

Freiformabrollbiegen

Daniel Nebeling^{1,a}, Bernd Engel¹

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

^adaniel.nebeling@uni-siegen.de

Keywords: Umformtechnik, Biegen, Freiformbiegen, Freiformabrollbiegen

Abstract. Current and future requirements for bending technology are identified and it is shown why these requirements cannot be met by current bending methods. The newly developed Free Form Unroll Bending (FFUB) is presented as a possible solution. Forming simulations are used to show that the process is, in principle, suitable for the bending of profile components. It is also shown that the process can be used to re-bend previously bent components, which is an important prerequisite for the cascading use of bent components. A process variant is presented in which the tool kinematics can be implemented using industrial robots. Due to the widespread use of industrial robots, this process variant offers a flexible and cost-effective entry into bending technology.

Einführung

Zum Biegen von Rohren und Profilen gibt es bereits eine Vielzahl an möglichen Fertigungsverfahren. Bei den bekannten Biegeverfahren gibt es zum einen die Freiformbiegeverfahren und zum anderen die werkzeuggebundenen Biegeverfahren. Während sich die Freiformbiegeverfahren durch eine hohe Flexibilität auszeichnen, haben typische Verfahren wie das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) oder das Matrizenschubbiegen (MSB) den Nachteil, dass das Bauteil durch den Werkzeugsatz geschoben werden muss. Dadurch ergibt sich im Bauteil eine dem Biegeprozess überlagerte Druckspannung, die insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen zur Faltenbildung führen kann [1]. Werkzeuggebundene Verfahren wie das Rotationszugbiegen (RZB) oder das Streckbiegen ermöglichen zwar die Überlagerung von Zugspannungen, sind aber nicht flexibel. Diese mangelnde Flexibilität führt zu erhöhten Aufwendungen bei der Regelung des Prozesses und zu hohen Kosten bei Änderungen des Biegeradius. Die werkzeuggebundenen Biegeverfahren bieten keine Möglichkeit zur Torsionskompensation, die insbesondere für unsymmetrische Profile unverzichtbar ist, wenn man ebene Bauteile herstellen möchte. Eine zunehmend wichtige Anforderung an die Produktionstechnik ist die skalierbare Fertigung, die erforderlich ist, um auch kleine Losgrößen wirtschaftlich herstellen zu können [2]. Eine weitere Anforderung speziell an die Biegetechnik ist die Möglichkeit, Leichtbaupotentiale durch die Umformung von dünnwandigen Profilen nutzen zu können [3]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es eines neuen Biegeverfahrens, das zum einen flexibler als bekannte werkzeuggebundene Verfahren ist und zum anderen ohne eine nachteilige Überlagerung von Druckspannungen auskommt, wie es bei den aktuellen Freiformbiegeverfahren der Fall ist.

Darüber hinaus können die aktuellen Biegeverfahren beziehungsweise die aktuellen Biegemaschinen nur gerade Halbzeuge aufnehmen, um diese anschließend zu biegen. Für eine nachhaltige Biegetechnik sind Biegeverfahren erforderlich, die auch eine kaskadierte Nutzung von Bauteilen ermöglichen und somit auch vorgebogene Bauteile in neue Biegegeometrien formen können.

Stand der Technik

Das Abrollbiegen (AB), welches gelegentlich auch als klassisches Rohrbiegen bezeichnet wird, ist ein werkzeuggebundenes Biegeverfahren [4]. Bei dem Verfahren wird das Bauteil zwischen Biegeschablone und Klemmstück eingespannt. Die Biegung wird durch die Rotation einer Biegerolle um die Biegeschablone erzeugt [5]. Die Biegeschablone und das Klemmstück sind ortsfest. Ebenso ist bei diesem Verfahren kein Profilver Schub erforderlich, wodurch dem Biegeprozess keine zusätzlichen Druckspannungen überlagert werden. Im Vergleich zum Rotationszugbiegen bietet das Abrollbiegen allerdings nur begrenzte Möglichkeiten den Materialfluss zu kontrollieren [6].

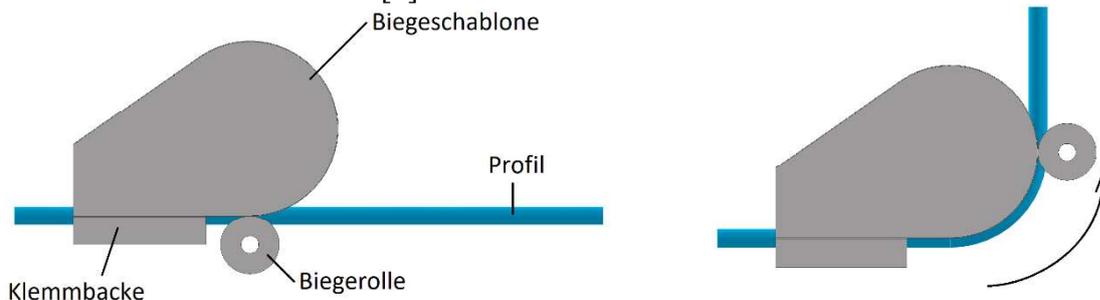


Abb. 1: Ausgangsposition beim Abrollbiegen Abb. 2: Endposition beim Abrollbiegen

Das Abrollbiegen ist ein werkzeuggebundenes Biegeverfahren, weshalb mit einer Biegeschablone immer nur ein Biegeradius hergestellt werden kann. Das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) ist im Gegensatz zum Abrollbiegen ein kinematisches Biegeverfahren, bei dem der Biegeradius nicht durch das Werkzeug vorgegeben wird, sondern durch die Positionierung der Umformrolle eingestellt wird [7]. Dadurch können verschiedene Biegeradien mit dem gleichen Werkzeugsatz hergestellt werden. Abbildung 3 zeigt die Ausgangsposition der Werkzeuge beim DRSB. Ein Werkzeugsatz beim DRSB besteht aus einer Biegerolle, einer Umformrolle und in der Regel min. zwei Stützrollen sowie einer Transporteinheit für den Profilver Schub [8]. Bei dem Biegeprozess (Abb. 4) wird die Umformrolle zugestellt und das Profil durch den Werkzeugsatz geschoben. Durch diese Art des Vorschubs wird dem Profil eine zusätzliche Druckspannung überlagert, die insbesondere bei dünnwandigen Profilen zur Faltenbildung führen kann [9].

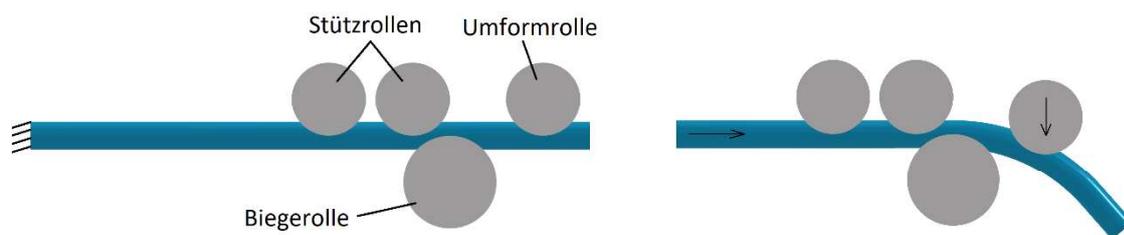


Abb. 3: Ausgangsposition beim DRSB

Abb. 4: Biegeposition beim DRSB

Freiformabrollbiegen

Der Verfahrensablauf beim Freiformabrollbiegen (FFAB) ist in Abb. 5 dargestellt. Zu Beginn des Prozesses wird das Profil einseitig eingespannt (Abb. 5a). Anschließend werden die Werkzeuge am Profil positioniert (Abb. 5b). Ein Werkzeugsatz beim Freiformabrollbiegen besteht aus mindestens einer Biegerolle und einer Umformrolle. Die in Abb. 5 gezeigte Konfiguration enthält zusätzlich noch zwei Stützrollen. Während dem eigentlichen Biegeprozess können die einzelnen Rollen dann auf beliebigen Bahnkurven verfahren werden. Gebogen wird das Profil in dem Bereich zwischen den beiden Rollenpaaren (Abb. 5c). Der Abstand d zwischen den beiden Rollenpaaren gibt daher im Wesentlichen auch die Größe der Umformzone vor und stellt somit einen wichtigen Prozessparameter dar. Nach dem Erreichen der Endposition und dem gewünschten Biegewinkel können die Werkzeuge wieder aufgeföhren werden und das gebogene Bauteil kann entnommen werden (Abb. 5d).

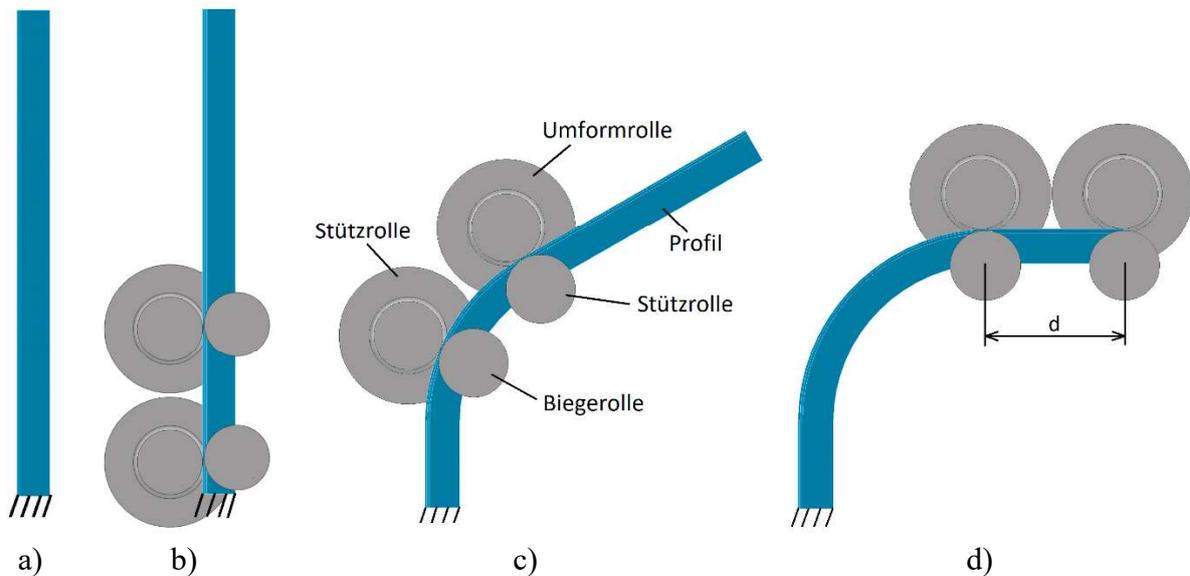


Abb. 5: Verfahrensablauf beim Freiformabrollbiegen

Die zusätzlichen Stützrollen stützen zum einen den Querschnitt des Profils während der Biegung und zum anderen erleichtern sie auch eine Torsionskompensation. Wenn Profile gebogen werden, die bezogen auf die Biegeachse einen unsymmetrischen Querschnitt aufweisen, kommt es aufgrund der Krafteinleitung außerhalb des Schubmittelpunkts zur Torsion des Querschnitts während dem Biegevorgang [10]. Das FFAB bietet die Möglichkeit eines der Rollenpaare, um die Schwerpunktschwerachse des Profils zu rotieren (Abb. 6). Dadurch kann der im Biegeprozess entstehenden Torsion des Querschnitts entgegengewirkt werden. Praktisch umsetzen lässt sich das FFAB beispielsweise mit Industrierobotern wie in Abb. 7 gezeigt. Dabei kann jeweils ein Rollenpaar auf einem Industrieroboter montiert werden, sodass anschließend beliebige Bahnkurven abgeföhren werden können.

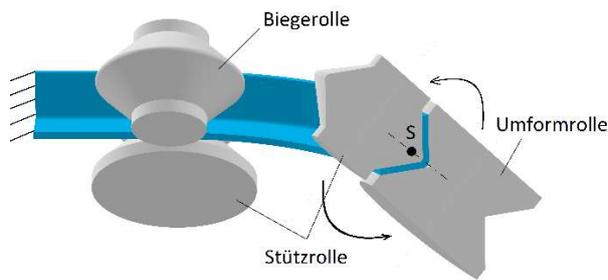


Abb. 6: Torsionsüberlagerung beim FFAB

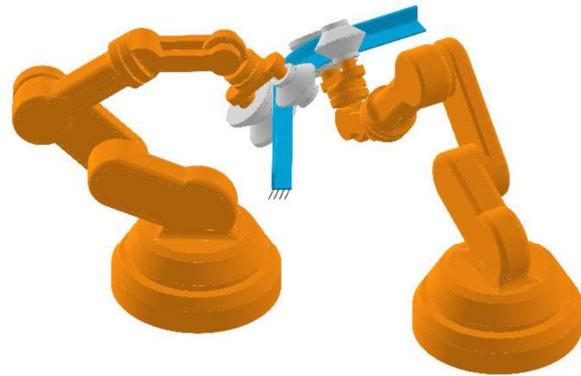


Abb. 7: FFAB mit Industrierobotern

Simulationsmodell

Mit der Software ABAQUS der Firma *Dassault Systèmes* wurde ein Simulationsmodell für den Biegeprozess erstellt. Dabei wurden die Werkzeuge als Starrkörper modelliert und das Profil mit Volumenelementen vernetzt. Die wichtigsten Simulationsparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Simulationsparameter

Solver	ABAQUS Dynamic, Explicit
Element Typ (ABAQUS)	C3D8R, reduced integration, hourglass control
Netzgröße	2 mm
Kontakt Algorithmus	Penalty contact method
μ zwischen Profil / Rollen	Frictionless

Für die Simulation wird ein isotropes v. Mises Verfestigungsmodell verwendet. Die Fließkurve wird mit Hilfe eines Swift/Krupkowski-Ansatzes approximiert [11].

$$k_f = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (1)$$

Die Dichte des Materials wurde mit $7,8E-09 \text{ t/mm}^3$ angenommen. Außerdem wurde ein Elastizitätsmodul von 210 GPa und eine Poissonzahl von 0,3 angenommen. Abb. 8 zeigt die für die Simulation verwendete approximierte Fließkurve.

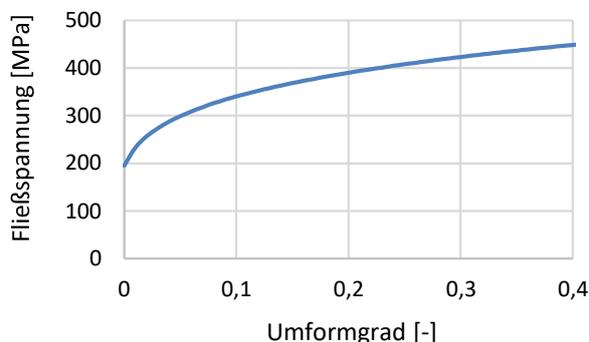


Abb. 8: Fließkurve für S235JR

Tab. 2: Parameter für Swift Approximation

K	=	540 [MPa]
ε_0	=	0.0073
n	=	0.207

Die in der Simulation verwendeten Rollenwerkzeuge sind in Abb. 9 dargestellt. Die außenliegende Stützrolle hat dabei die gleiche Geometrie wie die Umformrolle und die innenliegende Stützrolle hat die gleiche Geometrie wie die Biegerolle. Abb. 10 zeigt das vernetzte Profil. Das Profil hat einen Querschnitt von $40 \times 40 \text{ mm}$ und einen Katenradius von

5 mm. Die Gesamtlänge des Profils beträgt 1200 mm. Die Erforschung des Verfahrens erfolgt zunächst mit einem Vollquerschnitt, um Einflüsse durch eine Querschnittsdeformation ausschließen zu können.

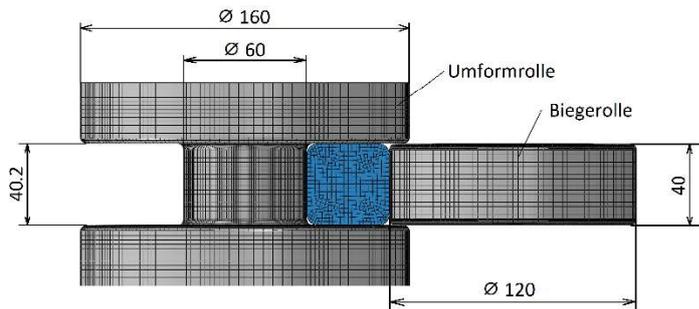


Abb. 9: Rollenwerkzeuge

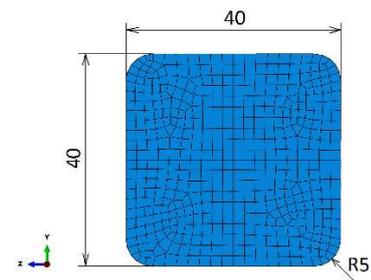


Abb. 10: Vernetztes Profil

Umformsimulationen

Die Simulationsergebnisse für einen einstufigen Biegeprozess sind in Abb. 11 dargestellt. Die Abb. zeigt das gebogene Profil und die Rollenwerkzeuge in ihrer Endposition. PE11 ist die plastische Dehnung in Längsrichtung des Profils und damit der Hauptumformgrad. Dieser schwankt zwischen 11 % Dehnung am Außenbogen und 8 % Stauchung am Innenbogen. Der Biegeradius in dieser Simulation beträgt 280 mm, was einem Biegefaktor von 7 entspricht. In Abb. 12 ist die dazugehörige Kinematik der einzelnen Rollen dargestellt.

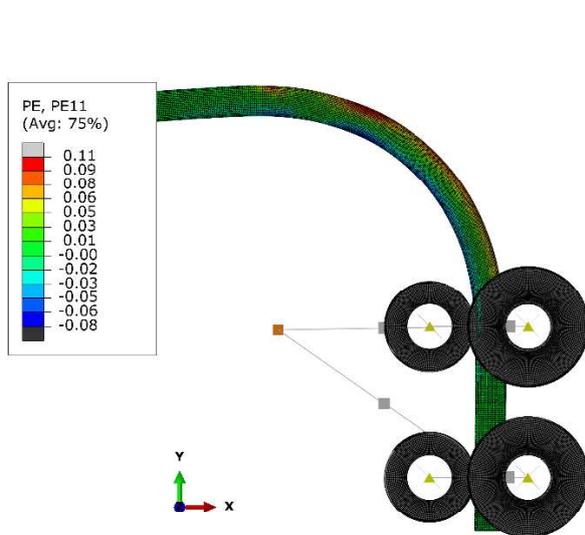


Abb. 11: Einstufige FEM Simulation FFAB

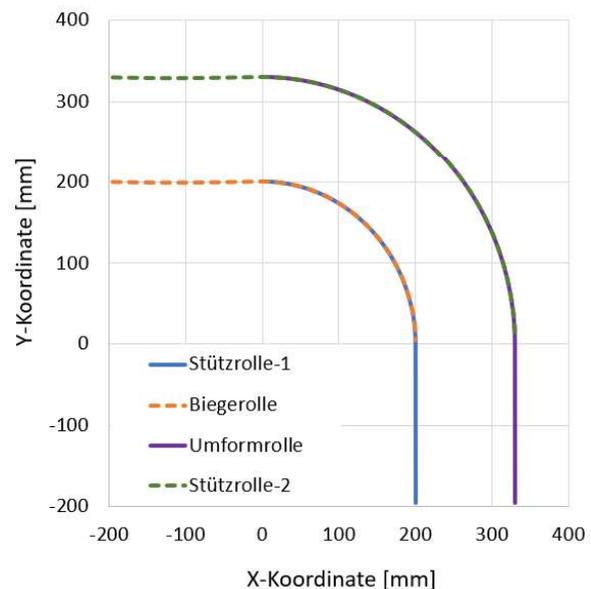


Abb. 12: Kinematik einstufiger Biegeprozess

Auffällig bei der Dehnungsverteilung ist eine Inhomogenität am Anfang der Biegung. Abb. 13 zeigt die gleiche Simulation zu Beginn der Biegung. Dort sieht man wie die Dehnung zunächst im Kontaktbereich der Rollen ansteigt, während im Bereich mittig zwischen den Rollenpaaren noch keine Umformung stattgefunden hat. Abb. 14 zeigt die plastische Dehnung in Längsrichtung des Profils am Außenbogen am Ende des Biegeprozesses. Auch dort ist zu erkennen, wie die Dehnung kurz nach dem Beginn der Biegung erst ansteigt und dann zunächst wieder abfällt, bevor das globale Maximum erreicht wird. Anschließend verläuft die Längsdehnung dann vergleichsweise konstant bis zum Ende der Biegung. Auch bei anderen Freiformbiegeverfahren wie dem Drei-Rollen-Schubbiegen kommt es zu Beginn der Biegung

zu ähnlich inhomogenen Dehnungsverteilungen, bevor ein annähernd konstanter Dehnungsverlauf erreicht wird [12].

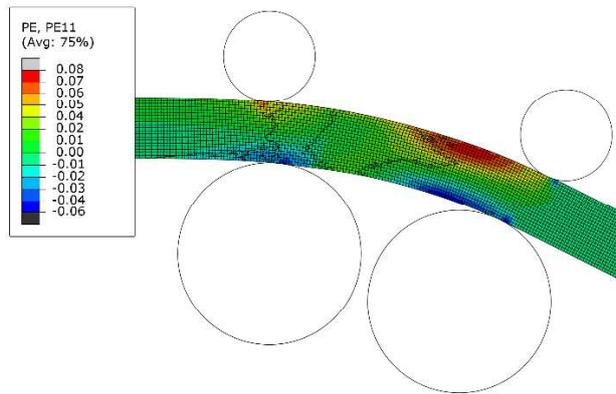


Abb. 13: Dehnungsverteilung beim Anbiegen

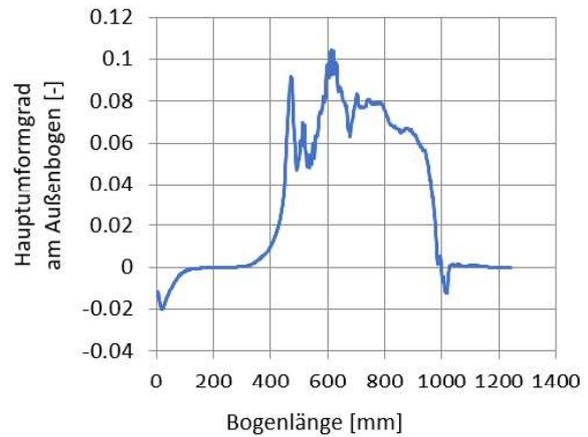


Abb. 14: Plastische Dehnung am Außenbogen

Neben dem einstufigen Biegeprozess wurde auch ein mehrstufiger Biegeprozess simuliert. Dabei sollte untersucht werden, ob mit dem Freiformabrollbiegen auch bereits gekrümmte Profilabschnitte erneut gebogen werden können. Die Möglichkeit, auch bereits gekrümmte Bereiche erneut zu Biegen, ist die Voraussetzung für eine Kaskadennutzung von Biegebauteilen und ein wichtiger Vorteil gegenüber bekannten Biegeverfahren. Konkret wurde ein zweistufiger Biegeprozess simuliert, bei dem das gerade Profil zunächst auf einen Radius von 280 mm gebogen wurde und anschließend in einer zweiten Umformstufe wieder auf einen Radius von 365 mm aufgebogen wurde. Abb. 15 zeigt das gebogene Profil sowie die Rollenwerkzeuge am Ende der zweistufigen Umformung. Dargestellt ist dort die plastische Dehnung in Längsrichtung des Profils. Die dazugehörige Kinematik der einzelnen Werkzeugrollen ist in Abb. 16 dargestellt.

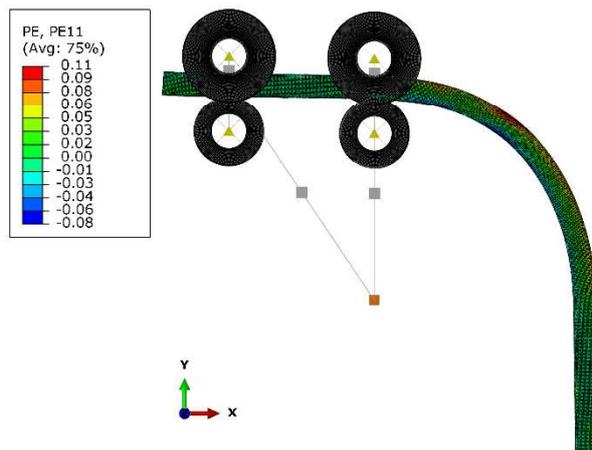


Abb. 15: Zweistufige FEM Simulation FFAB

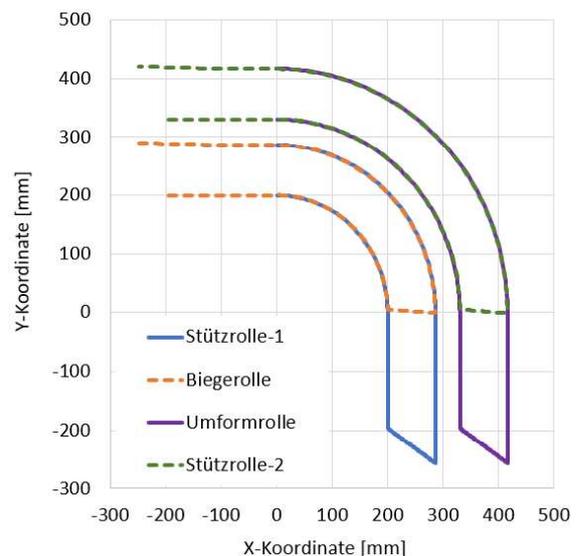


Abb. 16: Kinematik zweistufiger Biegeprozess

Abb. 17 zeigt den Verlauf der plastischen Dehnung am Außenbogen des Profils für den zweistufigen Biegeprozess. Der qualitative Verlauf der Dehnungsverteilung ist für beide Umformstufen identisch. Man sieht allerdings das die Dehnung bei der zweiten Biegung bereits früher ansteigt, was auf die insgesamt größere gebogene Länge der Biegung-2 zurückzuführen

ist. In der zweiten Hälfte des gebogenen Bereichs hat die Biegung-2 hingegen eine reduzierte Dehnung im Vergleich zur Biegung-1. Diese reduzierte Dehnung war aufgrund der geringeren Krümmung der zweiten Biegung auch zu erwarten. Annähernd identisch sind die Krümmungsverläufe hingegen in dem Bereich kurz nach Beginn der Biegung in dem bereits bei der einstufigen Umformung ein Abfall der Dehnung beobachtet werden konnte.

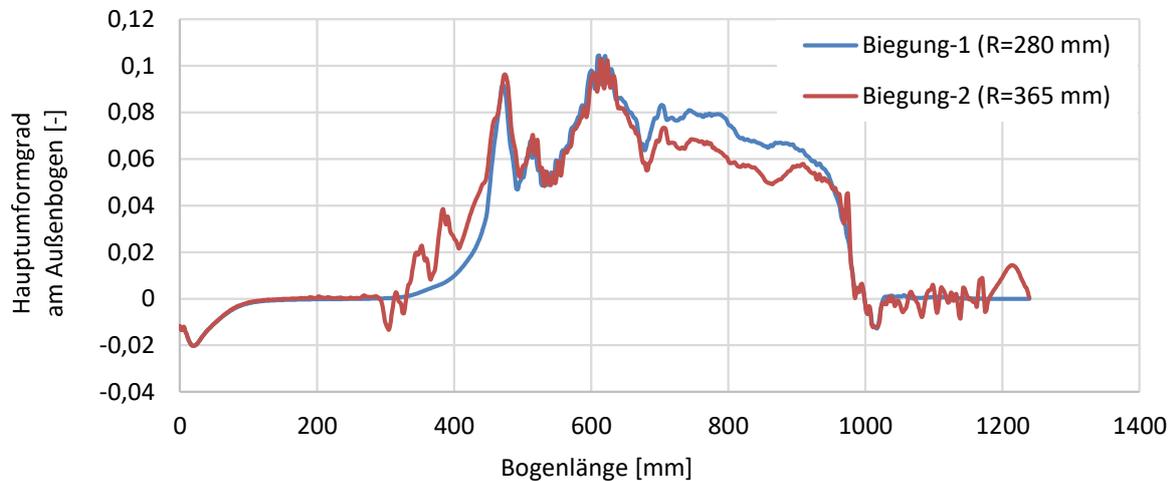


Abb. 17: Plastische Dehnung am Außenbogen bei mehrstufiger Umformung

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden aktuelle und zukünftige Anforderungen an die Biegetechnik genannt und aufgezeigt, warum diese Anforderungen mit aktuellen Biegeverfahren nicht erfüllt werden können. Als eine mögliche Lösung wurde das neu entwickelte Freiformabrollbiegen vorgestellt.

Bei den ersten hier vorgestellten Untersuchungen zum Freiformabrollbiegen konnte mit Hilfe von Umformsimulationen gezeigt werden, dass das Verfahren prinzipiell zum Biegen von Profilbauteilen geeignet ist. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass mit dem Verfahren auch bereits gekrümmte Bauteile erneut gebogen werden können, was eine wichtige Voraussetzung für die Kaskadennutzung von Biegebauteilen ist. Es wurde eine Verfahrensvariante vorgestellt, bei der die Werkzeugkinematik mithilfe von Industrierobotern umgesetzt werden kann. Aufgrund der weiten Verbreitung von Industrierobotern bietet diese Verfahrensvariante einen flexiblen und kostengünstigen Einstieg in die Biegetechnik. Die Umformsimulationen haben allerdings auch gezeigt, dass es im Anbiegebereich zu einer ungleichmäßigen Dehnungsverteilung kommt, die sicherlich auch einen Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Wie groß dieser Einfluss auch im Vergleich zu anderen Freiformbiegeverfahren ist und wie sich die Dehnungsverteilung optimieren lässt, soll in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Außerdem soll das hier gezeigte Simulationsmodell experimentell validiert werden, um im Anschluss weiterführende Untersuchungen und eine Sensitivitätsanalyse zum Freiformabrollbiegeprozess durchführen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Nebeling und B. Engel, „Bending profiles with variable cross section,“ in 15th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, Italy, 2021.
- [2] Klaus Dröder, Ann-Kathrin Reichler und Georg Mahlfeld, „Scalable Process Chain for Flexible Production of Metal-Plastic Lightweight Structures,“ in 2nd CIRP Conference on Composite Material Parts Manufacturing, 2019.
- [3] Y. Okude, S. Sakaki, S. Yoshihara und B. J. MacDonald, „High Precision Draw Bending Of Asymmetric Channel Section With Restriction Dies And Axial Tension,“ in International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2011.
- [4] VDI 3430, Rotary draw bending of profiles, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [5] J. Gillanders, Pipe and Tube Bending Manual, Rockford, Illinois: Fabricators & Manufacturers Association, International, 1994.
- [6] G. Miller, Tube forming processes: A comprehensive guide, Dearborn, Mich.: SME Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- [7] B. Engel und S. Kersten, „Analytical Models to Improve the Three-Roll-Pushbending Process of Tube-Profiles,“ in Special edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011, Aachen, 2011.
- [8] S. Groth, P. Frohn und B. Engel, „Product planning system for manufacture-oriented modeling of freeform bend tubes produced by three-roll-push-bending,“ in 47th SME North American Manufacturing Research Conference, Penn State Behrend Erie, 2019.
- [9] J.A. Österreicher, D. Nebeling, F. Grabner, A. Cerny, G.A. Zickler, J. Eriksson, G. Wikström, W. Suppan und C.M. Schlögl, „Secondary ageing and formability of an Al-Cu-Mg alloy (2024) in W and under-aged tempers,“ Materials & Design, Bd. 226, 2023.
- [10] S. Groth and B. Engel, „A method for manufacturing bent profiles with open cross-section by die-push-bending,“ ITAtube Journal, pp. 44-49, 2018.
- [11] H. Swift, „Plastic instability under plane stress,“ Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Bd. 1, Nr. 1, pp. 1-18, 1952.
- [12] S. Groth, Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen, Aachen: Shaker Verlag, 2020, p. 119.