

Alternative Werkzeugtechnik – holzbasierte Umformwerkzeuge

Michael Geueke^{1,a}, Daniel Nebeling¹ und Bernd Engel¹

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

^amichael.geueke@uni-siegen.de

Keywords: Umformtechnik, Biegen, Leichtbau, Nachhaltigkeit, Werkzeugtechnik, Holz

Abstract. Um die Flexibilität in einem Produktionszeitalter zu erhöhen, das durch Massenfertigung und Individualisierung gekennzeichnet ist, und gleichzeitig den geopolitischen Klimazielen gerecht zu werden, sind nachhaltigere Ansätze für die Blechumformung und das Profilbiegen erforderlich, die an die jeweiligen Fertigungsprozesse angepasst sind. Starre, metallbasierte Werkzeugsysteme erfordern große Material- und Energieressourcen, wenn hohe Flexibilität, kleine Losgrößen oder Individualisierung angestrebt werden. Um den Gesamtressourcenverbrauch zu reduzieren und den Klimaanforderungen gerecht zu werden, können nichtmetallische Werkzeugansätze diesen Problemen entgegenwirken und gleichzeitig Flexibilität und Individualisierung beim Profil- und Rohrbiegen anstreben.

Im Vergleich zu konventionellen Werkzeugansätzen auf Metallbasis können Umformwerkzeuge auf Holzbasis potenzielle Ressourceneinsparungen (z.B. CO₂-Fußabdruck) ermöglichen und eine nachhaltige Werkzeugalternative für das Biegen von Rohren und Profilen darstellen. Obwohl die mechanische Leistungsfähigkeit von Holz geringer ist als die von konventionellem Werkzeugstahl, können bestimmte Umformwerkzeuge auf Holzbasis für diese Biegeanwendungen eingesetzt werden. Um Werkzeuge für die Umformung von Verbundwerkstoffen auf Holzbasis auslegen zu können, ist ein tieferes Verständnis der mechanischen Eigenschaften erforderlich.

Diese Arbeit gibt einen Prozessüberblick für biobasierte Werkzeugalternativen in einer Machbarkeitsstudie für holzbasierte Werkzeugwerkstoffe, um die mechanische Leistungsfähigkeit von Metallrohren und -profilen für das Rotationsziehen und Freiformbiegen zu untersuchen. Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit werden verschiedene Verbundstrukturen (Dicke, Orientierung, Basismaterial) und Geometrien für holzbasierte Formwerkzeuge aus Robinie (*Robinia pseudoacacia*) untersucht. Abschließend wird festgestellt, dass die Ergebnisse ein potenzielles Prozessfenster für holzbasierte Umformwerkzeuge zum Rohr- und Profilbiegen aufzeigen.

Einführung und Motivation

In der Nachfolge des Kyoto-Protokolls wurde im Pariser Abkommen, das von 197 Staaten unterzeichnet wurde, das klare Ziel formuliert, den vom Menschen verursachten globalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen [1]. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Ansätze von Nachhaltigkeit erforderlich, um die ökologischen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten zu reduzieren. Auf der anderen Seite führt ein Paradigmenwechsel von der Massenfertigung hin über Flexibilität und Individualisierung in allen Produktions- und Konsumgüterindustrien zu einer stetig steigenden Nachfrage nach hochindividuellen Massen Anpassungen bei kleinen Losgrößen [2]. Zur Erhöhung der Flexibilität in der Metallumformung unter geopolitischen Restriktionen, sind neue Ansätze erforderlich, um beide Ziele in einem Umfeld zunehmender Globalisierung und Preiswettbewerbs in Einklang zu bringen [3].

Auch wenn die Flexibilität bei Biegeanwendungen mit kinematischen Umformmechanismen inhärent ist (z. B. Drei-Rollen-Schubbiegen), kann sie durch alternative, agile oder intelligente Produktionssysteme verbessert werden [2]. Als 2017 die Kreislaufwirtschaft postuliert wurde, definierten Potting et al. 9R-Strategien, um ein nachhaltiges Produktionssystem von der linearen zur zirkulären Wirtschaft zu gestalten [4]. Innerhalb der 9R-Strategien gibt es verschiedene Ansätze, um den Verbrauch natürlicher Ressourcen und die Umweltbelastung zu reduzieren. Durch die Anwendung der 9R-Strategien auf konventionelle Produktionsanwendungen können Potenziale für nachhaltige Produktionstechnologien und -systeme erschlossen werden.

Vor diesem Hintergrund besteht die Motivation, konventionelle Umformwerkzeuge durch biobasierte Materialien zu adäquieren und die Potentiale der alternativen Ansätze für geeignete Umformverfahren herauszustellen. Unter Berücksichtigung der 9R-Strategien in Kombination mit den Megatrends „Individualisierung“ und „Neo-Ökologie“ wird ein zunehmendes Umwelt- und Verantwortungsbewusstsein der Gesellschaft hinsichtlich konventioneller Technologien und Ansätze innoviert und neu gedacht [5].

In dieser Studie wird ein biobasierter Ansatz vorgestellt, der alternative Werkzeugkonzepte für die Metallumformung umfasst. Die Leistungsfähigkeit von Werkzeugen aus Robinien-Schichtsystemen (*Robinia pseudoacacia*) für das Freiformbiegen von Rohren wird anhand geometrischer Abweichungen hinsichtlich der Qualität und Machbarkeit dargestellt und bewertet.

Literaturübersicht

Das Biegen von Rohren ist eine weit verbreitete Umformtechnik, die sowohl formgebundene als auch kinematische Biegevorgänge umfasst. Rohrkomponenten unterschiedlichen Querschnitts können zu strömungstechnischen und strukturellen Bauteilen gebogen werden [6]. Formgebundene Werkzeugansätze, wie das Rotationszugbiegen, ermöglichen kleine Biegeverhältnisse, sowie ein hohes Maß an Prozessrobustheit und Zuverlässigkeit. Andererseits weisen sie jedoch einen Mangel an Flexibilität auf, da jede Biegegeometrie ein Biegewerkzeug mit einem spezifischen Biegeradius im Verhältnis zum Außenrohrdurchmesser erfordert [7]. Freiformbiegeverfahren wie das Drei-Rollen-Schubbiegen erhöhen die Flexibilität des Biegeprozesses, da die Biegegeometrie kinematisch erzeugt wird. Hierzu können durch die kinematische Variation gepaart mit dem Profilver Schub der Werkzeugausrichtung verschiedene Rohr- und Profilverhalzeuge mit einem Werkzeugaufbau gebogen werden: inline oder zwischen verschiedenen Biegeoperationen [8, 9]. Obgleich inkrementelle Biegeverfahren verschiedene Ausprägungen umfassen, ist das Prinzip des Umformmechanismus grundsätzlich gleich. Das Profil wird durch stationäre Stützwerkzeuge (Stütz- und Biegerollen) axial geführt und die Umformkraft wird durch eine bewegliche Umformrolle relativ zu den stationären Werkzeugen auf das Profil aufgebracht, während das Profil gleichzeitig durch den Vorschub in Längsrichtung bewegt wird [10]. Beim Drei-Rollen-Schubbiegen kann die gewünschte Produktgeometrie durch Zustellung der Biegegeometrie an der Umformrolle variiert werden (siehe Abb. 1).

Das Zusammenspiel von Walzenvorschub und Profilver Schub bestimmt die Biegekontur. Die Biegekontur ist werkzeugunabhängig und ermöglicht Radienübergänge und große Biegeverhältnisse, während für kleinere Biegeverhältnisse typischerweise formgebundene Werkzeuge (z.B. Rotationszugbiegen) zum Einsatz kommen. Um einen sicheren Prozess zu gewährleisten, müssen Materialschwankungen, Maschinensteifigkeit, Materialrückfederung und mechanische Abhängigkeiten berücksichtigt werden [11].

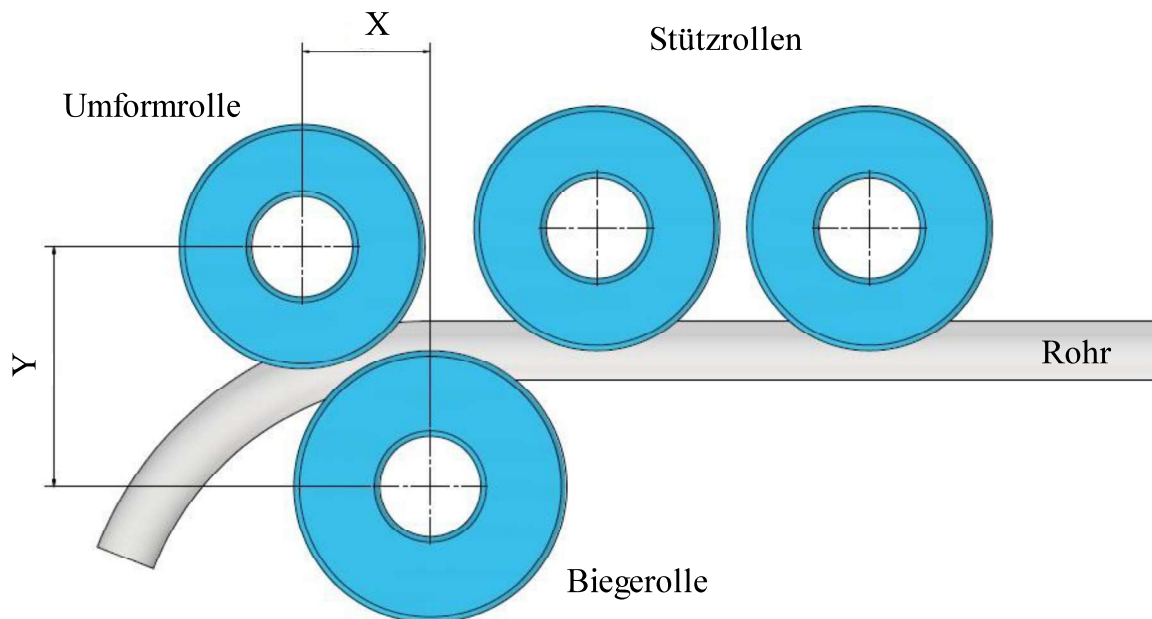


Abb. 1: Schematischer Werkzeugaufbau für das Drei-Rollen-Schubbiegen

Stand der Forschung

Mit den Arbeiten von Groth et al. [12], Kersten [13] und Plettke et al. [14] wurde das Drei-Rollen-Schubbiegen unter anderem hinsichtlich Optimierungs- und Verbesserungsstrategien untersucht. Konventionelle Fertigungsansätze können jedoch nur bedingt auf aktuelle Anforderungen aus Gesellschaft und Politik agieren und stellen sich demnach immer größeren Herausforderungen. Für Biegeanwendungen beim formgebundenen Rotationszugbiegen entwickelten Heftrich et al. einen systematischen Ansatz, um konventionell geschlossene Biegewerkzeuge aufzulösen und eine Konturänderung ohne Werkzeugwechsel zuzulassen [15]. Zudem postulierten Kuhnhen et al. eine Flexibilisierung von formgebundenen Umformverfahren in drei Skalenausprägungen, von Hunderstellmillimeter bis hin zu großen Oberflächenverstellungen für ganze Werkzeuge [16]. Geueke et al. untersuchten die Machbarkeit von Holzwerkzeugen für die Blechumformung [17]. In einer hydromechanischen Ziehwerkzeugkonstruktion wurde der Stempel aus laminiertem Robinienholz hergestellt und in einer Kleinserie von 64 Stück für konventionellen Ziehstahl (DC04) untersucht. Kolleck et al. untersuchten in einer Machbarkeitsstudie die Eignung holzbasierter Werkzeugwerkstoffe für den Tiefziehprozess [18]. Die hergestellten Holzwerkstoffwerkzeuge wurden aus 4 mm Robinienholzplatten (BL) verleimt. Sie zeigten eine gute Leistung bei der Produktion kleiner Losgrößen (<500 Teile) mit Kontaktnormalspannungen bei Eckradien von mehr als 5 mm. Pinto et al. untersuchten die Leistungsfähigkeit von Polymer- und Holzwerkzeugen für die Blechumformung bei Losgrößen von jeweils 500 Teilen [19]. Sie zeigten, dass insgesamt Radien von 7 mm realisierbar sind, wobei die Verformung bei den verdichteten Holzwerkstoffen etwas höher ist als bei den Polymerwerkzeugen.

Alternative Werkzeugtechnik

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die mögliche Substitution konventioneller Werkzeugwerkstoffe für Umformprozesse durch Robinienholz (*Robinia pseudoacacia*) zu untersuchen.

Mechanische Charakterisierung von Robinienholz

Die Robinie ist ein Hartholz, welches auf nährstoffarmen und trockenen Standorten angebaut und geerntet werden kann und im Vergleich zu anderen europäischen Laubhölzern und biobasierten Werkstoffen gute mechanische Eigenschaften aufweist. Nach Green et al. und Risse und Richter hat die Robinie die höchsten mechanischen Eigenschaften aller in Europa heimischen Holzarten [20, 21].

Vor der Machbarkeitsstudie holzbasierter Umformwerkzeuge wurde eine mechanische Charakterisierung von unbehandelten Holzproben der Robinie (Zug, Druck, Biegung, Härte) mittels einer Universalprüfmaschine ZWICK ROELL Z250 gemäß den einschlägigen Normen DIN EN ISO 527-1, DIN 52192 bzw. DIN 52186 durchgeführt (siehe Abb. 2).



Abb. 2: Testkörper aus Robinienholz zur mechanischen Charakterisierung

Die Kennwerte der mechanischen Charakterisierung sind in Tab. 1 zusammengeführt:

Tab. 1: Mechanische Eigenschaften von Robinienholz

Zugeigenschaften		Charakterisierung
Zugfestigkeit parallel zur Faser	[N/mm ²]	153,14 (± 23,31)
Zugfestigkeit quer zur Faser	[N/mm ²]	7,59 (± 1,36)
Zugmodul parallel zur Faser	[N/mm ²]	9325,95 (± 308,10)
Zugmodul parallel quer Faser	[N/mm ²]	1394,06 (± 409,82)
Druckeigenschaften		
Druckfestigkeit longitudinal	[N/mm ²]	75,63 (± 2,01)
Druckfestigkeit tangential	[N/mm ²]	20,86 (± 3,63)
Druckfestigkeit radial	[N/mm ²]	28,02 (± 2,36)
Druckmodul longitudinal	[N/mm ²]	8720,43 (± 622,56)
Druckmodul tangential	[N/mm ²]	603,71 (± 28,03)
Druckmodul radial	[N/mm ²]	750,24 (± 48,18)
Biegeeigenschaften		
Biegefestigkeit tangential	[N/mm ²]	141,54 (± 11,83)
Biegefestigkeit radial	[N/mm ²]	145,95 (± 14,04)
Biegemodul tangential	[N/mm ²]	11107,98 (± 1327,36)
Biegemodul radial	[N/mm ²]	11334,11 (± 1198,52)
Härteeigenschaften		
Brinellhärte longitudinal	[N/mm ²]	79,15 (± 5,80)
Brinellhärte tangential	[N/mm ²]	41,94 (± 4,95)
Brinellhärte radial	[N/mm ²]	39,93 (± 3,38)

Simulationsmodell für Drei-Rollen-Schubbiegen

Um die Belastung der Holzbiegewerkzeuge zu ermitteln, wurde aus der Simulation, die auf die Umformrolle resultierende Kraft berechnet. Die Biegesimulationen wurden mit der Software ABAQUS von DASSAULT SYSTÈMES durchgeführt. Die wichtigsten, während der Simulation verwendeten Parameter, sind in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2: Hauptparameter der Simulation des Drei-Rollen-Schubbiegeprozesses

Element Typ (ABAQUS)	C3D8R, reduced integration, hourglass control
Netzgröße	1.2 mm
Elementanzahl	76.944
Elemente über die Dicke	3
Solver	ABAQUS Dynamic, Explicit
Kontakt Algorithmus	General contact (Explicit)
μ zwischen Profil / Rollen	Frictionless

Für die Simulation wurde ein isotropes Verfestigungsmodell nach von-Mises verwendet. Die Dichte des Edelstahlrohres wurde mit $7,9 \text{ g/mm}^3$ angenommen. Außerdem wurde ein Elastizitätsmodul von 200 GPa und eine Poissonzahl von 0,3 angenommen. Abb. 3 zeigt die approximierte Fließkurve, die für die Simulation verwendet wurde.

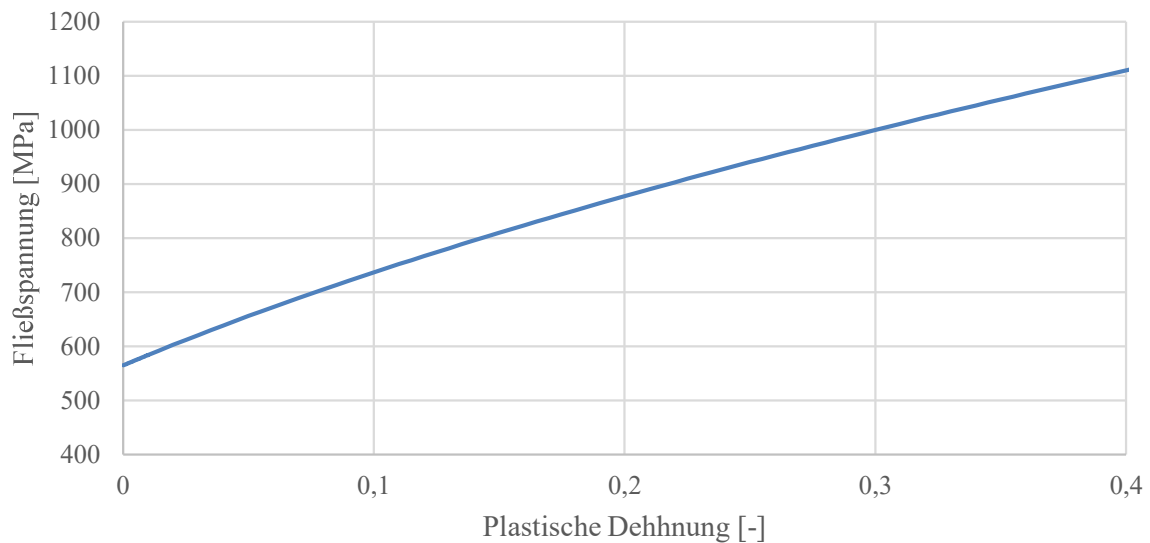


Abb. 3: Fließkurve für EN 1.4301

Abb. 4 stellt die Ergebnisse der Umformsimulation dar und zeigt die plastische Dehnung in Längsrichtung des Rohrs.

Gemäß Abb. 1 wurden zwei unterschiedliche Positionen der Umformrolle, sowohl experimentell als simulativ, untersucht. Die unterschiedliche Position der Umformrolle führte zu unterschiedlichen Prozesskräften und damit auch zu unterschiedlichen Belastungen auf die Werkzeuge. Die Kraftverläufe für beide Varianten sind in Abb. 5 dargestellt.

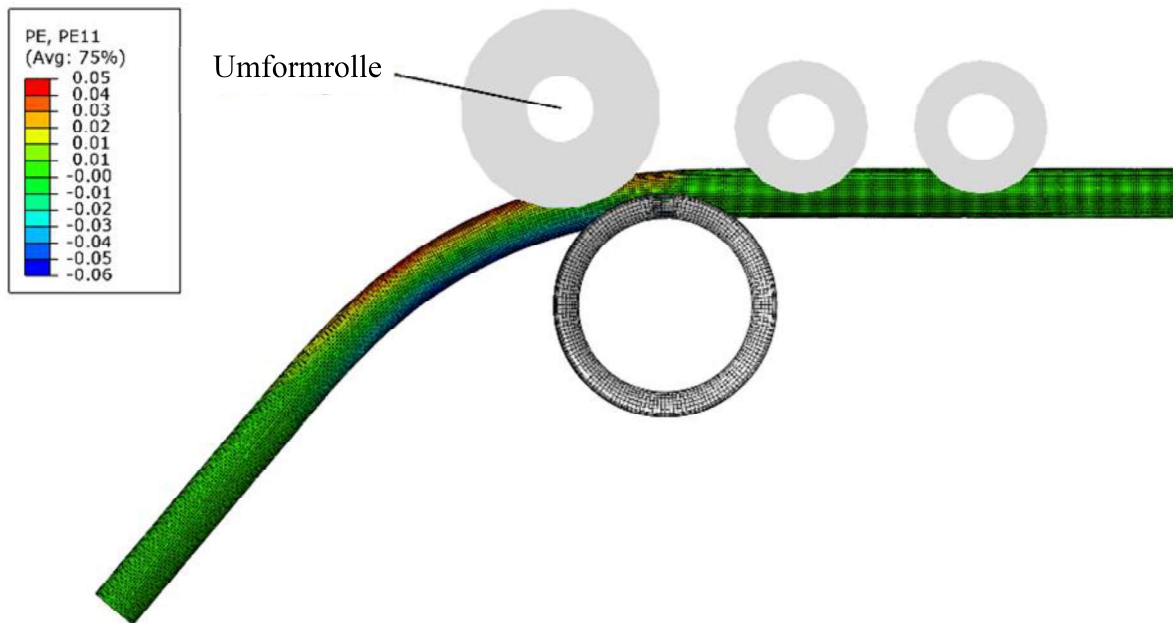


Abb. 4: Simulationsergebnisse des Drei-Rollen-Schubbiegeprozess

Obgleich beide Umformrollen das gleiche Biegemoment für den Biegevorgang erforderten, benötigte Variante 1 einen größeren Hebel, was zu einer geringeren Kontaktkraft im Vergleich zu Variante 2 führte. Im direkten Vergleich benötigte die Variante 2 einen deutlich höheren Kraftaufwand (Faktor 2,5) im Vergleich zur Variante 1. Zudem war zu erkennen, dass der degressive Kraftverlauf bei Variante 1 deutlich schneller das Kraftmaximum erreichte.

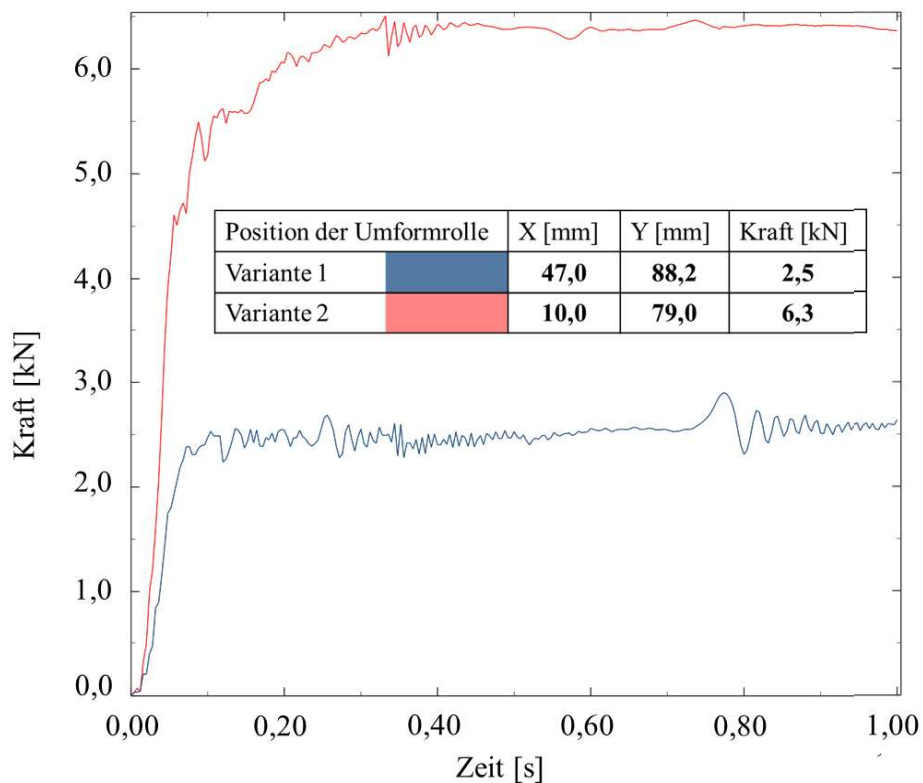


Abb. 5: Simulierte Kraftverläufe für verschiedene Umformrollenpositionen, gemäß Abb. 1.

Holzbasierte Umformwerkzeuge aus Robinienholz

Um die Leistungsfähigkeit holzbasierter Biegewerkzeuge zu ermitteln, wurde nach Geueke et al. ein Composite-Aufbau aus 3 mm dicken Robinienfurnieren rechteckig gestapelt und mit Polyurethan verklebt (siehe Abb. 6) [17]. Massive Robinienbretter wurden in dünne Furnierblätter geschnitten und mit grober Körnung (P80) auf einem Oberflächenschleifer planparallel auf 4 mm geschliffen, bevor ein Verbund aus insgesamt 34 Lagen hergestellt wurde. Jede Composite-Schicht wurde aus einzelnen Robinienfurnieren mit einer Breite von 85–130 mm ausgelegt und untereinander verklebt. Die Kontaktflächen wurden vor der abschließenden Verklebung auf eine Dicke von 3 mm geschliffen, um eine gute Haftung zwischen den einzelnen Robinienfurniere zu gewährleisten. Um eine stabile und steife Verbundstruktur zu gewährleisten, wurde der Klebevorgang gemäß dem Datenblatt für Klebstoff 501.0 des Herstellers KLEIBERIT durchgeführt. Die Verklebung erfolgte mit einer hydraulischen Furnierpresse, ohne die mechanische Belastbarkeit der Holzschichten zu beeinträchtigen oder zu beschädigen.

Im Anschluss an die Herstellung des Composite-Verbundes aus Robinie, wurden für alle Werkzeuge unterschiedliche Orientierungen für die Lagenorientierung untersucht. Um den Verschnitt beim Sägen und Fräsen zu reduzieren, wurde aus dem Verbundblock eine horizontale (0°) und eine diagonale (45°) Richtung geschnitten und mit einer CNC-Fräsmaschine auf die gewünschte Werkzeugform gefräst:

- Biegerollen: 70 mm (Höhe), 90 mm (Durchmesser)
- Umformrolle: 50 mm (Höhe), 70 mm (Durchmesser)
- Stützrolle: 50 mm (Höhe), 70 mm (Durchmesser)



Abb. 6: Herstellungsprozess der Umformwerkzeuge als Schichtverbund aus Robinienholz

Mechanische Leistungsfähigkeit und optische Qualitätsbestimmung von Holzbiegewerkzeugen

Nach der Herstellung der Umformrollen wurde das Biegeverhalten und die Stabilität der Werkzeuge an dünnwandigen Rohren (1 und 1,5 mm) mit einem Außendurchmesser von 22 mm aus EN 1.4301 untersucht. Es wurden zwei unterschiedliche Werkzeugpositionen für die Umformrolle betrachtet (siehe Abb. 1 und Abb. 4), die zu Prozesskräften von 2,5 kN für

Variante 1 und 6,3 kN für Variante 2 an der Kontaktfläche zwischen Rohr und Werkzeug führten. Da der horizontal gestapelte Schichtverbund (0°) während des zweiten Biegevorgangs bei Variante 2 brach, wurde eine zweite Ausrichtung (45°) hergestellt, um die Belastbarkeit der Rollen zu vergrößern (siehe Abb. 6, unten links). Mit einem kleineren Hebel und größerer Prozesskraft brachen die Umformrollen (45° Ausrichtung) während der Biegungen von Variante 2 nicht. Die gewünschte Form des Biegeprofils ist links in Abb. 7 dargestellt. Bei einem Biegeradius von ca. 300 mm wurde die Toleranz über eine kleine Losgröße von 5 Röhren für jede Konfiguration durch optische Korrelation der gebogenen Röhre untersucht. Die geometrische Abweichung entlang des Prozesses für eine 45° -Werkzeugausrichtung aller Rollen ist links in Abb. 7 detailliert dargestellt. Die geometrische Abweichung in der Mitte des Rohrstacks und an beiden Profilenden, kann als vernachlässigbar angesehen werden. Die Abweichung ist vergleichbar mit konventionell hergestellten Rollen aus Werkzeugstahl.

Nach der optischen Korrelation der Rohrprofile wurden die Werkzeuge mit einem GOM ATOS Scanner überprüft. Da die Simulationsergebnisse eine Höchstbelastung der Umformrollen aufwiesen, wurden die optischen Messungen für beide Varianten ausschließlich für diese Werkzeuge in zwei unterschiedlichen Orientierungen durchgeführt. Der optische Zusammenhang der räumlichen Abweichung für die Umformrollen ist rechts in Abb. 7 dargestellt. Während die 0° ausgerichtete Umformrolle eine gleichmäßige Umfangsverformung in der Kavität von bis zu 0,1 mm aufwies, zeigte das 45° ausgerichtete Werkzeug eine ungleichmäßig verteilte Verformung von bis zu 0,2 mm auf der Kavitätsseite.

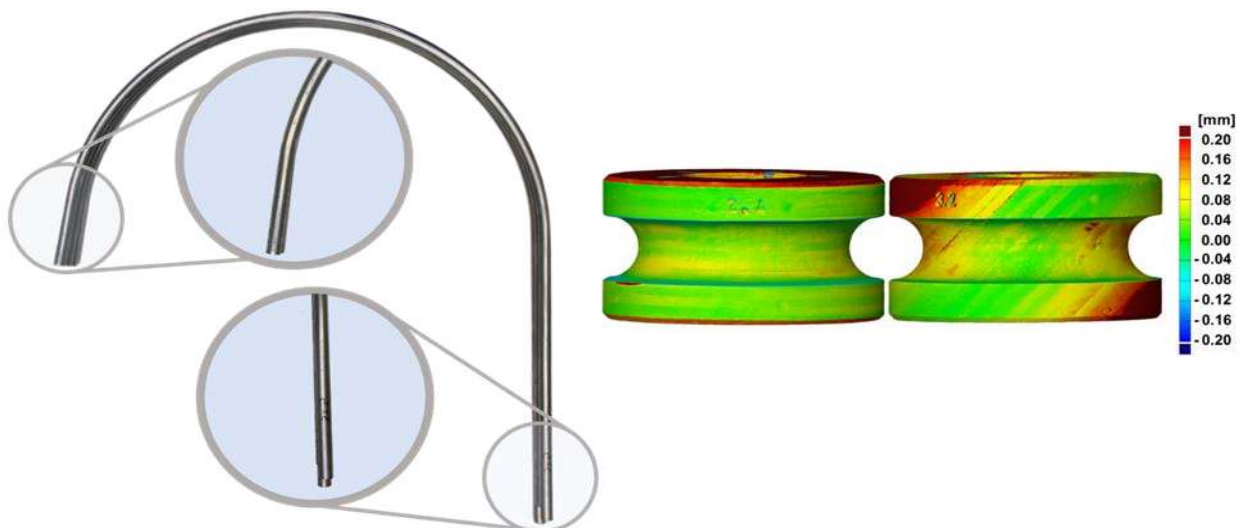


Abb. 7: Optischer Vergleich der Geometrieabweichung an Biegebauteilen durch Holzwerkzeuge (links) und optische Geometrieabweichung der eingesetzten Holzwerkzeuge nach den Biegeversuchen: horizontaler Schichtaufbau (links) und diagonalen Schichtaufbau (rechts).

Nach den Biegeversuchen wurde die Umformrolle an einem Röntgenmikroskop XRADIA 610 VERSA der Firma ZEISS auf interne Beschädigung und Versagen bzw. Delamination des Schichtsystems hin untersucht. In über 1000 Einzelbildsequenzen wurde ein Messbereich von 30 mm^3 auf derartiges Versagen überprüft. Die optische Auswertung durch Sichtprüfung ergab dabei keinen Aufschluss auf ein Versagen des technischen Systems (siehe Abb. 8, links). Im Vergleich dazu ist in Abb. 8, rechts eine Röntgenmikroskopanalyse des Druckprüfkörpers mit deutlich ersichtlicher Strukturschädigung (Faserabriss und Delamination der Jahresringe) innerhalb des Bauteils.

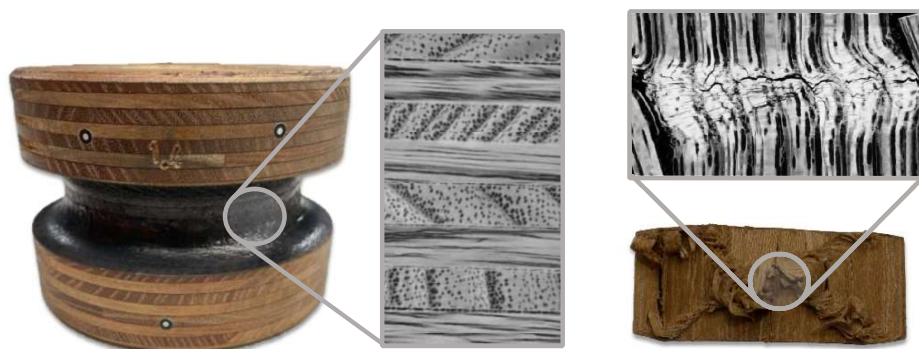


Abb. 8: Röntgenmikroskopanalyse der inneren Bauteilstruktur der eingesetzten Umformrolle nach 10 Biegeversuchen (rechts) und eines Druckprüfkörpers nach dem Versagen bei der mechanischen Charakterisierung von Robinie

Zusammenfassung und Ausblick

Die Substitution von konventionellen hin zu holzbasierten Umformwerkzeugen bietet eine Möglichkeit zur Verbesserung der Flexibilität und Massenindividualisierung in der Profilumformung von Rohren aus Edelstahl EN 1.4301. Während die rechteckige Lagenanordnung bei einem Schichtaufbau von 0° ein gleichmäßiges Verformungsverhalten der Werkzeuge zeigte, ermöglichte eine Ausrichtung von 45° höhere Prozesskräfte des Biegeprozesses, obwohl die Verformung in Umfangsrichtung heterogen war, was wiederum mit der mechanischen Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit der anisotropen Holzstruktur korreliert. Insgesamt konnte die Machbarkeit nachgewiesen werden und die Wiederholgenauigkeit der gebogenen Rohre war vergleichbar mit der von konventionellen Stahlwerkzeugen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die holzbasierten Umform- und Biegewerkzeuge ein geeignetes Substitut für die Produktion kleiner Losgrößen aufzeigen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich auf die hochbelasteten Bereiche der Biegewerkzeuge, sowie auf die Anordnung und Ausrichtung der Einzellagen konzentrieren. Weitere tribologische Untersuchungen könnten helfen, den Einfluss der Partikelanhaftungen zu charakterisieren und ein geeignetes Prozessfenster für Holzbiegeworkzeuge zu identifizieren.

Literaturverzeichnis

- [1] C. A. Horowitz, „Paris Agreement,“ *Int. leg. mater.*, Jg. 55, Nr. 4, S. 740–755, 2016, doi: 10.1017/S0020782900004253.
- [2] 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.
- [3] G. Herrigel, „Globalization and the German industrial production model,“ *J Labour Market Res*, Jg. 48, Nr. 2, S. 133–149, 2015, doi: 10.1007/s12651-014-0170-5.
- [4] Potting, José & Hekkert, M.P., E. Worrell und A. Hanemaaijer, *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain.: Policy Report (issue 2544)*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017.
- [5] L. Hildebrandt, „Open PPS - Konzeption eines Modells zur Produktionsplanung und -steuerung für dezentrale, vernetzte und offene Produktionswerkstätten,“ *Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg*, 2023.
- [6] P. Vatter, *Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode (Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2014) (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie 262)*. Bamberg: Meisenbach, 2015.

- [7] M. Schiller, C. Heftrich und B. Engel, „Remote Production,“ *Procedia CIRP*, Jg. 99, S. 242–247, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.099.
- [8] Sebastian Groth, *Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen: Dissertation (Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik, UTS Siegen)*. Düren: Shaker Verlag, 2020.
- [9] Vogel-Heuser B., Bauernhansl T. und ten Hompel M., *Handbuch Industrie 4.0: Bd. 3: Logistik, 2. Aufl. (Springer Reference Technik)*. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [10] B. Engel und S. Kersten, „Sensitivitätsanalyse beim Freiformbiegen von Rohrprofilen: 30. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung 2010,“ *EFB Tagungsband T31*, S. 125–138, 2010.
- [11] B. Engel und C. Gerlach, „Optimierung des Freiformbiegeprozesses von Profilen,“ *Verformungskundliches Kolloquium 2008, Rel10/05*, S. 1–17, 2008.
- [12] 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.
- [13] S. Kersten, *Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen: Dissertation (Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik, UTS Siegen)*. Aachen: Shaker Verlag, 2012.
- [14] R. Plettke, P. H. Vatter, D. Vipavc, M. Cojutti und H. Hagenah, „Investigation on the Process Parameters and Process Window of Three-Roll-Push-Bending,“ in *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*, Springer, London, 2010, S. 25–28. [Online]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84996-432-6_5
- [15] 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.
- [16] 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. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121003310>
- [17] Geueke M., Steinheimer R., Lutz M. und Engel B., „Sustainable tool technology: Wood-based forming tools,“ *Materials Research Proceedings*, Jg. 28, S. 1967–1976, 2023, doi: 10.21741/9781644902479-212.
- [18] R. Kolleck, C. Koroschetz, G. Schickofer und Agustin M., „Alternativer Werkstoff Holz spart Werkzeugkosten für die Blechumformung,“ *Maschinenmarkt*, 2008 2008. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/alternativer-werkstoff-holz-spart-werkzeugkosten-fuer-die-blechumformung-a-142940/?p=3>
- [19] M. Pinto, A. D. Santos, P. Teixeira und P. J. Bolt, „Study on the usability and robustness of polymer and wood materials for tooling in sheet metal forming,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Jg. 202, 1-3, S. 47–53, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.082.
- [20] D. W. Green, J. E. Winandy und D. E. Kretschmann, *The Mechanical Properties of Wood*, 1999 (1999).
- [21] M. Risse und Richter K., *Das Holz der Robinie – Eigenschaften und Verwendung: Beiträge zur Robinie (LWF Wissen)*, 2020.