

Segmentierung von Biegeformen als Grundlage für die Entwicklung von Transformer-Werkzeugen

Jonas Reuter^{1,a}, Apostolos Aslanidis¹ und Bernd Engel¹

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

^ajonas.reuter@uni-siegen.de

Keywords: Flexible Profile Bending, Flexible Profile Forming, Adjustable Forming Tools, Segmented Forming Tools, Transformer Tools

Abstract. The transformation of manufacturing technology from mass production to individualized production or individualized mass production requires agile and flexible processes on the part of forming technology [1]. To overcome the flexibility limitations of tool-bound processes, adjustable tools are needed. To this end, this paper presents a finite element (FE) simulation-based parameter study of the segmentation of bending tools in modified compression bending. The bending dies were segmented into a fixed number, and the inter-segment spacing, bending factor, and wall thickness factor are varied according to a full factorial experimental design. The effect of the segmentation is investigated based on strain contours, the histories of contact pressure, the histories of the longitudinal strains at the inner and outer arcs and based on the part geometry deviations from the geometry produced by conventional closed die surfaces. The main finding is that the (negative) effect of segmentation decreases with decreasing segment space and wall thickness factor and increases with increasing bending factor. Finally, these results were discussed in the light of the subordinate objective of the research project. The results allow us to conclude that the segmentation of bending dies, even for small bending radii, is a suitable approach to flexibilize bending processes through adjustable tools, so called transformer tools.

Einleitung und Stand der Forschung

Die Transformation der Fertigungstechnik von der Massenproduktion hin zur individualisierten Produktion bzw. individualisierten Massenproduktion erfordert seitens der Umformtechnik agile und flexible Prozesse [1]. Biegeprozesse mit kinematischer Gestalterzeugung wie bspw. das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) [2] oder das inkrementelle Schwenkbiegen (ISB) [3] besitzen eine inhärente Flexibilität hinsichtlich der mit einem einzigen Werkzeugsatz herstellbaren Bauteilgeometrien. Die Formgebung erfolgt durch die Werkzeugkinematik und den Profilver Schub, sodass die Bauteilgeometrie unabhängig von der Werkzeugkontur ist. Im Gegensatz dazu gibt die Werkzeugkontur in formgebundenen Biegeprozessen wie z.B. dem Rotationszugbiegen (RZB) oder dem Abrollbiegen (ARB) die Bauteilgeometrie vor [4]. Eben diese Formbindung bewirkt eine hohe Konturtreue und die Realisierbarkeit kleiner Biegeradien, ist jedoch nachteilig hinsichtlich der Flexibilität. Eine Änderung der Bauteilgeometrie oder die Reaktion auf Prozessschwankungen erfordern i.d.R. Werkzeuganpassungen.

Zur Flexibilisierung formgebundener Umformverfahren sind neuartige, verstellbare Werkzeuge notwendig. Die Oberflächenverstellung kann auf unterschiedlichen Skalen stattfinden und in entsprechende Flexibilitätslevel mit entsprechenden prozessbezogenen Auswirkungen kategorisiert werden, wie in [5] am Beispiel des Gesenkbiegens gezeigt ist. Beispielsweise können sehr kleine Oberflächenverstellungen im Flexibilitätslevel 1 von Hundertstel- bis Zehntelmillimeter die Kontaktdruckverteilung beeinflussen, in Erweiterung mit integrierter Sensorik und Regelalgorithmen sogar gezielt einstellen. Anwendungen und Untersuchungen hierzu sind insbesondere beim Tiefziehen zu finden. Flexible aktive oder

passive Niederhaltesysteme beeinflussen hier die Kontaktdruckverteilung und in der Konsequenz den Werkstofffluss [6], [7]. Sehr große Oberflächenverstellungen können im Flexibilitätslevel 3 zur Adaption der gesamten Werkzeugkontur genutzt werden. Dies kann sowohl initial vor dem Umformvorgang als auch während der Umformung in-process geschehen, wodurch der Umformpfad beeinflusst werden kann. Um diese Konturänderungen zu ermöglichen, bedarf es einer Auflösung der geschlossenen Werkzeugoberflächen. Hierzu entwickeln HEFTRICH et al. [8] eine systematische Methode. Basierend auf der numerisch berechneten Kontaktdruckverteilung beim RZB mit konventionell geschlossenen Oberflächen werden diejenigen Oberflächenbereiche identifiziert, die nicht oder nicht wesentlich zur Umformung beitragen. Es entstehen vereinfachte Werkzeuge, die sich aufgrund des gewonnenen Bauraums durch zusätzliche Verstellachsen auszeichnen. Dies ermöglicht die Erweiterung des bisher formgebundenen Verfahrens hin zu einem teilkinematischen Verfahren.

Andere Ansätze zur Flexibilisierung formgebundener Prozesse bestehen in der Diskretisierung formgebender Werkzeuge und werden in den Mehrpunkt-Umformverfahren (engl.: multi point forming, MPF) eingesetzt. Im Bereich der Blechumformung untersuchen einige Autoren die Konstruktion und Algorithmen zur Formerzeugung von rekonfigurierbaren Matrizen für das Streckziehen großflächiger Bauteile [9]–[12]. LI et al. [9], [10] stellen einen MPF-Prozess mit oberer und unterer Matrize jeweils bestehend aus einer Vielzahl von Stempeln vor. Sie untersuchen die sektionale Umformung zur Herstellung großer Bauteile, stellen die Möglichkeit zur Variation des Umformpfades heraus und entwickeln einen geschlossenen Regelkreis zur Kompensation der Rückfederung. Als wesentliche Bauteilfehler beim MPF identifizieren zahlreiche Autoren Falten, Grübchen und Formabweichungen als Resultat des lokalen, inhomogenen Werkzeugkontaktes [9]–[15]. Zur Eindämmung dieser Charakteristika werden Zwischenschichten aus bspw. Polyurethan [9]–[14] zwischen Werk- und Halbzeug oder schwenkbare, flächige Stempelköpfe [15] verwendet, was zudem eine bessere Konturtreue bewirkt. Die Bauteilfehler können durch Werkzeug- und Prozessparameter beeinflusst werden, wobei aus der Literatur folgende Zusammenhänge bekannt sind: Die Stempeldichte, Stempelgröße (Durchmesser) und der Radius des Stempelkopfes beeinflussen das Umformergebnis. Aus numerischen und experimentellen Versuchen sowie einer statistischen Versuchsplanung und -auswertung ist bekannt, dass Stempelgröße und -radius einen signifikanten Einfluss auf die Falten, Blechdickenvariation und Formabweichung haben [12]. Je höher die Stempeldichte und je größer die Stempelradien sind, desto geringer ist die Ausprägung von Grübchen und desto kleiner ist die Formabweichung [13]. Die Geometrie des Stempelkopfes ist von untergeordneter Bedeutung, wie gemäß [16] durch Vergleiche von halbkugelförmigen und sattelförmigen Stempelköpfen bei ansonsten vergleichbaren Flächenabmessungen der Stempel deutlich wird. CAI et al. [11] entwickeln sichere Prozessfenster für die falten- und grübchenfreie Umformung für das MPF großflächiger, sphärischer und sattelförmiger Bauteile. Die Prozessfenster beinhalten die Flächenabmessung des Blechhalbzeugs, die Blechdicke, den Bauteilradius sowie die Grenzkraft pro Stempel, ab der Grübchenbildung (1% Dehnung in Dickenrichtung) auftritt. Ähnliche Erkenntnisse wie beim MPF in der Blechumformung finden sich auch im Bereich der Profilmformung. Ein zusätzlicher Bauteilfehler ist hier die Querschnittsdeformation. LIN et al. [17] zeigen, dass beim Mehrpunkt-Streckbiegen von offenen Aluminiumprofilen mit großen Biegeradien die Formabweichung mit einer Erhöhung der Anzahl an Werkzeugsegmenten reduziert werden kann. LIANG et al. [18] stellen heraus, dass die Querschnittsdeformation von Aluminiumprofilen mit Rechteckquerschnitt beim Mehrpunkt-Streckbiegen mit zunehmendem Biege Winkel zunimmt. LIU et al. [19] applizieren das MPF auf den Gesenkbiegeprozess von stranggepressten, geschlossenen Aluminiumprofilen. Sie finden heraus, dass sich die Grübchenbildung mit zunehmender Größe der Matrizenstempel sowie der Verwendung einer Zwischenschicht aus Federstahl verringert. Weiterhin stellen sie heraus, dass durch eine

Variation des Umformpfades die Querschnittsdeformation beeinflusst werden kann und somit auch kleinere Biegeradien realisiert werden können.

Ziel, Umfang und Vorgehensweise

Zur Flexibilisierung von formgebundenen Biegeprozessen hin zu teilweise kinematischen Prozessen sind verstellbare Werkzeuge erforderlich. MPF-Verfahren besitzen durch ihre rekonfigurierbaren Werkzeugsysteme eine hohe Flexibilität und können den Prozess z.B. durch Variation des Umformpfades positiv beeinflussen. Die Verfahrensentwicklung erfolgte bisher jedoch nur für großflächige Bauteile bzw. große Biegeradien. Bauteilfehler als Konsequenz des lokalen, inhomogenen Werkzeugkontaktes sind typisch für diese Prozesse. Soweit uns bekannt ist, existiert keine Gestaltungsmethode für solch segmentierte Oberflächen hinsichtlich der Segmentgeometrie und der ertragbaren Spalte in Abhängigkeit der Halbzeugeigenschaften und der vorherrschenden Randbedingungen. Dies gilt insbesondere für das Profilbiegen von engen Biegeradien. Fernziel des laufenden Forschungsprojektes, aus dem die Inhalte dieses Beitrags hervorgingen, ist daher die Erforschung einer Gestaltungsmethode für segmentierte Oberflächen und Mechanismen zur Änderung dieser Oberflächen durch in-situ Verstellungen.

In diesem Beitrag wird als Teilschritt hierzu eine simulationsgestützte Parameterstudie zur Segmentierung von Biegeformen präsentiert. Dazu werden die Biege- und Wanddickenfaktoren sowie die Segmentabstände systematisch variiert. Die Auswertung fokussiert die Phänomene hinsichtlich der Bauteileigenschaften, die im Vergleich zur konventionell geschlossenen Oberfläche durch die Segmentierung hervorgerufen werden. Abschließend werden die Ergebnisse im Gesamtkontext des vorliegenden Forschungsprojektes diskutiert.

Aufbau eines FE-Simulationsmodells

Ein modifiziertes Abrollbiegen (siehe Abb. 1 links) dient in diesem Beitrag als Prozessbeispiel. Es handelt sich um ein formgebundenes Biegeverfahren, bei dem der Biegeradius R durch die Biegeform vorgegeben wird. Das Biegemoment wird durch die Biegerolle aufgebracht, die mit einem Anfangshebelarm a in einer Kreisbahn um das Zentrum der Biegeform rotiert, und durch den Gegenhalter abgestützt.

Zur Approximation der in Rohrzugversuchen in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 an nahtlosgezogenen Rundrohren mit einem Außendurchmesser von 30 mm ermittelten Fließkurven wird der Approximationsansatz nach El-Magd [20] verwendet, siehe Gleichung 1. Mit diesem Ansatz gelingt es, den durch die Lüdersdehnung bedingten charakteristischen Verlauf der Fließkurven hinreichend genau abzubilden. Die Parameter wurden durch Kurvenfitting mittels der kleinsten Fehlerquadratmethode zu $C_1=271,0$; $C_2=385,2$; $C_3=157,6$; $C_4=0,05$; $n=1,07$ bestimmt. Abb. 1 zeigt rechts die aus den Zugversuchen ermittelten Fließkurven und die Approximierte.

$$k_f(\varphi) = C_1 + C_2 \cdot \varphi + C_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\varphi}{C_4}}\right)^n \quad (1)$$

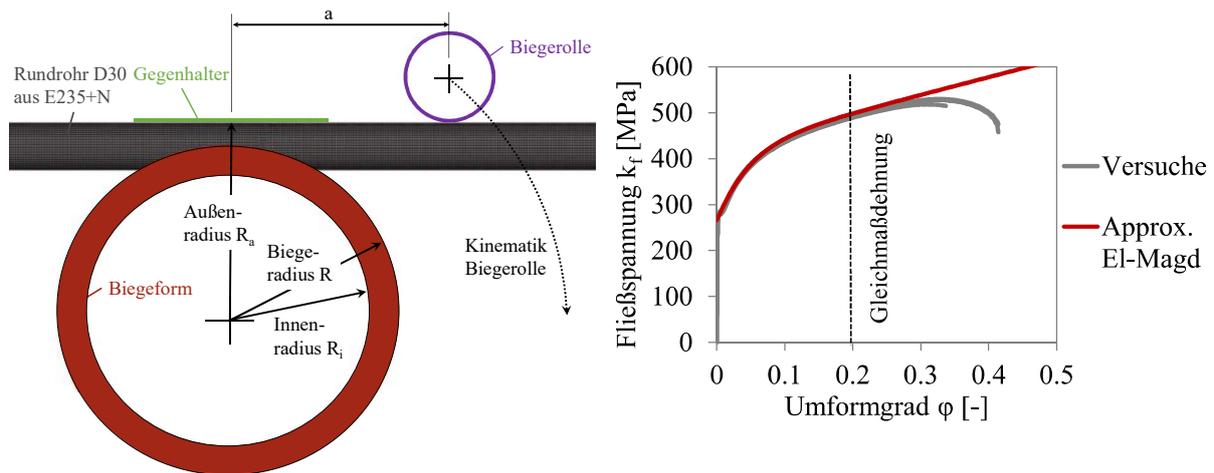


Abb. 1. links: Schematische Darstellung des modifizierten Abrollbiegens; rechts: Fließkurvenapproximation mit dem Ansatz nach El-Magd [20] im Vergleich zu den in Rohrzugversuchen in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 an Rundrohren mit einem Außendurchmesser von $D = 30$ mm und einer nominellen Wanddicke von $t = 3,0$ mm ermittelten Fließkurven

Es wurden FE-Simulationsmodelle für den expliziten Gleichungslöser LS-DYNA R12.0.0 erstellt. Die Werkzeuge sind mit Schalenelementen mit einer nominellen Elementkantenlänge von 0,8 mm diskretisiert und als starre Körper modelliert (*MAT_RIGID). Das Halbzeug ist mit vollintegrierten Schalenelementen (ELFORM=16 in *SECTION_SHELL) mit 5 Integrationspunkten über der Dicke und einer nominellen Elementkantenlänge von 1,5 mm diskretisiert. Die Kontakte zwischen den Werkzeugen und dem Halbzeug werden über die *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE Karte abgebildet. Der coulomb'sche Reibkoeffizient zwischen Rohrhalbzeug und Biegeform sowie zwischen Rohrhalbzeug und Gegenhalter wird zu 0,1 gesetzt. Die Biegerolle ist im Realprozess rollend gelagert, was nicht im Modell abgebildet ist. Um dem geringen Rollwiderstand dennoch Rechnung zu tragen, wird der Reibkoeffizient zwischen Biegerolle und Halbzeug zu Null gesetzt.

Als Materialmodell für den Halbzeugwerkstoff E235 +N wird ein elastisch-plastisches v. Mises Material mit isotroper Verfestigung (*MAT_024) eingesetzt. Die Fließkurve (siehe Abb. 1 rechts) ist als Tabelle mit äquidistanten Stützstellen hinterlegt.

Parameterstudie zur Segmentierung von Biegeformen

Die folgenden Untersuchungen zur Segmentierung der Biegeform werden simulationsgestützt durchgeführt. Für drei Biegefaktoren $B = R/D$ und drei Wanddickenfaktoren $W = D/t$ wird die Biegeform in eine gleichbleibende Anzahl an Segmenten segmentiert und der Segmentspalt von 0 mm bis 9 mm variiert, wobei der Segmentspalt von Null die geschlossene Oberfläche beschreibt. Der Außendurchmesser des Rohres von $D = 30$ mm wird beibehalten, sodass die Variation der Biege- und Wanddickenfaktoren aus den Variationen der Wanddicken und der Biegeradien resultieren. Es wird kein Biegedorn verwendet. Abb. 2 veranschaulicht die Segmentierung und zeigt die insgesamt durchgeführten Simulationsvarianten.

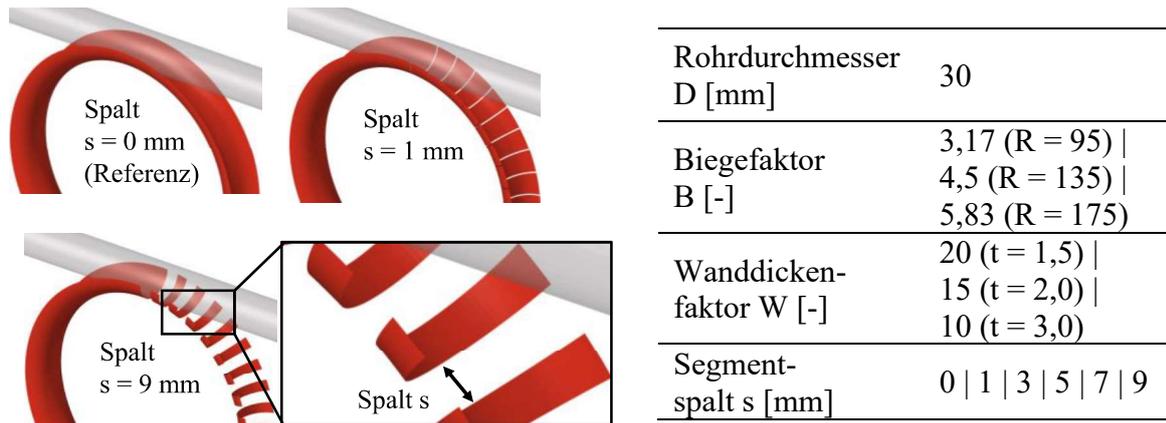


Abb. 2. links: Segmentierung der Biegeform; rechts: Durchgeführte Variationen

Im Folgenden sind zunächst anhand ausgewählter Biegeaufgaben Phänomene beschrieben, die die Segmentierung der Biegeform verursacht. Abb. 3 vergleicht oben die v. Mises Vergleichsdehnung im Längsschnitt für unterschiedliche Segmentabstände.

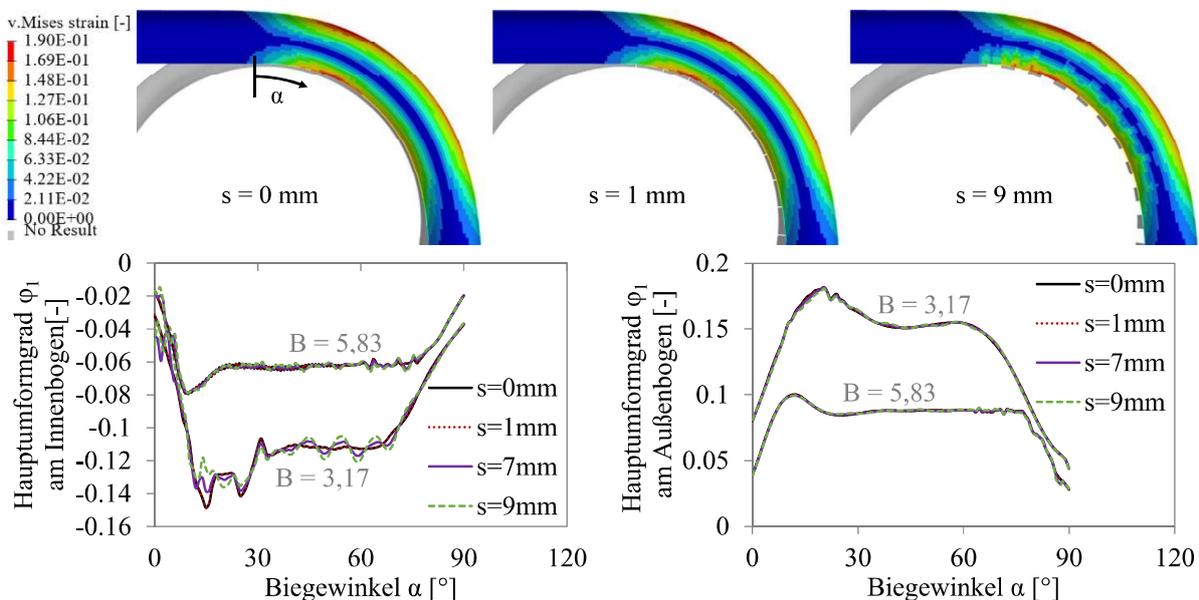


Abb. 3. oben: Vergleich der v. Mises Dehnungen aus der FE-Simulation des modifizierten Abrollbiegens mit einem Biegefaktor von $B = 3,17$ und einem Wanddickenfaktor von $W = 10$ im Längsschnitt; unten: Vergleich der Hauptdehnungen am Innen- und Außenbogen für unterschiedliche Segmentabstände bei $B = 3,17$ | $5,83$ und $W = 10$.

Zwischen der geschlossenen Oberfläche und einem Segmentspalt von $s = 1$ mm sind keine nennenswerten Unterschiede erkennbar. Es ist jedoch deutlich zu sehen, dass die Dehnungsverteilung bei einem Segmentspalt von $s = 9$ mm inhomogener im Vergleich zur geschlossenen Oberfläche ist. Dies trifft insbesondere auf die Umgebung der dehnungsneutralen Faser und den Innenbogen zu. Letzteres bestätigt sich durch die Verläufe der Hauptdehnungen entlang des Innenbogens (Abb. 4, unten links). Für den Biegefaktor $B = 3,17$ ist ersichtlich, dass diese mit zunehmendem Segmentspalt merklich von der Referenz abweichen. Im Anfangsbereich bei den Biegewinkeln von ca. $10^\circ - 30^\circ$ sind die Abweichungen besonders markant. Mit zunehmendem Biegewinkel und Segmentspalt oszillieren die Hauptdehnungsverläufe sinusförmig um den der Referenz. Abermals sind bei einem Segmentspalt von 1 mm – für diese Biegeaufgaben – keine nennenswerten Unterschiede im Vergleich zur Referenz erkennbar. Weiterhin ist zu sehen, dass diese Phänomene bei einem

Biegefaktor von $B = 5,83$ weitaus weniger ausgeprägt sind. Die markanten Abweichungen für kleine Biegewinkel treten hier nicht auf und die oszillierenden Kurvenverläufe für größere Biegewinkel besitzen kleinere Amplituden. Ferner hat die Segmentierung einen vernachlässigbaren kleinen Einfluss auf den Verlauf der Hauptdehnungen am Außenbogen, wie in Abb. 3 rechts offensichtlich ist.

Es ist zu erwarten, dass die zuvor beschriebenen Einflüsse der Segmentierung auf das Umformverhalten auch auf die Bauteilgeometrie wirken. Daher sind nachfolgend die Bauteilgeometrien für ausgewählte Biegeaufgaben verglichen. Für die Geometrievergleiche wird der belastete Zustand, d.h. der Zustand mit zugestellter Biegerolle am Ende der Biegung, ausgewählt. Dies ermöglicht, die durch die Segmentierung hervorgerufenen Effekte, z.B. die lokalen Deformationen am Innenbogen, isoliert herauszustellen. Diese sind für den belasteten Fall dann nicht durch überlagerte globale Bauteilrückfederungen, die wiederum für unterschiedliche Segmentierungen verschieden sein können, verzerrt.

Die Bauteilgeometrien wurden aus der Simulation als stl-Datei exportiert. Mittels der GOM INSPECT SUITE 2020 Software wurden Flächenvergleiche erstellt, die in Abb. 4 exemplarisch für eine Biegeaufgabe und unterschiedliche Segmentabstände dargestellt sind. Das Bauteil, welches mittels geschlossener Biegeform ($s = 0$ mm) hergestellt wurde, ist jeweils die Referenz.

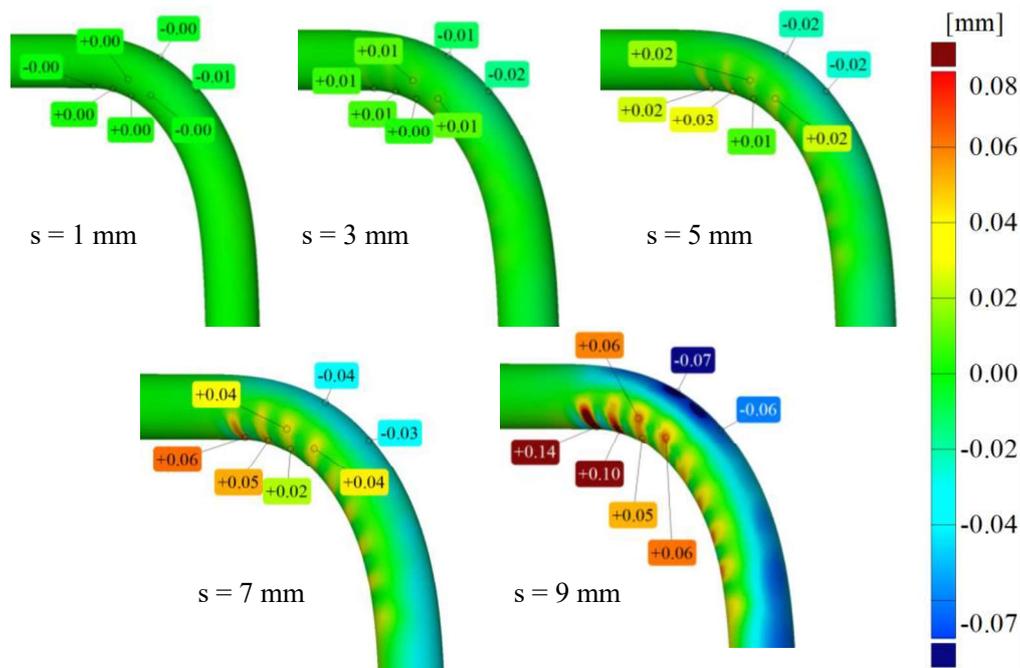


Abb. 4. Flächenabweichungen der Biegegeometrien für unterschiedliche Segmentabstände bei einem Biegefaktor von $B = 3,17$ und einem Wanddickenfaktor von $W = 10$

Für einen Segmentspalt von $s = 1$ mm und $s = 2$ mm sind keine nennenswerten Geometrieabweichungen zur Referenz zu verzeichnen. Ab einem Segmentspalt von $s = 5$ mm sind erste Abdrücke der Segmente in Umfangsrichtung in der unteren Hemisphäre des Rohrquerschnitts sowie ein Einfall am Außenbogen zu sehen, wenngleich sie mit Beträgen von maximal 0,03 mm klein sind. Diese Phänomene werden mit zunehmendem Segmentspalt charakteristischer. Für $s = 9$ mm sind schließlich maximale Flächenabweichungen von 0,14 mm im Anfangsbereich des Innenbogens, d.h. bei kleinen Biege winkeln, vorhanden. Bei größeren Biege winkeln drücken die Segmente seitlich und nicht mehr am Innenbogen in den Rohrquerschnitt.

Dies lässt sich auch in den Kontaktdrücken erkennen, deren Verläufe entlang des Innenbogens und entlang des Biegeradius in Abb. 5 für unterschiedliche Segmentspalte für einen Wanddickenfaktor und zwei Biegefaktoren dargestellt sind. Im Anfangsbereich kontaktiert das Rohr große Teile der halbumfänglichen Biegekavität, jedoch nicht den Bereich in der unmittelbaren Umgebung des Biegeradius. Die maximalen Kontaktdrücke befinden sich im Grund der Kavität am Innenbogen. Mit größer werdendem Biegewinkel reduziert sich der Kontaktdruck am Innenbogen bis auf null, sodass sich ab einem Biegewinkel von ca. 20° für $B = 3,17$ bzw. von ca. 11° für $B = 5,83$ nur noch seitliche Flächen im Kontakt mit dem Halbzeug befinden.

Mit größer werdendem Segmentspalt werden die dargestellten Kontaktdruckverläufe insgesamt inhomogener und weisen größere Maximalwerte auf. Diese Phänomene sind für den Biegefaktor $B = 3,17$ ausgeprägter als für $B = 5,83$. Weiterhin sind die Maximalwerte der Kontaktdrücke für $B = 3,17$ größer als für $B = 5,83$.

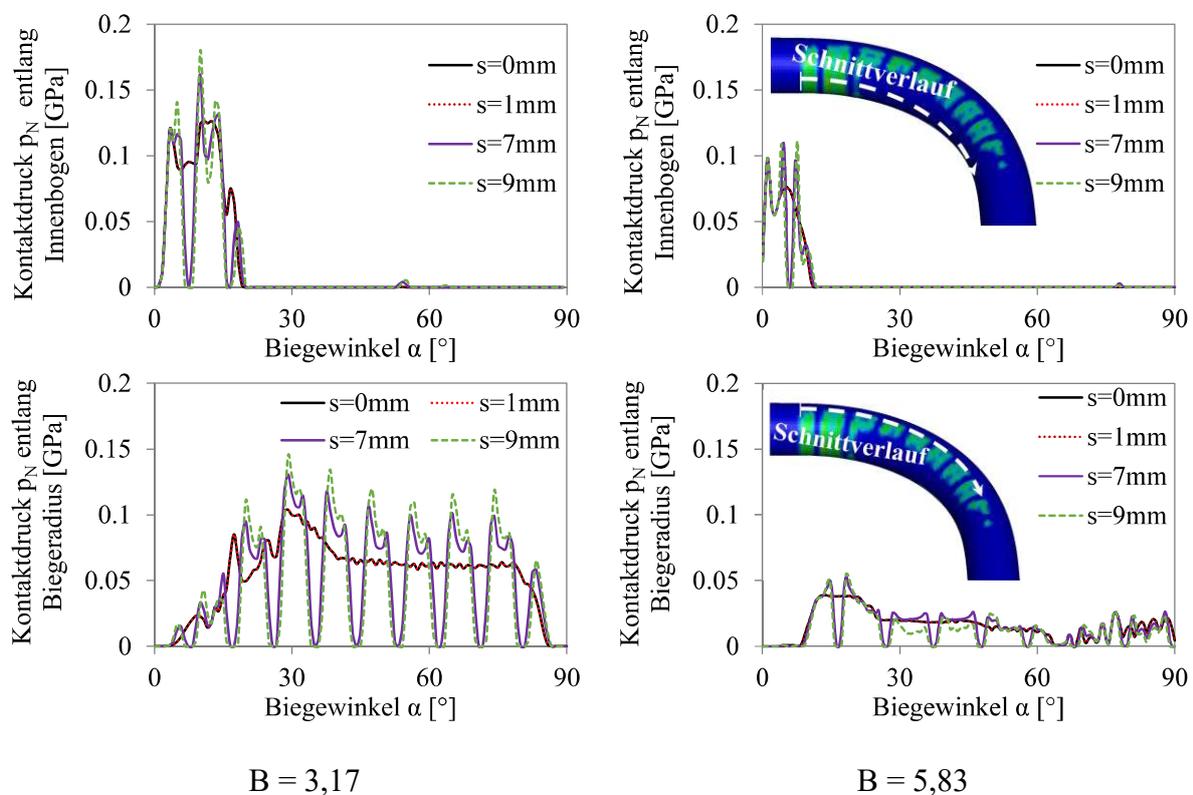


Abb. 5. Kontaktdruckverläufe entlang des Innenbogens (oben) und entlang des Biegeradius (unten) für unterschiedliche Segmentspalte, für einen Wanddickenfaktor von $W = 10$ und für die Biegefaktoren $B = 3,17$ (links) und $B = 5,83$ (rechts)

Bei allen Flächenvergleichen der in Abb. 2 rechts beschriebenen Variationen stellte sich der Anfangsbereich des Innenbogens als derjenige mit den größten Flächenabweichungen heraus, vgl. auch Abb. 4. Um die Abhängigkeit der lokalen Segmenteindrücke vom Segmentspalt und von den Biege- und Wanddickenfaktoren nun für alle Variationen aufzuzeigen, wurde in jedem Flächenvergleich dieser Maximalwert extrahiert und über dem Segmentspalt aufgetragen, siehe Abb. 6. Mit zunehmendem Biegefaktor und abnehmendem Wanddickenfaktor je Biegefaktor werden die Abweichungen kleiner.

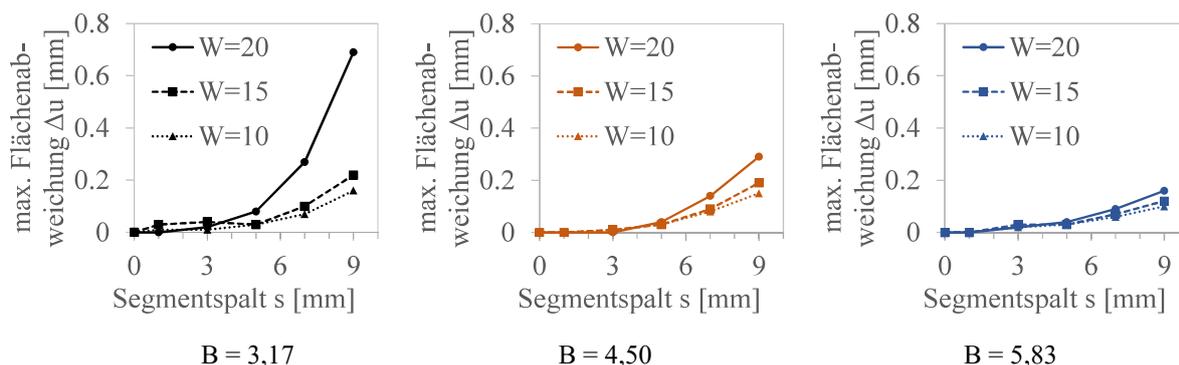


Abb. 6. Vergleich der maximalen Flächenabweichung Δu am Innenbogen in Abhängigkeit vom Segmentspalt s für unterschiedliche Biege- und Wanddickenfaktoren.

Diskussion der Ergebnisse im Kontext der übergeordneten Zielsetzung

Die übergeordnete Motivation des zugrundeliegenden Forschungsprojektes ist die Flexibilisierung von formgebundenen Biegeverfahren hin zu teilweise kinematischen Verfahren durch aktive Konturänderungen der formgebenden Wirkflächen. Hierzu werden Methoden zur Auflösung von Werkzeugoberflächen, z.B. durch Segmentierungen, und zur in-situ Verstellung dieser Oberflächen erforscht.

Die Ergebnisse dieses Beitrags legen dar, dass die Segmentierung von Biegeformen bei formgebundenen Prozessen für die hier untersuchten Biegeaufgaben grundsätzlich möglich ist. Kleine Segmentabstände verursachen vernachlässigbar kleine Auswirkungen in Bezug auf die Dehnungsverteilung, die Kontaktdruckverteilung und in der Konsequenz auf die Geometrie. Größere Segmentabstände, größere Wanddickenfaktoren und kleinere Biegefaktoren verursachen ausgeprägtere Phänomene.

Vor dem Hintergrund des Forschungsstands zum lateralen Eindringen von einzelnen Segmenten in Rundrohre erscheinen die Ergebnisse konsistent. Die Kontaktfläche wird mit zunehmendem Segmentspalt kleiner, sodass die Kontaktdrücke bei gleichzeitig durch die Biegegeometrie vorgegebenem Biegemoment steigen. Der Querschnitt muss somit einen lokal höheren Eindrückwiderstand aufbringen. Dieser hängt bei Rundrohren signifikant von den Randbedingungen (Zug, Druck, etc.), denen das Rohr ausgesetzt ist, und vom Wanddickenfaktor ab [21]. Die Randbedingungen sind beim hier betrachteten Prozess in Form der Längsdehnung gemäß $\epsilon = y/R$ durch den Biegefaktor bzw. den Biegeradius bestimmt. Die Längsdehnung einer Faser im Abstand y zur dehnungsneutralen Faser berechnet sich aus dem Verhältnis dieses Abstands und dem Biegeradius. Größere Biegeradien bewirken somit antiproportional zum Radius kleinere Biegedehnungen.

Für die Erforschung einer Gestaltungsmethode für segmentierte Oberflächen müssen die Wirkzusammenhänge zwischen Oberflächenparameter, Halbzeugeigenschaften und Randbedingungen in zukünftigen Arbeiten grundlegend charakterisiert und modelliert werden.

Eine Verstellung der Biegeform ist grundsätzlich vorstellbar. Auf Grundlage der gezeigten Ergebnisse wäre eine gleichmäßige radiale Verstellung der Segmente möglich, um mit einem Werkzeug mehrere Biegeradien abzubilden. Beim radialen Aufweiten würde sich der Segmentspalt zwar vergrößern, aber aufgrund des größeren Biegeradius kleinere Auswirkungen auf das Biegeergebnis ausüben. Ebenso ist es vorstellbar, mittels der segmentierten Biegeformen über den Biegewinkel veränderliche Radien abzubilden. Ggf. kann hierzu eine Variation des Umformpfades durch eine in-process Verstellung der Segmente dem Umformergebnis zuträglich sein, wie bspw. in der Literatur für das MPF großflächiger Bauteile berichtet wird [9], [10].

Zur Realisierung der dargelegten Konzepte bedarf es einer Werkzeugstruktur, die die Prozesslasten aufnimmt und gleichzeitig in der Lage ist, die definierten Segmentbewegungen durch Bewegungsmechanismen mit integrierter Aktuatorik zu induzieren. Neben der dafür notwendigen Entwicklung und Integration von Sensorik, Aktuatorik, Regelung und der Entwicklung von Fertigungsmethoden sind zunächst mechanistische Fragestellungen hinsichtlich eben dieser Werkzeugstruktur zu erforschen. In der gemeinsamen Forschung widmet sich unser Projektpartner der Fragestellung, wie sich das algorithmische Auffinden eines veränderlichen Stabwerkdesigns mittels gemischt ganzzahliger Optimierung (engl.: mixed integer programming, MIP) modellieren lässt. Das Ergebnis ist eine Methode, veränderliche Stabwerkstrukturen zu entwerfen, die ihre geometrische Form ändern können und gleichzeitig dem Lastkollektiv aus dem Umformprozess standhalten, sog. Transformer-Werkzeuge. Der MIP-Optimierungsansatz vereint folglich Topologieoptimierung und die Optimierung von Bewegungsmechanismen. Für nicht bewegliche Stabwerke existiert bereits eine Designmethode basierend auf MIP [22]. Diese wird im Projektverlauf auf Biegeformen appliziert und der entstehende Stabwerksentwurf wird bis zum Prototyp entwickelt werden.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag präsentiert eine simulationsgestützte Parameterstudie zur Segmentierung von Biegeformen beim modifizierten Abrollbiegen. Die Biegeformen werden in eine festgelegte Anzahl an Segmenten unterteilt und der Segmentspalt sowie die Biege- und Wanddickenfaktoren in einem vollfaktoriellen Versuchsplan variiert. Die Auswirkungen der Segmentierungen auf die Dehnungsverteilungen, die Kontaktdruckverteilungen und die Bauteilgeometrien werden für ausgewählte Biegeaufgaben untersucht und beschrieben. Anschließend erfolgt ein Vergleich der durch die Segmentierung verursachten lokalen Eindrücke am Innenbogen in Abhängigkeit vom Segmentspalt für unterschiedliche Biege- und Wanddickenfaktoren. Abschließend werden die Ergebnisse im Kontext der übergeordneten Zielsetzung des Forschungsprojektes diskutiert.

Mit größer werdendem Segmentspalt resultiert für eine ausgewählte Biegeaufgabe eine inhomogenere Dehnungsverteilung sowie eine inhomogenere Kontaktdruckverteilung mit größeren Maximalwerten. Diese spiegeln sich gleichsam in Geometrieabweichungen im Vergleich zum Bauteil, welches mit konventionell geschlossener Biegeform hergestellt wird, wider. Mit zunehmendem Segmentspalt nehmen der Einfall am Außenbogen und die lokalen Eindrücke der segmentierten Werkzeugkavität zu. Diese Phänomene sind umso ausgeprägter, je größer der Wanddickenfaktor ist und je kleiner der Biegefaktor ist. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine Segmentierung von Biegeformen für die hier betrachteten Biegeaufgaben mit moderaten Auswirkungen auf die Bauteilgeometrie möglich ist. Sie liefern den Ausgangspunkt für die Entwicklung von Gestaltungsmethoden für Segmentierungen, von Mechanismen zur Veränderung dieser Oberflächen und die Entwicklung von Transformer-Werkzeugen.

Funding Acknowledgement

Der vorliegende Beitrag stellt einen Auszug der Arbeiten zu einem Forschungsprojekt, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 509709804, dar.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Y. Yang et al., “Flexibility in metal forming,” *CIRP Annals*, vol. 67, no. 2, pp. 743–765, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.05.004.
- [2] S. Groth, “Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen,” Universität Siegen, Siegen, 2020.
- [3] P. Frohn-Sörensen, B. Mašek, M. F.-X. Wagner, K. Rubešová, O. Khalaj, and 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*, vol. 275, p. 116312, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116312.
- [4] S. A. Tronvoll, J. Ma, and T. Welo, “Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 124, no. 3, pp. 801–816, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10433-7.
- [5] C. Kuhnhen, J. Knoche, J. Reuter, S. S. Hassan Al-Maeni, and B. Engel, “Hybrid tool design for a bending machine,” *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 370–374, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.052.
- [6] E. Doege and L.-E. Elend, “Design and application of pliable blank holder systems for the optimization of process conditions in sheet metal forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 111, no. 1, pp. 182–187, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00506-4.
- [7] T. Yagami, K. Manabe, M. Yang, and H. Koyama, “Intelligent sheet stamping process using segment blankholder modules,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155–156, pp. 2099–2105, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.144.
- [8] C. Heftrich, R. Steinheimer, and B. Engel, “Rotary-draw-bending using tools with reduced geometries,” *Procedia Manufacturing*, vol. 15, pp. 804–811, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.410.
- [9] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui, and Q. G. Yan, “Multi-point forming technology for sheet metal,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1, pp. 333–338, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00685-4.
- [10] M.-Z. Li, Z.-Y. Cai, and C.-G. Liu, “Flexible manufacturing of sheet metal parts based on digitized-die,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 1, pp. 107–115, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.rcim.2005.09.005.
- [11] Z.-Y. Cai, S.-H. Wang, and M.-Z. Li, “Numerical investigation of multi-point forming process for sheet metal: wrinkling, dimpling and springback,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 37, no. 9, pp. 927–936, Jun. 2008, doi: 10.1007/s00170-007-1045-5.
- [12] M. Abosaf, K. Essa, A. Alghawail, A. Tolipov, S. Su, and D. Pham, “Optimisation of multi-point forming process parameters,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 92, no. 5, pp. 1849–1859, Sep. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0155-y.
- [13] S. Wang, Z. Cai, and M. Li, “Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 49, no. 5, pp. 475–483, Jul. 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2420-1.
- [14] A. M. Elghawail et al., “Measurement of forces on multi-point forming tools using fibre Bragg grating sensors,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 234, no. 3, pp. 453–462, Feb. 2020, doi: 10.1177/0954405419875334.

- [15] N. Selmi and H. BelHadjSalah, “Ability of the flexible hydroforming using segmented tool,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 89, no. 5, pp. 1431–1442, Mar. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9160-9.
- [16] V. Paunoiu, P. Cekan, E. Gavan, and D. Nicoara, “Numerical Simulations in Reconfigurable Multipoint Forming,” *Int J Mater Form*, vol. 1, no. 1, pp. 181–184, Apr. 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0021-4.
- [17] X. Lin et al., “Effect of Flexible 3D Multipoint Stretch Bending Dies on the Shape Accuracy and the Optimal Design,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, p. e1095398, May 2018, doi: 10.1155/2018/1095398.
- [18] J. Liang, Y. Liao, Y. Li, and C. Liang, “Study on the Influence of Bending Angle of Multipoint Stretch-Bending of Profiles on Section Distortion of Parts,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, p. e1975805, Feb. 2020, doi: 10.1155/2020/1975805.
- [19] X. Z. Liu, C. G. Liu, Y. Yao, and X. G. Zhang, “Numerical Analysis for Multi-Point Forming of Aluminum Alloy Profile,” *Advanced Materials Research*, vol. 1035, pp. 128–133, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1035.128.
- [20] E. El-Magd, C. Treppman, and M. Korthäuer, “Description of flow curves over wide ranges of strain rate and temperature,” *International Journal of Materials Research*, vol. 97, no. 10, pp. 1453–1459, Oct. 2006, doi: 10.3139/146.101390.
- [21] T. Wierzbicki and M. S. Suh, “Indentation of tubes under combined loading,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 30, no. 3, pp. 229–248, Jan. 1988, doi: 10.1016/0020-7403(88)90057-4.
- [22] C. Reintjes, *Algorithm-Driven Truss Topology Optimization for Additive Manufacturing*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-36211-9.