlässt in allen Bereichen eine große Lücke. Er wird mir in positiver Erinnerung bleiben.

Für die spontane Übernahme der Betreuung, der kritischen Durchsicht dieser Arbeit und die Erstbegutachtung möchte ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch recht herzlich danken. Weiters gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel für die Übernahme der Zweitbegutachtung. Auch den Projektpartnern aus der Industrie gilt für die wohlwollende Unterstützung großer Dank.

Bei allen Teamkollegen am Institut, die durch ihre große Hilfsbereitschaft zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich auf diesem Wege ganz herzlich für die letzten fünf Jahre bedanken. Ohne die konstruktiven Diskussionen und die motivierende Atmosphäre wäre die Arbeit in der vorliegenden Form sicherlich nicht entstanden.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich natürlich auch bei meiner Familie, die durch ihre moralische Unterstützung und das Schaffen von zeitlichen Freiräumen eine wesentliche Grundlage für meinen Werdegang geschaffen hat.

Graz, im Juli 2016

Christian Gasser

KURZFASSUNG

Bei der Produktion von Rohkarosserien in Schalenbauweise werden Strukturbauteile je nach Festigkeitsgrad durch Kalt- oder Warmumformung hergestellt. Diese konventionelle Herstellung von Schalenbauteilen erfordert hohe technische und energetische Aufwände, wobei die formgebenden Werkzeuge einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen. Neue Herstellprozesse müssen es vor allem bei kleinen Stückzahlen ermöglichen, wirtschaftlich und mit gleichbleibender oder sogar verbesserter Qualität fertigen zu können.

Freibiegen ist ein sehr flexibles Fertigungsverfahren, welches ohne bauteilspezifische Werkzeuge derartig komplexe Bauteile bei der Erhaltung ihrer Eigenschaften herstellen und damit wesentlich zur Wirtschaftlichkeit im Produktionsprozess beitragen kann. In der Karosseriefertigung und dabei im Speziellen bei der Fertigung crashrelevanter Sicherheitsbauteile findet das Biegeumformen noch keine Anwendung.

Eine von der Soll- bis zur Istgeometrie detailliert erarbeitete Gesamtprozessbeschreibung bei der Herstellung komplexer, funktioneller Schalenbauteile dient, neben der ausführlich ausgearbeiteten, konstruktiven Überführung von Schalen- zu Biegebauteilen, als Basis für die Entwicklung einer durchgängigen Methode bei der Herstellung von Funktionsbauteilen durch Freibiegen. Zusätzlich werden aus dem im Freibiegeprozess enthaltenen Fehlerpotential und den wesentlichen Einflussparametern, notwendige Prozessverbesserungsansätze in Bezug auf Flexibilität und Maßhaltigkeit vorgestellt und experimentell belegt. Die durchgängige Anwendbarkeit der erarbeiteten Methode wird beispielhaft an einem realen Musterbauteil demonstriert und die Herstellbarkeit von funktionalen Schalenbauteilen durch Freibiegen mit gleichbleibenden Bauteileigenschaften, wie Festigkeit und Energieaufnahmevermögen, bei der Karosseriefertigung nachgewiesen. Abschließend wird anhand von virtuellen Optimierungsschleifen gezeigt, dass durch Freibiegen belastungsoptimierte Geometrien herstellbar sind, die mit herkömmlichen Herstellverfahren nicht umsetzbar sind.

ABSTRACT

The production of structural components for body-in-white assemblies strongly relies on cold and, depending on the strength category, warm forming. These conventional production techniques are accompanied by a considerable technical effort as well as a high energy input. In addition, a significant cost factor, mainly caused by the forming tools, has to be considered. New procedures need to ensure an economic production, especially for low number of pieces, with a constant, or even higher, product quality.

Air bending is characterized by the ability to realize complex structural components, and their defined properties, using multi-purpose tools. This can highly contribute to the economic efficiency of the production process. In the field of automotive body production, especially for the manufacturing of crash-relevant safety parts, bending has not been utilized so far.

In order to provide a suitable methodological approach for the production of functional air bent components, a detailed process description of complex shell elements and a thoroughly elaborated transformation from shell to bending designs is included. In addition, potential sources of error and all influencing process parameters of the air bending process are identified and proposals for improving flexibility and dimensional accuracy are derived and demonstrated experimentally. A real sample component is used to verify the continuous applicability of the presented method as well as the producibility of functional shell elements that feature the same properties, like strength and crash performance, as a conventional manufactured part. Finally, a virtual optimization step confirms that air bending is capable of producing geometries that cannot be manufactured by conventional production techniques.

Leerseite

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	5
2.1	Einteilung der Biegeverfahren	5
2.2	Der Umformprozess Freibiegen	5
2.2.1	Prozessbeschreibung	6
2.2.2	Technologieparameter	8
2.2.3	Grenzen des Verfahrens	16
2.3	Werkzeugtechnik beim Freibiegen	17
2.3.1	Standardwerkzeuge	17
2.3.2	Sonderwerkzeuge - Gesenkweitenverstellbare Biegematrizen . . .	18
2.4	Anwendungsgebiete des Freibiegens	21
3	ZIELSETZUNG UND VORGEHEN	23
4	ERWEITERUNG DER ANWENDUNGSGBIETE	25
4.1	Potentielle Anwendungsbereiche	25
4.2	Erweiterungsfeld	26
5	FREIBIEGEN BEI DER HERSTELLUNG VON FUNKTIONALEN SCHALENBAU- TEILEN	29
5.1	Gesamtprozess Freibiegen	29
5.1.1	Gesamtprozessbeschreibung	29
5.1.2	Vor- und Nachteile	34
5.1.3	Sollzustand und Fehlerpotential	35
5.1.4	Toleranzen	36
5.1.5	Wesentliche Einflussparameter	37
5.1.6	Verbesserungspotential des Biegeprozesses	39
5.2	Verbesserungsansätze	42
5.2.1	Ansatz der Verkürzungskorrektur - Zusammenhänge beim Frei- biegen	44
5.2.2	Regelkreis der adaptiven Gesenkweitenverstellung beim Freibiegen	46

5.2.3	Gesenkweitenverstellbares Biegewerkzeug zur Verwendung im Regelkreis	48
5.3	Umformversuche zur experimentellen Analyse	49
5.3.1	Versuchs- und Messaufbau	49
5.3.2	Experimentelle Ermittlung der Technologieparameter	53
5.3.3	Experimentelle Validierung des Ansatzes der Verkürzungskorrektur	56
5.4	Bauteil Auswahl	58
6	KONSTRUKTIVE SUBSTITUTION ZU BIEGEBauteILEN	65
6.1	Konstruktive Randbedingungen beim Freibiegen	65
6.1.1	Minimaler Biegeradius	65
6.1.2	Mindestschenkellänge	66
6.1.3	Maximale Schachtelhöhe	66
6.1.4	Bauteile mit unterschrittenen Biegungen	67
6.1.5	Mindestabstände von Bohrungen und Durchbrüchen	68
6.1.6	Versteifung - Sicken	68
6.1.7	Eckenfreistellungen	69
6.1.8	Ausklinkungen	69
6.1.9	Schräge Kanten und Ausläufe	70
6.1.10	Abwickelbarkeit	70
6.1.11	Falzen	71
6.2	Konstruktive Teillösungen	72
6.2.1	Querschnitte	72
6.2.2	Querschnittsübergänge mit konstanter Profilbreite	73
6.2.3	Querschnittsübergänge mit konstanter Profilhöhe	76
6.2.4	Querschnittsausläufe	77
6.2.5	Flächenkrümmungen	79
6.2.6	Befestigungspunkte, Prägungen und Versteifungen	80
6.2.7	Geometriebereiche der Gesamtintegration	81
6.3	Konstruktive Überführung von Schalenbauteilen	83
7	ENTWICKLUNG EINER METHODE ZUR HERSTELLUNG VON FUNKTIONSBauteILEN	87
7.1	Bauteil Entstehungszyklus	87
7.1.1	Engineering	88
7.1.2	Fertigung	89

7.1.3	Bauteilverwendung	90
8	EXEMPLARISCHE ANWENDUNG DER METHODE	91
8.1	Konzept	91
8.1.1	Materialauswahl	92
8.2	Konstruktive Überführung der Seitenaufprallträgergeometrie	92
8.3	Simulative Bewertung der Bauteilfunktion	94
8.4	Fertigung der Biegebauteile	97
8.4.1	Durch Fügen zum Funktionsbauteil	100
8.5	Qualität	101
8.5.1	Simulationsverifikation	104
8.5.2	Optimierung	107
9	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	111
10	ZUSAMMENFASSUNG	115
	Symbolverzeichnis	117

Leerseite

EINLEITUNG

Es gibt unzählige verschiedene Arten von Blechbauteilen und verschiedenste Möglichkeiten Blechbauteile herzustellen. In der Serienproduktion von Rohkarosserien in Schalenbauweise werden funktionelle Strukturbauteile je nach Festigkeitsgrad durch Kalt- oder Warmumformung hergestellt. Die Fortschritte im Bereich der Crash-Sicherheit, bei gleichzeitiger Reduzierung des Fahrzeuggewichtes, konnten nur durch die Weiterentwicklung der Werkstoffe und den dafür geeigneten Umformverfahren erreicht werden [LB07]. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Werkstoffe nach ihren Festigkeitsklassen in einer modernen Fahrzeugkarosserie in Schalenbauweise.

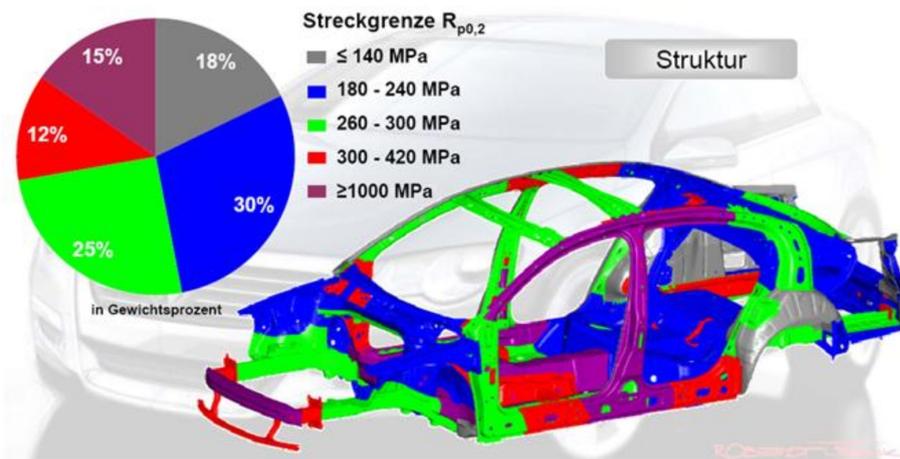


Abbildung 1: Werkstoffverteilung in einer modernen Karosserie nach Festigkeitsklassen, Bild VW AG ©

Die formgebenden Werkzeuge stellen bei den verwendeten Umformverfahren einen entscheidenden Kostenfaktor bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bauteilen dar, da für jedes Bauteil ein entsprechendes Werkzeug gefertigt werden muss. Aus diesem Grund wird die Schalenbauweise vorwiegend von Großserienherstellern angewandt, die mit Stückzahlen von mehreren 100.000 *Bauteilen/Jahr* die Kosten von Werkzeugen und Anlagen schneller amortisieren können.

Das derzeit wichtigste Verfahren zur Herstellung crashrelevanter Bauteile stellt das sogenannte Presshärten borlegierter Stähle [Neu+06], auch Formhärten genannt, dar. Der grundsätzliche Prozess basiert auf der Verfahrenskombination aus Warmumformen und Vergüten in einem Prozessschritt [VDI14]. Die Formplatte wird zunächst

auf Austenitisierungstemperatur erwärmt, anschließend in einem gekühlten Werkzeug umgeformt und mit einer Mindestabkühlgeschwindigkeit von 27 K s^{-1} abgekühlt. Entsprechend sind hohe Investitionen in Ofenanlagen und Umformwerkzeuge nötig, die im Vergleich zu Werkzeugen für die Kaltumformung noch deutlich komplexer aufgebaut sind.

Vor dem Hintergrund der Diversifikation von Produkten und dem Streben nach individuellen, kundenspezifischen Ausführungen in höchster Qualität ist die Produktionstechnik ständig mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Einhergehend mit der Qualität von Produkten sind schlussendlich die Herstellkosten ein essentieller Punkt für das Bestehen eines Produktes auf dem Markt. Dabei sind diese Bauteilkosten zu einem wesentlichen Bestandteil vom Herstellverfahren und von der herzustellenden Stückzahl abhängig. Durch die steigende Diversifikation und die steigende Personalisierung von Produkten sind wirtschaftliche Stückzahlen für formgebundene Herstellverfahren oft nicht mehr vorhanden. Dieses Spannungsfeld wird zusätzlich durch steigende Qualitätsanforderungen verstärkt.

Da am Markt höhere Bauteilpreise aber nicht durchsetzbar sind, müssen neue Bauteil- und Fertigungskonzepte gefunden werden. In diesem Zusammenhang drängt sich das Freibiegen in den Vordergrund. Abbildung 2 zeigt eine Detailaufnahme des Umformprozesses.

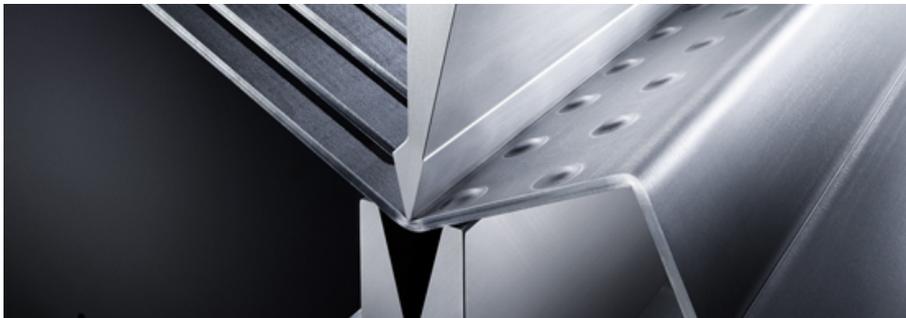


Abbildung 2: Detailaufnahme des Freibiegeprozesses mit Stempel, Matrize und Werkstück [TRU]

Das Verfahren wird im Automobilbau bereits für die Herstellung von Kleinteilen [BHS13] (z.B. Befestigungselemente) eingesetzt. In der Karosseriefertigung und dabei im Speziellen bei der Fertigung von Funktionsbauteilen und crashrelevanter Sicherheitsbauteile, findet es hingegen noch keine Anwendung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die konventionelle Herstellung funktioneller Schalenbauteile enorme technische und energetische Aufwände erfordert. Daraus entspringt die Notwendigkeit, eine Herstellmethode zu entwickeln, welche den

Aufwand zur Erzielung der geforderten Eigenschaften wie zum Beispiel Festigkeit und Energieaufnahmevermögen, vor allem für Kleinserien, wesentlich reduziert.

Leerseite

„Biegeumformen nach DIN 8586 ist das Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch eine Biegebeanspruchung herbeigeführt wird.“ [Lan90] Das Verfahren wird bei der Blechbearbeitung neben dem Tiefziehen am häufigsten verwendet. [KK05]

2.1 EINTEILUNG DER BIEGEVERFAHREN

Biegeverfahren werden, wie in Abbildung 3 dargestellt, in Abhängigkeit von der Werkzeugbewegung in Verfahren mit geradliniger und mit drehender Werkzeugbewegung eingeteilt.

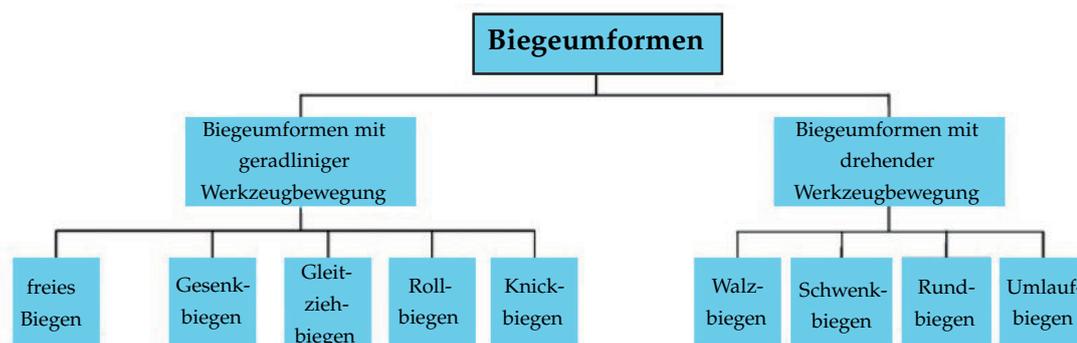


Abbildung 3: Einteilung der Biegeumformverfahren nach DIN 8586 [Hof12]

Ferner kann bei den einzelnen Verfahren noch eine Unterteilung nach der Gestalt der Biegelinie in gerade, gekrümmt, offen und geschlossen erfolgen. [BHS13]

2.2 DER UMFORMPROZESS FREIBIEGEN

Das freie Biegen wird weiter in das freie Biegen zwischen zwei Auflagern mit dazwischenliegendem Stempel und das freie Biegen von einseitig eingespanntem Blech eingeteilt. Beide Arten des freien Biegens setzen voraus, dass der kleinste Biegeradius r_i größer als der Stempelradius r_{ST} ist, siehe dazu Abbildung 4.

Biegeschenkellänge, Bl ... Biegelinie, Bz ... Blechzuschnitt, F ... Biegekraft, l_0 ... gestreckte Länge, l_b ... Biegelinienlänge, l_w ... Werkzeuglänge, OW ... Biegestempel, r_{ST} ... Stempelradius, r_i ... Biegeradius, innerer Werkstückradius, r_a ... Biegeradius außen, äußerer Werkstückradius, r_w ... Einzugsradius Biegegesenk, t ... Blechdicke, UW ... Biegegesenk, v_{ST} ... Stempelgeschwindigkeit, Wr ... Walzrichtung, Wk ... Werkstück, y ... Eintauchtiefe, w ... Gesenkweite, x ... Abstand der Biegelinie.

Die für die Umformung des Blechzuschnittes Bz notwendige Relativbewegung der Werkzeuge wird durch den mit konstanter Stempelgeschwindigkeit v_{ST} bewegten Biegestempel gegen das starr mit der Biegemaschine verbundene Biegegesenk erreicht. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Werkzeuge zueinander zentriert ausgerichtet sind. In Abhängigkeit von der Eintauchtiefe y stellt sich der Öffnungswinkel β des fertigen Werkstücks Wk mit den Biegeschenkeln A und B ein. Beim freien Biegen dient das Werkzeug ausschließlich zur Übertragung der Kräfte, beziehungsweise der Momente auf das Werkstück. Die Kraftübertragung erfolgt dabei durch linienförmige Berührungsstellen. Dadurch ist die Geometrie der Umformzone nicht primär von der Form der Werkzeuge, sondern von der relativen Lage der Werkzeuge zueinander, siehe Abbildung 5, und der Eigenschaften des Blechs, abhängig.

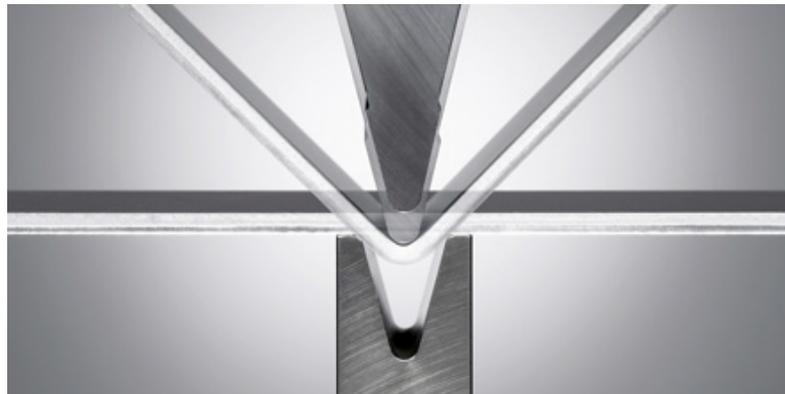


Abbildung 5: Relative Lage der Biegewerkzeuge [EHTa]

Die Maschine zur Durchführung dieses Umformprozesses wird als Biege- oder Abkantmaschine bezeichnet und ist durch die Positioniergenauigkeit des Biegestempels für die Biegegenauigkeit verantwortlich.

Als Abgrenzung ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass das Gesenkbiegen ein Freibiegen mit direkt angeschlossener Nachformung ist (siehe Abbildung 6). Dabei erfolgt das Biegen zwischen einem Biegestempel und einem Biegegesenk bis zum Anlegen des Werkstücks an das Gesenk am Ende des Gesenkbiegevorgangs. Der Beginn des Rückbiegens der Biegeschenkel stellt den Übergang zwischen dem Freibiegen

und dem Gesenkbiegen dar. Das wichtigste in der Praxis angewandte Gesenkbiegeverfahren ist das Biegen im V-förmigen Gesenk. Neben dem erhöhten Kraftaufwand des Gesenkbiegens gegenüber dem freien Biegen ist als wesentlichster Unterschied die werkzeuggebundene Werkstückgeometrie zu nennen.

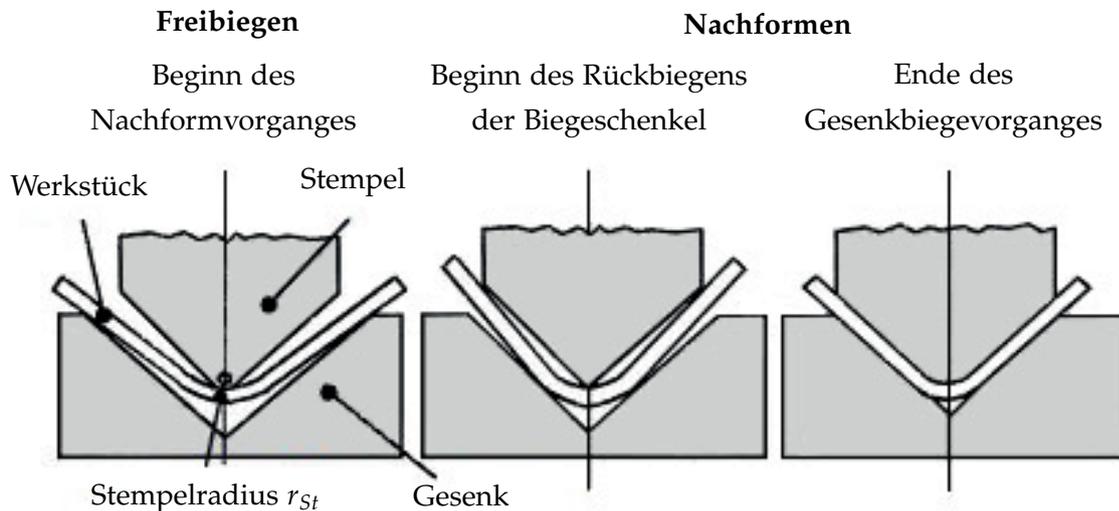


Abbildung 6: Gesenkbiegen [DB10]

2.2.2 Technologieparameter

2.2.2.1 Eigenschaften der Biegezone

In Abbildung 7 links sind die Umformzonen der Biegeumformung dargestellt. Unter Last ist das Material in der Matrizenöffnung von A bis C unter Spannung. Bei Entlastung federn die Teile AD und EC aus der Zone der elastischen Verformung (ZeV) in ihre ursprüngliche Lage zurück. Im Bereich DE befindet sich die Zone der plastischen und bleibenden Verformung (ZpV). [Bys13]

In der Umformzone wird das Blech an der Außenseite gestreckt und an der Innenseite gestaucht. Vergleiche dazu Abbildung 7 rechts. Dazwischen liegt die ungelängte oder neutrale Faser, die in ihrer Länge unverändert bleibt und bei großen Radien ungefähr in der Mitte liegt. Bei kleinen Biegradien verschiebt sich diese hin zum inneren Biegeradius r_i [KK05]. Beim Freibiegen ist die ungelängte Faser geometrisch jedoch nicht bestimmt. Ein qualitativer Verlauf der Biegelinie ist in Abbildung 10 dargestellt.

Die Umformung hat in der Biegezone eine Reduktion des Blechquerschnitts von t auf t_1 und eine Randverformung am äußeren Rand des Biegebogens mit der Spitzenhöhe x zur Folge (Abbildung 8). Der Querschnitt im Biegebereich entspricht demzufolge nicht

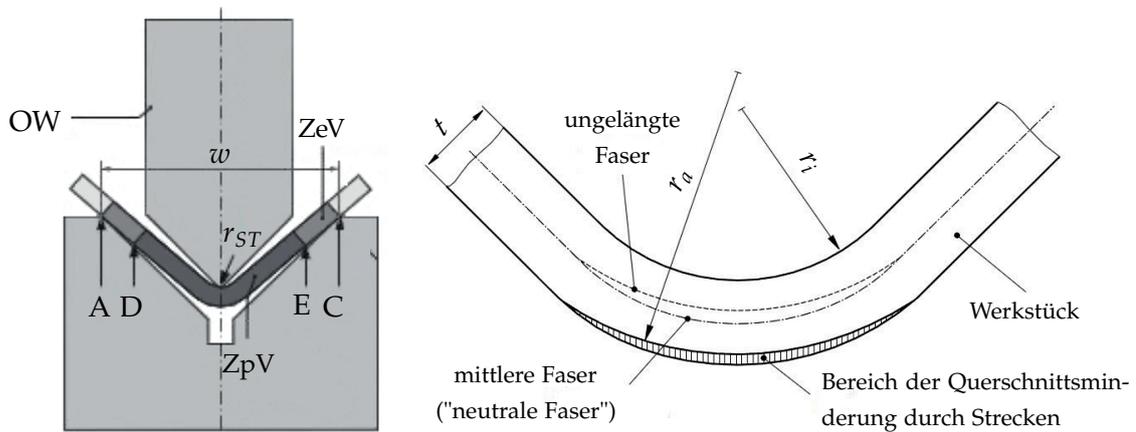


Abbildung 7: Prinzip des Luftbiegens [Bys13] - Biegezone [KK05]

mehr einem Rechteck mit $b \times t$, sondern eher einem Trapez. Diese grundsätzlich störende Eigenschaft ist verstärkt bei dicken Blechen und kleinen Biegeradien festzustellen. [KK05]

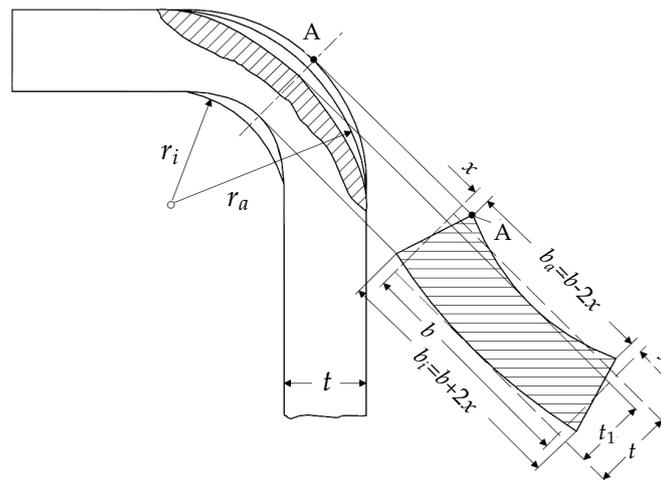


Abbildung 8: Randverformung [KK05]

Zusätzlich zu den geometrischen Veränderungen des Blechs in der Umformzone werden auch dessen mechanischen Eigenschaften verändert. In Abbildung 9 ist die über Härtemessungen ermittelte Verfestigung an einem durch Freibiegen umgeformten Stahlblech dargestellt.

2.2.2.2 Biegeradius

Wie bei der Prozessbeschreibung bereits erwähnt, bildet sich die Umformzone nicht als geometrisch bestimmter Radius, sondern als materialabhängiger Krümmungsverlauf, wie in Abbildung 10 dargestellt, aus.

Welcher Bereich der Krümmung als Biegeradius definiert wird, ist auch unter Experten nicht eindeutig definiert. Im Hinblick auf versagenstechnische Phänomene wird der Bereich

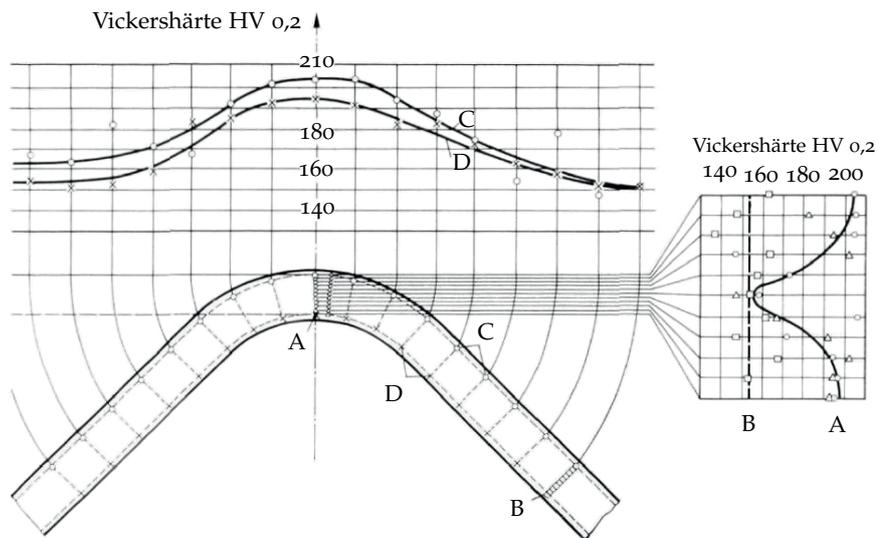


Abbildung 9: Kaltverfestigung [Lan90]

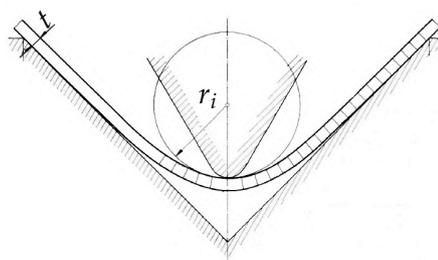


Abbildung 10: Biegelinie beim freien Biegen [Lan90]

der kleinsten Krümmung als Biegeradius, innerer Werkstückradius r_i definiert. Da die exakte geometrische Form der Umformzone bei diesem Verfahren nicht von primärer Bedeutung ist, liegt das Augenmerk in diesem Zusammenhang auf dem Mindestbiegeradius. Der Biegeradius wird in der Literatur auch als Biegehalbmesser bezeichnet. In Abbildung 11 ist zur Begriffserläuterung eine einfache Darstellung eines Biegebauteils angeführt.

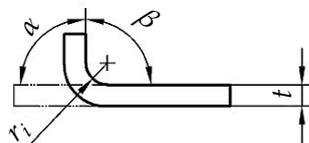


Abbildung 11: Biegebauteil nach [N5] mit t ...Blechdicke, r_i ... Biegehalbmesser, α ... Biegewinkel und β ... Öffnungswinkel.

Wird der kleinstmögliche Biegeradius unterschritten, kommt es zu Materialversagen in Form von Rissen an der Außenseite der Biegung oder zu Quetschfalten entlang der Biegelinie. Siehe dazu Abbildung 32. Der kleinstmögliche Biegeradius hängt vom Material und der Blechdicke ab und kann für Standardmaterialien aus Tabellen abgelesen werden. In Tabelle 1 sind die

kleinsten zulässigen Biegeradien für bestimmte Blechdicken und Werkstoffe angegeben. Diese Werte gelten für Biegewinkel $\alpha \leq 120^\circ$. Bei Winkeln von α größer 120° sollte der nächsthöhere Wert gewählt werden. In dieser Tabelle ist ersichtlich, dass sich der minimale Biegeradius proportional zur Blechdicke und Blechfestigkeit verhält. Außerdem muss beim Biegen von Blech unbedingt auf die Walzrichtung geachtet werden. Quer zur Walzrichtung sind kleinere Biegeradien möglich. Dieser Effekt kommt aber hauptsächlich bei dickeren Blechen oder Materialien mit höherer Festigkeit zum Tragen.

Stahlsorten	beim Biegen quer oder längs zur Walzrichtung	Kleinst zulässiger Biegehalbmesser r für Dicken s														
		bis 1	über 1	über 1,5	über 2,5	über 3	über 4	über 5	über 6	über 7	über 8	über 10	über 12	über 14	über 16	über 18
			bis 1,5	bis 2,5	bis 3	bis 4	bis 5	bis 6	bis 7	bis 8	bis 10	bis 12	bis 14	bis 16	bis 18	bis 20
S 235 JR S 235 J0 S 235 J2	quer	1	1,6	2,5	3	5	6	8	10	12	16	20	25	28	36	40
	längs	1	1,6	2,5	3	6	8	10	12	16	20	25	28	32	40	45
S 275 JR S 275 J0 S 275 J2	quer	1,2	2	3	4	5	8	10	12	16	20	25	28	32	40	45
	längs	1,2	2	3	4	6	10	12	16	20	25	32	36	40	45	50
S 355 JR S 355 J0 S 355 J2	quer	1,6	2,5	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	36	45	50
	längs	1,6	2,5	4	5	8	10	12	16	20	25	32	36	40	50	63

Tabelle 1: Mindestbiegeradius nach [N5]. Alle Maße sind in Millimeter.

Wenn aus konstruktiven Gründen scharfe Biegekanten gefordert sind, muss das Werkstück entweder vor der Umformung erwärmt oder das Blech vorher eingekerbt werden. Bei dünnen Blechen werden Sicken eingebracht, siehe Abbildung 12.

Vorbehandlung: Einkerben

Vorbehandlung: Sicken

Querschnitt nach Biegen

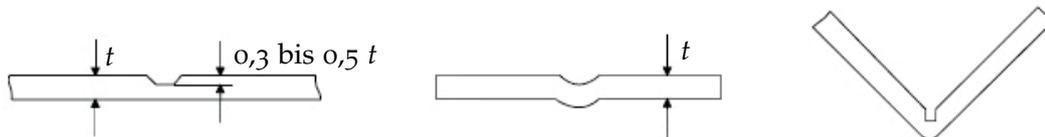


Abbildung 12: Möglichkeiten zur Erzielung scharfer Biegekanten [KK05]

2.2.2.3 Biegekraft

In Abbildung 13 ist der Kraftverlauf der Stempelkraft in Abhängigkeit der Eintauchtiefe dargestellt. Zusätzlich zum Kraftverlauf beim Freibiegen ist das Diagramm um das Gesenkbiegen erweitert. Darin ist ersichtlich, dass der maximale Kraftbedarf im Bereich des Biegewinkels von 45 Grad liegt und die Maximalkraft beim Gesenkbiegen bzw. Prägebiegen noch deutlich höher liegt.

Die Presskraft F_{St} , siehe Kräftesituation beim Freibiegen in einer allgemeinen Lage mit resultierendem Momentenverlauf in Abbildung 14, kann unter der Voraussetzung, dass $w/t \leq 10$ ist, näherungsweise laut unten stehender Formel (1) nach Mäkelt, Cali oder Oehler [Oeh63]

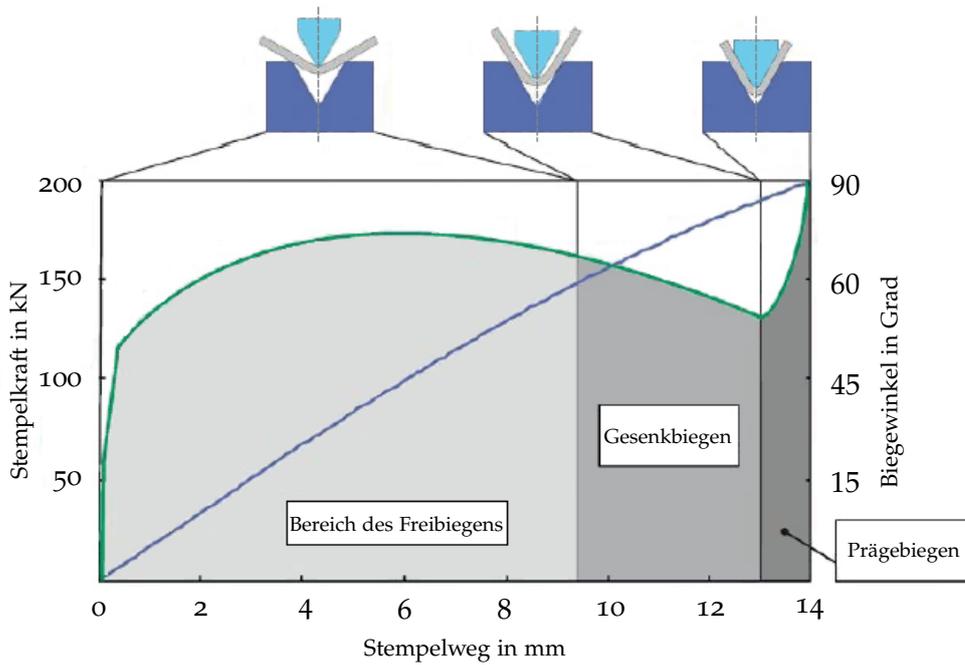


Abbildung 13: Phasen des Gesenkbiegens[Hof12]

berechnet werden. Es ist darin ersichtlich, dass nur die Blechstärke quadratisch und alle anderen Variablen linear in die Berechnung eingehen wobei die Gesenkweite indirekt proportional wirkt.

$$F_{St} = \left(1 + \frac{4 * t_0}{w}\right) * R_m * b * \frac{t_0^2}{w} \tag{1}$$

2.2.2.4 Rückfederung

Mit der Entlastung und dem Rückzug des Biegestempels federt ein gebogenes Blech in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften um einen bestimmten Winkel zurück. Das Verhältnis zwischen den Biegewinkeln bei erreichter Eintauchtiefe und dem entlasteten Fall wird als Rückfederungsverhältnis bezeichnet. In Abbildung 15 und Formel 2 ist α_1 ... Winkel unter Last, α_2 ... Winkel am Werkstück, t ... Blechdicke, r_{i1} ... Biegeradius unter Last r_{i2} ... Biegeradius am Werkstück. [KK05]

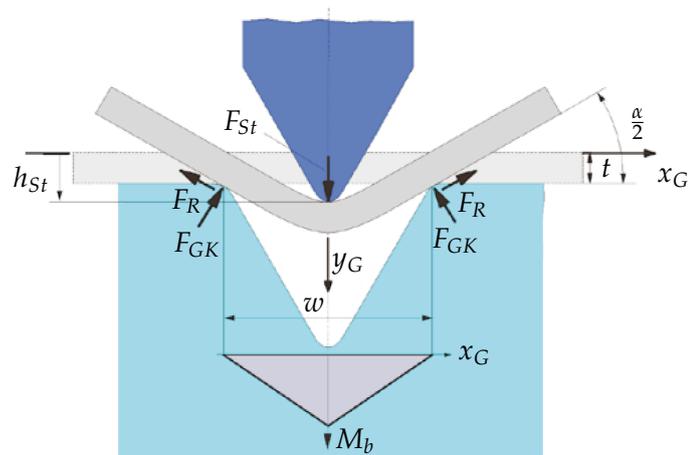
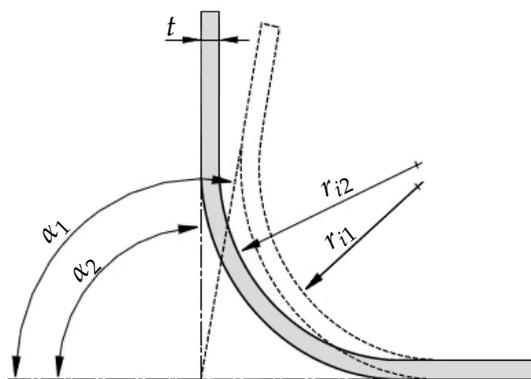


Abbildung 14: Kräftesituation beim Freibiegen [Hof12]



$$k_r = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_{i1} + 0.5t}{r_{i2} + 0.5t} < 1 \quad (2)$$

Abbildung 15: Rückfederung [KK05]

Die Rückfederung ist abhängig vom Werkstoff und der Verformung. Ein Vergleich der Rückfederungsverhältnisse verschiedener Werkstoffe zeigt, dass die Rückfederung mit abnehmendem Elastizitätsmodul, höherer Streckgrenze und höherem n-Wert, sowie einem steigendem Verhältnis r_i/t (d.h. bei großem Biegeradius) zunimmt. [DB10] Beim Freibiegen wird die Rückfederung durch Überbiegen kompensiert, wobei zu bemerken ist, dass der Winkel der Matrizenöffnung mindestens um den Betrag der Rückfederung kleiner als der zu erzielende Öffnungswinkel sein muss. Werte für Rückfederungsfaktoren k_r liegen in Tabellen und Diagrammen für verschiedene Werkstoffe vor. Beispielfhaft sind in Abbildung 16 unter anderem die Werte für einige typische Stahlbleche dargestellt.

2.2.2.5 Biegeverkürzung

Die Ermittlung der gestreckten Länge l_0 ist der Kerninhalt bei der Zuschnittsermittlung. Sie ist beim freien Biegen die Länge der ungelängten bzw. neutralen Faser des Werkstücks. Wie in

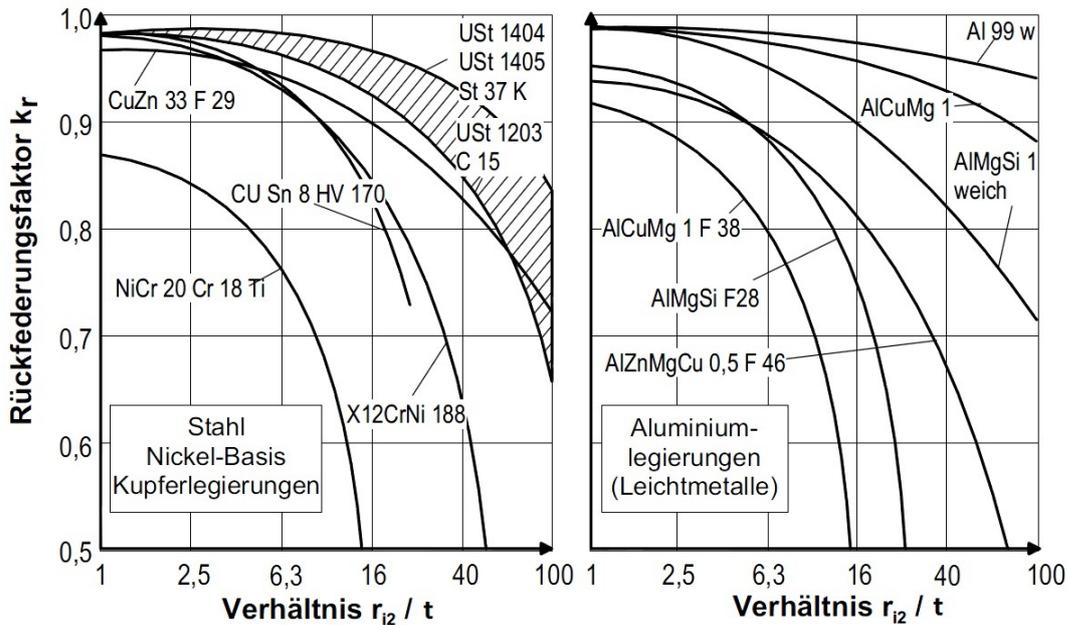


Abbildung 16: Rückfederungsdiagramm [KK05]

Abschnitt 2.2.2.1 behandelt, wandert die ungelängte Faser in der Realität bei der Umformung aus der Mitte hin zur Innenseite und liegt damit nicht, wie vereinfacht angenommen, in der Blechmitte. Dieses, mit vertretbarem Aufwand nicht exakt vorhersagbare Verhalten, erschwert die Ermittlung von l_0 . Die Biegeverkürzung ist dabei der fundamentale Teil.

Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Ermittlung der gestreckten Länge, wobei sich alle Methoden nur in der Art die Längenskorrektur, in Form der Biegeverkürzung v , vorzunehmen unterscheiden. Je nach verwendeter Methode unterscheiden sich die Maßzeichnungen der Werkstücke.

In Abbildung 17 ist ein Werkstück im Tangentenschnitt bemaßt und liefert wie dargestellt, alle notwendigen Größen für die nachfolgend vorgestellte, meist verwendete Berechnungsmethode. Bei ihr berechnet sich die gestreckte Länge l_0 laut nachstehender Formel 3 aus der Summe der Schenkellängen A und B und der Biegeverkürzung v , wobei diese zuerst selbst zu ermitteln ist. [N5]

$$l_0 = A + B + v \tag{3}$$

Die Biegeverkürzung v berücksichtigt die Materialverkürzung in der Biegezone und kann mit den nachstehenden Formeln laut DIN 6935 [N5] berechnet werden. Sie ist im Wesentlichen vom Öffnungswinkel, dem Biegeradius, der Blechstärke und den Materialeigenschaften abhängig. Dabei beinhaltet der Biegeradius implizit die verwendeten Werkzeuge.

Für einen Öffnungswinkel von 0° bis 90° berechnet sich die Biegeverkürzung mit:

$$v = \pi * \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) * \left(r_i + \frac{t}{2} * k \right) - 2 * (r_i + t) \tag{4}$$

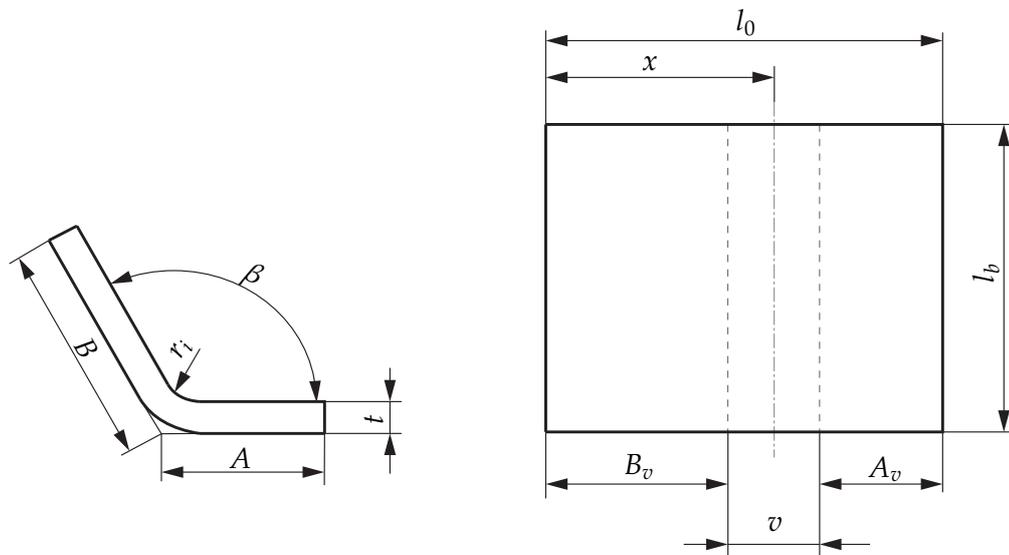


Abbildung 17: Berechnungsgrundlage der Biegeverkürzung

und für einen Öffnungswinkel von 90° bis 165° mit:

$$v = \pi * \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) * \left(r_i + \frac{t}{2} * k \right) - 2 * (r_i + t) * \tan \left(\frac{180^\circ - \beta}{2} \right) \quad (5)$$

Für Öffnungswinkel größer als 165° wird die Biegeverkürzung als Null angenommen.

Der in den Formeln 4 und 5 verwendete Korrekturfaktor der Biegeverkürzung k beschreibt die Abweichung der Lage der neutralen Faser zur Blechmitte und errechnet sich aus folgender Formel 6 für Stähle des Stahlbaus und des allgemeinen Maschinenbaus. Ab einem Verhältnis von $\frac{r_i}{t} > 5$ ist für den Korrekturwert der Wert 1 zu setzen.

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} \log \frac{r_i}{t} \quad (6)$$

Auch in [KP96] wurde ausgehend von der Dehnung im Außenrand die Verschiebung der ungedehnten Faser und damit die gestreckte Länge bestimmt. Aufgrund der schwierigen mathematischen Formulierung der exakten Zusammenhänge wird in der Praxis meist auf eine Berechnung der gestreckten Länge mit einer empirisch ermittelten Biegeverkürzung, siehe Abschnitt 5.3.2, zurückgegriffen. Dabei gibt es grundsätzlich keine allgemeingültigen Berechnungsvorschriften. Es werden vielmehr unternehmensspezifische Vorschriften erstellt. Formel 3 bleibt dabei in ihrer fundamentalen Form erhalten. Die Korrekturwerte der Biegeverkürzung, oder sie selbst, werden durch Versuche für die notwendigen Kombinationen aus Blech-, Material- und Werkzeugeigenschaften ermittelt und tabellarisch hinterlegt.

2.2.3 Grenzen des Verfahrens

Beim Auftreten von Anrissen in den Randlagen sind die werkstoffbedingten Verfahrensgrenzen des Umformprozesses Freibiegen erreicht. Diese Anrisse entstehen durch die Erschöpfung des Formänderungsvermögens des Werkstückmaterials. [Lang0]

Das heißt, dass ein kleinstzulässiger Biegehalbmesser nicht unterschritten werden darf, weil sonst Haarrisse an der Außenseite der Biegekante entstehen können, siehe Abbildung 18 links. Eine vereinfachte Möglichkeit der Abschätzung der Versagensgrenze kann mit Hilfe der Gleichmaßdehnung des umzuformenden Materials erfolgen. In [Kau12] wird die Entwicklung einer Methodik zur Identifikation der Schädigungsstadien und Ermittlung des Umformvermögens bei Biegebeanspruchung mittels optischer Dehnungsmessung vorgestellt. Quetschfalten (rechter Bildausschnitt) entstehen infolge zu hoher Materialbelastung an der Innenseite durch den Biegestempel und können durch eine geeignete Werkzeugwahl beeinflusst werden. [Hau06]

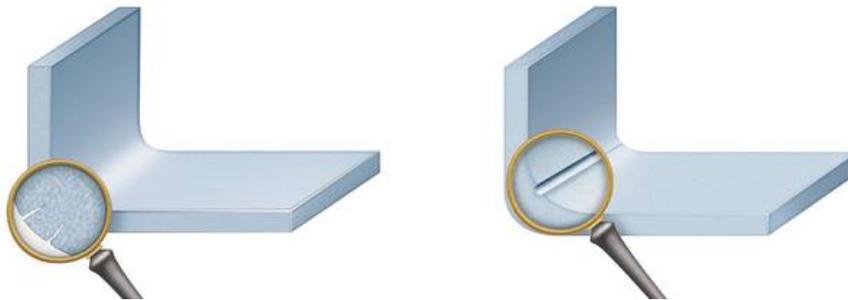


Abbildung 18: Haarrisse durch zu kleinen Biegehalbmesser und Quetschfalte auf der Innenseite

Neben den umformtechnischen Verfahrensgrenzen sind bei der Bauteilherstellung durch Freibiegen eine Reihe von meist geometrischen Prozesseinschränkungen in Bezug auf Biegewerkzeuge und Biegemaschinen zu berücksichtigen. Diese konstruktiven Randbedingungen werden in Abschnitt 6.1 detailliert behandelt.

2.3 WERKZEUGTECHNIK BEIM FREIBIEGEN

Biegewerkzeuge sind mechanische Präzisionsteile, die besonders stabil ausgebildet sein müssen. Es wird nach Standardwerkzeugen und Sonderwerkzeugen sortiert, wobei unzählige Werkzeughersteller dieselben Grundprinzipien verwenden.

2.3.1 Standardwerkzeuge

Die beim Freibiegen zur Herstellung verschiedenster Biegebauteile auf entsprechenden Biegemaschinen am häufigsten verwendete Werkzeugkombination besteht aus einer einfachen und starren Standardmatrize und einem geraden Biegestempel. Vergleiche dazu Abbildung 4 und 19. Standardmatrizen sind dabei Stahlblöcke in verschiedenen Längen mit einer V-förmigen Gesenköffnung und einer Vorrichtung zur Positionierung und Fixierung in der Biegepresse.



Abbildung 19: Standardwerkzeuge beim Freibiegen

Die Wirkflächen sind meist, wie in Abbildung 19 rechts an einem Schlitfbild dargestellt, mit 60 bis 62 HRC lasergehärtet. Diese einfachste Ausführung von Biegegesenken ist sehr flexibel in Bezug auf die damit herstellbaren Werkstückgeometrien, mit sehr geringen Kosten verbunden und deshalb sehr weit verbreitet. Für den Biegestempel gilt im Wesentlichen dasselbe. Biegegesenke sind in diskreten Abstufungen der Gesenkweite und Biegestempel mit verschiedenen Stempelradien vertreten. Auch die Werkzeuglänge ist für die einzelnen Abstufungen in diskreten Schritten verfügbar. Biegelinienlängen, die länger als die Einzelwerkzeuglängen sind, können als Kombination von diskreten Einzelstücken realisiert werden. In Abbildung 19 ist ein Werkzeugmagazin mit verschiedenen Standardwerkzeuggeometrien in unterschiedlichen Längen dargestellt. Das Thema Werkzeugauswahl wird unter Punkt 5.1.1.1 behandelt.

2.3.2 Sonderwerkzeuge - Gesenkweitenverstellbare Biegematrizen

Als Ergänzung zu den sehr günstigen Standardwerkzeugen ist eine Reihe von herstellerspezifischen Sonderwerkzeugen am Markt verfügbar, die der Produktivitätssteigerung des Freibiegens dienen. Gesenkweitenverstellbare Biegewerkzeuge sind Inhalt einer speziellen Gruppe der Sonderwerkzeuge. Solche Spezialwerkzeuge ersetzen eine Reihe von verschiedenen Standardmatrizen, vermindern damit Rüstzeiten und tragen laut verschiedener Werkzeughersteller zur Wirtschaftlichkeit des Biegeprozesses bei. Wesentliche Anforderungen an eine verstellbare Biegematrize sind dabei eine robuste, symmetrische Verstellbarkeit und eine hohe Steifigkeit. Folgend sind, nach deren Verstellprinzipien sortiert, beispielhaft die verfügbaren Typen dieser Werkzeugart angeführt.

VERSTELLUNG DURCH EINLEGETEILE

Die Größe der Gesenkweite, der symmetrisch ineinander geschobenen kammartigen Einzelelemente, wird bei diesem Werkzeugtyp durch Einlegeleisten, wie in Abbildung 20 dargestellt, eingestellt und in einer definierten Position gehalten. Damit sind theoretisch beliebige Gesenkweiten einstellbar. Praktisch sind aber nur definierte Abstufungen von Einlegeleisten vorhanden. Die Werkzeuge werden für Gesenkweiten von 25 -125 mm, bzw. 65 -185 mm, bzw. 120 -300 mm, bzw. 150 -400 mm und den entsprechenden Einlegeleisten angeboten. Abbildung 20 rechts zeigt die größtmögliche Stellung der Gesenköffnung. Dabei können die Einlegeleisten entfallen, da die verschiebbaren Elemente über den Matrizenkörper fixiert sind. Der Einzugsbereich ist mit drehenden und gehärteten Einlaufwellen zum abdruckarmen Biegen realisiert. Unter anderem wird dieser Werkzeugtyp von den Firmen UKB - Uwe Krumm Burbach GmbH und VLM bvba hergestellt.

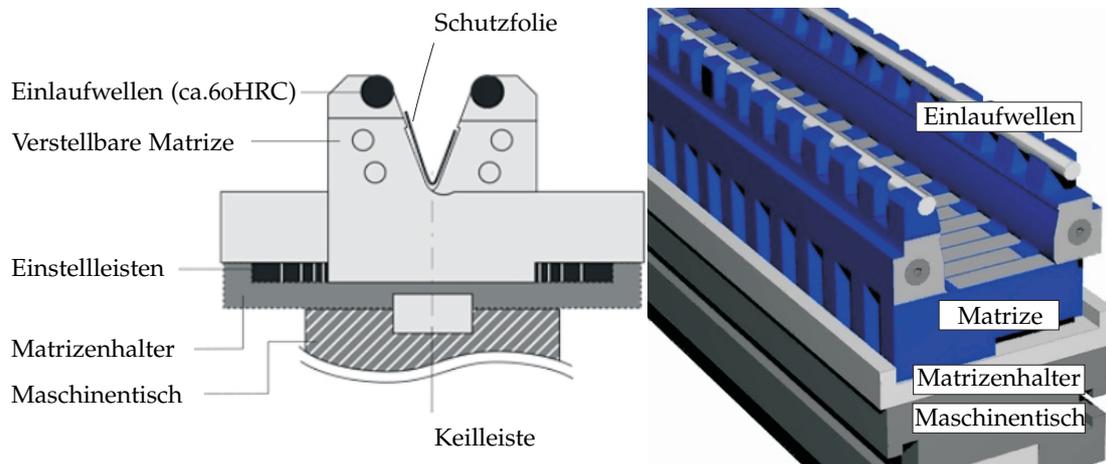


Abbildung 20: Verstellbare Biegematrize mit Einlaufwellen, links [UKBa], rechts [VLM]

Eine sehr ähnliche Möglichkeit bei diesem Typ der Verstellung ist in Abbildung 21 links schematisch dargestellt. Die verstellbare Matrize kann einfach durch Austausch der Einstellleisten

in mm-Schritten verändert werden. Die Einstelleisten werden dabei zwischen Werkzeugeinsatz und Matrizenhalter gelegt, wie im rechten Teil des Bildes dargestellt. Hierin ist auch deutlich die robuste Ausführung solcher Werkzeuge zu sehen. Die einstellbaren Öffnungsweiten sind hierbei 40 -100 mm. Die Besonderheit bei diesem Werkzeug ist die zusätzliche Austauschbarkeit der Werkzeugeinsätze für verschiedene Biegeaufgaben. Dieses Prinzip verwendet neben der Firma UKB - Uwe Krumm Burbach GmbH auch die Firma Wila.

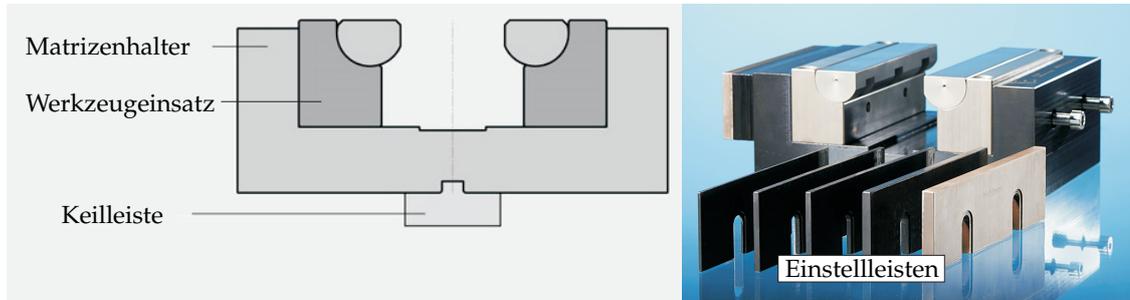


Abbildung 21: Verstellbare Matrize mit austauschbaren Werkzeugeinsätzen, links [UKBb], rechts [Sch]

GESENKBACKENPOSITIONIERUNG MIT HILFE VON VERZÄHNUNGEN

Ein weiteres System zur Verstellung zeigt Abbildung 22. Die Biegebacken werden dabei mit Hilfe von Verzahnungen diskret positioniert und durch Schrauben fixiert. Dieses System wird als manuelle Verstellung mit Schraubbefestigung und als halbautomatische Verstellung durch einen Kurbeltrieb von der Firma vertrieben.



Abbildung 22: Gesenkbackenpositionierung mit Hilfe von Verzahnungen [Acc]

GESENKWEITENVERSTELLUNG DURCH EINEN SPINDELTRIEB

Bei dieser Verstellmöglichkeit können die Gesenkbacken durch eine Gewindespindel mit Selbsthaftung leicht positioniert werden. Jeder Schraubstock funktioniert nach diesem Prinzip. Das flexible Unterwerkzeug EHT VarioTool hat ein entsprechendes System, welches, wie in Abbildung 23 links dargestellt, aus bis zu sechs Werkzeugstationen für Gesenke von 120 -300 mm besteht. Das Werkzeug kann manuell oder automatisch verstellt werden. Eine automatische Verstellung kann, wie im rechten Bildabschnitt gezeigt, über einen elektrischen Spindeltrieb erfolgen.



Abbildung 23: Matrizenverstellung durch Spindeltrieb, links [EHTb], rechts [ADR]

GESENKWEITENVERSTELLUNG DURCH EINE HORIZONTALE KEILVERSTELLUNG
 Eine horizontale Keilverstellung, wie in Abbildung 24 links dargestellt, ist derzeit nicht am Markt verfügbar. Die patentierte Matrize [Fab02] ermöglicht eine stufenlose Verstellung. Die Positionierung der im Matrizenhalter quer zur Gesenköffnung geführten Gesenkbacken erfolgt dabei durch eine horizontale Relativbewegung von schräg zur Bewegungsrichtung angestellten Flächen des Keilschiebers. In diesem Fall wird die Relativbewegung durch einen Spindeltrieb erzwungen. Ein weiteres Konzept dieser Verstellung mit optionalen Werkzeugeinsätzen [Sul96] ist in der rechten Bildhälfte dargestellt.

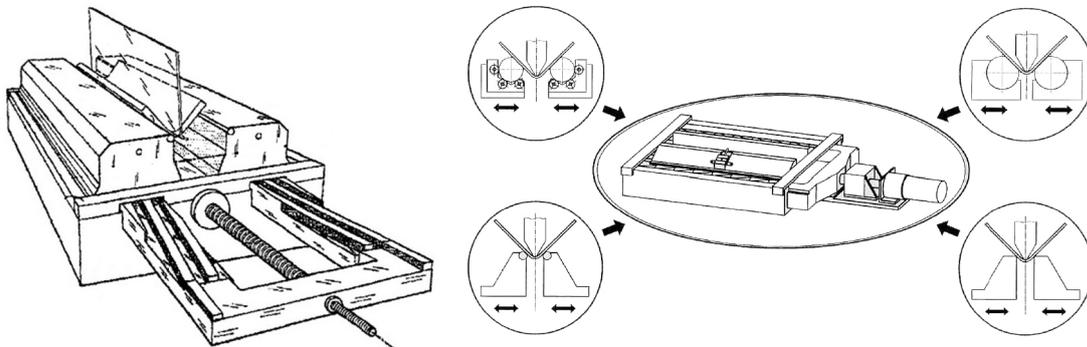


Abbildung 24: Verstellbare Matrize mit horizontaler Keilverstellung

ZUSAMMENFASSEND kann festgehalten werden, dass die einfachen verfügbaren Verstellkonzepte meist grobe diskrete Verstellmöglichkeiten durch Einlegeteile aufweisen und eher für schwere Kantaufgaben ausgelegt sind. Im Bereich der stufenlosen Verstellmöglichkeiten erfolgt die Positionierung der Gesenkbacken durch Spindel- und Keilprinzipien. Mit der Komplexität der Werkzeuge steigen die Möglichkeiten einer Automatisierung aber proportional auch der Preis. Die Verstellung kann generell manuell oder automatisch erfolgen und ist nur für chargenweises Verstellen konzipiert. Durch die zusätzlichen Verstelleinheiten für eine automati-

sche Verstellung sind solche Konzepte nicht auf jeder Maschine anwendbar. Die Werkzeughöhe bleibt bei allen Konzepten konstant.

2.4 ANWENDUNGSGEBIETE DES FREIBIEGENS

Zu den aktuell standardmäßigen Einsatzgebieten des Biegeumformens zählen zum einen die Einzelfertigung im Kessel-, Behälter-, und Schiffsbau und zum anderen die Massenproduktion kleinerer Bauteile im Automobilbau, sowie die Herstellung verschiedenartiger Profile und Wellbleche. Bei der Blechbearbeitung steht das Biegen als Umformverfahren neben dem Tiefziehverfahren an forderster Front. [KK05] Zusätzliche Anwendungsbereiche sind der Fahrzeug- und Flugzeugbau, die Landmaschinenherstellung, die Herstellung von Möbeln und Dekoration durch Biegen, der Automatenbau und viele weitere. Dieses breite Anwendungsfeld ergibt sich aus den flexiblen und wirtschaftlichen Eigenschaften des Freibiegens. In Abbildung 25 sind verschiedene, durch Freibiegen hergestellte Biegebauteile aus den angeführten Anwendungsbereichen dargestellt. Dazu gehören Abdeckungen für verschiedenste Gehäuse, Geräteträger (oben mitte), Verteilerschränke und Führungseinrichtungen oder auch Transportmittel (unten rechts). Im Bereich der Automobilproduktion beschränkt sich derzeit die Anwendung jedoch auf einige Kleinteile in Form von L- oder U-Profilen.

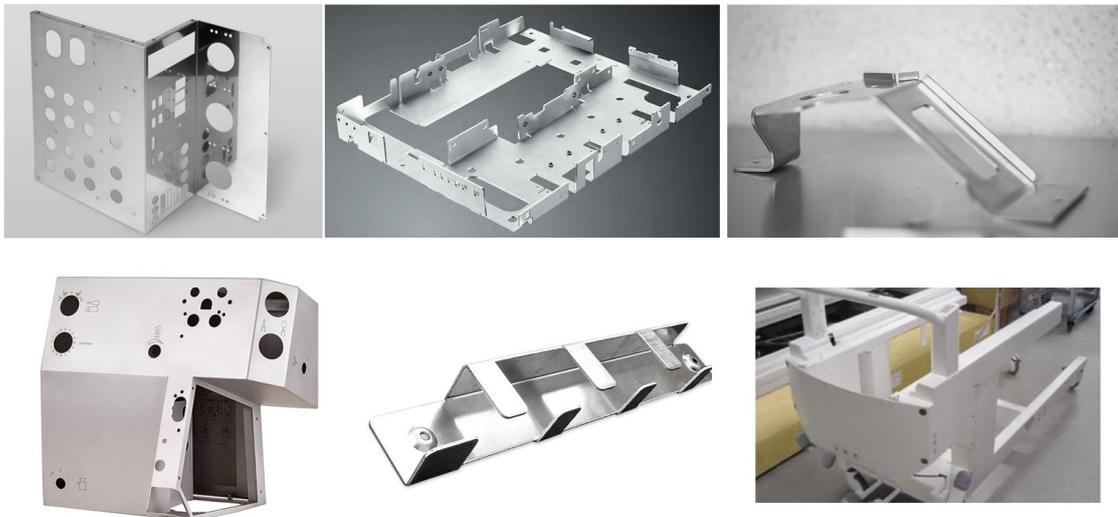


Abbildung 25: Musterbauteile

Zusätzlich zu diesen Standardanwendungen gibt es Bereiche in denen Bauteile beziehungsweise Baugruppen durch funktionelle Biegebauteile ersetzt werden und gleichzeitig durch Ausnutzung der Vorteile des Verfahrens der Aufwand reduziert und die Wirtschaftlichkeit erhöht wird. Am Beispiel einer Befestigungskonsolle [Tru12], siehe Abbildung 26, kann gezeigt werden, dass durch eine genaue Analyse der Bauteilfunktionen und eine Neukonstruktion die Reduktion von Bearbeitungsschritten bei der Erhaltung der Funktionen und Eigenschaften möglich

wird und gleichzeitig eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann. Ausgehend von einer Schweißkonstruktion, bestehend aus zwei gesägten und mechanisch bearbeiteten Einzelbauteilen (links im Bild), erfolgt in einem ersten Schritt eine Überführung zu einer Schweißkonstruktion aus zwei, mit lasergeschnittenen Platinenzuschnitten, hergestellten Biegebauteilen (mittlere Abbildung). Durch eine weitere Überarbeitung kann die Befestigungskonsole mit gleichen Verwendungseigenschaften als selbstständiges Biegebauteil (rechter Bildausschnitt) durch nur vier Biegungen aus einem Laserzuschnitt hergestellt werden und die Produktionskosten damit deutlich reduziert werden. Dies lässt den Schluss zu, dass ein wesentlicher Punkt für eine effiziente Ausnutzung von Ressourcen eine detaillierte Analyse und eine ganzheitliche Prozessbetrachtung bei der Bauteilherstellung ist.



Abbildung 26: Befestigungskonsole

ZIELSETZUNG UND VORGEHEN

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung einer durchgängigen Methode zur Herstellung von Biegebauteilen bei der Substitution von komplexen, hoch- und höchstfesten Schalenbauteilen mit gleichen oder gar verbesserten Bauteileigenschaften und reduziertem wirtschaftlichen Aufwand für Kleinserien im Vergleich zu herkömmlichen Herstellverfahren. Die exemplarische Anwendung der Methode zur Demonstration der Funktionsweise und der damit einhergehende Nachweis der Herstellbarkeit komplexer Schalenbauteile durch Freibiegen ist dabei von großer Bedeutung. Zusammenhänge sind darzustellen und durch eine durchgängige Prozessbetrachtung Schwachstellen aufzudecken und mit einer konzeptionellen Prozessverbesserung entsprechend zu beheben, damit das volle Potential dieses Herstellverfahrens bei der Substitution von Schalenbauteilen ausnutzbar ist. Der übergeordnete Zweck der Arbeit ist eine damit hervorgerufene Erweiterung der Anwendungsgebiete des Freibiegens.

Zur Zielerreichung soll in einem ersten Schritt der Iststand des Freibiegeprozesses und dessen Anwendungsbereiche, sowie die Potentiale, wie zum Beispiel die Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der Bauteilherstellung für die erweiterte Nutzung des Produktionsverfahrens Freibiegen, dargestellt werden. Zusätzlich sollen Alleinstellungsmerkmale aufgezeigt und das konkrete Erweiterungsfeld als Basis für die folgende Arbeit anhand eines wirtschaftlichen Verfahrensvergleichs definiert werden und Referenzbauteile ausgewählt werden. Darauf aufbauend soll der Gesamtprozess beim Freibiegen dargestellt und notwendige Prozessverbesserungen erarbeitet werden. Hauptaugenmerk ist dabei auf die Flexibilität und Maßhaltigkeit zu legen. Konstruktive Umsetzungsmöglichkeiten für Bauteile des neuen Anwendungsgebietes mit erhaltenen oder verbesserten Eigenschaften sind ein weiterer Teilbereich der Entwicklung einer durchgängigen Methode zur Bauteilherstellung. Am Beispiel eines im Rahmen der Erweiterung des Anwendungsbereiches liegenden Bauteils ist abschließend die durchgängige Anwendbarkeit der erarbeiteten Methode zu demonstrieren und die zukünftigen Anwendungen des Herstellverfahrens Freibiegen einzuschätzen.

Zusätzlich zum definierten Ziel soll durch die Erarbeitung dieser durchgängigen Methode das Freibiegen und der zugehörige Herstellungsprozess einer breiteren Anwendungsgruppe zugänglich und verständlich gemacht werden und zeigen, dass das Freibiegen nicht nur für einfache Bauteile geeignet ist. Dabei sind die Inhalte nicht zwingend an das neue Anwendungsgebiet gebunden, sondern können jederzeit in weiteren Gebieten Anwendung finden. Darüber hinaus können die vorgestellten Prozesszusammenhänge und Verbesserungspotentiale des Freibiegeprozesses auch für aktuelle Anwendungsgebiete einen deutlichen Mehrwert aufweisen.

Leerseite

ERWEITERUNG DER ANWENDUNGSGEBIETE

Am einfachen Beispiel der Befestigungskonsole aus Abschnitt 2.4 kann bereits das Potential der Biegetechnologie abgeleitet werden. Zusätzlich ist darin auch ersichtlich, dass die Kenntnis der Rahmenbedingungen eines Fertigungsverfahrens zwingend notwendig sind, damit die Vorteile eines Verfahrens zur Gänze ausgenutzt werden können. Erst die ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette macht die Herstellung von Biegebauteilen zu einem komplexen Ablauf mit großem Potential.

4.1 POTENTIELLE ANWENDUNGSBEREICHE

Ein Bereich mit großem Potential ist die Substitution bestehender komplexer Schalenbauteile. Wie schon in der Einleitung dargestellt, bestehen Autokarosserien aus einzelnen mehr oder weniger komplexen Schalenbauteilen, die durch Warm- oder Kaltumformen, meist durch Tiefziehen, hergestellt werden. Bei der Herstellung solcher funktioneller Bauteile gibt es neben einer kritischen Stückzahl auch noch weitere Punkte, wie zum Beispiel die Herstellung hinterschnittiger Bauteile, die Funktionsintegration und die Prozesseingriffsmöglichkeiten, die andere Verfahren konkurrierend zulassen. Zusätzlich geht der Trend in der Automobilindustrie zur Dickenreduktion der Blechstärke bei gleichzeitiger Steigerung der Festigkeit. Gerade hohe Festigkeiten bringen geringe Bruchdehnungen mit sich. Dies erzeugt Probleme mit der Formbarkeit in Bezug auf komplexe Geometrien, wodurch herkömmliche Verfahren an ihre Grenzen stoßen und eine wirtschaftliche Fertigung nicht mehr zu lassen. Neuartige Konzepte, wie zum Beispiel die Herstellung von Schalenbauteilen durch das Freibiegen, haben in diesem Zusammenhang jetzt eine große Chance sich zu etablieren. Als Entscheidungsgrundlage für das potentielle neue Anwendungsgebiet wird in Abschnitt 4.2 ein Verfahrenvergleich durchgeführt.

Weitere Bereiche neben der Substitution von Karosseriebauteilen sind alle Bereiche in denen durch die Substitution von Schweißbaugruppen oder Fräsbauteilen Herstellprozesse optimiert und Kosten reduziert werden können. Durch einen ganzheitlichen Ansatz sind dabei zusätzliche Verbesserungspotentiale in folgenden Bereichen zu erwarten.

- Weniger Schweißen durch das Ersetzen von Schweißnähten durch Biegungen.
- Aufwandsreduktion im Vorrichtungsbau.
- funktionelle Präzisionsbiegeteile durch genauere Herstellverfahren.

4.2 ERWEITERUNGSFELD

Zur Abschätzung des Potentials des Freibiegens bei der Herstellung von funktionellen Schalenbauteilen in der Automobilindustrie und als Entscheidungsgrundlage für die Definition eines Erweiterungsfeldes bei der Anwendung des Freibiegens ist folgend ein Verfahrensbenchmark auf Basis einer Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) für die Technologien Freibiegen und Tiefziehen angeführt. Vergleichend werden in dieser vereinfachten KNA die geschätzten Bauteilherstellkosten bestehend aus variablen und fixen Investitions- und Prozesskosten für einen Seitenaufprallträger einer aktuellen Fahrzeugkarosserie, siehe Abbildung 103, durch genaue Betrachtungen und detaillierte Aufschlüsselungen der einzelnen Teilbereiche gegenübergestellt.

Die wesentlichsten Unterschiede bei den Herstellverfahren liegen im Bereich der Investitionskosten für Presse und Werkzeug [BHS13], sowie den damit verbundenen Folgekosten. Zwanzig Umformstufen zu je zehn Sekunden mit Standardwerkzeugen auf einer Biegemaschine für den Biege-seitenaufprallträger haben bei einer jährlichen Planarbeitszeit von 4400 Stunden eine Kapazitätsgrenze von maximal 79200 Bauteile zur Folge. Die jährliche Kapazitätsgrenze bei der Herstellung durch Tiefziehen liegt mit einer Umformstufe zu 20 Sekunden um den Faktor 10 höher. Der einflussreichste Kostenfaktor bei der Kostenermittlung variabler Basis ist der Betriebskostensatz in Euro pro Stück. Er setzt sich aus Anlagenstundensatz und planmäßiger Ausbringung zusammen.

Bezogen auf die Bauteilstückzahl ergibt die Summe der errechneten Gesamtkosten beim verwendeten Modell einen linearen Kostenverlauf bei beiden Herstellverfahren. Aus der Darstellung der beiden Kostenverläufe in einem Diagramm, siehe Abbildung 27, kann der Schnittpunkt der Geraden und damit eine Grenzstückzahl zur Verfahrensbewertung sichtbar gemacht werden. Die Grenzstückzahl liegt bei 59811 Stück.

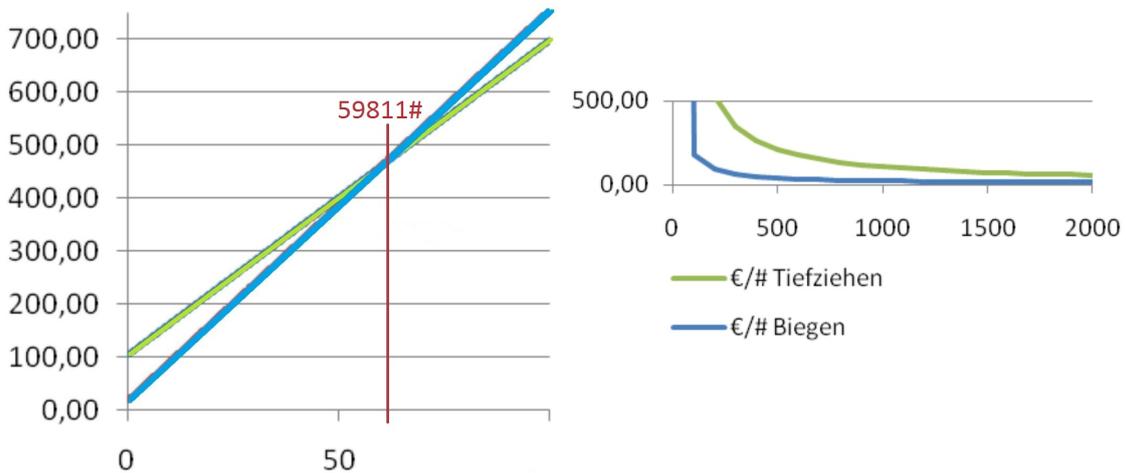


Abbildung 27: Stückzahlabhängige (in tausend) Gesamtkosten und Stückkostenverlauf (rechts)

Eine zusätzliche Darstellung im rechten Bildabschnitt stellt die Abnahme der Stückkosten bei zunehmender Stückzahl dar. Dabei ist klar ersichtlich, dass diese beim Biegen aufgrund der

deutlich geringeren Fixkosten schon bei kleinsten Stückzahlen niedrig sind. Im Detail bedeutet das, dass bis zu dieser Grenzstückzahl die Gesamtkosten des Herstellverfahrens Biegen geringer als jene des Tiefziehens sind und damit der wirtschaftliche Vorteil dieses Verfahrens bei geringen Stückzahlen quantifiziert werden kann.

Diese Herangehensweise ist für eine grundsätzliche Abschätzung der Wirtschaftlichkeit ausreichend. Genauere Betrachtungen müssen bauteilabhängig erstellt werden, da der Bauteildurchsatz beim Biegen einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat und selbst sehr stark von der Anzahl der Kantungen bestimmt wird. Durch einen erhöhten Automatisierungsgrad und die Verwendung von Sonderwerkzeugen kann diese Grenzstückzahl enorm verbessert werden. Neben dem wirtschaftlichen Aspekt kann das Herstellverfahren Freibiegen im Gesamtprozess, siehe Abschnitt 5.1, gegenüber dem Tiefziehen weitere Vorteile, wie zum Beispiel die Herstellung hinterschnittiger Werkstücke ohne Zusatzaufwand und die einfachen Prozesseingriffsmöglichkeiten in Bezug auf Korrekturen, ausspielen. Trotz der vielen Vorteile, siehe Abschnitt 5.1.2, hat es aber auch einige Eigenschaften, die für eine wirtschaftliche Serienproduktion eine deutliche Verbesserung erfordern. Unter Punkt 5.1.6 werden die Verbesserungspotentiale ausführlich behandelt.

Zusammenfassend kann das Freibiegen als geeignetes Produktionsverfahren zur Herstellung komplexer, funktioneller Schalenbauteile bewertet werden und als geeignete Erweiterung der Anwendungsgebiete beim Freibiegen eingestuft werden.

Leerseite

FREIBIEGEN BEI DER HERSTELLUNG VON FUNKTIONALEN SCHALENBAUTEILEN

Bezugnehmend auf das in Kapitel 4 definierte Erweiterungsfeld wird im Folgenden zuerst der Gesamtprozess Freibiegen genau analysiert, Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet und schließlich unter einer ganzheitlichen Betrachtung konkrete Bauteile für das Freibiegen bei der Herstellung von funktionalen Schalenbauteilen ausgewählt.

5.1 GESAMTPROZESS FREIBIEGEN

Freibiegen ist ein hochflexibles Fertigungsverfahren zur Herstellung dreidimensionaler Bauteile aus ebenen Blechzuschnitten. Nur die exakte Kenntnis aller Einflussparameter des Freibiegeprozesses ermöglicht die reproduzierbare Produktion qualitativ hochwertiger Bauteile ohne lange Rüstzeiten. Eine geeignete Vorhersage der notwendigen Prozessparameter vermindert dabei den Ausschuss und erhöht gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit des Herstellverfahrens und verkürzt Durchlaufzeiten.

Im Stand der Technik wurde der Umformprozess des Freibiegens erläutert. Freibiegen zur Herstellung von komplexen Blechbauteilen bedarf aber einiger zusätzlicher Arbeitsschritte. Nur die Betrachtung des gesamten Herstellungsprozesses ermöglicht eine optimale Ausnutzung der Potentiale.

In diesem Kapitel werden genau diese Potentiale dargestellt. Des Weiteren werden unter anderem wesentliche Einflussparameter identifiziert, Zusammenhänge dargestellt und Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Damit sollen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine praxisorientierte Erweiterung des Anwendungsgebietes Freibiegen erlauben.

5.1.1 Gesamtprozessbeschreibung

Der Gesamtprozess des Freibiegens ist als Analyseergebnis in Abbildung 28 dargestellt und wird folgend beschrieben. Der eigentliche Umformprozess ist im Ablaufdiagramm bei der Bauteilherstellung eingegliedert.

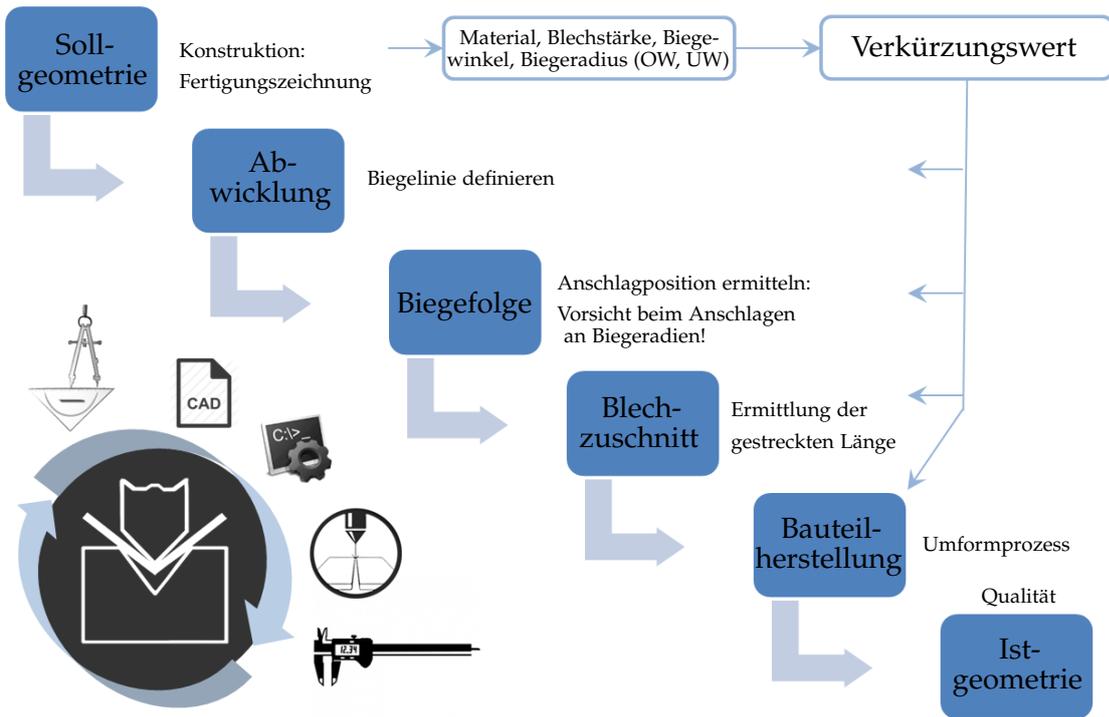


Abbildung 28: Gesamtprozess Freibiegen

5.1.1.1 Sollgeometrie

Bei der konstruktiven Umsetzung eines Biegebauteils sind die Gestaltungsrichtlinien der Freibiegetechnologie zu berücksichtigen. Siehe dazu Kapitel 6. Die Fertigungszeichnung, als Ergebnis der Erzeugung einer Sollgeometrie des Werkstückes, enthält alle notwendigen Angaben für dessen Herstellung.

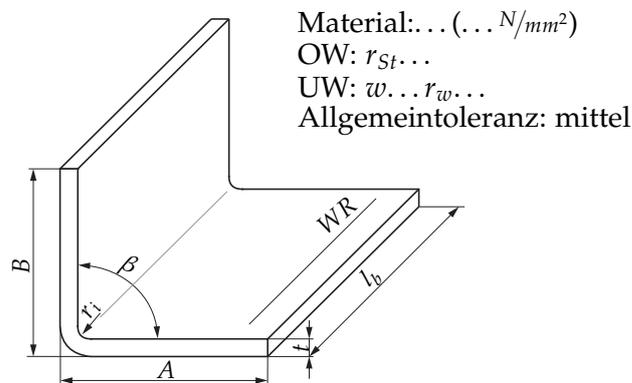


Abbildung 29: Sollgeometrie

Abbildung 29 zeigt beispielhaft einen Auszug einer entsprechenden Fertigungszeichnung. Die darin enthaltenen Kerninformationen für den weiteren Ablauf sind geometrische Abmessungen wie Biege- oder Öffnungswinkel, Biegeradien, Schenkellängen, Länge der Biegelinie und Blechstärke sowie Informationen zum Blechmaterial wie Festigkeit und Walzrichtung. Zusätzlich sind Angaben bezüglich der zu verwendenden Werkzeuge und einzuhaltender Toleranzen erforderlich.

Die wesentlichen Werkstückparameter in Bezug auf die Istgeometrie des fertigen Werkstücks sind Schenkellänge und Biegewinkel.

WERKZEUGAUSWAHL

Im Wesentlichen kann mit der Werkzeugwahl innerhalb definierter Grenzen die Geometrie der Umformzone bestimmt werden. Diese stellt damit einen essentiellen Punkt für die weitere Prozesskette dar. Theoretisch werden die Werkzeuge durch den in der Fertigungszeichnung definierten Biegeradius vorgegeben und über den Stempelradius, die Gesenkweite und den Einzugsradius des Biegegesenkes charakterisiert. In der Praxis sind aber nicht beliebige Kombinationen aus Stempel und Matrize vorhanden und zusätzlich ist ein konstanter Biegeradius verfahrensbedingt durch Freibiegen nicht herstellbar. Deshalb ist ein definierter Biegeradius beim Freibiegen nur als Richtwert anzusehen.

Für die Werkzeugauswahl finden Empfehlungen der verschiedenen Werkzeughersteller Anwendung. Die Gesenkweite ist dabei von der Blechstärke abhängig und wird als Kompromiss zwischen gewünschtem Biegeradius, Rückfederung und Werkzeugbelastung ausgewählt und hat beim Freibiegeprozess den wesentlichsten Einfluss auf den Biegeradius. Wichtige Punkte sind in diesem Zusammenhang die maximal zulässige Werkzeugbelastung, welche meist in kN/m angegeben ist und die minimale Schenkellänge des Werkstücks, die größer als die halbe Gesenkweite sein muss. In der Praxis wird aus Kostengründen häufig aber nur nach Werkzeugverfügbarkeit gehandelt. In der nachfolgender Darstellung 30 ist die Empfehlung der Firma Trumpf dargestellt.

Blechdicke s:	0,5 - 2,6mm	3,0 - 8,0mm	9,0 - 12,0mm
Gesenkweite w:	6 * s	8 * s	10 * s

Abbildung 30: Gesenkweitenempfehlung [TRU06]

5.1.1.2 Abwicklung und Biegefolge

Ein Flächenstück ϕ heißt abwickelbar, wenn es eine globale und injektive Abbildung von ϕ in eine Ebene ϵ gibt, sodass jeder Kurve $c \subset \phi$ eine gleichlange Kurve d in ϵ zugeordnet wird. Die Menge der Bildpunkte bei dieser Abbildung heißt Verebnung der Fläche ϕ . Eine Fläche heißt abwickelbar, wenn sie eine Vereinigungsmenge abwickelbarer Flächenstücke ist. [Bra86] In der Definition der Abwicklung wird

die zentrale Forderung nach der bogenlängentreuen Abbildung einer Kurve erhoben. Weiters sieht man unmittelbar ein, dass die Abwicklung geradentreu ist, d.h. eine Gerade auf der Fläche ϕ geht in eine Gerade der Verebnung über. Umgekehrt ist diese Behauptung allerdings falsch. Einen exakten Beweis für diese beiden Eigenschaften kann nur die Differentialgeometrie liefern.

Als Abwicklung eines Blechbauteils wird einfach gesagt die zu einem dreidimensionalen Werkstück gehörende, ebene Basisgeometrie bezeichnet, die im Weiteren durch die Umformung entlang der Biegelinie zur konstruierten Geometrie verwandelt wird. Beim Abwickeln wird die Werkstückgeometrie durch einzelne ebene Teilflächen, ohne Verzerrung, glatt in einer Ebene entsprechend kombiniert. Voraussetzung dafür ist, dass die Werkstückgeometrie abwickelbar ist.

Spätestens an dieser Stelle des Gesamtprozesses muss der Verkürzungswert v zur Ermittlung der gestreckten Länge ermittelt werden, siehe dazu Abschnitt 2.2.2.5. Wie in Abbildung 28 dargestellt sind die Kerninformationen der Sollgeometrie Grundlage für diese Ermittlung. Dabei gilt größte Sorgfaltspflicht, da der Verkürzungswert bei allen weiteren Schritten des Gesamtprozesses direkt oder indirekt Verwendung findet.

Anschließend wird die Biegelinie definiert und in die Abwicklung eingetragen. Neben dem Biegewinkel und einer fortlaufenden Biegelinienummer ist in diesem Zusammenhang mit oben oder unten die Richtung der Schenkelumformung anzugeben und unter Berücksichtigung der Rückfederung die kollisionsfreie Herstellbarkeit des Biegebauteils zu überprüfen. Abbildung 31 zeigt die Abwicklung eines einfachen L-Winkels mit Biegelinie und den beschriebenen Informationen. Die Position der Biegelinie x definiert die Anschlagposition und kann für den ersten Schenkel mit folgender Formel berechnet werden. Die dazugehörige Fertigungszeichnung mit der Schenkellänge A ist oben im Abschnitt Sollgeometrie dargestellt.

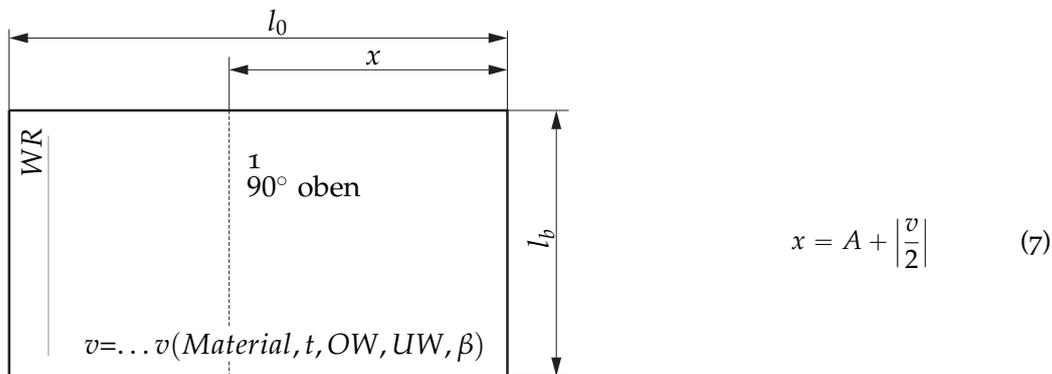


Abbildung 31: Abwicklung

Sind mehrere Biegelinien auf einer Abwicklung vorhanden, ist in Abhängigkeit der verwendeten Werkzeuge eine geeignete Biegefolge zu bestimmen. Als Unterstützung in Bezug auf Abwicklung, Biegelinie, Anschlagposition und Biegefolge sind am Markt verschiedene Softwareprodukte verfügbar. Der Biegeprozess wird damit unter realen Bedingungen virtuell simuliert und verhindert dadurch Ausschuss.

Die gesammelten Informationen aus Fertigungszeichnung, Abwicklung und Biegefolge werden für das Weitere als Fertigungsunterlagen bezeichnet.

5.1.1.3 *Blechzuschnitt*

Die Zuschnittsermittlung erfolgt auf Basis der Umrandung der abgewickelten Fläche und durch die Aufsummierung der bei der Definition der Biegelinien gefundenen Teillängen. Die erforderlichen Längen sind in Abbildung 31 eingetragen. Für einen L-Winkel erfolgt die Berechnung nach Formel 3.

$$l_0 = A + B + v$$

Der eigentliche Zuschnitt erfolgt durch ein trennendes Verfahren aus Blechtafeln oder vom Coil. Als wesentliches Kriterium für die Auswahl des Schneidverfahrens ist die individuell geforderte Schnittqualität. Die gängigsten Verfahren sind dabei Laserschneiden oder Nibbeln.

5.1.1.4 *Bauteilherstellung an der Biegemaschine*

Die Bauteilherstellung an einer Biegemaschine erfordert die Fertigungsunterlagen aus den vorhergehenden Schritten und den Blechzuschnitt. Der hier durchgeführte Umformprozess Freibiegen ist bereits unter Punkt 2.2.1 ausführlich erklärt. Abhängig vom verwendeten Maschinentyp werden die Positionierung der Anschläge, das Rüsten der Werkzeuge, die Ermittlung der Eintauchtiefe der Werkzeuge und das Einstellen der Maschinenparameter wie zum Beispiel der Pressgeschwindigkeit und verschiedener Korrekturwerte je nach Automatisierungsgrad manuell bis vollautomatisch durchgeführt.

5.1.1.5 *Qualitätskontrolle der Istgeometrie*

Das fertige Werkstück ist nach dessen Herstellung einer Qualitätskontrolle zu unterziehen. Die Erfassung der Istgeometrie und der Vergleich mit der Sollgeometrie bestimmt abhängig von den angegebenen Toleranzen in der Fertigungszeichnung die Güte des Werkstücks. Treten Abweichungen auf ist eine Fehleranalyse und die Bestimmung von Korrekturfaktoren erforderlich. Der Geometriefehler ist umso kleiner, je besser die Istwerte der Bauteilherstellung den Soll- und Datenbankwerten entsprechen.

5.1.2 Vor- und Nachteile

Das Biegen ist aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit sehr weit verbreitet und es lassen sich komplexe Geometrien herstellen. Bei der folgenden Auflistung von Vorteilen des Freibiegens beziehen sich Vergleiche auf das Umformverfahren Tiefziehen.

- Hohe Flexibilität und Wirtschaftlichkeit.
- Kurze Bauteilentwicklungszeiten.
- Kürzere Durchlaufzeiten.
- Virtuelle Durchgängigkeit.
- Einfachere und schnellere Bauteilkonstruktion, da keine Freiformflächen.
- Aufwendige Umformsimulation und deren Iterationsschleifen können entfallen.
- Drastische Reduktion der Durchlaufzeit von Auftragserteilung der Werkzeugkonstruktion bis zum Start der Bauteilproduktion. Dies betrifft vor allem die Werkzeugfertigung und Einarbeitung.
- Reduzierter Rüstaufwand.
- Wesentlich einfacherer und flexiblerer Prozess.
- Werkzeuggeometrieunabhängige Werkstücke herstellbar.
- Herstellung hinterschnittiger Werkstücke ohne Zusatzaufwand möglich.
- Prozessveränderungen leicht durchführbar. Verschleiß oder geänderte Blechstärken können zum Beispiel durch Korrekturen einfach berücksichtigt werden.
- Wesentlich geringere Presskraft notwendig.
- Pressen sind billiger in Anschaffung und Instandhaltung und benötigen weniger Platz bei geringeren Fundamentanforderungen und deutlich weniger Energie. Dies stützt die geringeren Anlagenstundensätze.
- Billige, sehr einfache Standardwerkzeuge mit einfachen Werkzeuggeometrien.
- Platine wird in Endgeometrie zugeschnitten. Kein zusätzlicher Beschnitt nach der Umformung notwendig.
- Bessere Materialausnutzung durch kleinere Platinengeometrie.
- Beim Platinenbeschnitt können bereits Funktionsgeometrien erzeugt werden.
- Qualitätskontrolle aufgrund stückweise gerader Bauteilkonturen einfacher mit Standardmessmethoden durchführbar. 3D Formen sind hingegen nur mit teuren Prüfvorrichtungen kontrollierbar.

- Keine wesentlichen Unterschiede in der Bauteilverwendung vorhanden. Die Eigenschaften des Biegebauteils müssen jedoch im Rahmen einer Gesamtkonzeptintegration berücksichtigt werden.

Nachteilig für eine schnelle Bauteilherstellung wirkt sich die charakteristische Kerneigenschaft des Biegens aus. Pro Hub kann mit Standardwerkzeugen nur eine Kantung erzeugt werden. Dadurch steigt die Anzahl der Umformstufen enorm und hat zur Folge, dass wesentlich weniger Bauteile pro Zeiteinheit erzeugt werden können. Weiters besteht die Notwendigkeit durch Fügen das Biegebauteil zum Funktionsbauteil in der Wertschöpfungskette anzuheben. Dieser Zusatzaufwand erfordert zusätzliche Ressourcen. Zusätzliche kritische Punkte betreffen die Eigenheit gerader Biegelinien des Freibiegens und die im Vergleich aufwendigere Maschinenprogrammierung.

5.1.3 Sollzustand und Fehlerpotential

Tritt der Sollzustand ein, entspricht die Geometrie des fertigen Werkstücks genau der theoretischen Vorgabe aus der Fertigungszeichnung. Dies setzt voraus, dass die Verkürzung für die zu verwendeten Prozessparameter exakt ermittelt und damit die Position der Biegelinie und die abgewinkelte Länge richtig berechnet wird. Zusätzlich dürfen keine Abweichungen beim Platinezuschnitt, der Anschlag- und der Einlegeposition auftreten und weiters muss unter Berücksichtigung der Rückfederung die passende Eintauchtiefe der idealen Werkzeuge bei der Umformung verwendet werden.

Da in der Praxis nie alle Voraussetzungen zur Gänze erfüllt werden können, ist das Ziel die Minimierung des Fehlers in Bezug auf die wesentlichen Werkstückparameter, Schenkellänge und Biegewinkel. Folgend ist das Fehlerpotential des Biegeprozesses in Bezug auf die einzelnen Schritte des Gesamtprozesses aus Abschnitt 5.1 angeführt. Die Angaben der Fertigungszeichnung werden in diesem Zusammenhang als korrekt und herstellbar angenommen.

In den ersten zwei Stufen des Gesamtprozesses kann der für die weitere Verwendung ermittelte Verkürzungswert, die berechnete Position der Biegelinie oder die Berechnung der Längen für die Abwicklung fehlerhaft sein. Im Abschnitt der Biegefolge stellt die Anschlagstrategie, unter anderem durch die Verwendung idealer Biegeradien, eine potentielle Fehlerquelle dar. Der Blechzuschnitt unter der Berücksichtigung der definierten Walzrichtung unterliegt abhängig vom Schneidverfahren Fertigungstoleranzen und kann daher resultierend zu Abweichungen führen.

Bei der eigentlichen Bauteilherstellung können fehlerhafte Prozesseinstellungen, Maschinen- oder Werkzeugabweichungen, Materialabweichungen bei Blechstärke oder Festigkeit und Bedienerfehler, wie zum Beispiel fehlerhafte Einlegepositionen, das Ergebnis negativ beeinflussen. Bei der Qualitätskontrolle der Istgeometrie führen Messfehler zu fehlerhaften Korrekturwerten für weitere Biegebauteile der selben Charge.

Dieses gesamte Fehlerpotential verursacht die in Abbildung 32 dargestellten Fertigungsfehler von Biegebauteilen. Die exakte Ursachenzuordnung aus dem Gesamtprozess zu einem be-

stimmten Fertigungsfehler, wie zum Beispiel einem Maßfehler der Biegeschenkel, ist deshalb sehr schwierig.

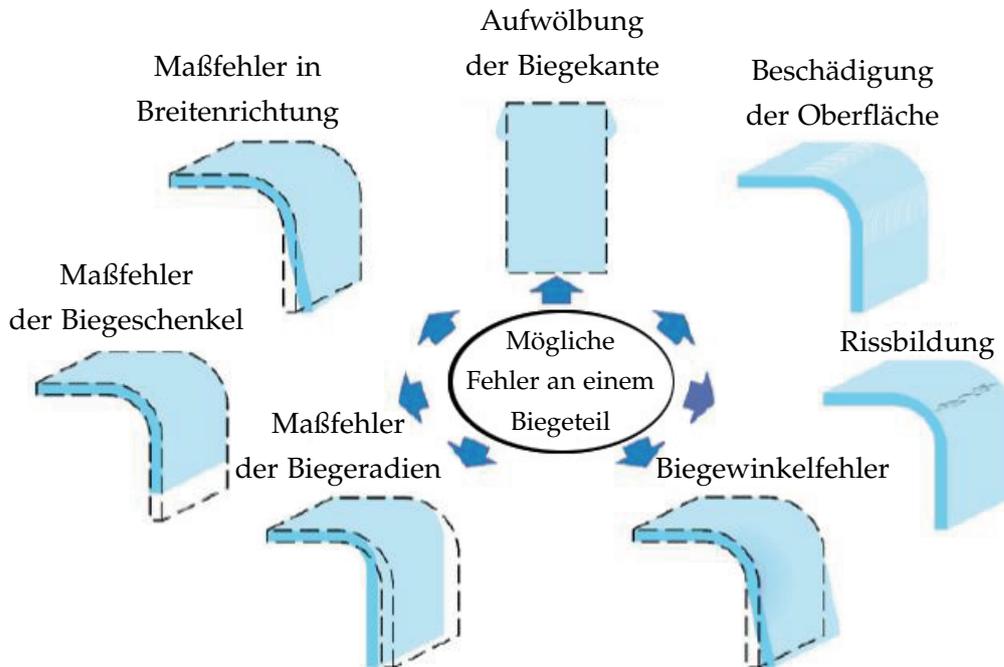


Abbildung 32: Fertigungsfehler [Hof12]

Die Auflistung der Fehlerpotentiale an den verschiedenen Stellen des Freibiegeprozesses zeigt deutlich die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung des Herstellprozesses. In Abschnitt 5.1.5 werden die wesentlichen Parameter des Biegeprozesses zur Beeinflussung des Fehlers identifiziert.

5.1.4 Toleranzen

Um ein Werkstück trotz der Komplexität des Gesamtprozesses innerhalb definierter Toleranzgrenzen produzieren zu können, müssen bereits alle Teilergebnisse deren Anforderungen entsprechen.

Im Maschinenbau wird zur Tolerierung von Längen und Winkeln die Allgmeintoleranz für Längen und Winkelmaße DIN ISO 2768-1 [N2] verwendet. Für die spezifische Anwendung des Biegeumformens ist die Allgmeintoleranz für Stanzteile aus Stahl DIN 6930 Teil 2 [N1] verfügbar. Diese kategorisiert die Toleranzwerte für Längenabmaße zusätzlich in Bezug auf die Blechstärke, lässt dabei aber noch größere Toleranzen als die DIN ISO 2768-1 zu. Winkelabweichungen werden in der DIN 6935 [N5] für Biegebauteile toleriert.

Für herkömmliche Anwendungen des Freibiegens sind diese Richtlinien mit relativ großzügigen Toleranzen sinnvoll und nachvollziehbar, da Toleranzen der am Markt verfügbaren Blechhalbzeuge bereits nach DIN EN 10029, DIN EN 10131 [N3] und DIN EN 10051 im Bereich von

10% der Nennblechstärke liegen und den Umformprozess direkt beeinflussen. Abbildung 33 fasst dies inhaltlich zusammen.

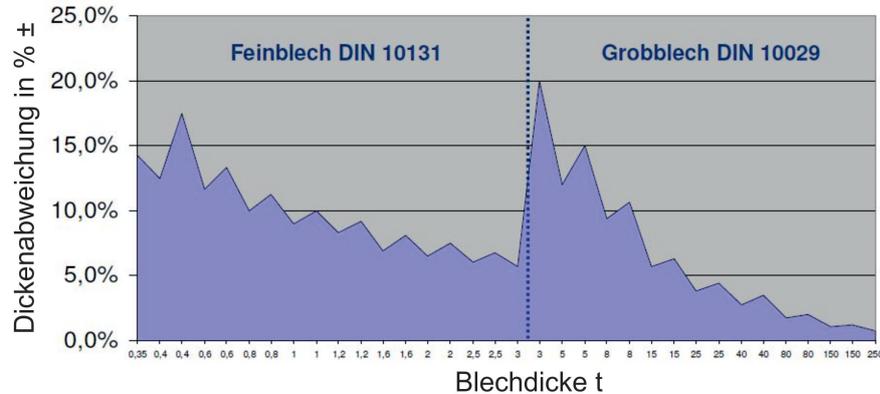


Abbildung 33: Halbbezugtoleranzen aus DIN EN 10029 und DIN EN 10031 [N3]

Die Toleranzen für thermische Schnitte, wie zum Beispiel Laserschneiden, sind nach EN ISO 9013 [N4] toleriert.

Die vorgestellten Toleranzen sind für funktionelle Biegebauteile mit mehreren Kantungen grundsätzlich anwendbar, meist aber nicht zweckmäßig und nicht ausreichend genau. In der Praxis werden meist Kombinationen der Tolerierung verwendet [VSM12], [Mek16]. Um Summenfehler auszuschließen, muss das fertige Werkstück direkt auf der Zeichnung, dem Anwendungszweck entsprechend, so genau wie notwendig toleriert werden, um die geforderte Qualität zu erhalten. Daraus leitet sich dann auch die Einzeltoleranz je Biegung ab und wird wesentlich geringer, als die per Allgemeintoleranz zulässige, sein.

5.1.5 Wesentliche Einflussparameter

Das Ziel des Umformprozesses Freibiegen ist es, die Werkstückzielgrößen Biegeschenkelänge und Biegewinkel innerhalb der vorgegebenen Gesamttoleranz zu produzieren. Dabei ist es notwendig, die bekannten Teilfehler an geeigneter Stelle im Gesamtprozess zu reduzieren oder korrigieren um Summenfehler zu vermeiden. Auf Basis der in Abschnitt 5.1.3 dargestellten Fehlerpotentiale können dem Gesamtprozess vier wesentliche Einflussparameter auf das Biegeergebnis zugeordnet werden, siehe Abbildung 34 in Anlehnung an [Hof12]. Diese sind Werkstoff-, Platinengeometrie-, Werkzeug- und Maschinenparameter.

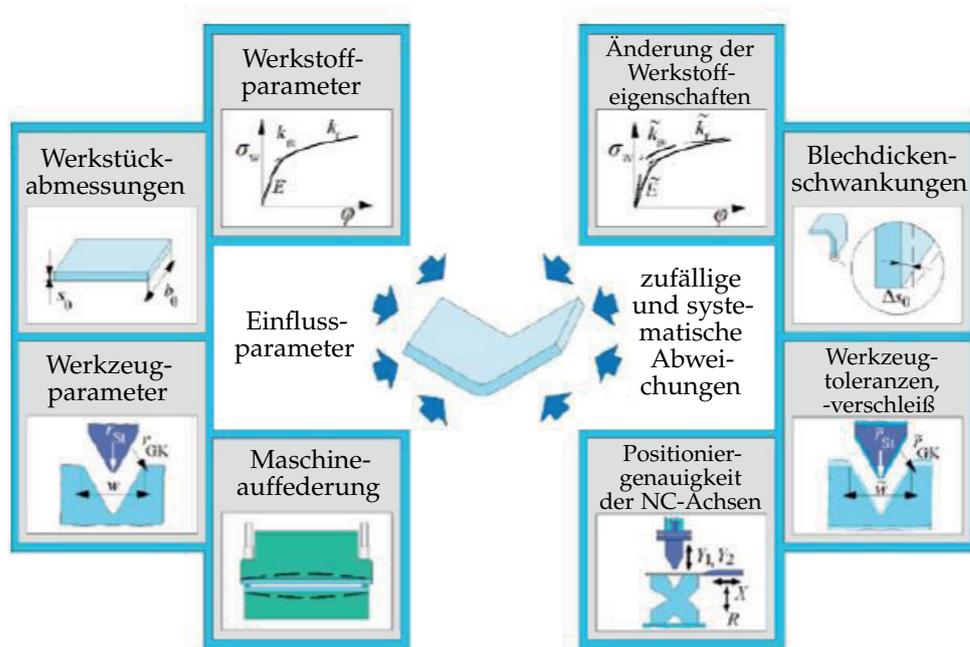


Abbildung 34: Einflussgrößen beim Freibiegen [Hof12]

Die Parameter der linken Seite entsprechen den Sollgrößen beim Biegeprozess. Die rechte Seite deren Abweichungen, die im Wesentlichen für Fehler im Biegeergebnis verantwortlich sind. Systematische Abweichungen, wie Werkzeugverschleiß und Maschinenabweichung, sind unkritisch, da vorhersagbar. Schwierigkeiten bei der Vorhersage und der Korrektur bereiten hingegen die zufälligen Abweichungen des Zuschnitts, sowie unzureichende Qualität der Biegewerkzeuge oder der Biegemaschine. In dieser Kategorie beeinflusst vor allem aber das zu verarbeitende Blech das Biegeergebnis negativ. Bedingt durch die Herstellmethode von Blechen, den verschiedenen Herstellern und Vertriebsnetzen und den zulässigen Toleranzen, unterliegen die Eigenschaften der angelieferten Bleche geringen Schwankungen. Diese Schwankungen in Bezug auf Blechstärke und Festigkeit sind in ausgeprägter Form beim Chargenwechsel zu beobachten.

Die Abhängigkeit der wesentlichen Zielgrößen beim Freibiegen von den gerade angeführten Parametern, führt auch schon bei geringen Abweichungen dazu, dass die gewünschte Schenkellänge, wie experimentelle Ergebnisse in Abschnitt 5.3 zeigen, und der gewünschte Biegewinkel nicht zuverlässig eingehalten werden können. Die resultierende Werkstückabweichung ist in der Regel eine Kombination aus allen Einflussparametern. Es ist dabei aber hervorzuheben, dass die geringen Abweichungen der Einzelparameter meist innerhalb der erlaubten Toleranzen liegen, die Werkstückabmaße resultierend aber oft nicht mehr.

Eine Steigerung der Genauigkeit erfordert die Identifikation des maßgebenden Einflussparameters auf den Fehler und die damit einhergehende Bestimmung der passenden Korrekturmaßnahme und des richtigen Korrekturwertes. Wie aus Formel 3 ersichtlich, setzt sich die Zu-

schnittlänge l_0 aus den Schenkellängen und der Verkürzung zusammen. Dabei beschreibt die Biegeverkürzung, siehe Punkt 2.2.2.5, die resultierende Geometrie des Werkstückes in der Umformzone und ist vom Biegewinkel, den verwendeten Werkzeugen, der Blechstärke und den Materialeigenschaften abhängig. Die Biegeverkürzung ist folglich eine reduzierte Funktion aller wesentlichen Einflussparameter des Freibiegeprozesses und damit eine passende Stellschraube um Prozessverbesserungen zu erreichen und die Gesamtabweichungen zu reduzieren.

Aus den Abhängigkeiten der Biegeverkürzung können die Werkzeuge, auf Grund der nicht vorhandenen Beeinflussbarkeit der restlichen Parameter, als geeigneter Einflussparameter identifiziert werden. Grundlagenversuche (Abschnitt 5.3) zeigen in diesem Zusammenhang, dass die Umformzone, und damit der Verkürzungswert, am stärksten durch die Gesenkwerte beeinflusst wird.

5.1.6 Verbesserungspotential des Biegeprozesses

Um die Vorteile des Freibiegens vollständig umsetzen zu können, muss die Biegetechnologie so verbessert werden, dass bereits beim ersten Werkstück die Messwerte der Biegeschenkelänge innerhalb reduzierter Toleranzfelder liegen und eine deutliche Steigerung der Genauigkeit zu erzielen ist. Zusätzlich ist eine Reduktion von Arbeitsschritten durch den Bediener wünschenswert. Eine deutliche Verbesserung in diesen Bereichen wird eine wirtschaftliche Serienproduktion von komplexen Biegebauteilen begünstigen.

Das Problem beim aktuellen Freibiegen liegt also darin, dass die im Gesamtprozess verwendete Biegeverkürzung v_{soll} von der tatsächlich bei der Umformung entstehenden Verkürzung v_{ist} abweicht und folglich zu einer Maßabweichung des Biegebauteiles führt. Diese Erkenntnis stützt sich auf den oben angeführten Erklärungen und wird durch folgenden Bericht aus der Praxis bestätigt.

"Das Hauptproblem liegt in der unzureichenden Genauigkeit des Biegeverfahrens. Durch die vorhandenen Schwankungen der Blechparameter können im Serienprozess zuverlässig nur maximal zwei Kantungen pro Bauteil durchgeführt werden. Um auch komplexere Bauteile maßhaltig herstellen zu können werden diese derzeit als Schweißbaugruppe ausgeführt.

Durch die Reduktion von Schweißnähten könnte wesentlich wirtschaftlicher produziert werden, da neben der Schweißnaht auch die dazugehörige Vorrichtung und die Vor- und Nacharbeit entfällt. Genauere Bauteile hätten auch den Vorteil, dass dennoch erforderliche Vorrichtungen weniger massiv ausgeführt werden müssen." [Mic14]

Maßabweichungen in Bezug auf Biegeschenkel und Biegewinkel liegen vor allem bei der ersten Biegung außerhalb der Toleranz und werden durch Korrekturen bei den folgenden Biegungen ausgeglichen. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Ermittlung des richtigen Korrekturwertes für eine Maßabweichung, welche erst nach dem Umformvorgang darstellbar ist. An einer Iststandanalyse wird das Verbesserungspotential bei diesen globalen Korrekturwerten aufgezeigt.

ISTSTANDERFASSUNG BEI DER KORREKTUR DES FEHLERS

Aktuell wird in diesem Zusammenhang der Einfluss von abweichenden Parametern in Form von Maßabweichungen nach dem ersten Biegevorgang durch eine Werkstückvermessung außerhalb des Umformprozesses festgestellt und daraus Korrekturwerte für die nächste Biegung ermittelt.

In Bezug auf den Biegewinkel wird ein Korrekturwert der Eintauchtiefe ermittelt. Ist der gemessene Öffnungswinkel größer als der Sollwert, ist eine Korrektur des Werkstücks möglich. Der Korrekturwert ist ein Erfahrungswert oder stammt aus einer entsprechenden Datensammlung mit dem Nachteil, dass der ermittelte Korrekturwert für einen aktuellen Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die gleiche Kombination an Parameterabweichungen berücksichtigt. Deshalb sind oft mehrere Iterationsschritte notwendig, bis der richtige Korrekturwert gefunden ist. Vor allem bei kleinen Stückzahlen wirkt sich dies bei manueller Durchführung negativ auf den Durchsatz und die Gesamtkosten aus. Verschiedene Maschinenhersteller haben dieses Korrekturprinzip auf unterschiedliche Weise bereits im Biegeprozess automatisiert integriert und garantieren mit einigen geometrischen Prozesseinschränkungen Toleranzen von $\pm 0,3^\circ$. Abbildung 35 zeigt die in einen Biegestempel integrierte Biegewinkelmessensorik die im Wesentlichen aus zwei Tastscheiben mit verschiedenen Durchmessern besteht. In Abhängigkeit des Biegewinkels stellt sich, durch die unterschiedlichen Berührungspunkte (1) der Tastscheiben an den Innenschenkeln, ein bestimmter Abstand der Scheibenzentren ein. Durch die Auswertung dieser Abstände (2) und (3) kann auf den Biegewinkel geschlossen werden. [Tru14]

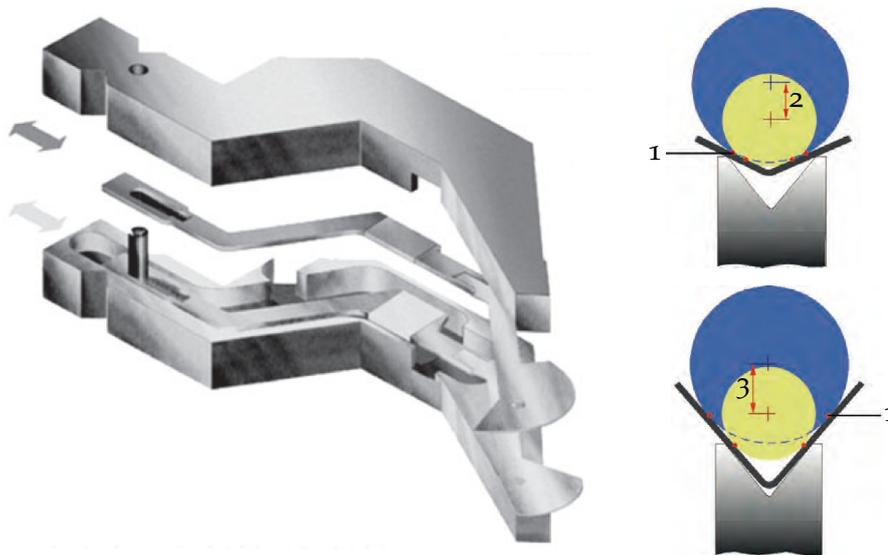


Abbildung 35: Winkelmesssystem der Firma Trumpf [Tru96]

Für die Schenkellänge besteht an dieser Stelle nur die Möglichkeit der Korrektur der Biegelinienposition x bei der nächsten Biegung. Wie am einfachsten Beispiel eines L-Winkels in Abbildung 36 schematisch dargestellt, entspricht der Korrekturwert dabei der Differenz ΔA aus der Schenkellänge A_{soll} der Sollgeometrie und der gemessenen Schenkellänge A_1 des an

der Biegelinienposition x_1 vorangegangenen ersten Umformvorganges, in rot dargestellt. Der zweite Biegeschenkel B_1 weist auch eine entsprechende Abweichung auf.

Die um den Wert ΔA korrigierte Biegelinienposition x_2 des nächsten, in blau dargestellt, Werkstücks hat zur Folge, dass der Biegeschenkel A_2 dadurch der Sollgeometrie im Rahmen der Toleranz entspricht. Durch die gleichbleibende Zuschnittslänge l_0 wird damit aber das Abmaß des zweiten Biegeschenkels B_2 dieser Biegung zusätzlich negativ verändert. Resultierend wird bei dieser Methode der gesamte Fehler zum Biegeschenkel B verschoben. Abhängig von der Funktion des Biegeschenkels bei der Bauteilverwendung kann diese Vorgehensweise das Problem oft nicht zufriedenstellend lösen. Müssen beide Schenkel innerhalb kleiner Toleranzen liegen, kann das Problem an dieser Stelle gar nicht gelöst werden und die Bauteile sind Ausschuss.

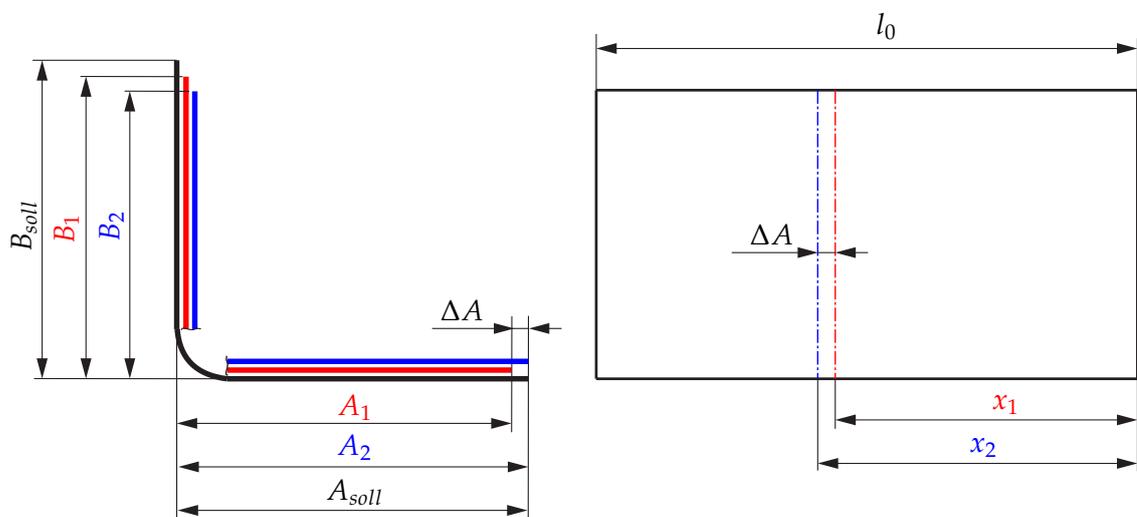


Abbildung 36: Längenkorrektur der Biegeschenkel

Eine Kompromisslösung ist in diesem Zusammenhang den Fehler gleichmäßig auf die beiden Biegeschenkel aufzuteilen. Bei Werkstücken mit mehr als zwei Kantungen und komplexeren Geometrien erfordert diese Methode viel Erfahrung und Prozessverständnis und ist sehr fehleranfällig. Zusätzlich ist meist eine Neuberechnung der Anschlagpositionen erforderlich um Summenfehler zu verhindern.

Die Schwierigkeit der Korrektur liegt also in der Ermittlung der passenden Korrekturwerte unter den einschränkenden Rahmenbedingungen. Zusätzlich wird dieses Spannungsfeld durch die Einzelteilmontage verschärft, da dabei keine Referenzbiegungen zur Ermittlung herangezogen werden können.

5.2 VERBESSERUNGSANSÄTZE

Der komplizierte und oft unzureichende Korrekturaufwand bedarf bei gleichzeitiger Verbesserung der Genauigkeit, für die Herstellbarkeit von komplexen Schalenbauteilen durch Freibiegen, einer deutlichen Verbesserung. Das Freibiegen ist daher dahingehend zu verbessern, dass Eigenschaftsschwankungen bereits beim ersten Werkstück hinsichtlich der Maßhaltigkeit korrigiert werden und damit bereits die Abmaße des ersten Werkstückes innerhalb der Toleranzen liegen. Aus der bekannten Vorgangsweise und den Erfahrungen mit dem Freibiegeprozess und dessen Zusammenhänge werden folgend theoretische Verbesserungsansätze zur Erhöhung der Genauigkeit abgeleitet.

Bei der vorhandenen Zufälligkeit der Einflüsse, im speziellen die schwankenden Chargeigenschaften von Blechhalbzeugen, auf die Maßhaltigkeit des Biegeergebnisses wird für die Erarbeitung der Verbesserungsansätze angenommen, dass sich von den oben gefundenen Einflussparametern nur die Platinengeometrieparameter, Blechstärke t und Zuschnittslänge l_0 , und die Festigkeitseigenschaften als Werkstoffparameter auf den Fehler der wesentlichen Werkstückparameter, Biegeschenkelänge und Biegewinkel auswirken. Verbesserungen für weitere Fertigungsfehler werden in diesem Zusammenhang nicht behandelt. Zu erfüllende Toleranzen sind entsprechend der Notwendigkeit bei der Herstellung komplexer Biegebauteile kleiner als die passenden Allgemeintoleranzen gewählt. Der Fokus liegt nur auf der Verbesserung der Maßhaltigkeit der Biegeschenkel, da, wie beschrieben, bereits geeignete Methoden zur Ermittlung der richtigen Eintauchtiefe für einen maßhaltigen Biegewinkel vorhanden sind und deren Verwendung vorausgesetzt wird.

ANSATZ 1

beruht auf der experimentellen Ermittlung des Verkürzungswertes, Abschnitt 5.3.1, und der Eintauchtiefe für jede durch die Fertigungszeichnung definierte Biegeaufgabe. Bereits bei der Erstellung der Fertigungsunterlagen und im darauffolgenden Gesamtprozess sind diese Istwerte zu verwenden und führen damit zu einem Biegebauteil in hoher Qualität innerhalb der Toleranz. Der Restfehler resultiert aus Zuschnittsabweichungen.

Dieser grundsätzlich aufwendige Ansatz hat den Vorteil, dass Abweichungen zu Referenzmaterialien, in Bezug auf Material und Blechstärke, durch die Istwertverwendung keine Auswirkung auf das Biegeergebnis haben und die Abmaße der Werkstücke damit ohne Korrekturwerte innerhalb der Toleranz liegen. Werden bei den Experimenten die zur Bauteilherstellung verwendende Maschine und die entsprechenden Werkzeuge verwendet, wird damit zusätzlich dieser Einfluss mit berücksichtigt und der Restfehler weiter reduziert.

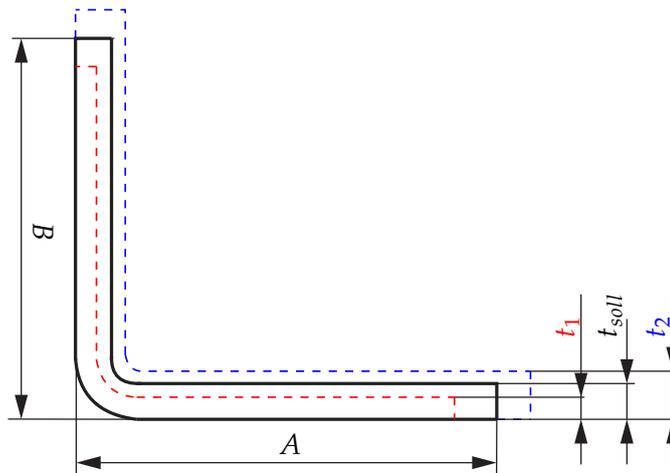


Abbildung 37: Einfluss der Blechdicke auf die Schenkellänge [Heu12]

Anhand experimenteller Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die Blechstärke t einen wesentlichen Einfluss auf die Schenkellänge eines Werkstückes hat. In Abbildung 37 ist dieses Verhalten mit $t_1 < t_{soll} < t_2$ schematisch dargestellt. Eine Blechstärke die kleiner als die Sollblechstärke t_{soll} ist, verursacht kürzere Biegeschenkel A und B . Umgekehrt verursachen dickere Bleche längere Schenkel. Die durch die Norm zulässigen Dickenschwankungen von Blechhalbzeugen sind in Abbildung 33 dargestellt. Auf Basis dieser Erkenntnis wird für die folgenden Ansätze die Blechdickenabweichung als maßgebender Einflussparameter identifiziert.

ANSATZ 2

Auf Basis einer direkt vor dem Zuschnitt gemessenen Blechstärke erfolgt mit einem geeigneten Modell eine um die Blechdickenabweichung korrigierte Neuberechnung der Abwicklung und des Biegeprogramms für die weitere Verwendung. Der Restfehler resultiert aus Zuschnittsabweichungen und Materialabweichungen. Um den großen Aufwand zu rechtfertigen, muss der Restfehler durch die Integration der Materialabweichung in der Korrektur ausreichend verbessert werden. Die prozessintegrierte Ermittlung der Materialabweichung stellt dabei jedoch eine große Schwierigkeit dar und Bedarf eigener Untersuchungen.

ANSATZ 3

Wie in Abschnitt 5.1.5 beschrieben, kann die Gesenkweite zur Beeinflussung des Biegeergebnisses direkt beim Umformprozess genutzt werden. Durch die zusätzliche Identifikation des maßgebenden Einflussparameters als Blechdickenabweichung, kann das Werkstück direkt beim Umformprozess, durch eine der Blechdickenabweichung entsprechende Gesenkweitenänderung, korrigiert werden. Dies setzt voraus, dass das Biegegesenk als verstellbares Werkzeug ausgeführt ist. Der Restfehler resultiert aus Zuschnittsabweichungen und Materialabweichungen. Diese Vorgehensweise lässt eine deutlich verbesserte Maßhaltigkeit des Biegeergebnisses erwarten. Im Detail wird dieser Ansatz in Abschnitt 5.2.1 erläutert.

Neben der erhöhten Genauigkeit werden noch folgende Vorteile erreicht:

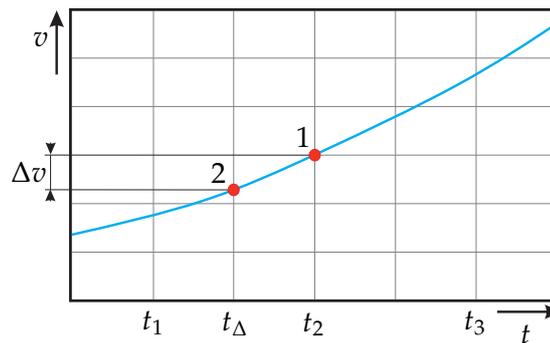
- Kompensation von Eigenschaftsschwankungen vor der ersten Umformung.
- Keine Aufsummierung von Fehlern bei mehreren Kantungen durch präzise Schenkellängen.
- Keine Korrektur der Anschlagpositionen notwendig. Werkstück kann laut Planung hergestellt werden.
- Einstellarbeiten bei Chargenwechsel entfallen.
- Erhöhung der Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit.
- Reduktion von Arbeitsschritten und Entlastung des Bedieners.
- Kompensation des fehlenden Grundlagenwissens der Bediener.
- Reduktion von Ausschuss und weniger Nacharbeit am Werkstück.
- Kostenersparnis und Steigerung der Konkurrenzfähigkeit.

ANSATZ 4

Die prozessintegrierte Ermittlung der wesentlichen Eigenschaftsabweichungen von Blechstärke t , Zuschnittslänge l_0 und Festigkeit des verwendeten Blechmaterials vom Sollzustand bildet die Basis dieses beinahe idealen Ansatzes. Deren Korrektur erfolgt direkt beim Umformprozess durch eine entsprechende Gesenkweitenänderung. Aufgrund der umfassenden Berücksichtigung der Einflussparameter kann bei der Verwendung eines geeigneten Vorhersagemodells der Restfehler bereits beim ersten Bauteil gegen Null gehen. Dieser Ansatz kann als eine Erweiterung des Ansatzes Nummer 3 mit dem gleichen Grundprinzip angesehen werden. Zusammenfassend muss aber festgehalten werden, dass die Herausforderung in der prozessintegrierten, messtechnischen Erfassung aller Eigenschaftsabweichungen und der Erstellung eines passenden Vorhersagemodells für die automatische Korrektur im Umformprozess liegt. Für eine vollständige Prozessintegration ist vor allem die Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung der Materialabweichungen und eine Schenkellängenmessung beim Umformvorgang notwendig.

5.2.1 *Ansatz der Verkürzungskorrektur - Zusammenhänge beim Freibiegen*

Für die Umsetzung des Verbesserungsansatzes Nummer 3 sind folgend die notwendigen physikalischen Zusammenhänge beim Freibiegen schematisch dargestellt. Die Verbindung der Parameter Blechstärke und Gesenkweite erfolgt, wie schon erklärt, durch die Verkürzung v , womit der Ansatz 3 als Ansatz der Verkürzungskorrektur bezeichnet werden kann. Der Einfluss von Blechstärke und Gesenkweite bei jeweils konstanten weiteren Einflussparametern auf die Verkürzung ist experimentell einfach nachweisbar.

Abbildung 38: Verkürzung v in Abhängigkeit der Blechdicke t

In Abbildung 38 ist die Verkürzung in Abhängigkeit der Blechdicke, $t_1 < t_2 < t_3$, für eine konstante Gesenkweite und einen konstanten Biegewinkel schematisch, auf Basis experimenteller Ergebnisse (Abschnitt 5.3), dargestellt. Ausgehend vom Sollzustand (1) ergibt sich eine Verkürzungsänderung δv durch eine davon abweichende Blechstärke (2). Die Darstellung dieses Zusammenhangs für eine veränderte Gesenkweite ist in gleicher Weise möglich. Folgend sind die möglichen Einzelparameteränderungen in Bezug auf Blechstärke und Gesenkweite und deren Auswirkung dargestellt. Der Verkürzungswert aus Formel 3 ist ein negativer Zahlenwert. Er wird hier als Betragswert verwendet, da sich dieser proportional zur Schenkellänge verhält.

- Eine Blechstärkenreduktion, $|v|$ sinkt, bewirkt eine Abnahme der Schenkellänge bei konstanter Gesenkweite, siehe Abbildung 38 und 37.
- Eine Gesenkweitenreduktion, $|v|$ sinkt, bewirkt eine Abnahme der Schenkellänge bei konstanter Blechstärke.
- Eine Blechstärkenzunahme, $|v|$ steigt, bewirkt eine Zunahme der Schenkellänge bei konstanter Gesenkweite, siehe Abbildung 38 und 37.
- Eine Gesenkweitenzunahme, $|v|$ steigt, bewirkt eine Zunahme der Schenkellänge bei konstanter Blechstärke.

Diese Erkenntnisse definieren den Kerninhalt dieses Verbesserungsansatzes und lassen den Schluss zu, dass :

- der zu erwartende Fehler aus der Blechstärkenabweichung der halben Verkürzungsabweichung pro Schenkellänge entspricht und durch die entsprechende Gesenkweitenänderung korrigiert werden muss.
- eine der Blechdickenabweichung entsprechende Gesenkweitenänderung für die Korrektur jene mit der betragsmäßig selben Verkürzungsänderung δv aber mit umgekehrten Vorzeichen ist. Damit stellt sich am Werkstück wieder die Sollverkürzung und Sollschenkellänge ein.
- eine Blechstärkenreduktion ein größeres Gesenk für gleiche Verkürzung erfordert.
- eine Blechstärkenzunahme ein kleineres Gesenk für gleiche Verkürzung erfordert.

Beim gegenläufigen Effekt von Blechstärken- und Gesenkweitenänderung bei der Erhaltung der Sollverkürzung kann eine Verstärkung der Blechstärkenänderung im Verhältnis zur Gesenkweitenänderung mit dem Faktor 10 bei 90° Biegewinkel identifiziert werden. Dieser Hebel verhält sich proportional zum Biegewinkel und wird folglich mit steigendem Biegewinkel größer. Da der Biegeradius von den verwendeten Werkzeugen abhängig ist, wird dieser sich auch proportional zur Gesenkweite verändern. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass Anschlagstrategien an Biegeradien dadurch zusätzlich zu Fehler führen.

5.2.2 Regelkreis der adaptiven Gesenkweitenverstellung beim Freibiegen

Da der Verkürzungswert direkt die Schenkellänge beeinflusst, kann er als resultierende Mess- und Regelgröße für eine Korrektur der Schenkellänge verwendet werden. Der Regelkreis der adaptiven Gesenkweitenverstellung beim Freibiegen beschreibt schematisch die Prozessintegration des Ansatzes der Verkürzungskorrektur. Die Kombination der in Abschnitt 5.2.1 angeführten Ergebnisse zu einem räumlichen Diagramm mit den drei Dimensionen Blechstärke t , Gesenkweite w und Verkürzung v , siehe Abbildung 39, ist resultierend die Basis für ein Ermittlungsmodell von Korrekturwerten im Regelkreis. Der Biegewinkel als vierte Dimension des kompletten Korrekturansatzes wird in dieser Darstellung aus Gründen der Darstellbarkeit konstant gehalten, ist aber zusätzlich bei der Ermittlung der Korrekturwerte zu berücksichtigen. Das verwendete Blechmaterial sowie der Stempelradius sind für den Ansatz als konstante Randbedingung definiert.

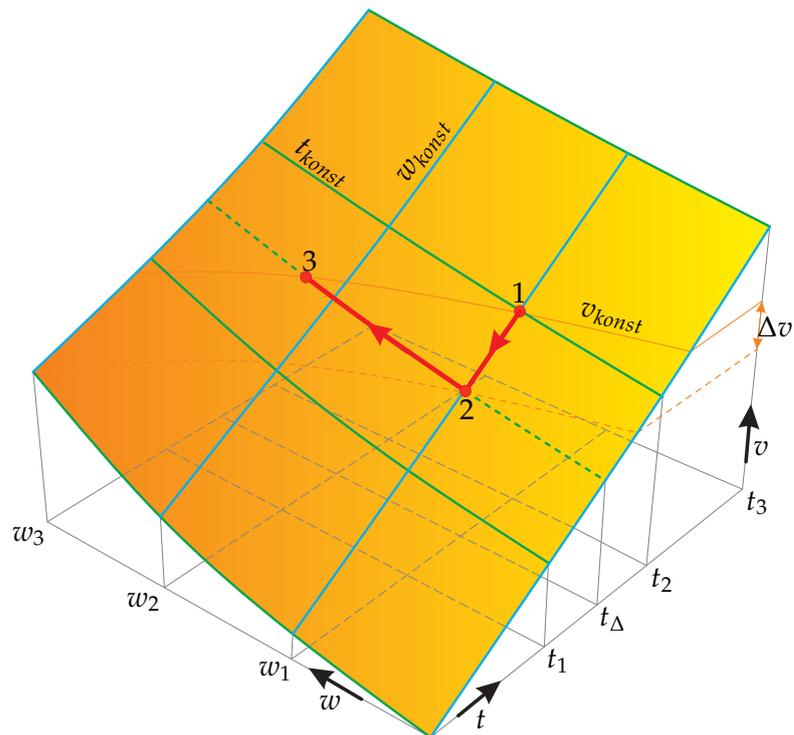


Abbildung 39: Kompensationsansatz

Hierin ist $t_1 < t_2 < t_3$ und $w_1 < w_2 < w_3$. Diese Werte bilden die Stützpunkte für eine Fläche, welche durch den Schnitt mit einer waagrecht Ebene eine Linie konstanter Verkürzung v_{konst} erzeugt. Die schematische Darstellung 39 basiert auf einzelnen experimentellen Ergebnissen. Die einzelnen Schritte dieses Regelkreises sind mit einem roten Pfad von (1) nach (3) grafisch dargestellt. Im Detail sind dies:

- Ein Sollwert (1) ist aus den Fertigungsunterlagen zu ermitteln.
- Vor jeder Umformung ist die aktuelle Blechstärke t_Δ in Punkt (2) zu erfassen und daraus eine Blechstärkenabweichung sowie die zugehörige Verkürzungsabweichung Δv zu ermitteln.
- Als Korrekturwert ist die Verkürzungsabweichung Δv derart in eine Gesenkweitenänderung (3) umzurechnen, dass die Punkte (1) und (3) auf einer Linie konstanter Verkürzung v_{konst} liegen und damit eine konstante Schenkellänge haben.
- Die berechnete Gesenkweite ist an einem verstellbaren Biegegesenk einzustellen und die Umformung anschließend mit der unveränderten Biegelinienposition durchzuführen.
- Das resultierende Ergebnis wird daraufhin einen in seiner Größe leicht veränderten Biegeradius und eine gesteigerte Maßhaltigkeit aufweisen.

Die Funktionsweise des hier schematisch erarbeiteten Ansatzes wird in Abschnitt 5.3.3 experimentell bewiesen. Dieser Kompensationsansatz ist als Verbesserung für eine Serienanwen-

derung der in Kapitel 7 entwickelten Methode gedacht und Bedarf weiterer Entwicklungen außerhalb dieser Arbeit. Die Aufnahmemethode der notwendigen Messgrößen sowie die Prozesskopplung und die Erstellung eines entsprechenden Vorhersagemodells für die Ermittlung des Korrekturwertes kann dabei beliebig komplex gestaltet werden. Für die Umsetzung dieses Ansatzes kann grundsätzlich jedes stufenlos verstellbare Biegegesenk verwendet werden. Mit Ausblick auf eine automatisierte Prozessintegration mit Bedienerentlastung wird folgend ein neuartiges, flexibles Werkzeugkonzept vorgestellt.

5.2.3 *Gesenkweitenverstellbares Biegewerkzeug zur Verwendung im Regelkreis*

Das aktuelle Angebot an verstellbaren Biegematrizen als Sonderwerkzeug im Freibiegeprozess ist bereits in Abschnitt 2.3 dargestellt. Alle automatisierbaren Werkzeugprinzipien benötigen dabei zur Gesenkweitenverstellung eine zusätzliche Antriebseinheit, welche parallel zum Umformprozess angesteuert werden muss und nicht für die Verstellung bei jedem Hub ausgelegt ist. Für eine effiziente Verwendung des gerade in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Regelkreis ist ein in den Umformprozess integriertes Verstellprinzip ohne zusätzliche Antriebseinheit erforderlich, da bei jedem Umformvorgang eine spezifisch berechnete Gesenkweite einzustellen ist. Mit Hilfe des in Abbildung 40 dargestellten Werkzeugkonzeptes können diese Anforderungen erfüllt werden. Diese bereits als Prototyp umgesetzte konzeptionelle Entwicklung eines stufenlos gesenkweitenverstellbaren Biegegesenkes zur Verwendung direkt im Biegeprozess bietet zusätzlich den Vorteil in der ständigen Verfügbarkeit einer Vielzahl von unterschiedlichen Gesenkweiten ohne umrüsten. Über zwei symmetrisch angeordnete schiefe Ebenen können dabei die Gesenkbacken (1) durch eine vertikal aufgeprägte Bewegung ausgehend von einer maximalen Gesenkweite stufenlos zu kleineren Gesenkweiten verstellt werden. Die Gesenkbacken werden durch eine Rückstellfeder (4), die auf ein im Werkzeuggrundkörper (5) befindliches Flüssigkeitsreservoir (2) bei geöffneter Absperrvorrichtung (3) drückt, in der Position maximaler Gesenkweite gehalten. Die aufgeprägte Bewegung erfolgt durch eine durch den Biegestempel über den im Werkzeug eingelegten Blechzuschnitt wirkende Kraft (F) direkt im Biegeprozess. Mit Hilfe der Absperrvorrichtung (3) kann in beliebiger Position der Gesenkbacken durch eine Absperrung das Flüssigkeitsvolumen zwischen Gesenkbacken und Absperrung und damit die Gesenkweite konstant gehalten werden. Durch die definierte Zuordnung des konstanten Volumens zur entsprechenden Gesenkweite kann damit mit der gleichen Pressbalkenbewegung die Gesenkweitenverstellung durchgeführt werden und nahtlos die Umformung des Werkstückes mit der aus dem Regelkreis geforderten Gesenkweite erfolgen.

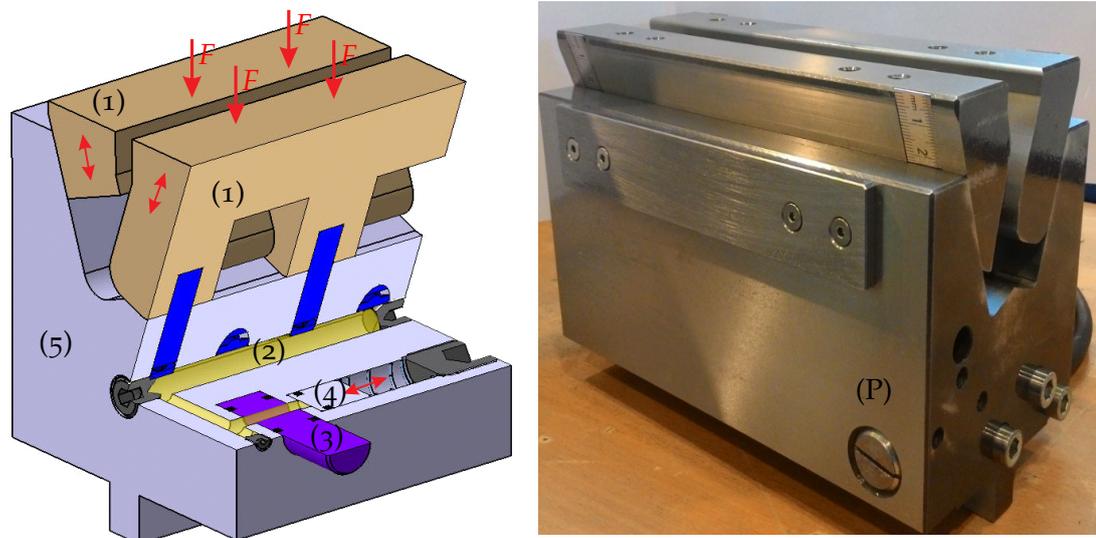


Abbildung 40: Konzept für ein im Prozess verstellbares Biegegesenk

Erste Erfahrungen mit dem Prototyp (P) in Abbildung 40 beweisen die Umsetzbarkeit des erarbeiteten Funktionsprinzips und eine zusätzliche Verbesserung der Biegetechnologie. [GH15] Vor allem für komplexe Bauteile mit mehreren Kantungen verspricht dieses Werkzeugkonzept bei der Verwendung im Regelkreis der adaptiven Gesenkweitenverstellung beim Freibiegen eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Maßhaltigkeit des Werkstückes, da auf die zufälligen Abweichungen des Platinenzuschnitts direkt im Biegeprozess reagiert wird und damit Summenfehler durch genaue Einzelschenkel reduziert werden. Die weitere Umsetzung dieses Werkzeugkonzeptes ist nicht Inhalt dieser Arbeit, da es für eine industrielle Anwendbarkeit eine Reihe weiterer Untersuchungen und Weiterentwicklungen bedarf. Dies stellt auch keine Einschränkung für die folgenden Umformversuche und deren Auswertung dar.

5.3 UMFORMVERSUCHE ZUR EXPERIMENTELLEN ANALYSE

In diesem Abschnitt wird die Durchführung von Umformversuchen dargestellt, mit deren Ergebnisse in der gesamten vorliegenden Arbeit Annahmen direkt oder indirekt bestätigt, Erkenntnisse abgeleitet und spezifische Parameter ermittelt werden.

5.3.1 Versuchs- und Messaufbau

Für die Durchführung von Umformversuchen entsprechend des Umformprozesses aus Abschnitt 2.2.1 und Kapitel 5 wird der in Abbildung 41 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Darin dient ein durch Gesenkbacken (2), mit einem Einzugsradius von 1 mm , zum Biegegesenk modifizierter Zentrischspanner (1) als Unterwerkzeug. Dieses ist durch eine säulengeführte

Aufnahme (5) mit optionaler Kraftmessung mit dem Pressentisch einer herkömmlichen Biegemaschine definiert verbunden. Messuhren (3) ermöglichen das Ablesen der durch eine Stellspindel (4) eingestellten Gesenkweite.

Da das Dicken-Breitenverhältnis der Biegelinie laut [Kah86] mindestens 20 betragen muss, damit der Einfluß der Blechbreite auf den Biegewinkel bzw. -radius vernachlässigt werden kann werden für eine maximale Blechdicke von 3mm alle Versuche mit Blechproben (6) mit den Abmaßen $l_b = 60\text{mm} \times l_0 = 130\text{mm}$ in verschiedenen Blechstärken und Materialien durchgeführt. Als Oberwerkzeug (7) dient ein Biegestempel mit 1mm Stempelradius, welcher die Umformung mit 10mm/s durchführt. Die entsprechende Eintauchtiefe kann aus den Technologieinformationen entnommen werden oder ist iterativ durch Experimente zu ermitteln. Zur Positionierung der Blechproben entsprechend der geforderten Biegelinienposition ist eine Anschlagvorrichtung (8) vorgesehen.

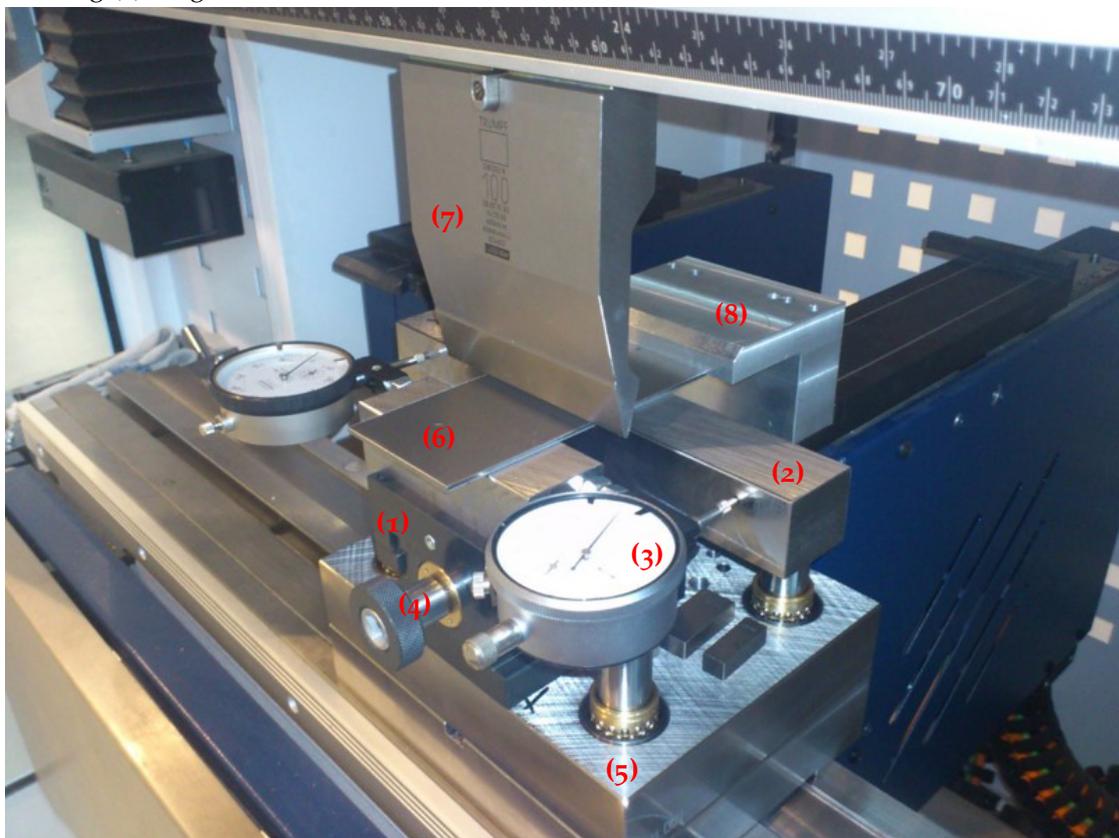


Abbildung 41: Versuchsaufbau zur Durchführung von Umformversuchen

Eine Vermessung der wesentlichen Werkstückparameter, Schenkellänge und Biegewinkel, erfolgt anschließend an jede Umformung durch die in Abbildung 42 dargestellte Messanordnung. Als Schenkellänge wird in diesem Zusammenhang immer der Messwert zwischen Schenkelennde und Schnittpunkt der zwei an der Biegung beteiligten Schenkel definiert. Diese Definition wird als Schenkellänge nach dem Tangentenschnitt bezeichnet, siehe Abschnitt 2.2.2.5.

Der Biegewinkel wird mit Hilfe eines analogen Winkelmessers (1) mit einer Noniusauflösung von 5 Winkelminuten gemessen. Dieser ist auf einer Messplatte fest montiert. Durch die Verwendung eines Hintergrundlichtes (2) wird die Winkelmessung durch eine bessere Erkennbarkeit des Lichtspaltes erleichtert und gleichzeitig die Wiederholbarkeit gesteigert.

Die Ermittlung der Schenkellängen eines Werkstückes erfolgt in Anlehnung an eine patentierte Messvorrichtung für Biegewerkstücke [HS12] mit dem aus zwei digitalen Messschiebern bestehenden Schenkellängenmessgerät (3). Durch eine entsprechende Umrechnung der Ableswerte der beiden Messschiebern in Abhängigkeit des mit (1) gemessenen Biegewinkels wird die Schenkellänge bestimmt. Der Biegeradius wird mit Hilfe einer in halben Millimetern abgestuften Radianlehre abgenommen. Alle Messwerte werden in Versuchsdokumentationsbogen (4) digital erfasst und entsprechend ausgewertet. Es werden neben den Messergebnissen die Versuchsparameter zu Material, Walzrichtung, Blechdicke, Abkantlänge, Gesenkweite, Stempelradius, Pressgeschwindigkeit, Haltezeit und die theoretische Presskraft sorgfältig aufgezeichnet.

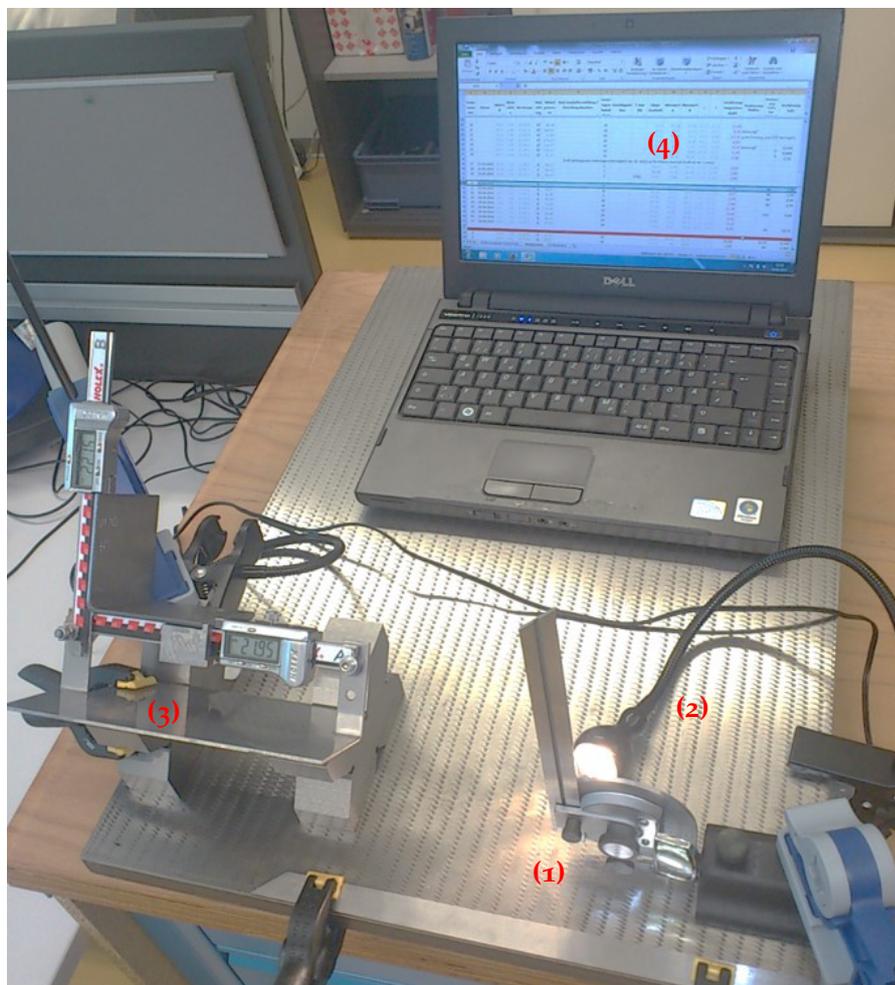


Abbildung 42: Schenkellängenmessung

Der besondere Vorteil bei der Verwendung dieses Schenkellängenmessgerätes liegt darin, dass auch Biegeproben die einen Öffnungswinkel β ungleich 90° haben, genau gemessen werden können. Mit einem herkömmlichen Messschieber ist diese Messung aufgrund des fehlenden Schenkelschnittpunktes am Werkstück nicht möglich. Durch die hier verwendete zweistufige Vermessung von Biegewinkel und Schenkellänge und die damit einhergehende indirekte Berechnung ist der Einfluss der Winkelabweichung auf die Genauigkeit des Messergebnisses zu berücksichtigen.

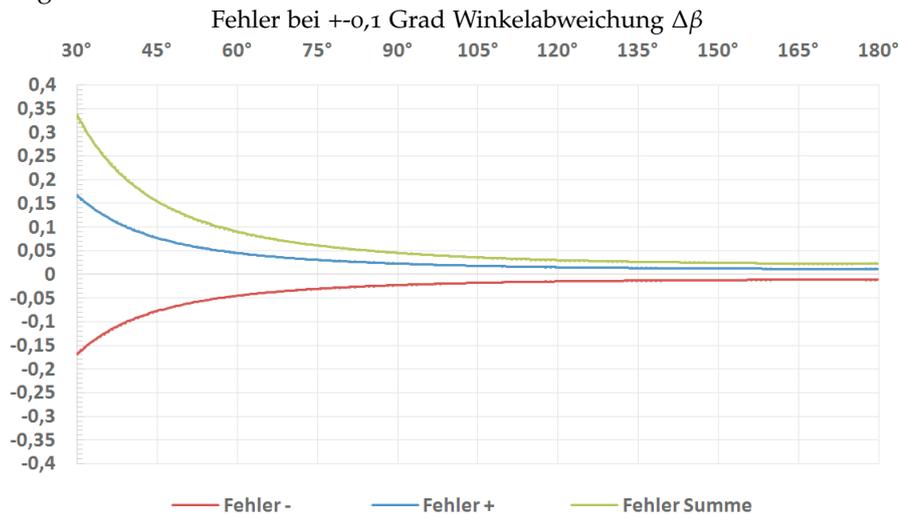


Abbildung 43: Einfluss der Winkelabweichung auf die Genauigkeit bei der zwei-stufigen Vermessung

In Abbildung 43 ist zu sehen, dass vor allem bei spitzen Winkeln von β bereits eine kleine Winkelabweichung zwischen dem gemessenen Winkelwert und dem Werkstück-Istwert von $\pm 0,1^\circ$, bei der aus den Ablesewerten berechneten Schenkellänge, zu Fehlern von bis zu $\pm 0,15$ mm führt. Die Winkelabweichung resultiert dabei aus Ablese- und/oder Messfehlern. Bei ungünstigen Kombinationen der Messergebnisse kann dies zu einer resultierenden Schenkelabweichung (grüner Linienzug) von bis zu 0,35 mm führen. Dieser Effekt wirkt sich vor allem bei Untersuchungen bezüglich Wiederholbarkeit negativ aus. Mit zunehmenden Öffnungswinkel β geht der Fehler gegen Null. Bei einem Öffnungswinkel von 90° und einer Winkelabweichung von $\pm 0,1^\circ$ liegt der Summenfehler bei 0,05 mm und damit im Bereich der Messgerädetoleranzen und kann vernachlässigt werden. Bei einer gängigen Toleranz bei Biegewinkeln von $\pm 0,3^\circ$ erreicht der Fehler aber schon einen Wert von 0,15 mm und beeinflusst das Ergebnis merklich.

Daher ist bei 90° Biegungen die Verwendung eines Höhenmessers oder eines Messschiebers als Messmittel zur direkten Schenkellängenmessung zu empfehlen. In Abbildung 44 stellt diese direkte Schenkellängenmessung dar. Der Messfehler der Schenkellänge Δl aufgrund des Winkelfehlers $\Delta\beta$ setzt sich bei einem orthogonalen Messmittel (OM) aus der Differenz der Schenkellänge ohne Winkelabweichung A_0 und der gemessenen Schenkellänge A_1 zusammen. Dieser Wert ist Abhängig von der Schenkellänge und beträgt, für einen 70mm langen Schenkel bei einer Abweichung von $\Delta\beta = 1^\circ$, 0,01 mm und ist damit vernachlässigbar. Bei der indirekten

Berechnung würde die gleiche Abweichung einen Fehler von 0,23 mm verursachen wodurch die Notwendigkeit einer sorgfältigen Versuchsdurchführung untermauert wird. Generell wäre eine direkte Schenkellängenmessung, vor allem aber bei spitzen Öffnungswinkeln, zu bevorzugen und in weiterer Folge in diesem Zusammenhang das verwendete Prinzip des Tangentenschnitts wegen der vorgestellten Problematik zu überdenken.

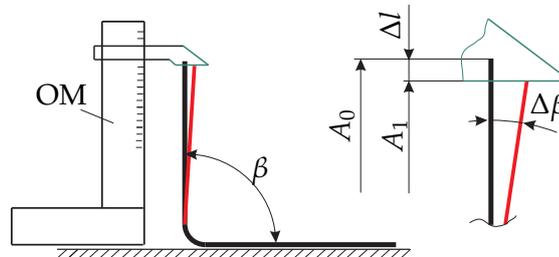


Abbildung 44: Probenvermessung mit einem Höhenmesser

5.3.2 Experimentelle Ermittlung der Technologieparameter

Anhand der Durchführung gezielter Experimente mit dem gezeigten Versuchsaufbau können die Eigenschaften der Biegezone für verschiedene Kombinationen aus Material und Werkzeug analysiert und Parameter zur weiteren Verwendung in den Technologieinformationen gesammelt werden. Die wichtigsten Technologieparameter sind in diesem Zusammenhang der Verkürzungswert v , der unter anderem zur Berechnung der gestreckten Länge benötigt wird und der Mindestbiegeradius, welcher für die Grenzen der Umformung steht. Die Rückfederung inklusive Eintauchtiefe des Biegestempels und die Biegekraft werden zusätzlich aufgezeichnet.

VERKÜRZUNGSWERT v Die experimentelle Ermittlung des Verkürzungswertes erfolgt indirekt durch eine Berechnung mit Formel 8 wobei die notwendigen Schenkellängen A und B , sowie die Länge des Probenzuschnitts l_0 aus den zugehörigen Messdaten, wie in Abschnitt 5.3.1 gezeigt, stammen. Eine Umstellung der Formel 3 liefert Formel 8.

$$v = l_0 - A - B \quad (8)$$

Für die zugehörige Werkzeugkombination, die Materialbezeichnung, die Blechstärke und den entsprechenden Biegewinkel wird diese Istverkürzung in den Technologieparametern abgelegt und im Gesamtprozess verwendet.

Für eine Beispielprobe einer L-Geometrie, wie in Abbildung 17 auf Seite 15 dargestellt, aus ZE1050, $t = 1.2\text{mm}$, OW $r_{st} = 1\text{mm}$, UW $w = 10\text{mm}$ $r_w = 1\text{mm}$ und $\alpha = 90^\circ$, ergibt die indirekte Verkürzungsberechnung $v = -2.75\text{mm}$ nach Formel 8 für $l_0 = 130.04\text{mm}$ und den gemessenen Schenkellängen $A = 69,38$ und $B = 63,41$.

MINDESTBIEGERADIUS r_i Zusätzlich zur Verkürzung ist der Mindestbiegeradius ein wesentlicher Technologieparameter für geometrische Grenzen bei der Konstruktion und Fertigung.

Durch einen standardisierten Versuchsablauf, wie in Abbildung 45 dargestellt, können an einer Materialprobe mit den Abmaßen 100 mm x 100 mm ressourcenoptimiert mehrere verschiedene Biegeradien getestet werden. Die Umformung kann grundsätzlich auch an einzelnen Blechproben erfolgen. Der minimale Biegeradius wird dabei durch eine materialabhängige stufenweise Anpassung der Gesenkweite (zB. $w = 6, 8, 10, 12, 16, 20$) und des Stempelradiuses (zB $r_{St} = 1, 2, 3, 4$) experimentell am vorgestellten Versuchsaufbau ermittelt.

Der Mindestbiegeradius für ZE1050 1.2mm beträgt quer zur Walzrichtung 0,8 mm. Realisierbar sind diese Werte mit der Werkzeugkombination $w10/r_{St}1$. Parallel zur Walzrichtung beträgt der minimale Biegeradius 2,5 mm mit der kleinstmöglichen Werkzeugpaarung $w12/r_{St}3$. Die Herstellung kleiner Biegeradien führt zu Materialversagen wie in Abbildung 45 rechts dargestellt.

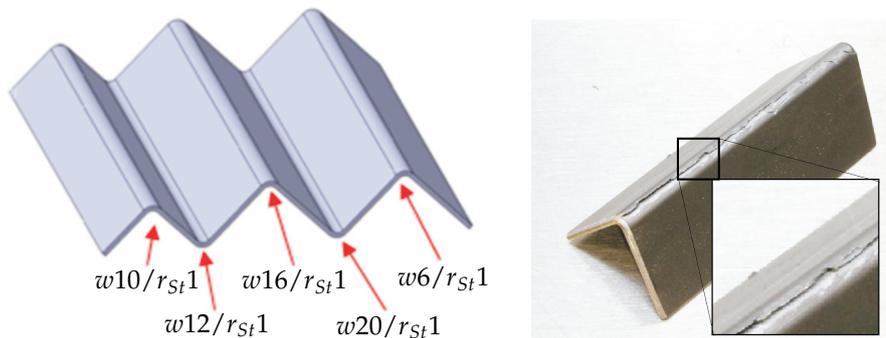


Abbildung 45: Versuchsgeometrie zur Bestimmung der Eigenschaften der Biegezone

RÜCKFEDERUNG Die Ermittlung der biegewinkelabhängigen Rückfederung erfolgt indirekt durch die aus Bildern ermittelten Biegewinkel mit Formel 6 auf Seite 15. Dazu wird ein Bild im unteren Totpunkt (UT) der Umformung und eines der entlasteten Biegeprobe benötigt. In Abbildung 46 links ist die zur verzerrungsfreien Bildaufnahme notwendige orthogonale Ausrichtung der Kamera dargestellt. In der Mitte das Bild im UT und rechts die entlastete Biegeprobe. Durch eine direkte Validierungsmessung der entlasteten Biegeprobe können die durch eine anschließende Bildverarbeitung ermittelten Winkelwerte α_1 und α_2 einfach überprüft werden.

Die Rückfederungsergebnisse für den Blechwerkstoff ZE1050 mit 1,2 mm Blechstärke betragen für einen Biegewinkel von 90° quer zur Walzrichtung, mit der Werkzeugkombination $w10/r_{St}1$, $k_r = 0.957$ und als Differenz von $\alpha_1 - \alpha_2 = 4^\circ$. Parallel zur Walzrichtung beträgt die Rückfederung mit der Werkzeugpaarung $w12/r_{St}3$ $k_r = 0.918$ und als Differenz von $\alpha_1 - \alpha_2 = 8^\circ$.

EIGENSCHAFTEN DER BIEGEZONE HÖCHSTFESTER ZE-GÜTEN Da auch in der Literatur keine Technologieinformationen zu den hier verwendeten höchstfesten mikroliegerten klatgewalzten ZE-Güten [BIL] vorhanden sind und diese auch in Kapitel 8 Verwendung finden, werden hier zusätzliche Untersuchungen an verschiedenen Materialsorten dieses Typs durchgeführt. Neben der Werkstoffbezeichnung sind dabei die 5-stellige Chargennummer und

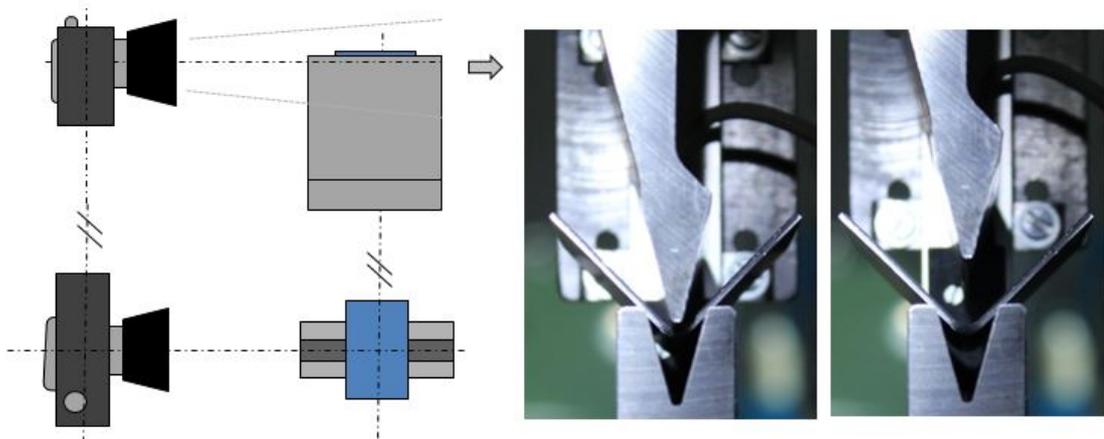
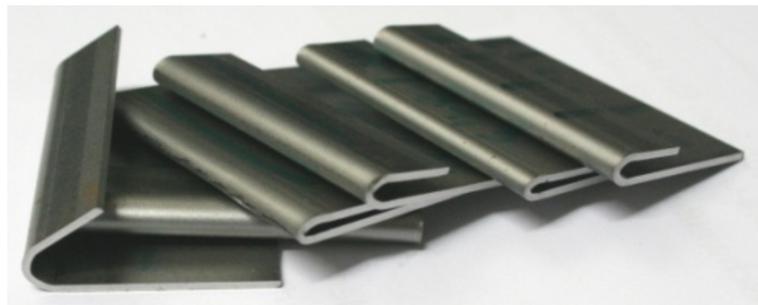


Abbildung 46: Bestimmung der Rückfederung

die Blechdicke angegeben. Die untersuchten Materialien sind: ZE1200, 63954, 0,4 mm; ZE 1200, 62514, 0,6 mm; ZE1200, 63951, 0,6 mm; ZE1400, 89451, 0,8 mm; ZE1000, 42429, 1 mm; ZE1000, 28342, 1 mm; ZE1200, 89450, 1 mm; ZE 950, 21418, 1,2 mm; ZE 900, 14827, 1,4 mm; ZE 700, 14836, 1,4 mm.

Abbildung 47: Probefalzung an ZE1000 $t = 1$ mm

Aus dieser Parameterstudie resultieren Informationen über den kleinsten Biegeradius, Rückfederungsverhalten, Verkürzungswerte sowie Verarbeitungsrichtlinien, notwendige Biegekraft und Mindestschenkellängen für die verschiedenen Materialien zur Sammlung in den Technologieinformationen. Zusätzlich werden aus den ermittelten Fertigungsparametern allgemein gültige Aussagen zur Verarbeitung höchstfester Stahlbleche beim Freibiegen folgend abgeleitet.

- Einfluss von Stempelradius und Gesenkweite in Bezug auf den Mindestbiegeradius:
 - Für eine versagensfreie Umformung ist ein Mindeststempelradius im Bereich des zu erwartenden minimalen Biegeradius notwendig, da ein größerer Stempelradius einen größeren Biegeradius zur Folge hat. Zusätzlich nimmt der Biegeradius mit steigendem Biegewinkel ab und ist in verstärkter Form von der Walzrichtung abhängig. Dieses Verhalten ist bei weichen Stahlgüten nicht in dieser ausgeprägten Form zu beobachten.

- Bei zu kleinem Stempelradius bringt eine reine Erhöhung der Gesenkweite in Bezug auf den minimalen Biegeradius eine nur bedingte Verbesserung.
- Erkenntnisse zur Rückfederung:
 - Die Rückfederung steigt mit größerem Gesenk und ist proportional zum Biegewinkel.
 - Der Einfluss der Walzrichtung auf die Rückfederung bei gleichen Werkzeugkombinationen ist gering.
 - Der Einfluss des Stempelradiuses auf die Rückfederung ist gering.
- Falzen der ZE Blechgüten:
 - Eine Falzung parallel zur Walzrichtung ist erst mit einem Spalt von zweimal der Blechdicke rissfrei möglich (Probe 3 von rechts) und ist wesentlich von der Lage der Walzrichtung abhängig. Siehe dazu Abbildung 47, worin zu erkennen ist, dass quer zur Walzrichtung eine Spaltreduktion auf die Blechdicke möglich ist (Probe 2 von rechts).
- Erkenntnisse zur Biegekraft:
 - Die Biegekraft sinkt mit steigenden Gesenkweiten. Der Absolutwert entspricht durch die hohe Festigkeit des Materials aber den zu erwartenden höheren Werten im Vergleich zu weichen Materialsorten.

5.3.3 Experimentelle Validierung des Ansatzes der Verkürzungskorrektur

Der Regelkreis der adaptiven Gesenkweitenverstellung beim Freibiegen mit dem Ansatz der Verkürzungskorrektur aus Abschnitt 5.2.2 wird an dieser Stelle experimentell bestätigt. Dafür wird ein beispielhaftes Werkstück aus $t = 3\text{mm}$ DC01 mit einer 90° L-Geometrie und einer Sollschenkellänge $A = 69\text{mm}$ in einem 16mm Biegegesenk und einem 1mm Biegestempel am vorgestellten Versuchsaufbau hergestellt. In Abbildung 48 ist ausgehend von einer Referenz mit Solleigenschaften ein durch eine Blechdickenabweichung resultierender gemessener Schenkelfehler von $\Delta l = 0,28\text{mm}$ dargestellt. Die Blechdickenabweichung der Probe (1) von $0,5\text{mm}$ simuliert durch die Verwendung einer Nennblechstärke von $2,5\text{mm}$ des gleichen Materials abweichende Blecheigenschaften und führt bei einer Umformung mit den bis auf die Eintauchtiefe selben Rahmenbedingungen der Referenz zu der fehlerhaften Schenkellänge. Diese Abweichung kann bei gleichbleibender Blechdickenabweichung der Probe (2) durch eine hier iterativ gesteigerte Gesenkweite zu $w = 22.16\text{mm}$ in Form einer Schenkelverlängerung durch das größere Gesenk kompensiert und die Anwendbarkeit des Verbesserungsansatzes bewiesen werden. Durch die größere Gesenkweite wird der Verkürzungswert der abweichenden Probe an den die Referenz angeglichen und beträgt gemessen $v = -5.16\text{mm}$.

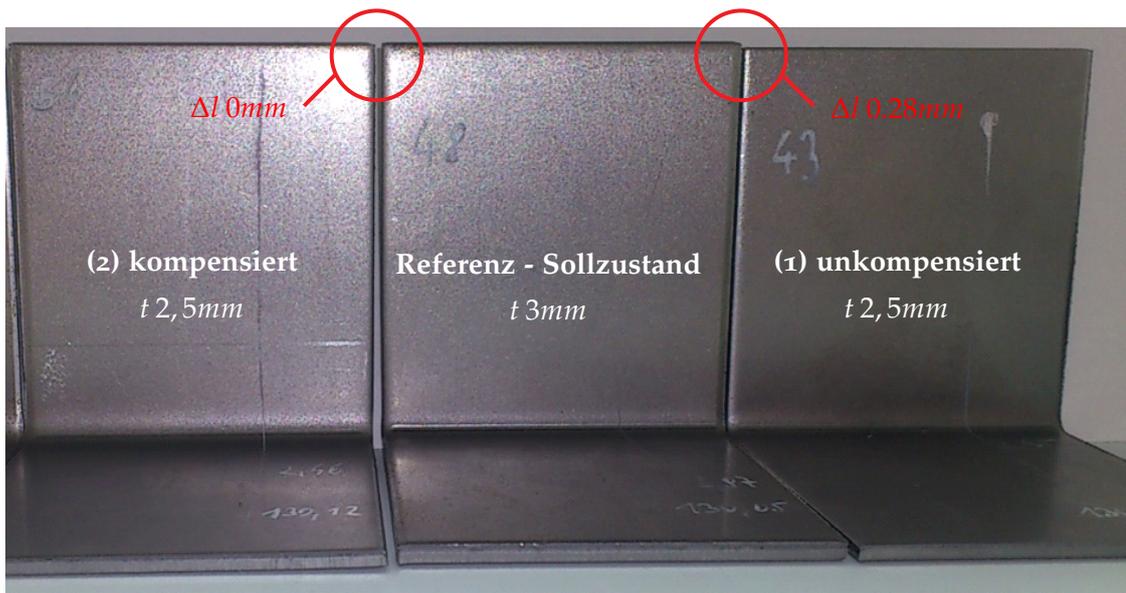


Abbildung 48: Kompensationsbeispiel

5.4 BAUTEILAUSWAHL

Bezugnehmend auf das zuvor in Kapitel 4 definierte Erweiterungsfeld, bildet in dieser Arbeit die Betrachtung einer realen Fahrzeugkarosserie die Basis zur Bauteilauswahl bei der Herstellung von funktionalen Schalenbauteilen mittels Biegeumformen. Anhand dieser werden Schalenbauteile mit Substitutionspotential ausgewählt und in Bezug auf ihre Funktion und Einbaubedingungen charakterisiert. Das Hauptaugenmerk sollte dabei auf die Umsetzbarkeit durch Freibiegen und die Erhaltung der Bauteileigenschaften gelegt werden.

Aufgrund des klaren Ziels in Richtung Herstellung von komplexen Karosseriebauteilen bei der Ausnutzung der Vorteile des Herstellprozesses Freibiegen und der Berücksichtigung der damit verbundenen Eigenschaften kommen für eine erste Einschränkung nur verschiedene Strukturbauteile der Gesamtkarosserie als potentielle Bauteile in Frage. Alle anderen Bauteile einer Karosserie, siehe Abbildung 49, können bereits an dieser Stelle für diese Arbeit vernachlässigt werden. Des Weiteren wird hier in diesem Zusammenhang zusätzlich noch eine Einschränkung auf hoch- und höchstfeste Stahlbleche getroffen, da weiche Stahlsorten auch mit herkömmlichen Verfahren wirtschaftlich zu komplexen Schalenbauteilen geformt werden können. Hieraus ergibt sich auch eine spätere Auswahl geeigneter Blechwerkstoffe, die für die Konstruktion von solchen Biegebauteilen herangezogen werden können. Mit der Erhöhung der Festigkeit kann grundsätzlich eine Dickenreduktion und eine damit einhergehende Gewichtersparnis von Komponenten erreicht werden. Eine Herausforderung bei der Blechdickenreduzierung ist die Beibehaltung der Steifigkeit des Bauteils.

Die Verwendung hochfester Stahlgüten bedeutet jedoch keine Einschränkung bezüglich der Nutzung der im Folgenden entwickelten Strategien und Methoden bei deren Anwendung an weichen Blechgüten.

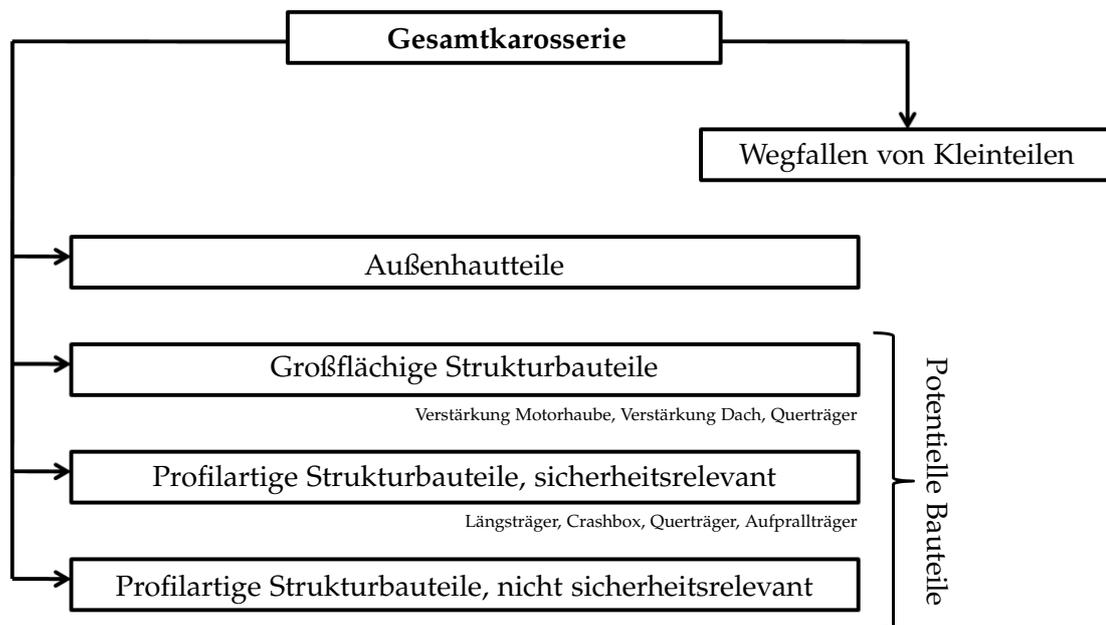


Abbildung 49: Bauteilkategorien einer Gesamtkarosserie

Im Zuge einer Potentialanalyse werden Bauteile zielgerichtet ausgewählt. Die Bauteilgröße, der Komplexitätsgrad und die Festigkeitsklasse werden dabei als Hauptkriterien für die Einteilung der relevanten Bauteile festgelegt. Das Ergebnis dieses Analysevorgangs ist in Abbildung 50 mit einigen beispielhaften Bauteilen dargestellt.

Auf Basis der Matrix aus Abbildung 50 werden konkrete Bauteile mit hohem Substitutionspotential ausgewählt. Ergänzend zu den bereits erwähnten Bewertungsparametern wurden Stückzahlen, Einbaubedingungen, Montagepunkte, realistische Prüfmöglichkeiten sowie eine grundlegende Einschätzung der Machbarkeit auf Basis von fertigungstechnischen Randbedingungen zur Entscheidungsfindung herangezogen. Zu bemerken ist dabei, dass Bauteile die als Komponente ausgelegt und bewertet werden können, die später notwendigen Modelle in Simulation und Experiment wesentlich vereinfachen. Die Auswahl beschränkt sich daher weiter auf Bauteile, deren Test nicht im Karosserieverbund erfolgen muss und damit als Komponente für sich testbar sind.

Das Ergebnis der Bauteilauswahl mit detaillierten Hintergründen und Entscheidungsgrundlagen sind an folgenden Beispielen dargestellt.

- Der Seitenaufprallträger, dargestellt in Abbildung 53, ist ein Sicherheitsbauteil. Bei der herkömmlichen Herstellung mittels Crash-Formen treten Probleme mit der Maßhaltigkeit auf. Diese resultieren aus Chargenschwankungen des Blechmaterials, sowie durch den großen Werkzeugverschleiß aufgrund der hohen Werkstofffestigkeiten. Weitere Herausforderungen sind das damit verbundene Rückfederungsverhalten und der nicht uner-

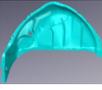
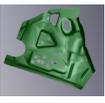
		Festigkeitsklasse								
		LSS			HSS			UHSS		
Komplexitätsgrad	einfach	-# / -kg -	6# / 1,6kg Querträger Boden 	-# / -kg -	-# / -kg -	-# / -kg -	-# / -kg -	-# / -kg -	-# / -kg -	-# / -kg -
	mittel	6# / 0,3kg Scharnier- verstärkung oben, Säule B 	3# / 2,3kg Verstärkungs- profil Heckklappe 	-# / -kg -	8# / 0,3kg Scharnier- verstärkung unten, Säule B 	1# / 2,2kg Seitenteil innen, oben 	-# / -kg -	-# / -kg -	-# / -kg Seitenauf- prallträger 	-# / -kg -
	hoch	24# / 0,7kg Verstärkung Aufnahme SBBR- Leuchte 	3,3# / 3,3kg Radhaus Innen, hinten 	24# / 0,7kg Bodenteil vorn 	8# / 0,2kg Scharnier- verstärkung Säule A oben 	8# / 4,9kg Säule A Innen, unten, Oberteil 	-# / -kg -	-# / -kg -	4# / 4kg Säule B Innen 	-# / -kg -
		Klein	mittel	groß	Klein	mittel	groß	Klein	mittel	groß
		Bauteilgröße								

Abbildung 50: Einteilung der relevanten Bauteile einer Karosserie

hebliche Pressenverschleiß aufgrund der hohen Umformkräfte.

Kompensierende Maßnahmen sind in diesem Prozess schwer zu integrieren und Wartung und Instandhaltung sind tägliche Begleiter.

- Beim Stoßfänger gilt Ähnliches wie beim Seitenaufprallträger. Die Herausforderung ist die konturfolgende Abbildung der vordefinierten Krümmungen mit verschiedenen Radien.
- In Bezug auf die Darstellbarkeit komplexer Geometrien in hochfester Ausführung mit einhergehender Blechdickenreduzierung und optimierter Funktionsintegration stellen Versteifungs- und Verbindungsbauteile wie zum Beispiel der „Stützträger Radhaus außen“, siehe Abbildung 51 linkes Bild, eine große Herausforderung dar. Die Funktionsintegration kann dabei Fügepartner einsparen.

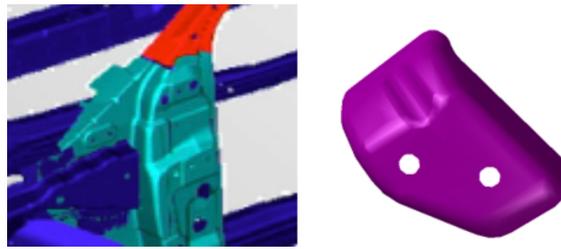


Abbildung 51: Verbindungs- und Versteifungsbauteile

- Die Schweller- und Bodenbaugruppe stellt ein großes Potential mit hinterschnittigen Bauteilen, welche durch Biegen hergestellt werden können, dar. Siehe Abbildung 52.

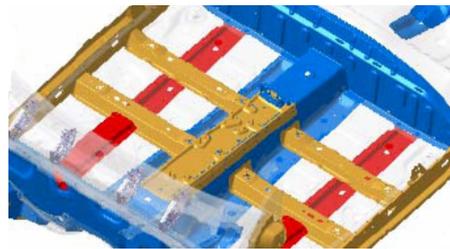


Abbildung 52: Schwellerbaugruppe

- Auf eine komplette B-Säule wird aufgrund der vielen Abhängigkeiten und der damit verbundenen hohen Komplexität bei der Bauteilerauswahl verzichtet.

In Abbildung 53 sind auf Basis dieser Vorauswahl die zur weiteren Analyse zu verwendenden CAD-Daten der Bauteile dargestellt. Die in dieser Abbildung enthaltene diagonale Linie berücksichtigt die oben beschriebenen Testverhältnisse.

Zur detaillierten Beschreibung der ausgewählten Schalenbauteile werden diese weiter analysiert. Dabei werden aus den einzelnen Bauteilgeometrien Funktionsbereiche definiert und ausgewählte Geometriebereiche richtig zugeordnet. Zusätzlich wird an dieser Stelle nochmals die Herstellbarkeit in Bezug auf das Herstellverfahren Freibiegen grundlegend abgeschätzt.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass nur der Seitenaufprallträger durchgängig bis zur physischen Umsetzung, siehe Kapitel 8, im Weiteren behandelt wird. Diese Entscheidung beruht auf der Basis, dass diese Komponente ausreichend komplex ist, um die notwendigen Schlüsse ziehen zu können und gleichzeitig keine besonderen Zusatzaufwände durch komplizierte Abhängigkeiten zu anderen Bauteilen oder Prozessen entstehen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind aber sehr wohl auf andere Bauteile und Materialien übertragbar.

Alle anderen relevanten Bauteile dienen der Analyse und werden nur in Bezug auf konzeptionelle Überlegungen und konstruktive Teillösungen weiterbehandelt.

Die Geometrieanalyse der Daten ergibt, dass alle untersuchten Schalenbauteile im Wesentlichen aus Kombinationen der in Tabelle 2 aufgelisteten Geometriebereichen bestehen. Dies lässt weiters den Schluss zu, dass mit entsprechenden konstruktiven Teillösungen, Schalenbauteile nach dem Baukastensystem konstruiert werden können. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 8.2 detailliert ausgearbeitet. Zusätzlich zur Identifikation der Geometriebereiche ist deren Zweck

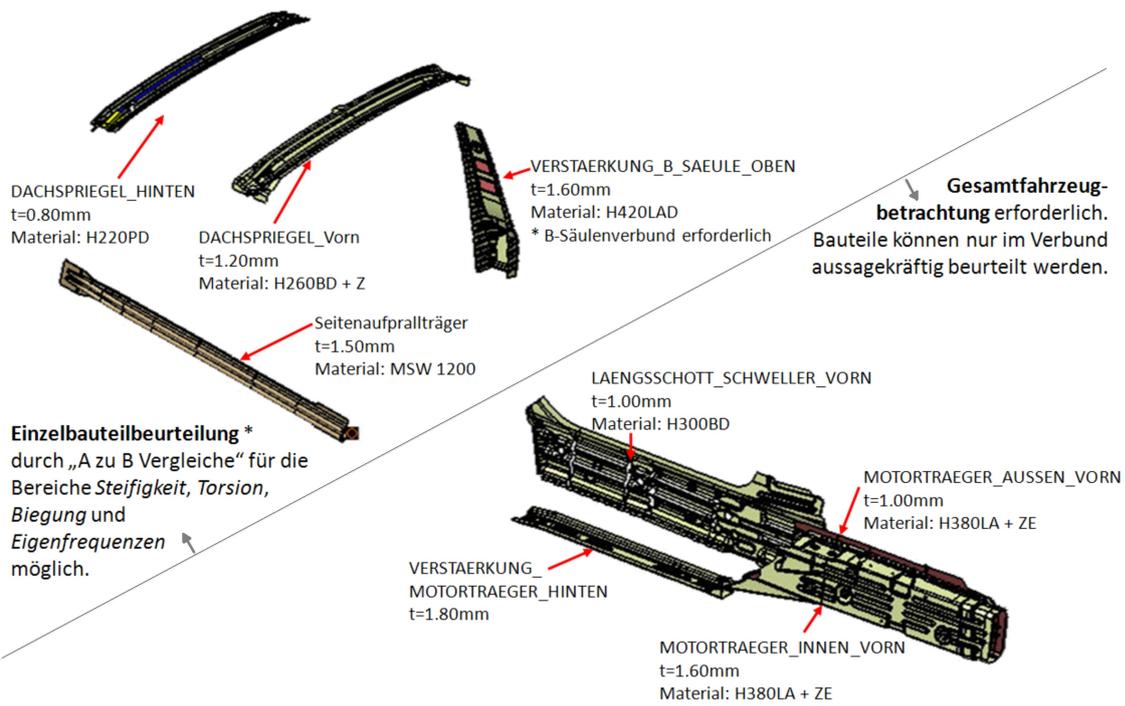


Abbildung 53: Geometriedaten

analysiert und in Funktionskategorien eingeteilt. Darin wird ersichtlich, dass Funktionskategorien wie Belastbarkeit und Steifigkeit mit dem grundlegenden Zweck eines Bauteils, dessen Funktionserfüllung, zusammenhängen. Sie erhalten damit eine höhere Priorität bei einer Bauteilkonstruktion als die Funktionskategorien Schnittstelle und Gesamtintegration, welche durch Gesamtkonzeptänderungen beeinflussbar sind. Die Herstellbarkeit durch standardisiertes Freibiegen ist nicht bei allen Geometriebereichen gegeben. Durch Sonderwerkzeuglösungen kann dieser Umstand im Rahmen der Wirtschaftlichkeit weitestgehend behoben werden. In Tabelle 2 ist dies mit einem mit Klammer versehenen „ja“ in der Spalte Freibiegen gekennzeichnet. Eine Sammlung an entsprechenden Teillösungen zu den einzelnen Geometriebereichen für das Freibiegen wird in Kapitel 6 ausgearbeitet.

<i>Geometriebereich</i>	<i>Zweck</i>	<i>Funktionsgeometrie</i>	<i>Freibiegen</i>
Querschnitte	Funktionserfüllung	Belastbarkeit	ja
Querschnittsübergang	Funktionserfüllung	Belastbarkeit	ja
Querschnittsauslauf	Funktionserfüllung	Belastbarkeit	ja
Prägung	Versteifungen	Steifigkeit	(ja)
Prägung	Sollknickstelle	Sicherheit	(ja)
Flächenkrümmung	Klebeflächen	Schnittstelle	(ja)
Befestigungsdom	Befestigungspunkt	Schnittstelle	(ja)
Lasche	Bauteilpositionierung	Schnittstelle	ja
Lasche gekrümmt	Anschlussfläche	Schnittstelle	(ja)
Kontaktfreistellung	Freistellung	Gesamtintegration	ja
Ebenensprung	Freistellung	Gesamtintegration	ja
Durchbruch	Freistellung	Gesamtintegration	ja
Variable Radien	Design	Gesamtintegration	nein

Tabelle 2: Ergebnisse der Geometrieanalyse

Leerseite

KONSTRUKTIVE SUBSTITUTION ZU BIEGEBauteILEN

Die Suche nach alternativen konstruktiven Lösungsprinzipien für Biegebauteile, auf Basis der unter Punkt 5.4 gefundenen Geometriebereiche, stellt den wesentlichen Inhalt dieses Abschnittes dar. Als Ergebnis soll ein Katalog mit konstruktiven Teillösungen für die einzelnen Geometriebereiche bereitgestellt werden. Damit sollte es möglich sein, durch die Kombination von Teillösungen aus Schalenbauteilen nach dem Baukastenprinzip, Biegebauteile zu konstruieren. Bei der Substitution muss unter Beachtung der Vorschriften aus dem Freibiegeprozess die Funktionserhaltung des Bauteils gewährleistet werden.

Zur detaillierten Untersuchung der Möglichkeiten zur Herstellung von Schalenbauteilen durch Freibiegen werden die einzelnen Geometriebereiche virtuell mit der CAD-Software Catia V5 [Eib13] [Lis12] in eine biegegerechte Teillösung überführt.

6.1 KONSTRUKTIVE RANDBEDINGUNGEN BEIM FREIBIEGEN

In einem ersten Schritt werden folgend die prozessbedingten, konstruktiven Randbedingungen als Basis für die zu erarbeitenden Teillösungen angeführt. Diese Gestaltungsrichtlinien stellen im Wesentlichen auch die kritischen Parameter für Konstruktionsrichtlinien dar.

6.1.1 *Minimaler Biegeradius*

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2.2 angeführt sind Mindestwerte für Biegeradien zu beachten, um ein Materialversagen zu verhindern. Zu große Biegeradien erhöhen die Rückfederung was zu Geometrie einschränkungen infolge des notwendigen Überbiegens führen kann. In der Abbildung 54 ist ersichtlich, dass sich der minimale Biegeradius proportional zur Blechdicke und Blechfestigkeit verhält. Außerdem muss beim Biegen von Blech unbedingt auf die Walzrichtung geachtet werden. Quer zur Walzrichtung sind kleinere Biegeradien möglich. Dieser Effekt kommt aber hauptsächlich bei dickeren Blechen oder Materialien mit höherer Festigkeit zum Tragen.

Stahlsorten	beim Biegen quer oder längs zur Walzrichtung	Kleinster zulässiger Biegehalbmesser r für Dicken s														
		bis 1	über 1 bis 1,5	über 1,5 bis 2,5	über 2,5 bis 3	über 3 bis 4	über 4 bis 5	über 5 bis 6	über 6 bis 7	über 7 bis 8	über 8 bis 10	über 10 bis 12	über 12 bis 14	über 14 bis 16	über 16 bis 18	über 18 bis 20
S 235 JR S 235 J0 S 235 J2	quer	1	1,6	2,5	3	5	6	8	10	12	16	20	25	28	36	40
	längs	1	1,6	2,5	3	6	8	10	12	16	20	25	28	32	40	45
S 275 JR S 275 J0 S 275 J2	quer	1,2	2	3	4	5	8	10	12	16	20	25	28	32	40	45
	längs	1,2	2	3	4	6	10	12	16	20	25	32	36	40	45	50
S 355 JR S 355 J0 S 355 J2	quer	1,6	2,5	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	36	45	50
	längs	1,6	2,5	4	5	8	10	12	16	20	25	32	36	40	50	63

Abbildung 54: Mindestbiegeradius [N5]

6.1.2 Mindestschenkellänge

Die Mindestschenkellänge soll gewährleisten, dass die Biegeschenkel während des gesamten Umformvorganges am Einzugsradius der Matrize Kontakt aufweisen. Wird diese unterschritten, rutscht der Biegeschenkel ins Gesenk und kann damit nicht ordnungsgemäß umgeformt werden. Nach DIN 6935 wird beim Biegen eine kleinste Schenkellänge b (Abbildung 55) mit $4 * r_i$ empfohlen. Diese sehr konservative Empfehlung kann durch eine gesenkweitenabhängige Richtlinie, für 90° Winkel mit $0,75 * w$ [TRU07], optimiert angegeben werden.

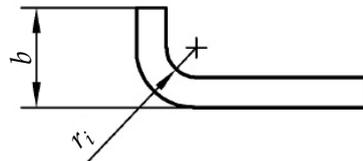
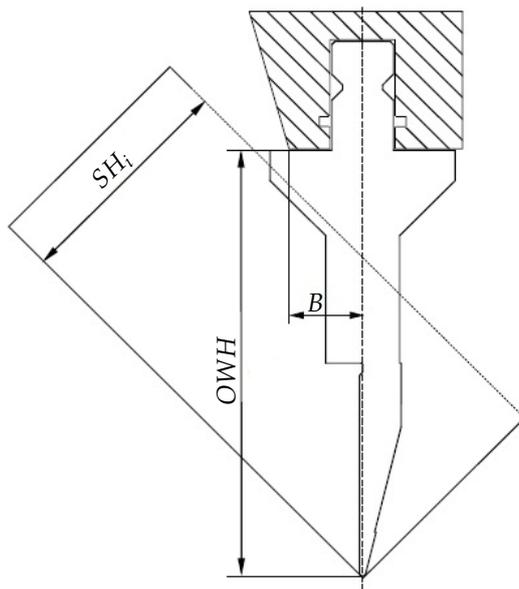


Abbildung 55: Kleinste Schenkellänge b [N5]

6.1.3 Maximale Schachtelhöhe

Die maximale Schachtelhöhe ist ein maschinen- und werkzeugabhängiger Parameter. Er beschreibt die maximal zulässigen geometrischen Verhältnisse der Schenkellängen bei vorgegebenen Randbedingungen, siehe Abbildung 56. Hierin ist SH die Schachtelhöhe (innen), OWH die Oberwerkzeughöhe und B der Abstand von Pressbalkenmitte bis zur Pressbalkenaußenkante. Die maximale Schachtelhöhe für einen 90° Winkel berechnet sich aus Formel 9 [TRU07].



$$SH_i = \frac{OWH - B}{\sqrt{2}} * 0.95 \quad (9)$$

Abbildung 56: Maximale Schachtelhöhe SH_i [TRU07]

6.1.4 Bauteile mit unterschrittenen Biegungen

Bei Bauteilen mit unterschrittenen Biegungen (Abbildung 57) ist der Abstand e grundsätzlich bauteilabhängig so groß wie möglich zu wählen. [Mar05] Eine allgemeingültige Formel ist nicht bekannt. Die Problematik bei zu großer Schenkellängen A_i bzw. zu kleinem Abstand e resultiert wie auch bei einer Überschreitung der maximalen Schachtelhöhe in einer Kollision mit dem Biegestempel.

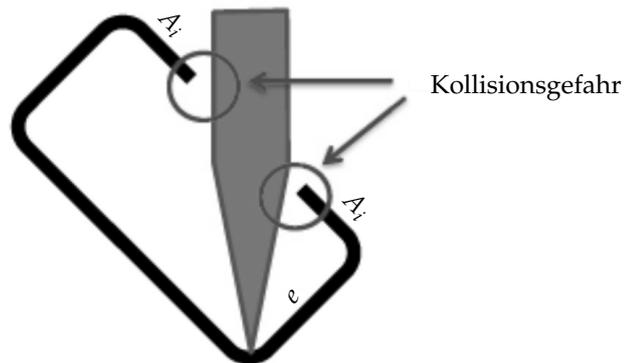


Abbildung 57: Problemstellung bei unterschrittenen Bauteilen

6.1.5 Mindestabstände von Bohrungen und Durchbrüchen

Die Mindestabstände von Bohrungen und Durchbrüchen zur Biegekante sind unbedingt zu beachten. Wenn die Einhaltung des Mindestabstandes nicht möglich ist, sind Durchbrüche über die Biegekante zu ziehen, siehe Abbildung 58 und Abbildung 59. [Pah+05] Eine Missachtung dieser Richtlinie führt infolge der Umformung zu verzerrten Geometrien in diesem Bereich. Eine Empfehlung nach TRUMPF für den Mindestabstand von Bohrungen und Ausklinkungen ist $x > 0,75 \cdot w$, dies entspricht der Mindestschenkellänge. [TRU07]

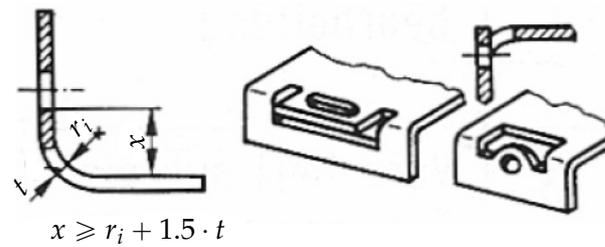


Abbildung 58: Mindestabstände von Löcher und Durchbrüchen [Pah+05]

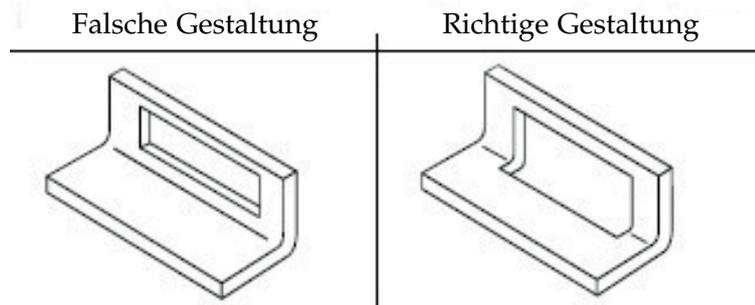


Abbildung 59: Durchbruch bis über die Biegekante gezogen [TRU07]

6.1.6 Versteifung - Sicken

Um die Formsteifigkeit bei Blechen zu erhöhen, werden Sicken angebracht. Sicken sind rinnenartige Vertiefungen in Blechoberflächen, wobei die Tiefe gegenüber der Länge klein ist. [Lan90] In Abbildung 60 sind verschiedene Typen von Sicken dargestellt.

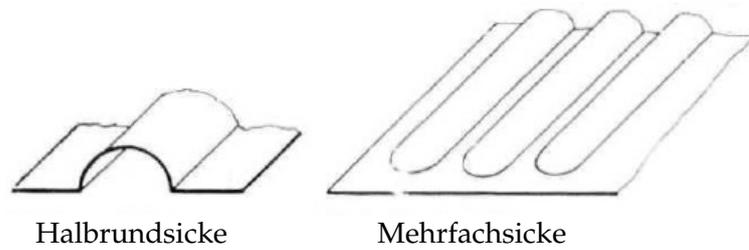


Abbildung 60: Sicken [Lan90]

6.1.7 Eckenfreistellungen

Biegelinien sollen keinen gemeinsamen Schnittpunkt im Material bilden. Die Stauchung und Dehnung wird ansonsten in der Biegezone behindert und verursacht Risse oder Geometrieverzerrungen. Als Lösungsmaßnahme können Ausklinkungen, wie in Abbildung 61, vorgesehen werden. [TRU07]

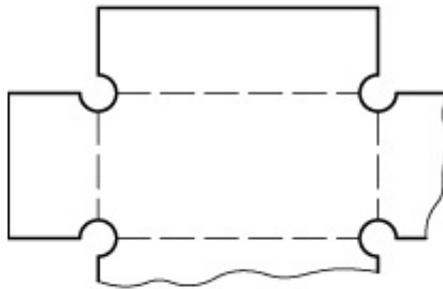


Abbildung 61: Ausklinkungen bei gemeinsamen Schnittpunkt im Material [Mar05]

6.1.8 Ausklinkungen

Ausklinkungen mit $x = 1,5 * t$ sind auch als Lösungsmaßnahme bei Problemen, wie in Bild 62 dargestellt, wirksam.

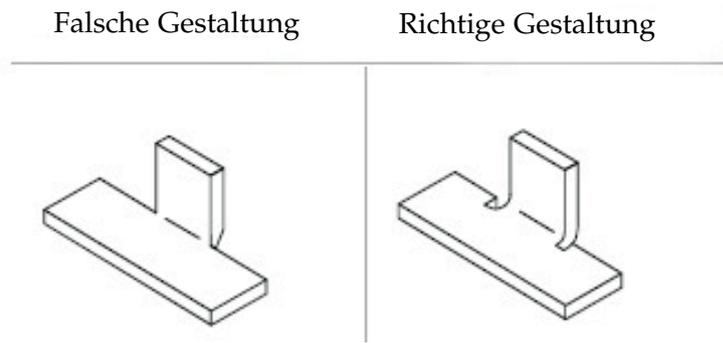


Abbildung 62: Ausklinkungen bei gemeinsamen Schnittpunkt im Material [TRU07]

6.1.9 Schräge Kanten und Ausläufe

Schräge Kanten und Ausläufe im Bereich der Biegekante sind zu vermeiden. Die Einhaltung von Mindestschenkellängen oder eine Ausführung mit Freischnitt an der schrägen Kante, siehe Abbildung 63 rechts, ist in diesem Zusammenhang erforderlich. [TRU07]

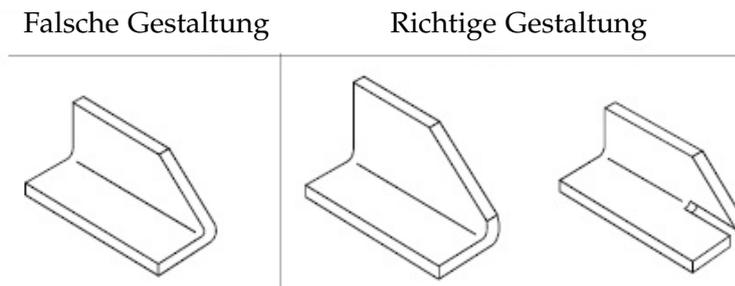


Abbildung 63: Schräge Kanten und Ausläufe im Bereich der Biegekante [TRU07]

6.1.10 Abwickelbarkeit

In Bezug auf die Herstellbarkeit von Biegebauteilen ist die Abwickelbarkeit ein sehr wichtiger Punkt, da jedes Biegebauteil beim Freibiegen in einem ebenen Blechzuschnitt seinen Ursprung findet. Bei der Gestaltung von Biegebauteilen ist daher ständig auf die Abwicklung zu achten. In Abbildung 64 ist ein Musterbauteil (links) mit Überlappung in der zugehörigen Abwicklung (rechts) dargestellt. Dieses Beispiel zeigt, dass konstruierte Biegebauteile nicht selbstverständlich herstellbar sind.

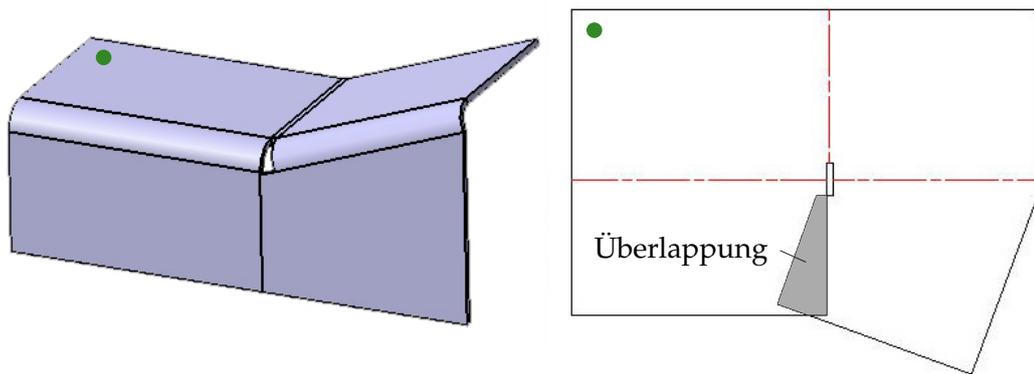


Abbildung 64: Abwickelbarkeit eines Biegebauteils

6.1.11 Falzen

Als Falzen wird im Zusammenhang mit Freibiegen eine Kantung mit 180° Biegewinkel bezeichnet. Es muss jedoch aufgrund der scharfkantigen Biegung entlang der gesamten Biegelinie, infolge von Materialversagen wegen der Unterschreitung des minimalen Biegeradiuses, mit einer Festigkeitsminderung gerechnet werden. [Mar05] Durch das scharfkantige 180° -Biegen kann es in den gedehnten Randlagen zu Anrissen (vgl. Abbildung 18) und in den gestauchten Randlagen zu Fehlerscheinungen kommen. Eine Verbesserung dieses Sachverhaltes kann durch eine tropfenförmige Ausführung der Falzung, siehe Abbildung 65 rechts, erreicht werden.

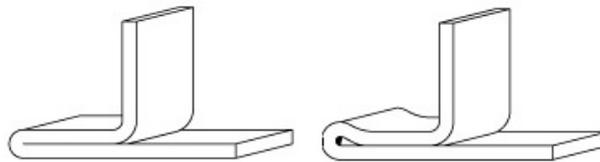


Abbildung 65: Festigkeitsminderung durch Umschlagen [Mar05]

Als Vorteil einer Falzung kann in diesem Zusammenhang die Möglichkeit einer Teilerduzierung, siehe Abbildung 66, genannt werden.

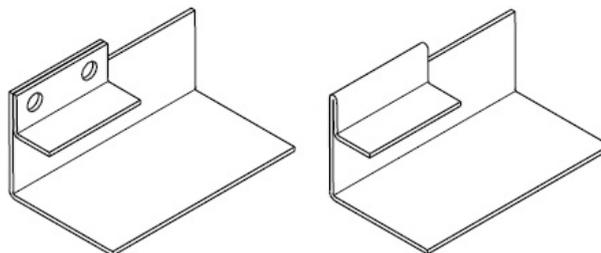


Abbildung 66: Teilerduktion durch Falzen [Ral09]

6.2 KONSTRUKTIVE TEILLÖSUNGEN

Unter Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien aus Abschnitt 6.1 als geometrische Grenzen werden nun die unter Punkt 5.4 identifizierten Geometriebereiche abstrahiert und zu biegegerechten Teillösungen überführt.

Neben der geometrischen Herstellbarkeit der Biegebauteile ist zusätzlich auf die Erhaltung der Eigenschaften der funktionellen Schalenbauteile zu achten. Biegebauteile sind demnach so zu gestalten, dass die verfahrensbedingte Trennung von Biegeschenkeln in Abhängigkeit der Belastungspfade erfolgt. Zur Fertigstellung der funktionalen Biegebauteile müssen geometrie- und materialabhängige Fügeverfahren zum Einsatz kommen. Neben verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten durch Umformen direkt beim Freibiegen können zusätzlich als Folgeprozess mechanische oder thermische Fügeverfahren zur Anwendung kommen [Fri13]. Die verschiedenen Fügemöglichkeiten, wie zum Beispiel Kehlnähte, Ecknähte, I-Nähte, Punktschweißungen oder auch Niet- und Schraubverbindungen [Hau96], werden in dieser Arbeit nicht detailliert behandelt. In den folgend erarbeiteten konstruktiven Teillösungen sind notwendige Fügstellen durch grüne Linien und Punkte gekennzeichnet und die wesentlichen Geometrieparameter bemisst. Durch eine Anpassung der Geometrieparameter der Teillösungen im Rahmen der Gestaltungsrichtlinien können die zu substituierenden Teilbereiche entsprechend abgebildet werden. Die einzelnen Geometriebereiche stammen aus den in Abbildung 53 dargestellten Karosseriekomponenten. Auf eine detaillierte Herkunftsbeschreibung wird im folgenden verzichtet, da die geometrischen Teilbereiche in sehr ähnlicher Form bei mehreren Bauteilen vorkommen und nur als Prinzipdarstellung zur Abstraktion dienen.

6.2.1 Querschnitte

Die Querschnittsgrundformen der hier betrachteten Schalenbauteile sind als U- oder Hutprofil ausgeführt. Bei diesen Querschnittsprofilen ist vor allem auf das Verhältnis zwischen Profilhöhe H_P und Profilhöhe H_P zu achten, um eine Kollision mit dem Oberwerkzeug bei der Herstellung zu verhindern.

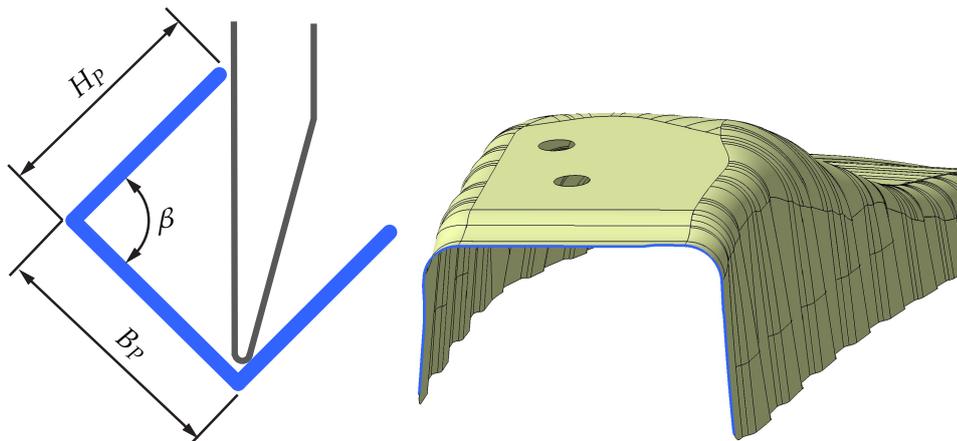


Abbildung 67: Verhältnis von Profilbreite und Profilhöhe am U-Profil

QUERSCHNITT U-PROFIL: Für einen Biegewinkel von $\alpha = 90^\circ$ ist dieses Verhältnis am Beispiel eines U-Profiles in Abbildung 67 neben der zugehörigen Referenzgeometrie abgebildet. Dieser Profilquerschnitt ist durch Freibiegen einfach herstellbar.

QUERSCHNITT HUT-PROFIL Eine erweiterte Form des U-Profiles ist das Hut-Profil, siehe Abbildung 68. Die zwei Zusatzschenkel gegenüber dem U-Profil sind bei der Herstellung unproblematisch. Eine doppelte Ausführung des Hut-Profils kann als W-Profil bezeichnet werden.

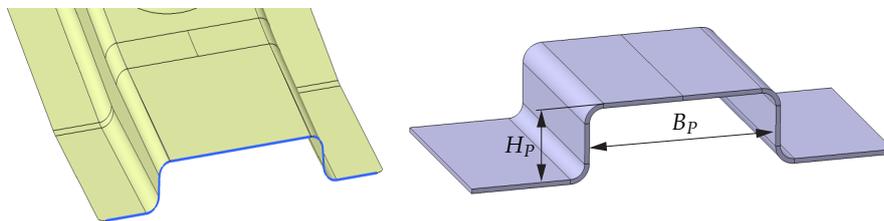


Abbildung 68: Querschnitt Hut-Profil

6.2.2 Querschnittsübergänge mit konstanter Profilbreite

Die Querschnittsübergänge mit konstanter Profilbreite B_p und veränderlicher Profilhöhe H_p können, wie am Referenzbauteil in Abbildung 69 dargestellt, in positive (blau markiert) und negative (rot markiert) Querschnittsübergänge eingeteilt werden.

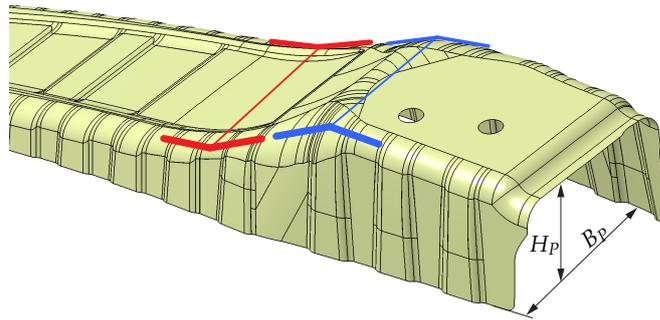


Abbildung 69: Querschnittsübergänge

QUERSCHNITTÜBERGANG-POSITIV Eine Musterlösung für positive Querschnittsübergänge zeichnet sich durch ihre volle Awickelbarkeit mit Materialpotential für Verbindungslaschen aus. Wie in der Abbildung 70 links dargestellt, kann die Verbindung der Biegeschenkel beispielhaft durch eine Linienverbindung in Form einer Schweißnaht erfolgen. Die zugehörige Abwicklung in der Mitte der Darstellung zeigt das vom Biegewinkel α abhängige Materialpotential für Verbindungslaschen in Kombination mit Punktfügeoperationen für eine Teillösung, wie auf der rechten Seite dargestellt. Die Herstellung ist bis auf die bereits bekannten Einschränkungen des U-Profils als unproblematisch einzustufen.

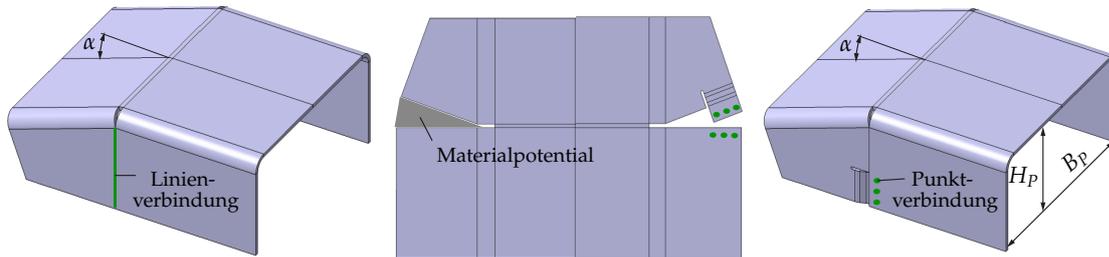


Abbildung 70: Querschnittsübergang-Positiv

QUERSCHNITTÜBERGANG-NEGATIV Im Unterschied zum positiven Querschnittsübergang kann bei der negativen Variante selbst bei voller Ausnützung des Materialpotentials aus der Abwicklung keine geschlossene Bauteilgeometrie erzeugt werden. In Abbildung 71 ist dieser Sachverhalt rot markiert. Vergleiche dazu auch Abbildung 64. Der Öffnungswinkel β definiert in diesem Zusammenhang die Größe der Öffnung. Die für ein Funktionsbauteil notwendige Verbindung der zwei Biegeschenkel durch Fügen kann folglich nur durch zusätzliches Blechmaterial erfolgen.

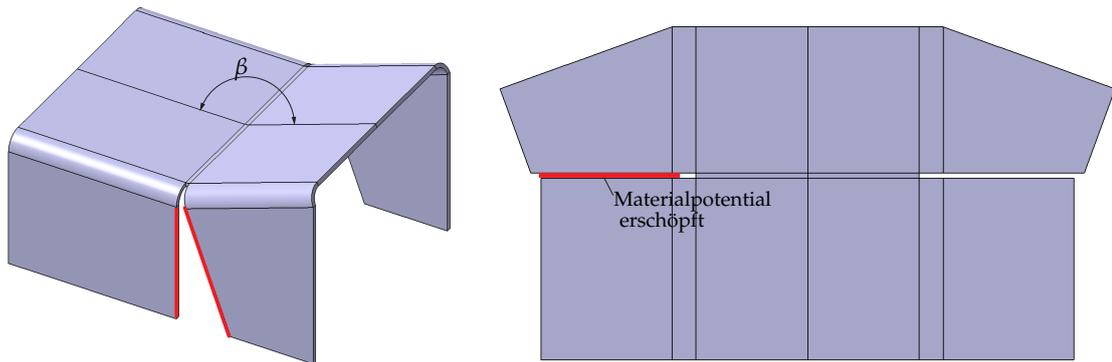


Abbildung 71: Querschnittsübergang-Negativ

Für eine einteilige Lösung kann materialabhängig ein zusätzlicher Schenkel durch eine Falzoperation erzeugt werden. Bei hochfesten Materialien wird es bei der Herstellung durch den kleinen Biegeradius beim Falzen zu Rissen kommen. In Abbildung 72 ist ein negativer Querschnittsübergang mit gefalzter Zusatzlasche und Punktfügeverfahren dargestellt. Bei der Geometrierzeugung ist unbedingt auf die Winkelabhängigkeit, dabei vor allem bei Öffnungswinkeln $\beta < 150^\circ$, der Laschengeometrie zu achten.

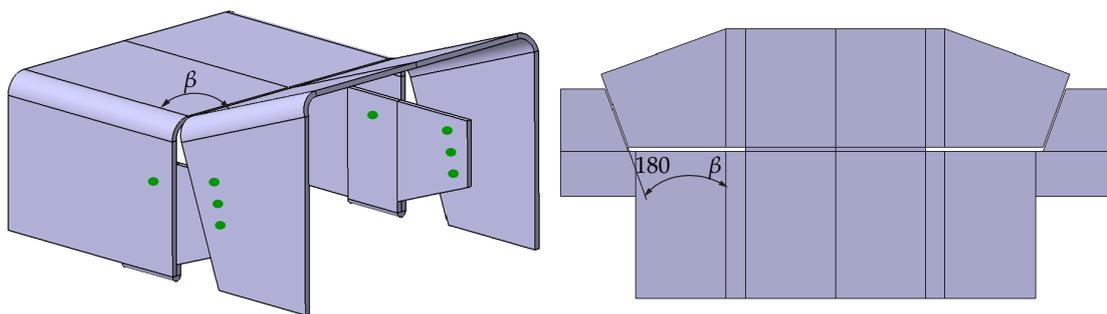


Abbildung 72: Querschnittsübergang-Negativ mit gefalzter Zusatzlasche

Eine alternative Teillösung ist die Verbindung der Biegeschenkel durch zusätzliche Einlegeteile. In Abhängigkeit des bevorzugten Fügeverfahren ergeben sich die in Abbildung 73 dargestellten Gestaltungsmöglichkeiten mit a) Linien- oder b) Punktverbindungen. Bei den Querschnittsübergängen mit Einlegeteilen kann β grundsätzlich ohne besondere Einschränkungen gewählt werden. Es ist aber zu beachten, dass Einlegeteile beim Fügevorgang einen erhöhten Aufwand bedeuten.

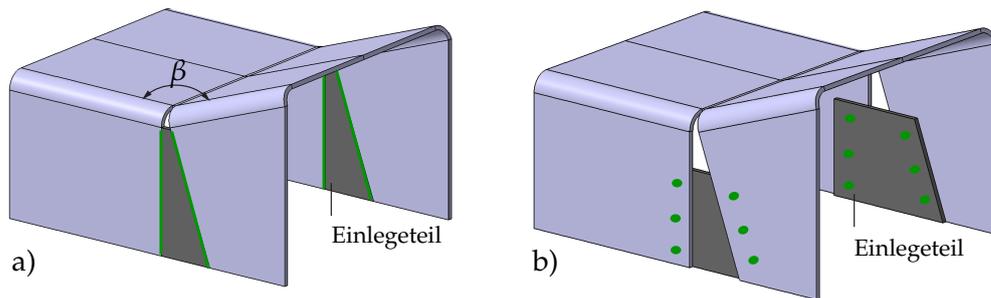


Abbildung 73: Querschnittsübergang-Negativ mit Einlegeteilen

Eine weitere Möglichkeit zur Verbindung der Biegeschenkel durch Einlegeteile ist die Kombination zweier Biegebauteile mit einem im Bauteil integrierten Clipsystem. Diese Lösung ist als reine Biegelösung ohne zusätzliche Fügeoperationen umsetzbar. Abbildung 74 zeigt rechts das zusätzliche Einzelbauteil und links die verbundene Teillösung.

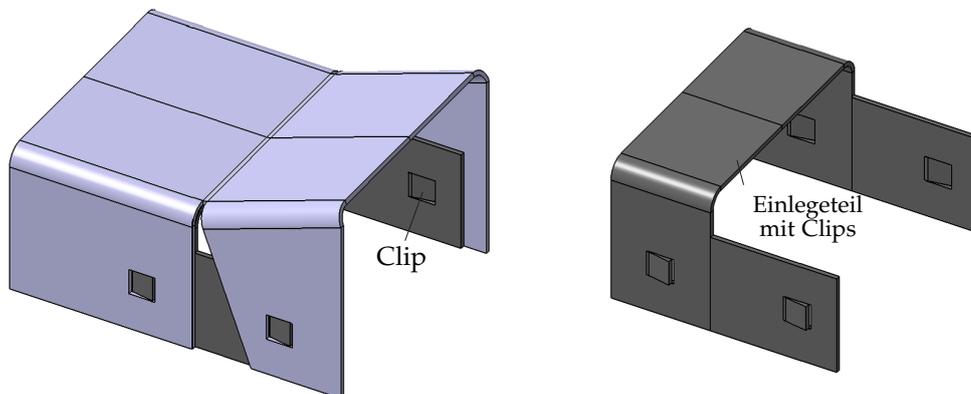


Abbildung 74: Querschnittsübergang-Negativ mit Clipsystem

6.2.3 Querschnittsübergänge mit konstanter Profilhöhe

Querschnittsübergänge mit konstanter Profilhöhe und veränderlicher Profilhöhe können, wie in Abbildung 75 rechts dargestellt, durch eine Verbindung von mindestens zwei Biegeschenkeln umgesetzt werden. Wenn aufgrund der geometrischen Verhältnisse die Lasche A nicht als verbindungs-fähige Biegelasche (rote Biegelinie) ausgeführt werden kann, muss diese als Einlegeteil ausgeführt oder belastungsabhängig weglassen werden. Die Verbindungsfähigkeit wird durch die, von der Übergangslänge L , der Profilverengung ΔB und dem zu verwendenden Fügeverfahren abhängigen, Spaltweite Δl bestimmt.

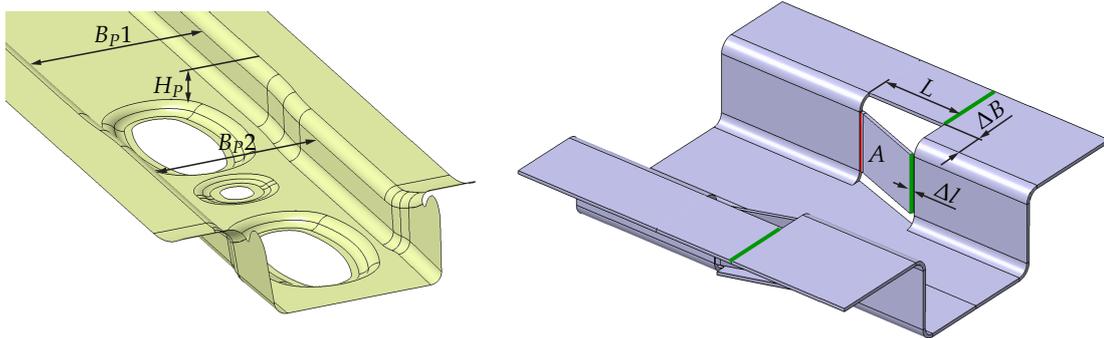


Abbildung 75: Querschnittsübergang mit konstanter Profilhöhe

6.2.4 Querschnittsausläufe

QUERSCHNITTAUSLAUF MIT RESTPROFILHÖHE Ein Querschnittsauslauf mit Restprofilhöhe H_{RP} ist in Abbildung 76 links dargestellt. Die folgend angeführten Lösungsvorschläge sind mit konstanter Profilbreite ausgeführt. Eine zusätzliche Änderung der Profilbreite beim Querschnittsauslauf ist in gleicher Weise umsetzbar. Eine Teillösung mit Linienverbindung, Abbildung 76 rechts, ist als geschlossene Geometrie einfach durch Freibiegen und anschließendem Fügeprozess herstellbar. Der Auslaufwinkel β kann dabei von 179° bis 90° variiert werden.

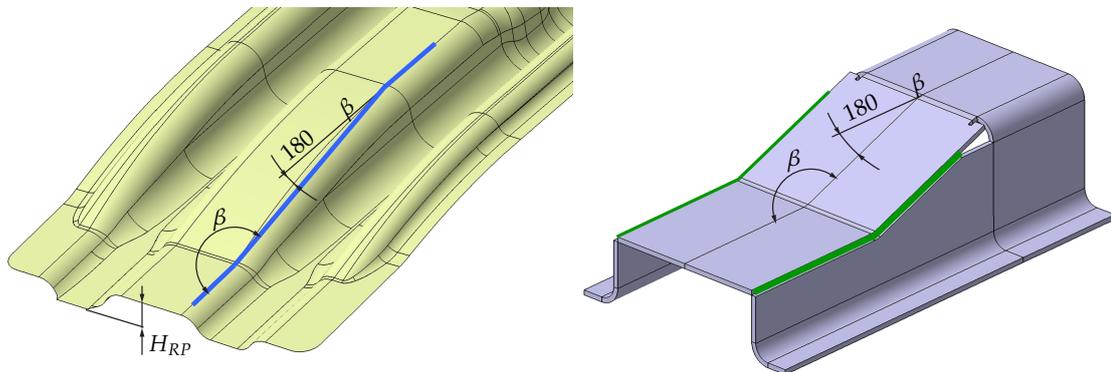


Abbildung 76: Querschnittsauslauf mit Restprofilhöhe

In Abbildung 77 sind ausgearbeitete Lösungsvorschläge mit Punktverbindungen der Biegeschenkel dargestellt. Teillösung a) ist darin gewichtsoptimiert und Teillösung b) belastungsoptimiert ausgelegt. Abhängig vom notwendigen Auslaufwinkel β , dem zu verwendenden Fügeprozess und der Abwickelbarkeit sind Verbindungslaschen entsprechend auszuführen.

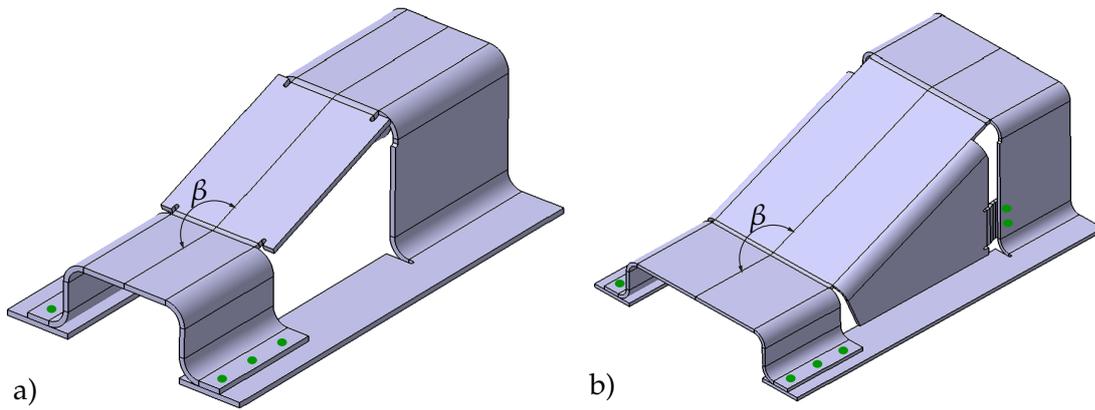


Abbildung 77: Teillösung mit Punktverbindung zum Querschnittsauslauf mit Restprofilhöhe

QUERSCHNITTAUSLAUF IN EINE EBENE Ein Querschnittsauslauf ohne Restprofilhöhe, der in eine Ebene übergeht, ist in Abbildung 78 als Referenz dargestellt. Bei den entsprechenden Teillösungen wird wieder auf die zwei Arten des Fügens eingegangen.

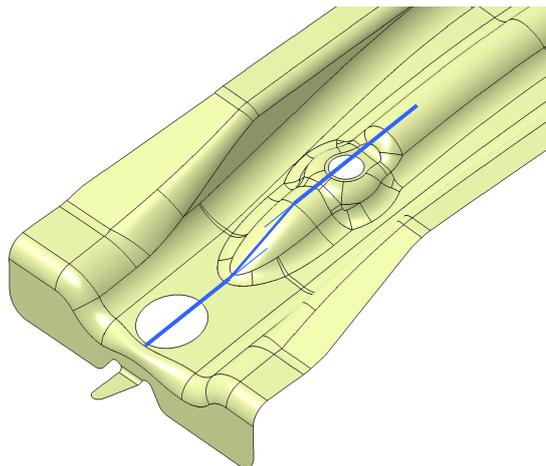


Abbildung 78: Querschnittsauslauf in eine Ebene

Die Teillösung in Abbildung 79 a ist für eine Punktverbindung ausgelegt. Der Abstand x ist von der Profilhöhe H_p und der Profilbreite B_p abhängig. Der Mindestwert ergibt sich aus diesen Parametern und der Abwickelbarkeit. Zusätzlich ist die Auslauflänge l ein charakterisierender Parameter dieser Teilgeometrie.

Die vor allem in Bezug auf den Fügeprozess aufwendigere Teillösung b ist bei der Geometriegestaltung flexibler. Der Abstand y kann abhängig vom Verbindungsverfahren beliebig gewählt werden.

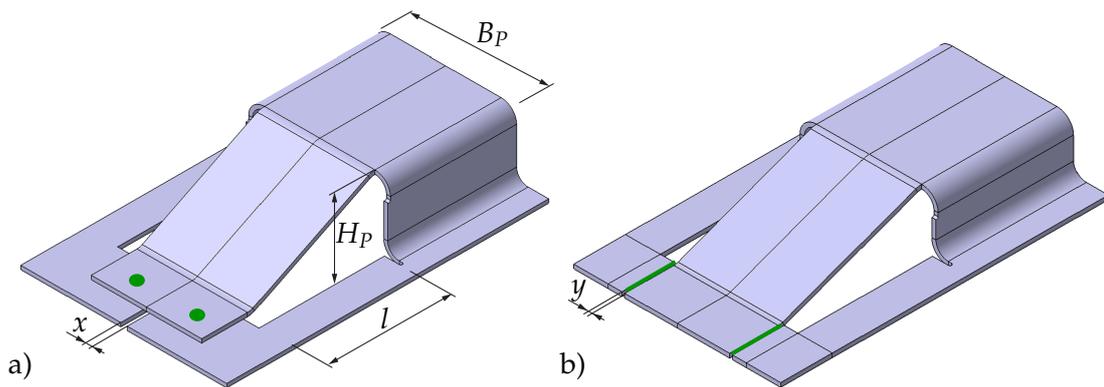


Abbildung 79: Teillösungen zu Querschnittsauslauf in eine Ebene

6.2.5 Flächenkrümmungen

Stetige Flächenkrümmungen werden beispielsweise für Klebestellen bei der Bauteilkombination zu Baugruppen benötigt. Durch stückweise lineare Biegungen können solche Geometriebereiche nur angenähert werden. Abbildung 80 a zeigt blau eingefärbt eine positive Flächenkrümmung mit großem Radius. In Abbildung 81 ist die zugehörige Teillösung inklusive Abwicklung dargestellt, die mit von der Anzahl der Trennschnitten abhängigem Aufwand hergestellt werden kann. Bei negativen Krümmungen, vergleiche dazu Abschnitt 6.2.2, wird der Aufwand aufgrund des zusätzlich notwendigen Materials noch höher. Als alternative Lösung in diesem Zusammenhang ist das Profilbiegen zu nennen. [Hof12] Kleine Bereiche mit gekrümmten Flächen, siehe Abbildung 80b, können durch spezielle Sonderwerkzeuge im Biegeprozess hergestellt werden.

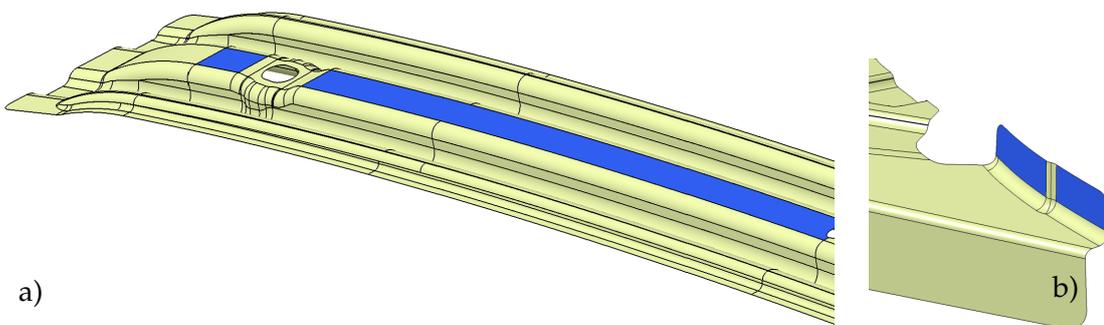


Abbildung 80: Flächenkrümmungen

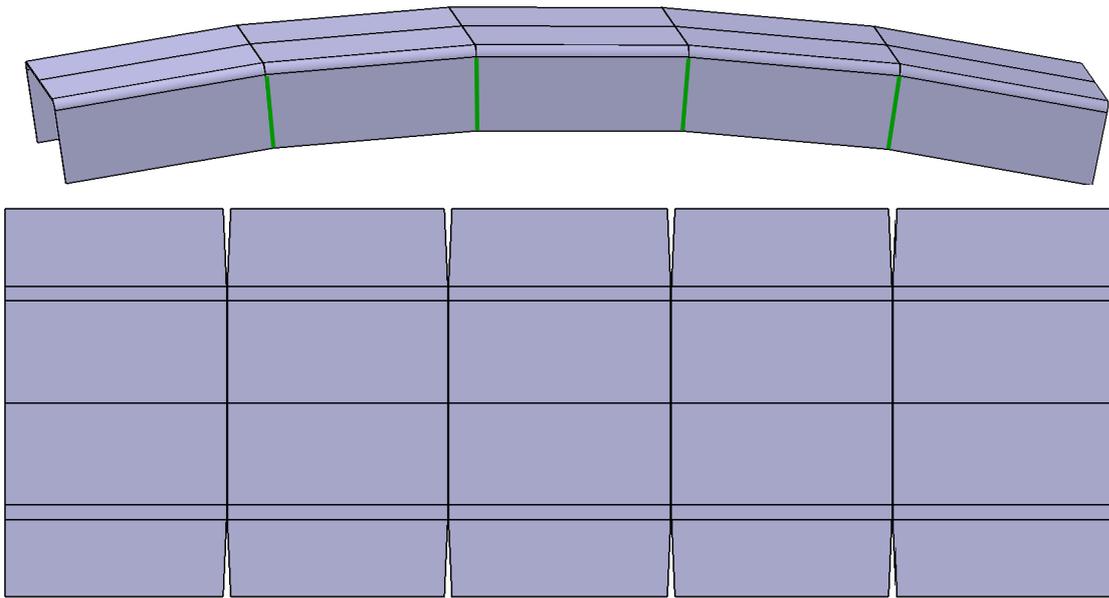


Abbildung 81: Flächenkrümmung vereinfacht

6.2.6 Befestigungspunkte, Prägungen und Versteifungen

Diese Art von Geometriebereichen ist grundsätzlich durch standardisiertes Freibiegen nicht herstellbar. Dennoch sind sie mit ihrer Schnittstellenfunktion und der steifigkeitssteigernden Eigenschaft für viele Bauteile notwendig.

BEFESTIGUNGSDOME Befestigungsdome, wie in Abbildung 82 blau dargestellt, dienen der Bauteilbefestigung und sind mit zusätzlichen Sonderwerkzeugen im Freibiegeprozess herstellbar. Bauteilabhängig können diese Befestigungspunkte auch bereits beim Zuschneiden mittels Stanzen eingebracht werden.

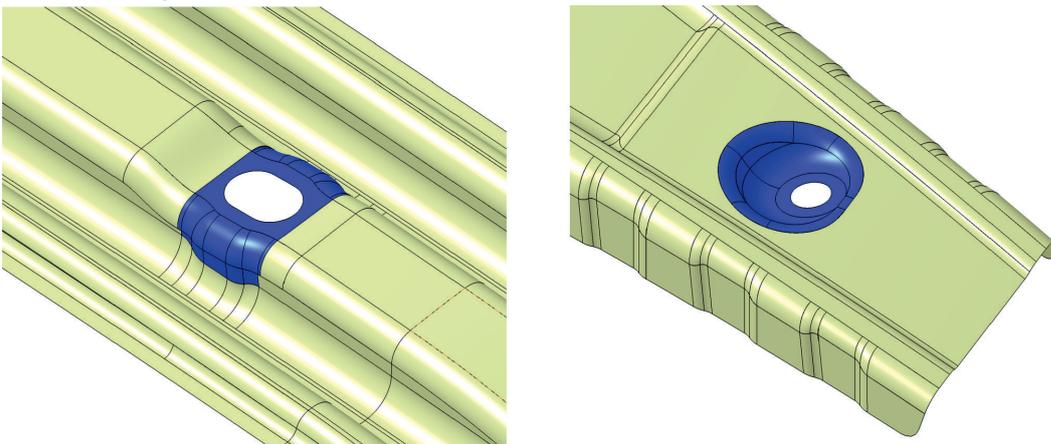


Abbildung 82: Befestigungsdom

PRÄGUNGEN UND VERSTEIFUNGEN Prägungen und Versteifungen (Abbildung 83) sind genauso wie Sicken und Sollbruchstellen nur mit Zusatzwerkzeugen bzw. durch einen zusätzlichen Prozess herzustellen.

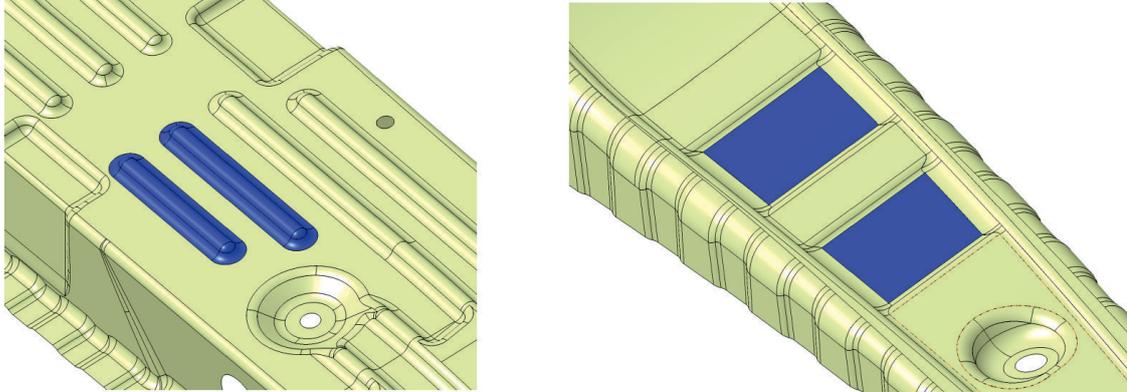


Abbildung 83: Prägungen und Versteifungen

6.2.7 Geometriebereiche der Gesamtintegration

FREISTELLUNGEN Es ist generell möglich, Freistellungen wie in Abbildung 84 a (blau) gefordert herzustellen. Die Teillösung aus Bildabschnitt b entspricht den Anforderungen und ist bei geschlossener Ausführung, durch die notwendigen Einlegeteile und dem damit einhergehenden Fügeaufwand, sehr aufwendig in der Herstellung.

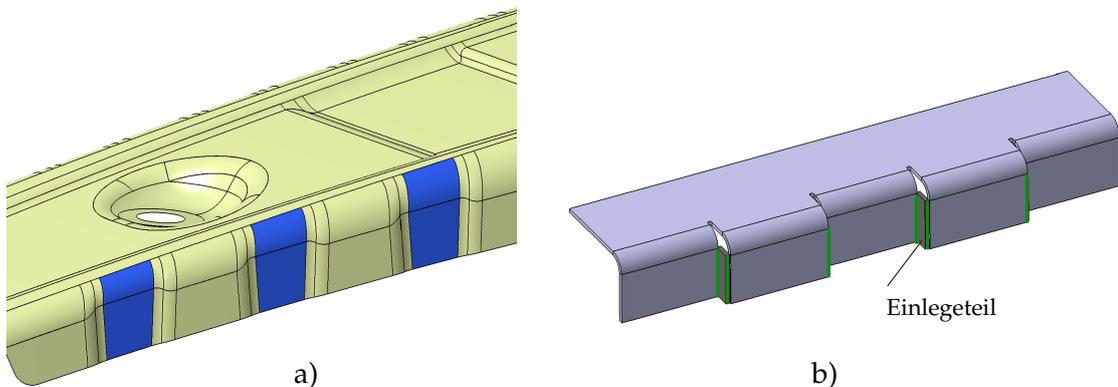


Abbildung 84: Kontaktfreistellungen

EBENENSPRUNG Ein Ebenensprung nach Abbildung 85 a wird als Teillösung in Bildabschnitt b mit einer Biegelasche gestaltet. Der Abstand x zwischen den Kanten hängt von der Höhe H und der Länge L des Ebenensprungs ab.

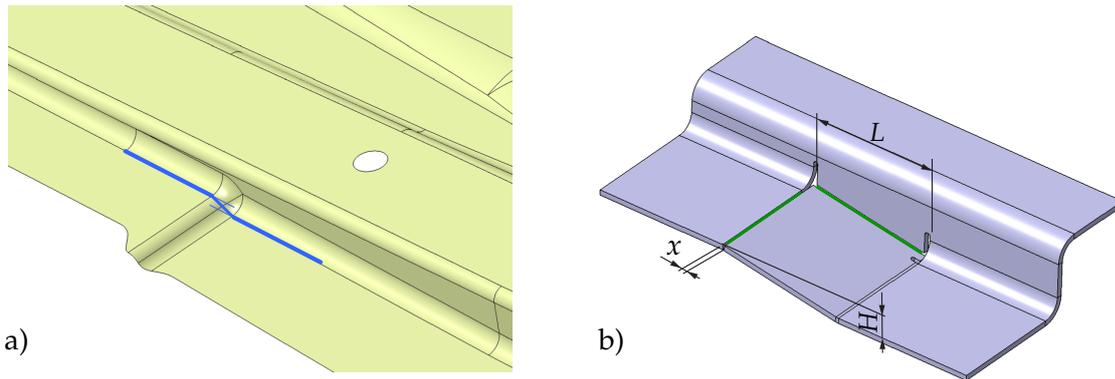


Abbildung 85: Ebenensprung

DURCHBRÜCHE Durchbrüche, wie in Abbildung 86 a dargestellt, können im Allgemeinen schon bei der Herstellung des Zuschnittes abgebildet werden.

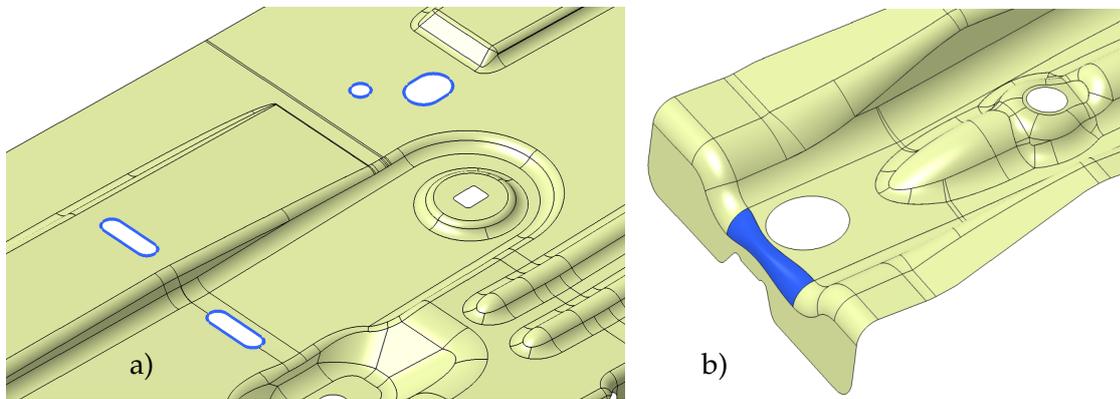


Abbildung 86: Durchbrüche und variable Radien

VARIABLE RADIEN Variable Radien (Abbildung 86b) sind durch Biegen nicht herstellbar, da sich entlang der Biegekante verfahrensbedingt immer ein konstanter Biegeradius einstellt.

6.3 KONSTRUKTIVE ÜBERFÜHRUNG VON SCHALENBAUTEILEN ZU FUNKTIONELLEN BIEGEBauteILEN

Die konstruktive Überführung von Schalenbauteilen zu Biegebauteilen soll nach dem Prinzip eines modularen Baukastenprinzipes erfolgen. Dabei wird an einer Referenzgeometrie in einem ersten Schritt die Geometrie und deren Anforderungen analysiert und geometrische Teilbereiche identifiziert. Die in Abschnitt 6.2 erarbeiteten Teillösungen verschiedener Geometriebereiche werden dann unter Berücksichtigung der konstruktiven Randbedingungen beim Freibiegen (Abschnitt 6.1) und in Abhängigkeit der geforderten Bauteileigenschaften schrittweise an den identifizierten Teilbereichen angewendet und damit zu einem Biegebauteil kombiniert. Das Ergebnis ist eine an die Referenzgeometrie angenäherte Substitution, die durch Freibiegen und entsprechende Fügeprozesse herstellbar ist.

Ausgehend von der Referenzgeometrie wird in diesem Abschnitt exemplarisch eine B-Säulenverstärkung konstruktiv überführt. In Abbildung 87 ist die Referenzgeometrie mit dem Ergebnis der Geometrieanalyse und der Teilbereichsidentifikation, sowie der Hauptbelastungsrichtung dargestellt. Darin ist A) U-Profil, B) positiver Querschnittsübergang, C) negativer Querschnittsübergang, D) negativer Querschnittsübergang, E) variabler Radius, F) Kontaktfreistellungen, G) Befestigungsdom, H) Durchbrüche und I) Versteifungen.

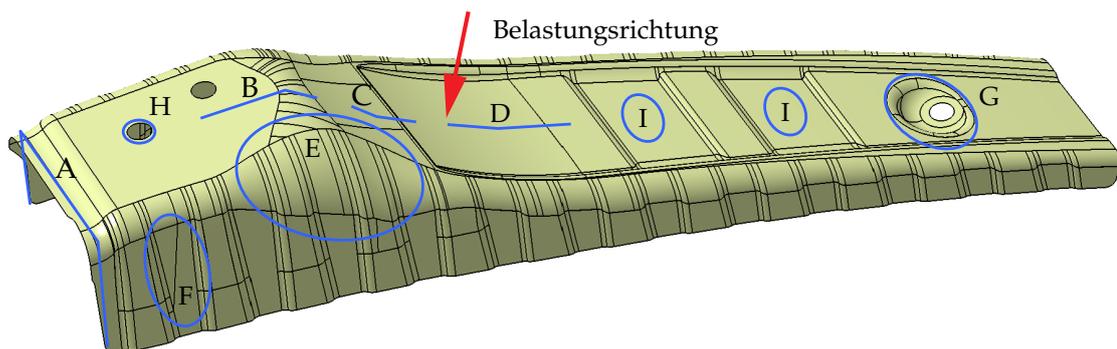


Abbildung 87: B-Säulenverstärkung als Schalenbauteil mit den Geometriebereichen

Im Sinne des Baukastenprinzips kann durch punktweises Abarbeiten der Liste von identifizierten Geometriebereichen durch die Verwendung der zugehörigen Teillösungen eine Substitution zum Biegebauteil erfolgen. In Abbildung 89 ist eine mögliche Variante des überführten Biegebauteils dargestellt. Das U-Profil mit den Querschnittsübergängen, siehe dazu Abbildung 89, kann die Geometrie der B-Säulenverstärkung gut nachbilden. Im Wesentlichen setzt sich das Bauteil aus den konstruktiven Teillösungen

- B_B) Querschnittsübergang-Positiv mit Punktverbindung,
- C_B) Querschnittsübergang-Negativ mit Einlegeteilen und Punktverbindung,
- D_B) Querschnittsübergang-Negativ mit gefalzter Zusatzlasche und Punktverbindung

und den bereits beim Zuschnitt eingebrachten Durchbrüchen H_B) zusammen. In Folge der zu erwartenden Belastungsrichtung müssen die Biegeschenkel der Querschnittsübergänge verbunden werden, damit das Bauteil als Verstärkung seine Funktion erfüllen kann. Die Verbindungen erfolgen hier durch Punktschweißen, können grundsätzlich auch durch andere Punktverbindungen wie Niet- oder Schraubverbindungen oder auch Linienverbindungen ersetzt werden. Abbildung 88 zeigt in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der maximalen Schweißpunktanzahl von der Übergangsgeometrie B_B). Bei einem mit 6mm im Quadrat angenommenen Platzbedarf für einen Schweißpunkt und einem Übergangswinkel β von 160° kann aufgrund der Verhältnisse bei der Abwicklung eine Lasche mit maximal $x = 6$ und $y = 18\text{mm}$ erzeugt und damit maximal 3 Schweißpunkte angebracht werden. Die Schweißpunkte sind in der Abbildung grün dargestellt. Die gleichen Überlegungen, vor allem in Bezug auf die notwendigen Anforderungen des Fügeverfahrens, wie zum Beispiel Zugänglichkeit, Platzbedarf, Überlappungsgröße und ähnliches, sind auch bei allen anderen Verbindungen anzustellen.

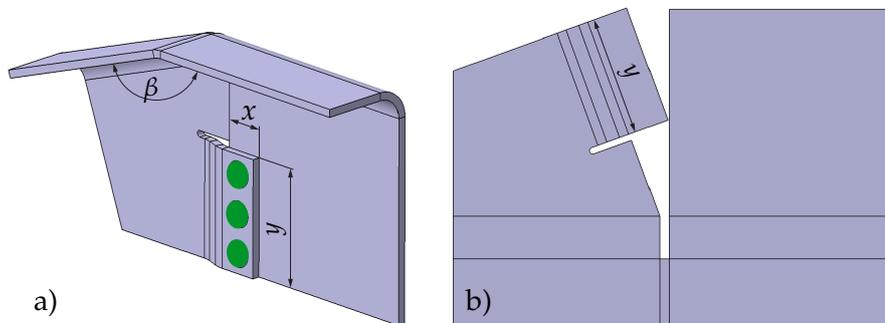


Abbildung 88: Detail des Punktschweißens beim Querschnittsübergang-Positiv

Notwendige Vereinfachungen bei der Überführung betreffen den Bereich E) der Referenzgeometrie, da variable Radien durch Freibiegen nicht herstellbar sind und den Bereich F) um den Aufwand zu reduzieren. Die Versteifungen I) und der Befestigungsdom G) können nur durch geeignete Sonderwerkzeuge hergestellt werden und werden deshalb auch vernachlässigt.

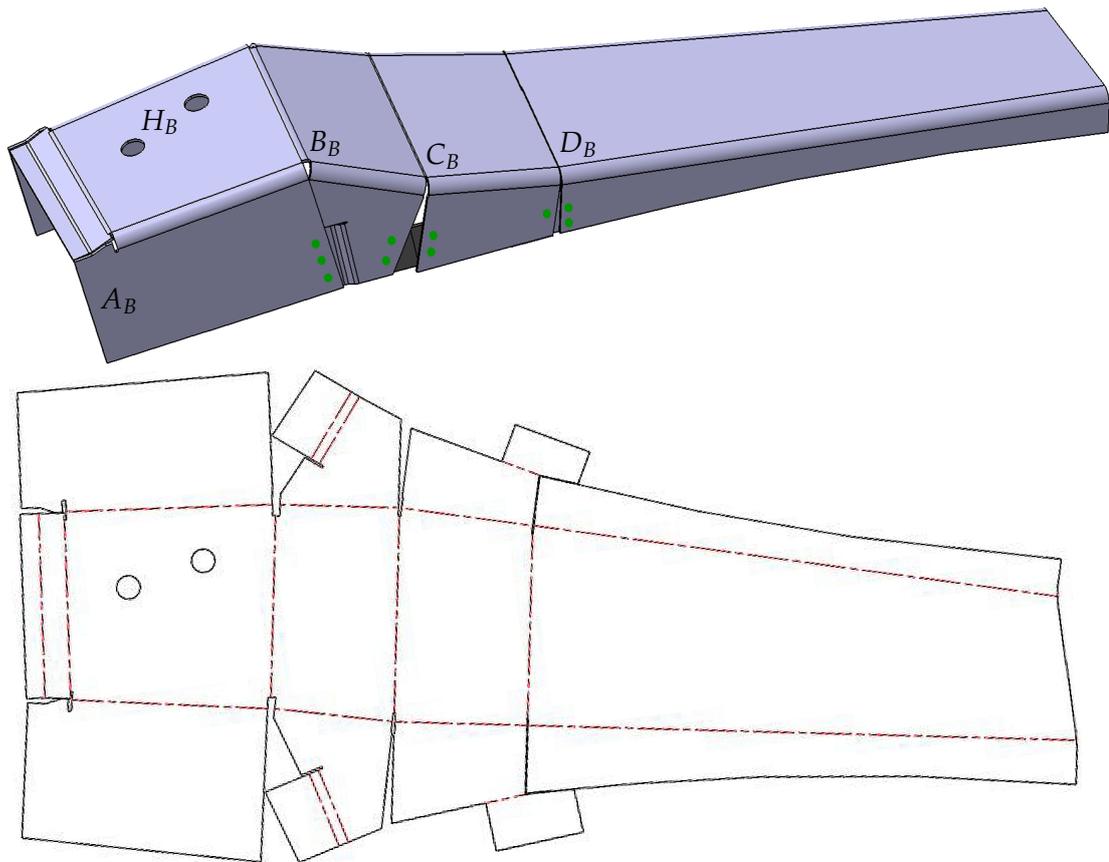


Abbildung 89: B-Säulenverstärkung als Biegebauteil mit Abwicklung

Am vorgestellten Beispiel ist ersichtlich, dass jede Überführung eine Annäherung an vorgegebene Freiformgeometrien ist und bestimmter Vereinfachungen bedarf. Allein durch die grundlegende Eigenschaft des Freibiegens, gerade Biegekanten und ebene Teilflächen, können nicht alle Bereiche exakt substituiert werden. Die Aufgabe des Konstrukteurs wird es sein, vorhandene Abweichungen in Bezug auf die Bauteilverwendbarkeit zu bewerten und unter Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen, vor allem in Bezug auf die Fügeprozesse, eine wirtschaftlich herstellbare Lösung zu finden. Prägungen, Versteifungen, Freistellungen, Befestigungsdomen und Durchbrüche sind in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Sonderwerkzeugen zu gestalten. Eine weitere Möglichkeit ist eine Einbringung dieser Geometrielemente bereits beim Platinezuschnitt. Ähnliche Überlegungen gelten für Fügeverfahren.

Durch eine ständige Erweiterung des Kataloges an konstruktiven Teillösungen, wie in Abschnitt 6.2 begonnen, und die Einbindung von verfügbaren Ressourcen, kann die Konstruktionsqualität gesteigert und die Durchlaufzeit für eine Bauteilkonstruktion erheblich verkürzt werden. Eine Anpassung der Referenzgeometrie an die Grundeigenschaften des Biegens würde eine deutliche Verbesserung der Anwendbarkeit dieser Methode bewirken und die notwendige Verwendung von Sonderwerkzeugen reduzieren und damit gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit

steigern. Die hier dargestellte Vorgehensweise ist für Bauteilsubstitutionen konzipiert, kann aber grundsätzlich auch für Neukonstruktionen in leicht modifizierter Form angewendet werden.

ENTWICKLUNG EINER METHODE ZUR HERSTELLUNG VON FUNKTIONSBAUTEILEN

In diesem Kapitel wird eine durchgängige Methode erarbeitet, die, bei der Substitution von Schalenbauteilen durch mit Freibiegen hergestellte Bauteile, einen durchgängigen Bauteilentscheidungszyklus bereitstellt und die Anwendbarkeit dieser, einem breiteren Anwendungsfeld, ermöglichen soll. Ein wesentlicher Bestandteil ist es dabei Zusammenhänge darzustellen und das volle Potential dieses Herstellverfahrens bei der Substitution von Schalenbauteilen auszunützen. Die erarbeiteten Inhalte des Gesamtprozesses Freibiegen, Kapitel 5, und der bereits vorgestellten konstruktiven Möglichkeiten, Kapitel 6, tragen wesentlich zur zielgerichteten Bauteilentscheidung bei und sind Kerninhalte des hier dargestellten Bauteilentscheidungszyklus. Darüber hinaus soll diese Methode dazu beitragen, die Möglichkeiten des Freibiegens zu verdeutlichen und dadurch zusätzliche Anwendungsgebiete anzusprechen.

7.1 BAUTEILENTScheidungsZYKLUS

Der Arbeitsablauf für eine zielgerichtete und durchgängige Lösungsfindung bei der Entwicklung von funktionellen Biegebauteilen, ausgehend vom Konzept bis hin zur Bauteilverwendung, ist in Abbildung 90 grafisch dargestellt und im Weiteren detailliert erklärt. Er vermittelt einen Überblick über die notwendigen Zusammenhänge der einzelnen Teilinhalte bei der Bauteilentscheidung und wird als Bauteilentscheidungszyklus bezeichnet. Zusätzlich zu dieser theoretischen Darstellung des Ablaufs und aller Zusammenhänge wird die Anwendung des Bauteilentscheidungszyklus am Beispiel einer Seitenaufprallträgersubstitution in Kapitel 8 als Bestätigung der Anwendbarkeit der Methode und zur Festigung des Verständnisses durchgängig vorexerziert.

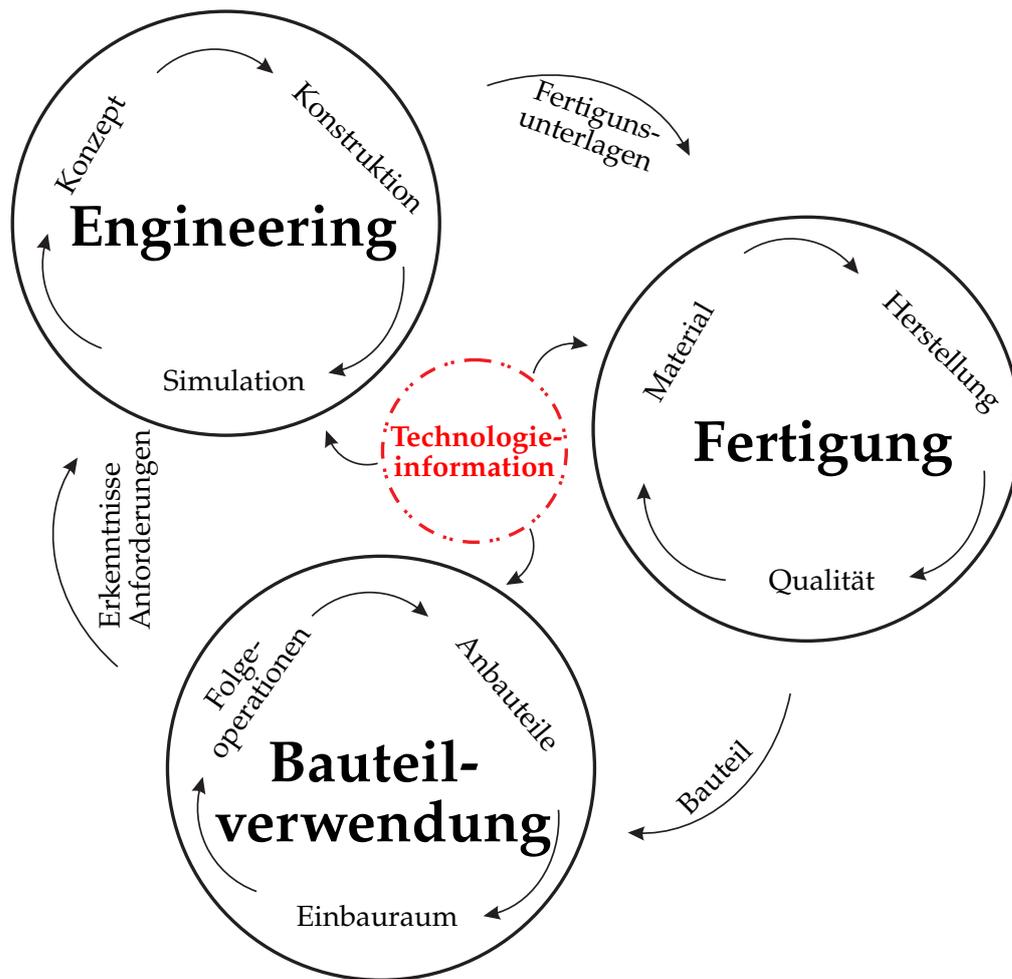


Abbildung 90: Bauteilentstehungszyklus

Grundsätzlich wird der Bauteilentstehungszyklus in die drei Hauptphasen Engineering, Fertigung und Bauteilverwendung unterteilt und wie in Abbildung 90 dargestellt, sind Inhalte, die zwischen den einzelnen Phasen ausgetauscht werden, genau definiert. Dennoch müssen jederzeit der Gesamtprozess und zielführende Querverbindungen im Auge behalten werden. Die kreisförmige Anordnung und die Pfeile symbolisieren die gegenseitige Abhängigkeit der Inhalte und die Notwendigkeit von iterativen Schleifen für ein optimiertes Ergebnis aus dem Gesamtprozess.

Übergeordnet ist es wichtig, dass Technologieinformationen des Freibiegeprozesses, wie in Abschnitt 2.2.2 ausführlich beschrieben, zu jedem Zeitpunkt im Zyklus beachtet werden.

7.1.1 Engineering

Die erste Phase des Bauteilentstehungszyklusses ist das Engineering. Es enthält die Teilphasen Konzept, Konstruktion und Simulation.

Während der Konzeptphase, als ersten Schritt im Bauteilentstehungszyklus, hat im Wesentlichen die detaillierte Definition des Lastenheftes sowie eine Referenzbauteilanalyse mit der Identifikation von Geometriebereichen zu erfolgen. Das Lastenheft beinhaltet neben Angaben zur Belastung und der geforderten Steifigkeit unter anderem auch Informationen zum Einbauraum, den Anbauteilen sowie den geplanten Folgeoperationen. Die Materialvorauswahl für die Substitution ergibt sich aus den Anforderungen und ist meist in Anlehnung an das Referenzbauteil durchzuführen. Ein gewissenhaft erstelltes Lastenheft beeinflusst direkt den Arbeitsaufwand in den einzelnen Arbeitspaketen und reduziert die Anzahl der notwendigen Iterationsschleifen.

Mit den entsprechenden Anforderungen und den identifizierten geometrischen Teilbereichen beginnt die Phase der Konstruktion. Dieser Schritt des Bauteilentstehungszyklus ist unter Punkt 8.2 ausführlich beschrieben. Das Ziel ist die Suche nach einer biegegerechten Konstruktion für das ausgewählte Bauteil unter der Berücksichtigung des Lastenheftes und der Technologieinformationen. Darin enthalten sind unter anderem Konstruktionsrichtlinien zu Biegeradien, Schenkellängen, Biegewinkel und geometrischen Grenzen verschiedener Materialien. Sollten für den gewählten Blechwerkstoff keine Technologieparameter vorhanden sein, sind sie wie unter Punkt 5.3.1 dargestellt zu ermitteln und zu ergänzen.

Die Beurteilung der Belastungsfähigkeit der konstruierten Biegebauteile mit definierten Fügeoperationen erfolgt in der Phase der Simulation. Dabei erfolgt die simulative Bewertung auf Basis der Randbedingungen aus dem Lastenheft. Je nach Anwendungsfall ist unter anderem die Belastbarkeit auf Biegung und Torsion oder die Steifigkeit zu überprüfen. Eine aus dem Ergebnis resultierende Aussage über kritische bzw. wenig belastete Bereiche am Bauteil ist die Grundlage für eine belastungsoptimierte Konstruktion. Zusätzlich können unbelastete Bauteilbereiche unter Berücksichtigung der Lastpfade entfernt werden. Dies stellt die Basis für eine gewichtsoptimierte Konstruktion dar. Sind keine Erfahrungswerte von ähnlichen Bauteilen, Materialien und Belastungen vorhanden ist es notwendig, eine Simulationsverifikation durchzuführen. Als Hinweis sei in diesem Zusammenhang angeführt, dass für neu zu erarbeitende Bauteile eine rein simulative Darstellung meist nicht ausreicht. Deshalb muss bereits an dieser Stelle darauf geachtet werden, dass ein realer Bauteiltest zur Simulationsverifikation laut Lastenheft durchführbar ist. Das Simulationsmodell muss selbstredend dementsprechend aufgebaut werden. Durch iterative Schleifen in der Engineering-Phase kann eine biegegerechte Substitutionslösung in Form einer herstellbaren Sollgeometrie und den zugehörigen Fertigungsunterlagen gefunden werden. Bei der Erstellung dieser Unterlagen wird aus Kostengründen grundsätzlich die Verwendung von Standardwerkzeugen angestrebt.

7.1.2 Fertigung

Die mit den Fertigungsunterlagen klar definierte Schnittstelle enthält die Ergebnisse der Teilschritte Sollgeometrie, Abwicklung und Biegefolge des Gesamtprozesses Freibiegen, siehe Abschnitt 5.1.1.

Die Punkte Blechzuschnitt und Bauteilherstellung des Gesamtprozesses sind unter dem Begriff

Herstellung in Abbildung 90 zusammengefasst. Zusätzlich zum Freibiegen werden in dieser Phase alle notwendigen Fügeoperationen der einzelnen Biegeschenkeln als Folgeprozess durchgeführt und die daraus resultierende Eignung des Bauteils zur Belastungsaufnahme erzielt.

Das dritte Teilarbeitsgebiet in dieser Phase behandelt das Thema Qualität. Hier ist neben der Kontrolle der Maßhaltigkeit sowie der Überprüfung von Form- und Lagetoleranzen auch die Einhaltung der laut Lastenheft geforderten Belastbarkeit durchzuführen. Weiterführend werden diese Ergebnisse aus den Realversuchen für die Simulationsverifikation verwendet.

Das Ergebnis dieser zweiten Hauptphase im Bauteilentstehungszyklus ist ein fertiges Bauteil, welches den Anforderungen aus dem Lastenheft entspricht.

7.1.3 Bauteilverwendung

Die letzte Phase im Gesamtzyklus ist die Bauteilverwendung. Darin sind Folgeoperationen wie Lackierung und Korrosionsschutz sowie Montage zu Baugruppen enthalten. Anbauteile und definierte Einbauräume geben klare Schnittstellen für eine zweckgebundene Verwendung vor. Zusätzlich werden in dieser Phase auch Erkenntnisse für eine Bauteiloptimierung generiert und gemeinsam mit resultierenden Anforderungen ans Engineering zurückgegeben.

EXEMPLARISCHE ANWENDUNG DER METHODE

Die theoretische Darstellung des Bauteilsteherungszyklus aus Kapitel 7 wird folgend am Beispiel einer Seitenaufprallträgersubstitution demonstriert. Dieses Musterbeispiel soll dabei die durchgängige Anwendbarkeit der erarbeiteten Methode aufzeigen und die Herstellbarkeit von funktionalen Schalenbauteilen durch Freibiegen beweisen.

8.1 KONZEPT

In dieser einführenden Phase des Bauteilsteherungszyklus erfolgt neben geometrischen Analysen und Überlegungen bezüglich Anforderungsprofil, die Materialauswahl und die Festlegung der wichtigsten Technologieparameter.



Seitenaufprallträger (SAT)

Abbildung 91: Quasistatischer Türeindrücktest nach FMVSS 214

Der Seitenaufprallträger (SAT) ist ein passives Sicherheitsbauteil [Fri13] in modernen Fahrzeugkarosserien. Aufgrund der praktisch nicht vorhandenen Deformationszone an der Fahrzeugseite ist ein umfangreicher Seitenaufprallschutz unverzichtbar. Der SAT ist dabei ein diagonal in die Baugruppe Tür integriertes Bauteil, welches im Falle eines Unfalls eine zu starke Verformung der Fahrgastzelle verhindert und damit einen wesentlichen Beitrag zum Insassenschutz liefert. In Abbildung 91 ist das Ergebnis eines quasistatischen Türeindrücktests nach der Prüfnorm FMVSS 214 [US 92] dargestellt. Aus der Prüfnorm ergibt sich auch die geforderte Steifigkeit des Seitenaufprallträgers und die Hauptbelastungsrichtung. Zusätzlich zu den Einbaubedingungen aus der Baugruppe bilden diese Randbedingungen die wesentlichen Inhalte des Lastenheftes.

Das Ergebnis der detaillierten Referenzbauteilanalyse und die identifizierten Geometriebereiche sind in Abbildung 92 dargestellt. Die Gesamtlänge des Seitenaufprallträgers beträgt

1030 mm. In Anlehnung an die in Abschnitt 6.2 erarbeiteten Teillösungen kann beim originalen Schalenbauteil des Seitenaufprallträgers

- 1) ein doppeltes Hutprofil, siehe Abbildung 68 auf Seite 73,
- 2) ein doppelter Querschnittsauslauf in eine Ebene, siehe Abbildung 78 auf Seite 78,
- 3) eine Flächenkrümmung mit großem Radius, siehe Abbildung 80 auf Seite 79,
- 4) Durchbrüche zur Positionierung, siehe Abbildung 86a auf Seite 82 und
- 5) eine Befestigungslasche identifiziert werden.

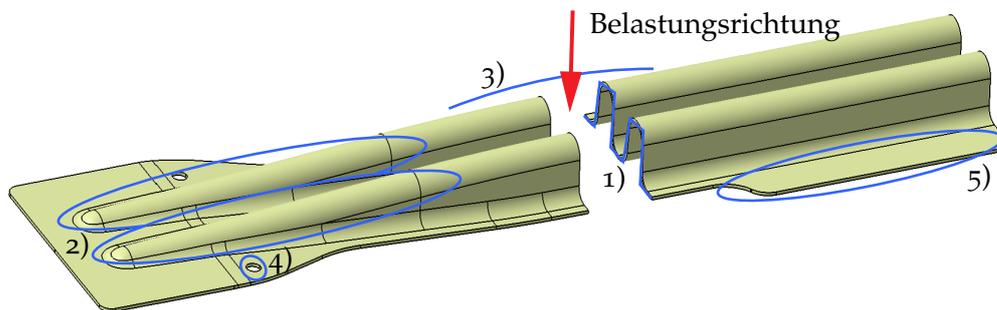


Abbildung 92: Referenzgeometrie SAT mit identifizierten Geometriebereichen

8.1.1 Materialauswahl

Eine geeignete Vorgehensweise bei der Materialvorauswahl ist die Verwendung des gleichen beziehungsweise eines sehr ähnlichen Werkstoffes für die Substitution der Referenzgeometrie. Die bauteilspezifische Materialendauswahl kann grundsätzlich erst nach Abschluss der simulativen Überprüfung erfolgen. Generell erfordern die einzelnen Teilphasen mehrmalige iterative Schleifen für eine optimale Lösung.

Der Referenzwerkstoff des durch Tiefziehen hergestellten Seitenaufprallträgers ist ein warmgewalzter martensitischer Stahl, MSW 1200 mit einer Blechstärke von 1,5 mm und einer Zugfestigkeit von 1355 N/mm^2 . Für die durch Freibiegen herzustellende Substitutionslösung wird hier ein kaltgewalzter mikrolegierter Stahl der Firma Bilstein, ZE 1050 mit 1,2 mm Blechstärke und 1125 N/mm^2 Zugfestigkeit, vorausgewählt. Die Unterschiede in Blechdicke und Zugfestigkeit und das damit einhergehende schlechtere Energieaufnahmevermögen des Bauteils wird aus Gründen der Materialverfügbarkeit bereits an dieser Stelle bewusst in Kauf genommen und stellt für die weitere Vorgehensweise keinerlei Einschränkung dar.

8.2 KONSTRUKTIVE ÜBERFÜHRUNG DER SEITENAUFPRALLTRÄGERGEOMETRIE

Bei der Überführung eines Schalenbauteils in ein Biegebauteil nach dem Baukastenprinzip sind die konstruktiven Leitlinien aus Kapitel 6 anzuwenden. Eine in diesem Zusammenhang

geeignete CAD-Software kann parametrisch-assoziative Geometriemodelle erstellen, benutzerdefinierte Technologieinformationen wie Biegeradius und Verkürzung interpretieren und die Geometrien entsprechend abwickeln.

Die konsequente Umsetzung der Teillösungen, bei der Berücksichtigung der Technologieinformationen und aller Einschränkungen, ergibt für den Profilquerschnitt des doppelten Hutprofils 1) oder auch W-Profiles das in Abbildung 93 dargestellte, herstellbare Ergebnis mit dem aus der Referenzgeometrie geforderten Verhältnis von Profilbreite B_P zu Profilhöhe H_P . Zusätzlich wird die notwendige Befestigungslasche (5) am Schenkel des Hutprofils ergänzt.

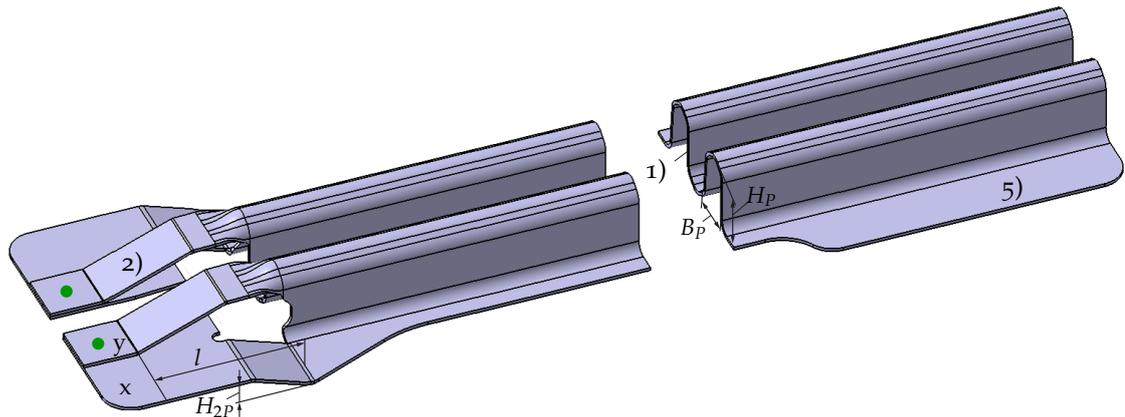


Abbildung 93: W-Querschnitt und zugehöriger Auslauf

Der Querschnittsauslauf dieses Hutprofils in eine Ebene aus der zugehörigen Teillösung von Seite 79 ist in Abbildung 93 dargestellt. Der zweite Querschnittsauslauf wird in gespiegelter Ausführung umgesetzt. Leichte Modifikationen zur Teillösung bestehen in der Anhebung der Auslaufebene (x) um H_{2P} und deren einseitige Gestaltung sowie der Verlängerung der Auslaufflasche (y) und eine Einkürzung der Länge l des Querschnittsauslaufes. Die Fixierung der Auslaufflasche ist mit einem Verbindungspunkt (grüner Punkt), welcher durch Punktschweißen herzustellen ist, definiert. Verfahrensbedingt wird die Längskrümmung des Schalenbauteils, Punkt 3) der identifizierten Geometriebereiche, linearisiert. Abbildung 94 zeigt die Abweichung des Biegebauteils zum Schalenbauteil, die in der Bauteilmitte 2mm beträgt. Diese, als auch die aus den unterschiedlichen Längen des Querschnittsauslaufes resultierende Abweichung am linken Ende von maximal 8mm , kann akzeptiert werden.

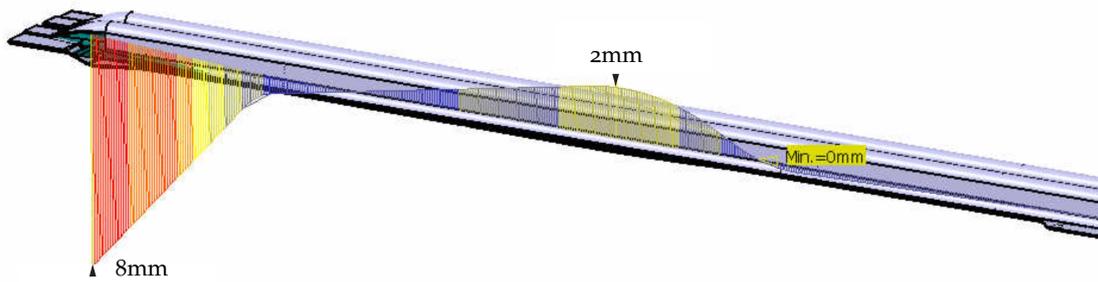


Abbildung 94: Vergleich der Längskrümmung beim SAT

Das Ergebnis eines iterativen Entwicklungsprozesses aus den Teilphasen Konstruktion und Simulation bei der Überführung und einer gleichzeitig ständigen Optimierung des Bauteils in Bezug auf seine geforderten Eigenschaften ist in Abbildung 95 mit der zugehörigen Abwicklung dargestellt. Eine notwendige Verbesserung im Rahmen der belastungsorientierten Konstruktion betrifft den Querschnittsauslauf zur Erreichung der geforderten Steifigkeit. Dabei wird unter Berücksichtigung des Fügeprozesses eine zusätzliche Stützlasche (z) beim Querschnittsauslauf ergänzt und mit je einem Schweißpunkt versehen.

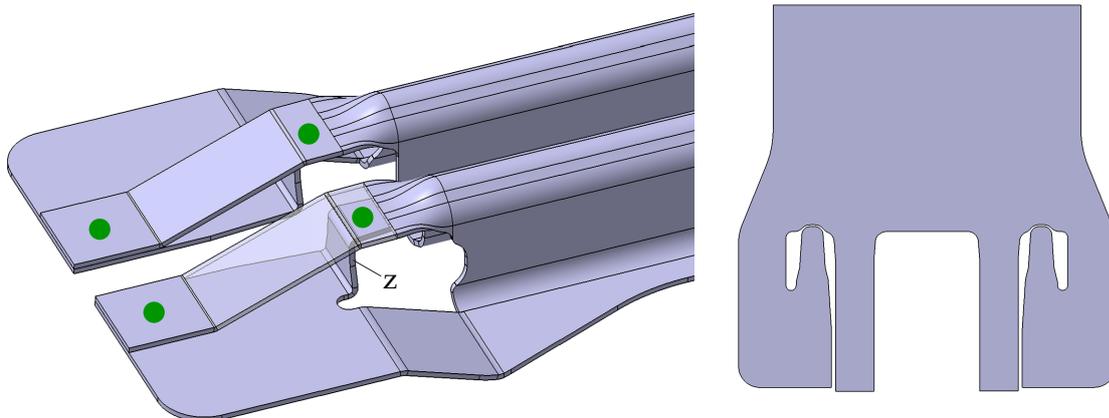


Abbildung 95: Querschnittsauslauf eines Seitenaufprallträgers als Biegebauteil mit Abwicklung

8.3 SIMULATIVE BEWERTUNG DER BAUTEILFUNKTION

Die Grundlage der belastungsorientierten Konstruktion ist die begleitende Simulation zur virtuellen Überprüfung der Erhaltung der Bauteilfunktion im Vergleich zum konventionell gefertigten Schalenbauteil. Durch iterative Schleifen zwischen diesen beiden Phasen wird die Sollgeometrie optimiert. Zur Überprüfung der Belastbarkeit wird für den Seitenaufprallträger

ein an die Anforderungen des Lastenheftes angepasster Drei-Punkt-Biegeversuch ausgewählt. Eine Bewertung kann dabei auf Basis des Energieaufnahmevermögens erfolgen. Zusätzlich können durch A zu B Vergleiche, Ergebnisse bei Bauteilsubstitutionen einfach und aussagekräftig beurteilt werden.

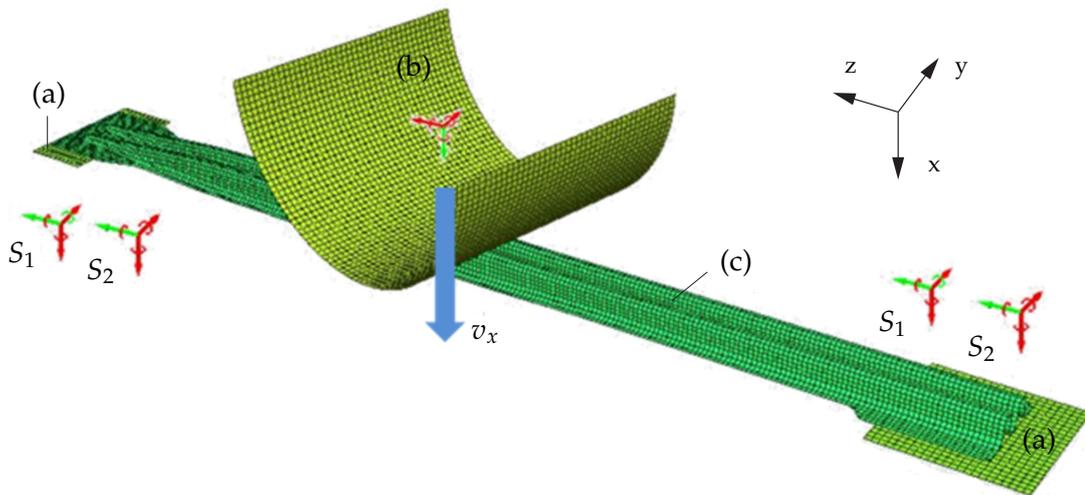


Abbildung 96: Simulationsmodell

In Abbildung 96 ist das Simulationsmodell des modifizierten Drei-Punkt-Biegeversuches in Anlehnung an [US 92] dargestellt. Es besteht im Wesentlichen aus zwei starren Auflageflächen (a), dem starren Deformationsstempel (b) mit einem Durchmesser von 300mm und dem Seitenaufprallträger (c). In Abbildung 97 ist die laut Lastenheft modellierte Fixierung des Seitenaufprallträgers auf den Auflageflächen detailliert dargestellt. Dabei werden die rot markierten Knoten fest mit der Auflage verbunden. Auch Schweißpunkte werden als feste Verbindung modelliert. Um eine bessere Aussagegüte der Simulationsergebnisse zu erreichen, werden zwei verschiedene Belastungsfälle modelliert. Diese unterscheiden sich durch die Freiheitsgrade der Auflageflächen und sind mit S_1 und S_2 gekennzeichnet. Beiden Varianten ist die Translation in z -Richtung erlaubt. Der Unterschied liegt darin, dass Variante S_1 zusätzlich eine Rotation um die y -Achse ermöglicht. Alle anderen Freiheitsgrade der Einspannungen sind gesperrt, wobei die entsprechenden Richtungspfeile in den zugehörigen Koordinatensystemen rot dargestellt werden, offene Freiheitsgrade grün. Für die Crashsimulation erfolgt die Stempelbewegung v_x in x -Richtung mit 1000mm/s für 200mm ab Kontakt.

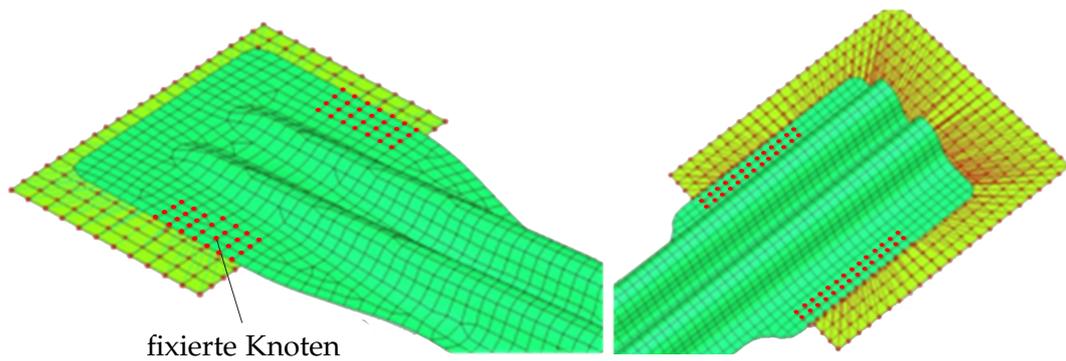


Abbildung 97: Modellierung der Einspannung

Bei der simulativen Bewertungsmethode des A zu B Vergleichs dient der herkömmlich hergestellte Seitenaufprallträger als Referenzsimulation. Zusätzlich wird die erarbeitete Substitutionslösung in Form des Biegeseitenaufprallträgers mit den gleichen Randbedingungen mit dem vorgestellten Modell simuliert und mit der Referenz verglichen.

Zur Bewertung der Eigenschaften werden das Verformungsbild und die resultierende Kraft-Weg-Kurve herangezogen. Die Simulationsverifikation mit dem Nachweis der Aussagegüte ist bei Abbildung 107 angeführt. Die Details zum Realversuch werden in Abschnitt 8.5 beschrieben.

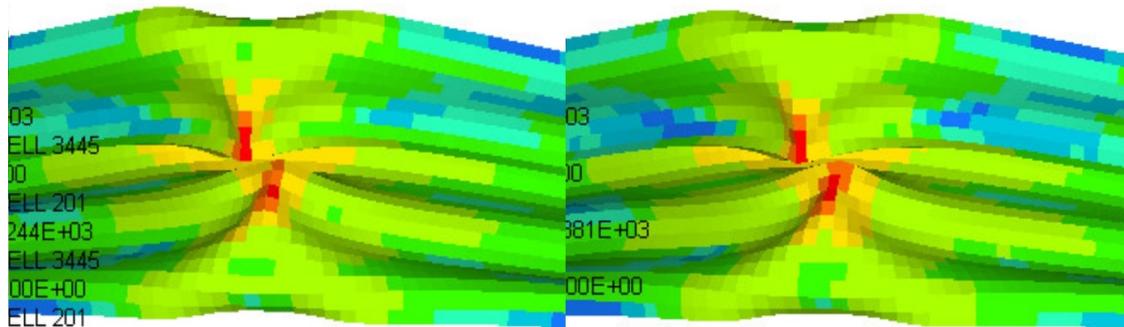


Abbildung 98: A zu B Vergleich des Verformungsbildes. Links die Referenz, rechts das Biegebauteil.

Abbildung 98 zeigt den sehr gut übereinstimmenden Vergleich des Verformungsbildes in der Mitte des Trägers nach 200mm Tonneneindringung zwischen dem Referenz-SAT aus 1,5 mm MSW1200 und dem Biege-SAT aus 1,2 mm ZE1050. Die Farben symbolisieren die Größe der Oberflächendehnungen.

In Abbildung 99 werden die Kraft-Weg-Verläufe verschiedener Simulationen der Variante S1 gegenübergestellt. Der schwarze Kurvenzug (a) repräsentiert darin das Energieaufnahmevermögen der Referenz aus 1,5 mm MSW1200 unter der Berücksichtigung der Umformhistorie. (b) stellt den gleichen Verlauf ohne Umformhistorie dar. Da bei der Herstellung durch Frei-

biegen der Einfluss der Kaltverfestigung bei der Umformung in Bezug auf die Bauteileigenschaften vernachlässigbar ist, kann ein Vergleich der Kurve (b) und der Substitutionslösung aus 1,5 mm MSW₁₂₀₀ (c) die grundsätzlich vergleichbare Energieaufnahme beweisen. Das unruhige Ende der Simulationsdaten ab ca. 150 mm ist auf die ab diesem Zeitpunkt sehr starke Elementverformung und Elementdurchdringungen zurückzuführen. Die Substitutionslösung (d) als Biegeseitenaufprallträger aus 1,2 mm ZE₁₀₅₀ hat wie bereits bei der Materialauswahl erwartet ein deutlich schlechteres Energieaufnahmevermögen als die Referenz. Aus Gründen der Materialverfügbarkeit wird der weitere Ablauf aber trotzdem mit diesem Material durchgeführt und stellt auch keine Einschränkung dar. Im Abschnitt 8.5.2 werden in Bezug auf die Materialauswahl optimierte Lösungen diskutiert, um auch den Nachweis gleicher Energieaufnahmefähigkeit zu beweisen.

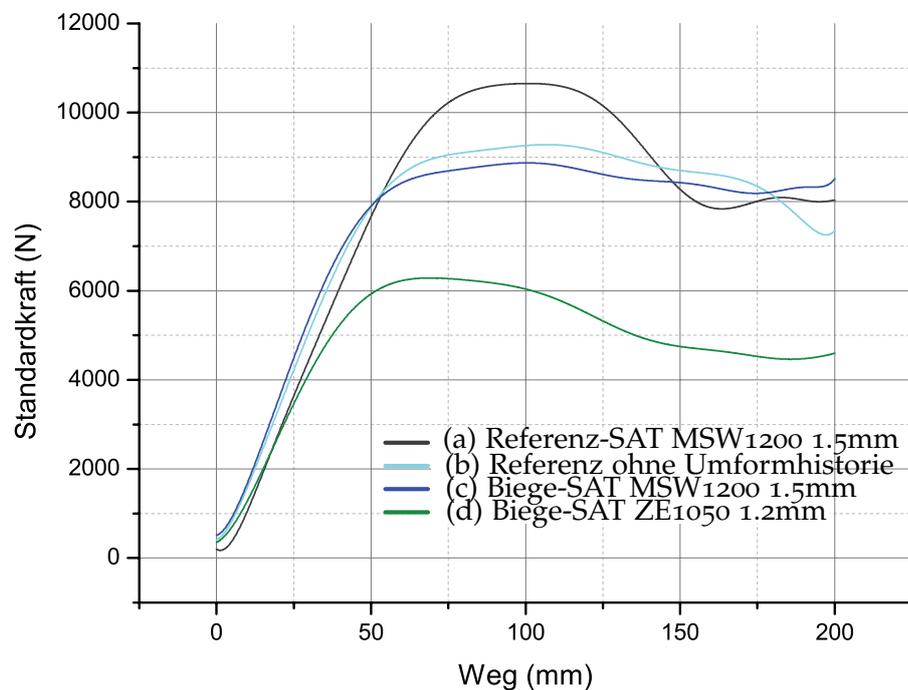


Abbildung 99: Kraft-Weg-Verläufe verschiedener Simulationen

Aus dem übereinstimmenden Verformungsbild und dem tendenziell gleichen Kurvenverlauf der Referenz und der Biegelösung wird hiermit der virtuelle Nachweis der Erhaltung der geforderten Bauteilfunktion erbracht.

8.4 FERTIGUNG DER BIEGEBauteILE

Auf Basis des bisher gezeigten wird ein Seitenaufprallträger mit dem Herstellverfahren Freibiegen gefertigt. Dazu wurde in der Engineering-Phase des Bauteilentscheidungszyklus eine entsprechende Sollgeometrie konstruiert, unter Berücksichtigung der Technologieinformationen eine Abwicklung und eine herstellbare Biegefolge gefunden und an die Phase der Fertigung

übergeben. Bei der Konstruktion wurde bereits darauf geachtet, dass nur Standardwerkzeuge verwendet werden. Diese sind einerseits billig und unterstreichen die damit verbundene Flexibilität des Freibiegens. Im Speziellen wird der hier gefertigte Biegeseitenaufprallträger mit nur einer Kombination aus Unter- und Oberwerkzeug gefertigt. Dies reduziert zusätzlich den Rüstaufwand und wirkt sich positiv auf die Herstellzeit aus. Ein kritischer Parameter für die wirtschaftliche Herstellung von Biegebauteilen ist aber zusätzlich die Anzahl der Biegekanten, sprich die Anzahl der Hübe.

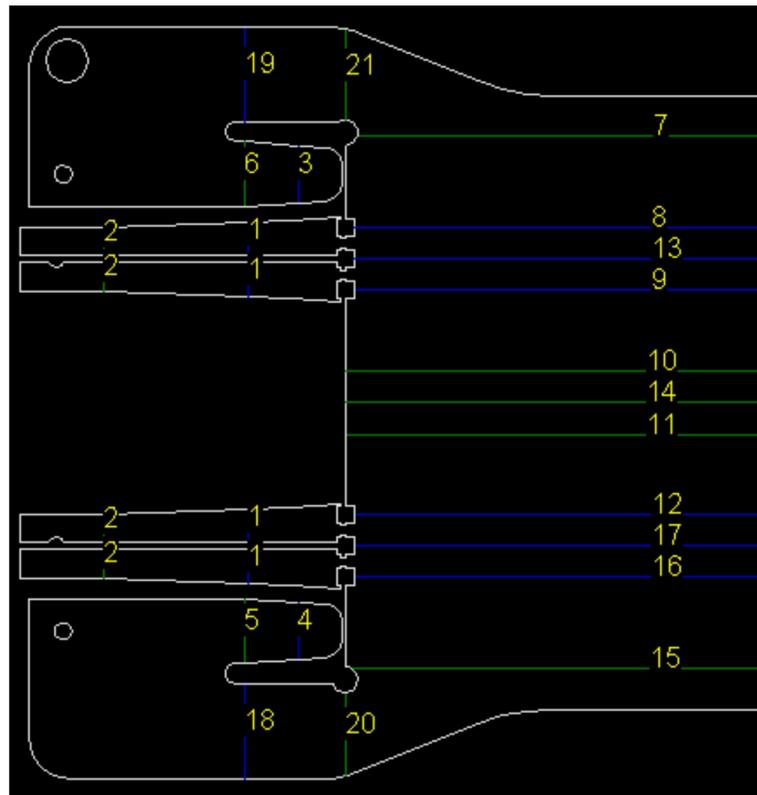


Abbildung 100: Biegefolge beim SAT

Abbildung 100 zeigt einen Ausschnitt der ermittelten Abwicklung der Bauteilgeometrie, welche durch 21 Einzelbiegungen hergestellt wird. Durch die Verwendung von Sonderwerkzeugen kann diese Anzahl vermindert und damit der Durchsatz erhöht werden. Die Nummern kennzeichnen darin die Biegefolge, die Farben der Biegelinien kennzeichnen die Biegerichtung. Grün entspricht nach oben und blau nach unten. Zu beachten ist dabei, dass die Lasche bei Biegung 1 und 2 aufgetrennt ist, weil der bei der Umformung am Anfang der Lasche entstehende Freiformübergang aufgrund der geometrischen Rahmenbedingungen nicht einfach als umsetzbare Abwicklung darstellbar ist. Die Lasche ist für die Prüfung der Herstellbarkeit in Bezug auf Kollisionen und die Bauteilfunktion aber wesentlich.

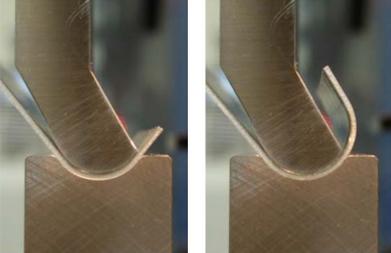
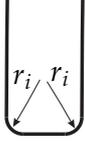
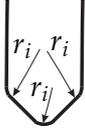
	Werkzeug	Werkstück	Bemerkung
1.			sehr teures Sonderwerkzeug Werkstück mit einem Hub herstellbar
2.			teures Sonderwerkzeug 2 Hübe notwendig
3.			billiges Standardwerkzeug 3 Hübe notwendig

Abbildung 101: Werkzeugalternativen bei der SAT-Herstellung [Tru14]

In Abbildung 101 ist neben der Lösung mit Standardwerkzeugen (Variante 3), ein Auszug möglicher Sonderwerkzeuge, um die Anzahl der Biegekanten zur Herstellung einer Rippe des Querschnitts des Seitenaufprallträgers zu reduzieren, dargestellt. Neben den Werkzeuglösungen ist die damit erzeugte Geometrie abgebildet und in Bezug auf Preis und Hubanzahl bewertet. Mit allen drei Varianten ist es möglich, die Sollkontur eines U-Profiles mit sehr ähnlichen Eigenschaften herzustellen. Noch aufwendigere und teurere Sonderlösungen zur Reduzierung der Hubanzahl bei sinkender Flexibilität sind möglich.

Variante 3 aus Abbildung 101 repräsentiert eine günstige und sehr flexible Lösung mit Standardwerkzeugen zur SAT-Fertigung und wird, wie in Abbildung 102 dargestellt, zur realen Herstellung des Biegeseitenaufprallträgers verwendet. Der Blechzuschnitt sowie die Maschinenprogrammierung bezüglich Anschlagposition und Eintauchtiefe für eine marktübliche Biegemaschine wird, wie in Abschnitt 5.1.1 bereits beschrieben, durchgeführt.

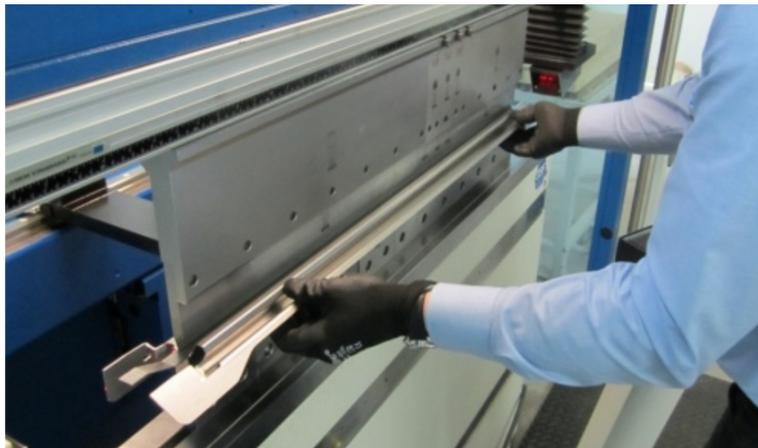


Abbildung 102: BiegeSAT-Herstellung mit Standardwerkzeugen

8.4.1 *Durch Fügen zum Funktionsbauteil*

Damit das Biegebauteil zum Funktionsbauteil wird, müssen offene Laschen durch ein geeignetes Fügeverfahren verbunden und das Bauteil damit in der Wertschöpfungskette angehoben werden. An diesem Beispiel erfolgt dies durch vier Punktverschweißungen. Siehe Abbildung 103 , worin die Schweißpunkte an der dunklen Wärmeeinflusszone zu erkennen sind.

8.5 QUALITÄT

In diesem Abschnitt wird das aus der Bauteilherstellung fertige Werkstück einer Qualitätskontrolle unterzogen. Es erfolgt der Nachweis der Bauteilfunktion durch Messungen am Realbauteil und einer vergleichenden Gegenüberstellung. Neben der positiven Kontrolle der Maßhaltigkeit sowie der geforderten Form- und Lagetoleranzen ist hier als Hauptkriterium die Belastbarkeit des Bauteils zu überprüfen.



Abbildung 103: Seitenaufprallträger

Die zwei zu bewertenden Bauteile sind einerseits der crashgeformte original Seitenaufprallträger aus 1,5 mm MSW1200 und andererseits der aus 1,2 mm ZE1050 hergestellte Biegeseitenaufprallträger mit punktgeweißten Laschen. Beide Bauteile sind in Abbildung 103 mit Detailaufnahmen dargestellt.

Als Basis für die Auswertung dient eine Messung des Energieaufnahmevermögens, wie bereits bei der Simulation vorgestellt. In Abbildung 104 ist die reale Ausführung des modifizierten 3-Punkt-Biegeversuchs dargestellt. Die wichtigen Eckdaten sind

- Prüfgeschwindigkeit: $v=200\text{mm}/\text{min}$,
- maximaler Prüfweg: $s=200\text{mm}$,
- Stempeldurchmesser: $D = 300\text{mm}$,
- Freiheitsgrade der Einspannung, wie in der Simulation: T = Translation, R = sperrbare Rotation zur Durchführung der Varianten S₁ und S₂.

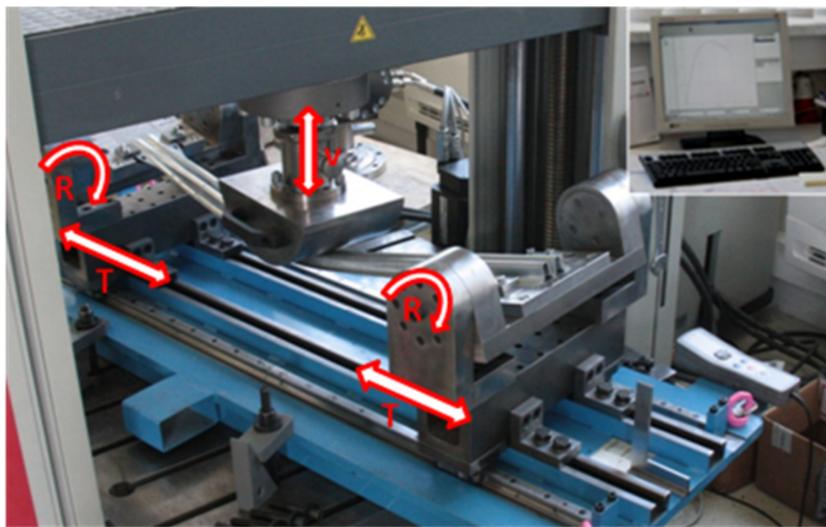


Abbildung 104: Prüfstand des modifizierten 3-Punkt-Biegeversuchs

Die Energieaufnahme der Bauteile wird in Form eines Kraft-Weg-Verlaufes dargestellt. Um eine statistische Auswertung zu ermöglichen, werden jeweils vier vergleichbare Bauteile unter gleichen Bedingungen gemessen.

- 4x Original SAT, Translation offen, Rotation gesperrt (S₂)
- 4x Original SAT, Translation offen, Rotation offen (S₁)
- 5x BiegeSAT, Translation offen, Rotation offen (S₁)
- 3x BiegeSAT, Translation offen, Rotation gesperrt (S₂)

Die Messergebnisse beider Varianten sind in den Abbildungen 105 und 106 dargestellt. Die dazugehörige Legendenbeschreibung wird beispielhaft erklärt:

M-O-ToRo-5 = Messung-Original SAT-Translation offen Rotation offen – Bauteilnummer 5

M-B-ToRg-14 = Messung-BiegeSAT-Translation offen Rotation gesperrt – Bauteilnummer 14

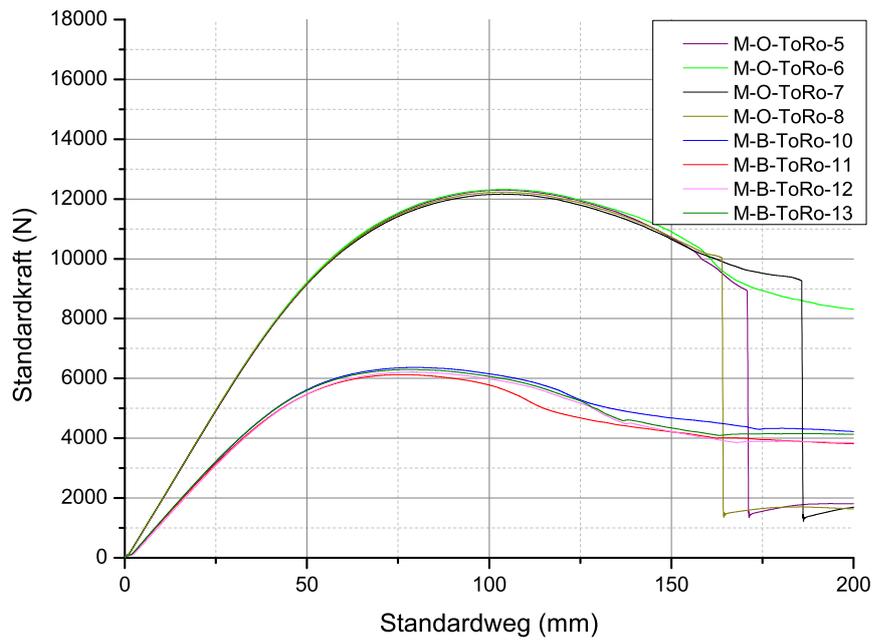


Abbildung 105: Messergebnisse der Variante S1

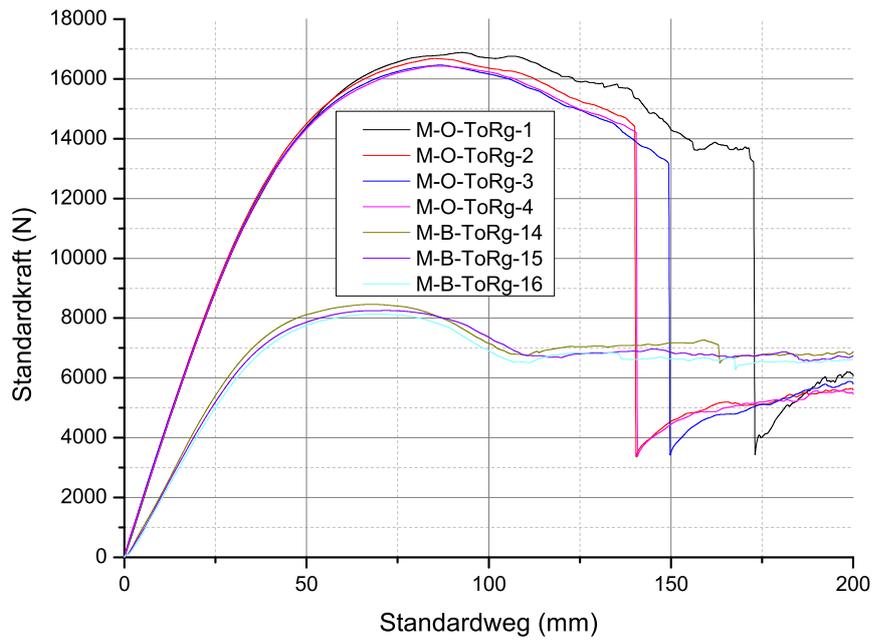


Abbildung 106: Messergebnisse der Variante S2

Die deutlich reduzierte Energieaufnahme der Biege-Seitenaufprallträger erklärt sich aus der geringeren Blechstärke des BiegeSATs und der höheren Festigkeit des originalen Seitenaufprallträgers. Diese Eigenschaft beeinflusst die Zielerreichung dieser Arbeit nicht und wurde wie bereits erklärt, aus Gründen der Materialbeschaffung bewusst in Kauf genommen. Der rasche Abfall der Messkurven des originalen Seitenaufprallträgers bei ca. 150mm kennzeichnet den Zeitpunkt des Bauteilversagens. Die Messergebnisse dienen zusätzlich zur Simulationsverifikation.

8.5.1 Simulationsverifikation

Ein wesentlicher Teil bei der Durchführung von Simulationen ist deren Validierung und Verifikation. Dabei werden Simulationen derart optimiert, dass die Ergebnisse mit Experimenten und den daraus resultierenden Messergebnissen übereinstimmen. Diese Übereinstimmung bedarf meist einer genauen Modellanalyse und Anpassung der signifikanten Parameter.

Abbildung 107 und 108 zeigen das Ergebnis der Verifikation der Simulation des Biegeseitenaufprallträgers. Im Detail stellt dies den Vergleich des Energieaufnahmevermögens aus Messung und Simulation für die zwei Varianten S1 und S2 dar, wobei Messdaten als durchgezogene Linien dargestellt sind. Die Legendennotation entspricht der der Messergebnisse. Es ist ersichtlich, dass der Kraft-Weg-Verlauf der Messung und der Simulation sehr gut übereinstimmen.

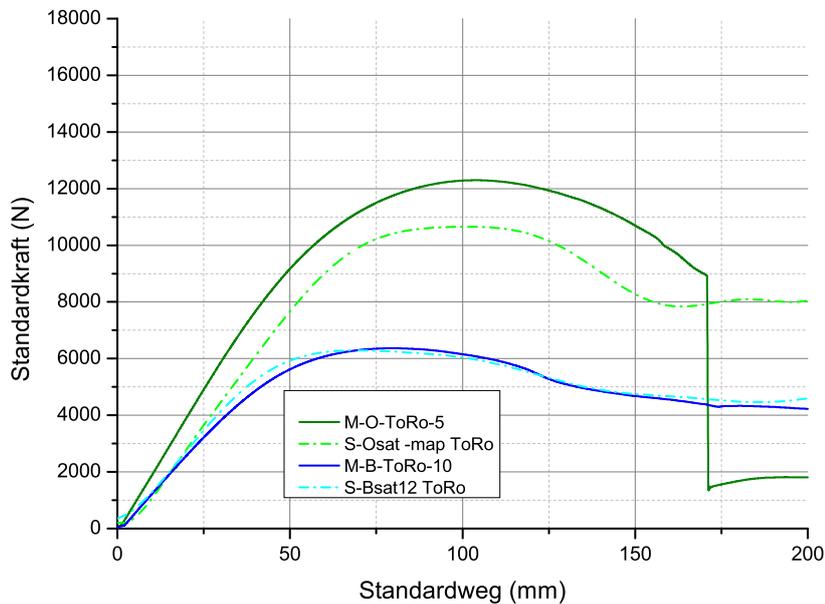


Abbildung 107: Simulationsverifikation der Variante S1 beim Biege-SAT sowie der Referenz

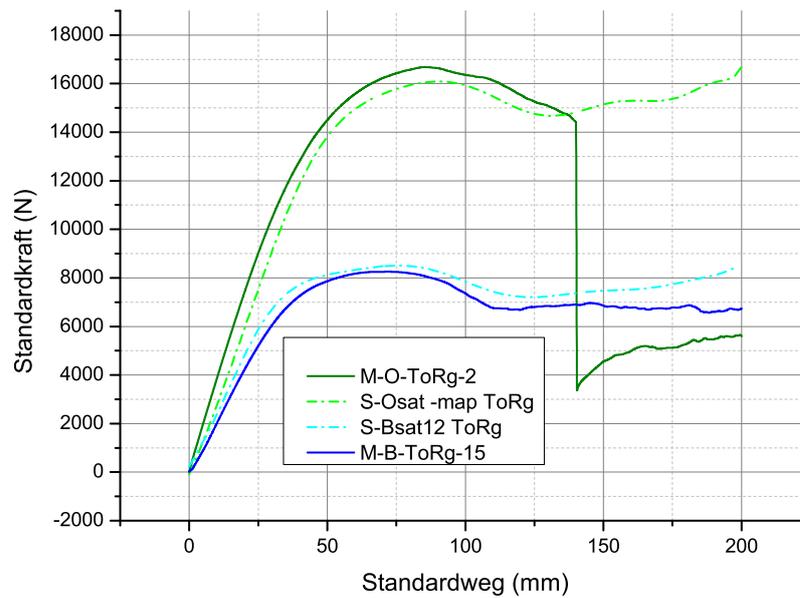


Abbildung 108: Simulationsverifikation der Variante S2 beim Biege-SAT sowie der Referenz

Zusätzlich zur Überprüfung des Kraft-Weg-Verlaufes werden für die Verifikation die wirkliche und die vorhergesagte Verformung verglichen. Die Bilder 109 für S1 und 110 für S2 des Biege-SATs zeigen die Vergleiche beider Varianten.



Abbildung 109: Verformungsvergleich der Variante S1

Wie in den Abbildungen optisch zu erkennen, entsprechen die Simulationsergebnisse sehr gut dem Verformungsbild des getesteten Seitenaufprallträgers. Sichtbar ist auch, dass die Bauteileinspannung des Realversuches weicher als in der Simulation modelliert ist. Dieses Phänomen ist auch durch den tendenziell steileren Anstieg der Kraft-Weg-Kurve der Simulation sichtbar.



Abbildung 110: Verformungsvergleich der Variante S2

Zusammenfassend kann durch die gute Übereinstimmung der Verformungsbilder und der Kraft-Weg-Verläufe von Simulation und Realversuche die Aussagegüte der Simulationen bestätigt werden und das fertige Bauteil für die abschließende Phase des Bauteilentscheidungszykluses, der Bauteilverwendung und den damit verbundenen Folgeoperationen, freigegeben werden.

8.5.2 Optimierung

Zum Nachweis der gleichen Energieaufnahmefähigkeit der Biegelösung erfolgt in diesem Abschnitt eine dahingehende Optimierung der gefertigten Seitenaufprallträger Variante S1. Die geringere Crashperformance des Biege-SATs kann grundsätzlich durch eine Materialanpassung und/oder eine Geometrieoptimierung ausgleichen werden.

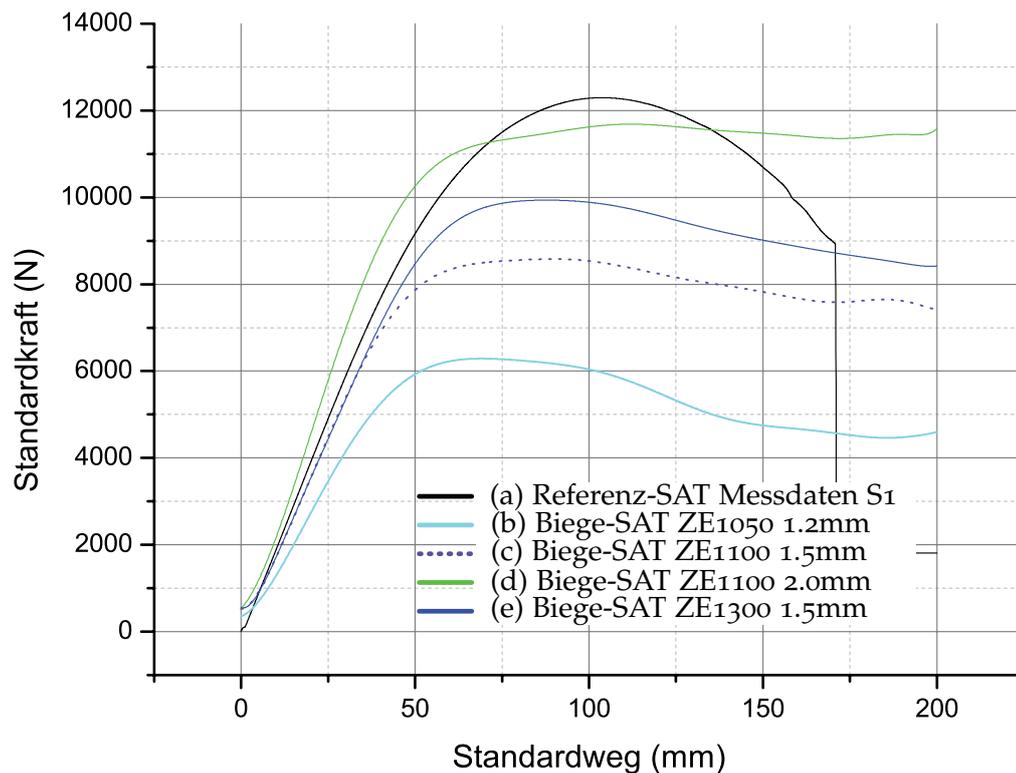


Abbildung 111: Vergleichssimulationen zur Optimierung durch Materialanpassung

In Abbildung 111 ist zusätzlich zu den Messdaten der Variante S1 der Referenz (a) als Zielwert auch der Ausgangspunkt für eine Optimierung durch Materialanpassung, die validierte Simulation des Biegeseitenaufprallträgers aus ZE1050 in 1.2mm (b), dargestellt. Durch die Verwendung der derzeit festesten ZE-Güte in 1.5mm (c) kann bei gleichbleibender Geometrie bereits eine deutliche Steigerung der Energieaufnahmefähigkeit erreicht werden. Eine Blechstärkensteigerung dieser Güte auf 2mm (d) führt zu einem vergleichbarem Ergebnis in der Energieaufnahme. Eine damit einhergehende Erhöhung des Bauteilgewichtes wird aber in der Praxis vor dem Hintergrund der Leichtbauthematik nicht haltbar sein. Selbst ein ZE1300 (e), eine noch nicht verfügbare Güte, in 1.5mm, um beim gleichen Gewicht zu bleiben, würde die Referenz nicht erreichen. Dies hängt auch damit zusammen, dass die Kaltverfestigung bei der Umformung beim crashgeformten Referenzbauteil einen wesentlichen Einfluss auf das erreichte Kraftniveau hat. Wie schon im Abschnitt der Simulation beschrieben, ist dieser Einfluss beim Freibiegen aufgrund der sehr lokalen Beeinflussung vernachlässigbar klein. Umgekehrt ist dadurch bei

der Bauteilverwendung mit einer höheren Restbruchdehnung des Biegebauteils gegenüber einem tiefgezogenen Bauteils zu rechnen. Aus diesen Vergleichen wird sichtbar, dass eine reine Materialanpassung an diesem Beispiel bei gleichbleibender Geometrie durch die fehlende Kaltverfestigung nicht zielführend ist.

Die von geometrieoptimierten Biegebauteilen aus ZE1100 1.5mm stammenden Vergleichssimulationen, zeigt Abbildung 112. Darin sind (a) wieder die Messdaten der Variante S1 der Referenz und (d) die bis jetzt bekannte Biege-SATLösung aus ZE1100 mit 1.5mm Blechstärke. Die Kraft-Weg-Kurve (b) gehört zu einer Variante mit hinterschnittigem Profilquerschnitt, womit die vorgegebene Energieaufnahme erreicht werden kann. Der Querschnittsauslauf ist dabei wie in Abschnitt 8.2 erarbeitet ausgeführt. Verlauf (c) erreicht das Ziel zwar nicht ganz, die zugehörige Lösung zeigt aber eine weitere Möglichkeit der Geometriegestaltung auf. In diesem Zusammenhang besonders zu erwähnen ist, dass die Varianten 3 und 4 nicht durch herkömmliches Tiefziehen herstellbar sind und daher weiteres Potential des Freibiegens aufzeigen.

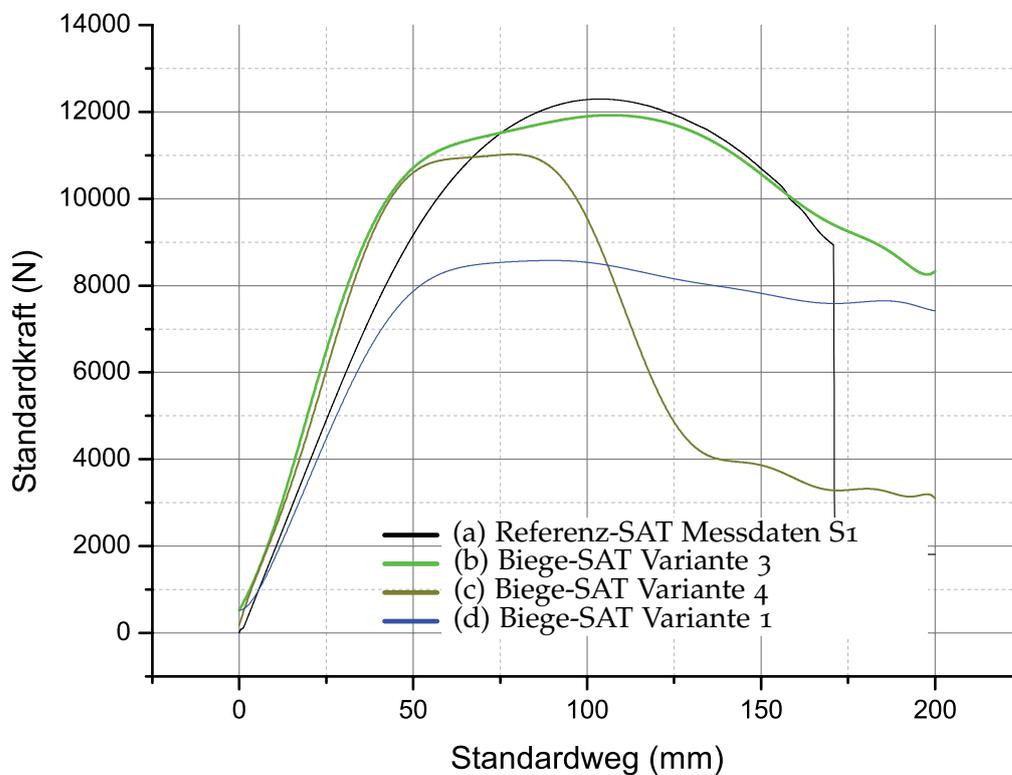


Abbildung 112: Vergleichssimulationen zur Optimierung durch Geometrieanpassung

Die zu den dargestellten Simulationsergebnissen zugehörige Querschnittsgeometrie, die Eigenschaften der einzelnen Varianten und ein Performancevergleich ist in Tabelle 3 noch einmal quantitativ zusammengefasst.

<i>Eigenschaft</i>	<i>Referenz</i>	<i>Variante 1</i>	<i>Variante 2</i>	<i>Variante 3</i>	<i>Variante 4</i>
	Original 1,5mm MSW 1200	BiegeSAT 1,5mm ZE 1100	BiegeSAT 2,0mm ZE 1100	BiegeSAT 1,5mm ZE 1100	U-Profil 1,5mm ZE 1100
	 Messdaten	 Profil wie Original	 Profil wie Original	 Optimiertes Profil	 Doppel- blech- biegung
Energie- aufnahme	1858199 Nmm	-23,1%	+7,21%	+3,4%	-30,95%
Maximale Kraft	12250 N	-29,54%	-4,52%	-2,42%	-9,75%
Gewicht	1876 g	-9,12%	+19,30%	+3,94%	-12,53%
statisches Widerstands- moment	1,18e-06 m ³	+2,06%	+32,88%	+54,14%	+49,77%

Tabelle 3: Ergebnisse der Optimierungsschleifen

Leerseite

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Der Bauteilentstehungszyklus ist das Ergebnis der Erarbeitung einer durchgängigen Methode zur Herstellung von Biegebauteilen durch Freibiegen bei der Substitution von komplexen Schalenbauteilen. Um das volle Potential des Freibiegens ausnützen zu können ist es notwendig, die Zusammenhänge des gesamten Entstehungszyklus zu kennen, diese in jeder Phase im Auge zu behalten und vor allem die Technologieparameter als zentrale Datensammlung durchgängig zu verwenden. Die Kerninhalte der durchgängigen Methode sind die Ergebnisse der Gesamtprozessbetrachtung des Freibiegens, 5, und die Ausarbeitung, 6, der konstruktiven Möglichkeiten und Rahmenbedingungen bei der Biegebauteilgestaltung in Form eines einfach, bei der Bauteilsubstitution nach dem Baukastensystemprinzip, anwendbaren Konstruktionskataloges. Die große Abhängigkeit der einzelnen Teilbereiche voneinander erfordert eine iterative Abarbeitung und eine gesamtheitliche Verwendung der Methode um optimierte Bauteillösungen herzustellen.

Die vorgestellte Methode gilt für Schalenbauteile, welche aus den in Abschnitt 5.4 identifizierten Geometriebereichen bestehen. Unter der Voraussetzung einer, im Rahmen der allgemeinen konstruktiven Randbedingungen, anwenderbezogenen Erweiterung des Konstruktionskataloges kann darüber hinaus das Vorgehen in gleicher Art und Weise für weitere Schalengeometrien verwendet werden.

BIEGEPROZESS Bei der am Stand der Technik angewendeten Prozessführung [Tru96] ist ausgehend von einer Sollgeometrie der Verkürzungswert die zentrale Größe im Biegeprozess. Die aktuell erreichbare Maßhaltigkeit in Bezug auf Schenkellänge und Biegewinkel von Biegebauteilen ist für viele Anwendungsbereiche nicht ausreichend hoch. Dies liegt in erster Linie neben den beschriebenen Einflüssen an der zufälligen Abweichung von Blechstärken (Abbildung 33) und Festigkeitseigenschaften der für die Biegebauteile verwendeten Blechhalbzeuge über mehrere Chargen. Experimentell kann gezeigt werden, dass eine daraus resultierende Schenkellängenabweichung im Bereich von 0,3mm liegen kann. Es ist dabei auch hervorzuheben, dass die Abweichungen der Einzelparameter meist innerhalb der erlaubten Toleranzen liegen. Vor allem bei der Herstellung von komplexen Bauteilen mit mehreren Kantungen führen solche Einzelabweichungen schnell zu einem großen Summenfehler der eine stabile Produktion innerhalb definierter Toleranzgrenzen verhindert. Die herkömmliche Methode den Fehler zu verschieben, funktioniert bei vielen Bauteilen nicht oder ist aufgrund der Komplexität zu aufwendig und fehleranfällig. [Mic14] Vor allem komplexe Biegebauteile werden deshalb in der Industrie derzeit durch komplizierte Mehrteillösungen mit aufwendigen Fügeoperationen umgesetzt oder gar auf alternative Herstellverfahren ausgewichen, weil das Freibiegen im Allgemeinen nicht als präzises Fertigungsverfahren eingestuft, dementsprechend verwendet und teure Nacharbeit als unumgängliche Begleiterscheinung akzeptiert wird.

Generell ist die exakte Ursachenzuordnung aus dem Gesamtprozess zu einem bestimmten Fertigungsfehler, wie zum Beispiel einem Maßfehler der Biegeschenkel, wegen der gegebenen Prozesskomplexität sehr schwierig. Da die wesentlichen Einflussparameter des Freibiegeprozesses direkt den Verkürzungswert als resultierende Größe beeinflussen, kann dieser als geeignete Stellgröße zur Verbesserung der Maßhaltigkeit identifiziert werden. Zusammengefasst resultieren Maßabweichungen der Schenkellänge im wesentlichen aus einer Abweichung der Istverkürzung am Werkstück von der Sollverkürzung aus der Zeichnung. Die nicht vernachlässigbare Abweichung von berechneten Verkürzungswerten im Vergleich zur gemessenen Istverkürzung für eine Biegeaufgabe aus verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten ist in [P G11] dargestellt und untermauert diese Problematik.

Der Ansatz der experimentellen Ermittlung der Technologieparameter beschreibt die Verwendung der Stellgröße Verkürzungswert im Biegeprozess. Der Kern dieses Ansatzes ist die zentrale Verwendung des speziell für die anstehende Biegeaufgabe ermittelten Verkürzungswert. Die damit einhergehende Korrektur von abweichenden Prozessparametern ermöglicht eine maßhaltige Produktion. Bei der gewonnenen Genauigkeit und der universellen Anwendbarkeit darf aber nicht auf den zusätzlichen Zeitaufwand für diesen Verbesserungsansatz vergessen werden, welcher bei der Prototypenherstellung und Konzeptstudien vernachlässigbar ist, weshalb er in der gesamten Arbeit Verwendung findet. Um auch für eine wirtschaftliche Serienproduktion eine Lösung bieten zu können, wurde mit dem Ansatz der Verkürzungskorrektur eine konzeptionelle Lösung erarbeitet, bei der durch die automatisierbare Ermittlung der Eigenschaftsabweichung des Halbzeuges mit Hilfe eines Kernfeldes und ein in den Biegeprozess eingebundenes verstellbares Werkzeug die Maßhaltigkeit bei der Herstellung komplexer Biegebauteile ausreichend gesteigert werden kann. Der Anwender muss sich dabei aber auch bewusst sein, dass diese Korrekturmaßnahme den Biegeradius beeinflusst. Stichprobenartige experimentelle Ergebnisse bestätigen die Annahmen und die Funktionsweise. Für eine industrielle Verwendung und automatisierten Maschineneinbindung kann der hier schematisch aufskizzierte Regelkreis der adaptiven Gesenkweitenverstellung beim Freibiegen nur als Basis dienen und muss in zukünftigen Entwicklungsprojekten nochmal im Detail aufgearbeitet werden. Als Anregung könnte dabei eine Kompensations- und Korrekturmethode [Kop] eines adaptiven Blechbiegeprozesses im Folgeverbund dienen, welche sowohl eine Kompensation der Rückfederung als auch eine Korrektur der Biegewinkel ermöglicht oder eine Arbeit über eine Entwicklung eines Prozessmodells [Ker13] zur Bestimmung von Maschinenparametern um endkonturnahe Biegegeometrien mit geringen Restabweichungen zur Soll-Biegekontur herzustellen.

Die entwickelten Verbesserungsansätze versprechen, wie die experimentellen Ergebnisse zeigen, eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Maßhaltigkeit des Werkstückes, da auf Abweichungen direkt im Biegeprozess reagiert wird und damit der Summenfehler durch genaue Einzelschenkel reduziert wird. Zusätzlich ist hervorzuheben, dass dabei keine Neuberechnung oder Korrektur von Hinteranschlagpositionen erforderlich ist und damit ein übersichtlicher und nachvollziehbarer Prozessablauf mit klar definierten Eingriffspunkten zur Verfügung steht. In Bezug auf den Freibiegeprozess sind damit die Rahmenbedingungen für die Herstellung von Freibiegebauteilen bei der Substitution von komplexen Schalenbauteilen geschaffen.

BAUTEILSUBSTITUTION Der zweite wesentliche Bereich bei der Entwicklung des Bauteilentstehungszyklus liefert die konstruktive Grundlage der mit dem Herstellprozess Freibiegen herzustellenden Bauteilsubstitutionen. Neben den allgemein gültigen konstruktiven Randbedingungen, woraus deutlich die gegenseitige Abhängigkeit der verschiedenen Teilbereiche des Freibiegens erkennbar ist, sind konstruktive Lösungen das Ergebnis. Anhand von Geometrieanalysen wurde festgestellt, dass die untersuchten Schalenbauteile aus wenigen verschiedenen Geometriebereichen bestehen. Durch die Aufbereitung eines Konstruktionskataloges, bestehend aus parametrischen Teillösungen für die gefundenen Geometriebereiche und einer zweckgebundenen Priorisierung der Konstruktionsaufgabe ist es nun im Rahmen der Methode möglich, Bauteilsubstitutionen nach dem Baukastenprinzip zu erstellen.

Die Herstellbarkeit durch standardisiertes Freibiegen ist nicht bei allen Geometriebereichen gegeben. Durch Sonderwerkzeuglösungen kann dieser Umstand im Rahmen der Wirtschaftlichkeit weitestgehend behoben werden, wobei generell zu bemerken ist, dass Schalengeometrien für das Freibiegen in geradlinig abwickelbare Geometriesubstitutionen verwandelt werden müssen und zusätzlich die fügetechnische Verbindung einzelner Biegeschenkel zur Funktionserfüllung durchzuführen ist. In Summe kann durch die Anpassung der Geometriebereiche an das Freibiegen mit der Anwendung der Baukastenelemente und einer begleitenden simulativen Überprüfung validierter Modelle die Erhaltung der Bauteileigenschaften gewährleistet werden. Besonders hervorzuheben ist hier noch einmal das Potential der Geometrieoptimierung, da durch Freibiegen belastungsoptimierte Geometrien herstellbar sind, die mit herkömmlichen Ziehverfahren nicht umsetzbar sind. Durch die hinterschnittige Geometrie in Variante 3 aus Tabelle 3 kann beispielhaft das statische Widerstandsmoment bei gleichbleibenden Bauteilgewicht im Vergleich zur Referenz um 54% gesteigert werden.

Wie bereits in Abschnitt 8.2 erklärt, ist auch am durchgängig vorgestellten Beispiel des Seitenaufprallträgers ersichtlich, dass jede Überführung eine Annäherung an vorgegebene Freiformgeometrien ist und bestimmter Vereinfachungen bedarf. Die Aufgabe des Konstrukteurs wird es sein, vorhandene Abweichungen in Bezug auf die Bauteilverwendbarkeit zu bewerten und unter Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen, vor allem in Bezug auf die Fügeprozesse, eine wirtschaftlich herstellbare Lösung zu finden. Durch eine ständige Erweiterung des Kataloges an konstruktiven Teillösungen und die Einbindung von verfügbaren Ressourcen, kann die Konstruktionsqualität gesteigert und die Durchlaufzeit für eine Bauteilkonstruktion erheblich verkürzt werden. Eine Anpassung der Referenzgeometrie an die Grundeigenschaften des Biegens würde eine deutliche Verbesserung der Anwendbarkeit dieser Methode bewirken und die notwendige Verwendung von Sonderwerkzeugen reduzieren und damit gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit steigern. Die hier dargestellte Vorgehensweise ist für Bauteilsubstitutionen konzipiert, kann aber grundsätzlich auch für Neukonstruktionen in leicht modifizierter Form angewendet werden.

WIRTSCHAFTLICHKEIT Wie die Kosten-Nutzen-Analyse gezeigt hat, wird konkurrierend zu einem Ziehverfahren das Hauptanwendungsgebiet für eine mögliche Serienanwendung bei Stückzahlen im Bereich von 50.000 Stück liegen. Diese doch beachtliche Stückzahl stützt

sich im wesentlichen auf den Preisunterschieden von Presse und Werkzeug der verglichenen Verfahren. Durch den Einsatz und die Entwicklung von Sonderwerkzeugen können auch beim Freibiegen mit einem Hub mehrere Kantungen hergestellt werden. Dies reduziert die Anzahl der Umformstufen und trägt damit zur Wirtschaftlichkeit bei, wobei es in diesem Zusammenhang die dadurch eingeschränkte Flexibilität abzuwiegen gilt. Neue Maschinen- und Automatisierungskonzepte können die Konkurrenzfähigkeit dabei weiter steigern. Eine ergänzende Möglichkeit um die Biegetechnologie in die Serienanwendung zu bringen, wäre die Entwicklung von Folgeverbundwerkzeugen, die dabei eine Verwendung von vorhandenen Standardpressen erlauben. Dabei können die Vorteile des Biegens mit denen des Formens mit Flexibilitätseinbußen kombiniert werden.

Unter der Berücksichtigung der Eigenschaften des Freibiegens und der damit verbundenen einzuhaltenden Richtlinien ist es möglich, günstigere und vielleicht sogar bessere Bauteilsubstitutionen mit Hilfe der entwickelten Methode herzustellen. Der Nachweis wurde am Beispiel einer Seitenaufprallträgersubstitution erfolgreich erbracht. Neben den in der Bauteiloptimierung genannten Vorteile kommen durch den Bauteilentstehungszyklus zusätzliche Vorzüge, wie eine kurze Bauteilumsetzungszeit mit virtueller Durchgängigkeit, die Möglichkeit der Funktionsintegration, eine in Bezug auf Geometrie und Biegeprozess flexible Herstellung auch hinterschnittiger Werkstücke und die effektiven Prozesseingriffsmöglichkeiten, zum Tragen.

Abschließend kann das Freibiegen auf Basis der vorliegenden Ergebnisse als geeignetes Produktionsverfahren zur Herstellung komplexer Schalenbauteile bewertet und als potentiell erweitertes Feld eingestuft werden.

Aufbauend auf die Motivation dieser Arbeit aus Kapitel 1 wurden in Kapitel 2 die aktuellen Anwendungsgebiete des Freibiegens, auf Basis einer Erarbeitung des Standes der Technik beim Freibiegen, dargestellt. Aus potentiellen Anwendungsgebieten wurde anschließend anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse das Freibiegen in Kapitel 4 als geeignetes Produktionsverfahren zur Herstellung komplexer, funktioneller Schalenbauteile bewertet und die Karosseriefertigung als potentielle Erweiterung der Anwendungsgebiete beim Freibiegen eingestuft.

Die von der Soll- bis zur Istgeometrie detailliert erarbeitete Gesamtprozessbeschreibung bei der Bauteilherstellung durch Freibiegen in Kapitel 5 ist ein wesentlicher Punkt für die vorliegende Arbeit. Aus dem enthaltenen Fehlerpotential und den wesentlichen Einflussparametern im Freibiegeprozess wurden vor dem Hintergrund der Herstellung komplexer, funktioneller Schalenbauteile, notwendige Prozessverbesserungsansätze vorgestellt. Der Ansatz der Verkürzungskorrektur wurde dabei detailliert ausgearbeitet und in Kombination mit einer gesenkweitenverstellbaren Biegematrize als wesentliche Verbesserung des Freibiegeprozesses, durch eine Kompensationsmöglichkeit von zufälligen Parameterschwankungen in einem in den Biegeprozess integrierbaren Regelkreis, dargestellt. An einem geeigneten Versuchsaufbau erfolgte dafür der experimentelle Beweis. Zusätzlich wurde die experimentelle Ermittlung von Technologieparametern beim Freibiegen erklärt und beispielhaft vorexerziert.

Aufgrund des klaren Ziels der Arbeit in Richtung Herstellung von komplexen Karosseriebauteilen bei der Ausnutzung der Vorteile des Herstellprozesses Freibiegen und der Berücksichtigung der damit verbundenen Eigenschaften wurden in Abschnitt 5.4 Referenzbauteile zur umfangreichen Analyse und einer einhergehenden Abschätzung der Herstellbarkeit durch Freibiegen ausgewählt. Die Geometrieanalyse der Daten ergab, dass alle untersuchten Schalenbauteile im Wesentlichen aus Kombinationen weniger verschiedener Geometriebereiche bestehen. Die konstruktive Substitution von Schalenbauteilen zu Biegebauteilen in Kapitel 6 erfolgte unter Berücksichtigung der konstruktiven Randbedingungen beim Freibiegen durch die Erarbeitung entsprechender konstruktiver Teillösungen für die identifizierten Geometriebereiche und deren Anwendung an Schalenbauteilen nach dem Baukastensystem.

Die konstruktive Umsetzung nach dem Baukastenprinzip anhand eines Konstruktionskataloges mit Teillösungen war neben dem umfangreich ausgearbeiteten Gesamtprozessverständnis ein vorweggenommener Teil der Entwicklung einer durchgängigen Methode zur Herstellung von Funktionsbauteilen durch Freibiegen in Kapitel 7.1. Diese zielgerichtete und durchgängige Lösungsfindung bei der Entwicklung von funktionellen Biegebauteilen, ausgehend vom Konzept bis hin zur Bauteilverwendung, wurde darin detailliert erklärt und als Bauteilentstehungszyklus dargestellt. Kapitel 8 demonstrierte am Beispiel einer Seitenaufprallträgersubstitution die durchgängige Anwendbarkeit der erarbeiteten Methode und bewies die Herstellbarkeit von funktionalen Schalenbauteilen durch Freibiegen. Durch einen A zu B Vergleich des in einer

aktuellen Karosserie eingesetzten Seitenaufprallträgers und der zugehörigen Biegesubstitution wurde die Erhaltung der Eigenschaften in Bezug auf die Energieaufnahme positiv überprüft. Abschließend wurde anhand von Optimierungsschleifen gezeigt, dass durch Freibiegen belastungsoptimierte Geometrien herstellbar sind, die mit herkömmlichem Tiefziehen nicht umsetzbar wären.

Neben den erarbeiteten Ergebnissen in Bezug auf die Herstellung komplexer, funktioneller Schalenbauteile durch Freibiegen, anhand einer durchgängigen Methode, sollte diese Arbeit darüber hinaus dazu beitragen, die Möglichkeiten des Freibiegens zu verdeutlichen. Sie soll auch aufzuzeigen, dass das Freibiegen nicht nur für einfache Bauteile mit geringen ansprüchen an die Maßhaltigkeit verwendet werden kann und dadurch zusätzliche Anwendungsgebiete anzusprechen.

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_s		Biegeanschlag
UW		Biegegesenk
Bl		Biegelinie
A	mm	Biegeschenkellänge
B	mm	Biegeschenkellänge
OW		Biegestempel
Bz		Blechzuschnitt
x	mm	Abstand der Biegelinie
B_p	mm	Profilbreite
H_p	mm	Profilhöhe
Wr		Walzrichtung
Wk		Werkstück
F	N	Biegekraft
l_b	mm	Biegelinienlänge
r_i	mm	Biegeradius, innerer Werkstückradius
r_a	mm	Biegeradius außen, äußerer Werkstückradius
v	mm	Biegeverkürzung
α	°	Biegewinkel
t	mm	Blechdicke
y	mm	Eintauchtiefe
r_w	mm	Einzugsradius Biegegesenk
w	mm	Gesenkweite
l_0	mm	gestreckte Länge
k		Korrekturfaktor der Biegeverkürzung
k_r		Rückfederungsfaktor

Symbol	Einheit	Beschreibung
v_{ST}	m/s	Stempelgeschwindigkeit
r_{ST}	mm	Stempelradius
l_w	mm	Werkzeuglänge
β	$^\circ$	Öffnungswinkel

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Werkstoffverteilung in einer modernen Karosserie nach Festigkeitsklassen	1
Abbildung 2	Detailaufnahme des Freibiegeprozesses	2
Abbildung 3	Einteilung der Biegeumformverfahren nach DIN 8586	5
Abbildung 4	Freibiegen zwischen zwei Auflagern mit dazwischenliegendem Stempel	6
Abbildung 5	Relative Lage der Biegewerkzeuge	7
Abbildung 6	Gesenkbiegen	8
Abbildung 7	Prinzip des Freibiegens - Biegezone	9
Abbildung 8	Randverformung	9
Abbildung 9	Kaltverfestigung	10
Abbildung 10	Biegelinie beim freien Biegen	10
Abbildung 11	Biegehalbmesser	10
Abbildung 12	Möglichkeiten zur Erzielung scharfer Biegekanten	11
Abbildung 13	Phasen des Gesenkbiegens	12
Abbildung 14	Kräfteituation beim Freibiegen	13
Abbildung 15	Rückfederung	13
Abbildung 16	Rückfederungsdiagramm	14
Abbildung 17	Berechnungsgrundlage der Biegeverkürzung	15
Abbildung 18	Haarrisse durch zu kleinen Biegehalbmesser und Quetschfalte auf der Innenseite	16
Abbildung 19	Standardwerkzeuge beim Freibiegen	17
Abbildung 20	Verstellbare Biegematrize mit Einlaufwellen	18
Abbildung 21	Verstellbare Matrize mit austauschbaren Werkzeugeinsätzen	19
Abbildung 22	Gesenkbackenpositionierung mit Hilfe von Verzahnungen	19
Abbildung 23	Matrizenverstellung durch Spindeltrieb	20
Abbildung 24	Verstellbare Matrize mit horizontaler Keilverstellung	20
Abbildung 25	Musterbauteile	21
Abbildung 26	Befestigungskonsole	22
Abbildung 27	Stückzahlabhängige Gesamtkosten und Stückkostenverlauf	26
Abbildung 28	Gesamtprozess Freibiegen	30
Abbildung 29	Sollgeometrie	30
Abbildung 30	Gesenkweitenempfehlung	31
Abbildung 31	Abwicklung	32
Abbildung 32	Fertigungsfehler	36
Abbildung 33	Halbzeugtoleranzen aus DIN EN 10029 und DIN EN 10031	37
Abbildung 34	Einflussgrößen beim Freibiegen	38

Abbildung 35	Winkelmesssystem der Firma Trumpf	40
Abbildung 36	Längenkorrektur der Biegeschenkel	41
Abbildung 37	Einfluss der Blechdicke auf die Schenkellänge	43
Abbildung 38	Verkürzung v in Abhängigkeit der Blechdicke t	45
Abbildung 39	Kompensationsansatz	47
Abbildung 40	Konzept für ein im Prozess verstellbares Biegegesenk	49
Abbildung 41	Versuchsaufbau zur Durchführung von Umformversuchen	50
Abbildung 42	Schenkellängenmessung	51
Abbildung 43	Einfluss der Winkelabweichung auf die Genauigkeit bei der zwei-stufigen Vermessung	52
Abbildung 44	Probenvermessung mit einem Höhenmesser	53
Abbildung 45	Versuchsgeometrie zur Bestimmung der Eigenschaften der Biegezone	54
Abbildung 46	Bestimmung der Rückfederung	55
Abbildung 47	Probefalzung an ZE1000 $t = 1$ mm	55
Abbildung 48	Kompensationsbeispiel	57
Abbildung 49	Bauteilkategorien einer Gesamtkarosserie	59
Abbildung 50	Einteilung der relevanten Bauteile einer Karosserie	60
Abbildung 51	Verbindungs- und Versteifungsbauteile	61
Abbildung 52	Schwellerbaugruppe	61
Abbildung 53	Geometriedaten	62
Abbildung 54	Mindestbiegeradius	66
Abbildung 55	Kleinste Schenkellänge b	66
Abbildung 56	Maximale Schachtelhöhe	67
Abbildung 57	Problemstellung bei unterschrittenen Bauteilen	67
Abbildung 58	Mindestabstände von Löcher und Durchbrüchen	68
Abbildung 59	Durchbruch bis über die Biegekante gezogen	68
Abbildung 60	Sicken	69
Abbildung 61	Ausklinkungen bei gemeinsamen Schnittpunkt im Material	69
Abbildung 62	Ausklinkungen bei gemeinsamen Schnittpunkt im Material	70
Abbildung 63	Schräge Kanten und Ausläufe im Bereich der Biegekante	70
Abbildung 64	Abwickelbarkeit eines Biegebauteils	71
Abbildung 65	Festigkeitsminderung durch Umschlagen	71
Abbildung 66	Teilereduktion durch Falzen	71
Abbildung 67	Verhältnis von Profilbreite und Profilhöhe am U-Profil	73
Abbildung 68	Querschnitt Hut-Profil	73
Abbildung 69	Querschnittsübergänge	74
Abbildung 70	Querschnittsübergang-Positiv	74
Abbildung 71	Querschnittsübergang-Negativ	75
Abbildung 72	Querschnittsübergang-Negativ mit gefalzter Zusatzlasche	75
Abbildung 73	Querschnittsübergang-Negativ mit Einlegeteilen	76
Abbildung 74	Querschnittsübergang-Negativ mit Clipsystem	76

Abbildung 75	Querschnittsübergang mit konstanter Profilhöhe	77
Abbildung 76	Querschnittsauslauf mit Restprofilhöhe	77
Abbildung 77	Teillösung mit Punktverbindung zum Querschnittsauslauf mit Restprofilhöhe	78
Abbildung 78	Querschnittsauslauf in eine Ebene	78
Abbildung 79	Teillösungen zu Querschnittsauslauf in eine Ebene	79
Abbildung 80	Flächenkrümmungen	79
Abbildung 81	Flächenkrümmung vereinfacht	80
Abbildung 82	Befestigungsdom	80
Abbildung 83	Prägungen und Versteifungen	81
Abbildung 84	Kontaktfreistellungen	81
Abbildung 85	Ebenensprung	82
Abbildung 86	Durchbrüche und variable Radien	82
Abbildung 87	B-Säulenverstärkung als Schalenbauteil mit den Geometriebereichen	83
Abbildung 88	Detail des Punktschweißens beim Querschnittsübergang-Positiv	84
Abbildung 89	B-Säulenverstärkung als Biegebauteil mit Abwicklung	85
Abbildung 90	Bauteilentstehungszyklus	88
Abbildung 91	Quasistatischer Türeindrückttest	91
Abbildung 92	Referenzgeometrie SAT mit identifizierten Geometriebereichen	92
Abbildung 93	W-Querschnitt und zugehöriger Auslauf	93
Abbildung 94	Vergleich der Längskrümmung beim SAT	94
Abbildung 95	Querschnittsauslauf eines Seitenaufprallträgers als Biegebauteil mit Abwicklung	94
Abbildung 96	Simulationsmodell	95
Abbildung 97	Modellierung der Einspannung	96
Abbildung 98	A zu B Vergleich des Verformungsbildes. Links die Referenz, rechts das Biegebauteil.	96
Abbildung 99	Kraft-Weg-Verläufe verschiedener Simulationen	97
Abbildung 100	Biegefolge beim SAT	98
Abbildung 101	Werkzeugalternativen bei der SAT-Herstellung	99
Abbildung 102	BiegeSAT-Herstellung mit Standardwerkzeugen	100
Abbildung 103	Seitenaufprallträger	101
Abbildung 104	Prüfstand des modifizierten 3-Punkt-Biegeversuchs	102
Abbildung 105	Messergebnisse der Variante S1	103
Abbildung 106	Messergebnisse der Variante S2	103
Abbildung 107	Simulationsverifikation der Variante S1 beim Biege-SAT sowie der Referenz	104
Abbildung 108	Simulationsverifikation der Variante S2 beim Biege-SAT sowie der Referenz	105
Abbildung 109	Verformungsvergleich der Variante S1	105
Abbildung 110	Verformungsvergleich der Variante S2	106

Abbildung 111	Vergleichssimulationen zur Optimierung durch Materialanpassung . .	107
Abbildung 112	Vergleichssimulationen zur Optimierung durch Geometrieangepassung	108

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Mindestbiegeradius	11
Tabelle 2	Ergebnisse der Geometrieanalyse	63
Tabelle 3	Ergebnisse der Optimierungsschleifen	109

Leerseite

LITERATUR

- [LB07] M. Lai und R. Brun. „Latest Developments in Sheet Metal Forming Technologies and Materials for Automotive Application: the Use of Ultra High Strength Steels at Fiat to Reach Weight Reduction at Sustainable Costs“. In: *Key Engineering Materials* 344 (2007), S. 1–8.
- [Neu+06] R. Neugebauer u. a. „Sheet metal forming at elevated temperatures“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2 2006), S. 793–816.
- [VDI14] VDI-Gesellschaft Materials Engineering. *Werkstoffinnovationen fuer nachhaltige Mobilität und Energieversorgung*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2014. 292 S.
- [TRU] TRUMPF Maschinen Austria GmbH + Co. KG. *TruBend – Mehr Freiheit beim Biegen*. URL: <http://www.trumpf-machines.com/de/produkte/biegen.html> (besucht am 02. 02. 2016).
- [BHS13] A. Birkert, S. Haage und M. Straub. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. 720 S.
- [Lan90] K. Lange. *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.] und New York [u.a.]: Springer, 1990. 629 S.
- [KK05] F. Klocke und W. König. *Fertigungsverfahren. Umformen*. 5., neu bearbeitete Aufl. Berlin und New York: Springer, 2005. 573 S.
- [Hof12] H. Hoffmann. *Handbuch Umformen*. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2012. 1000 S.
- [EHTa] EHT Werkzeugmaschinen GmbH. *Blechbiegetechnologie für höchste Ansprüche*. URL: <http://www.eht.de/produkte/biegen.html> (besucht am 13. 11. 2015).
- [DB10] E. Doege und B.-A. Behrens. *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer, 2010. 923 S.
- [Bys13] Bystronic. *Werkzeugkatalog Version 3.0*. Linz: Bystronic, 2013. 136 S.
- [N5] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 6935 Kaltbiegen von Flacherzeugnissen aus Stahl*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [Oeh63] G. Oehler. *Biegen unter Pressen, Abkantpressen, Abkantmaschinen, Walzenrundbiegemaschinen, Profilwalzmaschinen*. München: Hanser, 1963.

- [KP96] G. Khodayari und U. Pickhan. „Biegeuntersuchungen von Grobblechen“. In: *Fertigungstechnik - Berichte aus Forschung und Praxis* (1996), S. 79–87.
- [Kau12] M. Kaupper. „Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit“. Lehrstuhl für Fertigungstechnologie. Dissertation. Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg, 2012. 160 S.
- [Hau96] H. Hauß. *Faszination Blech. Flexible Bearbeitung eines vielseitigen Werkstoffs*. Überarb. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Raabe, 1996. 168 S.
- [UKBa] UKB - Uwe Krumm Burbach GmbH. *Adjustable UKB-dies and die holders*. URL: <http://www.ukb-gmbh.de/english/press-brake-tools/ukb-adjustable-dies/ukb-adjustable-dies-with-rollers/use-of-the-adjustable-ukb-dies/> (besucht am 17. 12. 2015).
- [VLM] VLM bvba. *Standard manuell verstellbare Modelle*. URL: <http://www.vlmbvba.com/de/vlm-modelle> (besucht am 15. 12. 2015).
- [UKBb] UKB - Uwe Krumm Burbach GmbH. *UKB-Adjustable dies with exchangeable inserts*. URL: <http://www.ukb-gmbh.de/english/press-brake-tools/ukb-adjustable-dies/ukb-adjustable-dies-with-exchangeable-inserts/info/> (besucht am 15. 12. 2015).
- [Sch] Schäfer Tools GmbH. *Verstellbare Matrize mit gehärteten wechselbaren Wellen*. URL: http://demo.schaefertools.de/img/cms/pdf/schaefertools%5C_catalogue%5C_2009%5C_hq.pdf (besucht am 10. 12. 2015).
- [Acc] Accurpress Tooling. *Adjustable Lock Dies*. URL: http://www accurpress.com/tooling%5C_cat.html (besucht am 11. 12. 2015).
- [EHTb] EHT Werkzeugmaschinen GmbH. *Flexibles Werkzeugsystem*. URL: <http://www.eht.de/de/produkte/biegen/powerpress.html> (besucht am 14. 12. 2015).
- [ADR] ADR Press Brakes. *Wilas Multi-V-Matic Automatically Adjustable Die System*. URL: <http://www.jorgensonmachinetools.com/brochures/JMT-AD-R-Press-Brake-Catalog.pdf> (besucht am 15. 12. 2015).
- [Fab02] Fabrizio Paoletti. „Adjustable Forming Die, In Particular For Forming Presses“. US 20030041642A1. 2002.
- [Sul96] H. Sulaiman. *Erweiterung der Einsetzbarkeit von Gesenkbiegepressen durch die Entwicklung von Sonderwerkzeugen*. Berichte aus der Fertigungstechnik. Aachen: Shaker, 1996. 126 S.

- [Tru12] Trumpf. *Besser mit Blech. Konstruktion & Entwicklung*. Zwölf Strategien, um mit einfachen Mitteln und einer intelligenten Teilegestaltung mit Blech deutlich effizienter und günstiger zu fertigen. Augsburg: Schlütersche Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2012. 32 S.
- [TRU06] TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. *Technische Information. Technologie des Biegens*. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2006. 124 S.
- [Bra86] H. Brauner. *Lehrbuch der konstruktiven Geometrie*. Wien und New York: Springer, 1986. 384 S.
- [N2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN ISO 2768 Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [N1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 6930-2 Stanzteile aus Stahl, Allgemeintoleranzen*. Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [N3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 10131 Kaltgewalzte Flacherzeugnisse ohne Überzug und mit elektrolytischem Zink- oder Zink-Nickel-Überzug aus weichen Stählen sowie aus Stählen mit höherer Streckgrenze zum Kaltumformen - Grenzabmaße und Formtoleranzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Sep. 2006.
- [N4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN ISO 9013 Thermisches Schneiden - Einteilung thermischer Schnitte - Geometrische Produktspezifikation und Qualität*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Dez. 2014.
- [VSM12] VSM GmbH Maschinen- und Anlagenbau. *Allgemeintoleranzangaben_VSM*. 2012. URL: http://www.vsmgmbh.de/images/stories/downloads/Toleranzen%5C_VSM.pdf (besucht am 01.02.2016).
- [Mek16] Mekon. *Toleranzen für Baugruppen von Mekon*. Mekon Blechsysteme. 2016. URL: http://www.mekon-blechsysteme.de/uploads/media/toleranzen%5C_mekon%5C_extern.pdf (besucht am 01.02.2016).
- [Mic14] Michael Rögner. *Probleme bei der Bauteilherstellung durch Freibiegen*. Unter Mitarb. von H.P.Kaysser GmbH+Co.KG. Leutenbach, 20. Nov. 2014.
- [Tru14] Trumpf Maschinen Austria GesmbH & Co.KG. *Werkzeugkatalog 2014. Trumpf Laserdur Biegewerkzeuge*. Pasching: Trumpf Maschinen Austria GesmbH & Co.KG, 2014. 251 S.

- [Tru96] Trumpf Werkzeugmaschinen, Ditzingen, DE. *Faszination Blech. Flexible Bearbeitung eines vielseitigen Werkstoffes*. Stuttgart: Raabe Verlag, 1996.
- [Heu12] Heusel J. „Verfahren und Werkzeug zum Freibiegen mit einem einstellbaren Gesenk“. EP2403664 A1. T. W. G. +. Co.KG. 2012.
- [GH15] Gasser Christian und Hatzer Raphael. *Entwicklung und Validierung einer verstellbaren Biegematrize für das Freibiegen. Interner Bericht, Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion*. TU Graz, 2015.
- [Kah86] K.-W. Kahl. *Untersuchungen zur Verbesserung der Form- und Massgenauigkeit beim Biegen von Blechen*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1986. 148 S.
- [HS12] Heller B. und Sternberg A. „Messvorrichtung für Biegewerkstücke“. EP2538168 A1. T. W. G. +. Co.KG. 21.06.2012.
- [BIL] BILSTEIN SERVICE GmbH. *BILSTEIN ZE-Sorten*. URL: <http://www.bilstein-gruppe.de/produkte/sorten/bilstein-ze-sorten/> (besucht am 01.09.2015).
- [Eib13] T. Eibl. *Blechmodellierung mit CATIA V5. Effizientes Konstruieren von Blechbiegeteilen*. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. 218 S.
- [Lis12] R. List. *CATIA V5 - Grundkurs für Maschinenbauer. Bauteil- und Baugruppenkonstruktion, Zeichnungsableitung*. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [TRU07] TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. *Technische Information - Technologie des Biegens*. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 5/2007.
- [Mar05] Markus Meier. *Grundlagen der Produktentwicklung*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2005. 727 S.
- [Pah+05] G. Pahl u. a. *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 6. Aufl. Berlin: Springer, 2005. 764 S.
- [Ral09] Ralf Hellmann. *CAX-Technologien. Konstruktionstechnik*. Essingen: Hellmann, 2009.
- [Fri13] H. E. Friedrich. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. 836 S.

- [US 92] U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Administration. *Laboratory test procedure for FMVSS214S (static). Side Impact Protection*. Washington DC: Safety Assurance Office of Vehicle Safety Compliance, 1992. 38 S.
- [P G11] P. Groche, P. Beiter, A. Hassis. „Abgewinkelte Länge beim Biegen von Blech. Schwenkbiegeuntersuchungen zur Verschiebung der ungelängten Faser beim Biegen“. In: *wt Werkstattstechnik* (2011), S. 673–679.
- [Kop] P. Kopfer. *Methode zur adaptiven Rückfederungskompensation und -korrektur von Blechbiegebauteilen in mehrstufigen Biegeprozessen*. 1. Auflage. Bd. 7. Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik. 180 S.
- [Ker13] S. Kersten. *Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen*. 1., Aufl. Bd. 2. Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik. Herzogenrath: Shaker, 2013. 147 S.