

EFFIZIENTE KLEINSERIENFERTIGUNG EINES TÜRSPANTES IN BLECHBAUWEISE MITTELS ROROFO

Tina Abdolmohammadi¹, Valentin Richter-Trummer¹, Markus Werner¹, Karsten Richter¹,
Antje Ahrens¹, Wolfgang Schulze²

¹ Fraunhofer IWU, Chemnitz, Deutschland

² Airbus Operations GmbH, Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Herstellung von Aluminiumtürspanen erfolgt zumeist mittels Fräsen aus einem großen Block, dabei treten Spanvolumina von über 90% auf. In dieser Arbeit wird ein Türspantdesign in Blechbauweise vorgestellt, das mit über 90 % Materialnutzungsgrad und damit unter 10 % Verschnitt deutlich materialeffizienter ist. Um bei dieser Bauweise auch bei geringen Stückzahlen eine effiziente Fertigung zu gewährleisten, wurde ein roboterbasierter Rollformprozess (RoRoFo) entwickelt und genutzt. Hierbei fährt ein von einem Knickarmroboter geführter Endeffektor mit Doppelrollensatz entlang einer FE-optimierten Biegekurve und formt das Blech inkrementell um. Zur Maximierung der Fertigungseffizienz und insbesondere der Absicherung der Form- und Lagetoleranzen von Blechbauteilen wird des Weiteren ein Ansatz beschrieben, mit welchem Richtprozesse in die finalen Umforminkremente integriert werden können.

Keywords

Rollformen, Umformtechnik, Industrieroboter, inkrementelles Biegen

1. EINLEITUNG

Komplexe Versteifungsstrukturen werden im Flugzeugbau zumeist durch Fräsen aus massiven Aluminiumblöcken hergestellt, wobei oft sehr hohe Spanvolumen von über 90 % entstehen. Aluminium ist zwar recyclingfähig, doch der größte Teil der Späne lässt sich aktuell nicht für flugzeugtaugliche Legierungen wiederverwenden. Diese Vorgehensweise führt zu einem hohen Materialverlust und stellt sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht ein erhebliches Optimierungspotenzial dar. Blechbauweisen hingegen zeichnen sich durch einen hohen Materialnutzungsgrad und kosteneffiziente Fertigungsprozesse aus. Aus diesem Grund werden geometrisch einfache Strukturbauten traditionell häufig in dieser Bauweise realisiert. Ziel der aktuellen Entwicklung ist es, diese einfache, kostengünstige und ökologisch vorteilhafte Konstruktionsstrategie, welche bislang vor allem für einfache Geometrien wie Spante mit konstantem Querschnitt geeignet ist, auch für komplexe Bauteile nutzbar zu machen – etwa für Türspante mit veränderlichem Profil. Dazu wurde unter Nutzung inkrementeller Umformung ein vielseitig einsetzbarer, robotergestützter inkrementeller 3D-Rollformprozess (RoRoFo) entwickelt, der für die Fertigung kleiner bis mittlerer Stückzahlen geeignet ist. Dabei handelt es sich um ein flexibles Biegeumformverfahren mit drehender Werkzeugbewegung, das Ähnlichkeiten mit dem konventionellen Walzprofilieren [1] und flexiblen Rollformen [2-4] aufweist. Im Gegensatz zu herkömmlichen Rollprofilieranlagen, bei welchen ein Blechstreifen oder Band durch mehrere Gerüste geführt wird, erfolgt die Formgebung beim RoRoFo-Prozess durch ein Rollenpaar, welches von einem Roboter entlang definierter Bahnen bewegt wird. So erfordert RoRoFo einen geringeren Anlagen- und Werkzeugaufwand. Dadurch eignet sich der Prozess insbesondere für die Fertigung kleiner bis mittlerer Stückzahlen bis hin zu Einzelteilen. Für die Anpassung an

unterschiedliche Bauteilvarianten müssen lediglich die Bewegungsbahnen neu definiert werden. In Abhängigkeit von Werkstoff und Blechdicke können Rollensätze mit angepassten Biegeradien genutzt werden. Um die Flexibilität eines Roboters auch im Spannsystem wiederzufinden, ist eine wandelbare Lösung von Vorteil [5-6].

Die durchgeführte Prozessentwicklung umfasste dabei sämtliche Schritte von der simulativen Auslegung der Biegekurve und dem fertigungsgerechten Design über die Konstruktion der Rollensätze, der Endeffektoren und Spannsysteme bis zur Festlegung der Bahnkinematik und der Qualitätssicherung im laufenden Prozess. Zurückliegende Untersuchungen [7-8] fokussierten auf den Zusammenhang zwischen den während der Umformung gemessenen Umformkräften und den erzielten Bauteilgeometrien. Mithilfe verschiedener Algorithmen konnte gezeigt werden, dass die Wechselwirkungen zwischen Kraftverlauf und Geometrieausprägung komplex und nichtlinear sind. Die Analyse zeigte, dass neuronale Netze im Vergleich zu anderen Algorithmen die Geometrievorhersage für zwei Zielgeometrien am zuverlässigsten abbilden konnten. Darauf aufbauend wurde ein Konzept für ein prozessintegriertes Richten entwickelt.

Alternative Fertigungstechnologien für komplexe Blechbauteile, wie etwa das Umformen mit formgebundenen Werkzeugen [9], das inkrementelle Abkanten mit Drückdorn [10], der StaBiFü®-Ansatz [11] oder das 3D-Rollforming von data M [12] weisen eine deutlich höhere Formbindung in den verwendeten Formeinsätzen, Werkzeugen und Spannkonzepen auf, als die in dieser Arbeit beschriebene Lösung. Dies schränkt die realisierbare Formenvielfalt ein, bzw. ist mit höheren Kosten für die bauteilspezifische Werkzeugkonstruktion und -anfertigung verbunden. In der Luftfahrtindustrie serienmäßig eingesetzte Verfahren wie das Umformen mit Gummikissen oder mit Fluidzellkissen bedingen ebenfalls bauteilspezifische Formen und teilweise mehrere Umformstufen. Zudem begrenzt die

verfügbare Pressengröße und die darauf realisierbaren Drücke das Anwendungsspektrum.

2. BAUTEILDESIGN

Beim untersuchten Türspant eines Airbus A321 lag der Fokus darauf, die bestehende Außenkontur im Blechspant zu behalten, um eine reibungslose Integration in die Flugzeugstruktur sicherzustellen. Die Umstellung auf eine blechbasierte Fertigungstechnologie ermöglicht eine erhebliche Reduzierung des Materialbedarfs – im Fall eines 7,4 kg schweren Türspants um etwa 300 kg gegenüber konventionellen Fräsenverfahren.

Der zentrale Konstruktionsunterschied zwischen gefrästen und umgeformten Türspanten besteht darin, dass die blechbasierte Variante prozessbedingt die integrierten Versteifungsrippen nicht 1:1 ersetzen kann und daher alternative Formen genutzt oder Designanpassungen durchgeführt werden müssen.

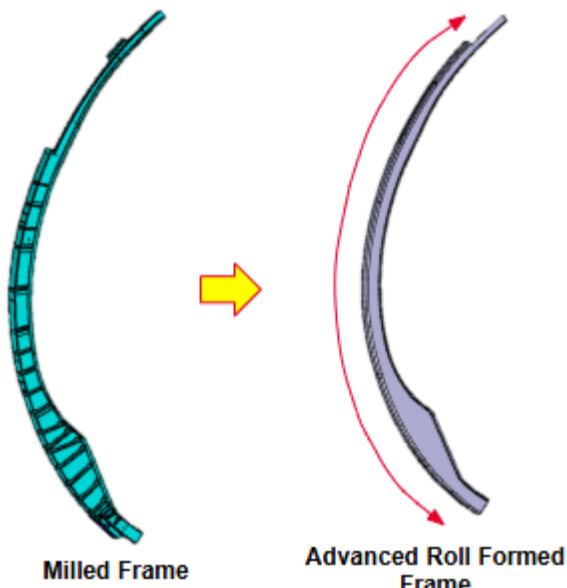


BILD 1. Vergleich gefräster Spant zu Blechspant

Da die Rumpfaußenhaut direkt auf den vergleichsweise steifen Türspant genietet wird und dieser damit deren Außenkontur beeinflusst, ist die Einhaltung sehr enger Formtoleranzen der entlang des roten Pfeils in BILD 1 definierten Kontur das zentrale Projektziel.

Die entfallenen Versteifungsrippen lassen sich über eine gleichmäßige Bauteildicke und ggf. kleine Extrabauteile in den Lasteinleitungsbereichen (siehe BILD 2) ausgleichen, deren Einbau keinen zusätzlichen Aufwand gegenüber den ohnehin benötigten Verbindungselementen verursacht.

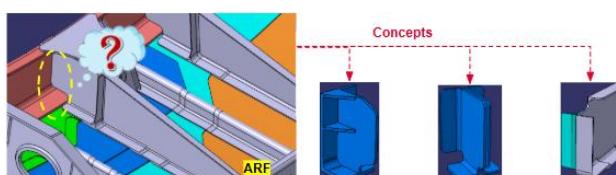


BILD 2. Konzepte zum Ripplersatz im Lasteinleitungsbereich

Auf diese Weise kann ein Blechspant ähnliche strukturelle Eigenschaften erreichen wie ein traditioneller gefräster Spant.

Für die aktuellen Untersuchungen wurde ein Spantausschnitt gewählt, der fertigungsgerecht ist, die relevantesten komplexen Geometrie-Features beinhaltet und aufgrund der Größe in höherer Stückzahl hergestellt werden konnte, siehe BILD 3.

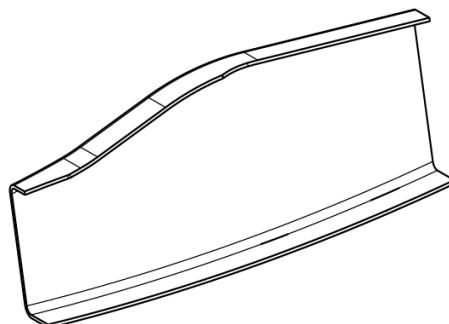


BILD 3. Ausschnittsdemonstrator eines komplexen Türspants

3. UMFORMVERFAHREN

Aufgrund des hohen Materialnutzungsgrades eines Blechtürspants (im Vergleich zu einer gefrästen Variante) wird ein effizientes Umformverfahren benötigt, das sowohl komplexe Geometrien herstellen kann als auch für mittlere Stückzahlen geeignet ist. Insbesondere aufgrund des bereits seit Jahrzehnten in der Luftfahrtindustrie etablierten Pressformverfahrens und der daraus resultierenden Verfügbarkeit großer Fluidmembranpressen wird aktuell die Fertigung eines pressgeformten Blechtürspants evaluiert. Nachteile bei diesem Verfahren ergeben sich vor allem durch erhöhte, ins Bauteil eingebrachte Eigenspannungen und eine verstärkte Ausdünnung in der Biegekante sowie durch den kostenintensiven Richtprozess nach Umformung und nachgelagerte Wärmebehandlung.

Im Gegensatz dazu bietet das inkrementelle RoRoFo den wesentlichen Vorteil, dass durch die schrittweise Biegung über mehrere Durchgänge eine gleichmäßige Spannungsverteilung und geringere Materialausdünnung im Biegeradius bewirkt wird. Dieser Vorteil ist aus dem Bereich des Walzprofilierens bekannt. Die schrittweise Biegung ermöglicht zudem kleinere Biegeradien und eine höhere Formgenauigkeit, da materialbedingter Rückfederung durch zwischen den Biegeschritten angepasste Prozessparameter begegnet werden kann.

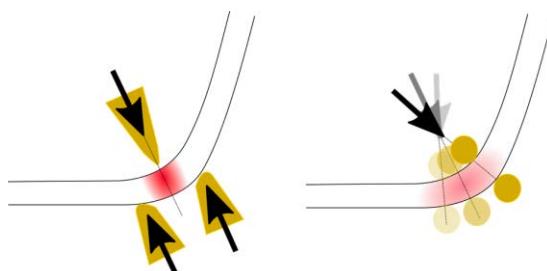


BILD 4. Vergleich des Umformprinzips von Pressformen (links) und Rollumformen (rechts) und eine Visualisierung der durch die Umformung erzeugte Eigenspannungen im Bauteil.

Bei dieser inkrementellen Umformtechnologie verteilt sich die Umformenergie durch die kontinuierliche

Werkzeugbewegung entlang der Biegezone gleichmäßiger und wirkt so potenziellen Risskeimen im Kristallgitter entgegen. Gegenüber konventionellen Verfahren lassen sich so engere Biegeradien erzielen. So kann beispielsweise auch bei hochfesten Aluminiumlegierungen ein r/t -Verhältnis von 1,5 erreicht werden, was einen konstruktiven Vorteil gegenüber alternativen Umformtechnologien bietet.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit zur prozessintegrierten Formkorrektur mittels Künstlicher Intelligenz (KI), die die Korrelation zwischen gemessener Biegekraft und erzielter Geometrie nutzt (siehe Abschnitt 6).

Anders als beim herkömmlichen Rollformen mit vielen aufeinanderfolgenden Gerüsten, erfolgt beim RoRoFo die Umformung n -fach durch denselben Rollensatz. Entsprechend wird die Geometrie schrittweise aufgebaut und lässt sich aufgrund der verfügbaren Roboterkinematik sehr flexibel ausprägen. Durch den Einsatz spezieller Vorrichtungen lassen sich auch Biegewinkel über 90° vergleichsweise einfach realisieren, was beispielsweise beim Pressformen nicht ohne weiteres möglich ist.

Im Vergleich zum Pressformen sind beim inkrementellen RoRoFo höhere Prozesszeiten zu erwarten. Je nach benötigtem Richtaufwand und Wärmebehandlungsschritten relativiert sich dies wieder bei komplexen Bauteilen. Aufgrund der geringen Investitionskosten in Anlagentechnik und den daraus resultierenden niedrigen spezifischen Stundensätzen ist der Prozess dennoch aus Sicht der wiederkehrenden Prozesskosten als günstig einzuordnen. Vor allem in der Entwicklungsphase ist ein entscheidender Vorteil, dass beim Rollumformen konstruktionsbedingte spätere Änderungen in der Geometrie keine teuren Werkzeugänderungen nach sich ziehen, sondern durch angepasste Prozesseinstellungen einfach und schnell umzusetzen sind.

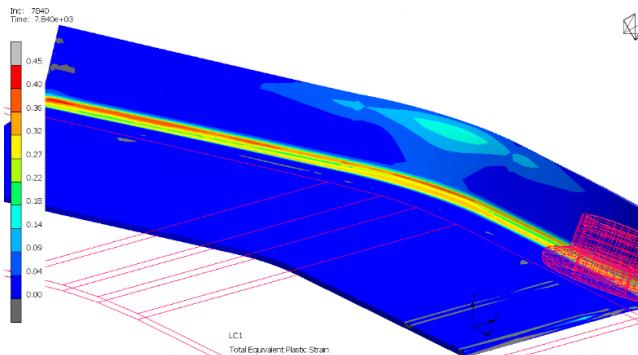


BILD 5. Umformgrad φ im modellierten Bauteilbereich

Die FEM in MarcMentat diente primär als Engineering-Tool zur simulationsbasierten Unterstützung von Bauteildesign und Prozessentwicklung. Exemplarisch ist dies für die als Demonstrator zu fertigende Spantgeometrie in BILD 5 dargestellt. Im Fokus stand die Optimierung der realisierbaren Biegeradien zwischen ebenen Boden und gekrümmten Flanschen unter Berücksichtigung umformtechnischer Restriktionen (maximale Umformgrade, Versagensfälle wie Ausknicken, etc.). Das vorgesetzte Design durchlief mehrere Iterationsschleifen mit strukturellen Berechnungen. So wurden kritische Bauteilbereiche identifiziert und die Geometrie fertigungsgerecht im Sinne der RoRoFo-Technologieführung angepasst. So wurden beispielsweise Biegeradien und Flanschhöhen leicht adaptiert. Ein

zweiter Fokus der FEM war die technologieorientierte Entwicklung und Absicherung der für das RoRoFo benötigten Biegestrategie, sprich die Festlegung der inkrementellen Biegefolge sowie der in den einzelnen Biegeinkrementen genutzten Bahnkurven. Diese dienten als Grundlage für das Roboterprogramm, mit dem der Umformvorgang gesteuert wird.

4. EXPERIMENTELLER AUFBAU

Für den experimentellen Nachweis des Verfahrens wurde eine traditionelle Roboterzelle mit entsprechendem Endeffektor und Spannsystem aufgerüstet. Am Roboter selbst wurden keine Modifikationen vorgenommen, um zukünftig eine möglichst einfache Implementierung der entwickelten Lösung im industriellen Umfeld zu ermöglichen.



BILD 6. Experimenteller Aufbau in der Roboterzelle.

Die Umformbewegung wird durch einen Kuka KR240 Roboter realisiert, der auf einer zusätzlichen Linearachse steht. Am Roboterflansch ist ein Endeffektor installiert, an dem zwei Umformrollen mit verstellbarem Rollenabstand befestigt sind. Diese Rollen werden lediglich passiv durch die Roboterbewegung bewegt und dienen zur Aufbringung des erforderlichen Biegemomentes an der Umformkante, siehe BILD 6.

Als Ergänzung zum hochflexiblen Roboter auf der einen Seite des Bleches wurde ein wandelbares pneumatisch betriebenes Spannsystem auf der anderen Seite des Bauteils entwickelt. Dieses kann einerseits vor der Umformung auf eine zu erzielende Blechgeometrie eingestellt werden, andererseits erlaubt die eingebaute Kinematik aber auch ein biegestellennahes Spannen, ohne eine Kollision mit den Umformrollen zu riskieren. Dies wurde erreicht, indem das in Segmente geteilte Spannsystem jeweils in dem Moment einzelne Spanner löst, wenn sich die Rollen an der jeweiligen Stelle befinden. Das Spannsystem wurde modular entwickelt, sodass es nahezu beliebig erweitert werden kann.

Für die Anpassung des Systems an unterschiedliche Blechdicken muss das Spannsystem entsprechend eingestellt werden, damit die maximalen Spannkräfte erreicht werden können. Außerdem müssen bei größeren Blechdicken Rollen mit einem passenden Biegeradius, größer als der zulässige Mindestbiegeradius, ausgewählt werden. Schließlich kann der Rollenabstand und damit der Walzenspalt einfach auf die Blechdicke justiert werden. Die hauptsächliche Anpassung geschieht softwareseitig durch die Definition einer optimalen Kinematik.

Mit der verfügbaren Ausrüstung konnten Blechdicken zwischen 1 und 6 mm bei Aluminium und 1 und 2 mm bei Stahl nachgewiesen werden. Bauteillängen zwischen 0,3 und 2 m können so auf einfache Weise realisiert werden, wobei die Bauteillänge durch die vorhandene siebente Achse nahezu beliebig verlängert werden kann, sofern ein entsprechendes Spannsystem vorhanden ist.

5. UMFORMERGEBNIS

Anhand von Messungen der Bauteilgeometrie konnte nachgewiesen werden, dass der Prozess stabil läuft und eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit bezüglich der Bauteilkontur erreicht wird. Auch wenn die geforderte absolute Geometrietreue noch nicht ganz erreicht wurde, konnte die Strategie zur Erreichung der finalen Geometrie definiert werden. BILD 7 zeigt die Darstellung eines Türpantausschnitts, der mithilfe von RoRoFo umgeformt wurde.



BILD 7. Mit RoRoFo umgeformter Türpantausschnitt.

Eine optische Vermessung der Demonstratorbauteile weist über die Bauteillänge einen nahezu konstant bleibenden Bauteilradius auf. Hinsichtlich der erreichten Genauigkeit bei den Flanschwinkeln zeigt sich eine geringe Formabweichung, die bei der Montage aber nicht hinderlich ist. Mit einer weiterführenden Feinabstimmung des Überbiegens im letzten Biegeinkrement ist noch eine Verringerung der Winkelabweichung auf weniger als 1° erreichbar.

6. KONZEPT EINES INTEGRIERTEN RICHTPROZESSES

Enge Geometrie- und Qualitätsanforderungen treffen in der Praxis auf unvermeidbare Variationen: Materialkennwerte (z. B. Streckgrenze, Anisotropie, Eigenspannungen) und Prozessbedingungen schwanken innerhalb ihrer Spezifikationsgrenzen. So zeigen beispielsweise gewalzte Bleche lageabhängige Eigenspannungsprofile, die sich in den Zuschnitten niederschlagen [13]. Diese Streuungen führen, besonders nach Wärmebehandlungsprozessen, zu

Formabweichungen und erfordern zusätzlichen Richtaufwand. Um diesen Aufwand zu minimieren, empfiehlt sich ein prozessintegriertes Richten; RoRoFo bietet hierfür als flexibles, inkrementelles Verfahren die geeignete Grundlage.

Aufbauend auf dieser Grundlage wurde ein Konzept für einen prozessintegrierten Richtprozess erstellt. Kernidee ist die Kombination aus dem indirekten Zugang zur Geometrie und der eigentlichen Korrekturlogik. Nach jedem Umforminkrement wird aus den gemessenen Prozesskräften die lokale Bauteilgeometrie rekonstruiert und darauf basierend die Korrektur für den nächsten Schritt berechnet. Kräfte sind im Prozess gut und zuverlässig erfassbar; die eigentliche Herausforderung ist eine belastbare Kraft-Geometrie-Korrelation zu finden. Das wurde mit einem leistungsfähigen KI-Modell auf Basis neuronaler Netze erreicht, welches aufgrund der vielen Stör- und Einflussgrößen komplex ist und fortlaufend erweitert, kalibriert und validiert wird. Vorarbeiten [7-8] belegen das Potenzial, insbesondere für definierte Zielgeometrien. Um die Generalisierung zu verbessern, rücken der Fokus von einem globalen Bauteilmodell ab und betrachten lokale Ausschnitte. Das erhöht die Stichprobendichte, erfasst lageabhängige Effekte (z. B. Randeffekte) gezielt und deckt ein breiteres Spektrum an Zielgeometrien robust ab. Insgesamt reduzieren KI-gestützte Vorhersagen den Messaufwand und damit die Prozesszeit, weil direkte Geometriemessungen entfallen.

Es wurde bereits gezeigt, dass eine zusätzliche Korrekturbahn nach der Umformung die Geometrie dem Soll annähern kann [8]. Die Ableitung der Korrekturbahn selbst ist jedoch herausfordernd, was wiederum den Einsatz eines KI-gestützten Verfahrens nahelegt, das auf Basis von Umformsimulationen vtrainiert wird. Der in Entwicklung befindliche integrierte Richtprozess ist in BILD 8 skizziert.

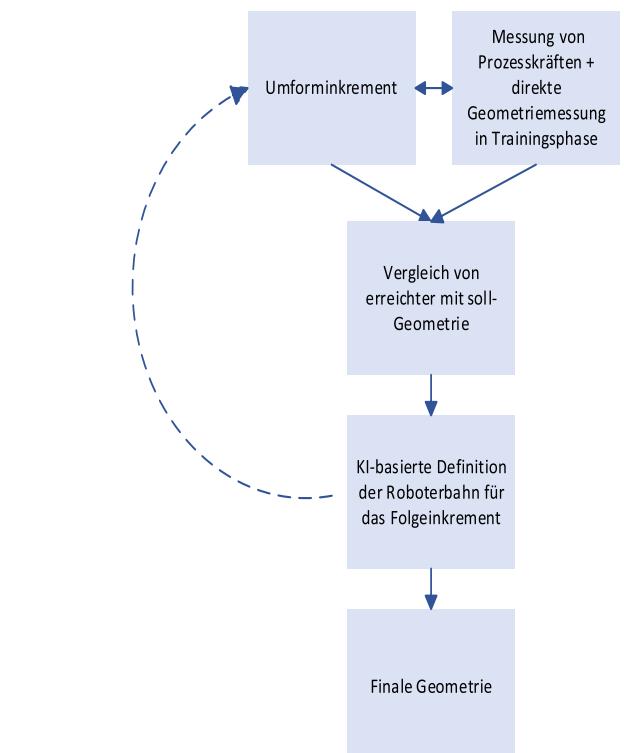


BILD 8. Flussdiagramm des integrierten Richtprozesses

7. AUSBLICK

Die für kleine bis mittlere Stückzahlen konzipierte und am Fraunhofer IWU entwickelte Umformtechnologie RoRoFo zeichnet sich durch einen außerordentlich hohen Materialnutzungsgrad im Vergleich zur üblichen Fräsbearbeitung aus. Zudem bietet das Verfahren gegenüber traditionellen Umformprozessen eine hohe geometrische Flexibilität insbesondere veränderliche Profilquerschnitte bei gleichzeitig minimalem Investitionsbedarf in Anlagentechnik und formspeichernden Formen bzw. Werkzeugen. Die kinematische Umkehr in Bezug zum Walzprofilieren und Nutzung eines Rollenpaars welches durch einen Roboter Vorschub- sowie An- und Zustellbewegung erfährt, bietet enorme Gestaltungsfreiheiten. Die reversierende Formerzeugung führt zwar zu längeren Fertigungszeiten, erlaubt dafür aber die prozessintegrierte Erfassung sowie Korrektur der Ist-Geometrie inklusive einer vollautomatisierten durchgängigen Dokumentation.

Neben der allgemeinen Technologieentwicklung und dem Ausloten der umformtechnischen Grenzen wird die Prozessoptimierung der kinematischen Gestalterzeugung über die Teilsysteme hinweg forciert. Dies erfordert die volle Integration aller Komponenten in eine möglichst automatisierte Prozessauslegung, so dass nach Definition der Kinematik die Roboterbahnen automatisiert erstellt werden, ebenso wie die SPS-Befehle für das flexible Spannungsnetz. Der wissenschaftliche Fokus liegt auf der finalen Integration des Richtprozesses mit integrierter Qualitätssicherung in den Gesamtprozess, sodass mittelfristig Bauteile bereits bei Stückzahl 1 geometrietreu hergestellt werden können. Der anpassbare Walzenspalt bietet zudem die Option, zukünftig Blechhalbzeuge mit bereichsweise angepassten Wanddicken zu verarbeiten.

8. DANKSAGUNG

Die vorliegende Forschung wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Förderkennzeichens 20W2102E gefördert. Wir sprechen dem BMWK unseren ausdrücklichen Dank für die finanzielle Unterstützung aus.

Literatur

- [1] Halmos, G. T.: *Roll forming handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis 2006
- [2] Istrate, A.: Verfahrensentwicklung zum Walzprofilieren von Strukturbauten mit über der Längsachse veränderlichen Querschritten. Dissertation, TU Darmstadt, 2002
- [3] Woo, Y. Y.; Han, S. W.; Oh, I. Y. et al. (2019): Shape Defects in The Flexible Roll Forming of Automotive Parts. In: *International Journal of Automotive Technology* 20, 2, S. 227–236. DOI: 10.1007/s12239-019-0022-y
- [4] Abeyrathna, B.; Abvabi, A.; Rolfe, B. et al. (2016): Numerical analysis of the flexible roll forming of an automotive component from high strength steel. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 159, S. 12005. DOI: 10.1088/1757-899X/159/1/012005
- [5] Richter, K.; Gerstmann, T.; Richter-Trummer, V.; Ahrens, A.; Abdolmohammadi, T.; Nestler, M.; Werner, M.; Kräusel, V. (2021): Roboterbasiertes Rollformen: Flexible Fertigung von Profilbauteilen ab Losgröße 1. In: *Wt Online* 111, 10, S. 709–711. DOI: 10.37544/1436–4980–2021–10–55

- [6] Werner, M.; Richter, K.; Haase, R.; Richter-Trummer, V.; Kräusel, V. (2023). Inkrementelles Biegen durch roboterbasiertes Rollformen (2023). In: Transformation in der Biegetechnik: Tagungsband zum 6. Biegeforum Siegen, S. 123–131. DOI: 10.25819/ubsi/10401
- [7] Abdolmohammadi, T.; Richter-Trummer, V.; Ahrens, A.; Richter, K.; Alibrahim, A.; Werner, M. (2023): Virtual Sensor-Based Geometry Prediction of Complex Sheet Metal Parts Formed by Robotic Rollforming. In: *Robotics* 12 (2), S. 33. DOI: 10.3390/robotics12020033.
- [8] Abdolmohammadi, T.; Ahrens, A.; Richter-Trummer, V.; Todtermuschke, M. (2023): Data preparation for AI-based robot control. In: *Procedia CIRP* 118, S. 211–216. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.037.
- [9] Klocke, F.; König, W.: *Umformen*. Berlin: Springer-Verlag 2006
- [10] Voswinckel, D. H.: Abkanten und Kragenziehen mit der inkrementellen Blechumformung. Dissertation, RWTH Aachen, 2017
- [11] Werner, M.: StaBiFÜ® – efficient manufacturing of structural parts. Presentation held at 5. Automotive Photonics Konferenz, Ditzingen/Germany, 2019
- [12] Sedlmaier, A.; Dietl, T.: 3D roll forming center for automotive applications (2018). In: *Procedia Manufacturing* 15, S. 767–774. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.319
- [13] Richter-Trummer, V., Koch, D., Witte, A. et al. Methodology for prediction of distortion of workpieces manufactured by high speed machining based on an accurate through-the-thickness residual stress determination. *Int J Adv Manuf Technol* 68, 2271–2281 (2013). DOI: 10.1007/s00170-013-4828-x