

Numerische Analyse des Rotationszugbiegens runder und quadratischer Rohre

Nadine Wurm^{1, a *}, Jonas Knoche^{2, a}, Daniel Nebeling^{3, a} und Bernd Engel^{4, a}

¹Universität Siegen, Lehrstuhl für Umformtechnik, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Deutschland

^aNadine.Wurm@uni-siegen.de, ^bJonas.Knoche@uni-siegen.de,

^cDaniel.Nebeling@uni-siegen.de, ^dBernd.Engel@uni-siegen.de

Keywords: Rotationszugbiegen (RZB), Finite Elemente Methode (FEM), Spannungsverteilung, Quadratrohre, Rundrohre

Abstract. Das Rotationszugbiegen (RZB) ist ein etabliertes Verfahren zur Herstellung anspruchsvoller Rohrbögen mit engen Radien und geringen Wanddicken. In dieser Arbeit wird das Biegeverhalten von Rohren mit rundem und quadratischem Querschnitt mithilfe von Simulationsmodellen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Ziel ist es, Unterschiede im Biegeverhalten beider Querschnittsformen unter nahezu identischen Biegebedingungen zu analysieren, wobei ein einheitlicher Biege- und Wanddickenfaktor als Grundlage dient. Im Fokus der Untersuchung stehen die Spannungsverteilung und die Verformungsmuster während des Biegeprozesses, mit besonderem Schwerpunkt auf dem Einspannbereich. Die Ergebnisse zeigen, dass Quadratrohre, insbesondere dünnwandige, anfälliger für Faltenbildung und das Einfallen der Flanken sind. Ihre ebenen Flächen reagieren unter den entlang des Umfangs wirkenden Spannungen anders als die der Rundrohre und stehen beim Spannen nur in den Radien in Kontakt mit den Werkzeugflächen. Folglich sind die für Rundrohre entwickelten Arbeitsdiagramme nicht direkt auf Quadratrohre übertragbar. Die Resultate verdeutlichen, dass für das Rotationszugbiegen von Quadratrohren spezifische Arbeitsdiagramme und angepasste Biegeprozesse erforderlich sind.

Einleitung

Das für den RZB-Prozess erforderliche Biegemoment wird reibschlüssig mit den Spannbacken auf das Rohr übertragen. Die an Rundrohren erforschten und validierten Arbeitsdiagramme sind nicht unmittelbar auf Quadratrohre anwendbar, weil die ebenen Flächen solcher Rohre dazu neigen, unter den entlang des Rohrumfangs wirkenden Spannungen einzufallen. Beim Spannen von Quadratrohren stehen daher nur Flächen im Bereich der Radien in Kontakt zu den Spannbacken.

Nach bekannten Biegediagrammen lassen sich Rundrohre mit einem Biegeverhältnis $B=1,5$ (Verhältnis Biegeradius zu Durchmesser bzw. Höhe des Rohres) bei einem Wanddickenfaktor $W \leq 50$ (Verhältnis Durchmesser bzw. Höhe des Rohres zu Wanddicke) auf einer RZB-Maschine biegen. Quadratrohre mit $B=1,5$ und $W=40$ können jedoch nicht gebogen werden, weil die erforderliche Kraft in der Einspannung nicht übertragen werden kann. In der Einspannung kommt es zum Kollaps des Rechteckrohrs, wie in Abbildung 1 rechts dargestellt ist.

Stand der Technik

Rechteckige Halbzeuge werden zur Herstellung zahlreicher Strukturbauteile in der Automobilindustrie sowie der Bau- und Luftfahrtindustrie eingesetzt. Zukünftig könnten zum Beispiel Bauteile für Batteriekästen aus solchen Halbzeugen gefertigt werden. Im Verhältnis zu Halbzeugen mit rundem Querschnitt sind rechteckige Querschnitte, insbesondere in dünnwandiger Form im Biegeprozess anfälliger für Faltenbildung oder für den Einfall der Flanken [1].

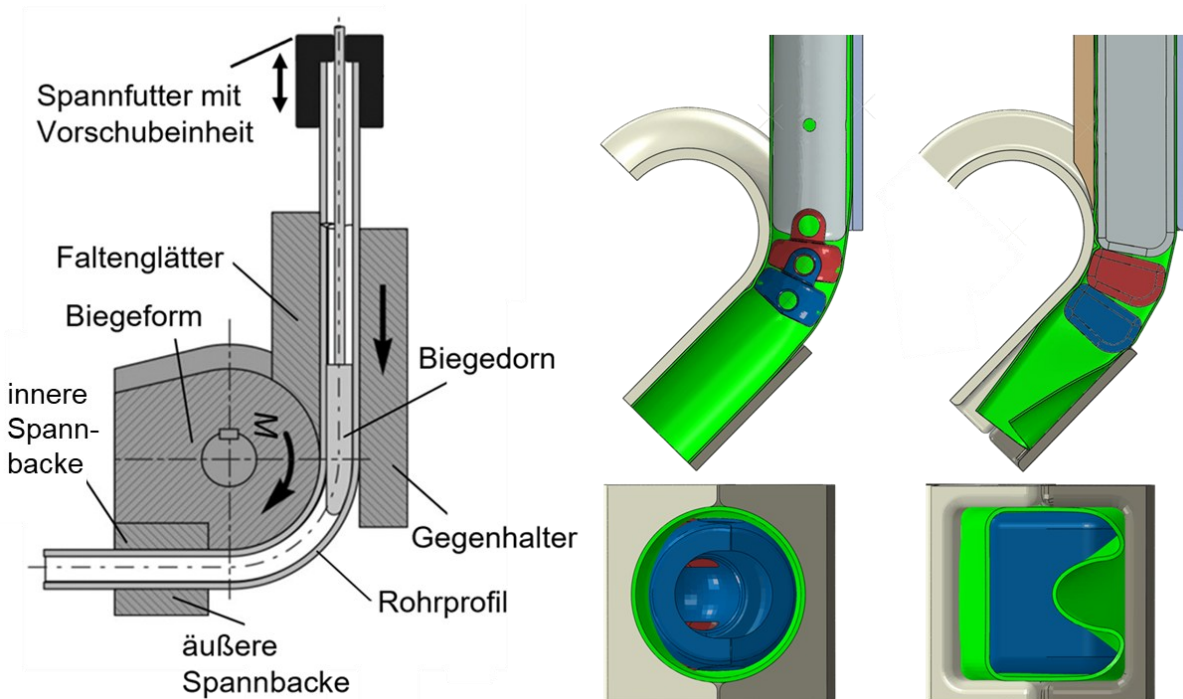


Abbildung 1: Links: Prinzip des RZB (VDI 3430). Rechts: Vergleich der Biegeaufgabe $B=1,5$ und $W=40$ für Rundrohr und Quadratrohr mit Kollaps des Quadrat-Querschnitts in der Einspannung.

Zur Erfassung der Qualitätsmerkmale sowie der Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern wird sich in zahlreichen Studien auf dünnwandig gebogene Rechteckrohre fokussiert. Auf die entwickelten analytischen Modelle sowie die Betrachtung mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) wird im Folgenden genauer eingegangen.

Es existieren analytische Modelle zur Vorhersage der Durchbiegung von Rechteckrohren, mit denen ein Zusammenhang zwischen dem Einfall des auf Zug belasteten Außensteiges und der Rohrgeometrie, insbesondere der Breite, hergestellt wird [2]. Weitere Forschungsprojekte befassen sich mit der Entwicklung von FE-Modellen für den RZB-Prozess dünnwandiger Rechteckrohre. Die Wandausdünnung am Außenbogen des Profils wird bspw. durch die Wechselwirkung des Dornglied-Rohr-Abstands und der Vorschub-Geschwindigkeit des Gegenhalters negativ beeinflusst, während die Querschnittsverformung maßgeblich durch die Wechselwirkung zwischen dem Gegenhalter-Rohr-Abstand, der Anzahl der Dornglieder und der Vorschub-Geschwindigkeit des Gegenhalters beeinflusst wird [3]. Es wurde ein Modell zur Beschreibung der Tangentialspannung während des Biegeprozesses von Rechteckrohren mittels numerischer Analysen ermittelt [4]. Darüber hinaus wurde die Auswirkung des Werkzeugspalts auf die Faltenbildung untersucht. Die Wellenzahl nimmt durch Vergrößerung des Spalts zwischen Dorn und Rohr ab, während die Wellenhöhe deutlich zunimmt [5]. Die Verformung der Breite des Rechteckrohrs ist wiederum stark abhängig von der Umfangsspannung, während die Verformung der Höhe von der Umfangs- und Tangentialspannung beeinflusst wird [6]. Ebenfalls wurden Vergleiche der Verformung durch Kollabieren des Querschnitts anhand eines FE-Modells, sowie eines analytischen und experimentellen Modells angestellt. Für die experimentelle Untersuchung erfolgte die Einspannung des Rohrs unter Zuhilfenahme eines innenliegenden Spannstopfens [7].

Obwohl es bereits zahlreiche FE-Modelle zur numerischen Simulation des RZB von Rechteckrohren gibt, liegt der Fokus i.d.R. auf den geometrischen Qualitätsmerkmalen des Querschnitts im gebogenen Bereich. Der Einspannbereich, der im RZB-Prozess eine entscheidende Rolle für die Übertragung des erforderlichen Biegemoments spielt, wird numerisch mit einem ausreichend hohen Reibungskoeffizienten nach Coulomb zwischen $\mu=0,6-0,7$ modelliert. Alternativ wird numerisch die Kontakteinstellung „rough“, mit der eine

Relativbewegung zwischen Halbzeug und Werkzeug nach erstem Kontakt unterbunden wird, verwendet [4–7]. Besonders wichtig ist die Gestaltung der Einspannung bei mehreren Biegungen an einem Bauteil, speziell wenn nur kurze Einspannlängen zwischen den Bögen zur Verfügung stehen.

Methodik

Um den Einfluss des Modellierungsansatzes zu bewerten, wurden zwei Finite-Elemente-Modelle entwickelt und unter identischen geometrischen, materialbezogenen und randbedingungsbezogenen Voraussetzungen verglichen. Die Modelle unterscheiden sich lediglich in der Querschnittsgeometrie der Halbzeuge. Für den runden Querschnitt ist der schematische Werkzeugaufbau des Modells in Abbildung 2 dargestellt.

Geometrische Modellierung. Für das FE-Modell des RZB-Prozesses wird Abaqus 2021 von Dassault Systems SIMULIA verwendet. Die Berechnung erfolgt über den expliziten Solver von Abaqus. Die vereinfachten Werkzeuge werden in der CAE-Umgebung von Abaqus mit einem Biegeverhältnis von 2 für eine Quadratrohr von 40 x 40 mm² mit einer Wanddicke von 2 mm und einem Außenradius von 4 mm bzw. einem Rundrohr mit Durchmesser 40 mm und Wanddicke 2 mm erstellt. Der Werkzeugspalt beträgt 0,1 mm. Alle Kanten der Werkzeuge in Kontakt mit dem Halbzeug sind mit einem 3 mm Radius versehen. Für die Diskretisierung der Werkzeuge und des Profils werden lineare Achtknotenelemente (C3D8R) verwendet. Die Werkzeuge werden mit einer Materialdicke von ca. 5 mm modelliert. Die Kantenlänge des verwendeten Netztes beträgt im Durchschnitt 1-1,5mm, in Bereichen der Radien 0,5 mm. Beim Halbzeug wird ebenfalls eine Kantenlänge von 1 mm entlang des Umfangs gewählt, über die Dicke wird die Kantenlänge zu mindestens 3 Elementen über die Materialdicke gewählt.

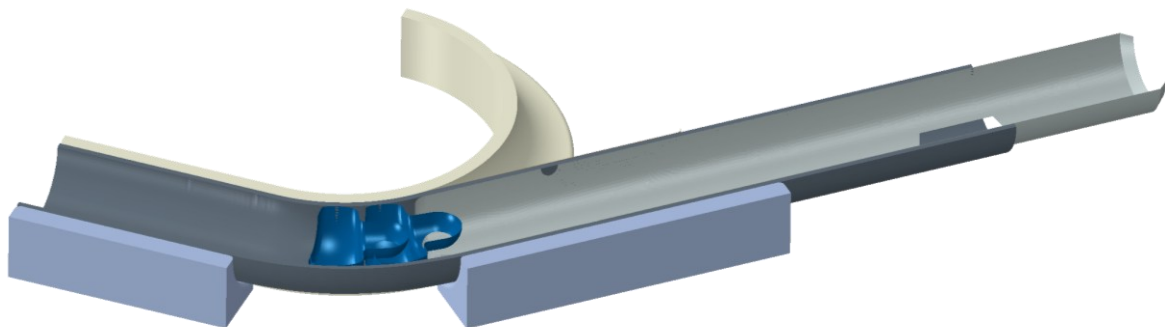


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Werkzeugaufbaus im FEM-Modell am Beispiel des runden Halbzeugquerschnitts

Material. Sämtliche Komponenten des Modells werden als verformbare Körper abgebildet und erfordern die Definition entsprechender Materialeigenschaften. Diese werden durch das Elastizitätsmodul E , die Poissonzahl ν sowie die Dichte ρ beschrieben. Zur Abbildung des plastischen Materialverhaltens wird die Fließkurve auf der Basis der Ergebnisse des Zugversuchs mittels des SWIFT-Ansatzes gemäß Gleichung 1 approximiert und bis zu einem Umformgrad von 1 extrapoliert.

$$k_f(\varphi) = A_s \cdot (B_s + \varphi)^{c_s}. \quad (1)$$

Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften, die für das Simulationsmodell verwendet werden, sind in Tabelle 1 aufgeführt. Den Werkzeugen wird das Material X155CRVMo12-1 mit der Werkstoffnummer 1.2379 zugeordnet. Das Profilmaterial ist X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4301. Beide Materialien werden als homogen angenommen.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften des Simulationsmodells [8]

Werkstoffnummer	E-Modul	Poissonzahl	Dichte	SWIFT Koeffizienten		
	E (MPa)	ν (-)	ρ (g/cm ³)	A _s (-)	B _s (-)	C _s (-)
1.4301	195000	0.3	7.9	1456.1981	0.0416	0.4195
1.2379	215000	0.3	7.7	-	-	-

Randbedingungen. Die Rückseiten der Werkzeuge werden mithilfe der Constraint-Funktion „Rigid-Body“ in ihrer Bewegung gesperrt. Die Kontaktmodellierung erfolgt über einen allgemeinen Kontaktansatz („General Contact“). In den zugehörigen Interaktionseigenschaften wird das Normalverhalten als harter Kontakt modelliert, während das tangentielle Verhalten mittels eines Penalty-Ansatzes beschrieben wird. Der Reibungskoeffizient wird mit $\mu = 0,1$ bzw. im Spannberiech mit $\mu = 0,3$ angesetzt. Der Kontakt wird über insgesamt zehn Werkzeugflächen definiert, bestehend aus der Biegeformfläche, der äußeren und inneren Spannbackenfläche, der Gegenhalterfläche, der inneren und äußeren Rohrfläche, der Faltenglätterfläche, der Dornschaftfläche sowie der ersten und zweiten Dorngliedfläche. Sämtliche Kontaktflächen stehen in Wechselwirkung mit dem Rohr, wobei die Werkzeugflächen aufgrund ihrer höheren Steifigkeit als Masteroberfläche definiert sind.

Die Biegeform ist gelagert und kann um ihre Mittelachse rotieren, wodurch die reale Kinematik des Biegeprozesses abgebildet wird. Die Spannbacke ist ebenfalls gelagert und wird über einen geschwindigkeitsgesteuerten Translator kontrolliert in Richtung der Biegeform verfahren. Der Gegenhalter wird analog über einen geschwindigkeitsgesteuerten Translator an das Halbzeug herangeführt und anschließend in seiner Position gehalten, um die Gegenkraft der Biegung aufzunehmen. Der Faltenglätter ist in seiner Position fixiert.

Der Dorn ist entlang der mittleren Dornachse gelagert, wobei der Freiheitsgrad in Vorschubrichtung des Profils gesperrt ist, um eine axiale Relativbewegung zwischen Dorn und Rohr zu vermeiden. Das erste Dornglied ist über einen Hinge-Connector mit dem Dornschaft verbunden. Die Bewegung des Connectors wird mittels einer Coupling-Constraint auf das Dornglied übertragen. Das zweite Dornglied ist unter identischen Randbedingungen an das erste Dornglied gekoppelt. Das freie Ende des Halbzeugs wird als unbelastet angenommen, sodass keine zusätzlichen Zwangsbedingungen in den Umformprozess eingebracht werden. Die Zusammenfassung des FEM-Modelsetups ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Prozessparameter. Die Ansteuerung erfolgt in allen Prozessschritten weggesteuert und wird jeweils über eine Smooth-Step-Rampe angefahren und beendet, um sprunghafte Last- und Geschwindigkeitsänderungen zu vermeiden. Der Prozess wird zunächst über einen Zeitschritt von 0,1 s für den Spannvorgang abgebildet. Hierfür wird die äußere Spannbacke in Richtung der inneren Spannbacke verfahren, um das vordere Halbzeugende zu spannen. Dies führt im Bereich der Einspannung zu einem Spannungszustand, der gemäß der von-Mises-Vergleichsspannungshypothese gerade noch dem elastischen Bereich zuzuordnen ist.

Der anschließende Rotationsschritt besitzt eine Dauer von 1 s bei einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit von $0,5\pi$. Im dritten Zeitschritt werden die Werkzeuge innerhalb von 0,1 s entlastet. Sämtliche Prozessschritte werden unter Verwendung eines Massenskalierungsfaktors von 1000 durchgeführt.

Tabelle 2: FEM-Modellsetup

Komponente	Lagerung/ Ansteuerung	Freie Freiheitsgrade	gesperrte Freiheitsgrade/ Annahmen	Begründung
Biegeform	gelagert	Rotation um Mittelachse	Translation	Abbildung der realen Biegekinematik
Spannbacke	Gelagert, geschwindigkeitsgesteuerter Translator	Translation in Spannrichtung	Übrige Freiheitsgrade	Kontrolliertes Spannen des Profils
Gegenhalter	geschwindigkeitsgesteuerter Translator	Translation bis Kontakt	Fixierung nach Positionierung	Aufnahme Gegenkraft Biegung
Faltenglätter	Fixiert	-	Alle Freiheitsgrade	Stabilisierung der Profilgeometrie
Dornschaft	Gelagert entlang der Dornachse	Translation in Spannrichtung und orthogonal zur Biegeebene	Translation in Vorschubrichtung des Profils, Rotation	Vermeidung axialer Relativbewegung
Dornglied 1	Hinge-Connector zum Dornschaft	Rotation um das Gelenk	Translation	Anpassung an lokale Profilkrümmung
Dornglied 2	Hinge-Connector zum ersten Dornglied	Rotation um das Gelenk	Translation	Anpassung an lokale Profilkrümmung
Halbzeug	-	Frei deformierbar	Keine Zwangsbedingungen	Realistische Abbildung des Umformprozesses

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt zweistufig. Die Spannungsverteilung wird direkt aus Abaqus extrahiert. Die Analyse der Profildeformation wird auf Grundlage der exportierten Netzgeometrie in der Software GOM Inspect durchgeführt. Die externe geometrische Auswertung ermöglicht eine konsistente Bestimmung der Rohrabweichungen auf Basis der aus der Finiten-Elemente-Simulation exportierten Daten.

Ergebnisse

Für das Spannen von Rohren wurde das von Hinkel in Abbildung 3 links dargestellte Prozessfenster berechnet. Es bezieht sich auf das Spannen von Rundrohren aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Wanddicke von 2 mm. Die Grenzen SA, SB, SC und SD geben die von der Spannbacke übertragbare Zugkraft in Abhängigkeit der anliegenden Spannkraft, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Reibbeiwerte, an. Das Prozessfenster wurde erfolgreich am Rundrohrquerschnitt validiert, zeigte jedoch in eigenen Vorarbeiten bei der Anwendung auf rechteckige Querschnitte erhebliche Abweichungen.

Im Vergleich zum runden Querschnitt verhält sich der quadratische Querschnitt bedeutend instabiler und neigt an den Außenflanken zum Einfall. Es stellt sich bereits beim Spannen ein nahezu linienförmiger Kontaktbereich zwischen Rohr und Spannbacken ein, in dem sich lokal sehr hohe Kontaktnormalspannungen ausbilden, vgl. Abbildung 3 rechts. Die deutliche Reduktion der Kontaktfläche führt bei gleichbleibender Spannkraft zu einer erheblichen lokalen Belastungssteigerung des Quadratrohrs.

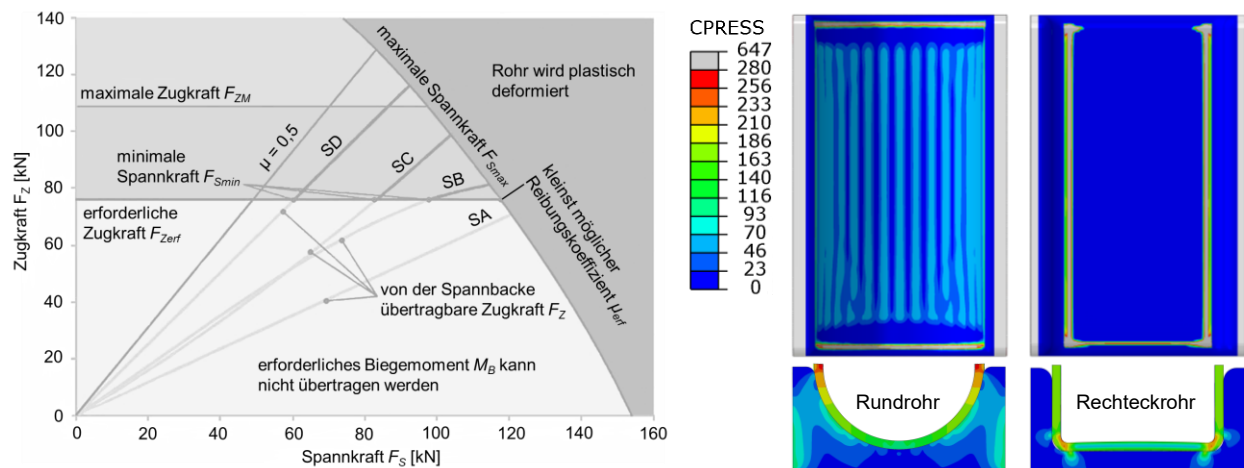


Abbildung 3: Links: Prozessfenster für das Spannen von Rundrohren beim RZB unter Berücksichtigung der Reibbeiwerte für den Werkstoff X5CrNi18-10 mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Wanddicke von 2 mm [9]. Rechts: Vergleich der Kontaktnormalspannungsverteilung beim Spannen von Rund- und Quadratrohr Durchmesser bzw. Kantenlänge 40 mm und Wanddicke 2 mm.

Die Kontaktflächen beider Querschnitte verringern sich während der Biegung im Bereich der Spannbacken und des Gegenhalters zusätzlich. Die Werkzeuge verlieren den Kontakt zum Rundrohr in Richtung der Umformzone jeweils in Form einer halbkreisförmigen Fläche, wie in Abbildung 4 links oben dargestellt ist.

Für die Kontaktfläche des Gegenhalters hat Heftrich [10] dies bereits in der Untersuchung zu reduzierten Werkzeugflächen beim RZB gezeigt (vgl. Abbildung 4 rechts).

Auch beim Quadratrohr wird in diesem Bereich der Werkzeuge ein weiterer Verlust der Kontaktfläche deutlich, wie in Abbildung 4 links unten gezeigt wird.

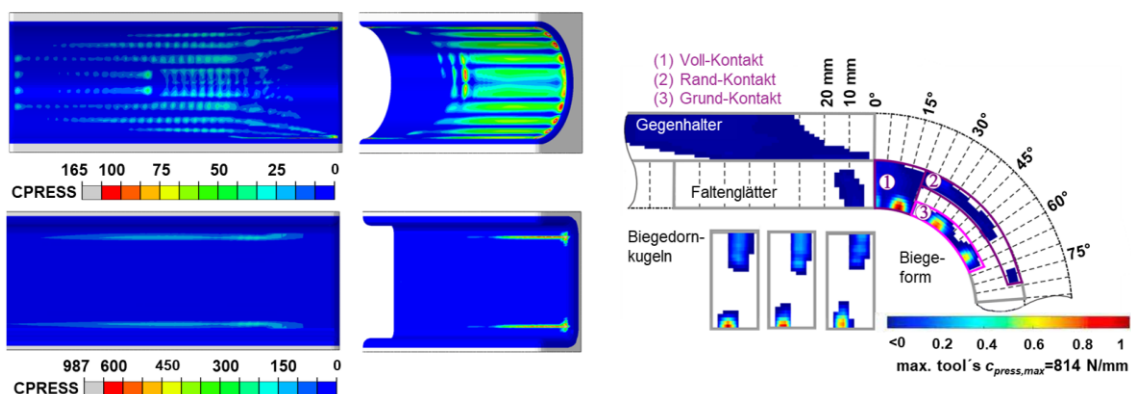


Abbildung 4: Links: Vergleich der Kontaktnormalspannungsverteilung an Spannbacke und Gegenhalter beim Biegen von Rund- und Quadratrohr $B=2$, $W=20$ und Biegewinkel 36° . Rechts: Kontaktnormalspannungsverteilung an den Werkzeugen beim RZB [10].

Zusammenfassung

Der Halbzeugquerschnitt hat einen entscheidenden Einfluss auf die Werkzeugkontaktflächen und den Materialfluss während des Umformprozesses. Während der runde Querschnitt beim Spannen zu einer flächigen und gleichmäßigen Belastung führt, entsteht beim quadratischen Querschnitt überwiegend eine linienförmige Belastung in den Randzonen. Darüber hinaus verringert die im Prozess überlagerte Biegebeanspruchung die effektive Kontaktfläche weiter: Beim runden Querschnitt reduziert sie sich im Übergang zum gebogenen Bereich um eine halbkreisförmige Fläche, während sie beim quadratischen Querschnitt in dieser Region etwa auf die Hälfte der Linienkontaktfläche abnimmt.

Mithilfe von FE-Simulationen können die Auswirkungen unterschiedlicher Halbzeugquerschnitte auf die Spannungsverteilung sowie mögliche Querschnittsdeformationen quantitativ untersucht und miteinander verglichen werden. Dadurch lassen sich Unterschiede im Beanspruchungsverhalten infolge geometrischer Variationen systematisch erfassen und vergleichen. Für eine belastbare qualitative Bewertung der Ergebnisse ist jedoch eine experimentelle Validierung der Modelle erforderlich. Die Daraus gewonnenen Erkenntnisse können anschließend in einer prozesssicheren und belastungsgerechten Auslegung der Werkzeuge einfließen.

Literaturverzeichnis

- [1] Ancellotti S, Benedetti M, Fontanari V, Slaghenaufl S, Tassan M. Rotary draw bending of rectangular tubes using a novel parallelepiped elastic mandrel. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;85(5-8):1089–103. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8000-7>.
- [2] Paulsen F, Welo T. Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part II - analytical models. *International Journal of Mechanical Sciences* 2001(43):131–52. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00107-1).
- [3] Li HP, Liu YL, Zhu YX, Yang H. Global sensitivity analysis and coupling effects of forming parameters on wall thinning and cross-sectional distortion of rotary draw bending of thin-walled rectangular tube with small bending radius. *Int J Adv Manuf Technol* 2014;74(5-8):581–9. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6014-1>.
- [4] Zhao G, Liu Y, Yang L, LU C, Gu R. Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube. *Materials Science and Engineering A* 2009:257–61.
- [5] Zhao G, Liu Y, Yang H. Effect of clearance on wrinkling of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process. *Int J Adv Manuf Technol* 2010(50):85–92. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2508-7>.
- [6] Shen H, Liu H, Qi H, Yang H, Zhou S. Relations between the stress components and cross-sectional distortion of thin-walled rectangular waveguide tube in rotary draw bending process. *Int J Adv Manuf Technol* 2013(68):651–62. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4786-3>.
- [7] Liu K, Liu Y, Yang H. An analytical model for the collapsing deformation of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending. *Int J Adv Manuf Technol* 2013(69):627–36. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5042-6>.
- [8] Groth S. Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen. Düren: Shaker Verlag; 2020.
- [9] Hinkel M (ed.). Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie. Shaker Verlag; 2013.
- [10] Heftrich C, Steinheimer R, Engel B. Rotary-draw-bending using tools with reduced geometries. *Procedia Manufacturing* 2018;15:804–11. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.410>.