

Erhöhung der Flexibilisierung des Rotationszugbiegens mit reduzierten Werkzeugen

Christopher Heftrich^{1,a} und Bernd Engel²

¹MPA Technology GmbH, 57299 Burbach, Deutschland

²Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Deutschland

^achristopher.heftrich@mpa-tec.com

Keywords: Rotationszugbiegen, Flexibilität, Werkzeugkonstruktion, Rüstprozess.

Abstract. Die Werkzeugsätze für das Rotationszugbiegen werden nach den Abmessungen der Halbzeuge und den gewünschten Biegeradien ausgelegt. Für mehr Flexibilität können die Werkzeugoberflächen geteilt und verstellbar ausgeführt werden. Ausgehend von der Verteilung der Kontaktnormalspannungen wurden in dieser Arbeit reduzierte Oberflächen abgeleitet. Der Einfluss dieser Oberflächen auf die Qualität der Bögen zeigt die technischen Möglichkeiten der Reduzierung der Werkzeuge auf.

Einleitung

Der Weg von der Massenproduktion zu einer wirtschaftlich nachhaltigen personalisierten Massenproduktion erfordert ein Neudenken der gesamten Produktentwicklungskette. Die Kunden müssen eng in die Produktion ihres individuellen Produktes eingebunden werden [1]. Voraussetzungen für eine „Production on Demand“ sind eine schnelle ordnungsgemäße Rüstung der Produktionsmaschine [2], eine stabile Prozessregelung [3] sowie Werkzeuge, die mit Hilfe von Sensoren und ggf. Aktoren auf Produktänderungen und Prozessschwankungen reagieren.

Für die Wirtschaftlichkeit personalisierter Produktion sind flexible und skalierbare Fertigungsverfahren von Bedeutung. Das Potential bestehender Verfahren, wie das des Freiformbiegens, sollte besser genutzt werden [4]. Skalierbare Verfahren, wie das inkrementelle Schwenkbiegen [5], ermöglichen die Herstellung von bisher unwirtschaftlichen Losgrößen. Ebenso kann auch die weitere Nutzung älterer Maschinen in aktuellen Prozessketten sowie die Erforschung alternativer Werkzeugwerkstoffe [6] zu nachhaltigerer Produktion beitragen.

Das Rotationszugbiegen (RZB), welches häufig beim Biegen von Rohrprofilen in der Automobil-, Bau-, Sanitär- und Luftfahrtindustrie Anwendung findet, ist heute schon ein flexibles Verfahren, mit dem komplexe Biegungen hergestellt werden [7]. Da die Produktgeometrie durch Halbzeuge und Werkzeuge bestimmt wird, können kleine Toleranzen bei einzelnen und mehreren Bögen eingehalten werden. Der Biegeradius kann dabei nur variieren, wenn mehrere unterschiedliche Biegeformen eingesetzt werden [8].

Die Produktvielfalt steigt seit den 1980-er, aber die Produktivität nimmt seither ab [9]. Diese größere Variantenvielfalt führt zu sinkenden Losgrößen [10]. Derzeit werden Werkzeuge in der Umformtechnik für die Massenproduktion ausgelegt und meist spanend hergestellt [11]. Beim RZB wird der Biegeradius durch die Biegeform bestimmt. Die Kavitäten der Werkzeuge sowie der Dorndurchmesser sind an die Halbzeugabmessungen angepasst. Die Fertigung sehr kleiner Lose bedingt Werkzeuge, die an unterschiedlichen Biegeaufgaben anpassbar sind. Das Potential zur Flexibilisierung der Produktgeometrien steigt mit Abnahme der Werkzeugbindung [12]. Zur dessen Nutzung ist die Kenntnis der Entwicklung und Verteilung einzelner Wirkflächenbereiche sowie deren Relevanz erforderlich.

Stand der Technik

Rotationszugbiegen

Formgebundene Biegeverfahren bilden die Biege- und Profilgeometrie zu einem möglichst hohen Grad ab und eignen sich daher für anspruchsvolle Biegeaufgaben [13]. Das RZB ist ein weit verbreitetes formgebundenes Biegeverfahren zum Biegen von Rohren [13], [14]. Selbst bei dünnwandigen Rohren können Biegeradien kleiner $1xD$ gebogen werden [15], [7]. Mit dem RZB werden meist Rundrohre, aber auch andere Voll- und Hohlprofile gebogen [16].

Für die Umformung erfolgt die Krafteinleitung durch das Biegemoment bei überlagerter Längskraft [16]. Dabei sind die Biegeform, die innere und die äußere Klemmbacke sowie der Gegenhalter für die Biegung notwendige Werkzeuge. Zunächst wird das Rohr zwischen den Klemmbacken geklemmt, um die Rotation der Biegeform auf das Rohr zu übertragen. Das Biegemoment wird durch die Abstützung des Rohres am Gegenhalter aufgebracht. Die Vorschubeinheit, welche das Rohr meist an dessen Ende spannt, kann der Wanddickenreduktion am Außenbogen durch Mitlaufen bzw. Nachschieben entgegen wirken [17]. Beim aktiven Nachschieben (Boosten) bei großer ungestützter Rohrlänge, besteht das Risiko, dass die resultierende Druckspannung zum Knicken des Rohres führen kann. Die Druckspannung kann, besonders bei kleinen Biegeradien und dünnwandigen Rohren, zur Ausbildung von Falten senkrecht zur Rohrlängsachse führen. Um dem entgegenzuwirken kann zusätzlich zum Biegedorn ein Faltenglätter verwendet werden [18]. Ebenso kann die Faltenbildung verringert werden, wenn die Geschwindigkeit der Vorschubeinheit geringer als die Biegegeschwindigkeit gewählt wird [17]. Dies kann auch bei Versuchen in dieser Arbeit genutzt werden.

Rotationszugbiegewerkzeuge

Die Profilkavitäten der Werkzeuge werden passend zu dem Durchmesser des Halbzeugs ausgelegt. Der Biegedorn ist an den Innendurchmesser angepasst. Sein Schaft stützt den geraden Bereich und vermindert so eine Faltenbildung. Die Kugeln stützen den Außenbogen und verringern Querschnittsdeformation. Weiter beeinflussen Dorngeometrie, Position des Dorns, Spiel zwischen Rohr und Dorn, Anzahl der Dornglieder, Dornmaterial sowie Schmierung des Dorns die Geometrieabweichungen, vgl. [17], [19], [20], [21]. Die Länge des Dorns soll nach [22] das Drei- bis Vierfache des Rohrdurchmessers betragen.

Der Faltenglätter ist an den Biegeradius angepasst. Er füllt den Freiraum zwischen Biegeform und dem geradem Rohrschenkel. Er wird durch eine aufwändige spanende Bearbeitung mehrfach gekrümmter Flächen hergestellt [17]. Seine Länge soll mindestens das Zwei- bis Dreifache des Rohrdurchmessers betragen [22]. Größere Gegenhaltestellungen erlauben eine Kürzung der Faltenglätterspitze im Bereich der Biegeform, da die Falten bereits im Bereich deutlich vor der Übergangsebene E_G (s. Abb. 1 a) entstehen [17], [18].

Die Mindestlänge des Gegenhalters entspricht ebenfalls dem Zwei- bis Dreifachen des Rohrdurchmessers. Bei mitlaufendem oder schiebendem Gegenhalter wird die verfahrenende Bogenlänge vorgehalten [16]. Beim Mitlaufen des Gegenhalters ist die Relativbewegung zwischen Gegenhalter und Rohr kleiner, wodurch Reibkräfte am Außenbogen in Längsrichtung verringert werden. Durch Nachschieben des Gegenhalters wird aktiv Material aus dem, noch nicht gebogenen Rohrabchnitt in die Umformzone geschoben. Daher treten weniger oft Einschnürungen, am Außenbogen auf [17]. Das Auftreten von Falten am Innenbogen wird damit jedoch begünstigt. Rollenwerkzeuge können auch als Gegenhalter verwendet werden, z.B. wenn der Biegeprozess aus RZB und Drei-Rollen-Schub-Biegen besteht [23].

Die Biegeform definiert neben dem Profilquerschnitt auch den Biegeradius. Halbzeuge aus Werkstoffen mit einem elastischen Anteil der Formänderung, federn nach dem Biegen zurück. Dabei verbleibt eine Restspannung (Eigenspannung) im Profil. Die Veränderung des Biegewinkels wird kompensiert, indem unter Last ein größerer Biegewinkel gebogen wird. Die Rückfederung führt auch zur Vergrößerung des Biegeradius nach dem Rückfedern. Eine Korrektur kann derzeit nur vorgenommen werden, indem die Biegeform mit geringerem

Durchmesser gefertigt wird [23]. Wegen des hohen Fertigungsaufwands – speziell, weil die Rückfederungen auch werkstoffabhängig sind – wird diese Methode bisher kaum genutzt. Die Kavitätsgeometrie besitzt großen Einfluss auf die Rohrbogenovalität [24], [25].

Innere und äußere Klemmbacke fixieren das Profil und übertragen die erforderliche Zugkraft reibschlüssig über die Spannkraft. Zur Übertragung der benötigten Zugkraft ohne unzulässige Querschnittsdeformation ist eine Mindestlänge für die Klemmbacken erforderlich [16].

Flexibilisierungsansätze des Rotationszugbiegens

KALE untersucht die Querschnittsdeformation beim Abrollbiegen [25]. Das Rohr wird dabei mit einer Rolle über die Biegeform gebogen, ohne eine Zugkraft aufzubringen. Bei den Experimenten wurden unterschiedliche Querkräfte senkrecht zur Biegerichtung aufgebracht. Dies erfolgte über Zustellung flacher Werkzeugplatten. Er zeigt, dass mit größerer Querkraft die Querschnittsdeformation abnimmt.

WEN teilte die Werkzeuge in der Biegebene. Distanzstücke zwischen den geteilten Kavitäten machen den Werkzeugsatz für mehrere Rohrdurchmesser verwendbar [24]. Dabei liegt das Rohr nur für den größten ausgelegten Rohrdurchmesser vollumfänglich in der Werkzeugkavität an, die nahezu einem idealen Kreis entspricht. Je kleiner der Rohrdurchmesser, desto weniger Kontaktfläche bietet die Biegeformkavität, die mehr einem Oval entspricht. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Querschnittsdeformation geringer ist, wenn die Biegeformkavität größer als der Rohrdurchmesser ist.

ZARDOSHTIAN ersetzt den Biegedorn durch ein unter Druck stehendes flüssiges Medium, welches die Innenkontur des zu biegenden Rohres stützt. Dazu müssen allerdings die Rohrenden abdichtbar sein [26].

ŘIHÁČEK untersucht die Geometrie des Gegenhalters beim RZB, um die Querschnittsdeformation des gebogenen Rohres zu verringern. Er untersuchte Gegenhalter mit vollumfänglicher Kavität, mit zwei vereinfachten ebenen Flächenkontakten und mit drei vereinfachten ebenen Flächenkontakten [27]. Beide vereinfachte Gegenhalterflächen verkleinerten die maximale Ovalität gegenüber der vollumfänglichen Kavität.

Charakterisierung prozessrelevanter Werkzeugflächen

Werkzeuge übertragen Kräfte über Kontaktflächen auf Werkstücke. Für eine Vereinfachung und Auftrennung von Werkzeugen ist zunächst zu untersuchen, wie sich Kontaktflächen während des Biegeprozesses verändern und welche Kräfte übertragen werden. Diese Wirkfläche A_{Press} ist abhängig von Zeit und Ort (s. Abb. 1 a) und kann von der Kontaktspannung C_{Press} , abgeleitet werden, vgl. Gl. 1.

$$A_{\text{Press}}(\alpha, \beta, \gamma) := A(\alpha, \beta, \gamma) \quad \text{für die gilt} \quad C_{\text{Press}}(\alpha, \beta, \gamma) > 0 \quad (1)$$

Als Wirkfläche wird somit jede Fläche bezeichnet, die zu einem Zeitpunkt während des Prozesses Kontakt zum Rohr besitzt. Beim Biegen liegt das Rohr zu Beginn in einer sehr kleinen Zone an der Biegeform an. Diese Kontaktfläche nimmt mit dem aktuellen Biegewinkel α zu. α beginnt bei der Übergangsebene E_G , die den Bogenanfang definiert, und endet bei der Übergangsebene E_K (s. Abb. 1 a). Die Kontaktspannung variiert hinsichtlich des Bogenwinkels β und des Rohrumfangwinkels γ .

Manche Flächenbereiche besitzen nicht während des gesamten Prozesses Kontakt zum Rohr. Zur Auslegung von Werkzeugen, die bei der Umformung unveränderlich sind, ist die kumulierte Wirkfläche $A_{\text{Press,kum}}$ mit Gl. 2 definiert. Alle über den zeitlichen Verlauf aufgetretenen A_{Press} werden zusammengefasst. Zur Bestimmung wird das Maximum der C_{Press} bis zum aktuellen Biegewinkel berechnet. Flächenelemente, die über den betrachteten Biegefortschritt Kontaktspannungen aufwiesen, werden zur $A_{\text{Press,kum}}$ gezählt.

$$A_{\text{Press,kum}}(\alpha, \beta, \gamma) := A(\alpha, \beta, \gamma) \quad \text{für die gilt} \quad \max_{\alpha} C_{\text{Press}}(\alpha, \beta, \gamma) > 0 \quad (2)$$

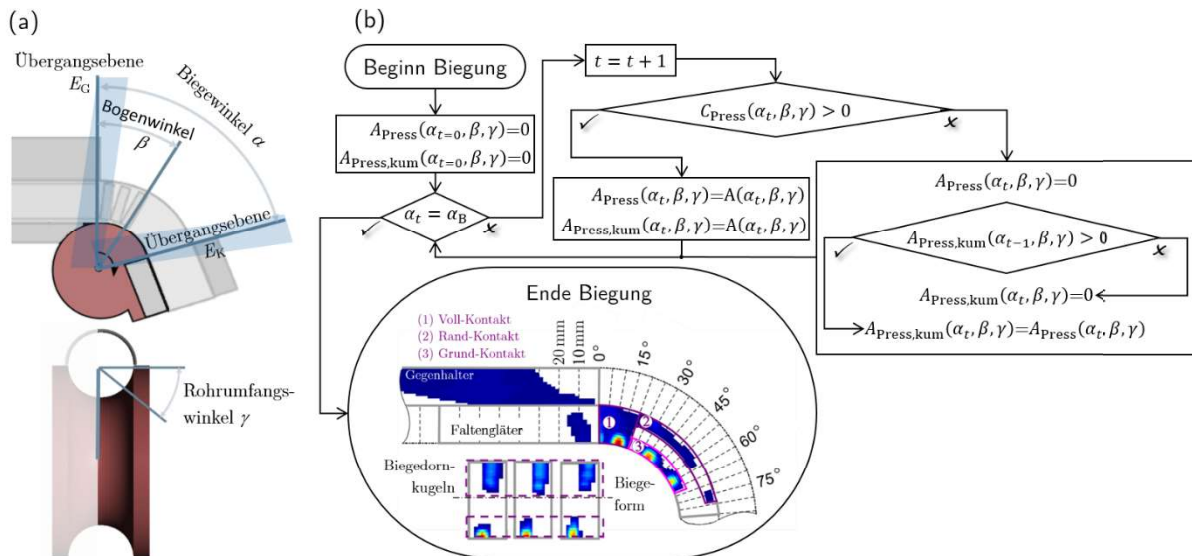


Abb. 1: (a) Fortschritts- und Ortsparameter zur Beschreibung der Wirkfläche, (b) Ermittlung der kumulierten Wirkfläche

Bei der Ermittlung wird nach dem in Abb. 1 b, dargestellten Schema vorgegangen. Zunächst wird eine Nullmatrix für A_{Press} und $A_{Press,kum}$ initialisiert. Zu jedem Zeitschritt t werden die einzelnen Flächenelemente der A_{Press} ermittelt und in der Matrix gespeichert. Für die $A_{Press,kum}$ gilt dies ebenfalls, solange C_{Press} größer Null ist. Flächenelemente, auf die keine Kontaktspannungen wirken, werden mit dem Eintrag der $A_{Press,kum}$ des vorherigen Zeitschritts verglichen. Ist dieser größer Null, wird die aktuelle Fläche gespeichert. HEFTRICH entwickelte die Methode zur Untersuchung des Rotationszugbiegens mit FE-Simulationen zur Vereinfachung der Werkzeuggeometrien [28]. Die Untersuchung der Kontaktspannung zeigt eine örtliche Verteilung, welche sich während des Biegeprozesses ändert. Eine signifikante Verteilung der Kontaktspannung ist ebenso erkennbar wie unbelastete Teilflächen der Biegeform, vgl. Abb. 1 b (Ende Biegung). Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass die Seitensegmente der Biegeform notwendig sind, um größere Deformationen zu verhindern. Weitere Flächen besitzen geringere Einflüsse auf die Querschnittsänderungen.

Vereinfachung der Werkzeugflächen

Wird lediglich die notwendige Unterstützung im Rand über 30 ° der Biegeform genutzt, kann die Biegeform in der Biegeebene geteilt werden. Zur Flexibilisierung ist eine Vereinfachung der doppeltgekrümmten Biegekavität zu zwei zueinander geneigten ebenen Flächen notwendig, so dass diese durch variable Positionierung zueinander unterschiedliche Biegeradien R oder Rohrdurchmesser D abbildet werden können, s. Abb. 2.

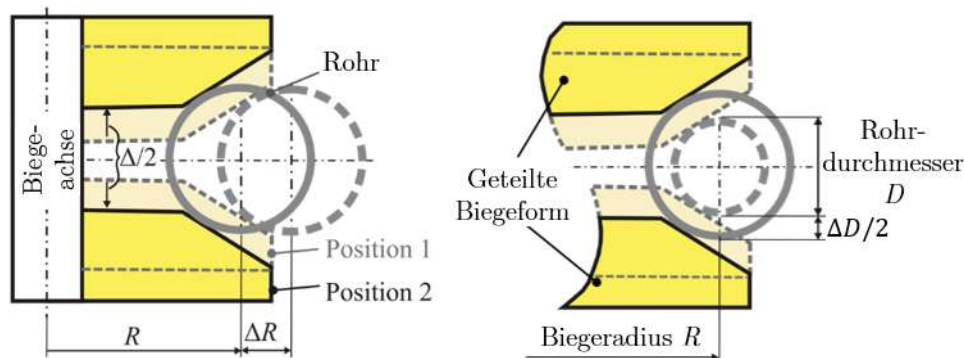


Abb. 2: Prinzip der geometrisch flexiblen Biegeform

Werkstoffermittlung und FE-Modell

Für die Untersuchungen genutzt wurden längsnahtgeschweißte nichtrostende Sahlrohre (1.4301) und stranggepresste Messingrohre (2.0321). Die Halbzeuge besitzen Durchmesser von 25 mm und 30 mm bei Wanddicken von 1 mm und 2 mm. Die mechanischen Werkstoffkennwerte in Tab. 1, welche im Rohrzugversuchen mit drei Wiederholungen auf der UNIVERSALPRÜFMASCHINE Z250 der ZWICK ROELL GMBH & CO. KG, Ulm ermittelt wurden, dienen als Eingabegröße im FE-Modell. Die Probenbezeichnung setzt sich aus Werkstoffnummer sowie Außendurchmesser D und Wanddicke T in Millimeter zusammen. Proben. Die Rohre aus Messing wiesen ein geringes Umformverhalten auf. Um dem Rissversagen in den praktischen Biegeversuchen vorzubeugen, wurden diese Halbzeuge eine Stunde bei einer Temperatur von 400 °C gegläht.

Aus Traversenweg und -kraft wurden die Streckgrenze $R_{P0,2}$, die Zugfestigkeit R_m und die Gleichmaßdehnung ϵ_{gl} ermittelt. Die Fließspannung k_f als Funktion von dem Vergleichsumformgrad φ_v wurde in Anlehnung nach SWIFT mit Gl. 3 und den Konstanten C_1 bis C_3 nach dem Best-Fit-Prinzip approximiert. Die E-Moduli E wurden der Literatur entnommen.

$$k_f = C_1 \cdot (C_2 + \varphi_v)^{C_3} \quad (3)$$

Die Reibbeiwerte wurden in Rohrdurchziehversuche mit drei Wiederholungen, nach [16], ermittelt. Aus Traversenkraft sowie der Spannkraft wurde der Reibungskoeffizient μ unter Berücksichtigung des Geometriefaktors für zylindrische Halbschalen, $\pi/2$, berechnet, vgl. [16].

Tab. 1: Werkstoffkennwerte

Bezeichnung	μ	E (kN/mm ²)	$R_{P0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	ϵ_{gl} (-)	C_1 (N/mm ²)	C_2 (10 ⁻²)	C_3 (10 ⁻¹)
1.4301-D25-T1	0,2	200	326	682	63,1	1635	15,1	8,42
1.4301-D25-T2	0,2	200	316	660	65,7	1528	11,7	7,16
1.4301-D30-T1	0,2	200	356	711	61,1	1685	15,9	8,33
1.4301-D30-T2	0,2	200	352	679	58,6	1562	12,1	6,95
2.0321-D25-T1	0,3	110	122	354	54,1	907	4	6,5
2.0321-D25-T2	0,3	110	122	329	40,6	881	4,7	6,65
2.0321-D30-T1	0,3	110	147	383	49,3	960	4	6,15
2.0321-D30-T2	0,3	110	142	357	44,4	903	4,1	6,07

Biegeversuche bis zu einem Biegewinkel von 90° wurden in der FE-Simulation mit PAM STAMP PROFESSIONAL 2020.0 der ESI-GROUP, Neu-Isenburg simuliert. In Hinblick auf die Faltenbildung wurden verformbare Volumenelemente mit 2 mm Oberflächenkantenlänge des Typs BELYTSCHKO-TSAY über der Dicke (drei Schichten) verwendet. Der Werkstoff wurde als isotrop modelliert.

Der Aufbau sowie die Randbedingung der Werkzeuge wurde mittels starren Schalenelementen mit weitestgehend 2 mm Kantenlänge beschrieben. Die Kontaktbedingung wurde nach COULOMB modelliert. Die Reibwerte μ zwischen Klemmbacken und Rohr entsprechen den ermittelten Werten aus Tab. 1. Bei allen anderen Kontaktflächen tritt eine geschmierte Gleitreibung auf. Der Reibkoeffizient beträgt hierfür 0,07. Der Gliederdorn, bestehend aus einem Dornschaft und bis zu zwei Dornkugeln, wurde als Mehrkörpersystem modelliert. Die Maschinensteifigkeit hat Einfluss auf die Faltenbildung [29]. Zu derer Modellierung wurden die Werkzeuge über Federelemente gelagert. Entsprechend der

Federkonstante verschieben sich die Werkzeuge bei Kraftbelastung während der Biegung. Dies wurde mit Stabelementen und einer Kraft-Weg-Kurve, vgl. Gl. 4 und Tab. 2, modelliert.

Die praktischen Versuche wurden auf der RBV 35 der WAFIOS AG, Reutlingen durchgeführt. Die entsprechenden Federkonstanten sind in Tab. 2. gelistet. Der Faltenglätter und die Biegeform sind auf einem Kreuztisch montiert. In der FE-Simulation wurde die Steifigkeit des Kreuztischs über zwei Stäbe – in Rohrlängsachse und in Rohrquerrichtung – abgebildet.

Tab. 2: Federkonstanten als Maß der Maschinennachgiebigkeit der RBV 35 [4]

Gegenhalter (kN/mm)	Kreuztisch in Rohrlängsachse (kN/mm)	Kreuztisch in Rohrquerrichtung (kN/mm)
9,36	1000 (ideal steif)	28,53

In der ersten Stufe der FE-Simulation wurde das Rohr geklemmt. Die zweite Stufe entspricht dem eigentlichen Biegeprozess. Die Biegeschwindigkeit betrug $8,727 \cdot 10^{-3}$ rad/s, wobei Geschwindigkeits- und Temperatureinflüsse im Model unberücksichtigt blieben. Dabei wurde die Geschwindigkeit so gewählt, dass Effekte aus Massenskalierung die Ergebnisse nicht signifikant beeinflussten. Zur Faltenminimierung wurde über die Vorschubeinheit eine Zugbelastung auf das Rohr aufgebracht. Der Transportfaktor ist als Verhältnis des Transportwegs zur Bogenlänge der idealen Rohrmittellinie definiert [17]. Er wurde zunächst auf den Wert gesetzt 0,90 gesetzt. Bei den Rohren mit Wanddicken von 1 mm traten Falten auf. Daher wurde der Transportfaktor für Messing auf 0,88 und für nichtrostende Sahlrohre auf 0,84 verringert. Bei einem Winkel von 5° vor Biegeende setzt der Dornrückzug ein und glättet Innen- und Außenbogen. Die Rückfederung wurde in der letzten Stufe berechnet, nachdem alle Werkzeuge entfernt wurden.

Aufbau und Durchführung der praktischen Versuche

Der flexible Aufbau auf der RBV 35 ist in Abb. 3 dargestellt. Die Biegeformflächen sind um den Neigungswinkel $\alpha_w = 30^\circ$ geneigten Flächen konisch ausgeführt. Die Einsätze der Biegeform wurden am oberen und unteren Befestigungsadapter ausgerichtet und verschraubt. Der untere Adapter sowie die Zylindersäule wurden auf dem Biegearm verschraubt. Die Positionierung des Adapters erfolgte mit einer Passfeder. Der obere Befestigungsadapter, aufgesteckt auf die Zylindersäule, wurde über Distanzringe in der Höhe positioniert. Das Höhenmaß ist abhängig von D , R und α_w . Die vertikale und rotatorische Fixierung des unteren zum oberen Befestigungsadapter gewährleistet die Versteifungsplatte. Zur Verstärkung der Steifigkeit gegenüber Querkraften wurde die Zylindersäule zusätzlich über die obere Verstrebung verspannt.

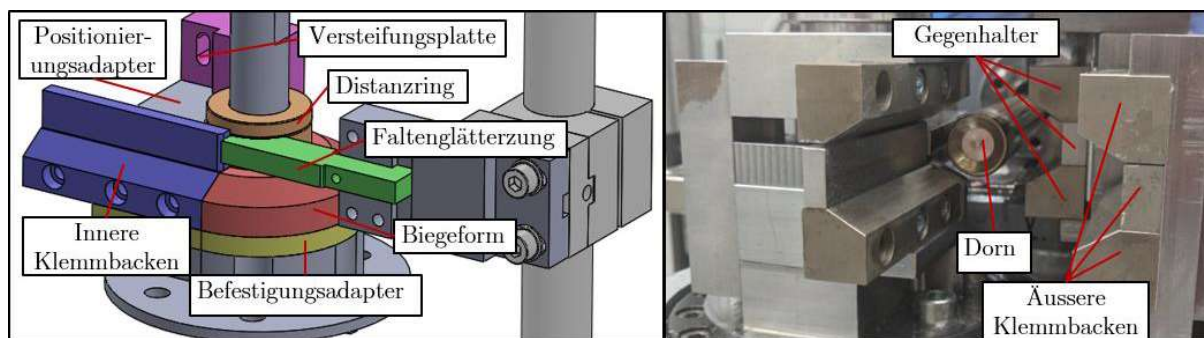


Abb. 3: Aufbau geometrisch flexibler Biegewerkzeuge auf der RBV 35

Die zwei angeschrägten Einsätze der inneren Klemmbacke fluchten mit den Biegeformeinsätzen. Die Abstützung des inneren mittleren Klemmbackeneinsatzes in der

Biegeebene erfolgte über Positionierungsadapter und einer Versteifungsplatte. Nutenverbindungen zwischen den drei Elementen gewährleisteten die Ausrichtung der Klemmbacke in Richtung der Rohrlängsachse. Die äußeren Klemmbackenelemente wurden in einen U-Rahmen, welcher für die jeweiligen Rohrdurchmesser ausgelegt wurde, verschraubt. Dieser U-Rahmen soll resultierende Vertikalkräfte aufnehmen. Die gesamte äußere Klemmbackenkonstruktion wurde über senkrecht, zur Biegeebene verlaufende Nutenfürungen auf dem Klemmschlitten der Biegemaschine auf Höhe der inneren Klemmbacke ausgerichtet und fixiert.

Die zwei Gegenhalterereinsätze wurden mit einer Adapterplatte auf die Gegenhalterachse montiert. Ausgerichtet und fixiert wurden diese, wie die äußeren Klemmbacken, über Nutenfürungen. Der mittlere Gegenhalterereinsatz wurde über zwei Stiftverbindungen in Rohrlängsachse fixiert.

Der Faltenglätter wurde auf eine ortsfeste Faltenglätterzunge reduziert. Optional kann dieser mit zwei schrägen Außeneinsätzen erweitert werden. Bei der RBV 35 wird der Faltenglätter über eine horizontal linear verstellbare Zylindersäule am hinteren Ende des Halters drehbar auf dem Kreuztisch montiert und ausgerichtet. Die Schnabelseite ist geometrisch an die Biegeformkavität angepasst, so dass diese formgenau über die Biegeform gestützt werden kann. Beim Konzept der geteilten Biegeform wurde die Faltenglätterzunge über den Distanzring gestützt. Die benötigten mittleren Einzelspannflächen der Klemmbacken führen dazu, dass die Faltenglätterzunge nur bis zur Übergangsebene E_G ausgeführt werden kann.

Zur Vermeidung bzw. Minderung der Querschnittsdeformation sowie der Faltenausprägung wurden Gliederdorne eingesetzt. Der Bogen wurde mit einem Dornglied für Rohre mit $D = 25$ mm gestützt. Betrug der Durchmesser 30 mm wurden zwei Dorngliedern eingesetzt.

Der modulare Aufbau des Versuchsaufbaus wurde auch für die Biegeversuche mit den konventionellen Werkzeugen eingesetzt. Zur Minderung der Reibung wurden alle Werkzeugflächen geschmiert, bei welchen eine relative Bewegung zum Rohr vorlag.

Bei der Durchführung wurde im ersten Schritt das 300 mm lange Rohr mit der Transporteinheit gespannt und positioniert, so dass später das andere Rohrende über die gesamte Klemmbackenlänge geklemmt werden konnte. Im zweiten Schritt wurde über die Querstellung des Gegenhalters eine Vorspannkraft aufgebracht. Im letzten Schritt vor Biegebeginn wurde das Rohr zwischen innerer und äußerer Klemmbacke geklemmt. Zur Vermeidung der Deformation beim Klemmen der dünnwandigen (T1) Rohre und der weichen Messingrohre wurde ein Innendorn im Klemmbereich verwendet. Die Biegewinkel betragen 90° . Bei den Untersuchungen im DFG-Projekt „Erweiterung des Rotationzugbiegens zu einem teilkinematischen Verfahren mit reduzierten Werkzeugflächen“ (DFG-EN 698/9-1) konnte eine Standardabweichung des Biegedurchmessers von 1,27 mm bei konventionellen und 1,50 mm bei flächenreduzierten Werkzeugen nachgewiesen werden. Aus statistischen Berechnungen wurde die Wiederholungszahl von drei Versuchen für konventionelle und vier Versuchen für flächenreduzierte Werkzeugsätze gewählt. Die Transportgeschwindigkeit entsprach der FE-Simulation.

Ergebnisse

Der reduzierte Kontakt beeinflusst die Qualität der Rohrbögen. Im Folgenden werden Deformation und Faltenausprägung über den Faltebewertungsfaktor Ω [30] validiert. Bei den praktischen Versuchen wurde die Rohroberfläche mit der Laserscan-Vorrichtung ATOS CORE 200 der CARL ZEISS GOM METROLOGY GMBH, Ulm und dem Programm GOM INSPECT PRO des gleichnamigen Unternehmens erfasst. Zur Vermessung wird das gereinigte Rohr auf der Oberfläche mit 1,5 mm kreisrunden Klebepunkten markiert und auf dem Messtisch mehrfach unterschiedlich rotierend positioniert eingescannt. Dabei werden alle Seiten erfasst. Mindestens 3 Markierungen der bereits eingescannten Oberfläche müssen sich im Messvolumen befinden. Nach dem Best-Fit-Prinzip werden einzelnen Oberflächenscans zur Gesamtrohroberfläche zusammengeführt.

Zur Analyse wurde die Ovalität einzelner Querschnitte entlang der Biegelinie an den digitalisierten Rohrkonturen berechnet. Die Ausprägung der maximale Ovalität liegt für Proben der vollumfänglichen Werkzeuge bei 2 % bis 3 %. Ausnahme sind die Proben mit $D = 25$ mm und $T = 1$ mm. Bei diesen Proben ist die Ovalität höher und beträgt 6 %.

Im Vergleich zu den vollumfänglichen Werkzeugen weisen Rohre, gebogen mit flächenvereinfachten Werkzeugen eine 2- bis 3-fach größere maximale Ovalität auf. Diese maximale Ovalität nimmt tendenziell mit steigender Wanddicke ab. Eine ausgeprägte Tendenz in Abhängigkeit des Durchmessers D ist bei den praktischen Versuchen nicht ableitbar. Bei den FE-Simulationen ist eine leichte abnehmende Tendenz mit steigendem D zu erkennen.

Abb. 4 zeigt die Konturen der Querschnitte mit der maximalen Ovalität. Zu sehen sind jeweils die Konturen der halben Rohrquerschnitte. Dargestellt sind links die mit den konventionellen Werkzeugen und rechts die mit den flächenvereinfachten Werkzeugen hergestellten Rohre. Der ideale Kreisquerschnitt (schwarz gepunktete Konturen) wird beim Biegen mit konventionellen Werkzeugen für alle Rohre mit $T = 2$ mm sowie für Rohre aus Messing mit $T = 1$ mm und einem $D = 30$ mm annähernd erreicht. Ansonsten kommt es zum Einfall bei Rohrumfangswinkeln von -90° und 90° . Die dünnwandigen Rohre mit D von 25 mm weisen zudem eine Aufweitung bei 0° auf. Beim Biegen mit flächenvereinfachten Werkzeugen ist ein Anschmiegen der Rohrkonturen an die ebenen Kontaktflächen zu erkennen.

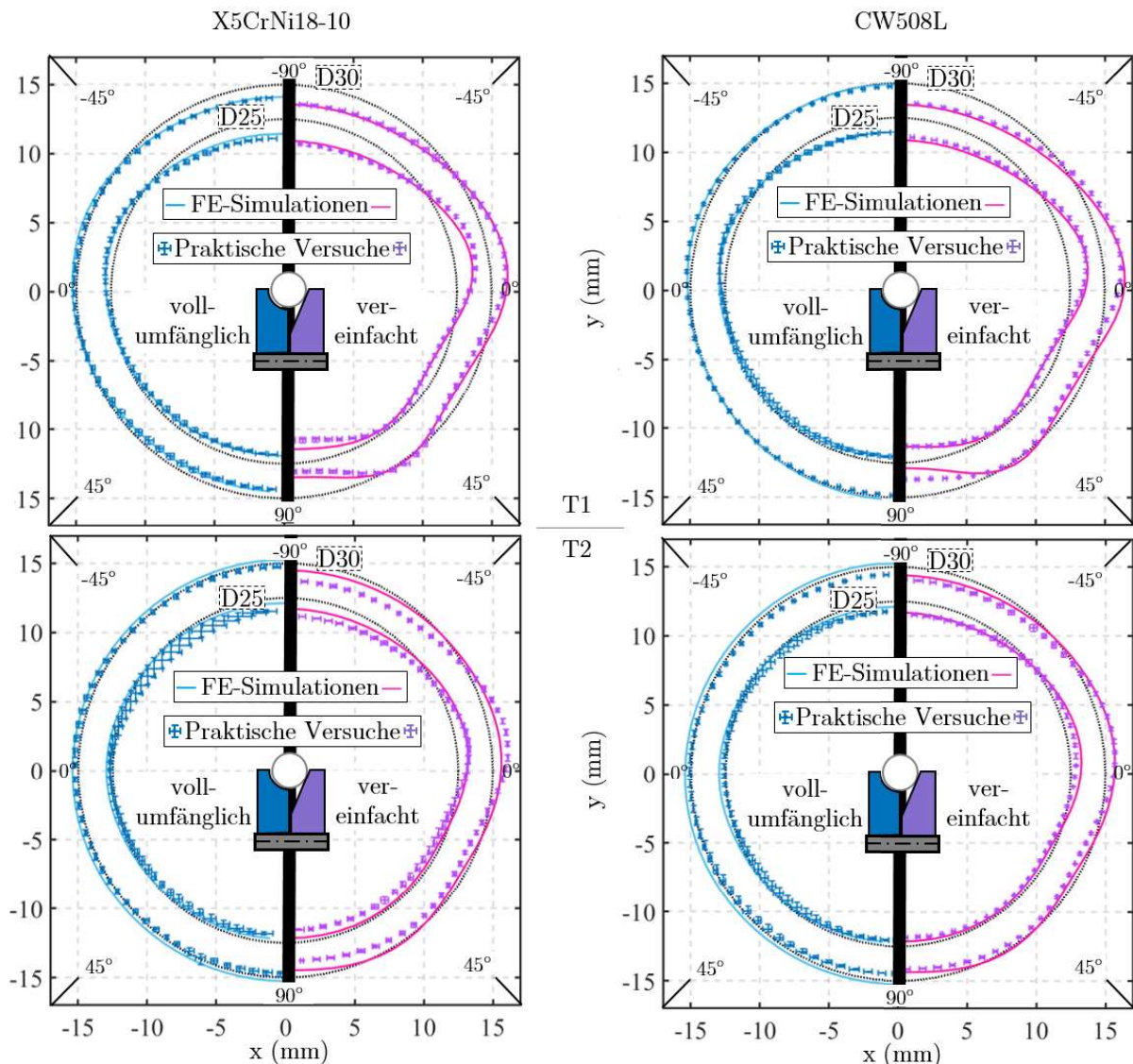


Abb. 4: Querschnitte der Biegeproben an Stelle der maximalen Ovalität

Die geringe Unterstützung bei 0° führt an dieser Stelle des Rohres zur Aufweitung und am Außenbogen zum Einfall. Im Vergleich zu den vollumfänglichen Werkzeugen ist die Deformation größer. Bei Rohren mit Wanddicke von 1 mm deformiert der flache Faltenglätter das Rohr außerdem am Innenbogen. Je dicker die Rohrwanddicke oder weicher der Werkstoff desto eher bleibt die Kreiskontur erhalten.

Für die Bestimmung des Faltenbewertungsfaktors Ω wurde das Rohr bis 50 mm vor und nach dem Biegebogen mit 219 Punkten ausgewertet. Abb. 5 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihen zu den flächenvereinfachten Werkzeugen und konventionellen Werkzeugen. Dünnwandigen Rohren (T1), gebogen mit flächenvereinfachten Werkzeugen, bilden Falten aus. Bei nichtrostenden Stahlrohren konnte eine Abnahme mit größerem Durchmesser festgestellt werden. Die Streuung bei Messingrohren lässt keine eindeutige Aussage zu. Rohre mit $T=2$ mm sowie alle Versuchsreihen der Biegungen mit konventionellen Werkzeugen weisen keine Falten auf.

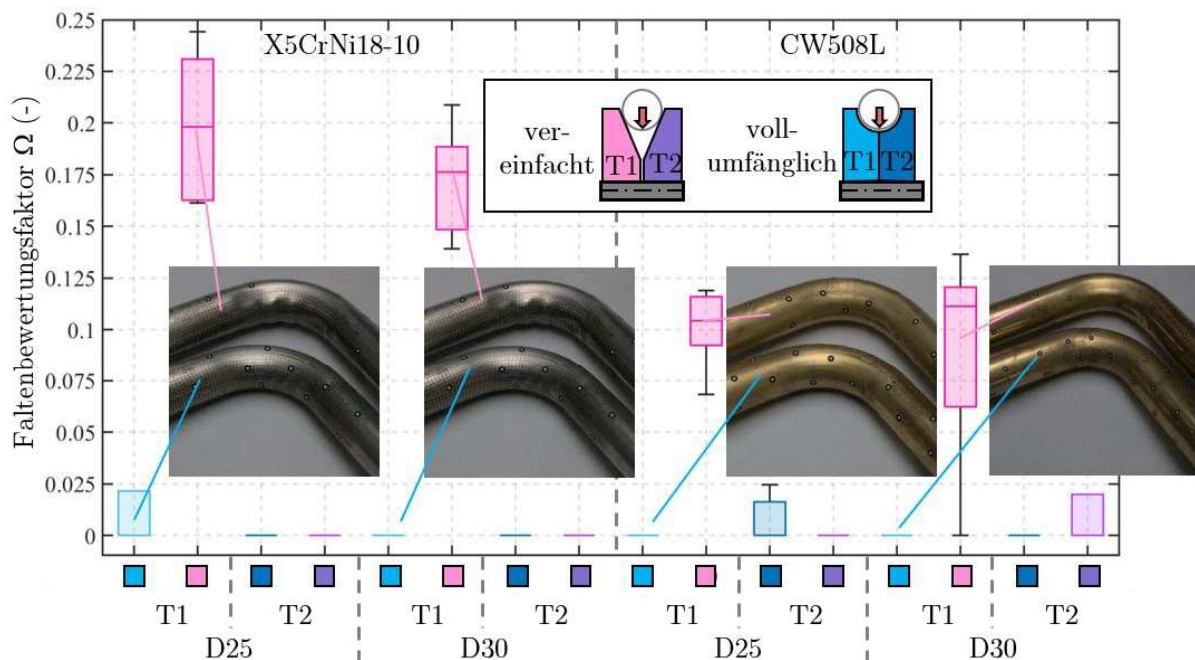


Abb. 5: Abhängigkeit der Faltenausprägung in Abhängigkeit der Rohrgeometrie und verwendeten Werkzeugen (links: nichtrostende Stahlrohre; rechts: Messingrohre)

Zusammenfassung

Die Verteilungen der Kontaktnormalspannungen auf der Biegeform für verschiedene Rohrdurchmesser und Wanddicken zeigen, dass die aktiven Flächen des Werkzeugs kleiner sind als die gesamten Flächen der Kavitäten. Reduziert auf die prozessrelevanteste Kontaktfläche (Biegeformrand) kann die Biegeform vereinfacht werden. Eine Modifizierung der Werkzeuge an Rohrdurchmesser und Biegeradius ist somit möglich.

Der Einfluss auf die Rohrqualität wurde gemessen und bewertet. Die Versuche belegen, dass die benötigte Zugkraft fürs Biegen mit flächenvereinfachten Klemmflächen übertragen werden kann. Bei dünnwandigen oder weichen Rohren ist eine Unterstützung mit Innendorn im Klemmbereich zu empfehlen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rohrwanddicke die Bogenqualität am größten beeinflusst. Geringere Wanddicken führen zu größeren Abweichungen.

Diese Arbeit zeigt den Einfluss der Reduzierung der Werkzeugkavitäten auf die Geometriequalität des gebogenen Rohres. In zukünftigen Arbeiten soll die Unterstützung des Rohres mit Innenwerkzeugen über den gesamten Bogen analysiert werden. Eine Erweiterung

der Faltenglätterzunge durch seitliche Flächen ist möglich. Der Neigungswinkel dieser seitlichen Flächen ist zu untersuchen und hinsichtlich des Biegeergebnisses zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Schiller, C. Heftrich und B. Engel, „Remote Production,“ in *Procedia CIRP*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.099>.
- [2] C. Kuhnhen, L. Schulte, S. Groth und B. Engel, „Cyberrüsten 4.0 - Static and Dynamic Expert Module - Maschinen rüsten und Parameterkorrektur mit Industrie 4.0,“ in *Verformungskundliches Kolloquium der Montanuniversität Leoben*, 2019.
- [3] L. Borchmann, C. Heftrich, J. Knoche, M. Schiller und B. Engel, „Control of material flow using measuring methods for wrinkle and crack detection during rotary draw bending,“ in *16th CIRP*, 2022.
- [4] S. Groth, „Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen,“ Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2020. ISBN: 978-3-8440-7775-9.
- [5] P. Frohn-Sörensen, B. Mašek, M. F.-X. Wagner, K. Rubešová, O. Khalaj und B. Engel, „Flexible manufacturing chain with integrated incremental bending and Q-P heat treatment for on-demand production of AHSS safety parts,“ *Journal of Materials Processing Technology*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116312>.
- [6] M. Geueke, P. Frohn-Sörensen, J. Reuter, N. Padavu, T. Reinicke und B. Engel, „Structural optimization of additively manufactured polymer tools for flexible sheet metal forming,“ in *Procedia CIRP*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.226>.
- [7] B. Burkhard und V. Albrecht, „Scharfe Kurven,“ *Industrie Anzeiger*, 2009.
- [8] VDI 3432:2016-08, *Rotationszugbiegemaschine*, Beuth Verlag GmbH.
- [9] Y. Wang, H.-S. Ma, J.-H. Yang und K.-S. Wang, „Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production,“ *Advances in Manufacturing*, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0204-7>.
- [10] R. Rauter, D. Globocnik, E. Perl-Vorbach und R. J. Baumgartner, „Open innovation and its effects on economic and sustainability innovation performance,“ *Journal of Innovation and Knowledge*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2018.03.004>.
- [11] J. Cao, E. Brinksmeier, M. Fu, R. X. Gao, B. Liang, M. Merklein, M. Schmidt und J. Yanagimoto, „Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming,“ *CIRP Annals*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.001>.
- [12] D. Y. Yang, M. Bambach, J. Cao, J. R. Duflou, P. Groche, T. Kuboki, A. Sterzing, A. E. Tekkaya und C. W. Lee, „Flexibility in metal forming,“ *CIRP Annals*, Bd. 67, p. 743–765, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.004>.
- [13] W. D. Franz, *Maschinelles Rohrbiegen: Verfahren u. Maschinen*, VDI-Verlag, 1988. ISBN: 9783184008147.
- [14] G. Sachs, *Principles and Methods of Sheet-metal Fabricating*, Literary Licensing, Llc, 2013. ISBN: 9781258807429.
- [15] D. Stahl, *Rundbiegen von Stahlrohrprofilen: ein Beitrag zur Rückfederungs- und Ovalisierungsprognose unter Anwendung künstlicher neuronaler Netze*, VDI-Verlag, 2002. ISBN: 9783183595020.

- [16] M. Hinkel, „Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie,“ Shaker Verlag GmbH, 2013. ISBN: 978-3-8440-2330-5.
- [17] L. Borchmann, C. Kuhnhen, P. Frohn und B. Engel, „Sensitivity analysis of the rotary draw bending process as a database of digital equipping support,“ *Procedia Manufacturing*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.100>.
- [18] B. Engel und C. Mathes, Erweiterung der Prozessfähigkeit des Rotationszugbiegens durch ein alternatives Faltenglättkonzept, Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., 2013. ISBN: 978-3-86776-421-6.
- [19] H. R. Hassan, „Plasto-mechanical model of tube bending in rotary draw bending process,“ 2017. ISBN: 978-3-8440-5106-3.
- [20] X. Xue, J. Liao, G. Vincze und A. B. Pereira, „Control strategy of twist springback for aluminium alloy hybrid thin-walled tube under mandrel-rotary draw bending,“ *International Journal of Material Forming*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1346-7>.
- [21] H. Zhang und Y. Liu, „An innovative PVC mandrel for controlling the cross-sectional deformation of double-ridged rectangular tube in rotary draw bending,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1284-z>.
- [22] H. Li, H. Yang und K. Liu, „Towards an integrated robust and loop tooling design for tube bending,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4258-1>.
- [23] VDI 3430:2014-06, *Rotationszugbiegen von Profilen*, Beuth Verlag GmbH.
- [24] T. Wen, „On a new concept of rotary draw bend-die adaptable for bending tubes with multiple outer diameters under non-mandrel condition,“ *Journal of Materials Processing Technology*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.019>.
- [25] A. V. Kale und H. T. Thorat, „CONTROL OF OVALITY IN PIPE BENDING: A NEW APPROACH,“ *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference December 12th – 14th, IIT Guwahati, Assam, India*, 2014.
- [26] A. Zardoshtian, H. Sabet und M. Elyasi, „Improvement of the rotary draw bending process in rectangular tubes by using internal fluid pressure,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1255-4>.
- [27] J. Řiháček, E. Peterková und M. Císařová, „Improving Rotary Draw Bending Process by Changing a Geometry of the Pressure Die,“ 2021. <https://doi.org/10.21062/mft.2021.081>.
- [28] C. Heftrich, R. Steinheimer und B. Engel, „Rotary-draw-bending using tools with reduced geometries,“ in *Procedia Manufacturing*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.410>.
- [29] L. Borchmann, C. Heftrich und B. Engel, „Influence of the stiffness of machine axes on the formation of wrinkles during Rotary Draw Bending,“ *SN Applied Science*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03419-1>.
- [30] C. Kuhnhen, „Bewertung und quantitative Beschreibung von Rohrbiegebauteilen anhand von Kennziffern zur Feststellung der Rückwirkungen ausgewählter Qualitätsmerkmale auf Produktion und Produktanwendung,“ Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2016. ISBN: 978-3-8440-4866-7.