

In-Prozess Verstellung von Werkzeugsegmenten bei Biegeverfahren

Apostolos Aslanidis^{1, a *} und Bernd Engel^{1, b}

¹Universität Siegen, Lehrstuhl für Umformtechnik (UTS), Breite Straße 11, D-57076 Siegen, Deutschland

^aapostolos.aslanidis@uni-siegen.de, ^bbernd.engel@uni-siegen.de

Keywords: Flexibles Profilbiegen, Segmentierte Umformwerkzeuge, Verstellbare Umformwerkzeuge, Transformer Werkzeuge, Abrollbiegen, Freibiegen.

Abstract. Kinematische Biegeverfahren wie das Drei-Rollen-Schubbiegen besitzen eine inhärente Flexibilität, da mit einem einzigen Werkzeugsatz unterschiedliche Bauteilgeometrien hergestellt werden können. Werkzeuggebundene Umformverfahren wie das Rotationszugbiegen (RZB) oder das Abrollbiegen (ARB) sind diesbezüglich limitiert. Diese Formbindung ist im Hinblick auf die Flexibilität nachteilig, da eine Änderung der Bauteilgeometrie i.d.R. ein anderes Werkzeug oder Werkzeuganpassungen erfordert. Vorteile dieser industriell weit verbreiteten Biegeverfahren sind hingegen eine hohe Prozessstabilität sowie die Möglichkeit, sehr kleine Biegeverhältnisse zu realisieren. Ein Ansatz zur Flexibilisierung formgebundener Biegeverfahren bei gleichzeitiger Beibehaltung ihrer Vorteile besteht in der Verwendung segmentierter, verstellbarer Werkzeuge. Um die hierfür notwendigen großen Konturänderungen zu ermöglichen, ist einerseits eine Segmentierung der bislang geschlossenen Werkzeugwirkflächen erforderlich, wie sie aus Mehrpunkt-Umformverfahren bekannt ist, und andererseits eine gezielte, aktive (in-prozess) Verstellung dieser Segmente. Für die Entwicklung sogenannter Transformer-Werkzeuge sind insbesondere mechanistische Fragestellungen hinsichtlich der Auslegung der Segmentverstellungen zu erforschen. In diesem Beitrag wird eine simulationsgestützte Parameterstudie zur in-prozess Verstellung von segmentierten Biegewerkzeugen am Prozessbeispiel des Abrollbiegens und des Freibiegens vorgestellt. Für ausgewählte Biegeaufgaben wird der Einfluss von Segmentkinematiken unter Variation des Biege- und Waddickenfaktors auf die resultierenden Bauteileigenschaften phänomenologisch untersucht. Der Schwerpunkt liegt insbesondere auf dem Vergleich der resultierenden Bauteileigenschaften, die mit statisch segmentierten Biegewerkzeugen erzielt werden, gegenüber jenen, die mit in-prozess verstellten segmentierten Biegewerkzeugen hergestellt werden.

Einleitung und Stand der Forschung

Megatrends wie Individualisierung und Nachhaltigkeit treiben die Nachfrage nach Kleinserienfertigung und Variantenvielfalt voran und transformieren die Fertigungstechnik grundlegend [1]. Seitens der Blech- und Profilumformprozesse erfordert dies agile, skalierbare und flexible Umformverfahren sowie innovative Werkzeugkonzepte.

Kinematische Biegeverfahren, wie z. B. das Drei-Rollen-Schubbiegen [2, 3], besitzen eine inhärente Flexibilität, da mit einem einzigen Werkzeugsatz unterschiedliche Bauteilgeometrien unabhängig von der Werkzeugkontur hergestellt werden können. Werkzeuggebundene Verfahren, wie z. B. das Rotationszugbiegen (RZB) oder das Abrollbiegen (ARB), sind dahingehend limitiert und folglich hinsichtlich der Flexibilität nachteilig [4-6]. Die Werkzeugkontur gibt die Bauteilgeometrie vor, sodass eine Änderung der Bauteilgeometrie ein anderes Werkzeug oder -anpassungen erfordert. Vorteile dieser industriell weit verbreiteten Biegeverfahren sind jedoch eine hohe Prozessstabilität und die Möglichkeit, sehr kleine Biegeverhältnisse zu realisieren.

Zur Flexibilisierung werkzeuggebundener Biegeverfahren bei gleichzeitiger Nutzung ihrer prozessbedingten Vorteile sind verstellbare Werkzeuge erforderlich. Kuhnhen et al. [7] kategorisieren am Beispiel des Gesenkbiegens drei Level der Werkzeugflexibilität, die sich durch die Größenordnung der Oberflächenverstellung sowie deren Auswirkungen auf den Umformprozess unterscheiden. Große Oberflächenverstellungen sind im Flexibilitätslevel 3 zuzuordnen und können zur Adaption der gesamten Werkzeugwirkflächenkontur genutzt werden. Dadurch können unterschiedliche Bauteilgeometrien mit einem Werkzeugsatz hergestellt werden. Ein solcher Ansatz wird ebenfalls von Reuter et al. [8] am Prozessbeispiel des Abrollbiegens demonstriert. Voraussetzung für derartige große Konturänderungen ist zum einen die Segmentierung der bislang geschlossenen Werkzeugoberflächen und zum anderen die Implementierung entsprechender Verstellmechanismen dieser Segmente.

Reuter [9] entwickelt eine methodische Vorgehensweise zur Gestaltung segmentierter Biegewerkzeuge am Prozessbeispiel des Abrollbiegens. In systematisch aufeinander aufbauenden Komplexitätsstufen, die sich durch die Anzahl der Werkzeugfreiheitsgrade sowie die Längskrümmung der betrachteten Teillastfälle differenzieren, werden die Wirkzusammenhänge zwischen der Werkzeugoberflächentopologie und den daraus resultierenden Umformphänomenen und -mechanismen in Abhängigkeit der geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Profilhalbzeugs experimentell sowie simulationsgestützt untersucht. Es wird eine Gestaltungsmethode zur Festlegung der Spaltmaße, Segmentgeometrien und Prozessparameter entwickelt, die eine fundierte Wissensbasis und Arbeitskennfelder bereitstellt. Auf dieser Grundlage entstehen segmentierte Biegewerkzeuge, die eine deutlich erhöhte Flexibilisierung hinsichtlich der mit einem einzigen Werkzeugsatz herstellbaren Bauteilgeometrien ermöglichen. Zudem birgt die Segmentierung das Potenzial zur Implementierung vieler zusätzlicher Werkzeugfreiheitsgrade, sodass jedes Segment potenziell als Aktuator aufgefasst werden kann, der die Umformung während des Prozesses beeinflusst.

Darüber hinaus entwickeln Heftrich et al. [5, 10] eine Methode zur Reduzierung und Vereinfachung von Biegewerkzeugen für das Rotationszugbiegen. Dabei wird die prozesszeitabhängige Flächenpressung zwischen Werk- und Halbzeug mit konventionell geschlossenen Werkzeugoberflächen numerisch analysiert. Es werden Bereiche der Werkzeugoberfläche identifiziert, die keinen wesentlichen Beitrag zur Umformung leisten. Auf dieser Basis entstehen Werkzeuge mit reduzierten Wirkflächen. Der dadurch gewonnene Bauraum ermöglicht die Integration zusätzlicher Verstellachsen sowie die Anpassung der Biegewerkzeuge, wodurch die Umformung von Profilen mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern realisiert werden kann.

Weitere vielversprechende Ansätze zur Flexibilisierung werkzeuggebundener Umformverfahren finden sich im Bereich der Mehrpunktumformung (engl.: multi point forming (MPF) oder digitized die forming (DDF)) in der Blech- und Profillumformung, die durch diskrete, rekonfigurierbare Werkzeugsysteme gekennzeichnet ist [11-18]. Durch die Approximation der Werkzeugoberfläche mittels diskreter Werkzeugelemente und deren Verstellung lassen sich unterschiedliche Bauteilgeometrien mit einem Werkzeug realisieren. Die Diskretisierung der Werkzeugwirkfläche führt jedoch zwangsläufig zu lokalen, inhomogenen Werkzeugkontakten mit dem Halbzeug, die Bauteilfehler und Geometrieabweichungen verursachen. Deren Ausprägung hängt von den jeweiligen Werkzeug- und Prozessparametern ab [12-15, 19-22]. Gleichzeitig wird von den Autoren die Möglichkeit hervorgehoben, den Umformpfad durch in-prozess Verstellungen der Werkzeugsegmente gezielt zu variieren, wodurch Bauteilfehler reduziert und das Anwendungsspektrum segmentierter Werkzeuge erweitert werden können [15].

Ziel und Vorgehensweise

Die Flexibilisierung werkzeuggebundener hin zu teilweise kinematischen Biegeverfahren erfordert segmentierte, verstellbare Werkzeuge, deren Wirkflächen anpassbar sind. Die Verstellung kann entweder vor dem Umformprozess zwischen einzelnen Biegeoperationen erfolgen (statisch) oder während der Umformung stattfinden (in-prozess). Im letzteren Fall bewegen sich die Segmente während des Biegeprozesses von einer Anfangs- zu einer Endposition, wodurch der Umformpfad variiert und Prozess- sowie Bauteileigenschaften gezielt beeinflusst werden können.

Eine Gestaltungsmethode zur Auslegung der in-prozess Verstellung segmentierter Werkzeugwirkflächen in Abhängigkeit von Segmentkinematiken, Werkzeugoberflächentopologie, Halbzeugeigenschaften und Randbedingungen ist bislang nicht bekannt, insbesondere für das Profilbiegen enger Radien. Ziel des zugrunde liegenden Forschungsprojekts ist daher die Entwicklung einer entsprechenden Auslegungsmethode sowie geeigneter Mechanismen zur in-situ Verstellung. Dabei stehen insbesondere die Wirkzusammenhänge zwischen Segmentkinematiken, Umformmechanismen und resultierenden Bauteileigenschaften im Fokus.

Als Teilschritt wird in diesem Beitrag, aufbauend auf [9], eine simulationsgestützte Parameterstudie zur in-prozess Verstellung segmentierter Biegewerkzeugen vorgestellt. Untersucht werden zwei Ansätze. Die Rotation der segmentierten Biegeform beim Abrollbiegen (ARB) sowie die koordinierte translatorische Bewegung eines segmentierten Biegestempels beim Freibiegen (FB). Die Auswertung fokussiert die durch die in-prozess Segmentverstellung induzierten Effekte auf die Bauteileigenschaften im Vergleich zu statisch segmentierten und geschlossenen Werkzeugoberflächen (Referenzbiegungen). Abschließend werden die Ergebnisse im Kontext des Forschungsprojekts diskutiert.

Aufbau von FE-Simulationsmodellen

Finite Element (FE) Simulationen werden mit dem expliziten Gleichungslöser *LS-Dyna* (Version *mpp d R 12.0.0*, *Livermore Software Technology, LCC*) durchgeführt. Der Aufbau der Simulationsmodelle für das ARB (a) und FB (b) ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Modellparameter des ARB, wie z. B. die Elementformulierungen, -kantenlängen, Kontakteinstellungen und Reibbeiwerte, wurden auf Basis experimenteller Biegeversuche mit segmentierten Biegeformen in [9] kalibriert und für die vorliegenden Untersuchungen übernommen.

Zur Diskretisierung des Rohrhalfzeugs werden vollintegrierte Hexaeder-Volumenelemente mit selektiv reduzierter Integration (ELFORM = -2 in *SECTION_SOLID) verwendet. Die nominelle Elementkantenlänge beträgt 0.5 mm in Umfangs- und 1.5 mm in Axialrichtung bei fünf Elementen über die Wanddicke. Zur Auswertung der Randfaserdehnungen werden auf der Rohroberfläche zusätzliche Schalenelemente (Shell Layer) mit einer Dicke von 0,001 mm und identischen Materialeigenschaften wie das Rohr aufgebracht. Die Werkzeugwirkflächen werden als starre Körper (*MAT_020) modelliert und mit vollintegrierten Schalenelementen (ELFORM = 16 in *SECTION_SHELL) mit einer mittleren Elementkantenlänge von 1,0 mm diskretisiert.

Zur Beschreibung des elastisch-plastischen Materialverhaltens des Halbzeugwerkstoffs E235 +N werden der E-Modul E , die Dichte ρ sowie ein von Mises Materialmodell mit isotroper Verfestigung (*MAT_024) verwendet. Die Fließkurve wurde in Rohrzugversuchen gemäß DIN EN ISO 6892-1 an nahtlosgezogenen Rundrohren mit einem Außendurchmesser von 30 mm bestimmt [8, 9]. Zur Approximation der Fließkurve wird der Approximationsansatz nach El-Magd [23] verwendet (vgl. Gl. (1)),

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

wobei k_f die Fließspannung und φ den Umformgrad beschreiben. Die Parameter C_1 bis C_4 sowie n werden durch Kurvenfitting mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

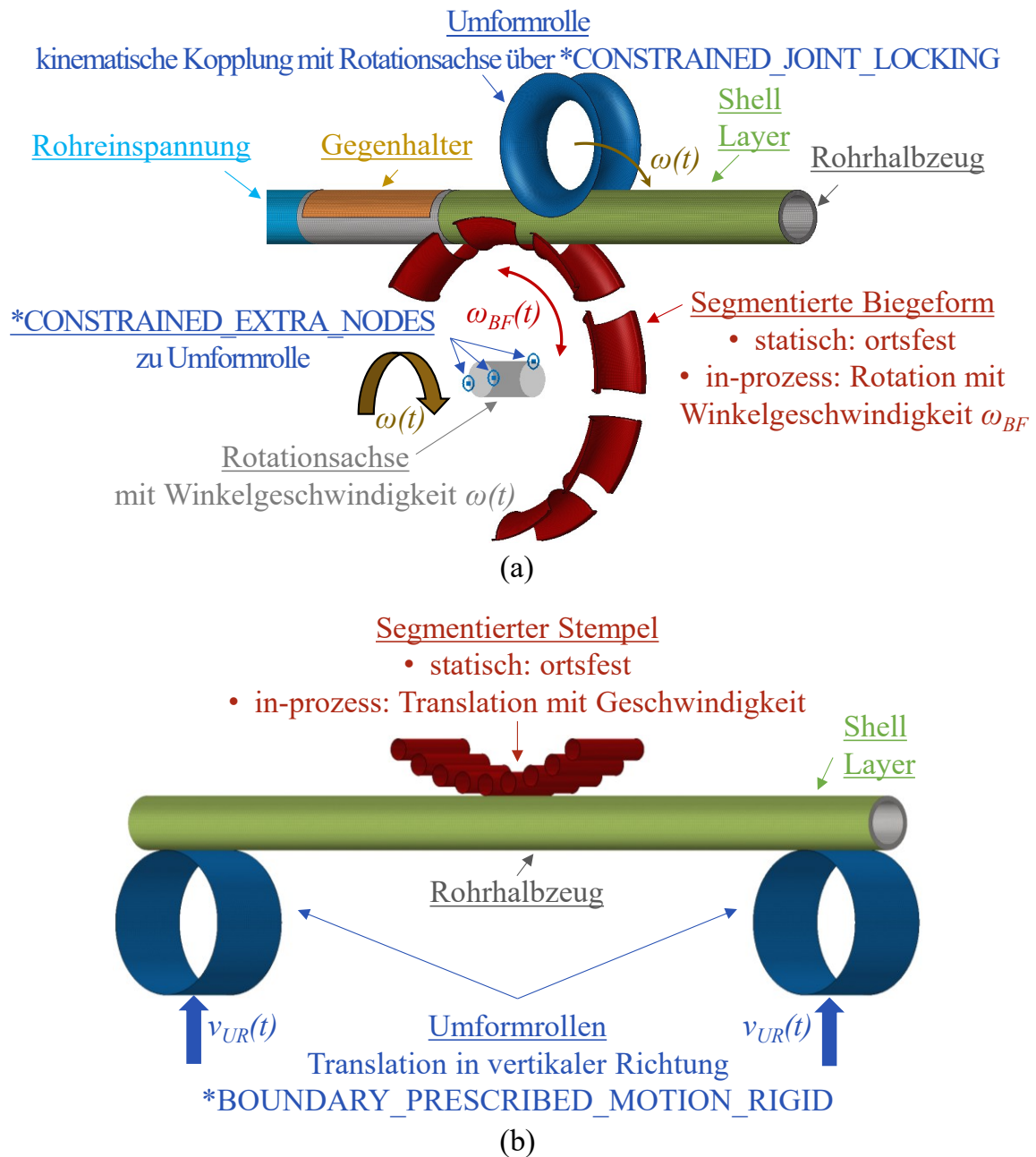


Abbildung 1: Aufbau von FE-Simulationsmodellen für das Abrollbiegen (a) und Freibiegen (b).

Beim ARB wird die Rotation der Umformrolle um den Biegemittelpunkt über eine als Schalenzyylinder modellierte Rotationsachse realisiert, deren Achse durch den Biegemittelpunkt verläuft und orthogonal zur Biegeebene steht. Die Ansteuerung erfolgt über ein zeitabhängiges Winkelgeschwindigkeitsprofil $\omega(t)$ mittels *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION. Die Übertragung auf die Umformrolle erfolgt kinematisch über *CONSTRAINED_EXTRA_NODES und *CONSTRAINED_JOINT_LOCKING. Die in-prozess Bewegung der segmentierten Biegeform wird durch die zeitabhängige Winkelgeschwindigkeit $\omega_{BF}(t)$ beschrieben. Beim FB wird die vertikale Bewegung der Umformrollen über ein zeitabhängiges

Geschwindigkeitsprofil $v_{UR}(t)$ mittels *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION realisiert, wobei ein maximaler Weg von 105 mm verfahren wird. Die translatorische in-prozess Bewegung des segmentierten Biegestempels erfolgt in vertikaler Richtung und wird kinematikabhängig zu den Umformrollen durch ein zeitabhängiges Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Die Penalty-Kontaktmodellierung zwischen den Werkzeugen und dem Halbzeug erfolgt über *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE, wobei die Schalendicken der Werkzeugvernetzung vernachlässigt werden. Es wird das Coulmb'sche Reibmodell verwendet. Beim ARB beträgt der Reibkoeffizient zwischen dem Rohr und der Biegeform sowie zwischen dem Rohr und dem Gegenhalter 0,1. Zur Berücksichtigung des im Modell nicht abgebildeten rollenden Lagerzustands der Umformrolle wird der Reibkoeffizient zwischen Umformrolle und Rohr auf 0 gesetzt. Beim FB wird für alle Werkzeugzug-Halbzeug-Kontakte ein Reibkoeffizient von 0,1 angenommen.

Parameterstudie zur in-prozess Verstellung von Werkzeugsegmenten

Die simulationsgestützten Untersuchungen zur in-prozess Verstellung von Werkzeugsegmenten werden in diesem Beitrag am Prozessbeispiel des ARB und des FB durchgeführt (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3).

Rotatorische Segmentbewegung beim Abrollbiegen. Die segmentierte Biegeform rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit ω_{BF} relativ zur Winkelgeschwindigkeit der Umformrolle ω_{UR} , wobei ω_{BF} ganzzahlige positive und negative Vielfache von ω_{UR} annimmt, sodass die stützenden Segmentwirkflächen in Abhängigkeit der rotierenden Umformrolle umlaufen (vgl. Abbildung 2). Die Biegeaufgabe ist durch den Biegefaktor $B = R/D = 3 \mid 4$, den Segmentspalt s , die Segmentteilung z und den Wanddickenfaktor $W = D/t = 10 \mid 15$ charakterisiert. In allen Varianten ist die Biegeform in $z = 9$ gleich große Kreissektoren mit Spalten der Breite $s = 15$ mm segmentiert. Der Rohraußendurchmesser beträgt konstant $D = 30$ mm. Der Halbzeugwerkstoff ist E235 + N. Der Innenradius der Segmente entspricht dem nominellen Innenradius der Biegeaufgabe. Der Rotationswinkel der Umformrolle beträgt $\alpha_{UR} = 30^\circ$. Als Referenz dient eine Simulation mit geschlossener Werkzeugoberfläche.

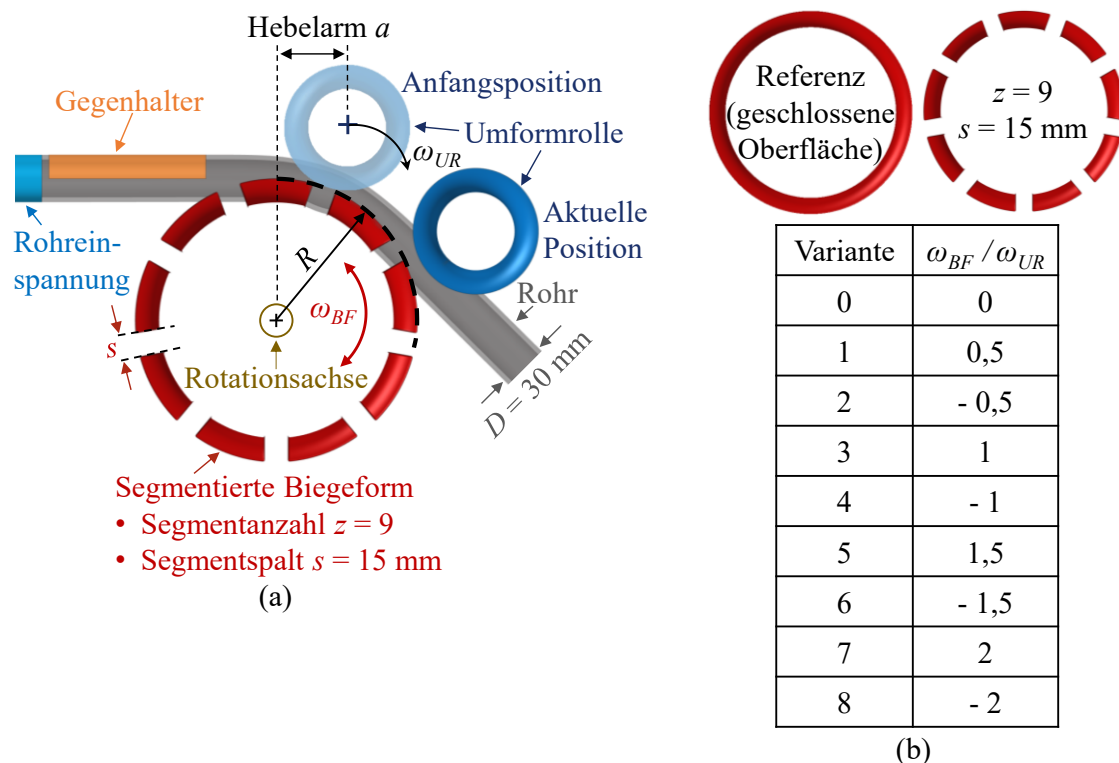


Abbildung 2: Simulationsvarianten zur rotatorischen in-prozess Verstellung der segmentierten Biegeform beim Abrollbiegen. (a) Prozessdarstellung, (b) Variation der Winkelgeschwindigkeit ω_{BF} .

Koordinierte translatorische Segmentbewegung beim Freibiegen. Die Segmente s_i liegen initial am geraden Rohrrhalbzeug an und werden während der Umformung koordiniert bis zur Endposition des statisch segmentierten Biegestempels verfahren. Die translatorische Bewegung erfolgt vertikal mit einer Geschwindigkeit $v_{s,i}(t)$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Umformrollen $v_{UR}(t)$, sodass ein kontinuierlicher Kontakt aller Segmente ohne zeitlich versetzte Kontaktfolge gewährleistet ist (vgl. Abbildung 3). Dadurch ändert sich der Biegeradius kontinuierlich. Die resultierende Werkzeugkontur entspricht am Prozessende der statischen Werkzeugkontur. Die Biegeaufgabe ist charakterisiert durch den Biegefaktor $B = R/D = 5 \mid 7,5$, die Segmentteilung $z = 9$, den Wanddickenfaktor $W = D/t = 15$ und den Halbzeugwerkstoff E235 + N. Der nominelle Segmentradius beträgt $r_s = 6$ mm bei konstantem Rohraußendurchmesser $D = 30$ mm. Als Referenz wird eine Simulation mit einer geschlossenen Werkzeugoberfläche verwendet.

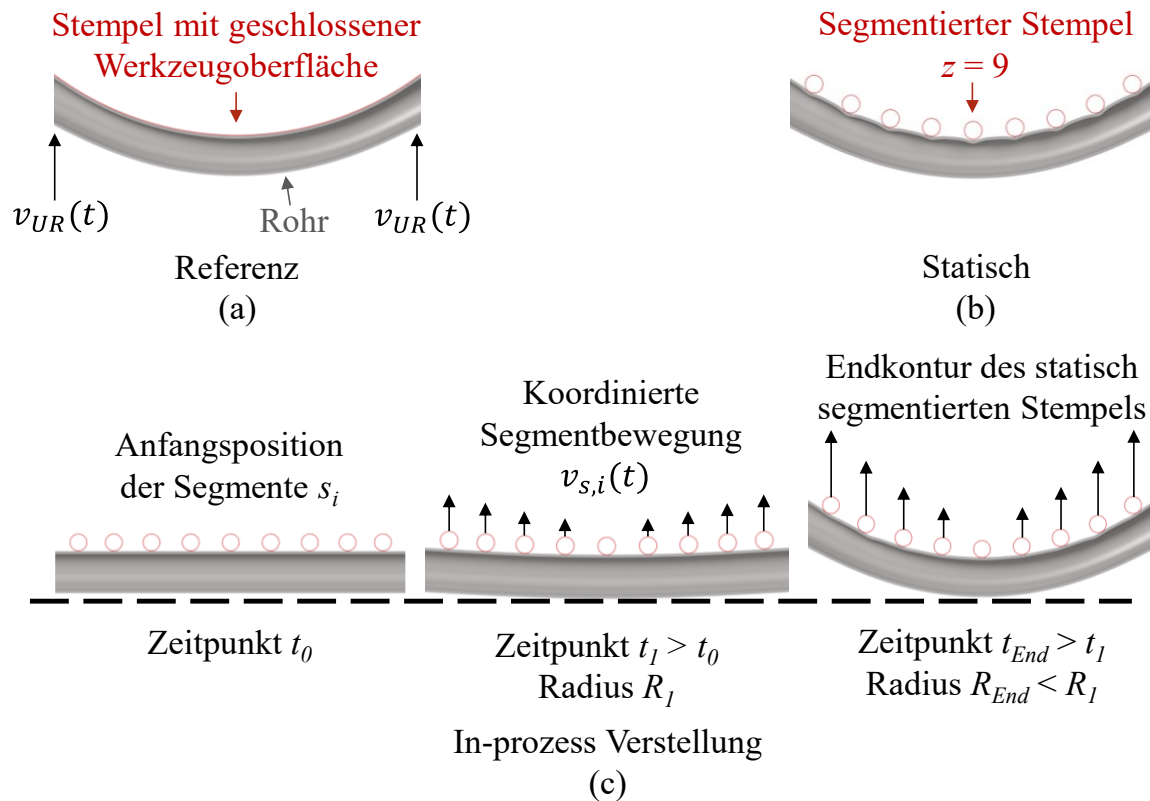


Abbildung 3: Übersicht der Simulationsstudie zur translatorischen in-prozess Verstellung des Biegestempels beim Freibiegen. (a) geschlossener, (b) statisch segmentierter und (c) segmentierter sowie in-prozess verstellbarer Biegestempel.

Auswertemethodik. Sowohl beim ARB als auch beim FB werden die Auswirkungen der in-prozess Verstellung bei variierenden Biege- und Wanddickenfaktoren auf die Bauteileigenschaften phänomenologisch untersucht. Untersucht werden die Längsdehnung entlang des Außen- und Innenbogens sowie geometrische Bauteilmerkmale anhand von Krümmungsverläufen der Schwerpunktlinie und Flächenabweichungen im Vergleich zu Bauteilen, die mit statisch segmentierten sowie geschlossenen Werkzeugen (Referenz) hergestellt werden. Die Analyse der geometrischen Bauteilmerkmale erfolgt im belasteten Zustand am Biegeende bei zugestellter Umformrolle, um die durch Segmentierung und in-prozess Verstellung induzierten Effekte isoliert zu betrachten, ohne eine Überlagerung durch variierende elastische Rückfederungen.

Ergebnisse

Im Folgenden werden anhand ausgewählter Biegeaufgaben die durch die in-prozess Verstellung von Werkzeugsegmenten hervorgerufenen Phänomene beim ARB und FB dargestellt.

Rotatorische Segmentverstellung beim Abrollbiegen. Die in Abbildung 4 dargestellten Verläufe zeigen die Längsdehnung φ_L entlang der Randfasern am Innen- und Außenbogen (a) sowie die Krümmung κ der Profilschwerpunktlinie (b) über die normierte Bogenlänge für die Referenz (REF) und verschiedene Winkelgeschwindigkeiten ω_{BF} der rotierenden segmentierten Biegeform. V0 bezeichnet die statisch segmentierte Werkzeugoberfläche, während V3, V4, V7 und V8 die in-prozess Verstellung repräsentieren. Zusätzlich werden Formabweichungen entlang des Innen- und Außenbogens mittels Flächenvergleich (c) gegenüber einem Referenzbauteil mit geschlossener Werkzeugoberfläche bei identischen Prozessbedingungen ausgewertet.

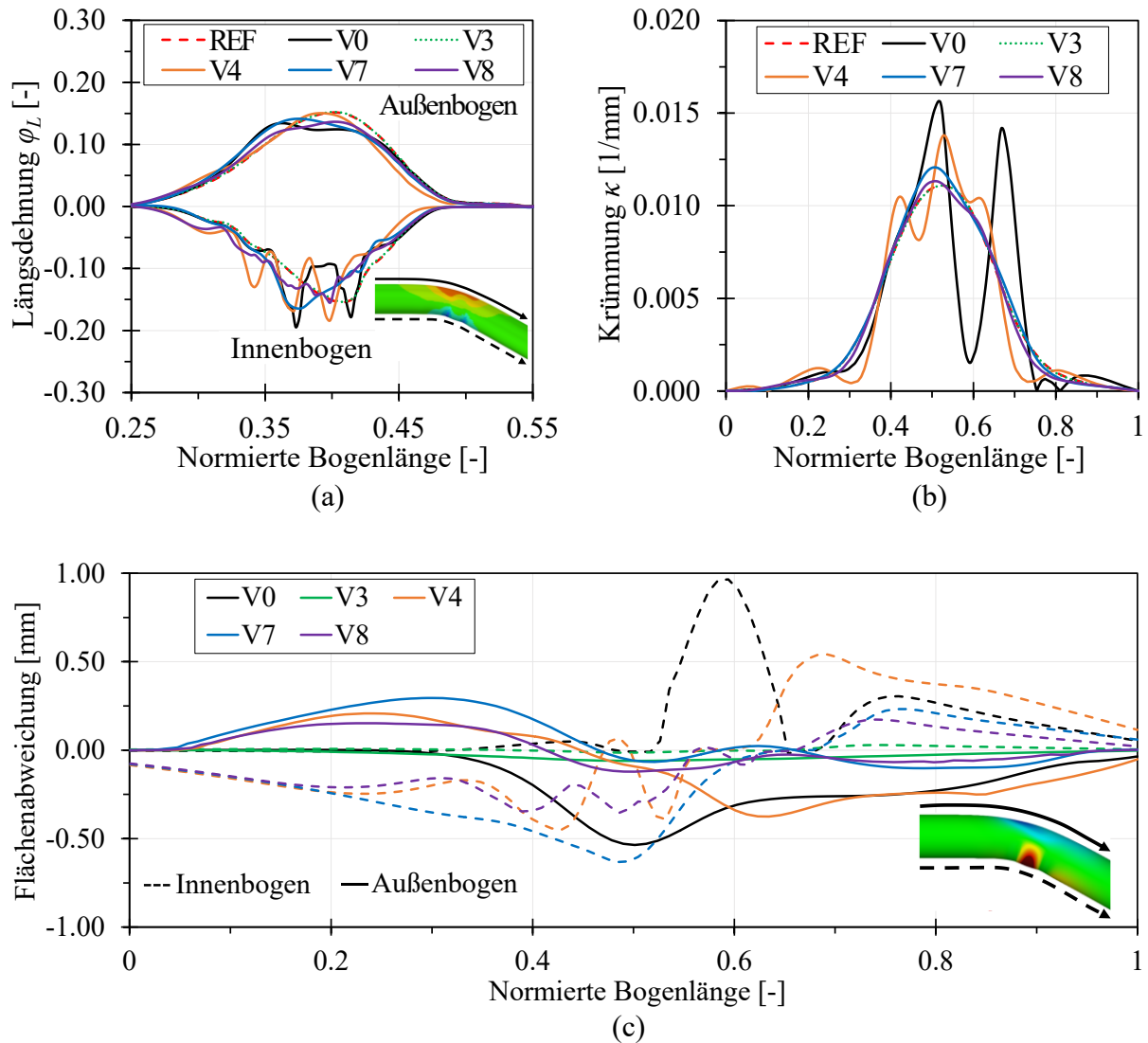


Abbildung 4: Einfluss der Winkelgeschwindigkeit ω_{BF} beim Abrollbiegen auf die Längsdehnung (a), den Krümmungsverlauf der Profilschwerpunktlinie (b) und die Flächenabweichung (FA) (c) entlang des Innen- und Außenbogens für $W = 10$ und $B = 3$.

Die Referenz zeigt einen gleichmäßigen Verlauf der Längsdehnung mit maximaler Zug- bzw. Druckdehnung im Außen- bzw. Innenbogen im Bereich der normierten Bogenlänge von 0,35 bis 0,45 (vgl. Abbildung 4 (a)). Die statisch segmentierte Variante V0 weist im Innenbogen ausgeprägte lokale Minima sowie erhöhte Schwankungen gegenüber der Referenz auf. Ein vergleichbares Verhalten zeigt V4 mit ähnlich hohen Amplituden der Extremwerte. Demgegenüber führen die Varianten V3, V7 und V8 zu homogenisierten Verläufen mit reduzierter Ausprägung lokaler Extremstellen.

Ein ähnliches Verhalten ergibt sich für die Krümmungsverläufe (vgl. Abbildung 4 (b)). Die Referenz zeigt ein einzelnes Maximum bei einer normierten Bogenlänge von ca. 0,5, während V0 mehrere lokale Maxima und Minima mit stark variierenden Amplituden aufweist. Auch V4 zeigt zusätzliche Extremstellen. Die Varianten V3, V7 und V8 führen hingegen zu einem kontinuierlicheren Verlauf mit einem Krümmungsmaximum nahe dem Referenzwert.

Für die Flächenabweichung zeigt V0 im Bereich der normierten Bogenlänge von 0,55 bis 0,65 deutliche Abweichungen zur Referenz mit ausgeprägten positiven und negativen Ausschlägen (vgl. Abbildung 4 (c)). Die Varianten mit in-prozess Verstellung weisen insgesamt reduzierte Abweichungen auf. V4, V7 und V8 zeigen lokale Abweichungen mit geringeren Amplituden als V0, während insbesondere V3, bei synchroner Rotation von

Biegeform und Umformrolle, über die gesamte Bogenlänge nahezu konstante Abweichungen von weniger als 0,1 mm aufweist.

Abbildung 5 zeigt den Einfluss der rotatorischen in-prozess Verstellung der segmentierten Biegeform auf die maximale und minimale Flächenabweichung im Außen- und Innenbogen für $B = 3$ und $B = 4$ bei $W = 15$ in Abhängigkeit der normierten Winkelgeschwindigkeit ω_{BF}/ω_{UR} . Zur Vergleichbarkeit wird je Flächenvergleich der jeweilige Extremwert extrahiert. Die Flächenabweichung beschreibt die Abweichung zum Referenzbogen mit geschlossener Werkzeugoberfläche. Die rot gestrichelte Linie kennzeichnet das Referenzniveau. Der orange markierte Punkt dient der Bewertung, ob die jeweilige in-prozess Variante die Flächenabweichung gegenüber der statisch segmentierten Biegeform reduziert oder erhöht.

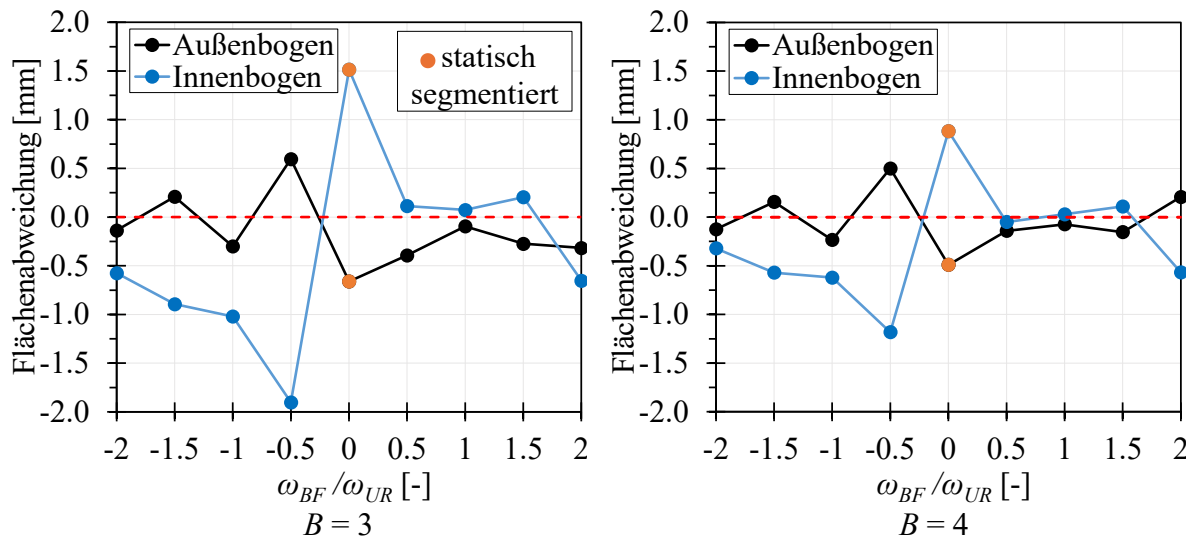


Abbildung 5: Vergleich der Extremwerte der Flächenabweichung am Außen- und Innenbogen in Abhängigkeit von der normierten Winkelgeschwindigkeit ω_{BF}/ω_{UR} für $W = 15$ und $B = 3 \mid 4$.

Die resultierende Flächenabweichung hängt stark von der Wahl der Winkelgeschwindigkeit der segmentierten Biegeform ab. Mit Ausnahme von $\omega_{BF}/\omega_{UR} = -0,5$ weisen alle in-prozess Varianten bei beiden Biege Faktoren geringere Flächenabweichungsbeträge als die statische Segmentierung auf. Minimale Abweichungen treten im Gleichlauf bei $\omega_{BF}/\omega_{UR} = 1$ auf. Der Einfluss ist bei $B = 3$ stärker ausgeprägt als bei $B = 4$.

Koordinierte translatorische Segmentverstellung beim Freibiegen. Abbildung 6 vergleicht die Längsdehnung φ_L am Innen- und Außenbogen (a), die Krümmung κ der Profilschwerpunktlinie (b) sowie die Flächenabweichung (c) über der normierten Bogenlänge für die Referenz, den statisch segmentierten und in-prozess verstellten Biegestempel bei $B = 5$ und $B = 7,5$ sowie $W = 15$.

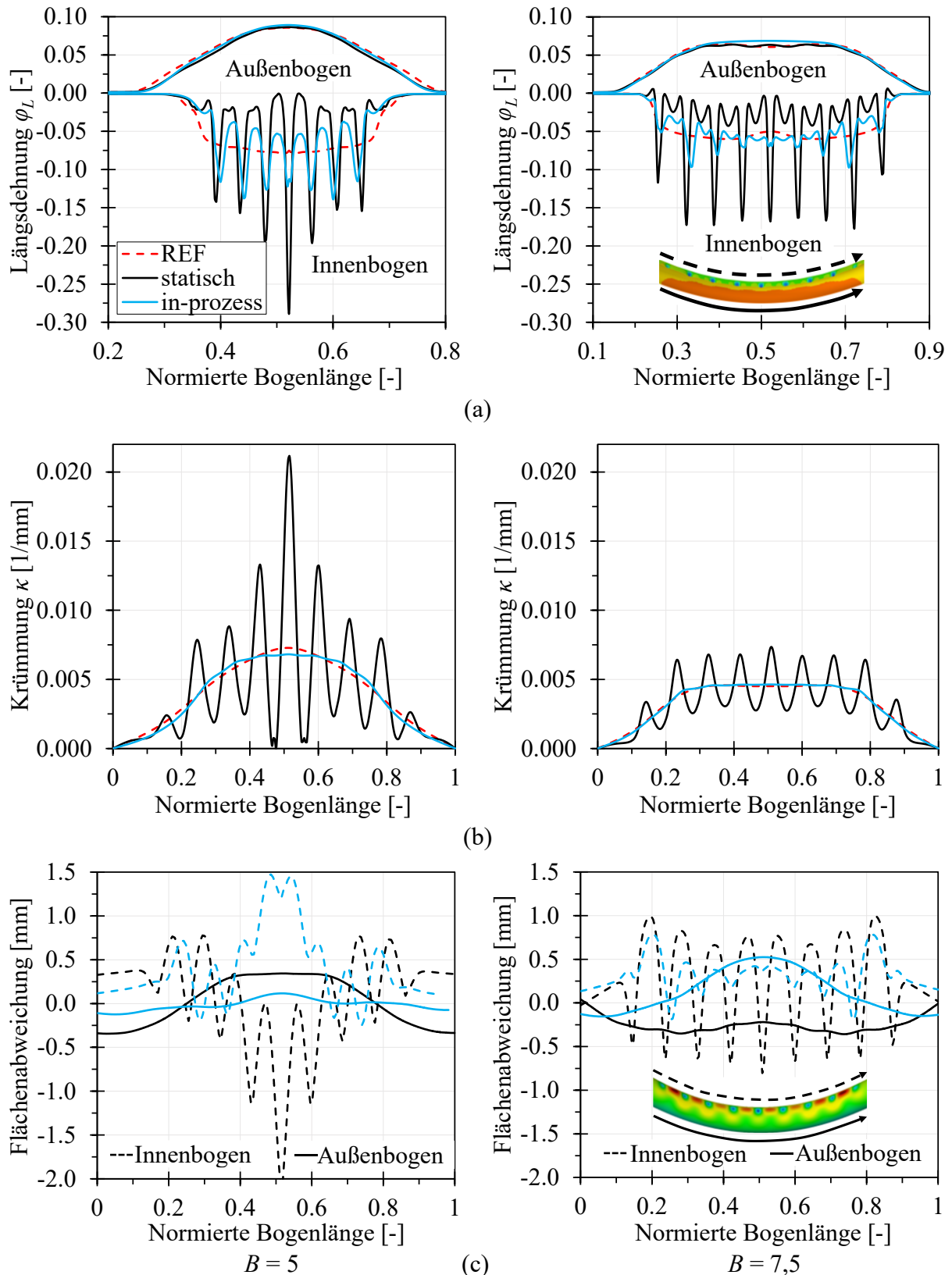


Abbildung 6: Auswirkungen der in-prozess Verstellung des Biegestempels beim Freibiegen auf die Längsdehnung (a), den Krümmungsverlauf der Profilschwerpunktlinie (b) und die Flächenabweichung (FA) (c) entlang des Innen- und Außenbogens für $W = 15$ und $B = 5 \mid 7,5$.

Die Referenz weist bei beiden Biegefaktoren einen glatten Verlauf mit moderaten Zug- und Druckdehnungen im Außen- bzw. Innenbogen auf (vgl. Abbildung 6 (a)). Die statische

Variante zeigt entsprechend der Segmentanordnung im Innenbogen ausgeprägte, periodisch auftretende lokale Minima mit hohen Amplituden sowie eine stark oszillierende Kurvenform um die Referenzkurve. Die in-prozess Variante folgt im Außenbogen weitgehend der Referenz und zeigt im Innenbogen deutlich reduzierte Schwankungen. Die Amplituden der Minima liegen näher an den Referenzwerten. Dieses Verhalten ist für beide Biege faktoren konsistent, wobei bei $B = 5$ höhere Amplituden auftreten als bei $B = 7,5$.

Ähnliches Verhalten ist für die Krümmung κ zu beobachten (vgl. Abbildung 6 (b)). Die Referenz zeigt einen glatten Verlauf mit einem Maximum im mittleren Bereich der normierten Bogenlänge. Die statische Variante weist in beiden Fällen mehrere ausgeprägte, periodisch auftretende lokale Maxima und Minima entsprechend der Segmentanordnung auf. Die in-prozess Variante zeigt hingegen einen überwiegend glatten Verlauf mit einem dominanten Maximum, dessen Lage und Höhe nahe an der Referenz liegen. Die lokalen Schwankungen sind deutlich reduziert, insbesondere bei $B = 5$.

Die Flächenabweichung für den Innen- und Außenbogen zeigt entsprechende Auswirkungen auf die Bauteilgeometrie (Abbildung 6 (c)). Im Innenbogen führt die statische Variante zu periodischen, amplitudenstarken Abweichungen infolge lokaler Dehnungskonzentrationen und Querschnittsdeformationen. Die in-prozess Variante weist ebenfalls Schwankungen auf, jedoch mit deutlich geringeren Amplituden und einer Annäherung an die Referenz. Im Außenbogen resultiert bei der statischen Variante überwiegend eine negative Abweichung, während die in-prozess Variante einen glatteren Verlauf mit reduzierter Abweichung und einer Annäherung an die Referenz aufweist. Dieses Verhalten ist für beide Biege faktoren konsistent, wobei die Abweichungen bei $B = 5$ insgesamt stärker ausgeprägt sind.

Diskussion der Ergebnisse

Die übergeordnete Motivation des Forschungsprojektes ist die Flexibilisierung werkzeuggebundener Biegeverfahren hin zu teilweise kinematischen Biegeverfahren durch aktive, in-prozess Konturänderungen der formgebenden Werkzeugwirkflächen. Hierfür sind sowohl eine geeignete Segmentierung der Werkzeugo berflächen als auch deren gezielte Verstellung erforderlich. Eine Gestaltungsmethode zur Segmentierung von Biege werkzeugen wurde in [9] entwickelt. Segmentierte Biege werkzeuge führen aufgrund des lokalen, inhomogenen Werkzeugkontakts mit dem Halbzeug zu charakteristischen Bauteilmerkmalen und beeinflussen die geometrischen Eigenschaften der Biegebauteile [9]. Die Auflösung der geschlossenen Werkzeugkontur ermöglicht zusätzliche Werkzeugfreiheitsgrade, wobei jedes Segment als Aktuator aufgefasst werden kann, der die Umformung in-prozess steuert.

Die Ergebnisse dieses Beitrags zeigen, dass eine in-prozess Verstellung segmentierter Werkzeugwirkflächen gegenüber einer statischen Segmentierung grundsätzlich vorteilhaft sein kann. Bei geeigneter Wahl der Kinematikparameter kann die zeitliche Abfolge von Segmentkontakten gezielt unterbunden werden, wodurch sich Bauteileigenschaften verbessern und Geometrieabweichungen gegenüber Referenzbögen reduzieren lassen.

Beim ARB führt die Rotation der segmentierten Biegeform dazu, dass die stützenden Wirkflächen des Segments mit der Umformrolle umlaufen. Alle untersuchten Varianten der Winkelgeschwindigkeit ω_{BF} beeinflussen die Längsdehnung, die Krümmung und die resultierende Geometrie, wobei sich je nach Kinematik unterschiedliche Abweichungen zur Referenz ergeben. Beim Gleichlauf von Biegeform und Umformrolle in Betrag und Richtung treten vernachlässigbare Abweichungen auf, da das auf der Biegeform abwickelnde Halbzeug keinen Spalt überrollt. Die in-prozess Verstellung des segmentierten Biegestempels beim FB führt gegenüber der statischen Ausführung zu verbesserten Bauteileigenschaften. Ursache ist der entfallende zeitversetzte Segmentkontakt, wodurch alle Segmente kontinuierlich am Halbzeug anliegen und die Kontaktkräfte gleichmäßiger verteilt werden. Die Umformzone erstreckt sich zu jedem Zeitpunkt über die gesamte Bogenlänge, während sie bei der statischen Variante orts- und zeitabhängig ist. Insgesamt reduziert die in-prozess Verstellung lokale

Beanspruchungsspitzen und Geometrieabweichungen, wobei die Wirksamkeit stark von den gewählten Segmentkinematiken und der Biegeaufgabe abhängt.

Unter Berücksichtigung eben dieser in-prozess Segmentverstellung ist eine weitere Reduzierung des Werkzeugs vorstellbar, wodurch die Flexibilität zusätzlich erhöht werden kann. Ebenso erscheint es möglich, über den Biegewinkel veränderliche Radien abzubilden, die sich in-prozess einstellen lassen. Die gezielte Variation des Umformpfads durch in-prozess Segmentverstellungen eröffnet damit ein erweitertes Anwendungsspektrum segmentierter Werkzeuge.

Für die Entwicklung einer Auslegungsmethode zur in-prozess Verstellung segmentierter Werkzeugwirkflächen müssen in zukünftigen Arbeiten die Wirkzusammenhänge zwischen den Segmentkinematiken, den infolgedessen stattfindenden Umformmechanismen und den sich ergebenden Bauteileigenschaften unter Berücksichtigung der Halbzeugeigenschaften und der Randbedingungen grundlegend untersucht werden.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine simulationsgestützte Parameterstudie zur in-prozess Verstellung segmentierter Biegewerkzeuge am Prozessbeispiel des Abrollbiegens (ARB) und des Freibiegens (FB) vorgestellt. Untersucht werden zwei Strategien zur Eliminierung der bei statischer Segmentierung auftretenden zeitlich versetzten Segmentkontakte. Beim ARB erfolgt dies durch eine rotatorische Segmentverstellung mittels Variation der Winkelgeschwindigkeit der segmentierten Biegeform relativ zur Umformrolle. Beim FB wird eine translatorische in-prozess Verstellung des segmentierten Biegestempels implementiert, sodass am Prozessende die identische Werkzeugkontur wie bei der statischen Variante vorliegt. Die Parameterstudie umfasst beim FB die Variation des Biegefaktors, beim ARB zusätzlich des Waddickenfaktors sowie der Winkelgeschwindigkeit der Biegeform. Die Auswirkungen auf die Längsdehnung, Krümmung und Geometrie werden untersucht und mit statisch segmentierten sowie geschlossenen Werkzeugoberfläche (Referenzbiegung) über Flächenabweichungen verglichen.

Beim ARB beeinflussen alle Varianten der Winkelgeschwindigkeit ω_{BF} die Längsdehnung, Krümmung und Bauteilgeometrie, wobei bei Gleichlauf (in Betrag und Richtung) mit der Umformrolle vernachlässigbare Abweichungen auftreten. Beim FB führen in-prozess Verstellungen gegenüber der statischen Variante zu verbesserten Bauteileigenschaften, da alle Segmente kontinuierlich im Kontakt stehen und sich die Umformzone über die gesamte Bogenlänge erstreckt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine Reduktion lokaler Beanspruchungsspitzen und geometrischer Abweichungen, abhängig von Segmentkinematik und Biegeaufgabe.

Die Ergebnisse dieses Beitrags legen dar, dass in-prozess Segmentverstellungen das Anwendungsspektrum segmentierter Werkzeuge erweitern und gezielt zur Verbesserung der Bauteilqualität eingesetzt werden können. Die Untersuchungen liefern den Ausgangspunkt für die Entwicklung von Gestaltungsmethoden für die in-prozess Verstellung von Werkzeugsegmenten, von Mechanismen zur gezielten Veränderung dieser Segmente sowie für die Entwicklung sogenannter Transformer-Werkzeuge.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag stellt einen Auszug aus den Arbeiten eines Forschungsprojekts dar, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 509709804 gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Y. Yang et al., "Flexibility in metal forming," *CIRP Annals*, Jg. 67, Nr. 2, S. 743–765, 2018. doi: 10.1016/j.cirp.2018.05.004.
- [2] S. Groth, P. Frohn und B. Engel, "Product planning system for manufacture-oriented modeling of freeform bend tubes produced by three-roll-push-bending," *Procedia Manufacturing*, Jg. 34, S. 10–18, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.107.
- [3] S. Groth, "Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen," Diss., Universität Siegen, Siegen, 2020.
- [4] S. A. Tronvoll, J. Ma und T. Welo, "Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending," *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 124, 3-4, S. 801–816, 2023. doi: 10.1007/s00170-022-10433-7.
- [5] C. Heftrich, R. Steinheimer und B. Engel, "Rotary-draw-bending using tools with reduced geometries," *Procedia Manufacturing*, Jg. 15, S. 804–811, 2018. doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.410.
- [6] M. Hinkel, "Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie," Diss., Universität Siegen, Siegen, 2013.
- [7] C. Kuhnhen, J. Knoche, J. Reuter, S. S. Hassan Al-Maeni und B. Engel, "Hybrid tool design for a bending machine," *Procedia CIRP*, Jg. 99, S. 370–374, 2021. doi: 10.1016/j.procir.2021.03.052.
- [8] Jonas Reuter, Apostolos Aslanidis und Bernd Engel, "Segmentierung von Biegeformen als Grundlage für die Entwicklung von Transformer-Werkzeugen," *Transformation in der Biegetechnik-Tagungsband zum 6. Biegeforum Siegen*, Jg. 2023, S. 91–101, 2023. doi: 10.25819/ubsi/10398.
- [9] J. Reuter, "Methode zur Gestaltung segmentierter Werkzeuge für die Flexibilisierung von Biegeprozessen," Diss., Universität Siegen, Siegen, 2025.
- [10] C. Heftrich und Bernd Engel, "Erhöhung der Flexibilisierung des Rotationszugbiegens mit reduzierten Werkzeugen," *Transformation in der Biegetechnik-Tagungsband zum 6. Biegeforum Siegen*, Jg. 2023, S. 33–43, 2023. doi: 10.25819/ubsi/10392.
- [11] M. Hermes, S. Chatti, M. Kleiner und W. Homberg, "Vorrichtung zum Biegen von schlanken Gegenständen, insbesondere zum Biegen von Rohren und Profilen," Patent DE102004045302A1.
- [12] J. Liang, Y. Liao, Y. Li und C. Liang, "Study on the Influence of Bending Angle of Multipoint Stretch-Bending of Profiles on Section Distortion of Parts," *Mathematical Problems in Engineering*, Jg. 2020, Nr. 1, S. 1–11, 2020. doi: 10.1155/2020/1975805.
- [13] 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*, Jg. 2018, Nr. 1, 2018, Art. Nr. 1095398. doi: 10.1155/2018/1095398.
- [14] M.-Z. Li, Z.-Y. Cai und C.-G. Liu, "Flexible manufacturing of sheet metal parts based on digitized-die," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 23, Nr. 1, S. 107–115, 2007. doi: 10.1016/j.rcim.2005.09.005.
- [15] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui und Q. G. Yan, "Multi-point forming technology for sheet metal," *Journal of Materials Processing Technology*, Jg. 129, 1-3, S. 333–338, 2002. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00685-4.

- [16] D. F. Walczyk, J. Lakshmikanthan und D. R. Kirk, "Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels," *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 17, Nr. 4, S. 287–296, 1998. doi: 10.1016/S0278-6125(98)80076-9.
- [17] D. E. Hardt, R. D. Webb und N. P. Suh, "Sheet Metal Die Forming Using Closed-Loop Shape Control," *CIRP Annals*, Jg. 31, Nr. 1, S. 165–169, 1982. doi: 10.1016/S0007-8506(07)63290-9.
- [18] B. A. Olsen, "Die forming of sheet metal using discrete surfaces," Diss., Institute of Technology, Massachusetts, 1980.
- [19] X. Z. Liu, C. G. Liu, Y. Yao und X. G. Zhang, "Numerical Analysis for Multi-Point Forming of Aluminum Alloy Profile," *AMR*, Jg. 1035, S. 128–133, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1035.128.
- [20] 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*, Jg. 234, Nr. 3, S. 453–462, 2020, doi: 10.1177/0954405419875334.
- [21] S. Wang, Z. Cai und M. Li, "Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process," *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 49, 5-8, S. 475–483, 2010. doi: 10.1007/s00170-009-2420-1.
- [22] M. Abosaf, K. Essa, A. Alghawail, A. Tolipov, S. Su und D. Pham, "Optimisation of multi-point forming process parameters," *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 92, 5-8, S. 1849–1859, 2017. doi: 10.1007/s00170-017-0155-y.
- [23] E. El-Magd, C. Treppman und M. Korthäuer, "Description of flow curves over wide ranges of strain rate and temperature," *International Journal of Materials Research*, Jg. 97, Nr. 10, S. 1453–1459, 2006. doi: 10.3139/146.101390.