



Raphael Hatzer BSc

**ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINER
VERSTELLBAREN BIEGEMATRIZE FÜR DAS
FREIBIEGEN**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Gasser

Graz, September 2016

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 benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Diplomarbeit 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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present masterthesis.

Graz, am

.....

Raphael Hatzler, e.h.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit am Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion entstanden. Neben der Dokumentation meiner geleisteten Arbeit, eröffnet sich mir die Gelegenheit allen Menschen zu danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck, der mir die Möglichkeit eröffnete, am Institut mitzuarbeiten, sowie meine Diplomarbeit zu verfassen. Leider verstarb Herr Prof. Kolleck unerwartet nach kurzer Krankheit im 47. Lebensjahr. Er wird mir immer in positiver Erinnerung bleiben. Außerdem möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch für die schnelle Betreuung und Beurteilung dieser Diplomarbeit danken.

Des Weiteren möchte ich allen Kollegen und Kolleginnen am Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion für die Unterstützung danken. Allen voran Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Gasser, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Vollmer, Herrn Dipl.-Ing. Vladimir Boskovic und Herrn Dipl.-Ing. Michael Machhammer, die mir während meiner Tätigkeit am Institut immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ganz besonderer Dank gilt natürlich meiner ganzen Familie, allen voran meinen Eltern Alois und Sonja, meinen Großeltern und meinem Freund Erik. Ohne die finanzielle und mentale Unterstützung wäre ein Studium in dieser Form nicht möglich gewesen.

Zu guter Letzt möchte ich noch all meinen Freunden und meiner Freundin Lisa danken, die mir während meines Studiums viel Geduld entgegengebracht haben und mir meine Studienzeit verschönerten.

Graz, im September 2016

Hatzer Raphael

KURZFASSUNG

Die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit spielt bei der Produktentwicklung eine zentrale Rolle. Steigende Anforderungen hinsichtlich Qualität und Wirtschaftlichkeit, die zu dieser Sicherstellung beitragen, verlangen alternative Methoden, die eine hohe Maschinen- und Materialausnutzung, sowie geringe Durchlaufzeiten der Einzelteile gewährleisten. In der Umformtechnik werden deshalb vermehrt flexible Umformverfahren entwickelt und angewandt, welche mit geringem Werkzeugaufwand eine hohe Formenvielfalt ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wird eine gesenkweitenverstellbare Biegematrize zur Substitution von mehreren Standardwerkzeugen beim Freibiegen entwickelt und validiert. Die Integration dieser Biegematrize in den Biegeprozess, soll den Gesamtprozess des Umformverfahrens Freibiegen optimieren. Eine automatische Gesenkweiteneinstellung, als eine im Biegeprozess ablaufende Eigenschaft, stellt eine am Markt neuartige und zukunftssträchtige Funktion dar. Durch den Einsatz dieses Konzeptes wird mit vergleichsweise geringem Werkzeugaufwand eine hohe Gesenkvielfalt ermöglicht, sowie die Rüst- und Durchlaufzeit von Biegebauteilen reduziert.

Beginnend mit einer Recherche über am Markt vorhandene, verstellbare Sonderwerkzeuge, werden Eigenschaften und Probleme dieser Werkzeuge analysiert. Diese Problemstellungen dienen als Grundlage zur Definition eines Lastenheftes für die verstellbare Biegematrize. Innerhalb dieses Lastenheftes werden Eigenschaften definiert, welche in Muss-, Wunsch-, und Abgrenzungskriterien eingeteilt werden. Aufbauend auf diesem Lastenheft erfolgt die Konzeptfindung und Umsetzung.

Nach der konzeptionellen, konstruktiven und fertigungstechnischen Umsetzung der verstellbaren Biegematrize wird diese mit einem geeigneten Versuchsaufbau validiert. Mittels Standardwerkzeugen durchgeführte Umformversuche dienen als Referenz. Eine Gegenüberstellung der Umformversuche von Standardwerkzeugen und dem entwickelten flexiblen Werkzeugsystem dient zur Beurteilung des Werkzeugkonzeptes.

ABSTRACT

Sustaining competitiveness is a major part in product design. Rising requirements in quality and economic efficiency that secure competitiveness acquire alternative methods which guarantee high usage of mechanism and material as well as low cycle times of individual parts. This is a main reason why you develop and use flexible forming processes which lead to low usage in tools and high shape diversity.

This thesis is about the development of an adjustable bending tool which substitutes several standard tools in air bending. This particular bending tool should optimize the entire air bending process. An automated die width adjustment during the bending process is a completely new and promising method. This concept requires a little usage of tools and allows high die diversity as well as a reduction of cycle time of bending components. At first a research on the market about current available, adjustable special tools and analysing these particular tools of their quality and problems is necessary. After that, a specification sheet, based on preserved information, is created. In this specification sheet compulsive, desired and demarcation characteristics are defined which result in the concept-making and implementation.

After the conceptional, constructive and ready to produce implementation of the bending tool a suitable breadboard is validated. Shaping tests where standard tools are used serve as reference. A comparison of the shaping tests with standard tools and flexible tool are used to evaluate this particular tool concept.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	3
2.1	Biegeumformen	3
2.2	Freies Biegen	4
2.2.1	Prozessbeschreibung	4
2.2.2	Eigenschaften des Freibiegens	5
2.3	Biegebauteile und Branchen	11
2.4	Werkzeugtechnik beim Freibiegen	13
2.4.1	Standardwerkzeuge	14
2.4.2	Gesenkweitenverstellbare Sonderwerkzeuge	15
3	ZIEL DER ARBEIT	23
3.1	Zielformulierung	23
3.2	Lastenheft	23
4	KONZEPTFINDUNG	27
5	ENTWICKLUNG WERKZEUGKONZEPT	29
5.1	Funktionsprinzip	29
5.2	Konstruktive Ausführung	30
5.2.1	Gesenkbacken	31
5.2.2	fixer Gesenkteil	33
5.3	Presskraft- und Druckberechnung im Hydrauliksystem	34
5.4	Absperrvorrichtung und Rückstellfeder	40
5.5	Leitungssystem und Zusammenbau	45
5.6	Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems	47
6	WERKZEUGVALIDIERUNG	51
6.1	Versuchs- und Messaufbau	51
6.2	Überprüfung der Werkzeugeigenschaften	54
6.3	Vergleich der Umformversuche von Standardwerkzeug und flexiblen Werkzeug	59

ii Inhaltsverzeichnis

6.4	Versuchsauswertung	61
7	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	65
8	ZUSAMMENFASSUNG	69
	Symbolverzeichnis	71
A	ANHANG A	77

EINLEITUNG

In der Produktentwicklung stellen Qualität und Wirtschaftlichkeit zwei der wichtigsten Parameter dar. Um heutzutage dauerhaft wettbewerbsfähig zu sein, müssen diese beiden Eigenschaften als Standard gelten. Um das qualitativ beste Produkt über längere Zeiträume am Markt zur Verfügung zu stellen, bedarf es immer wieder an innovativen Lösungsansätzen, um vorhandene Probleme wie hohe Rüst- und Durchlaufzeiten, geringe Maschinen-, Material- und Werkzeugausnutzung, sowie Maschinenstillstandszeiten zu vermeiden. [Pri92]

Besonders in der flexiblen Blechbearbeitung wird Qualität großgeschrieben. Das Ideal des sogenannten „near net shape“, welches das Ziel beschreibt, ein Bauteil mit definierter Geometrie aus der Biegepresse zu entnehmen, welches der Form des Fertigteils bzw. Endprodukts möglichst nahe kommt, treibt parallel zwei Entwicklungen voran. [Wiro9] Auf der einen Seite wird versucht, möglichst viele Umformungen, welche bereits bei der Flachbearbeitung möglich sind, in den Prozess zu integrieren. So wäre es zum Beispiel möglich, kleinere Umformungen vorab auf einer Stanzmaschine o. ä. durchzuführen. Auf der anderen Seite erschließen die Sonderwerkzeuge dem Konstrukteur neue Wege. Durch Zuhilfenahme der Sonderwerkzeuge ist es dem Konstrukteur möglich, seine Produkte im besten Fall so zu gestalten, dass zum Beispiel alle Verschweißungen durch Biegekanten ersetzt werden können.

Ein mögliches Einsatzgebiet von Sonderwerkzeugen liefert das in der Umformtechnik angewandte Fertigungsverfahren Freibiegen. Anhand von gesenkweitenverstellbaren Sonderwerkzeugen sollen neue Einsatzgebiete für das Freibiegen erschlossen werden. Zudem wird mit vergleichsweise kleinem Werkzeugaufwand eine hohe Gesenkvielfalt erreicht. Die Verstellung der Matrize erfüllt dabei den Zweck, die Fertigung des Bauteils innerhalb des Herstellungsprozesses zu optimieren. Neben der Reduktion von Rüst-, Durchlauf- und Stillstandszeiten wird der Lagerplatzbedarf erheblich verringert. Störgrößen wie Eigenschaftsschwankungen des Werkstoffs, infolge von Chargenschwankungen oder Alterungsvorgängen, Schwankungen der Blechdicke oder Toleranzen der Werkzeuge können weiterführend mit einem solchen Werkzeug kompensiert werden. [Dip16]

Nebenbei gewinnt die Einzelstück- bzw. Kleinserienfertigung, etwa in der Luft- und Raumfahrttechnik, zunehmend an Bedeutung. Mit dieser Zunahme wird die Problematik des Bereitstellens geeigneter Werkzeuge zunehmend verschärft. Einerseits ist

die Herstellung teurer Sonderwerkzeuge für geringe Stückzahlen nicht rentabel, andererseits erhöht Werkzeugvielfalt die Verwaltung und Logistik der Werkzeuge. Es bietet sich daher an, eine technische Lösung für ein universelles Werkzeugsystem zu erarbeiten, um dauerhaft wettbewerbsfähig zu bleiben.

2.1 BIEGEUMFORMEN

Eine große Anzahl von Umformverfahren steht bei der Fertigung und Herstellung von Blechwerkstücken zur Verfügung, wobei die Anwendungsbreite der Biegeumformverfahren besonders groß ist.

"Biegen bzw. Biegeumformen ist in Anlehnung an DIN 8586 plastisches Umformen eines festen Körpers, z.B. eines metallischen Bleches, wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch eine Biegebeanspruchung herbeigeführt wird."

Biegeumformen wird dabei, in Abhängigkeit der Werkzeugbewegung, in Verfahren mit geradliniger und drehender Werkzeugbewegung eingeteilt. Ersichtlich in Abbildung 1. [Sie15]

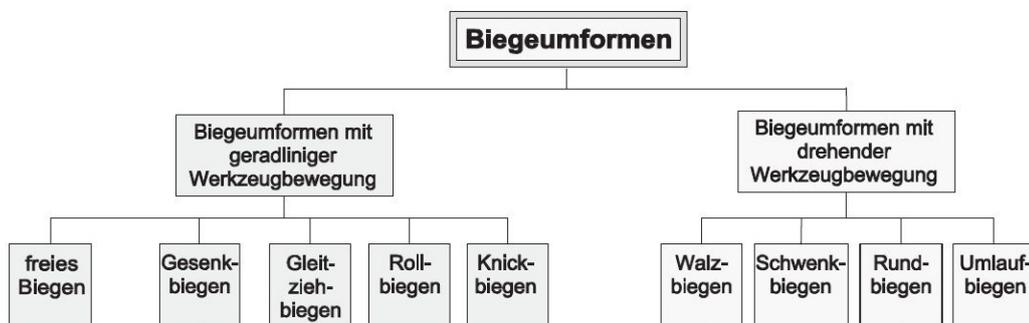


Abbildung 1: Einteilung der Biegeumformverfahren [Sie15]

Eine weitere Unterteilung des freien Biegens erfolgt in „freies Biegen zwischen zwei Auflagern mit dazwischenliegenden Stempel“ und „freies Biegen von einem einseitig eingespannten Blech mit einem am freien Ende angreifenden Stempel“, siehe Abbildung 2. Von freien Biegen kann jedoch in beiden Fällen nur gesprochen werden, wenn der kleinste Biegeradius größer als der Werkzeugradius des Stempels bzw. der Werkstückauflage ist. [DB10]

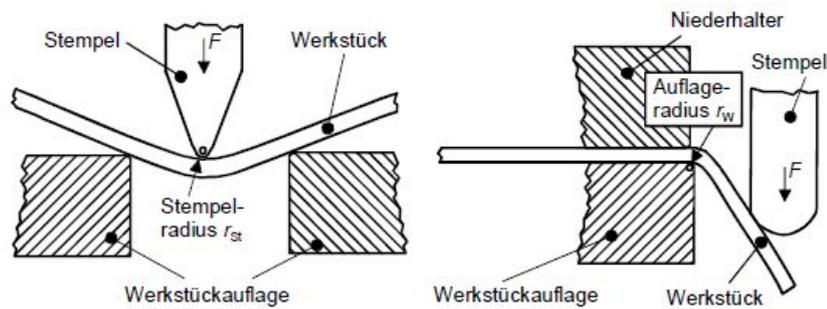


Abbildung 2: Einteilung Freibiegen [DB10]

In der vorliegenden Arbeit wird im Wesentlichen auf das freie Biegen zwischen zwei Auflagern mit dazwischenliegenden Stempel eingegangen, weshalb im Folgenden der Begriff Freibiegen für dieses Verfahren verwendet wird.

2.2 FREIES BIEGEN

Beim freien Biegen, oder Freibiegen, erfolgt die Übertragung der Kräfte und Momente ausschließlich über die Werkzeuge. Die Zielgeometrie ist dabei nur bedingt von der Werkzeuggeometrie abhängig, hauptsächlich wird sie von der relativen Lage der Werkzeuge zueinander und von Materialeigenschaften des verwendeten Werkstoffs bestimmt. [Pri92]

2.2.1 Prozessbeschreibung

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, liegt das Werkstück auf dem Biegegesenk bzw. Unterwerkzeug (*UW*) auf. Die Übertragung der Kraft erfolgt über linienförmige Auflagestellen. Mit Hilfe des Biegestempels, genannt Oberwerkzeug (*OW*), wird die Umformung mit konstanter Stempelgeschwindigkeit durchgeführt. Diese translatorische Bewegung stellt am Blechzuschnitt eine, zur Mitte zwischen den Auflageflächen wachsende Krümmung ein. [Hei05] Diese Krümmung wird anhand der Eintauchtiefe y , der Blechdicke s , des Werkstückmaterials, der Gesenkweite w , sowie vom Stempelradius Stempelradius definiert. Der Hinteranschlag dient anfangs zur Positionierung des Blechzuschnittes. Vergleiche Abbildung 3. Freibiegen ist also ein Verfahren, bei dem der Stempel das Werkstück abkantet, wobei es nicht zum Anliegen des Werkstücks an der Matrizeninnenseite kommt. Ist dies der Fall, spricht man vom Verfahren des Prägebiegens.

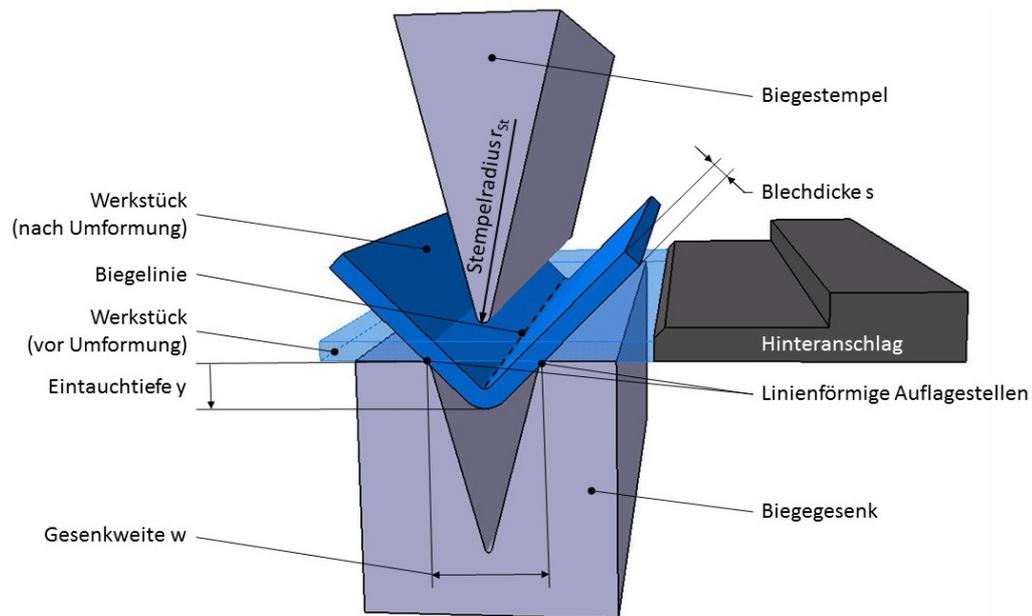


Abbildung 3: Übersicht Umformprozess Freibiegen

2.2.2 Eigenschaften des Freibiegens

- Spannungen in der Biegezone

Nicht jeder Blechwerkstoff eignet sich uneingeschränkt für das Biegen, da z.B. spröde Werkstoffe bei engen Biegeradien leichter reißen als elastische Werkstoffe. Die Eignung eines bestimmten Werkstoffes für das Freibiegen kann durch genormte Biege- bzw. Abkantversuche nach DIN 1605 bzw. DIN 9003 geprüft werden. Die Werkstoffabstimmung mit dem Werkzeug ist somit einer der wichtigsten Parameter. Häufig auftretende Werkstückfehler beim Freibiegen sind Quetschfalten oder Risse, aufgrund von unzulässigen Beanspruchungen des Werkstoffes in der Biegezone oder ungünstigen Biegeradien, sowie Maß- und Formfehler an den Biegeschenkeln. [Heio5] Entlang des Werkstückquerschnitts ist die Beanspruchung im Werkstoff während des Umformprozesses verschieden. Unter Belastung befindet sich das Werkstückmaterial in der Matrize von A bis C unter Zug- bzw. Druckspannungen. Links und rechts außerhalb der Matrizenöffnung unterliegt das Material keiner Spannung. Sobald das Versuchsmaterial entlastet wird, federn die Abschnitte AD und EC in die ursprüngliche Lage zurück (vergleiche Abbildung 4). Bereich AD und EC fallen in die Zone der elastischen

Verformung. Im Bereich DE tritt sowohl elastische Verformung, als auch plastische Verformung auf. [Bys13] Im Unterpunkt „Rückfederung“ wird darauf näher eingegangen.

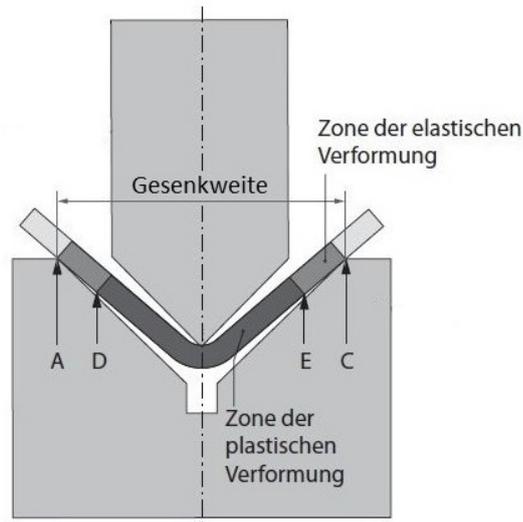


Abbildung 4: Prinzip Luftbiegen [Bys13]

- Biegeradius

An der Innenseite (innere Faser) des Versuchsmaterials wird der Werkstoff gestaucht, an der Außenseite (äußere Faser) gedehnt. Zwischen diesen beiden Fasern liegt die ungelängte Faser, oder neutrale Faser genannt, in Abbildung 6 ersichtlich. Bei großen Radien liegt die neutrale Faser in der Mitte, bei kleinen Radien verschiebt sie sich zunehmend nach innen. Die tatsächliche Lage der neutralen Faser ist abhängig vom Biegeradius r , von der Blechdicke s und vom Material. Beim Freibiegen kann die neutrale Faser also nicht als geometrisch bestimmt angesehen werden. [Sie15] Auf die Gestalt der Biegelinie wird beim Freibiegen ohne definierte Form kein Wert gelegt, sobald jedoch eine Zuschnittslänge benötigt wird, muss die Gestalt der Biegelinie bekannt sein. Grafische und mathematische Modelle verschaffen hierbei Abhilfe. [Kur90]

Da die Zielgeometrie beim Freibiegen im Gegensatz zum Prägebiegen nur indirekt von der Werkzeuggeometrie abhängt, z.B. durch Stempelradius, Gesenkweite, etc., stellt sich in der Umformzone kein geometrisch bestimmter Radius ein, sondern ein sogenannter Krümmungsverlauf. Vielfach wird in der Literatur der „Bereich der kleinsten Krümmung“ als Biegeradius r_1 (innerer Werkstückradius), siehe Abbildung 5, definiert. [Tru96] Eine Unterschreitung des kleinstzulässigen Biegeradius ist nicht zulässig, da sonst Quetschfalten oder Haarrisse entstehen können. Siehe Abbildung 7.

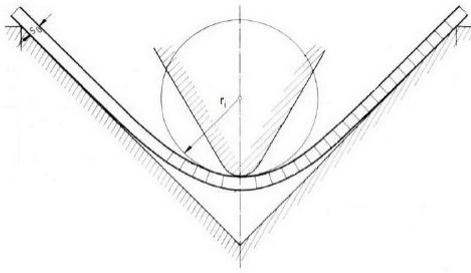


Abbildung 5: Verlauf des Krümmungsradius
[Kur90]

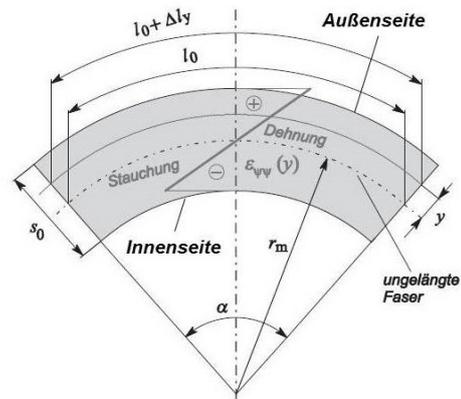


Abbildung 6: Spannungen im gebogenen Blech
[Sie15]

Die am stärksten gelängte Faser am äußeren Biegeradius ist grundsätzlich jene Zone, wo Haarrisse am wahrscheinlichsten auftreten, sobald der Mindestbiegeradius unterschritten wird. Dieser (Haar-)Rissbildung geht stets eine Aufrauung der Oberfläche voran, hervorgerufen durch die große Formänderung. Eine erhebliche Schwächung des Materials in diesen Zonen ist die Folge. Rissbildung ist somit die Folge zu großer Formänderung in den Biegeschenkeln. [Tru96]

Der kleinstzulässige Biegeradius ist abhängig vom Material, von der Walzrichtung des Blechs und von der Umformgeschwindigkeit. Somit lassen sich weichere Materialien wie Kupfer mit geringeren Radien biegen als harte bzw. spröde Materialien. Sind Werkstoffdaten unbekannt, kann die Faustregel, dass der Mindestbiegeradius größer als die Blechdicke gewählt werden soll, zu Hilfe genommen werden. [Tru96]



Abbildung 7: Links: Haarrisse an Bauteilaußenseite; Rechts: Quetschfalten an Bauteilinnenseite
[Tru96]

- Rückfederung

Eine weitere typische Erscheinung bei Umformprozessen, d.h. auch bei Freibiegeprozessen, ist der elastische Rückfederungseffekt. Nach Wegnahme der Biegekraft am Werkstück federt ein plastisch verformtes Biegebauteil an den Randzonen, den Zonen der elastischen Verformung, um einen bestimmten Winkel $\Delta\alpha$ zurück. Vergleiche Abbildung 8. Somit ist nach Entlastung der innere Winkel des Biegebauteils größer als unter Belastung. Bestimmt wird die Rückfederung vor allem durch Werkstoffeigenschaften, also durch Elastizitätsmodul, Streckgrenze, etc., sowie eventuellen Vorverformungen. Bei erreichter Eintauchtiefe wird das Verhältnis der Biegewinkel als Rückfederungsverhältnis K bezeichnet. Siehe Formel 1 und Abbildung 8. [Sie15]

Wird K durch Versuche ermittelt, kann man dadurch leicht auf den Rückfederungswinkel zurückrechnen. [Kur90]

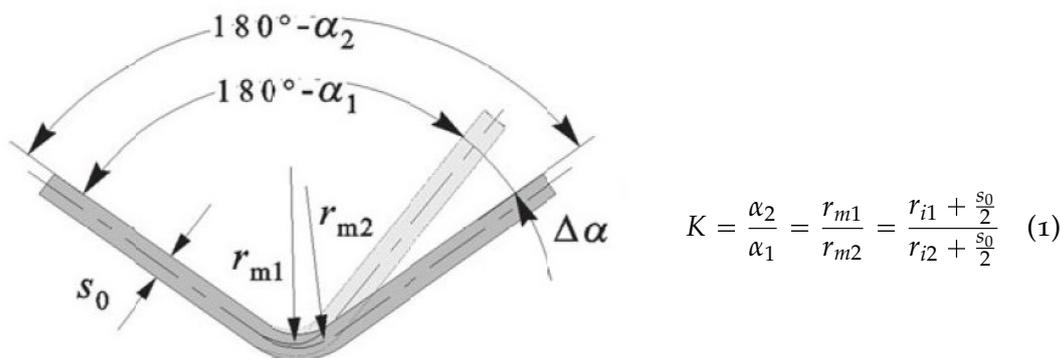


Abbildung 8: Definition Rückfederung [Sie15]

Werte für das Rückfederungsverhältnis K können aus verschiedenen Diagrammen und Tabellen entnommen werden. In Abbildung 9 sind beispielhaft einige Werte für K dargestellt. Grau hinterlegte Bereiche repräsentieren jeweils eine Werkstoffgruppe, einzelne Kurven beschreiben das Verhalten von genau einem Werkstoff. Bewegt man sich auf der Kurve eines bestimmten Werkstoffes, wie in Punkt 1 dargestellt, von rechts unten nach links oben, so sinkt das Radius-Dicken-Verhältnis. Dies ist gleichbedeutend mit einem stärker gekrümmten Biegebereich. Der K -Wert nimmt also zu und somit sinkt die Rückfederung.

Bewegt man sich wie in Punkt 2 dargestellt innerhalb einer Werkstoffgruppe, so ver-

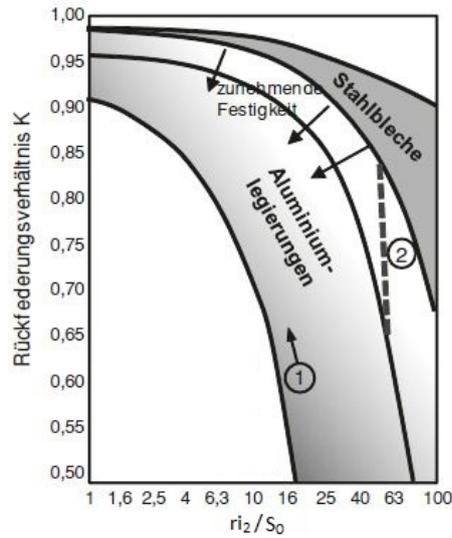


Abbildung 9: Rückfederungsverhältnis K in Abhängigkeit vom auf die Blechdicke s_0 bezogenen Biegeradius r_i [BHS13]

laufen die Werkstoffkurven mit zunehmender Festigkeit auf geringerem Niveau. Das heißt, dass bei gleichen geometrischen Voraussetzungen (Verhältnis r_{i2} zu s_0), der K -Wert abnimmt und dadurch die Rückfederung zunimmt.

- Verkürzung

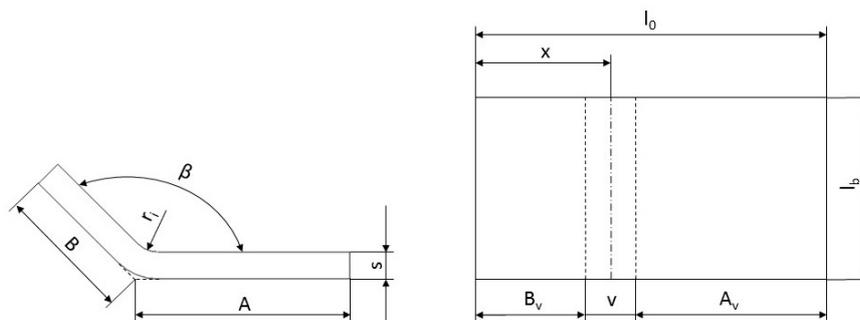


Abbildung 10: Berechnungsgrundlage der gestreckten Länge

Für die Zuschnittsermittlung ist es notwendig, die gestreckte Länge l_0 des Werkstückes zu ermitteln. Die gestreckte Länge entspricht der Länge der ungelängten Faser. Da die Lage der ungelängten Faser nicht exakt vorhersagbar ist, gestaltet sich die Bestimmung der gestreckten Länge schwierig. Die meist verwendete Berechnungsmetho-

de zur Ermittlung der gestreckten Länge l_0 ist in Formel 2 dargestellt. Alle notwendigen Größen sind in Abbildung 10 dargestellt.

$$l_0 = A + B + v \tag{2}$$

Demnach errechnet sich die gestreckte Länge aus der Summe der beiden Schenkellängen A und B und der Biegeverkürzung v. Die Biegeverkürzung v ist abhängig vom verwendeten Werkstückmaterial und kann mit nachfolgenden Formeln laut DIN 6935 ermittelt werden. [Deu] Für einen Öffnungswinkel von 0 Grad bis 90 Grad gilt:

$$v = \pi * \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ}\right) * \left(r_i + \frac{s}{2} * k\right) - 2 * (r_i + s) \tag{3}$$

Für einen Öffnungswinkel von 90 Grad bis 165 Grad gilt:

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

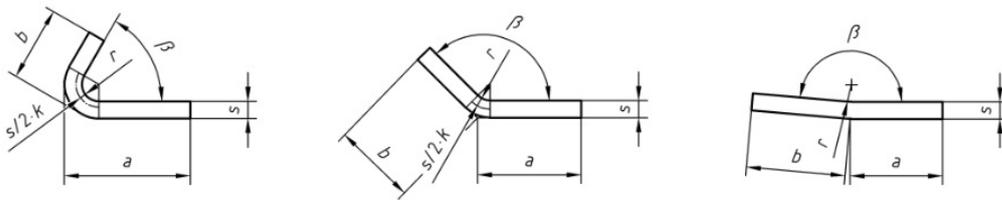


Abbildung 11: Berechnung der gestreckten Länge mittels Verkürzung; Links: Öffnungswinkel von 0 Grad bis 90 Grad, Mitte: Öffnungswinkel von 90 Grad bis 165 Grad, Rechts: Öffnungswinkel größer 165 Grad [Deu]

Ist der Öffnungswinkel größer als 165 Grad wird die Biegeverkürzung als Null angenommen. Vergleiche dazu Abbildung 11.

Mittels Korrekturfaktor k wird die Abweichung der Lage der neutralen Faser zur Blechmitte $s/2$ angegeben. Dieser errechnet sich aus Formel 5 für Baustähle und allgemeine Stähle des Maschinenbaus. Überschreitet das Verhältnis r_i/s den Wert 5, ist für der Korrekturwert k der Wert 1 zu setzen.

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} \log \frac{r_i}{s} \tag{5}$$

- Definition Biegelinie

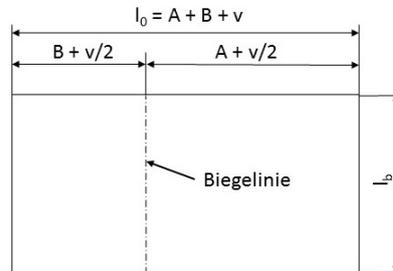


Abbildung 12: Lage der Biegelinie

Als Biegelinie wird jene Stelle des Blechzuschnittes definiert, an der der Blechzuschnitt gebogen werden soll. Dort befindet sich die Mitte des Biegeradius r_i , welche durch den Biegestempel erzeugt wird. In Abbildung 12 ist diese als strich-punktierte Linie dargestellt. Die Lage der Biegelinie wird bestimmt durch die anliegenden Schenkellängen A und B unter Berücksichtigung der halben Verkürzung v . Die Länge der Biegelinie wird mit l_b angegeben. [Deu] Mittels Positionierung des Hinteranschlages wird die Lage der Biegelinie auf der Abkantpresse definiert. Die einzustellende Größe x entspricht der Länge $A + v/2$ bzw. $B + v/2$, je nachdem welcher Schenkel für die Positionierung herangezogen wird.

2.3 BIEGEBauteile UND BRANCHEN

Biegebauteile, hergestellt durch den Prozess Freibiegen, finden in vielen Branchen Anwendung. Neben dem Fertigungsverfahren Tiefziehen zählt das Fertigungsverfahren Biegen in der Blechbearbeitung zu den Wichtigsten. Zu den aktuellen Einsatzgebieten zählen neben der Massenproduktionen kleinerer Bauteile in der Elektro-, Automobil- und Lebensmittelindustrie auch Einzelfertigungen für den Kessel-, Behälter- und Schiffsbau. Durch die einfache und kostengünstige Herstellung werden Biegeteile zudem vermehrt im Automaten-, Flugzeug-, Fahrzeug- und Personenbeförderungsbau eingesetzt. In den meisten Fällen werden L- oder U-förmige Profile gebogen.

Beispiele einiger Realbiegebauteile, welche heutzutage zum Einsatz kommen, sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 zu sehen.

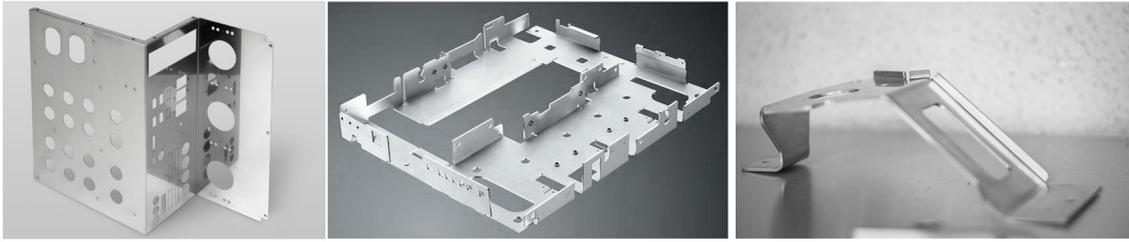


Abbildung 13: Musterbauteile hergestellt mittels Biegeumformung [EVN16]

Abdeckungen für Gehäuse, Verteilerschränke, Führungseinrichtungen, Personenkabinen in Aufzugsanlagen, aber auch Beförderungshilfen für die Medizintechnik, stellen mögliche Realbiegebauteile dar.



Abbildung 14: Links: Gehäuse Schaltschrank; Mitte: Führungseinrichtung; Rechts: Beförderungshilfe [KM 16]

Zu den erwähnten Standardanwendungen kommen weitere Einsatzmöglichkeiten, wie etwa die Möglichkeit, diverse Bauteile oder Baugruppen durch funktionelle Biegebauteile zu ersetzen, hinzu. Dies hat den Vorteil, dass der Aufwand in der Herstellung und Zusammenstellung der Baugruppe reduziert und die Wirtschaftlichkeit erhöht wird. Veranschaulicht wird dies am Beispiel eines konventionellen Seitenaufprallträgers eines PKWs. Statt der Herstellung eines teuren Ziehwerkzeuges ist es möglich, die Geometrie des Seitenaufprallträgers mittels einfacher, aufeinanderfolgender Biegeumformungen herzustellen. Siehe Abbildung 15 und 16. Die günstigere Herstellung solcher Bauteile bei gleichen Formänderungseigenschaften und kleinen Stückzahlen unterstreichen den Stellenwert dieses Einsatzgebietes. [Dip16]



Abbildung 15: Konventionell hergestellter Seitenaufprallträger eines PKWs



Abbildung 16: Seitenaufprallträger eines PKWs hergestellt durch aufeinanderfolgende Biegeumformungen

2.4 WERKZEUGTECHNIK BEIM FREIBIEGEN

Ein Werkzeugsatz für das Freibiegen besteht aus der Werkstückauflage, dem sogenannten Biegegesenk und einem Biegestempel (vergleiche Abbildung 3), aufgrund der räumlichen Anordnung in weiterer Folge als Unter- und Oberwerkzeug bezeichnet. Eingesetzt werden sowohl Einzelgesenke, meist in der Länge von 100 mm, sowie die Zusammenführung mehrerer Einzelgesenke zu Blockgesenken. Die Wirkflächen dieser mechanischen Präzisionsteile müssen, um den hohen Beanspruchungen Stand zu halten, einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Eine Unterteilung dieser Werkzeuge erfolgt in Standardwerkzeuge und Sonderwerkzeuge.

2.4.1 Standardwerkzeuge

Der am häufigsten eingesetzte Werkzeugsatz besteht aus einer Kombination einer starren Matrize und einem geraden Biegestempel, siehe Abbildung 17. Der Biegestempel ist für die Kraftübertragung auf das Bauteil verantwortlich. Die Matrize wird in verschiedenen Längen mit einer V-förmigen Gesenköffnung und diskreten Abstufungen zu bestimmten Gesenkweiten ausgeführt. Die Parameter Öffnungswinkel, Gesenkweite w und Einzugsradius r , stellen die wichtigsten Unterwerkzeugdaten dar. Die Gestaltung des Öffnungswinkels beeinflusst den maximal erreichbaren Biegewinkel α , die Gesenkweite bestimmt Werkstückgeometrieparameter wie den Biegeradius. Zudem besteht die Matrize aus einer Einrichtung zum Fixieren und Positionieren in der Abkantpresse nach dem Feder-Nut-Prinzip. Beim Biegestempel variiert der Stempelradius r_{St} . Aufgrund der einfachen Ausführung und den damit verbundenen geringen Anschaffungskosten, sowie der hohen Steifigkeit wird dieser Werkzeugsatz weitläufig eingesetzt. Nachteilig muss jedoch der hohe Werkzeug- und Lagerbedarf erwähnt werden, da für jede Gesenkweite eine eigene Matrize benötigt wird. [Hos92]

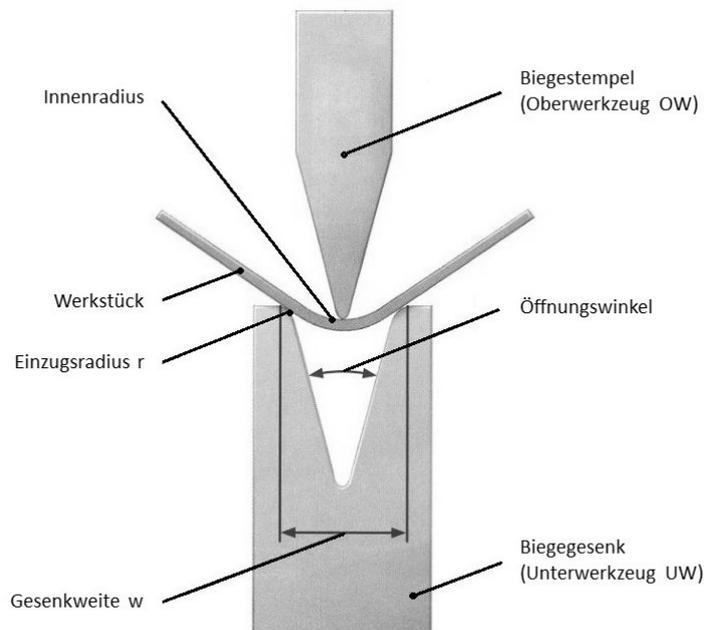


Abbildung 17: Beschreibung eines Werkzeuges beim Freibiegen [Tru11]

2.4.2 Gesenkweitenverstellbare Sonderwerkzeuge

Mit Hilfe von Standardwerkzeugen lässt sich ein breites Spektrum von Anwendungsfällen abdecken. Reichen diese für bestimmte Fälle nicht aus, werden herstellereigene Sonderwerkzeuge eingesetzt. Diese Werkzeuge verfolgen das Ziel, verschiedene Arbeitsschritte einfacher zu gestalten, um in vertretbarem Zeit-, Material- und Personenaufwand zur gewünschten Geometrie zu gelangen. Obwohl die Vorteile solcher Werkzeuge überwiegen, ist eine Kosten-Nutzen-Analyse unumgänglich, da diese Werkzeuge im Vergleich zu Standardwerkzeugen in ihrer Anschaffung sehr teuer und Lieferzeiten meistens lang sind. [Tru96]

Nachfolgend wird nur auf die gesenkweitenverstellbaren Sonderwerkzeuge eingegangen, welche eine Untergruppe der Sonderwerkzeuge darstellen.

Diese Gesenkweitenverstellbaren Sonderwerkzeuge dienen dafür, einen breiten Gesenkweitenbereich mit einem Werkzeug abzudecken. Dies hat den Vorteil, dass man nicht für jede Gesenkweite eine eigene Matrize benötigt, sondern an einem Werkzeug, anhand unterschiedlicher Modifikationen, die gewünschte Gesenkweite einstellen kann. Zudem wird Lagerplatzbedarf und Rüstaufwand reduziert, sowie die Wirtschaftlichkeit des Biegeprozesses gesteigert. [Tru11]

Charakteristisch für ein gesenkweitenverstellbares Werkzeug sind die im Gegensatz zu Standardwerkzeugen getrennten Gesenkhälften, durch deren Verstellung die gewünschte Gesenkweite eingestellt werden kann. Am Markt sind drei Hauptverstellmöglichkeiten von Sonderwerkzeugen verfügbar.

2.4.2.1 Verstellung durch Einlegeleisten

Die Ausgangsstellung stellt hierbei die größte verwendbare Gesenkweite dar. Durch Einlegen verschieden dicker Leisten, kann die Gesenkweite diskret bis zur minimal möglichen Gesenkweite verändert werden. Einsatzgebiete solcher Werkzeuge finden sich zumeist bei großen Blechdicken und großen Gesenkweiten. Der Vorteil dieser Ausführung besteht darin, dass die Einlegeleisten einfach getauscht werden können und es sich um eine kompakte Bauweise handelt. Zudem sind diese Werkzeuge billiger, als vergleichbare automatisch verstellbare Werkzeuge. Nachteilig ist zu erwähnen, dass eine automatische Verstellung bei dieser Ausführung nicht möglich ist. Benötigt man zusätzlich eine Gesenkweite die nicht üblich ist, also zum Beispiel eine Gesenkweite auf ein oder zwei Nachkommastellen, ist diese mit Einlegeleisten nur schwer zu realisieren. Dazu werden viele Einlegeleisten mit geringen Abstufungen benötigt, welche

den Lagerplatzbedarf erhöhen.

UKB (Uwe Krumm Burbach) Matrizen mit Einlaufwellen werden für Gesenkweiten von 25-125 mm, 65-185 mm, 120-300 mm und 150-400 mm angeboten. Rüstzeiten sollen durch den einfachen Austausch dieser Leisten minimiert werden. Durch die mitdrehenden, gehärteten Einlaufwellen werden Abdrücke am Werkstück vermieden, sowie die erforderliche Presskraft, im Vergleich zu Werkzeugen ohne Einlaufwellen, gesenkt. Siehe Abbildung 18. Wie man anhand der erhältlichen Gesenkweiten sehen kann, ist dieses Werkzeug nur für relativ große Blechdicken geeignet. [UKB]

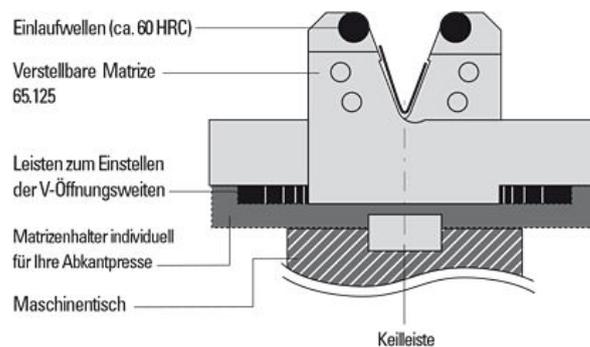


Abbildung 18: UKB (Uwe Krumm Burbach) Matrize [UKB]

Eine weitere Ausführungsmöglichkeit der UKB Matrize ist die „verstellbare UKB-Matrize mit drehbaren Biegewangen“, vergleiche Abbildung 19, welche durch den Einsatz der Einlegeleisten Gesenkweiten in 5 mm Schritten von 40-100 mm realisiert. Vorteil dieser Ausführung ist, dass die Flächenpressung zwischen Werkstück und Werkzeug dadurch verringert wird, da stets die flächenförmigen Matrizenelemente am Werkstück anliegen. Bei Feinblechen mit behandelter Oberfläche lassen sich somit Gleitspuren auf der Werkstückoberfläche vermeiden. [Acc16]

Ähnlich den UKB-Matrizen finden sich weitere Ausführungen von Werkzeugen, die mittels Einlegeleisten verstellt werden. Das Funktionsprinzip bleibt dasselbe, jedoch variiert der Verstellbereich. Beispielfhaft wird das Werkzeug „EHT VarioV manuell Tool“, siehe Abbildung 20 links, dargestellt. Durch eine Adaptierung eines Antriebsmotors ist es möglich dieses Werkzeug automatisch zu verstellen (EHT VarioV CNC Tool), allerdings ist dies nur in Abstufungen von 10 mm möglich, siehe Abbildung 20 rechts. Somit kann nicht von einer automatischen, stufenlosen Verstellung ausgegangen werden. Gesenkweiten ab 50 mm werden mit den EHT Werkzeugen realisiert.

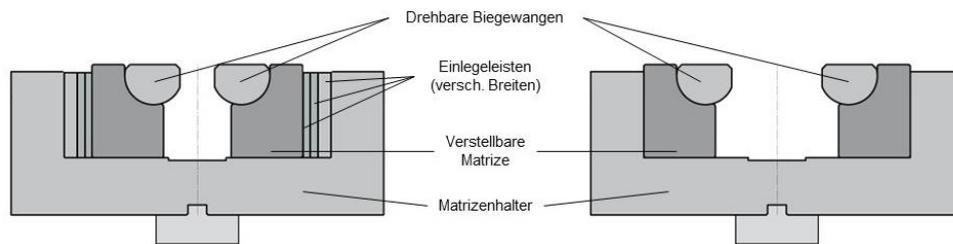


Abbildung 19: Links: UKB-Matrize mit Einlegeleisten; Rechts: UKB-Matrize ohne Einlegeleisten [UKB]



Abbildung 20: Werkzeuge von EHT - links: EHT Vario manuell Tool; rechts: EHT Vario CNC Tool [Tru16]

2.4.2.2 Verstellung durch Verwendung des Keilprinzips

Die Einstellung der Gesenkweite wird grundsätzlich durch ein Keilsystem realisiert, welches zumeist mit einer selbsthemmenden Spindel bzw. einer Einstellschraube über eine Verbindung zum Schrittmotor angetrieben wird, ersichtlich in Abbildung 21.

Wird die Einstellschraube hineingedreht, bewegt sich das Führungselement mit schräg angeordneten Ausnehmungen (Keilprinzip) in das Werkzeug hinein und verschiebt die verstellbaren Matrizen aus der Werkzeugmitte voneinander weg. Eine Zunahme der Gesenkweite ist die Folge. Wird im Gegensatz dazu die Einstellschraube herausgedreht, wird das Führungselement aus dem Werkzeug geführt. Die Gesenkweite wird dadurch verkleinert. Eine stufenlose Einstellung der Gesenkweite ist mit diesem Werkzeugsystem realisierbar. Ein mögliches universelles Werkzeugsystem ist in Abbildung 22 dargestellt. [Hos92]

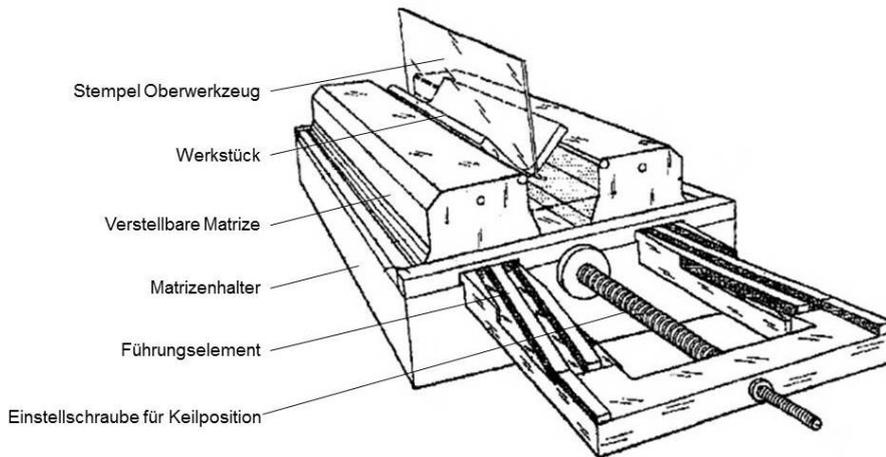


Abbildung 21: Einstellung der Gesenkweite mittels Keilprinzip und Einstellschraube [Pri92]

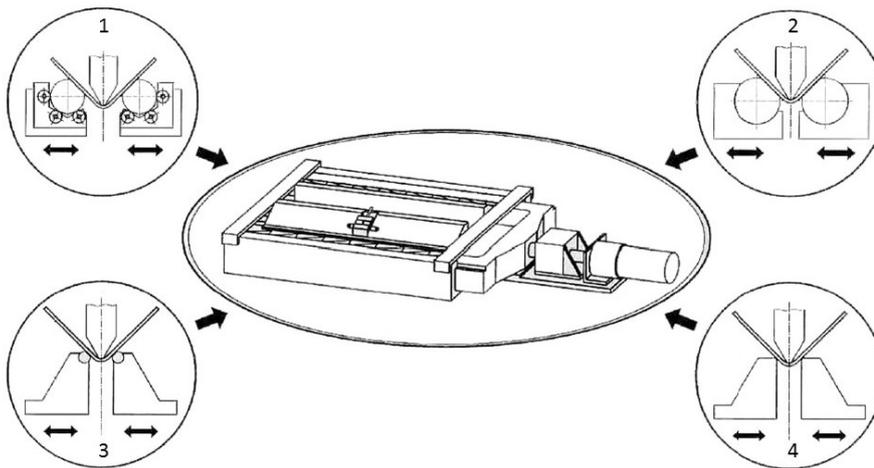


Abbildung 22: Universelles Werkzeugsystem mit unterschiedlichen Adaptierungsmöglichkeiten [Pri92]

Dieses universelle Werkzeugsystem ist für unterschiedliche Verfahren des Freibiegens geeignet. Das Werkzeugsystem besteht aus der Verstelleinheit um die Gesenkweite stufenlos zu verstellen, auf der es die Adaptionmöglichkeit für verschiedene Gesenkelemente bzw. -aufsätze gibt. Schematisch werden darin bereits vorhandene Werkzeugtypen für das Freibiegen von Feiblechen als Adaptionmöglichkeiten abgebildet. Bild 1 und Bild 2 in Abbildung 22 zeigen das flexible Freibiegen mit drehbar

gelagerten Gesenkelementen. Hier werden anstatt des V-Gesenkes zwei drehbar gelagerte, nach oben hin abgeflachte Walzen als Unterwerkzeuge eingesetzt. (Vergleiche „verstellbare UKB-Matrize mit drehbaren Biegewangen“) Vorteil dieser Ausführung ist das abdruckarme Biegen an empfindlichen, oberflächenbehandelten Feinblechen. Bild 3 und Bild 4 in Abbildung 22 zeigen adaptierbare V-Gesenke mit und ohne Einlaufwellen. Diese Systemvariante der variablen Gesenkweitenverstellung bietet einen Verstellbereich von 5-45 mm und eine Nutzlänge von 500 mm. Die Verstellung wird über ein Keilsystem realisiert, welches wiederum über Spindel und Elektromotor angetrieben wird. [Pri92]

2.4.2.3 Verstellung durch Verzahnung in diskreten Abstufungen



Abbildung 23: Verstellung der Biegebacken mittels Verzahnungen in diskreten Abstufungen [Acc16]

Ein weiteres Konzept zur Verstellung der Gesenkweite zeigt Abbildung 23. Bei diesem Werkzeug der nordamerikanischen Firma Accurpress werden die Biegebacken mittels Verzahnungen in diskreten Abstufungen in den Grundkörper gesteckt und mit Hilfe von Schrauben fixiert. Angeboten werden diese Werkzeuge, je nach Gebrauch und Anwendungsfall, in verschiedenen Größen, ab einer Gesenkweite von einem Zoll. Eine Modifikation dieses Bautyps ist als halbautomatische Verstellung mittels Kurbeltrieb erhältlich. Eine stufenlose Verstellung der Gesenkweite über weite Bereiche ist mit diesem Werkzeug jedoch nicht möglich, da durch die Kurbelverstellung die Grenzen bereits nach einigen Millimetern Verstellung erreicht sind. Ein weiterer Nachteil ist die massige Bauweise, wodurch der Rüstaufwand erhöht wird.[Acc16]

2.4.2.4 Verstellung durch Spindeltrieb

Abbildung 24 zeigt ein Werkzeugkonzept der Firma WILA, welches anhand eines CNC Antriebsmotors eine stufenlose Verstellung der Gesenkweite von 6 - 51 mm ermöglicht. Wahlweise ist eine Verstellung mittels Handkurbel und digitalem Zähler zur Einstellung der gewünschten Gesenkweite möglich. Dieses Konzept beruht auf dem Schraubstockprinzip, bei welchem durch Drehung der Gewindespindel die beweglich geführten Gesenkbacken geöffnet oder geschlossen werden und somit die gewünschte Gesenkweite eingestellt wird. Aufgrund der geringen Steigung in der Gewindespindel ist der Verstellvorgang verhältnismäßig langsam. Dadurch ist dieses Werkzeug für Serienfertigungen eher ungeeignet. Als Vorteil ist jedoch der geringe Rüstaufwand, die Verstellgenauigkeit sowie die Steifigkeit zu nennen. [WIL16]

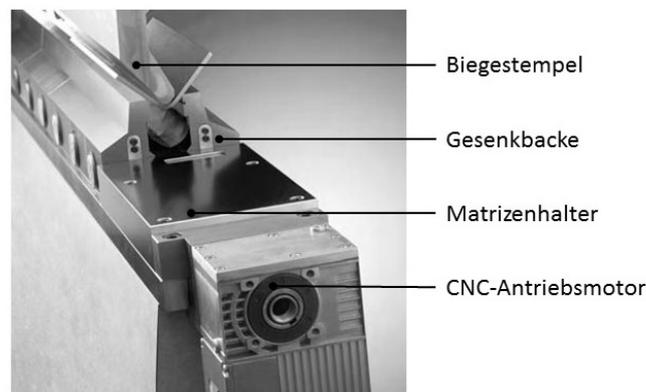


Abbildung 24: Wila-Werkzeug, Verstellung mittels Spindeltrieb über Elektromotor [WIL16]

2.4.2.5 Zusammenfassung der gesenkweitenverstellbaren Biegewerkzeuge

Eine allgemeine Zusammenfassung der am Markt verfügbaren gesenkweitenverstellbaren Werkzeuge ist in Tabelle 1 dargestellt. Diese weisen vorwiegend diskrete Verstellmöglichkeiten auf. Die Verstellung wird mittels eigener Einlegeteile realisiert, wobei solche Werkzeuge meistens für große Blechdicken und Gesenkweiten ausgeführt werden. Weiter finden sich stufenlos verstellbare Biegewerkzeuge, welche auf dem Spindel- bzw. Keilprinzip beruhen. Bei diesen Werkzeugkonzepten wird die Verstellung nur chargenweise realisiert, wobei für die Verstellung zusätzliche Antriebseinheiten benötigt werden. Die Ansteuerung dieser Verstellantriebe und somit die Einstellung der Gesenkweite erfolgt dem Umformprozess vorangestellt. Neben dieser ineffizienten Aus-

lastung der Werkzeuge hinsichtlich Gesenkweitenverstellung scheinen zusätzliche Probleme bzw. Negativeigenschaften auf, wie bedingte Prozessflexibilität, unzureichende Verstellgenauigkeit, lange Verstellzeiten und hoher Rüstaufwand auf. Weitere Eigenschaften wie Lagerplatzbedarf oder Wartungs- und Reinigungsaufwand werden durch vorangegangene Probleme negativ beeinflusst. Die Notwendigkeit, ein flexibles Werkzeugsystem zu entwickeln, welches die genannten Nachteile weitestgehend eliminiert, gilt es voranzutreiben. Die Gesenkweiteneinstellung, als eine im Biegeprozess stattfindende Eigenschaft, hätte nicht nur eine Entlastung des Bedieners zur Folge, sondern würde zudem die Maschinen- und Werkzeugauslastung positiv beeinflussen und neue Anwendungsgebiete für das Freibiegen schaffen. Durch die Einsparung zusätzlicher Antriebe für die Verstellung ist es außerdem möglich, vergleichsweise günstigere gesenkweitenverstellbare Biegewerkzeuge herzustellen.

<i>Werkzeug</i>	<i>Gesenkweite</i>	<i>Verstellung</i>	<i>Anmerkung</i>
UKB-Matrize	25-125mm 65-185mm 120-300mm 150-400mm	Einlegeleisten	inkl. Einlaufrolle und drehbaren Biegewangen
EHT VarioV manuell	> 50mm	Einlegeleisten	erf. Tischdicke mind. 110mm
EHT VarioV CNC	> 50mm	Grobeinstellung über Einlegeleisten, danach autom. Verstellung	Automatische Verstellung nur in Abstufungen von 10mm
Schraubstock mit Keilverstellung	5 - 45mm	Keilprinzip	mittels Einstellschraube wird Führungselement mit Ausnehmungen (Keile) in Werkzeug bzw. aus Werkzeug bewegt und die Gesenkweite verkleinert bzw. vergrößert
Accurpress Adjustable Die	1"-8"; 1"-10"; 1"-12"	Verstellung über Verzahnungen in diskreten Abstufungen	adaptierbar auf halbautomatische Verstellung mittels Kurbeltrieb und Digitalanzeige
WILA MultiV Matic	6 - 51mm	Spindelantrieb	Verstellung mittels CNC Motor - stufenlos

Tabelle 1: Zusammenfassung Gesenkweitenverstellbare Sonderwerkzeuge

ZIEL DER ARBEIT

3.1 ZIELFORMULIERUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer verstellbaren Biegematrize zur Substitution von mehreren Standardwerkzeugen beim Freibiegen. Diese verstellbare Biegematrize soll als eigenständiges, stückelbares Werkzeug in den Biegeprozess integriert werden, um eine automatische Gesenkweitenverstellung zu ermöglichen.

Vorteile der bereits bestehenden Werkzeuge sollen vereint, Nachteile weitestgehend vermieden werden. Probleme wie bedingte Verstellmöglichkeit, unzureichende Verstellgenauigkeit oder lange Rüstzeiten, welche nach derzeitigem Stand der Technik gegeben sind, sollen durch Einsatz des flexiblen Werkzeugsystems gelöst werden. Die Bestimmung der Werkzeugeigenschaften erfolgt durch Definition eines Lastenheftes, in welchem Muss-, Wunsch-, und Abgrenzungskriterien angeführt sind. Ausgehend von den geschaffenen Rahmenbedingungen durch das Lastenheft gilt es Teillösungen zu finden, welche die Funktionalität des Prototypen gewährleisten. Bei der Auslegung von Wandstärken, Profildicke, etc., erfolgt eine Orientierung an bereits bestehenden Standardwerkzeugen, siehe Abbildung 17. Die Verwendung des flexiblen Werkzeugsystems soll zur Effizienzsteigerung des gesamten Biegeprozesses beitragen.

3.2 LASTENHEFT

Innerhalb des Lastenheftes werden Rahmenbedingungen definiert, anhand derer sich die Auslegung des flexiblen Werkzeuges orientiert. Unter den Musskriterien werden Eigenschaften angeführt, welche für den Prototypen unabdingbar sind um die Zielformulierung zu erfüllen. Wunschkriterien gilt es ebenso umzusetzen, diese können jedoch unter gegebenen Bedingungen während der Konzeptausarbeitung als entbehrlich angesehen werden. Als Abgrenzungskriterien gelten jene Eigenschaften, welche vermieden bzw. umgangen werden sollen.

- Musskriterien

Die Erfüllung der Musskriterien bei der Umsetzung des Prototypen steht im Vordergrund. Alle zusätzlich angeführten Kriterien werden diesen Kriterien untergeordnet. Zu den Musskriterien zählen:

- *Integration des flexiblen Werkzeuges in den Biegeprozess*

Diese Eigenschaft ermöglicht die Eingliederung des flexiblen Werkzeuges in den Biegeprozess ohne zusätzliche Konfigurationen an bestehenden Abkantpressen.

- *Automatische Gesenkweiteneinstellung als Teil des Biegeprozess*

Die automatische Einstellung der Gesenkweite hat nicht nur eine Entlastung des Bedieners zur Folge, sondern senkt zudem die Fehleranfälligkeit in der Prozesskette durch mögliche Falscheinstellung der benötigten Gesenkweite.

- *Einsetzbarkeit des flexiblen Werkzeuges in herkömmliche Abkantpressen*

Die Geometrie des Prototypen ist so auszulegen, dass mittels Feder-Nut-Verbindung die Klemmung in herkömmlichen Abkantpressen stattfinden kann.

- *Kompakter, eigenständiger und segmentierbarer Prototyp*

Die Kompaktheit des flexiblen Werkzeugsystems soll sicherstellen, dass die Abmessungen der maximalen Breite von 100 mm und der maximalen Höhe von 135 mm nicht überschritten werden, um den Prototypen an Abkantpressen mit geringerem Bauraum einsetzen zu können. Die Definition der Länge des Prototypen erfolgt zudem so, dass über eine Segmentierung mehrerer Werkzeuge dieser Bauart größere Abkantlängen realisiert werden können. Die Werkzeuglänge wird mit 200 mm festgelegt. Innerhalb dieser Abmessungen erfolgt die konzeptionelle und fertigungstechnische Umsetzung.

- *Stufenlose Verstellung der Gesenkweite*

Aufgrund der Tatsache, dass Standardgesenke bei unterschiedlichen Gesenkweiten unterschiedliche Einzugsradien aufweisen, ist es von Vorteil eine stufenlose Verstellung zu ermöglichen, um unterschiedliche Einzugsbereiche simulieren zu können. Eine zusätzliche Erweiterung der Anwendungsgebiete durch Einstellung beliebiger, zu Standardgesenken unterschiedlichen Gesenkweiten, stellt einen positiven Nebeneffekt dar.

- *Lieferung gleicher Umformergebnisse wie durch Standardwerkzeuge*

Ein Vergleich der Umformergebnisse zwischen Standardgesenken und flexiblen Werkzeug ist vorzunehmen. Der Beweis, dass anhand des flexiblen Werkzeugsystems die

qualitativ gleichen Umformergebnisse erzielt werden können, wie mit Standardgesenkweiten, stellt neben der Funktionsüberprüfung das Primärziel der Validierung dar.

- Wunschkriterien

Innerhalb der Wunschkriterien werden Eigenschaften definiert, welche zwar entbehrlich sind, trotzdem nach Möglichkeit umgesetzt werden sollen. Dazu zählen:

- *Auslegung des Prototypen für Blechzuschnitte eines Baustahls ($R_m = 450 \text{ N/mm}^2$) mit einer Blechdicke $s = 3 \text{ mm}$ und einer Länge der Biegelinie $l = 200 \text{ mm}$ umgeformt in Gesenk mit Gesenkweite $w = 16 \text{ mm}$*

- *Abdeckung von mindestens vier Standardgesenkweiten*

Für die Werkzeugvalidierung sollen mindestens vier Standardgesenkweiten überprüft werden.

- *Möglichst geringe Verstellzeit*

Dadurch, dass die Verstellung in den Biegeprozess eingegliedert wird, erfolgt die Verstellgeschwindigkeit analog zur Umformgeschwindigkeit des Biegestempels.

- *Annähernd hohe Steifigkeit wie Standardgesenke*

Die hervorragende Eigenschaft der Steifigkeit von Standardgesenken soll nach Möglichkeit auf das flexible Werkzeugsystem übergeführt werden.

- *Möglichst geringer Rüstaufwand*

Der Rüstaufwand soll im Vergleich zu Standardwerkzeugen reduziert werden.

- *Geringe Empfindlichkeit gegen Schmutz und Verschleiß*

Geeignete Wärmebehandlungen sollen der Verschleißempfindlichkeit an den Wirkflächen entgegenwirken.

- *Geringer Wartungs- und Reinigungsaufwand*

Spezielle Schmutzabdeckungen sollen die Wartung und Reinigung minimieren.

- *Geringer Fertigungsaufwand und kostengünstige Herstellung*

Der Material- und Maschineneinsatz, welcher zur Fertigung des Prototypen notwendig ist, soll in vertretbaren Maßen gehalten werden. Die Auswahl der Einzelkomponenten des Prototypen soll möglichst kostengünstig erfolgen.

- Geringer Lagerplatzbedarf

Der Lagerplatzbedarf soll im Vergleich zu Standardwerkzeugen reduziert werden.

- Abgrenzungskriterien

Die Abgrenzungskriterien definieren jene Eigenschaften, welche bei der Umsetzung des Prototypen vermieden werden sollen. Dazu zählen:

- Keine zusätzlichen Antriebseinheiten für die Gesenkweitenverstellung

Die Einbindung der Gesenkweitenverstellung in den Biegeprozess ermöglicht die Verstellung der Gesenkweite ohne zusätzliche Antriebseinheiten.

- Keine manuelle Verstellmöglichkeit der Gesenkweite durch Bediener

Dieses Kriterium dient zur Reduktion der Fehleranfälligkeit einer möglichen Falscheinstellung der Gesenkweite. Zusätzlich wird die Sicherheit des Prozesses erhöht, da kein manueller Eingriff des Bedieners notwendig ist.

KONZEPTFINDUNG

Die Findung eines Konzeptes zur Realisierung des flexiblen Werkzeuges bildet den Kern dieses Kapitels. Als Basis dienen die definierten Eigenschaften des Lastenheftes aus Kapitel 3. Die Erfüllung der Musskriterien und die Vermeidung der Abgrenzungskriterien steht dabei im Vordergrund.

Gesenkweitenverstellmechanismen, welche an bereits bestehenden Sonderwerkzeugen Einsatz finden, fallen bei Betrachtung der zu erfüllenden Musskriterien durch. Entweder werden nur diskrete Abstufungen realisiert, oder die Gesenkweiteneinstellung erfolgt dem Umformvorgang vorangestellt. Alternative Verstellmöglichkeiten, etwa durch die Linearbewegung einer Zahnstange oder Linearmotoren, finden auf Grund der Abgrenzungskriterien keine mögliche Verwendung, da zusätzliche Antriebseinheiten benötigt werden. Es gilt daher ein neuartiges Verstellprinzip zu finden, welches Abgrenzungskriterien vermeidet und Musskriterien erfüllt.

Wird das Prinzip eines Pneumatik- bzw. Hydraulikzylinders betrachtet, so fällt auf, dass innerhalb des Hubraums jede mögliche Position des Kolbens mittels Pumpe o.ä. angesteuert werden kann. Wird dieses Prinzip so umgewandelt, dass ein geschlossenes Ölsystem entsteht, welches zwischen zwei beweglichen Kolben verschoben werden kann, lässt sich daraus ein Lösungskonzept erarbeiten, welches eine stufenlose Verstellung der Gesenkweite ermöglicht, siehe Abbildung 25.

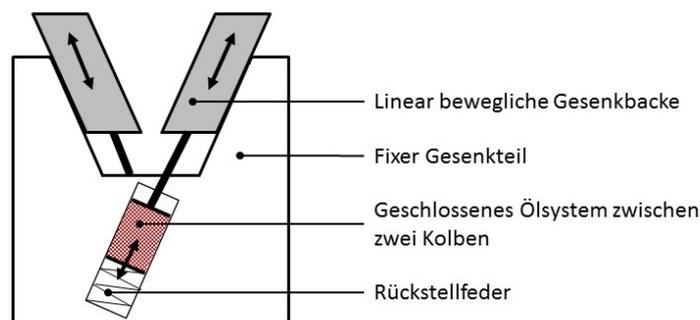


Abbildung 25: Gesenkweitenverstellung nach dem Prinzip des Hydraulikzylinders mit geschlossenem, verschiebbarem Ölkreislauf

Werden die zusätzlich benötigten Antriebseinheiten durch andere Verstellmechanismen ersetzt, wird auch das Abgrenzungskriterium zur Vermeidung von zusätzlichen Antrieben eingehalten. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung einer einfachen Rückstellfeder dar. Mit Hilfe einer von außen auf das System wirkenden Kraft wird das Ölsystem in Stauchrichtung der Feder verschoben. Nach Wegnahme der Belastung erfolgt die Rückstellung des Ölsystems durch die Federkraft. Die von außen auf das System wirkende Kraft kann dabei von der Stempelbewegung übernommen werden. Eine stufenlose Verstellmöglichkeit innerhalb definierter Grenzen ist somit gewährleistet. Die Vorschubbewegung des Biegestempels verschiebt das geschlossene Ölsystem bei eingelegtem Blechzuschnitt in eine bestimmte Richtung. Nach Umkehrung der Vorschubbewegung verschiebt die Rückstellfeder das geschlossene Ölsystem zurück in die Ausgangsstellung. Ein weiteres Musskriterium, die automatische Gesenkweitereinstellung als Teil des Biegeprozesses, ist damit erfüllt. Die Anordnung der Gesenkbacken muss so erfolgen, dass die erforderliche Gesenkweite über die von oben nach unten durchgeführte Vorschubbewegung des Biegestempels eingestellt wird. Die effektivste Möglichkeit der Verwirklichung stellt die Einstellung der Gesenkweite über eine schiefe Ebene dar, siehe Prinzipdarstellung in Abbildung 25.

Die translatorische Bewegung der linear beweglichen Gesenkbacken an den schiefen Ebenen ermöglicht die Gesenkweitenverstellung. Um eine definierte Position des geschlossenen Ölsystems nicht nur an den beiden Systemgrenzen zu gewährleisten, ist es notwendig, eine Absperrvorrichtung vorzusehen. Das mittels Biegestempel bewegte Ölsystem und die damit bewegten Gesenkbacken lassen sich so lange verschieben, bis die Absperrvorrichtung aktiviert wird und einen Teil des Ölsystems von der Rückstellfeder abtrennt, dargestellt in Abbildung 26.

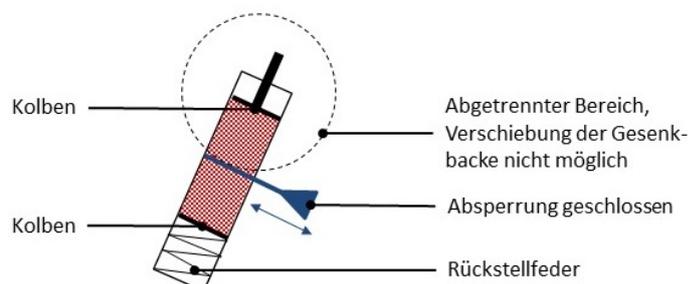


Abbildung 26: Geschlossener, verschiebbarer Ölkreislauf inklusive Absperrung

ENTWICKLUNG WERKZEUGKONZEPT

Wie bereits in Kapitel 4 - Konzeptfindung - vorgestellt, wird in diesem Kapitel ein Werkzeug entwickelt, welches eine automatische, stufenlose Verstellung der Gesenkweite ermöglicht und zudem voll in den Biegeprozess integrierbar ist. Ein Verstellbereich von mindestens 10mm wird angestrebt, um zumindest 4 Standardgesenkweiten (Wunschkriterium laut Lastenheft) durch Einsatz eines Werkzeuges abdecken zu können.

5.1 FUNKTIONSPRINZIP

Innerhalb des Hydrauliksystems erfolgt die Kraftübertragung durch eine Hydraulikflüssigkeit. Dieses Ölsystem kann zwischen zwei Kolben beliebig bewegt werden. Siehe Abbildung 25. Auf der einen Seite wird das System mit einem Kolben abgegrenzt, welcher fest mit der Gesenkbacke verbunden ist, auf der anderen Seite begrenzt ein weiterer Kolben die Hydraulikflüssigkeit, welcher an der Rückstellfeder anliegt. Vorteil des Hydraulikprinzips ist neben der hohen Kraftübertragung die sehr gleichmäßige und exakte Bewegung. Diese Eigenschaften erfüllen die Musskriterien des Lastenheftes für das flexible Werkzeugsystem aus Kapitel 3. Ein weiterer großer Vorteil dieses Prinzips ist, dass auf zusätzliche Antriebe verzichtet werden kann. Die Kolbenbewegung und somit die Verstellung der Gesenkweite wird vom Biegestempel übernommen. Über die schiefe Ebene ist es möglich, die Gesenkweite von oben nach unten zu variieren.

Ausgangsstellung des Werkzeuges ist bei maximaler Höhe und maximal möglicher Gesenkweite. Unter Belastung bewegen sich die Gesenkbacken V-förmig zu geringerer Höhe und Gesenkweite, dargestellt in Abbildung 27, Gesenkbacken mit Kennzeichnung „1“. Legt man den Blechzuschnitt (A) in das Werkzeug, kann mit Hilfe der Vorschubbewegung des Stempels (Oberwerkzeug OW) die Gesenkweite und dadurch die Werkzeughöhe variiert werden. Sobald der Stempel den Blechzuschnitt berührt, werden die linear geführten, beweglichen Gesenkbacken in das Werkzeug gedrückt und somit die Rückstellfeder gestaucht. Sobald die einzustellende Gesenkweite erreicht ist (Kennzeichnung 2 der Gesenkbacken), erfolgt eine Sperrung der Gesenkweite, damit

5.2.1 Gesenkbacken

Die Gesenkbacken erfüllen den Zweck, die für den Umformvorgang notwendige Gesenkweite zur Verfügung zu stellen. Nebenbei dienen sie als Krafteinleitung für das Hydrauliksystem. Die Kraftübertragung auf das Hydrauliksystem erfolgt über je zwei eingepresste Kolben, welche mit Kolbendichtringen versehen sind. Eine solche Gesenkbacke ist in Abbildung 28 dargestellt. Der Verfahrwinkel zur Vertikalen, auf dem die Gesenkbacken an dem fixen Gesenkteil gleiten, beträgt 20 Grad. Mit diesem Winkel ist es möglich, die Mindestverstellung von 10 mm einzuhalten und gleichzeitig die maximale Werkzeughöhe nicht zu überschreiten. Siehe dazu das Gesamtwerkzeug in Abbildung 31. Damit zudem Gesenkweiten im sehr kleinen Bereich (6 - 10 mm) möglich sind, ist es erforderlich, die beiden Biegekanten der Gesenkbacken auf diese Weite zusammenzuführen. Die konstruktive Auslegung muss daher so erfolgen, dass sich die Gesenkbacken wie bei einer Verzahnung ineinander verschieben lassen. Diese Funktion ist anhand der abgeschrägten Flächen, ersichtlich in Abbildung 28, erfüllt.

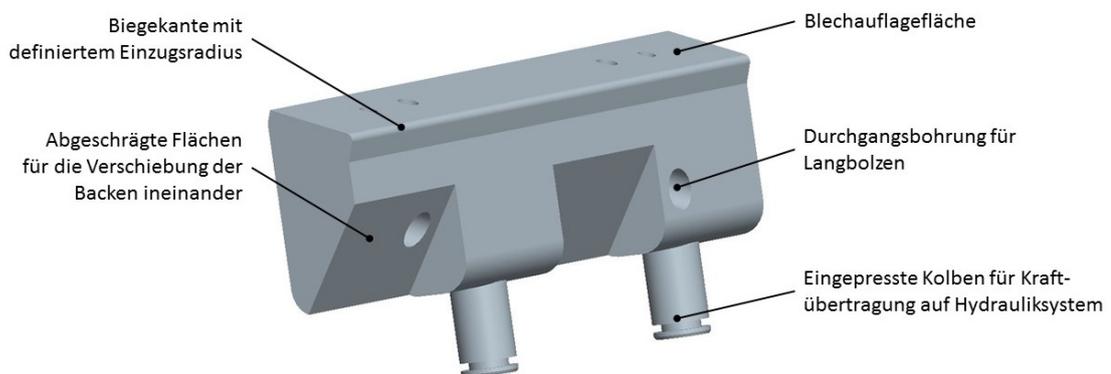


Abbildung 28: Bezüglich der Biegelinie symmetrisch ausgeführte Gesenkbacke inkl. Kolben

Zudem können auf den Gesenkbacken zusätzliche Gesenkleisten adaptiert werden, welche den Verstellbereich des Werkzeuges zu kleineren Gesenkweiten hin verschieben. Somit wird mit den adaptierten Gesenkleisten der Gesenkweitenbereich von kleinen Gesenkweiten und ohne die Gesenkleisten der Gesenkweitenbereich von großen Gesenkweiten abgedeckt. Siehe Abbildung 29. Wird mit Gesenkleisten umgeformt, wird ein Gesenkweitenbereich von 4 - 14 mm abgedeckt. Bei Umformung ohne Gesenkleisten ist ein Gesenkweitenbereich von 12 - 22 mm möglich. Für die Hinterlegung des Werkzeuges an der Abkantpresse muss jedoch die variable Werkzeughöhe berücksich-

tigt werden, da sich diese durch Adaption der Gesenkleisten ändert.

Für die synchrone Verstellung und axiale Sicherung besitzen die Gesenkbacken eine Durchgangsbohrung, in denen Langbolzen fixiert werden. Diese Langbolzen werden im fixen Gesenkteil über Langlöcher geführt. Die Fertigung der Außenkontur der Gesenkbacke erfolgt mittels Drahterodieren. Die Form und Lage der Durchgangsbohrungen für die Langbolzen werden mittels Innenrundscheifen gefertigt, die Form und Lage der Bohrungen für die Bolzen mittels Koordinatenschleifen. Dies ist aufgrund der äußerst niedrigen Fertigungstoleranzen erforderlich.

Der für die Umformung relevante Einzugsradius an der Biegekante der Gesenkbacke beträgt 2 mm. Dieser Wert wird deshalb ausgewählt, da bei Standardgesenken von 16 - 30 mm der Radius in diesem Bereich liegt. Vergleiche dazu die angegebenen Einzugsradien r_E der Standardwerkzeuge in Abbildung 33. An den aufsetzbaren Gesenkleisten wird ein Einzugsradius r_E von 1 mm gefertigt, da mit diesen Leisten ein sehr kleiner Gesenkweitenbereich abgedeckt wird und die Einzugsradien bei diesen Standardwerkzeugen im Bereich von 1 mm liegen. Vergleiche wiederum die Einzugsradien r_E aus Abbildung 33.

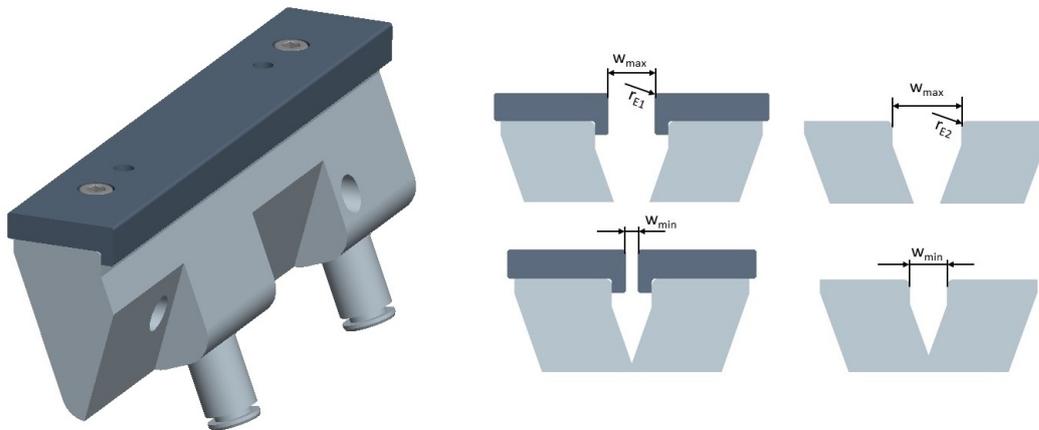


Abbildung 29: Links: Gesenkbacke mit aufschraubbarer Gesenkleiste; Rechts: Gesenkweitenverstellbereiche mit und ohne Gesenkleiste

5.2.2 fixer Gesenkteil

Der Grundkörper bzw. fixe Gesenkteil erfüllt eine Reihe von Funktionen. Neben der Gewährleistung der nötigen Stabilität der Gesenkbacken während des Umformvorganges, der Unterbringung von Hydraulikleitungen, Einschraubückschlagventil inkl. Kleinstmotor und Betätigung und des Federrückstellsystems, sowie der Führung der Gesenkbacken wird zudem noch die Klemmung des Werkzeuges auf der Abkantpresse über diesen Grundkörper realisiert. Die Ausnehmung im Grundkörper für die Gesenkbacken wird ident nach der Außenkontur der Gesenkbacken hergestellt, so dass es möglich ist, dass die Gesenkbacken an den Gleitflächen geführt werden und bei der kleinsten Gesenkweite als nahezu geschlossenes Werkzeug erscheint. Siehe dazu Abbildung 31 - Links. Bohrungen für die Gesenkbackenkolben dienen als Verbindung zum Hydrauliksystem. Siehe Abbildung 30. Diese werden ebenso wie die Bohrungen in den Gesenkbacken mittels Koordinatenschleifen hergestellt. Die Langlöcher an den Seitenwänden dienen als Führung und axiale Sicherung der Gesenkbacken.

Im unteren Teil des Werkzeuges befindet sich der Bauraum, in welchem das Leitungssystem für die Hydraulik (inkl. aller dazu notwendigen Komponenten) untergebracht ist. Die genaue Ausführung dieser Leitungen ist in Kapitel 5.5 ersichtlich.

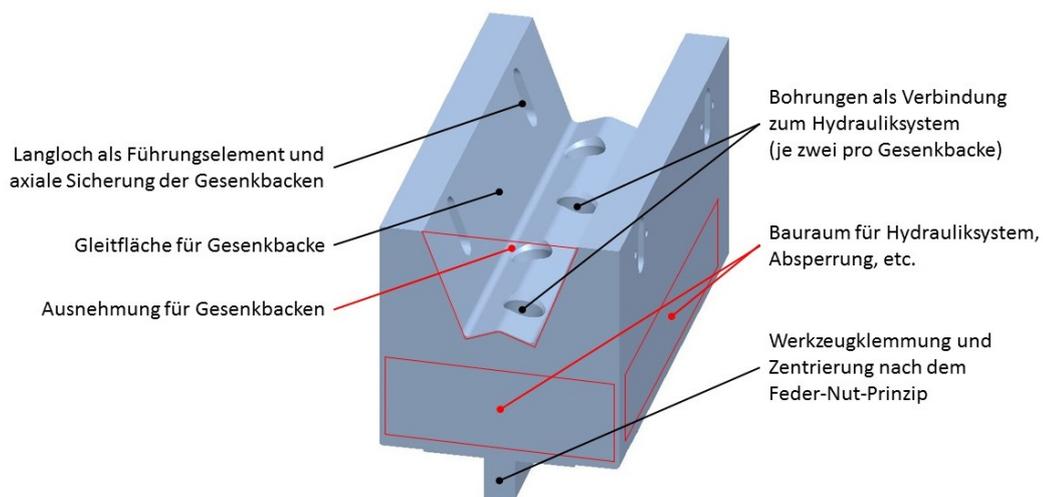


Abbildung 30: Grundkörper bzw. fixer Gesenkteil als Führungs- und Stabilisationselement der Gesenkbacken

Die Zusammenführung von Gesenkbacken und fixem Gesenkteil ist in nachstehender Abbildung 31 dargestellt. Die Gesenkbacken werden über die Kolben inkl. Kolbendichtringen (siehe Kapitel 5.5) in die dafür vorgesehenen Bohrungen des Grundkörpers geführt und mittels Langbolzen gesichert. Eine Verschiebung der Gesenkbacken inner-

halb des definierten Bereichs, laut Abbildung 31, ist somit möglich.

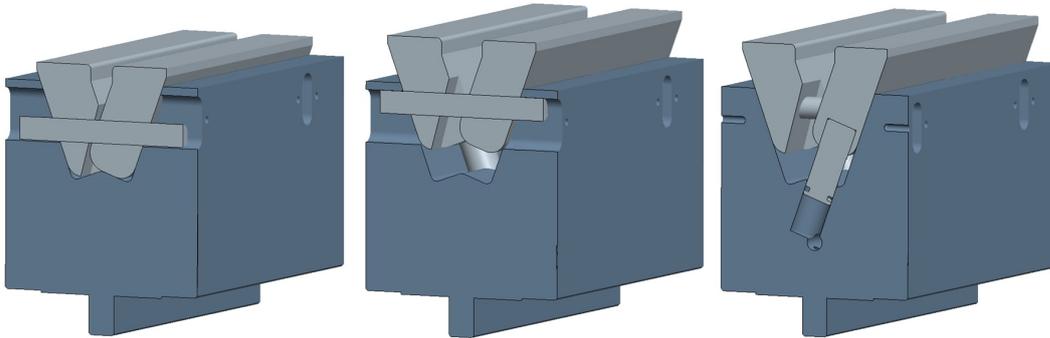


Abbildung 31: Zusammenführung Gesenkbacken und fixer Gesenkteil; Links: kleinste Gesenkweite, Gesenkbacken liegen auf Grundkörper an zwei Flächen auf; Mitte: größte Gesenkweite, Gesenkbacken werden axial durch Langbolzen gesichert, Auflage nur an Gleitflächen; Rechts: Schnitt durch Gesenkbackenkolben

5.3 PRESSKRAFT- UND DRUCKBERECHNUNG IM HYDRAULIKSYSTEM

Mit Hilfe einer Berechnung des Drucks, welcher im Hydrauliksystem des Werkzeuges auftritt, können einzelne Komponenten wie Absperrvorrichtung, Dichtungen, etc. ausgelegt werden. Dabei wird auf ein stark vereinfachtes Modell zurückgegriffen, welches als reibungsfrei angesehen wird. Durch die Annahme der Reibungsfreiheit wird die Berechnung vereinfacht, gleichzeitig aber der schlechteste Fall angenommen. Der schlechteste Fall deshalb, da alles an auftretenden Reibkräften die resultierende Kraft, welche auf das Hydrauliksystem wirkt, verringert und somit der Druck im System kleiner ist als der errechnete Druck. Reibkräfte treten im System an den Gleitflächen zwischen Gesenkbacke und fixem Gesenkteil, im Wirkmedium selber, aber auch zwischen Dichtungen und Gleitbohrungen auf.

In Abbildung 32 ist die Kräftesituation beim Freibiegen in einer allgemeinen Lage mit resultierendem Momentenverlauf dargestellt. Die Stempelkraft F_{St} bewirkt ein zur Mitte des Blechzuschnittes linear zunehmenden Momentenverlauf. Mit Hilfe der Stempelkraft ist es möglich, die Auflagekräfte an den Berührungspunkten Blech/Gesenk zu bestimmen. [Kur90]

Um über diese Auflagekräfte die Kräfte auf das Hydrauliksystem ermitteln zu können, ist es notwendig zuerst die erforderliche Presskraft zu berechnen. Die Presskraft F_{St} beim Freibiegen kann näherungsweise laut Formel (6) nach Mäkelt, Cali oder Oehler

berechnet werden. Voraussetzung für die Anwendung der Formel ist, dass $w/s \leq 10$ ist. [Ger63]

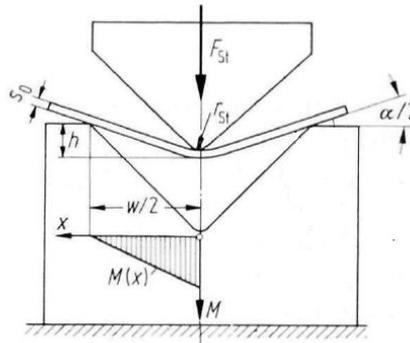


Abbildung 32: Kräftesituation beim Freibiegen in allgemeiner Lage mit resultierenden Momentenverlauf [Kur90]

$$F_{St} = \left(1 + \frac{4 * s_0}{w}\right) * R_m * b * \frac{s_0^2}{w} \quad (6)$$

Aus dieser Formel geht hervor, dass alle Variablen, bis auf die Blechstärke, linear in die Berechnung eingehen. Die Blechstärke wird quadratisch einbezogen. Die Gesenkweite wirkt indirekt proportional.

Um die Presskraft ermitteln zu können, wird eine in der Praxis gängige Blechdicken/Gesenkweiten Kombination gewählt und zusätzlich ein geeignetes Material mit bestimmter Zugfestigkeit. Für eine Blechdicke s von 3mm (siehe Wunschkriterium Lastenheft) ist eine gängige Mindestgesenkweite von 16mm zu wählen. Die kleinste zulässige Gesenkweite deshalb, da in Formel (6) die Gesenkweite im Nenner steht und dadurch bei geringerer Gesenkweite die Stempelkraft steigt. Ersichtlich sind die zulässigen Blechdicken/Gesenkweiten Kombinationen in einer Datenbanktabelle, siehe Abbildung 33. [Tru11] Die blau hinterlegten Bereiche werden als zulässige Kombinationen von Blechdicke und Gesenkweite angesehen. Für das verwendete Material wird ein Baustahlblechzuschnitt mit einer Zugfestigkeit R_m von 450 N/mm^2 gewählt. Die Länge der Biegelinie b entspricht der Länge des Werkzeuges mit 200mm.

Mit Formel (6) erhält man damit eine maximale Stempelkraft F_{St} von rund 88,594kN. Diese maximale Biegekraft tritt jedoch während des Umformvorgangs nur bei einem bestimmten Biegewinkel auf. Siehe dazu Abbildung 34.

Gesenkweite w	5	6	8	10	12	16	20	24	30
Blechdicke t_0	$r_E=0,6$	$r_E=0,6$	$r_E=1$	$r_E=1$	$r_E=1$	$r_E=1,6$	$r_E=2$	$r_E=2,5$	$r_E=3$
1									
1,5									
2									
2,5									
3									

Abbildung 33: Zulässige Blechdicken/Gesenkweiten Kombinationen (blau hinterlegt) [Tru11]

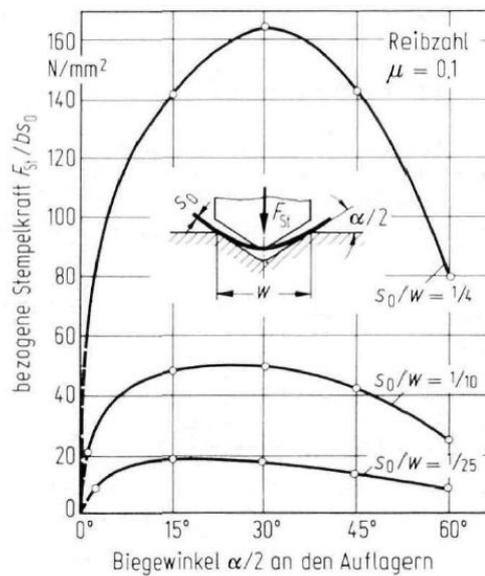


Abbildung 34: Bezogene Stempelkraft beim Freibiegen mit verschiedenen Gesenkweiten für Edelstahl [Kur90]

Daraus geht hervor, dass das Maximum der Stempelkraft abhängig vom Verhältnis s_0/w , also Blechdicke zu Gesenkweite, ist. In der Praxis wird vielfach für die Soll-gesenkweite das 4-6fache der Blechdicke vorgeschlagen. [Tru11] Dies bedeutet, dass im Diagramm aus Abbildung 34 die Kurve mit dem Verhältnis von $s_0/w = 1/4$ Verwendung findet. Das Maximum bei diesem Kraft-Biegewinkel-Verlauf befindet sich bei einem Biegewinkel von ca. 60 Grad. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass sich das Maximum der Biegekraft bei 120 Grad Öffnungswinkel des Blechzuschnittes befindet. Mit zunehmender Gesenkweite verschiebt sich das Maximum der Biegekraft zu geringeren Biegewinkeln bzw. zu größeren Öffnungswinkeln des Blechzuschnittes. Zudem sinkt dabei die maximale Stempelkraft.

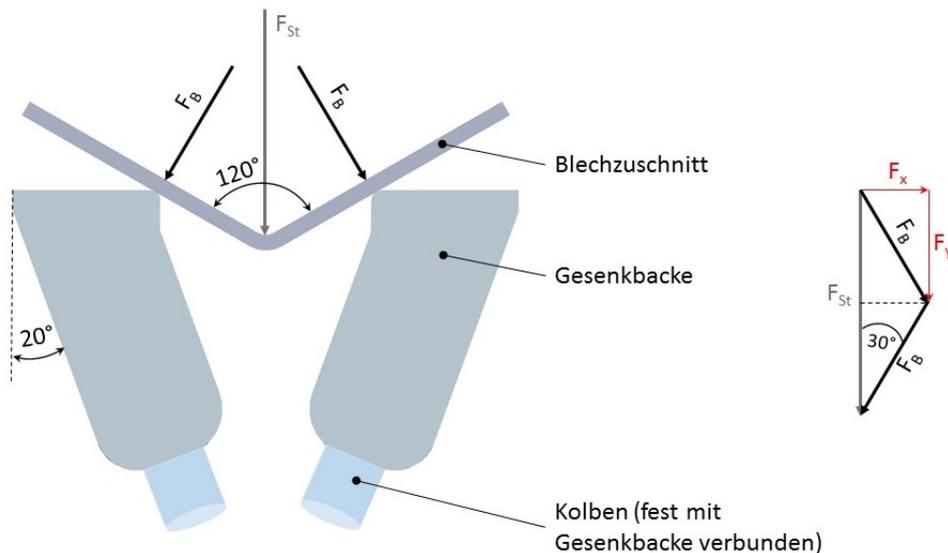


Abbildung 35: Betrachtung der Kräfte auf die Gesenkbacken (links) und Zerlegung dieser in Einzelkomponenten (rechts)

Um den Druck im Hydrauliksystem aus der Stempelkraft berechnen zu können, muss das System Biegestempel-Blechzuschnitt-Gesenkbacke hinsichtlich auftretender Kräfte analysiert werden, siehe Abbildung 35. Die Stempelkraft F_{St} teilt sich im Berührungspunkt von Blechzuschnitt und Gesenkbacken in zwei Kräfte F_B normal auf den Blechzuschnitt auf.

Aus der Geometrischen Beziehung des Krätedreiecks ergibt sich ein Angriffswinkel der Kraft F_B von 30 Grad zur Vertikalen.

$$F_B = \frac{\frac{F_{St}}{2}}{\cos(30)} = \frac{\frac{88594}{2}}{\cos(30)} = 51150 \text{ N} \quad (7)$$

Mittels lokalen x,y-Koordinatensystems wird die Kraft F_B in die Einzelkomponenten zerlegt, um die für die Druckberechnung benötigte Kraft F_P bestimmen zu können. Siehe Abbildung 36. Unter der Annahme des reibungsfreien Falles muss die Komponente F_1 von F_B gleich der Kraft sein, die für den Druck im inneren des Hydrauliksystems verantwortlich ist. Die Neigung der Gleitflächen zwischen Gesenkbacke und fixem Gesenkteil beträgt 20 Grad. Durch die vorangegangene geometrische Beziehung, dass die

Kraft F_B unter einem Winkel von 30 Grad zu Horizontalen angreift, ergibt sich folgende Beziehung laut Formel (8) für die Kraft F_1 :

$$F_1 = F_B * \cos(50) = 51150 * \cos(50) = 32878 \text{ N} \quad (8)$$

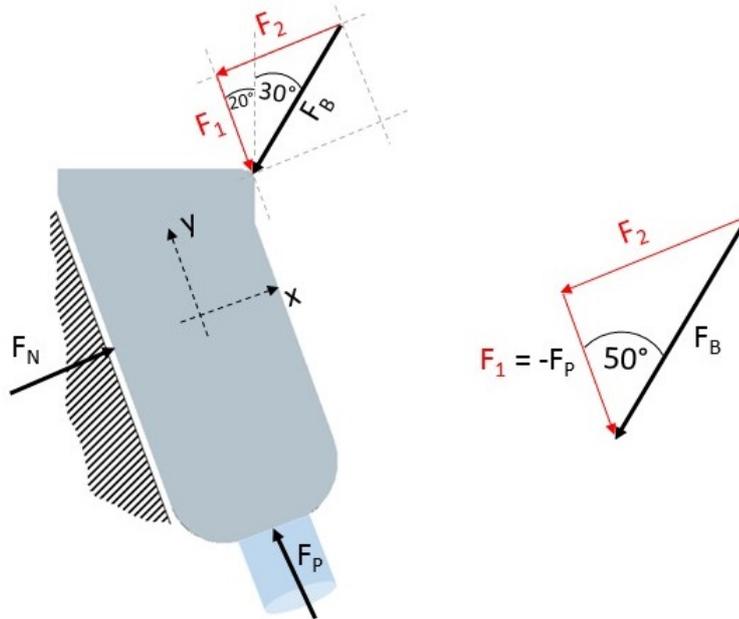


Abbildung 36: Zerlegung der auf die Gesenkbacke wirkenden Kräfte

Aus $\sum F_y = 0$ (siehe Abbildung 36) folgt, dass die auf das Hydrauliksystem wirkende Kraft F_P gleich groß wie die Kraft F_1 sein muss. Werden Zahlenwerte für in die Formeln (6)-(8) eingesetzt, erhält man für die Kraft F_1 einen Wert von 32,878kN.

Der Druck p wird allgemein als Ergebnis einer auf eine Grundfläche A wirkende Kraft F definiert. Je kleiner die Fläche, desto größer der Druck im System. Siehe Formel 9. Um das Werkzeug so kompakt wie möglich zu gestalten, den Druck im Inneren des Hydrauliksystems jedoch nicht zu hoch werden zu lassen, wurde ein Durchmesser d_1 für die Bohrungen des Hydrauliksystems von 16mm festgelegt. Pro Gesenkbacke sind zwei Kolben mit dem Hydrauliksystem verbunden.

$$p = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d_1^2 \pi}{4}} \quad (9)$$

Konkret können im Hydrauliksystem 2 verschiedene Druckbereiche auftreten. Der erste Druckbereich stellt sich bei Einstellung der Gesenkweite und geöffneter Absperrung ein. Die Verstellkraft, welche benötigt wird um die Gesenkbacken in das Werkzeug zu drücken und somit die Gesenkweite zu verkleinern, wird vereinfacht durch die Federkraft der Rückstellfeder und die Gewichtskraft der Gesenkbacken bestimmt. Die Federkraft nimmt dabei mit zunehmender Stauchung linear zu. Siehe Abbildung 37 - links.

Der zweite Druckbereich stellt sich nach Absperrung des Hydrauliksystems ein. Sobald die erforderliche Gesenkweite erreicht ist, wird die Verriegelung betätigt und das Hydrauliksystem in zwei Teile, Druckbereich eins und Druckbereich zwei, aufgeteilt. Druckbereich eins befindet sich zwischen Rückstellkolben und der Absperrung und ist, solange die Absperrung aufrechterhalten bleibt, konstant. Druckbereich zwei liegt zwischen Absperrung und dem linear beweglichen Führungskolben der Gesenkbacken. Siehe Abbildung 37 - rechts.

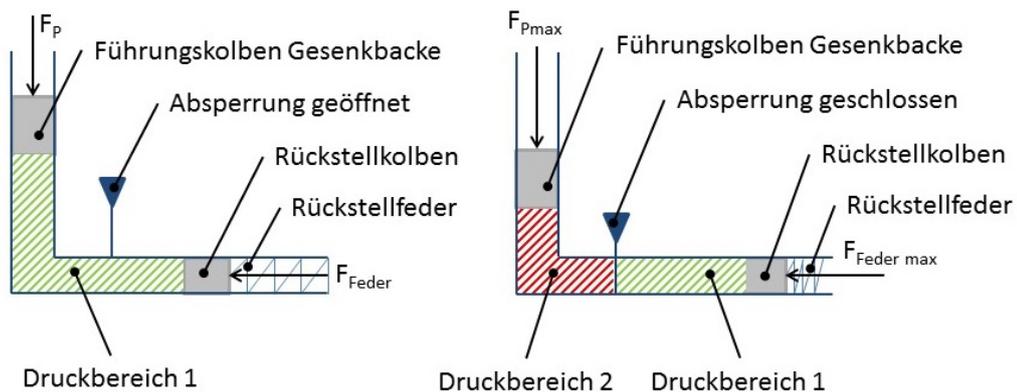


Abbildung 37: Mögliche auftretende Druckbereiche; links: Druckbereich 1 bei geöffneter Absperrung; rechts: Druckbereich 1 und 2 bei geschlossener Absperrung

Der Umformvorgang findet statt, sobald die Verriegelung geschlossen ist. Mit Hilfe der nach unten geführten Stempelbewegung wird der Blechzuschnitt innerhalb der definierten Gesenkweite bis zu einem bestimmten Winkel gebogen. Die dabei auf die Gesenkbacken wirkenden maximalen Kräfte wurden mit Formel (6) bestimmt. Da im Druckbereich 2 der höchste Druck herrscht, ist dieser als kritischer Bereich anzusehen. Dieser errechnet sich aus

$$p_{krit} = \frac{F}{2 * A} = \frac{F_1}{2 * \frac{d_1^2 \pi}{4}} = \frac{32878}{2 * \frac{16^2 \pi}{4}} = 81,76 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

und ergibt einen Wert von $81,76 \text{ N/mm}^2$. Umgerechnet ergibt dies einen Wert von 817,6 Bar. Diese Werte sind als Auslegungsgrundlagen für die Komponenten Absperrung und Dichtungen des Hydrauliksystems im Werkzeug anzusehen.

5.4 ABSPERRVORRICHTUNG UND RÜCKSTELLFEDER

Die Absperrung erfüllt den Zweck, einen Teil des Hydrauliksystems von der Rückstellfeder abzutrennen, siehe Abbildung 37. Die Verstellung der Gesenckbacken ist nach Absperrung nicht mehr möglich.

Die Schwierigkeit bei der Findung einer geeigneten Absperrung liegt dabei, den hohen Druck im Hydrauliksystem stand zu halten. Viele Lösungsmöglichkeiten, wie etwa die Realisierung nach dem Kugelhahnprinzip oder durch Verriegelung mittels Magnetventil o.ä., sind nicht durchführbar, da entweder der vorherrschende Druck zu hoch ist, oder die Bauart des Verriegelungsbauteils zu groß ist.

Eine einfache und effektive Lösungsmöglichkeit stellt die Verwendung eines Einschraub-Rückschlagventils dar. Diese sind für einen Betriebsdruck von bis zu 700bar erhältlich und stellen die optimalste Lösung für die geforderte Anwendung dar, siehe dazu Abbildung 38.

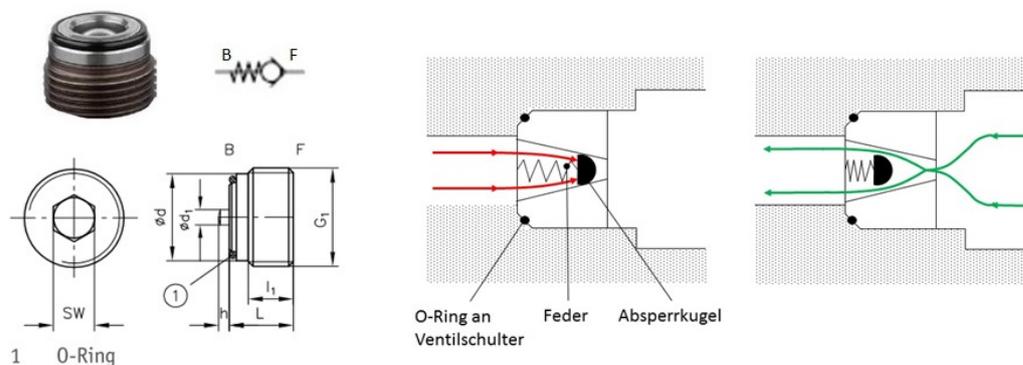


Abbildung 38: Links: Einschraubrückschlagventil als Absperrvorrichtung inkl. Prinzipschaubild Typ RB [HAW16] Rechts: freie Durchflussrichtung (grün) und gesperrte Durchflussrichtung (rot)

Aufgrund der Tatsache, dass der Einsatzbereich dieser Rückschlagventile bis 700 bar begrenzt ist, ist es notwendig die maximale Presskraft laut Lastenheft zu reduzieren. Dies hat zur Folge, dass die zuvor berechneten Werte neu berechnet und angepasst werden müssen. Als kritischer Druck wird nun der maximal mögliche Druck von 700

bar, bzw. 70 N/mm^2 des Rückschlagventils angesetzt. Aus Formel 9 kann somit die maximal mögliche Kraft F_1 , welche auf das Hydrauliksystem wirkt, berechnet werden.

$$p_{krit} = \frac{F_1}{2 * \frac{d_1^2 \pi}{4}} \rightarrow F_1 = p_{krit} * 2 * \frac{d_1^2 \pi}{4} = 70 * 2 * \frac{16^2 \pi}{4} = 28149 \text{ N}$$

Durch Umformung von Formel (8) erhält man die Kraft F_B , welche auf den Blechzuschnitt infolge der Stempelkraft wirkt.

$$F_1 = F_B * \cos(50) \rightarrow F_B = \frac{F_1}{\cos(50)} = \frac{28149}{\cos(50)} = 43792 \text{ N}$$

Weiterfolgend erhält man somit durch Umformung der Formel (7) die maximal erlaubte Presskraft, welche der Abkantpresse vorgegeben werden muss, um den zulässigen Maximaldruck nicht zu überschreiten.

$$\rightarrow F_{St} = 2 * F_B * \cos(30) = 2 * 43792 * \cos(30) = 75850 \text{ N}$$

Zusammenfassend werden alle relevanten Werte der theoretischen Druckberechnung und der Berechnung unter Berücksichtigung des maximal zulässigen Drucks in Tabelle 2 dargestellt. Die maximal zulässige Stempelkraft ist vor dem Umformvorgang an der Abkantpresse einzustellen. Das Wunschkriterium für die Umformbarkeit eines Blechzuschnittes mit einer Blechdicke von 3 mm, einer Länge der Biegelinie $b = 200$, umgeformt in einem Gesenk mit der Gesenkweite von 16 mm kann somit nicht eingehalten werden.

	Stempelkraft F_{St} [N]	Kraft auf Gesenkbacke F_B [N]	Kraft auf Hydrauliksystem F_P [N]	Druck in Hydrauliksystem p_{krit} [bar]
theoretische Werte laut Lastenheft	88594 N	51150 N	32878 N	817,6 bar
max. zulässige Werte nach Komponentenverfügbarkeit	75850 N	43792 N	28149 N	700 bar

Tabelle 2: Übersicht Ergebnisse aus Druckberechnung

Das Rückschlagventil wird in eine abgesetzte Gewindebohrung eingeschraubt. Die Ab-

dichtung erfolgt über einen O-Ring an der Ventilschulter, welcher an die vom Bohrer-spitzenwinkel gebildete Fläche gepresst wird. Siehe Abbildung 38. Der verwendete Typ wird in freier Durchflussrichtung eingeschraubt. Dies bedeutet, der freie Durchfluss ist jener, welcher durch die Ausdehnung der Feder bzw. Rückstellung der Gesenkbacken entsteht. Andererseits bedeutet dies jedoch auch, dass die Sperrung dieses Ventils sofort durch einen gegenläufigen Durchfluss erfolgt. Eine sofortige Sperrung bei dem Versuch der Backenverstellung bzw. Gesenkweiteneinstellung ist die Folge. Siehe Abbildung 38 - Rechts. Um die sofortige Absperrung bei der Einstellung der Gesenkweite zu umgehen, muss das Ventil permanent von außen geöffnet werden. Mittels permanent angesteuerten Kleinstmotor und Betätigungsstößel wird diese mechanische Öffnung realisiert. Wird die Gesenkweite eingestellt, erhält der Kleinstmotor ein Signal, welcher den Betätigungsstößel in das Ventil drückt und somit das Rückschlagventil so lang öffnet, bis die geforderte Gesenkweite erreicht ist. Ist dies erfolgt, wird der Kleinstmotor nicht mehr angesteuert und das Rückschlagventil schließt sich anhand der eingebauten Feder. Der Umformvorgang kann erfolgen. Ist dieser abgeschlossen, erfolgt die Rückstellung der Gesenkbacken bzw. der Gesenkweite in Ausgangsstellung durch die Federkraft der Rückstellfeder in freier Durchflussrichtung des Rückschlagventils. Prinzip siehe Abbildung 39 - Links.

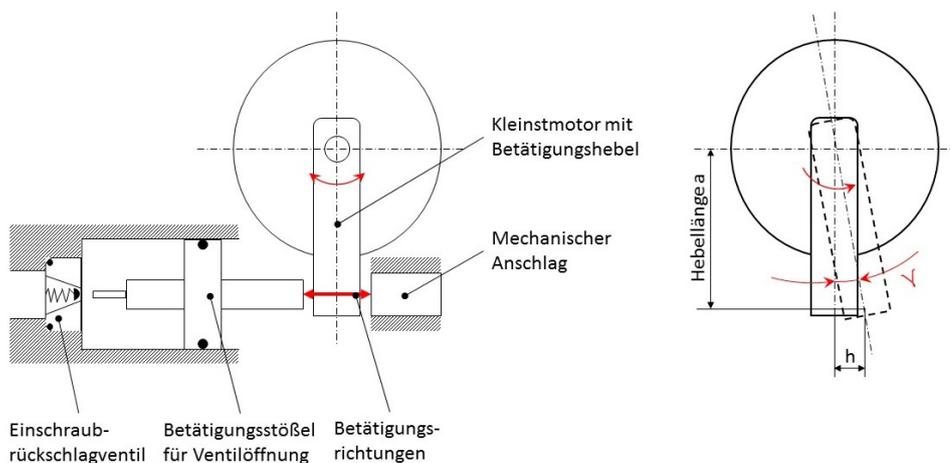


Abbildung 39: Links: Prinzipschaubild: Öffnungsmöglichkeit des Rückschlagventils mittels Betätigungsstößel und Kleinstmotor; Rechts: Herleitung des benötigten Winkelweges für Ventilöffnung

Für die Bewegung des Betätigungsstößels wird ein Kleinstmotor inkl. Planetengetriebe der Fa. Faulhaber eingesetzt. Der Kleinstmotor hat den Vorteil, dass auf relativ kleinem Bauraum ein genügend großes Drehmoment für die Betätigung erzeugt wer-

den kann. Für die Vollständige Öffnung des Rückschlagventils muss die Absperrkugel dieses Ventils (Abstand h in Skizze aus Abbildung 38) laut Hersteller 2mm aus dem Ventilsitz gedrückt werden. Bei einer Länge a des Betätigungshebels von 20mm ergibt dies laut Formel 11 und Abbildung 39 - Rechts, einen notwendigen Winkelweg von ca. 6 Grad. Die Kraft, welche für die Öffnung der Absperrkugel im Rückschlagventil aufgebracht werden muss, ist bei Verstellung der Gesenkbacken nur von der Federkraft der Rückstellfeder abhängig. Diese Federkraft F der ausgewählten Systemdruckfeder der Firma Meusburger beträgt bei einer Stauchung von $1/4$ des Gesamtfederweges 90 N, siehe nachfolgend Auswahl der Rückstellfeder. Bei einer Länge a des Betätigungshebels von 20 mm ergibt sich nach Formel 12 ein nötiges Moment M_A von circa 2 Nm. [Meu16]

$$\sin \gamma = \frac{2}{20} \rightarrow \gamma = \arcsin \frac{2}{20} = 5,7 \text{ Grad} \quad (11)$$

$$M_A = F * a = 90 * 0,02 = 1,8 \text{ Nm} \approx 2 \text{ Nm} \quad (12)$$

Die Öffnung des Rückschlagventils soll so schnell wie möglich erfolgen, damit mit dem Umformvorgang ehestmöglich begonnen werden kann. D.h., der erforderliche Winkelweg von 6 Grad muss so schnell wie möglich zurückgelegt werden. Ein realistischer Wert für diese Zeitspanne beträgt 10 ms. 6 Grad Winkelweg in 0,01 Sekunden sind umgerechnet 1,67 U/s oder 100,2 U/min. Unter der Berücksichtigung von der vom Hersteller empfohlenen Eingangsdrehzahlen für Planetengetriebe zwischen 5000-6000 U/min ergibt sich eine Untersetzung von 50-60:1. Bezieht man den vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrad von 0,75 mit ein, errechnet sich bei einem abtriebsseitigen Moment von aufgerundet 2 Nm ein benötigtes Motornennmoment von ca. 40 mNm.

$$M_N = \frac{M_A}{60 * 0,75} = \frac{2}{60 * 0,75} = 44 \text{ mNm}$$

Zu beachten gilt, dass dieses Nennmoment bei diesem Anwendungsfall für Dauerbetrieb gilt, da bei permanenter Öffnung des Rückschlagventils der Kleinstmotor dauerhaft auf Anschlag fährt. Eine Strombegrenzung ist deshalb vorzusehen, um den Kleinstmotor vor Überlast zu schützen.

Anhand dieser Werte wird ein Kleinstmotor der Firma Faulhaber ausgewählt, welcher ein Nennmoment für Dauerbetrieb von 41 mNm bei einem max. Nennstrom von 1,3 Ampere zur Verfügung stellt. In Kombination eines passenden Planetengetriebes, welches ein Übersetzungsverhältnis von 68:1 zur Verfügung stellt, ergibt sich laut Da-

tenblatt ein maximales Drehmoment für Dauerbetrieb von 4,5 Nm. Das erforderliche Moment von 2 Nm wird somit leicht erreicht. [Fau16]



Abbildung 40: Wippschalter mit 3 Schalterstellungen für die Ansteuerung des Kleinstmotors

Die Ansteuerung des Kleinstmotors erfolgt über eine 24V Spannungsversorgung, welche durch einen Wippschalter mit 3 Stellungsarten vom Kleinstmotor getrennt werden kann, siehe Abbildung 40. In Stellung „0“ liegt keine Spannung am Kleinstmotor an. Werden Umformversuche durchgeführt, muss der Schalter für die Verstellung der Gesenkbacken in Stellung „I“ gebracht werden. In dieser Stellung wird der Kleinstmotor in der Drehrichtung angesteuert die nötig ist, um den Betätigungsstößel in das Einschraubückschlagventil zu drücken. Das Ventil wird permanent geöffnet, die Verstellung ist möglich. Sobald die erforderliche Gesenkweite erreicht ist, wird der Schalter in Stellung „II“ gebracht. Die Drehrichtung des Motors wird umgekehrt damit sichergestellt werden kann, dass das Rückschlagventil schließt. Der Umformvorgang erfolgt bei abgesperrter Position. Sobald der Umformvorgang abgeschlossen ist, erfolgt die automatische Rückstellung der Gesenkbacken in Ausgangsstellung.

Für die Auswahl der Rückstellfeder ist es vorerst notwendig, den Hubraum des Rückstellkolbens zu bestimmen. Es muss möglich sein, dass in diesem Raum gleich viel Hydraulikflüssigkeit Platz findet, wie durch die Gesenkbackenkolben (Durchmesser $d_1 = 16 \text{ mm}$) bei Verstellung verdrängt wird. Um eine Mindestgesenkweitenverstellung von 10 mm, also 5mm pro Gesenkbacke, gewährleisten zu können, muss die Gesenkbacke an der schrägen Gleitfläche nach Formel 13 14,6 mm in das Werkzeug bewegt werden.

$$\cos(70) = \frac{5}{z} \rightarrow z = \frac{5}{\cos(70)} = 14,6 \text{ mm} \quad (13)$$

Das verdrängte Ölvolumen der 4 Gesenkbackenkolben wird nach Formel 15 berechnet:

$$V = 4 * \frac{d_1^2 * \pi}{4} * z = 4 * \frac{16^2 * \pi}{4} * 14,6 = 11661 \text{ mm}^3 \quad (14)$$

Dieses Volumen muss nun im Hubraum des Rückstellkolbens durch Federrückstellung Platz finden. Für den Rückstellkolben wird ein Durchmesser d_2 von 22mm gewählt. Der benötigte Federweg errechnet sich wie folgt aus Formel 15:

$$V = \frac{d_2^2 * \pi}{4} * l \rightarrow l = \frac{4 * V}{d_2^2 * \pi} = \frac{4 * 11661}{22^2 * \pi} = 30,7 \text{ mm} \quad (15)$$

Somit wird eine Rückstellfeder der Firma Meusburger mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Federlänge l von 89 mm gewählt. Diese Feder besitzt einen maximal zulässigen Federweg von 60% der Federlänge welcher damit 35,6 mm beträgt. [Meu16] Für die Rückstellung der Gesenkbacken ist es notwendig, dass die Federkraft F , bei Vernachlässigung der Reibung, größer als die Gewichtskraft der Gesenkbacken ist.

5.5 LEITUNGSSYSTEM UND ZUSAMMENBAU

Innerhalb des fixen Gesenkteils werden die Leitungen des Hydrauliksystems so gelegt, dass möglichst wenig Bauraum im Werkzeug benötigt wird und somit die Breite und Höhe des Werkzeuges nicht unnötig vergrößert werden. Das Prinzip des Hydrauliksystems mit allen dafür notwendigen Komponenten ist in Abbildung 41 ersichtlich. Eine korrekte Befüllung des Leitungssystems ist dabei Voraussetzung um Kompressibilitäten von eventuell vorhandenen Lufteinschlüssen zu verhindern.

Flussrichtung 1, rot dargestellt, zeigt den Hydraulikölfluss bei Einstellung der Gesenkweite. Durch die Belastung der Gesenkbacken über Biegestempel und Blechzuzchnitt, werden die Gesenkbacken nach unten zu geringerer Gesenkweite bewegt. Eine Verdrängung des Hydrauliköls ist die Folge. Mittels permanenter Ansteuerung des Kleinstmotors wird über den Betätigungshebel der Betätigungsstößel in das Einschraubückschlagventil gedrückt. Das Rückschlagventil befindet sich nun so lange im geöffneten Zustand, bis die Ansteuerung des Kleinstmotors wegfällt und die Feder im Rückschlagventil das Ventil wieder schließt. Der Ölfluss kann nun ungehindert über Rückschlagventil bis zum Rückstellkolben erfolgen. Die Verschiebung des Rückstellkolbens und somit die Stauchung der Rückstellfeder erfolgt so lange, bis die erforderliche Gesenkweite eingestellt wurde. Ein mechanischer Anschlag am Ende der Rückstellfeder dient dabei zur nötigen Einstellung der Vorspannung des Rückstellkolbens.

Flussrichtung 2, grün dargestellt, erläutert den Hydraulikfluss nach Wegnahme der

Belastung an den Gesenkbacken. Mit Hilfe der Federkraft der durch die Verstellung gestauchten Rückstellfeder wird der Rückstellkolben in Dehnungsrichtung der Rückstellfeder bewegt und der Ölfluss über die freie Durchflussrichtung des Einschraubückschlagventils bis hin zu den Kolben der Gesenkbacken geführt. Dadurch wird die Rückstellung der Gesenkbacken ermöglicht.

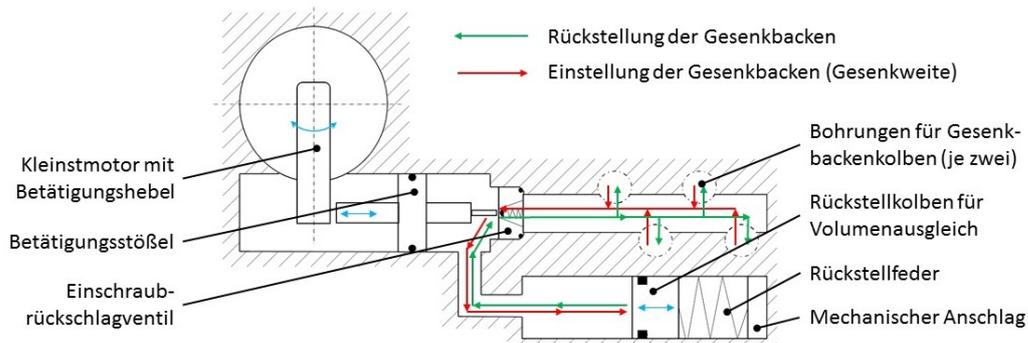


Abbildung 41: Prinzipschaubild: Hydrauliksystem inkl. Flussrichtungen

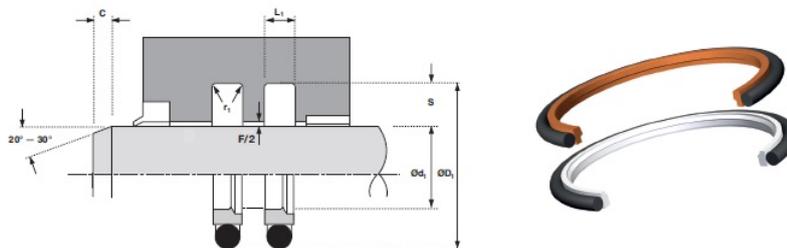


Abbildung 42: Links: Konstruktionsrichtlinie Stangendichtsatz; Rechts: PTFE-Stangendichtsatz bestehend aus einem O-Ring und einem PTFE-Dichtring [Hen16]

Für die Abdichtung der Gesenkbackenkolben nach außen, sowie des Rückstellkolbens nach außen werden PTFE-Stangendichtsätze verwendet. [Hen16] Laut Herstellerangaben halten diese Dichtringe bei Gleitgeschwindigkeiten von 0,2 m/s einen dynamischen Druck von 600 bar stand. Zudem können sie laut Hersteller bei statischen Drücken von bis zu 1000 bar eingesetzt werden, weshalb sie im gesenkweitenveränderlichen Werkzeug Einsatz finden, da dort bei Absperrung die Kolben nicht mehr bewegt werden. Statische Druckbelastung kann somit vorausgesetzt werden. Die Dichtsätze bestehen aus einem PTFE-Dichtring und einem O-Ring, welcher die Abdichtung im Nutraum übernimmt. Der Dichtring dichtet den dynamischen Bereich an der Gleitfläche ab. Durch den hydraulischen Druck tritt eine Verformung des O-Rings auf,

welcher eine zusätzliche Kraft über den Dichtring zur Gleitfläche erzeugt. Mit anderen Worten wird bei steigendem Druck die Anpresskraft des Dichtrings an die Gleitfläche erhöht. Ein großer Vorteil dieses Dichtsatzes besteht in der äußerst geringen Reibung an der Gleitfläche. Dies ermöglicht ruckfreie Bewegungen des Kolbens, vor allem beim Anfahren. Siehe Abbildung 42. [Hen16] Eingesetzt werden diese Dichtsätze für die Gesenckbackenkolben, sowie für Rückstellkolben und Betätigungsstößel.

Nachdem alle benötigten Komponenten ausgelegt sind, die Gestaltung von fixem Gesenckteil und Gesenckbacken definiert ist und das Leitungssystem in seiner Ausführung festgelegt ist, erfolgt nach der Fertigung der Zusammenbau des Prototypen. Beim Zusammenbau ist vor allem auf die richtige Befüllung mit der Hydraulikflüssigkeit zu achten, da eventuelle Lufteinschlüsse Nachgiebigkeiten durch Kompression dieser Luft hervorrufen. In Abbildung 43 ist der Zusammenbau des Prototypen mit transparentem, fixen Gesenckteil ersichtlich.

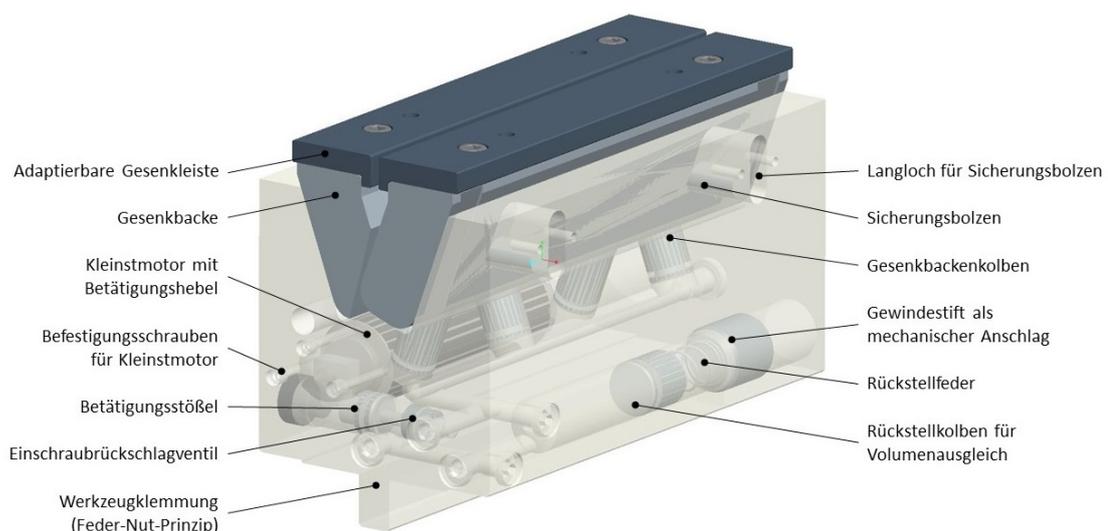


Abbildung 43: Zusammenbau Prototyp flexibles Werkzeugsystem; transparenter fixer Gesenckteil zur Erkennung der Leitungsführung

5.6 NACHGIEBIGKEIT DES HYDRAULIKSYSTEMS

Für das Hydrauliksystem wird ein herkömmliches Hydrauliköl vom Typ „Hyspin AWS 46“ verwendet. Neben den verschleißsenkenden Eigenschaften verhindert dieses Hydrauliköl Korrosion und ist gegenüber Dichtungen neutral. Der für die Nachgiebig-

keitsberechnung erforderliche Kompressionsmodul K_{Komp} dieses Öls liegt laut Angaben des Herstellers zwischen $1,2 \times 10^9$ und $1,6 \times 10^9$ Pascal.

Inkompressibles Verhalten gibt es nur im idealen Modellfall. Für die Berechnung der Nachgiebigkeit der Hydraulikflüssigkeit unter Belastung ist es notwendig, das gesamte Volumen für die Hydraulikflüssigkeit im Inneren des Werkzeuges zu bestimmen. Eine einfache Methode zur Bestimmung dieses Volumens ist die Bestimmung mittels CAD Programmes. Alle Leitungen und Begrenzungen des Systems können dadurch bestimmt und das Volumen ausgegeben werden. Das Ausgangsvolumen im abgesperrten Hydrauliksystem, begrenzt von Gesenkbackenkolben und Absperrung, beträgt 24228 mm^3 bzw. $24,228 \text{ ml}$.

Die Volumenverringerung durch Einwirkung eines äußeren Drucks wird laut Formel 16 definiert. [Wil+11]

$$\Delta V = \frac{V_0 * \Delta p}{K_{komp}} \quad (16)$$

In dieser Formel stellt V_0 das Ausgangsvolumen dar, Δp den maximalen Druck und K_{komp} den Kompressionsmodul.

Weiters gilt, dass die Änderung des Volumens proportional der Nachgiebigkeit Δn des Hydrauliksystems ist. Allgemein formuliert wird das Volumen aus der Grundfläche und der Höhe bestimmt, wobei in diesem Fall die Grundfläche gleich der Fläche der vier Kolbenbohrungen im fixen Gesenkteil entspricht und die Höhe gleich der Nachgiebigkeit ist. Die Berechnung der Volumsänderung ist in nachstehender Formel 17 abgebildet.

$$\Delta V = A_0 * \Delta n = 4 * \frac{d_1^2 * \pi}{4} * \Delta n \quad (17)$$

Wird Formel 17 in Formel 16 eingesetzt, ist es möglich, die Formel auf die gesuchte Nachgiebigkeit, welche gleich der Nachgiebigkeit der Gesenkbacken ist, umzuformen. Siehe Formel 18.

$$\Delta n = \frac{V_0 * \Delta p}{A_0 * K_{komp}} = \frac{V_0 * \Delta p}{d_1^2 * \pi * K_{komp}} \quad (18)$$

Für die Änderung des Drucks Δp wird der maximal mögliche Druck von 700 bar eingesetzt. Da sich bei Verstellung der Gesenkweite das sich momentan zwischen Gesenkbackenkolben und Absperrung befindliche Flüssigkeitsvolumen ändert, ändert sich auch die Nachgiebigkeit der Gesenkbacken unter Belastung je nach Position. Die Positionsabhängigkeit des Momentanvolumens muss in Formel 18 noch berücksichtigt werden. Die für die Berechnung des Momentanvolumens erforderlichen Faktoren sind in Abbildung 44 dargestellt. Der Faktor f_1 errechnet sich demnach aus der Hälfte der Differenz von maximal möglicher Gesenkweite w_{max} und einzustellender Gesenkweite w_{soll} , siehe

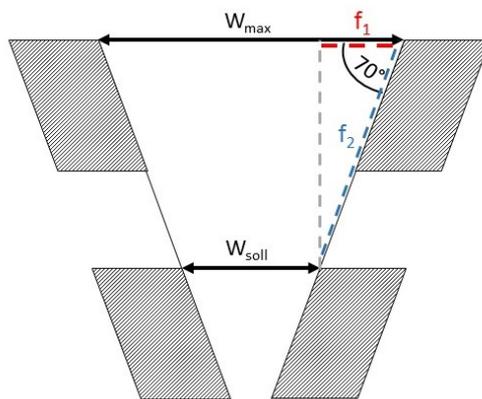
Formel 21. Anhand des Faktors f_1 ist es möglich, den Faktor f_2 zu bestimmen. Vergleiche dazu Formel 22.

Das Momentanvolumen kann nun durch Differenz des Anfangsvolumens und des durch die Verstellung verdrängten Volumens bestimmt werden. Siehe Formel 19. Der Faktor ist ausschlaggebend für das durch die Verstellung verdrängte Volumen.

$$V_{\text{momentan}} = V_0 - V_{\text{verdr}} = V_0 - \frac{d_1^2 * \pi}{4} * f_2 \quad (19)$$

Schlussendlich kann durch Einbeziehung von Formel 19 in Formel 18 die Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems unter Belastung bei jeder beliebigen Gesenkweite bestimmt werden. Vergleiche dazu Formel 20. Dies ist notwendig, damit die Gesenkweite bei maximaler Belastung während der Umformung gleich der benötigten Gesenkweite ist.

$$\Delta n = \frac{V_{\text{momentan}} * \Delta p}{A_0 * K_{\text{komp}}} = \frac{V_{\text{momentan}} * \Delta p}{d_1^2 * \pi * K_{\text{komp}}} \quad (20)$$



$$f_1 = \frac{w_{\text{max}} - w_{\text{soll}}}{2} \quad (21)$$

$$f_2 = \frac{f_1}{\cos(70)} \quad (22)$$

Abbildung 44: Abhängigkeit der Faktoren f_1 und f_2 von der Gesenkweite

Beispielhaft wird die Nachgiebigkeit für die größtmögliche Gesenkweite bei einem maximalen Druck von 700 bar errechnet. Bei maximaler Gesenkweite verschwindet der Faktor f_2 , somit entspricht das Momentanvolumen dem Ausgangsvolumen. Durch Einsetzen der Werte in Formel 20 erhält man für die Nachgiebigkeit einen Wert von 1,3 mm.

$$\Delta n = \frac{24228 * 700 * 10^5}{16^2 * \pi * 1,6 * 10^9} = 1,32 \text{ mm}$$

Mit anderen Worten bedeutet eine Nachgiebigkeit von 1,3mm der Gesenkbacken unter Belastung umgerechnet nach Formel 21 und 22 eine Verkleinerung der Gesenkweite

von 0,9 mm. Dies gilt für die Einstellung der Gesenkweite zu beachten. Die errechnete Gesenkweite ist somit um 0,9 mm größer einzustellen, um unter maximaler Belastung die errechnete Gesenkweite zu erreichen.

$$f_2 = \frac{f_1}{\cos(70)} \rightarrow f_1 = f_2 * \cos(70) = 0,45 \text{ mm}$$

$$\Delta w = 2 * f_1 = 0,9 \text{ mm}$$

Weiter wird die theoretische Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems für eine ausgewählte Biegeprobe berechnet, welche in Kapitel 6 für die Werkzeugvalidierung zur Anwendung kommt. Diese Biegeprobe besitzt eine Blechdicke von 3 mm und eine Breite von 60 mm (entspricht der Länge der Biegelinie), welche in einem Gesenk mit der Gesenkweite von 16 mm umgeformt wird. Nach Formel (6) ergibt sich daraus eine maximale Stempelkraft von 26578 N. Mittels Formel (7), (8) und (9) kann der im System herrschende Druck berechnet werden, welcher 245,3 bar beträgt. Da die Umformung bei einer Gesenkweite von 16 mm stattfindet, erhält man für den Faktor f_1 , laut Formel (21), einen Wert von 3 bzw. für den Faktor f_2 , laut Formel (22), einen Wert von 8,8. Eingesetzt in Formel (19) ergibt dies für das Momentanvolumen einen Wert von 22459 mm³. Den für die Validierung relevanten Wert der Nachgiebigkeit erhält man schlussendlich anhand von Formel (20). Die theoretische Nachgiebigkeit Δn für eine Biegeprobe mit einer Blechdicke von 3 mm und einer Breite von 60 mm, welche in einem Gesenk mit der Gesenkweite von 16 mm umgeformt wird, beträgt 0,43 mm.

WERKZEUGVALIDIERUNG

Anhand der Werkzeugvalidierung wird das flexible Werkzeugsystem, ersichtlich in Abbildung 45, auf Funktionstüchtigkeit, Dichtheit unter Belastung, Verstellung und Verstellgenauigkeit mittels geeigneter Umformversuche untersucht. Des Weiteren wird anhand dieser Umformversuche gezeigt, dass das flexible Werkzeug die gleichen Umformergebnisse liefert, wie ein Standardwerkzeug. Für die Validierung wird vorausgesetzt, dass der Hydraulikkreislauf ohne Lufteinschlüsse befüllt und ordnungsgemäß verschlossen ist. Biegegesenke der Firma Trumpf Maschinen GmbH, welche in Gesenkeweiten von 4 mm - 120 mm in diskreten Abstufungen erhältlich sind, dienen als Referenzwerkzeuge. [Tru16]



Abbildung 45: Zusammenbau flexibles Werkzeugsystem

6.1 VERSUCHS- UND MESSAUFBAU

Der für die Validierung verwendete Messaufbau ist in Abbildung 46 dargestellt. Das flexible Werkzeug wird über die Feder-Nut-Verbindung (1) mit dem Pressentisch einer herkömmlichen Abkantpresse geklemmt. Als Oberwerkzeug (2) dient ein Biegestempel mit einem Stempelradius von 1 mm, welcher den Verstell- bzw. Umformvorgang mit einer Umformgeschwindigkeit von 10 mm/s durchführt. Für die Positionie-

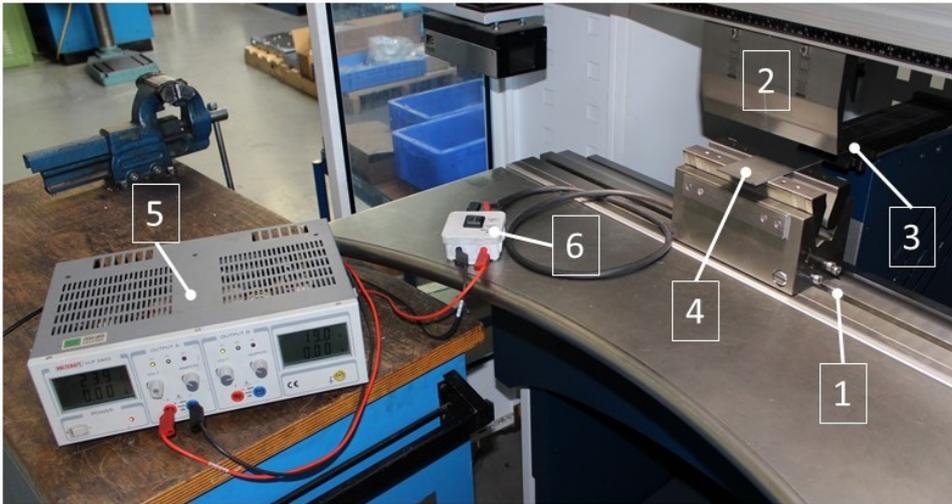


Abbildung 46: Versuchs- und Messaufbau flexibles Werkzeugsystem

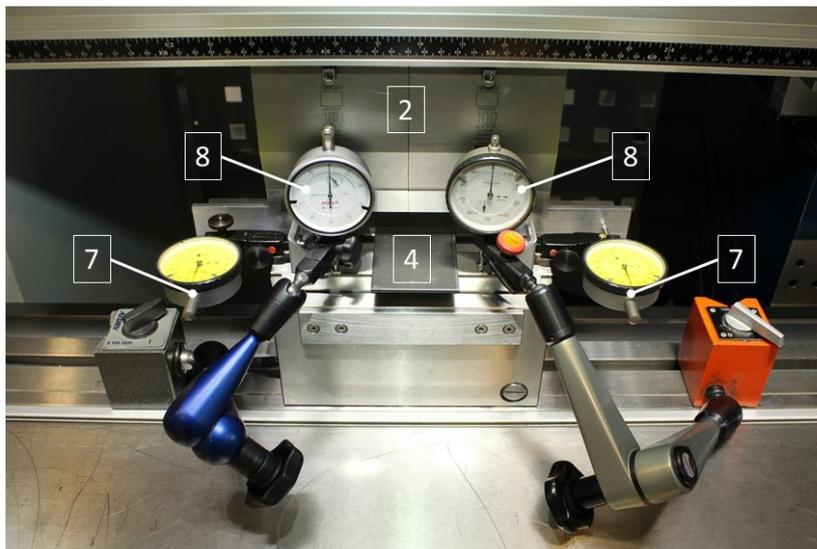


Abbildung 47: Zusätzlich angebrachte Messuhren zur Validierung des flexiblen Werkzeugsystems

rung der Blechzuschnitte (4) wird eine Anschlagvorrichtung (3), welche im Abstand x positioniert wird, verwendet. Ein Labortransformator (5) versorgt den Kleinstmotor der Absperrvorrichtung mit einer Spannung von 24 Volt. Für Dauerbetrieb wird laut Hersteller ein maximaler Strom von 1,3 Ampere vorgeschrieben, dieser ist mittels Strombegrenzung zu Beginn der Validierung einzustellen. Mittels Wippschalter

(6) kann sowohl die Drehrichtung des Kleinstmotors umgedreht werden, als auch die Spannungsversorgung zum Kleinstmotor getrennt werden. Zusätzlich angebrachte Messuhren, ersichtlich in Abbildung 47, ermöglichen die Überprüfung der eingestellten Gesenkweite (7), sowie die Kontrolle der über die Werkzeuglänge gleichmäßigen Verstellung (8). Weiter dienen sie dazu, die auftretenden Nachgiebigkeiten des Werkzeuges zu validieren.

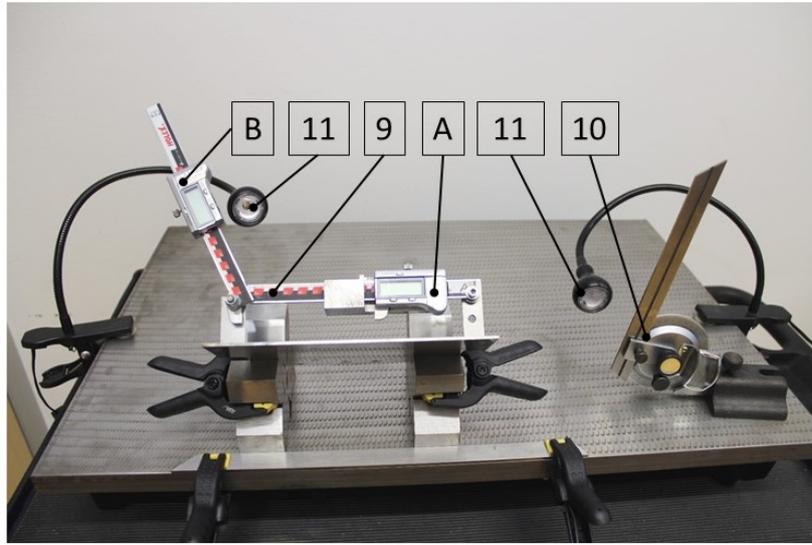


Abbildung 48: Messaufbau zur Schenkellängen- und Winkelmessung

Die für die Versuchsauswertung relevanten Parameter Schenkellängen und Biege-
winkel werden unmittelbar nach Beendigung des Umformvorganges aufgenommen
und zusammen mit Infowerten wie Umformgeschwindigkeit, eingestellte Gesenkweite,
Abkantlänge, Blechdicke, Versuchsmaterial, etc. gespeichert. Die Schenkellänge wird,
analog zu Abbildung 10, nach dem Tangentenschnitt definiert. D.h., die Schenkellänge
ist jener Messwert, welcher zwischen Schenkelende und Schnittpunkt der beiden an
der Biegung beteiligten Schenkel auftritt. Mittels eigener Messvorrichtung erfolgt die
Bestimmung der Schenkellängen und des Biege-
winkels, dargestellt in Abbildung 48. Die Vorrichtung zur Schenkellängenbestimmung (9) besteht aus zwei digitalen Mess-
schiebern (A) und (B) inkl. Ableseeinrichtung, welche im gemeinsamen Drehgelenk
miteinander verbunden sind. Die Ablesegenauigkeit dieser Messvorrichtung beträgt
1/100 mm. Nach dem Einlegen der Probe werden die beiden Messschieber an die
Schenkel angelegt und die Ableseeinrichtung an die Schenkelenden geschoben. Durch
eine geeignete Umrechnung der angezeigten Messwerte der Ableseeinrichtung erfolgt
die Schenkellängenbestimmung.

Die Bestimmung des Biegewinkels erfolgt mit einem analogen Winkelmesser (10). Die Noniusauflösung ermöglicht eine Bestimmung des Biegewinkels auf 5 Winkelminuten genau. Die Zuhilfenahme einer Hintergrundbeleuchtung (11) erleichtert mittels Lichtspalterkennung die Anlegung der Messlineale von Schenkellängenmessgerät und Winkelmesser an die Schenkel des Winkels.

6.2 ÜBERPRÜFUNG DER WERKZEUGEIGENSCHAFTEN

Zur Ermittlung der Funktionstüchtigkeit wird zu Beginn die Verstellung, bzw. die gleichmäßige Verstellbarkeit der Gesenkbacken überprüft. Der Blechzuschnitt wird in das Werkzeug eingelegt und die Absperrung permanent durch Ansteuerung des Kleinstmotors geöffnet. Mittels Vorschubbewegung des Biegestempels erfolgt die Verstellung von maximaler Gesenkweite zu minimal möglicher Gesenkweite. Nach Wegnahme der Belastung erfolgt die Rückstellung der Gesenkbacken in die Ausgangsstellung. Gleichmäßigkeit in der Verstellung bei Einstellung der Gesenkbacken, sowie Rückstellung der Gesenkbacken wird bei mittig eingelegten Blechzuschnitt dokumentiert. Anhand mehrerer Versuchsdurchführungen, bei denen der Blechzuschnitt außermittig in das Werkzeug gelegt wird, also eine außermittige Belastung der Gesenkbacken erfolgt, wird eine Schrägstellung der Gesenkbacken beobachtet. An der Belastungsseite werden die Gesenkbacken stärker in den fixen Gesenkteil gedrückt, es wird eine geringere Gesenkweite gemessen. Gesenkweitenunterschiede, bei einer Werkzeuglänge von 200 mm, bis zu 0,5 mm treten bei nicht symmetrischer Belastung der Gesenkbacken auf. Bei mittig platzierten Blechzuschnitten wird die Gesenkweite durch Einstellung der Gesenkbacken auf der gesamten Länge des flexiblen Werkzeuges auf $2/100$ mm genau erreicht. Zudem ist die Einstellung der Gesenkweite reproduzierbar. Nach Wegnahme der Belastung und erneuter Einstellung der Gesenkweite, wird eine Wiederholbarkeit der geforderten Gesenkweite von $2/100$ mm erreicht.

Eine an der Abkantpresse eingestellte Haltezeit am Klemmpunkt von 2 Sekunden ermöglicht nach Einstellung der Gesenkweite die Verriegelung des Hydrauliksystems. Durch Betätigung des Wippschalters erfolgt eine Drehrichtungsumkehr des Kleinstmotors. Das Einschraubückschlagventil wird geschlossen und das Hydrauliksystem abgesperrt. Nach Ablauf der Haltezeit wird mit dem Umformvorgang begonnen. Nach der Verriegelung des Hydrauliksystems wird die automatisch berechnete Eintauchtiefe mittels Biegestempel zurückgelegt. Der Umformvorgang erfolgt gleichmäßig bis zum geforderten Biegewinkel. Nach Beendigung des Umformvorganges erfolgt die neu-

erliche Rückstellung der Gesenkbacken. Während des Umformvorganges kann eine Nachgiebigkeit der Gesenkbacken beobachtet werden. Durch Analyse der angezeigten Messwerte an den Messuhren folgt der Schluss, dass sowohl eine Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems Δy (wie in Kapitel 5.6 beschrieben), als auch eine Nachgiebigkeit der Gesenkbacken Δx , auftritt. Siehe Abbildung 49. Diese Nachgiebigkeit Δx der Gesenkbacken resultiert aus der Gesenkbackenbelastung, der elastischen Verformung der Gesenkbacken und dadurch, dass bewegte Teile Einsatz finden. Diese Nachgiebigkeit trägt zu einer Vergrößerung der Gesenkweite bei. Die Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems Δy führt zu einer Verkleinerung der Gesenkweite.

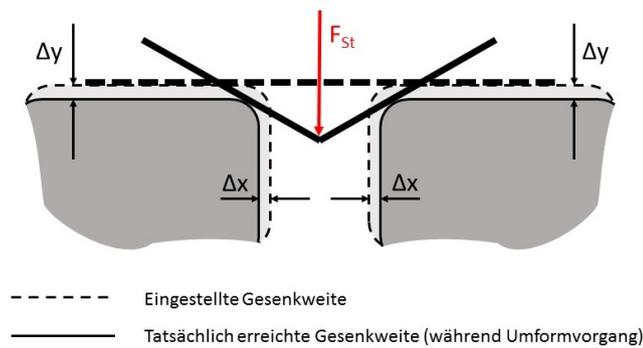


Abbildung 49: Nachgiebigkeiten Δx und Δy der Gesenkbacken

Es ist darauf zu achten, dass beide Nachgiebigkeiten bei der Einstellung der Gesenkweite berücksichtigt werden, da andernfalls die Gesenkweite während der Umformung zur Sollgesenkweite abweicht.

Ein weiterer, geometrisch bedingter Unterschied zwischen Standardgesenk und flexiblen Werkzeug ist zu beachten. Der Unterschied im Verlauf der Einzugsradien der Werkzeuge in Hinblick auf die Definition der Gesenkweite darf nicht vernachlässigt werden. Wie in Kapitel 5.2 bereits vorgestellt beträgt der Einzugsradius r_E an den Gesenkbacken 2 mm und an den Gesenkleisten 1 mm. Die Einzugsradien der Standardwerkzeuge sind aus Abbildung 33 zu entnehmen. Im Gegensatz zu den Gesenkbacken, wo der Einzugsradius am unteren Ende tangential in eine Vertikale übergeht, verläuft das Ende des Einzugsradius bei Standardwerkzeugen tangential in eine um 15 Grad zur Vertikalen verschobenen Linie. Dies ergibt einen Öffnungswinkel der Standardwerkzeuge von 30 Grad. Als Gesenkweite wird definitionsgemäß der Abstand zwischen den tangentialen Übergängen von den Einzugsradien zur Gesenkmitte

angegeben. Durch die verschiedenen tangentialen Übergänge unterscheidet sich der Kurvenverlauf bis hin zum Beginn des Einzugsradius. Vergleiche Abbildung 50. Der darin ersichtliche Unterschied (rot eingezeichnet) bei Beginn des Einzugsradius muss berücksichtigt werden. In Abbildung 51 ist beispielhaft eine Gegenüberstellung des Einzugsradius der Gesenkbacke ($r_2 = 2 \text{ mm}$) mit jenem eines Standardwerkzeuges ($r_1 = 1 \text{ mm}$) abgebildet. Dies ist der Fall, wenn Biegeproben zwischen einem Standardgesenk mit einer Gesenkweite von 10 mm und dem flexiblen Werkzeug ohne Gesenkleisten verglichen werden.

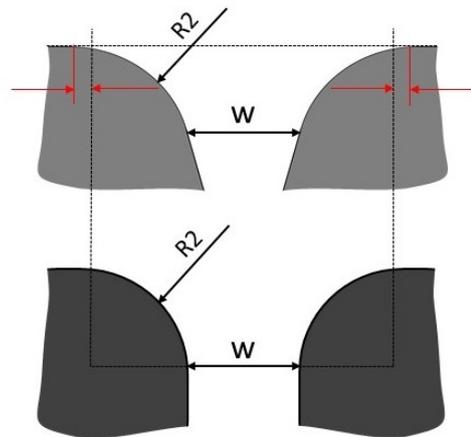


Abbildung 50: Definition der Gesenkweite bei Standardwerkzeug und flexiblem Werkzeugsystem; Standardgesenk hell dargestellt mit tangentialen Übergang des Einzugsradius in eine um 15 Grad zur Vertikalen verschobenen Linie; Flexibles Werkzeugsystem dunkel dargestellt mit tangentialen Übergang des Einzugsradius in die Vertikale

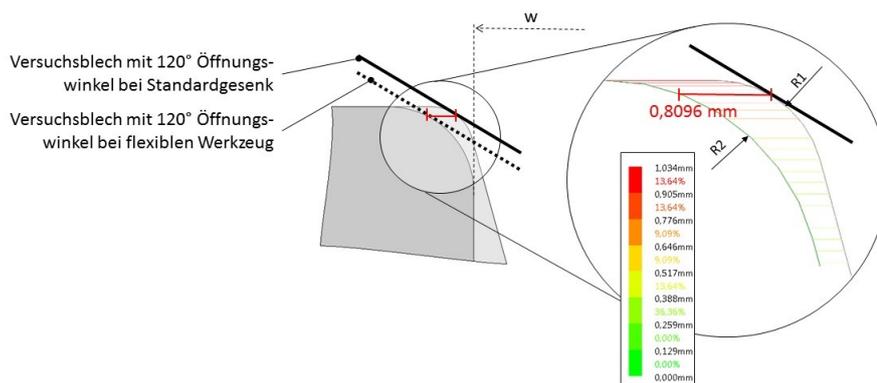


Abbildung 51: Analyse der Radienkorrekturwerte bei Vergleich zwischen Standardgesenk und flexiblem Werkzeug

GW Standardwerkzeug [mm]	Einzugsradius Standardwerkzeug [mm]	GW flexibles Werkzeug [mm]	Einzugsradius flexibles Werkzeug	Radiusabweichung pro Seite [mm]	Gesamtabweichung Δr [mm]
w6	0,6	w6 (GL)	1	0,4204	0,8408
w8	1	w8 (GL)	1	0,0341	0,0682
w10	1	w10 (GL)	1	0,0341	0,0682
w12	1	w12 (GL)	1	0,0341	0,0682
w16	1,6	w16 (GL)	1	-0,3624	-0,7248
w20	2	w20 (GL)	1	-0,5931	-1,1862
w24	2,5	w24 (GL)	1	-0,9138	-1,8276
w30	3	w30 (GL)	1	-1,1929	-2,3858
w6	0,6	w6	2	1,1619	2,3238
w8	1	w8	2	0,8096	1,6192
w10	1	w10	2	0,8096	1,6192
w12	1	w12	2	0,8096	1,6192
w16	1,6	w16	2	0,3516	0,7026
w20	2	w20	2	0,0681	0,1362
w24	2,5	w24	2	-0,2744	-0,5488
w30	3	w30	2	-0,6000	-1,2000

Tabelle 3: Radienkorrektur zwischen Standardwerkzeug und flexiblen Werkzeugsystem bei 120 Grad Öffnungswinkel

Aufgrund der unterschiedlichen tangentialen Übergänge unterscheiden sich die Kurvenverläufe auch bei gleichen Gesenkweiten und Einzugsradien zwischen Standardgesenken und flexiblen Werkzeug. Unterschiedliche Weiten zwischen den Gesenken treten somit bei Einzugsbeginn des Versuchsblechs beim Umformvorgang auf. Diese Abweichung Δr zwischen den Kurvenverläufen wird bei einem Öffnungswinkel von 120 Grad des Blechzuschnittes während der Umformung ermittelt. Der Winkel von

120 Grad wird deshalb gewählt, da dort während der Umformung die maximale Belastung auf die Gesenkbacken auftritt. Vergleiche dazu Kapitel 5.3. Alle Abweichungen hervorgerufen durch abweichende Einzugsradien zwischen Standardgesenken und flexiblen Werkzeug sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Beim flexiblen Werkzeug ist zu beachten, ob mit oder ohne Gesenkleiste umgeformt wird (Kennzeichnung „GL“ in Tabelle 3).

Ein positiver Wert der Gesamtabweichung Δr bedeutet, dass die Gesenkweite des flexiblen Werkzeuges im Vergleich zum Standardwerkzeug um diesen Abweichungswert größer ist. Bei der Gesenkweiteneinstellung muss dieser Wert von der Soll-Gesenkweite abgezogen werden. Sobald der Einzugsradius des Standardwerkzeuges größer als der Einzugsradius des flexiblen Werkzeuges ist, wird die Gesamtabweichung negativ. Dies bedeutet, dass die Gesenkweite des flexiblen Werkzeuges im Vergleich zum Standardgesenk um diesen Abweichungswert kleiner ist. Der Betrag dieses Wertes muss bei der Einstellung der Gesenkweite zur Soll-Gesenkweite dazugegeben werden.



Abbildung 52: Validierung der Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems mittels Messuhren

Zur Überprüfung der theoretisch errechneten Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems wird ein Blechzuschnitt mit der Blechdicke von 3 mm und einer Breite von 60 mm in das flexible Werkzeug gelegt. Durch Eingabe des Klemmpunktes an der Maschinensteuerung ist es möglich, die geforderte Gesenkweite von 16 mm, unter Berücksichtigung des Einflusses des Einzugsradius, einzustellen. Nach erfolgter Absperrung des Hydrauliksystems erfolgt der Umformvorgang, welcher mittels Kamera aufgezeichnet wird. Die angezeigten Messwerte der Messuhren können im Nachhinein analysiert

und dokumentiert werden. Die beiden Messuhren, ersichtlich in Abbildung 52, zeigen einen Nachgiebigkeitswert des Hydrauliksystems von 0,39 mm an der Ableseskala an. Dieser Wert entspricht nahezu dem theoretisch errechneten Wert von 0,43 mm, die Abweichung beträgt rund 10%.

6.3 VERGLEICH DER UMFORMVERSUCHE VON STANDARDWERKZEUG UND FLEXIBLEN WERKZEUG

Die Blechzuschnitte für die Umformversuche vom Material St37 besitzen eine Solllänge l_0 von 130 mm und eine Breite von l_b von 60 mm. Die Sollblechdicken der Blechzuschnitte betragen 1,5, 2, 2,5 und 3 mm. Die Umformversuche erfolgen für ausgewählte Gesenkweiten, abwechselnd für Standardwerkzeug und flexibles Werkzeug. Umformergebnis ist ein L-Winkel mit einer Sollschenkellänge A von 70 mm und einem Sollöffnungswinkel (Winkel zwischen den Schenkeln) von 90 Grad. Die erforderliche Eintauchtiefe für die Standardwerkzeuge wird an der Abkantpresse durch Eingabe der Blechdicke und des Öffnungswinkels automatisch berechnet. Aufgrund der veränderlichen Höhe des flexiblen Werkzeuges, ist für die Berechnung der Klemmpunktposition, sowie für die Eintauchtiefe ein eigenes Softwaretool zu verwenden. Jede Blechprobe wird vor dem Umformvorgang mit der Anschlagseite A (Schenkel A), der Blechprobennummer, der Blechprobenlänge und der Blechprobendicke gekennzeichnet, siehe Abbildung 53.

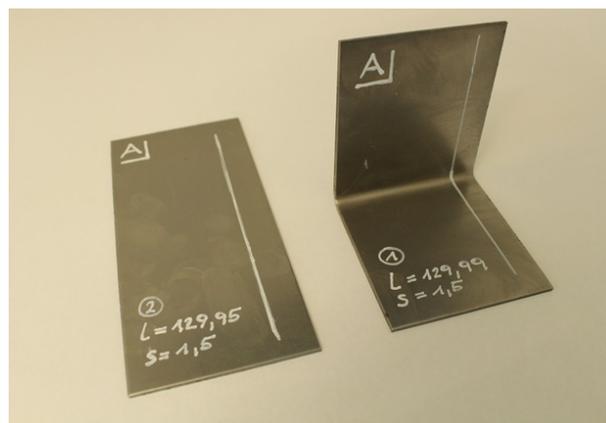


Abbildung 53: Verwendete Blechprobe, vorher - nachher; inkl. Kennzeichnung

Die an den Versuchsblechen vorhandenen Zuschnittstoleranzen verlangen die Ermittlung der Blechprobenlänge und Blechprobendicke mittels Digitalmessschieber und

Bügelmessschraube, welche jeweils eine Genauigkeit von 0,01 mm garantieren. Die für die Validierung notwendigen Umformungen werden anhand gängiger Gesenkweiten / Blechdickenkombinationen durchgeführt. Laut Kapitel 5.3, wird in der Praxis für die Sollgesenkweite das 4-6fache der Blechdicke empfohlen. Daraus ergeben sich für die Validierung folgende Kombinationen (Vergleiche Abbildung 33):

- Blechdicke $s = 1,5$ mm mit Gesenkweite $w = 8$ mm
- Blechdicke $s = 2$ mm mit Gesenkweite $w = 10$ mm
- Blechdicke $s = 2,5$ mm mit Gesenkweite $w = 12$ mm
- Blechdicke $s = 3$ mm mit Gesenkweite $w = 16$ mm

Insgesamt werden vier Gesenkweiten anhand der Validierung überprüft. Die Einstellung der Gesenkweiten von 8 mm, 10 mm und 12 mm erfolgen durch Aufsatz der Gesenkleisten auf die Gesenkbacken, die Gesenkweite von 16 mm wird ohne Gesenkleisten realisiert. Die für die Auswertung benötigten Größen werden für die jeweils vier gleichen Versuchsdurchführungen gemittelt. Die Auswertung erfolgt anhand des Vergleiches dieser gemittelten Werte. Für die Auswertung relevant sind die tatsächlichen Schenkellängen A und B, bzw. deren Abweichung zur Sollschenkellänge, sowie die Verkürzungswerte der Versuchsproben. Die experimentelle Ermittlung der Verkürzungswerte erfolgt durch Umstellung von Formel 4.

$$v = l_0 - A - B$$

Den Verkürzungswert erhält man dadurch, dass von der Ausgangslänge l_0 die beiden tatsächlichen Schenkellängen A und B abgezogen werden. Beispielhaft sei hier eine Blechprobe mit einer Länge l_0 von 130,00 mm, einer Schenkellänge A von 70 mm, einer Schenkellänge B von 62,756 mm und einer Blechdicke s von 1,47 mm angeführt. Bei einem Biegewinkel α von 90 Grad ergibt die Berechnung der Verkürzung nach Umstellung von Formel 4 einen Wert von -2,94 mm.

Bei der Versuchsdurchführung ist darauf zu achten, dass alle Blechproben sauber, entgratet, vermessen und gekennzeichnet sind. Eine saubere und genaue Durchführung der Vermessung trägt zur Qualitätssteigerung der Ergebnisse bei der Auswertung bei. Die Umformung wird an einer Abkantpresse der TruBend 7000 Serie mit einer Umformgeschwindigkeit von konstant 10 mm/s durchgeführt. Vor jeder Umformung sind die eingegebenen Werte an der Maschine zu kontrollieren, sowie die Unterwerkzeuge und der Anschlag auf Sauberkeit zu überprüfen. Bei Verwendung des flexiblen Werkzeuges sind zusätzlich die Nachgiebigkeiten, sowie der Einfluss des Einzugsradius zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass bei Verwendung des flexiblen Werk-

zeuges eine zur Sollgesenkweite unterschiedliche Gesenkweite einzustellen ist. Die Sollgesenkweite wird erst während des Umformvorganges bei maximaler Belastung erreicht. Berücksichtigt wird die Gesenköffnung durch Belastung der Gesenkbacken, die Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems und der Einfluss des Gesenkradius. Korrekte Befüllung des Hydrauliksystems ohne Lufteinschlüsse ist Voraussetzung für die erfolgreiche Versuchsdurchführung. Die für den Dauerbetrieb des Kleinstmotors benötigte Strombegrenzung ist vor Beginn der Versuchsdurchführung am Labortransformator einzustellen.

Mittels Schenkellängenmessgerät und analogen Winkelmesser werden die beiden Schenkellängen und der Biegewinkel gemessen und digital dokumentiert. Bei jeder Probe werden 3 Messwiederholungen durchgeführt, um zufällige Fehler, wie Ableserfehler oder Fehler durch unsachgemäße Handhabung von Messgeräten, etc. zu vermeiden.

6.4 VERSUCHSAUSWERTUNG

Pr.-Nr.	Werkzeugkurzbezeichnung	Sollgesenkweite w_{soll} [mm]	Einzustellende Gesenkweite w_{ist} [mm]	Blechdicke t_{soll} [mm]	Blechdicke t_{ist} [mm]	Biegewinkel α_{soll} [°]	Schenkellänge A_{soll} [mm]	Schenkellänge B_{soll} [mm]	Probenlänge l_0 [mm]	Biegewinkel α_{ist} [°]	Schenkellänge A_{ist} [mm]	Schenkellänge B_{ist} [mm]	Schenkelabweichung A [mm]	Schenkelabweichung B [mm]	Verkürzung v gemessen [mm]
Do1	Standard Wzg	16	16	3	2,98	90	70	65,45	129,99	90,083	69,88	65,44	0,12	0,01	-5,33
Do2	Standard Wzg	16	16	3	2,98	90	70	65,45	129,99	90,167	69,89	65,42	0,11	0,03	-5,32
Do7	flex Wzg	16	15,55	3	2,99	90	70	65,47	130,01	90,167	69,86	65,42	0,14	0,05	-5,27
Do8	flex Wzg	16	15,87	3	2,97	90	70	65,46	130,00	90,167	69,90	65,43	0,10	0,03	-5,33

Tabelle 4: Auszug der Umformversuche zur Gegenüberstellung von Standardgesenken und flexiblen Werkzeug

Eine Auswahl der Umformversuche zur Werkzeugvalidierung ist in Tabelle 4 angeführt. Neben Informationswerten beinhaltet diese Tabelle alle gemessenen Werte der Blechzuschnitte. Die für das flexible Werkzeug einzustellende Gesenkweite errechnet sich nach Formel 23.

$$w_{ist} = w_{soll} - \Delta r - \Delta w_{auf} + \Delta w \quad (23)$$

In Worten bedeutet dies, dass sich die einzustellende Gesenkweite aus der Sollgesenkweite w_{soll} weniger der Gesamtabweichung Δr des Einzugsradius, weniger der Gesenköffnung Δw_{auf} infolge Belastung, plus der Gesenkweitenveränderung Δw infolge der Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems zusammensetzt. Die Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems Δw wird deshalb dazugerechnet, da die Nachgiebigkeit der Gesenkbacken nach unten eine Verkleinerung der Gesenkweite nach sich zieht und diese damit um diesen Wert größer eingestellt werden muss. Der Wert für die Gesamtabweichung Δr des Einzugsradius kann aus Tabelle 3 entnommen werden. Die Vergrößerung des Gesenkes Δw_{auf} infolge Belastung wurde anhand der Messuhren bei diversen Versuchen ermittelt und ergibt bei einem Versuchsblech mit der Blechdicke von 3 mm, einer Breite von 60 mm, umgeformt in einem Gesenk mit der Gesenkweite von 16 mm einen Wert von 0,17 mm. Dieser Wert kann bei Änderung einzelner Parameter wie Breite des Blechzuschnitts, Gesenkweite, etc. als konstant angesehen werden, da dieser nur geringe Schwankungsbreite aufweist. Die Berechnung der Größe Δw wurde in Kapitel 5.6 vorgestellt.

Beispielhaft wird für Versuchsprobe D05 von einer Sollgesenkweite $w_{soll} = 16$ mm der Wert der Gesamtabweichung des Radienverlaufs Δr von 0,7026 mm und der Wert der Gesenköffnung Δw_{auf} von 0,17 mm subtrahiert, sowie der Wert der Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems $\Delta w = 0,42$ mm addiert. Die einzustellende Gesenkweite beträgt nach Formel 23 einen Wert von 15,55 mm, um während der Umformung eine Gesenkweite von 16 mm zu erhalten.

Am rechten Tabellenrand befinden sich die Auswertungen der Schenkellängenabweichungen sowie der Wert der gemessenen Verkürzung. Die Verkürzungswerte werden deshalb verwendet, da diese eine zentrale Größe in der Biegeumformung darstellen und die gesamte Umformzone beschreiben. Für die Auswertung der Umformversuche ist die Analyse der Verkürzungsabweichung ausreichend.

In Tabelle 5 sind die Versuchsreihen der verschiedenen Gesenkweiten / Blechdickenkombinationen, sowie die gemittelten Referenzverkürzungswerte der Standardwerkzeuge dargestellt. Jede Versuchsreihe besteht aus 4 nicht aufeinanderfolgenden Umformversuchen. Die gemittelten Referenzverkürzungswerte dienen als Bezug für die Abweichungsanalyse des flexiblen Werkzeuges. Der Biegewinkel soll bei allen Versuchsreihen innerhalb von $\pm 0,3^\circ$ und damit innerhalb der Allgmeintoleranz liegen.

Bezeichnung der Versuchsreihe	Sollgesenkweite w_{soll} [mm]	Blechdicke t_{soll} [mm]	Biegewinkel α_{soll} [°]	gemittelte Referenzverkürzung $v_{gemittelt}$ [mm] (Standardwerkzeug)
V1	w8	1,5	90	-2,700
V2	w10	2	90	-3,488
V3	w12	2,5	90	-4,275
V4	w16	3	90	-5,303

Tabelle 5: Versuchsreihen der ausgewählten Gesenkweiten / Blechdickenkombinationen bei konstantem Biegewinkel inklusive gemittelten Referenzverkürzungswert der Standardwerkzeuge

Die pro Versuchsreihe erhaltenen Verkürzungswerte des flexiblen Werkzeuges werden ebenso gemittelt und im Versuchsdokumentationsbogen, siehe Anhang A, dokumentiert. Durch Subtraktion des gemittelten Wertes der Referenzverkürzungswerte $v_{gemittelt}$ der jeweiligen Versuchsreihe aus Tabelle 5 vom Verkürzungswert v des flexiblen Werkzeuges derselben Versuchsreihe, wird die Abweichung zwischen Verkürzungswerten von Standardgesenk und flexiblen Werkzeug berechnet und als Wert $\Delta v_{normiert}$ dargestellt. Diese berechneten Werte pro Versuchsreihe dienen als Grundlage der Beurteilung der Umformversuche. In Abbildung 54 ist diese Verkürzungsabweichung $\Delta v_{normiert}$ über der Gesenkweite aufgetragen.

Die Horizontale Nulllinie entspricht dem Mittelwert der Referenzverkürzungswerte der jeweiligen Versuchsreihe. Alle Einzelmessergebnisse der Versuchsreihen für Standardgesenk und flexiblen Werkzeug sind als Abweichungswert zum Referenzmittelwert eingezeichnet. Schwarz dargestellt sind die Ergebnisse für Standardgesenk, rot dargestellt jene für das flexible Werkzeug. Die Verbindungslinie zwischen den einzelnen Versuchen dient als Darstellung der Streuung der jeweiligen Versuchsreihe.

Die Probenwiederholbarkeit aller Versuchsreihen liegt laut Abbildung 54 innerhalb von $1/10$ mm. Die Verschiebung des Streubereichs bei Versuchsreihe V2 zwischen Standardgesenk und flexiblen Werkzeug ist auf einen Unterschied im Einzugsbereich des Bleches, oder auf eine geringe Abweichung der Sollgesenkweite zurückzuführen. Bei allen anderen Versuchsreihen überdecken sich die Streubereiche, wobei diese bei den Umformversuchen der Standardgesenke insgesamt geringer ausfallen, als bei je-

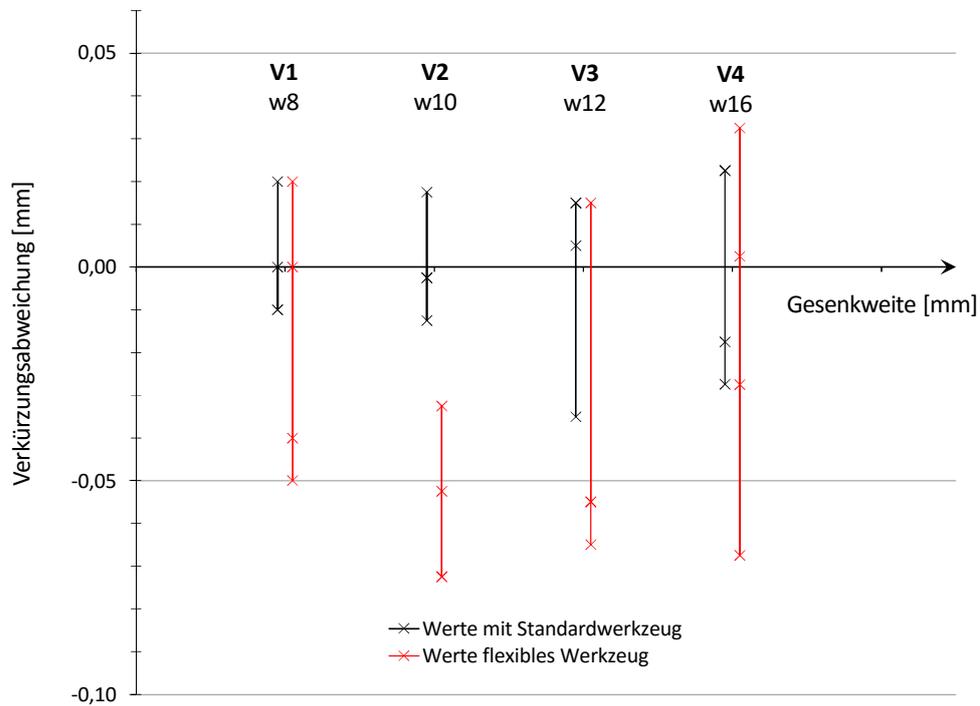


Abbildung 54: Vergleich der Verkürzungsabweichungen zwischen Standardgesenk und flexiblem Werkzeug bei verschiedenen Gesenkweiten/Blehdickenkombinationen bei konstantem Biegewinkel von 90 Grad.

nen des flexiblen Werkzeuges. Alle Abweichungen der Verkürzungswerte liegen jedoch innerhalb von $1/10$ mm. Bezogen auf die Schenkellänge bedeutet dies, dass diese innerhalb eines Toleranzfeldes von $5/100$ mm und somit in der Messtoleranz liegen. Die Auflistung aller für die Validierung relevanten Versuche ist im Versuchsdokumentationsbogen in Anhang A ersichtlich.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Durch die im Biegeprozess stattfindende Einstellung der Gesenkweite wurde eine deutlich geringere Durchführungszeit der Umformversuche vom flexiblen Werkzeug im Vergleich zu den Standardwerkzeugen beobachtet. Im Gegensatz zu Standardwerkzeugen, bei denen nach Beendigung der Versuchsreihe die Gesenke aus der Abkantpresse entfernt und durch Gesenke anderer Gesenkweiten ersetzt wurden, konnte durch Verwendung des flexiblen Werkzeuges ein erheblicher Aufwand an Rüst- und Stillstandszeit vermieden werden. Durch Anpassung einfacher Parameter wie Eintauchtiefe und Klemmpunktposition wird die stufenlose Einstellung gewünschter Gesenkweiten innerhalb des Bereichs mehrerer Standardgesenkweiten sichergestellt.

Bei Abkantungen, wo die Versuchsbleche eine geringere Länge der Biegelinie aufweisen als die Werkzeuglänge, ist darauf zu achten, dass die Biegeproben mittig in das flexible Werkzeug gelegt werden. Eine Gewährleistung der definierten Gesenkweite über die gesamte Werkzeuglänge wird dadurch sichergestellt. Eine Belastung über die Systemgrenzen hinaus ist nicht erlaubt, um die eingesetzten Hydraulikkomponenten nicht zu beschädigen. Durch sachgemäße Verwendung des flexiblen Werkzeuges wird sowohl die Dichtheit unter Belastung, die Gesenkweitenverstellgenauigkeit, sowie die Gesenkweitenwiederholbarkeit garantiert. Auf die korrekte Einstellung der Gesenkweite beim flexiblen Werkzeug ist aufgrund diverser Nachgiebigkeiten zu achten, um während des Umformvorganges die Sollgesenkweite zu erreichen.

Der errechnete Fehler von 10% zwischen theoretischer und gemessener Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems ist auf einen Unterschied zwischen theoretischen und tatsächlichen Kompressionsmodul des Hydrauliköls zurückzuführen. Der tatsächliche Kompressionsmodul kann durch Umstellung von Formel 20 berechnet werden und muss im Bereich der Herstellerangabe liegen. Allerdings würden mögliche Lufteinschlüsse, sowie die Nachgiebigkeit des Ventilsitzes im Einschraubückschlagventil das Ergebnis zum Negativen hin verfälschen. Das Wunschkriterium des Lastenheftes, welches eine annähernd hohe Steifigkeit und geringe Nachgiebigkeit des Werkzeuges ähnlich den Standardwerkzeugen fordert, ist aufgrund der Verwendung eines Hydrauliksystems und den darauf aufbauenden beweglichen Gesenkbacken durch gegebene Nachgiebigkeiten nicht möglich. Ein weiteres Wunschkriterium, welches die Durchführung einer Umformung an einem Blechzuschnitt mit einer Blechdicke von 3 mm, einer Länge der Biegelinie von 200 mm, umgeformt in einem Gesenk mit der Gesenkweite von 16 mm

fordert, konnte durch die Überschreitung der maximal zulässigen Stempelkraft und der daraus resultierenden Überlastung der Hydraulikkomponenten nicht umgesetzt werden. Eine Vergrößerung der Mindestgesenkweite bzw. eine Reduktion der Länge der Biegelinie oder der Blechdicke ist vorzunehmen.

Der Verkürzungswert stellt eine zentrale Größe im Biegeprozess dar. Dadurch, dass sich alle wesentlichen Einflussfaktoren direkt auf den Verkürzungswert auswirken, kann dieser als Indikator für die Beurteilung der Umformergebnisse herangezogen werden.

Auf einen Vergleich der Biegewinkel wird verzichtet, da sich der Einzugsbereich des Blechzuschnittes zwischen Standardwerkzeugen und flexiblen Werkzeug unterscheidet. Eine Abweichung der Istbiegewinkel zwischen Standardgesenken und flexiblen Werkzeug bei gleicher Eintauchtiefe ist die Folge. Dadurch, dass der Biegewinkel nur von der Eintauchtiefe abhängig ist, kann dieser z.B. durch einen Referenzversuch angepasst werden. Bereits am Markt vorhandene, laserunterstützte Hilfsmittel, welche den Biegewinkel während der Umformung messen und die Eintauchtiefe dahingehend anpassen, finden hier möglichen Einsatz.

Die in Abbildung 54 ersichtliche Abweichung der Streuung der Verkürzungsabweichungen des flexiblen Werkzeuges ist auf die Steifigkeit des Werkzeuges zurückzuführen. Die auftretenden Nachgiebigkeiten unterscheiden sich maßgebend zu Standardwerkzeugen. Die geringere Streuung der Verkürzungsabweichungen der Standardwerkzeuge beweist die Tatsache, dass diese praktisch keine Nachgiebigkeiten aufweisen und eine hohe Steifigkeit besitzen.

Ein weiterer Einflussfaktor, welcher bei den Verkürzungsabweichungen eine Rolle spielt ist der Zuschnitt der Versuchsbleche. Abweichungen in der Rechtwinkligkeit des Zuschnitts wirken sich negativ auf die gemessenen Schenkellängen und somit auf gemessene Verkürzungswerte aus. Weitere Fehler wie Messunsicherheiten, hervorgerufen durch fehlende Rechtwinkligkeit der Versuchsproben oder falsche Handhabung der Messgeräte tragen zur qualitativen Verschlechterung der Messergebnisse bei. Zufällige Fehler wie Materialschwankungen o.ä. können nicht berücksichtigt werden und wirken sich negativ auf die Messergebnisse aus, jedoch wird versucht, diese Fehler durch Verwendung von Blechzuschnitten der gleichen Blechcharge zu vermeiden.

Allgemeintoleranzen von Schenkellängen liegen beim Freibiegen bei ca. $3/10\text{mm}$, bezogen auf die Verkürzung bedeutet dies eine Abweichung von $6/10\text{mm}$. Die geringe Verbreiterung des Streubereiches der Verkürzungsabweichungen des flexiblen Werkzeuges, ersichtlich in Abbildung 54, ist im Vergleich zu diesen Allgemeintoleranzen

vernachlässigbar.

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Validierung ist erwiesen, dass durch Verwendung des flexiblen Werkzeuges gleiche Umformergebnisse erzielt werden können, wie mit Standardgesenken. Dieses Musskriterium des Lastenheftes wurde erfüllt. Alle zusätzlich geforderten Musskriterien wurden ebenso eingehalten, die Abgrenzungskriterien vermieden.

Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit eines solchen Werkzeuges darf nicht außer Acht gelassen werden, da die Herstellkosten dieser Werkzeuge diejenigen von Standardgesenken bei Weitem überschreiten. Eine Kosten-Nutzen Analyse ist daher unumgänglich. Zudem müssen einzelne Fertigungsverfahren bei der Herstellung der Werkzeuge wie Koordinatenschleifen der Bohrungen und Drahterodieren der Außenkontur von Gesenkbacke und fixem Gesenkteil überdacht werden, da diese Fertigungskosten ca. 60% der Herstellkosten in Anspruch nehmen. Zusätzliches Einsparungspotential bezüglich Herstellkosten ist durch eine alternative Absperrung des Hydrauliksystems gegeben. Durch Ersatz des Kleinstmotors samt Ventilöffnung werden nicht nur Kosten eingespart, sondern auch die Fertigung des fixen Gesenkteils erleichtert.

Werden all diese Aspekte berücksichtigt und somit ein vergleichsweise günstiges Werkzeug hergestellt, kann mit geringem Werkzeugaufwand eine hohe Gesenkviefalt für den Umformprozess Freibiegen gewährleistet werden.

Leerseite

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend vom Stand der Technik des Freibiegens, der momentan am Markt vorhandenen, gesenkweitenverstellbaren Biegewerkzeuge und der daraus resultierenden Problematik wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, welches als eigenständiges und in den Biegeprozess integrierbares Werkzeug Anwendung findet. Aus einer Auflistung der bereits am Markt bestehenden Werkzeuge wurden Vor- und Nachteile aufgezählt, welche für das flexible Werkzeug Bedeutung finden.

Durch Definition eines Lastenheftes wurde klar definiert, welche Eigenschaften das flexible Werkzeug erfüllen muss, bzw. welche Rahmenbedingungen eingehalten werden müssen. Innerhalb der Werkzeugentwicklung in Kapitel 5 erfolgte die Gestaltung der beweglichen Gesenkbacken und des fixen Gesenkteils, sowie die Auswahl der erforderlichen Komponenten für Absperrvorrichtung und Hydrauliksystem. Die Berechnung der maximal zulässigen Kräfte auf das flexible Werkzeug dient als Grenze des zulässigen Belastungsbereichs.

Anhand geeigneter Umformversuche mit dem umgesetzten Werkzeug konnte bewiesen werden, dass durch den Einsatz des flexiblen Werkzeugsystems die gleichen Umformergebnisse erzielt werden können, wie mit Standardwerkzeugen und damit die Substitution von Standardgesenken durch das entwickelte, verstellbare Biegegesenk zulässig ist. Dies stellt eine Verbesserung für den Biegeprozess dar.

Leerseite

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Beschreibung
x	mm	Anschlagposition
V_0	mm ³	Ausgangsvolumen
M_A	Nm	benötigtes Drehmoment des Kleinstmotors
r_i	mm	Biegeradius
α	°	Biegewinkel
s	mm	Blechdicke
d_1	mm	Durchmesser Gesenkbackenkolben
d_2	mm	Durchmesser Rückstellkolben
y	mm	Eintauchtiefe
r_E	N/mm	Einzugsradius Unterwerkzeug
F	N	Federkraft der Rückstellfeder
w	mm	Gesenkweite
f_1		gesenkweitenabhängiger Faktor
f_2		gesenkweitenabhängiger Faktor
A	mm ²	Grundfläche, auf welche Kraft F wirkt
A_0	mm ²	Grundfläche der Kolben
K_{Komp}	Pa	Kompressionsmodul
F_B	N	Kraft auf Gesenkbacken
F_P	N	Kraft auf Hydrauliksystem
p_{krit}	Pa, bar	Kritischer Druck im Hydrauliksystem
b	mm	Länge der Biegelinie
l	mm	Länge der Rückstellfeder

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	mm	Länge des Betätigungshebels
w_{max}	mm	maximal mögliche Gesenkweite
Δp	Pa, bar	maximal möglicher Druck im Hydrauliksystem
$V_{momentan}$	mm ³	Momentanvolumen
M_N	Nm	Motornendrehmoment
Δx	mm	Nachgiebigkeit der Gesenkbacken in x-Richtung
Δy	mm	Nachgiebigkeit der Gesenkbacken in y-Richtung
Δn	mm	Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems
OW		Oberwerkzeug, Biegestempel
K		Rückfederungsverhältnis
$\Delta \alpha$	°	Rückfederungswinkel
w_{soll}	mm	Sollgesenkweite
F_{St}	N	Stempelkraft
r_{St}	mm	Stempelradius
UW		Unterwerkzeug, Biegematrize
V_{verdr}	mm ³	Verdrängtes Ölvolumen
z	mm	Verfahrweg der Gesenkbackenkolben
v	mm	Verkürzung
ΔV	mm ³	Volumenverringerng durch Belastung der Gesenkbacken
γ	°	Winkel für Ventilöffnung
F_1	N	y-Komponente der Kraft F_B
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
h	mm	Öffnungsweg der Feder des Rückschlagventils

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Einteilung der Biegeumformverfahren	3
Abbildung 2	Einteilung Freibiegen	4
Abbildung 3	Übersicht Umformprozess Freibiegen	5
Abbildung 4	Prinzip Luftbiegen	6
Abbildung 5	Verlauf des Krümmungsradius	7
Abbildung 6	Spannungen im gebogenen Blech	7
Abbildung 7	Mögliche Bauteilfehler beim Freibiegen	7
Abbildung 8	Definition Rückfederung	8
Abbildung 9	Rückfederungsverhältnis K	9
Abbildung 10	Berechnungsgrundlage der gestreckten Länge	9
Abbildung 11	Berechnung der gestreckten Länge mittels Verkürzung	10
Abbildung 12	Lage der Biegelinie	11
Abbildung 13	Musterbauteile	12
Abbildung 14	Realbiegebauteile	12
Abbildung 15	Konventionell hergestellter Seitenaufprallträger eines PKWs	13
Abbildung 16	Seitenaufprallträger eines PKWs hergestellt durch aufeinanderfolgende Biegeumformungen	13
Abbildung 17	Beschreibung eines Werkzeuges beim Freibiegen	14
Abbildung 18	UKB Matrize	16
Abbildung 19	Mögliche Verstellung UKB Matrize	17
Abbildung 20	Werkzeuge von EHT	17
Abbildung 21	Werkzeug basierend auf dem Keilprinzip	18
Abbildung 22	Universelles Werkzeugsystem	18
Abbildung 23	Accurpress Adjustable Channel-Lock-Die	19
Abbildung 24	WILA MultiV-Matic	20
Abbildung 25	Gesenkweitenverstellung - Prinzip	27
Abbildung 26	Gesenkweitenverstellung - Prinzip inklusive Absperrung	28
Abbildung 27	Prinzipskizze Verstellmöglichkeit	30
Abbildung 28	Ausführung Gesenkbacke	31
Abbildung 29	Gesenkbacke mit und ohne Gesenkleiste	32
Abbildung 30	Fixer Gesenkteil	33

Abbildung 31	Zusammenführung Gesenkbacken und fixer Gesenkteil	34
Abbildung 32	Kräfte-situation beim Freibiegen	35
Abbildung 33	Zulässige Blechdicken/Gesenkweiten Kombinationen	36
Abbildung 34	Stempelkraft beim Freibiegen	36
Abbildung 35	Kräfte-situation bei Belastung der Gesenkbacken	37
Abbildung 36	Zerlegung der Kräfte auf die Gesenkbacken	38
Abbildung 37	Mögliche Druckbereiche im Werkzeug	39
Abbildung 38	Einschraub-rückschlagventil	40
Abbildung 39	Öffnungsmöglichkeit des Rückschlagventils	42
Abbildung 40	Wippschalter für Ansteuerung des Kleinstmotors	44
Abbildung 41	Prinzipschaubild Hydrauliksystem	46
Abbildung 42	PTFE Stangendichtsatz	46
Abbildung 43	Zusammenbau Prototyp	47
Abbildung 44	Nachgiebigkeit der Gesenkbacke bei Belastung	49
Abbildung 45	Zusammenbau flexibles Werkzeugsystem	51
Abbildung 46	Versuchs- und Messaufbau flexibles Werkzeugsystem	52
Abbildung 47	Zusätzliche Messuhren zur Validierung	52
Abbildung 48	Messaufbau zur Schenkellängen- und Winkelmessung	53
Abbildung 49	Nachgiebigkeiten der Gesenkbacken	55
Abbildung 50	Vergleich Einzugsradius Standardgesenk - flexibles Werkzeugsystem	56
Abbildung 51	Analyse Radienkorrekturwerte	56
Abbildung 52	Validierung der Nachgiebigkeit des Hydrauliksystems mittels Messuhren	58
Abbildung 53	Blechprobe; vorher - nachher	59
Abbildung 54	Vergleich der Verkürzungsabweichungen	64

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Zusammenfassung Gesenkweitenverstellbare Sonderwerkzeuge .	22
Tabelle 2	Übersicht Ergebnisse aus Druckberechnung	41
Tabelle 3	Radienkorrektur	57
Tabelle 4	Ausgewählte Umformversuche	61
Tabelle 5	Versuchsreihen der ausgewählten Gesenkweiten / Blechdicken- kombinationen	63

Leerseite



ANHANG A

Probennummer	Maschinenparameter	Gesamtlänge wolle (mm) laut Zeichnung	Gesamtlänge Gesenkwerte (mm)	Bleichte (mm)	Infowert für Dokumentation Bleichte (mm)	Länge der Beleglinie b (mm)	Offnungsgewinkel (Bo) (°)	Schenkelhöhe A (mm)	Schenkelhöhe B (mm)	Infowert für Dokumentation (mm)	Offnungsgewinkel (Bo) (°)	Schenkelhöhe A (mm)	Schenkelhöhe B (mm)	Winkelabweichung (°)	Schenkelhöhe A (mm)	Schenkelhöhe B (mm)	Verkürzungsabweichung (mm)	Verkürzungsabweichung (mm)	normierte Verkürzungsabweichung
D01	7036, A1 2/2, Z450	16	16	3	2,98	60	90	70	65,45	129,99	90,083	69,88	65,44	-0,083	0,120	0,009	-5,330	0,129	-0,027
D02	7036, A1 2/2, Z451	16	16	3	2,98	60	90	70	65,45	129,99	90,167	69,89	65,42	-0,167	0,110	0,029	-5,320	0,139	-0,017
D03	7036, A1 2/2, Z452	16	16	3	2,98	60	90	70	65,46	130,00	90,167	69,87	65,41	-0,167	0,130	0,049	-5,280	0,179	0,022
D04	7036, A1 2/2, Z453	16	16	3	2,98	60	90	70	65,47	130,01	90,417	69,89	65,4	-0,417	0,110	0,069	-5,280	0,179	0,022
D05	7036, A1 2/2, Z450	16	15,55	3	2,99	60	90	70	65,48	130,02	89,833	69,84	65,48	0,167	0,160	-0,001	-5,300	0,159	0,003
D06	7036, A1 2/2, Z450	16	15,55	3	2,99	60	90	70	65,49	130,03	90,000	69,89	65,51	0,000	0,110	-0,021	-5,370	0,089	-0,068
D07	7036, A1 2/2, Z450	16	15,55	3	2,99	60	90	70	65,47	130,01	91,000	69,86	65,42	-1,000	0,140	0,049	-5,270	0,189	0,032
D08	7036, A1 2/2, Z450	16	15,87	3	2,97	60	90	70	65,46	130,00	90,167	69,9	65,43	-0,167	0,100	0,029	-5,330	0,129	-0,028
D09	7036, A1 2/2, Z450	12	12	2,5	2,46	60	90	70	64,36	129,97	90,250	69,96	64,27	-0,250	0,040	0,094	-4,260	0,134	0,015
D10	7036, A1 2/2, Z451	12	12	2,5	2,46	60	90	70	64,34	129,95	90,167	69,96	64,25	-0,167	0,040	0,094	-4,260	0,134	0,015
D11	7036, A1 2/2, Z452	12	12	2,5	2,46	60	90	70	64,36	129,97	90,167	69,95	64,29	-0,167	0,050	0,074	-4,270	0,124	0,005
D12	7036, A1 2/2, Z453	12	12	2,5	2,46	60	90	70	64,37	129,98	90,167	69,94	64,35	-0,167	0,060	0,024	-4,310	0,084	-0,035
D13	7036, A1 2/2, Z456, GL	12	12,78	2,5	2,46	60	90	70	64,37	129,98	89,917	69,97	64,34	0,083	0,030	0,034	-4,330	0,064	-0,055
D14	7036, A1 2/2, Z456, GL	12	12,78	2,5	2,46	60	90	70	64,37	129,98	90,500	69,98	64,26	-0,500	0,020	0,114	-4,260	0,134	0,015
D15	7036, A1 2/2, Z456, GL	12	12,78	2,5	2,46	60	90	70	64,37	129,98	89,667	69,99	64,32	0,333	0,010	0,054	-4,330	0,064	-0,055
D16	7036, A1 2/2, Z456, GL	12	12,78	2,5	2,46	60	90	70	64,37	129,98	89,583	69,99	64,33	0,417	0,010	0,044	-4,340	0,054	-0,065
D17	7036, A1 2/2, Z453	10	10	2	1,94	60	90	70	63,58	129,98	90,333	69,95	63,52	-0,333	0,050	0,057	-3,490	0,107	-0,003
D18	7036, A1 2/2, Z454	10	10	2	1,94	60	90	70	63,58	129,98	90,250	69,94	63,51	-0,250	0,060	0,067	-3,470	0,127	0,018
D19	7036, A1 2/2, Z455	10	10	2	1,94	60	90	70	63,57	129,97	90,167	69,94	63,53	-0,167	0,060	0,037	-3,500	0,097	-0,012
D20	7036, A1 2/2, Z456	10	10	2	1,94	60	90	70	63,57	129,97	90,167	69,95	63,51	-0,167	0,060	0,057	-3,490	0,107	-0,002
D21	7036, A1 2/2, Z456, GL	10	10,97	2	1,94	60	90	70	63,61	130,02	89,833	70,01	63,53	0,167	-0,010	0,077	-3,520	0,077	-0,032
D22	7036, A1 2/2, Z456, GL	10	10,97	2	1,94	60	90	70	63,60	130,02	89,500	70,03	63,53	0,500	-0,030	0,067	-3,540	0,057	-0,052
D23	7036, A1 2/2, Z456, GL	10	10,97	2	1,94	60	90	70	63,59	130,01	89,667	70,04	63,53	0,333	-0,040	0,057	-3,560	0,037	-0,073
D24	7036, A1 2/2, Z456, GL	10	10,97	2	1,94	60	90	70	63,58	130,00	89,667	70,05	63,51	0,333	-0,050	0,067	-3,560	0,037	-0,072
D25	7036, A1 2/2, Z456	8	8	1,5	1,49	60	90	70	62,67	129,91	90,083	70,05	62,56	-0,083	-0,050	0,106	-2,700	0,056	0,000
D26	7036, A1 2/2, Z457	8	8	1,5	1,49	60	90	70	62,70	129,94	90,167	70,04	62,61	-0,167	-0,040	0,086	-2,710	0,046	-0,010
D27	7036, A1 2/2, Z458	8	8	1,5	1,49	60	90	70	62,70	129,94	90,250	70,05	62,6	-0,250	-0,050	0,096	-2,710	0,046	-0,010
D28	7036, A1 2/2, Z459	8	8	1,5	1,49	60	90	70	62,75	129,99	90,250	70,03	62,64	-0,250	-0,030	0,106	-2,680	0,076	0,020
D29	7036, A1 2/2, Z456, GL	8	8,15	1,5	1,49	60	90	70	62,77	130,01	90,417	69,98	62,71	-0,417	0,020	0,056	-2,680	0,076	0,020
D30	7036, A1 2/2, Z456, GL	8	8,15	1,5	1,49	60	90	70	62,75	129,99	90,250	70,03	62,7	-0,250	-0,030	0,046	-2,740	0,016	-0,040
D31	7036, A1 2/2, Z456, GL	8	8,15	1,5	1,49	60	90	70	62,69	129,93	90,167	69,99	62,64	-0,167	0,010	0,046	-2,700	0,056	0,000
D32	7036, A1 2/2, Z456, GL	8	8,15	1,5	1,49	60	90	70	62,69	129,93	90,000	70,03	62,65	0,000	-0,030	0,036	-2,750	0,006	-0,050

Leerseite

LITERATUR

- [Pri92] Priv.-Doz. Dr.-Ing. Mathias Kleiner, Hrsg. *Umformtechnik: Ideen, Konzepte und Entwicklungen: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Eberhard v. Finkenstein*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1992.
- [Wiro9] Wirtschaftsverlag. *Biegen ohne Brechen: Abkantpressen: special: Maschinen*. 2009. URL: <http://www.wirtschaftsverlag.at/bilder/d76/SpecialBiegen.pdf>.
- [Dip16] Dipl.-Ing. Christian Gasser. „Beitrag zur Erweiterung der Anwendungsgebiete des Freibiegens am Beispiel der Substitution von funktionellen Schalenbauteilen“. Diss. Graz: Technische Universität Graz, 2016.
- [Sie15] K. Siegert. *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. VDI-Buch. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [DB10] E. Doege und B.-A. Behrens. *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [Hei05] Heinz Tschätsch. *Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. 8. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2005.
- [Bys13] Bystronic.com. *Bystronic Tools: Werkzeugkatalog Version 3.0: Laser, Bending, Waterjet*. 2013. URL: https://webshop.bystronic.com/Content/BendingTools_DE.pdf.
- [Kur90] Kurt Lange. *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [Tru96] Trumpf GmbH + Co. *Faszination Blech: Flexible Bearbeitung eines vielseitigen Werkstoffes*. Stuttgart: Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH, 1996.
- [BHS13] A. Birkert, S. Haage und M. Straub. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013.
- [Deu] Deutsches Institut für Normung e. V. *Kaltbiegen von Flacherzeugnissen aus Stahl*.

- [EVN16] EVN Blechbearbeitung GmbH. *Biegebauteile*. Hrsg. von EVN Blechbearbeitung GmbH. 2016. URL: <http://www.evn-blechverarbeitung.de/>.
- [KM 16] KM Blechbearbeitung. *Biegebauteile: Showroom*. Hrsg. von KM Blechbearbeitung GmbH. 2016. URL: <http://www.km-blechbearbeitung.de/unternehmen/showroom/>.
- [Hos92] Hosen Sulaiman. *Konstruktion eines Unterwerkzeuges für das Gesenkbiegen mit variabler Gesenkweite: Interner Bericht*. Dortmund: Teubner, 1992.
- [Tru11] Trumpf GmbH + Co. *Verstellbare Matrize für viele Gesenkweiten: Eine für alles*. 2011. URL: http://www.blechhelden.com/kurz-gemeldet/eine-fuer-alles_4873/?output=pdf.
- [UKB] UKB Matrize. *UKB Matrize: UKB-Verstellbare Matrizen*. URL: <http://www.ukb-gmbh.de/fileadmin/pdf/UKB-Verstellbare-Matrizen.pdf>.
- [Acc16] Accurpress America Inc. *Tooling Systems*. 2016. URL: <http://www.accurpress.com/pdfs/ToolingCatalogue.pdf>.
- [Tru16] Trumpf Werkzeugmaschinen Teningen GmbH. *EHT Biegewerkzeuge: Biegetechnik*. 2016. URL: http://www.eht.de/fileadmin/dateien/produkte/EHT-Biegewerkzeuge/EHT_Biegewerkzeuge_DE_201605_01.pdf.
- [WIL16] WILA. *Press Brake Productivity Catalog*. 2016. URL: http://www.hesse-maschinen.com/uploads/media/Wila_2016_DE.pdf.
- [Ger63] Gerhard Oehler. *Biegen unter Pressen, Abkantpressen, Abkantmaschinen, Walzenrundbiegemaschinen, Profilwalzmaschinen*. Hanser, 1963.
- [HAW16] HAWE Hydraulik. *Rückschlagventil Typ RK und RB: Produktdokumentation*. 2016. URL: <http://downloads.hawe.com/7/4/D7445-de.pdf>.
- [Meu16] Meusburger. *Systemdruckfedern*. Hrsg. von Meusburger Georg GmbH & Co KG. 2016. URL: <http://ecom.meusburger.com/files/pdf/e/e15365.pdf>.
- [Fau16] Faulhaber. *DC Kleinstmotoren: Graphitkommutierung*. Hrsg. von DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG. 2016. URL: https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/DE_3242_CR_DFF.PDF.
- [Hen16] Hennlich & Zebisch GmbH. *PTFE-Stangendichtsatz S16/S216*. Hrsg. von Hennlich & Zebisch GmbH. 2016. URL: http://www.hennlich.at/uploads/S16-S216_2015.pdf.
- [Wil+11] D. Will u. a. *Hydraulik: Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. 5., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin und New York: Springer, 2011.