

Inkrementelles Biegen durch roboterbasiertes Rollformen

Markus Werner^{1,a}, Karsten Richter¹, Rico Haase¹, Valentin Richter-Trummer¹,
Verena Kräusel¹

¹Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik,
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz, Germany

^amarkus.werner@iwu.fraunhofer.de

Keywords: inkrementelle Blechumformung, inkrementelles Biegen, roboterbasiertes Rollformen, geometrieflexible Umformung

Abstract. Die Forderungen nach wirtschaftlichen Fertigungsverfahren für die Blechumformung sind nicht neu, aber unter den aktuellen Marktbedingungen wächst deren Bedeutung. Aufgrund der stark zunehmenden Modellpaletten in der Automobilindustrie sinken die Stückzahlen der einzelnen Modelle und dadurch gelangen etablierte Verfahren und Fertigungsweisen an ihre jeweiligen technologischen, insbesondere aber an ihre wirtschaftlichen Grenzen. Neue Fertigungsverfahren und Prozessketten, die eine hohe Produktflexibilität bei gleichzeitig geringem Werkzeugaufwand bieten, gewinnen an Bedeutung. Das inkrementelle Biegen von Flanschen, vorzugsweise mit nicht-linearem Kantenverlauf, welche mit einem robotergeführtem Rollenpaar gefertigt werden, zählt zu diesen Verfahren. Ohne bauteilspezifische Werkzeuge können mittels des roboterbasierten Rollformens (RoRoFo) viele Varianten gefertigt werden, da die geometrische Varianz durch programmseitige Anpassung der Bewegungsbahnen erzielt wird. Potenzielle Anwendungsfelder des Verfahrens sind die Prototypen- und Kleinserienfertigung in der Automobilindustrie, in der Luftfahrt sowie im allgemeinen Maschinenbau.

Einführung

Die Analyse der Fertigungskosten für Blechstrukturbauteile für die Automobilindustrie zeigt, dass die Kosten für die Umformwerkzeuge bei konventioneller, mehrstufiger Umformung in Presswerken bei sinkenden Stückzahlen der kostentreibende Faktor sind [1]. Derartige Werkzeuge mit hohem Formspeichergrad ermöglichen eine hohe, gut reproduzierbare Bauteilqualität und insbesondere eine hohe Produktivität. Demgegenüber stehen geringe Variantenflexibilität, hohe finanzielle und zeitliche Aufwände zur Herstellung und Einarbeit der Umformwerkzeuge sowie erhebliche Kosten bei erforderlichen Anpassungen, Wartungen und Instandsetzungen. Hieraus lässt sich der Bedarf an neuen Umformverfahren bzw. Fertigungsansätzen ableiten, die geringe Werkzeugkosten verursachen, eine hohe Variantenflexibilität ermöglichen und zudem punktuell geregelt werden können.

In der Innovationsallianz GreenCarBody [2] wurde hierfür der StaBiFü[®]-Ansatz [3] entwickelt. Dabei handelt es sich um eine alternative Fertigungsweise zum klassischen Tiefziehen in konventionellen Presswerken. Der Fokus liegt dabei auf kleinen bis mittleren Stückzahlen und auf Strukturbauteilen [4]. Die Geometrien der Bauteile werden hierfür in charakteristische Bereiche zerlegt und durch eine Sequenz aus Stanz-Biegen-Fügen (StaBiFü[®]) [5] gefertigt. Die Hauptformgebung kann beispielsweise durch Formschlagen realisiert werden und alle weiteren Umform- und Schneidoperationen erfolgen auf verschiedenen CNC-Stanz- und Biegemaschinen bzw. auf CNC-Schneidanlagen. Am Beispiel eines Sitzquerträgers konnten so die Aufwendungen für bauteilspezifische Werkzeuge um 90 % gesenkt werden, sodass sich mit dieser geometrieflexiblen Prozesskette trotz geringerer Produktivität Stückzahlen bis zu 30.000 Stück teilweise sogar bis zu 50.000 Stück pro Jahr wirtschaftlich abbilden lassen.

Ziel aktueller Forschung ist neben der Reduzierung des Materialbedarfs für die Fertigung auch die Verringerung des Gewichtes des finalen Bauteils durch lastoptimiertes Design. Hierbei entstehen Geometrien mit profilartigen Querschnitten und Flanschen, die keinen geradlinigen Verlauf aufweisen und daher nicht durch einfaches Abkanten gefertigt werden können.

Stand der Technik

Flexible Verfahren zur Fertigung nicht-linearer Flansche

Mit der Forderung nach flexiblen Umformverfahren und Technologien mit geringem bauteilspezifischen Werkzeugaufwand scheidet konventionelle Umformverfahren wie das Tiefziehen aus. Verfahren wie das Walzprofilieren und das Abkanten durch Freiformbiegen sind ebenfalls nicht geeignet, um Flansche bzw. Abkantungen zu fertigen, die keinen geradlinigen Verlauf aufweisen. Demgegenüber bieten die Weiterentwicklungen des klassischen Walzprofilierens zum 3D-Rollformen bzw. zum flexiblen Rollformen (FRF) hierfür geeignete Ansätze. Wesentliche Beiträge zum Walzprofilieren von Strukturbauteilen mit veränderlichen Querschnitten [6] inklusive geeigneter Auslegungsmodelle [7] ggf. unter Verwendung von Tailored Rolled Blanks [8] wurden am PtU in Darmstadt geleistet. Die Weiterverarbeitung derartiger Profile beispielsweise durch das 3-Rollen-Schubbiegen [9] ist Forschungsgegenstand in Siegen. Die Verfahren bzw. deren maschinenseitige Umsetzung lassen sich hinsichtlich der Fertigungsweise in eine kontinuierliche Arbeitsweise [10, 11] bzw. in eine diskontinuierliche Arbeitsweise mit Reversierbetrieb [12, 13] unterscheiden. Zu diesen diskontinuierlichen Verfahren zählt das roboterbasierte Rollformen (RoRoFo) [14], das im Folgenden näher vorgestellt wird.

Eine weitere Option der Fertigung nicht-linearer Abkantungen bietet ein speziell entwickeltes Schwenkbiegen „3D-swivel-bending (SB³)“ [15]. Bei prinzipiell gleicher Zielstellung unterscheiden sich die Ansätze von Schwenkbiegen und roboterbasiertem Rollformen hinsichtlich ihres geometrie-spezifischen Werkzeugbedarfs und dem Grundprinzip der Formgebung. Während das 3D-swivel-bending einstufig erfolgt, handelt es sich bei dem RoRoFo um eine Umformtechnologie mit kinematischer Gestalterzeugung.

Roboterbasiertes Rollformen

Grundlagen und allgemeine Beschreibung

Das roboterbasierte Rollformen ist entsprechend der Systematik der Fertigungsverfahren nach DIN 8586 [16] als Biegeumformverfahren mit drehender Werkzeugbewegung einzuordnen. Anders als beim klassischen Walzprofilieren erfolgt die Profilierung eines ortsfesten Bauteiles mit einem bewegten Rollensatz. Dieser ist Bestandteil eines Endeffektors, welcher durch einen Roboter manipuliert wird. Das Biegen der Flansche erfolgt in mehreren Schritten, Biegeinkrementen, durch eine definierte Vorschubbewegung entlang der Blechkante in Kombination mit Zustellbewegungen. Die Winkeleinstellung zur Realisierung der Biegeinkremente kann sowohl durch den Roboter als auch innerhalb des Endeffektors erfolgen. In Abb. 1 ist das Verfahrensprinzip schematisch dargestellt, wobei ① die Ausgangssituation, ② die Aufstellung des Flansches um 45° und ③ um 90° zeigt. Die konische Ausführung der Rollen erlaubt ein Überbiegen der Flansche, um die Rückfederung zu kompensieren.

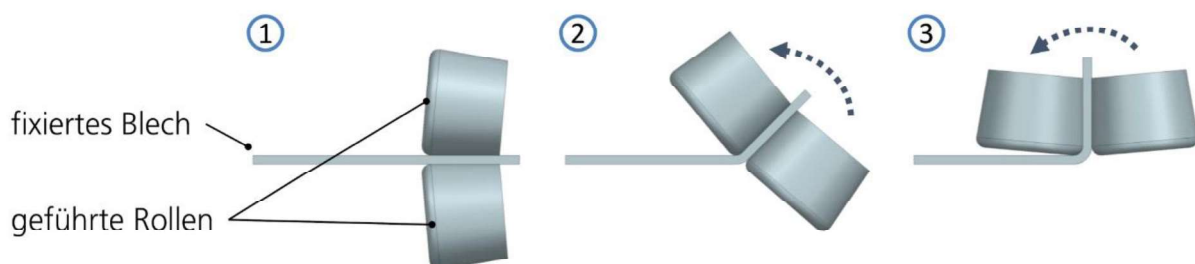


Abb. 1: Verfahrensprinzip des roboterbasierten Rollformens [9]

Geometrische Aspekte von Flanschen

Abkantungen und Borde, die im Folgenden als Flansche bezeichnet werden, weisen verschiedene geometrische Aspekte auf, die als Ordnungsmerkmale genutzt werden können. Als Längsform wird der Verlauf der Flansche in Längsrichtung bezeichnet. Hier kann prinzipiell in gerade, konkave und konvexe Verläufe unterteilt werden. Tritt eine Kombination dieser Grundvarianten auf, wird diese als komplex bezeichnet. In Abb. 2 sind die Längsformen in der genannten Reihenfolge abgebildet.

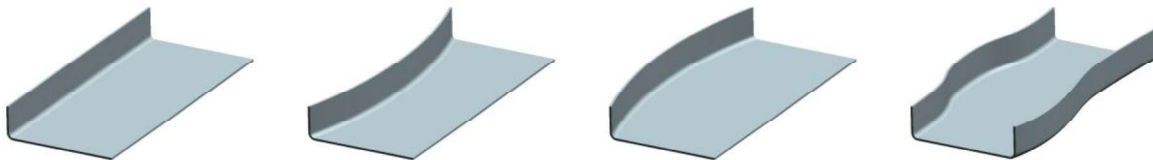


Abb. 2: Grundlegende Längsformen von Flanschen: (v.l.n.r) gerade, konkav, konvex und komplex

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Querschnittsform der Flansche. Diese kann wie abgebildet „L“-förmig sein, aber auch die Form eines „Z“s oder „C“s aufweisen. Zudem kann die Flanscbreite über den Verlauf hinweg konstant, aber auch lokal unterschiedlich gestaltet sein. Ebenso kann der Biegeradius des Querschnitts variieren, ist aber in der Regel konstant. Bei Verwendung von Tailored Blanks lässt sich zudem die Blechdicke lokal anpassen.

Gekrümmte Flanschverläufe sind geometrisch nicht abwickelbar, was bei der Formgebung dazu führt, dass bei konkaven Flanschverläufen zu wenig und bei konvexen zu viel Material im ebenen Zuschnitt vorhanden ist. Diese Bauteilbereiche weisen bei der Formgebung dementsprechende Zug- bzw. Druckspannungen in Längsrichtung auf und müssten neben der gewünschten Biegung im Radius im Flanscbereich gedehnt bzw. gestaucht werden.

In Abb. 3 sind die dominierenden Werte der Gesamtdehnung für einen konvexen und einen konkaven Flanscbereich, jeweils mit einem Radius $R = 500$ mm, anhand der Simulationsergebnisse eines S-förmigen Flanschverlaufes dargestellt. Die numerischen Untersuchungen hierzu erfolgten im FEM-Programm Marc Mentat von MSC.

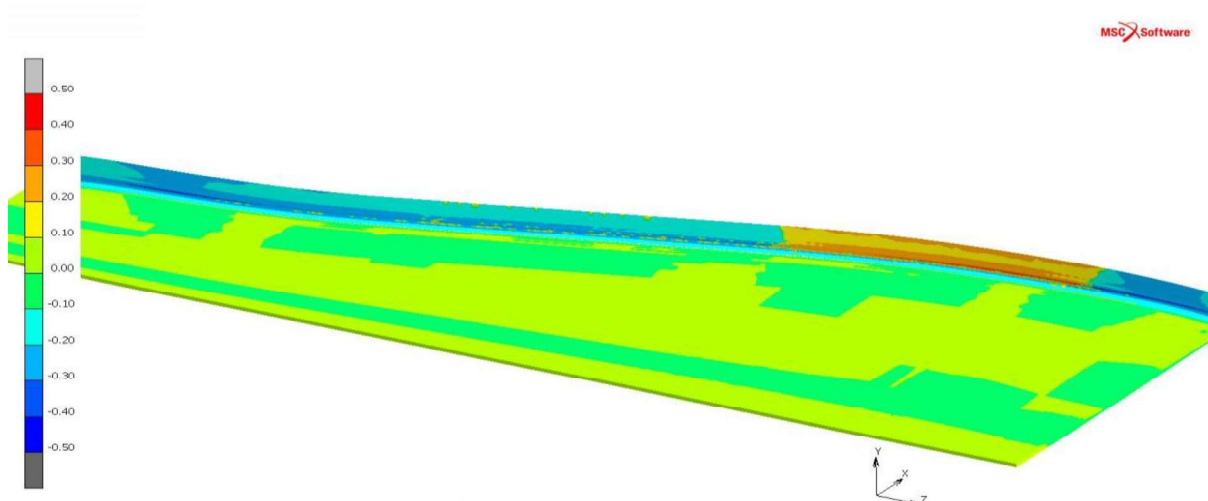


Abb. 3: Dominierende Werte in - der Gesamtdehnung (Major Principal Value of Total Strain) eines S-förmigen Flansches mit konvexem und konkavem Bereich und jeweils vorherrschender Dehnung bzw. Stauchung

Endeffektor und Versuchsanordnung

In Abb. 4, links, ist der genutzte Versuchsaufbau dargestellt. Das Versuchsteil ist auf einer Grundplatte mit Hilfe einer angeschrägten Niederhalterplatte gespannt. Der Endeffektor mit den daran drehbar gelagerten Umformrollen wird von einem Industrieroboter (KUKA KR150 R2700 Extra) entlang der Bauteilkante, hier mit einem Anstellwinkel von 45° , bewegt. Die Erfassung der realisierten Bauteilgeometrie erfolgt mit einem räumlich getrackten Linienscanner (T-Scan der Fa. Steinbichler).

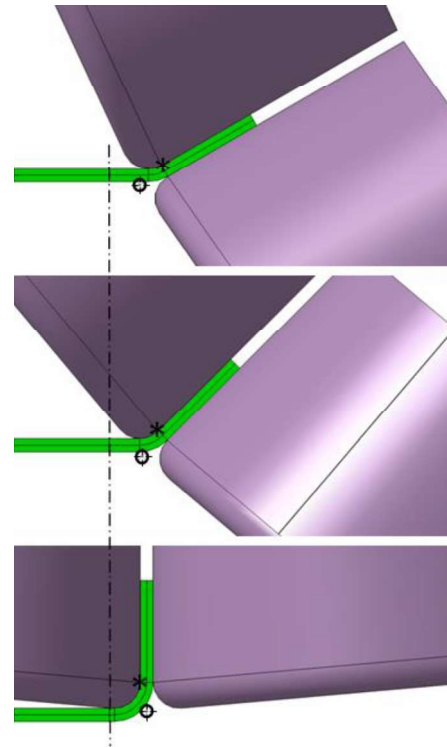
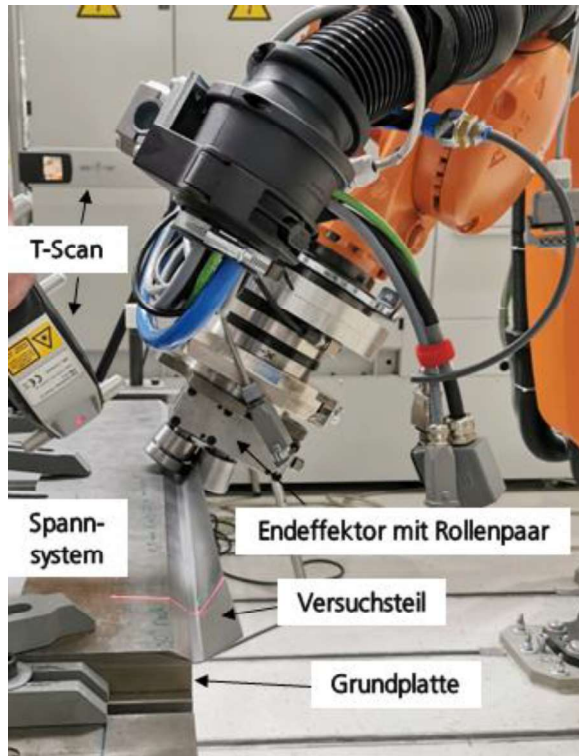


Abb. 4: Versuchsaufbau zum roboterbasierten Rollformen (links) sowie Zustellbewegung zur Formgebung des Profilbogens (v.o.n.u) mit Winkelstellungen von 30° , 45° und 90° (rechts)

Kinematik des Endeffektors

Gegenüber allen anderen flexiblen Rollformverfahren zeichnet sich das roboterbasierte Rollformen dadurch aus, dass das Bauteil ortsfest ist und das Rollenpaar via Endeffektor alle Bewegungen ausführt. Hierzu zählen sowohl die Vorschubbewegung entlang der Längsform als auch die Zustellbewegung der einzelnen Biegeinkremente. Für die Längsbewegung des Endeffektors bzw. zur Programmierung dieser Bahn wird auf die Schnittlinie zwischen der Grundfläche und der Flanschfläche zurückgegriffen, die einem theoretischen Biegeradius von 0 mm entspricht.

Ein weiterer Unterschied zu anderen Verfahren ist die Zustellbewegung der Biegeinkremente. Diese erfolgt, während der Endeffektor sich entlang der Längsrichtung bewegt, also im Eingriff ist. Die Winkelzustellung kann sukzessive entlang der gesamten Bauteil-Längsachse, in Abb. 5 rechts erfolgen oder durch kurzes Pendeln an einem oder an beiden Bauteilenden realisiert werden, wie es in Abb. 5 links dargestellt ist. Die Rückfahrt vom Bauteilende zum -anfang erfolgte ohne erneute Zustellung.

Während bei der Auslegung von Profilblumen für das konventionelle Walzprofilieren bei der Bogenführung die Variante mit konstantem Bogen bevorzugt wird, eignet sich beim roboterbasierten Rollformen das Einrollen von außen mit konstantem Radius. In Abb. 4 rechts ist diese Kinematik für die Winkelstellungen von 30° , 45° und 90° untereinander dargestellt.

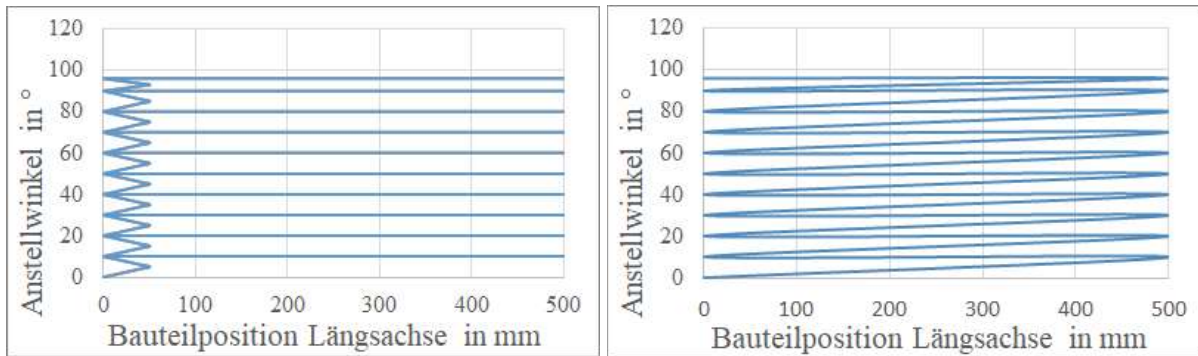


Abb. 5: Verschiedene Zustellbewegungen der Biegeinkremente: kurzes Pendeln am Bauteilanfang (links); Pendeln entlang der gesamten Flanschlänge, Rückfahrten ohne Winkelzustellung (rechts)

Beim konventionellen Walzprofilieren werden Profilanfang und -ende nicht genutzt, da hier keine gleichbleibenden Prozessbedingungen herrschen und folglich die Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie deutlich abweicht (sogenannte „Trompete“). Beim roboterbasierten Rollformen schwanken die Prozessbedingungen in gleicher Weise. Sowohl der Bauteilanfang als auch das Bauteilende sind freie, offene Enden, die folglich andere Biege widerstandsmomente aufweisen als der als quasistationär anzusehende Bereich in der Bauteilmitte. Die resultierenden Biege winkel weichen bei konstanter Winkelanstellung zwangsläufig voneinander ab und der Flansch bildet keine gerade Kante. In Abb. 6 ist ein derartiger Kantenverlauf dargestellt. Die gestrichelte gelbe Linie dient als Orientierungshilfe, sodass die Abweichung gut erkennbar ist. Zudem ist die Abweichung quantitativ im Diagramm dargestellt.

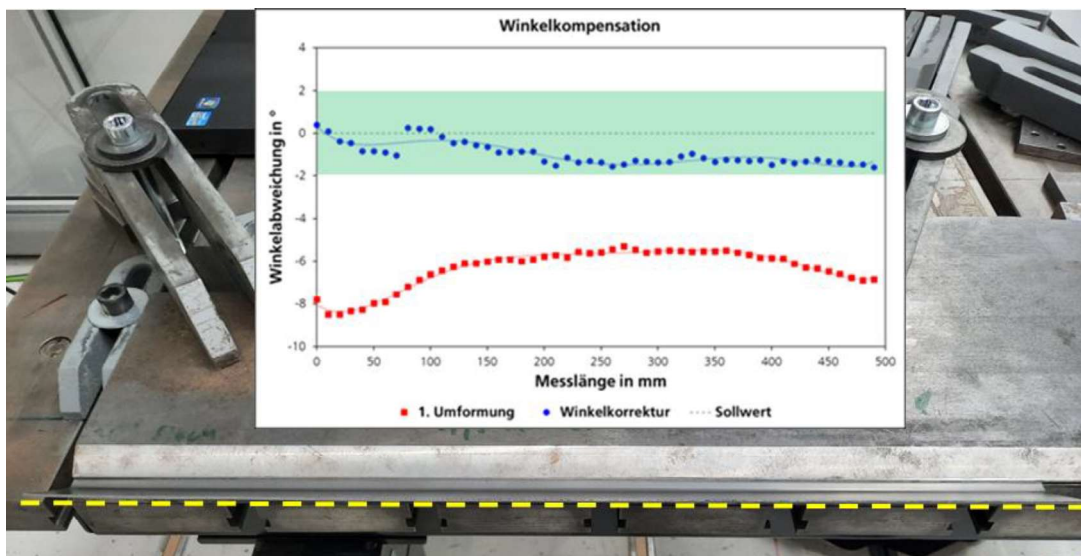


Abb. 6: Abweichung der realisierten Biegekante vom geraden Verlauf (gestrichelte gelbe Linie) aufgrund unterschiedlicher Biege widerstände an den freien Bauteilenden gegenüber dem mittleren Bauteilbereich sowie optisch erfasste Abweichungen vor und nach einer Kompensation durch entsprechende Winkelkorrektur

Im Gegensatz zum konventionellen Verfahren und einer Fertigung im Durchlaufbetrieb besteht beim roboterbasierten Rollformen die Möglichkeit, auf erfasste geometrische Abweichungen reagieren bzw. diese vorausschauend mit der letzten Bahn korrigieren zu können. Die erfolgreiche Kompensation sowohl prozessbedingter Abweichungen als auch der Rückfederung ist im Diagramm in Abb. 6 dargestellt. Hierfür wurde die erreichte Ist-Geometrie der vorletzten Bahn ausgewertet und die Abweichungen während der letzten Bahnbewegung durch eine entsprechende, positionsabhängige Anpassung des Biegeinkrements korrigiert. Neben der optischen Erfassung der Ist-Geometrie ist die kraftsensorische Erfassung und Auswertung Fokus aktueller Forschungsaktivitäten [17].

FlexHyBat Demonstratorbauteil

Die Ergebnisse der grundlegenden Untersuchungen mit einfachen Bauteilgeometrien wurden im Forschungsprojekt „Inkrementelle Leichtbau-Fahrzeugbodengruppe für leichte Nutzfahrzeuge auf Basis 3D-rollgeformter Profile“, kurz FlexHyBat, auf ein komplexes Demonstratorbauteil übertragen und angewandt. Ausgangspunkt hierfür war ein Konzeptentwurf für das Chassis eines Nutzfahrzeuges (Nfz) in Abb. 7 links. Diese Konstruktion wurde fertigungstechnisch umgestaltet und detailliert. Der nach dem StaBiFü®-Ansatz umgestaltete Querträger 3, der als Demonstratorbauteil für die Fertigung mit geringstmöglichem Formspeichergrad in den Werkzeugen konzipiert und mit dem RoRoFo umgesetzt wurde, ist in Abb. 7 rechts dargestellt.

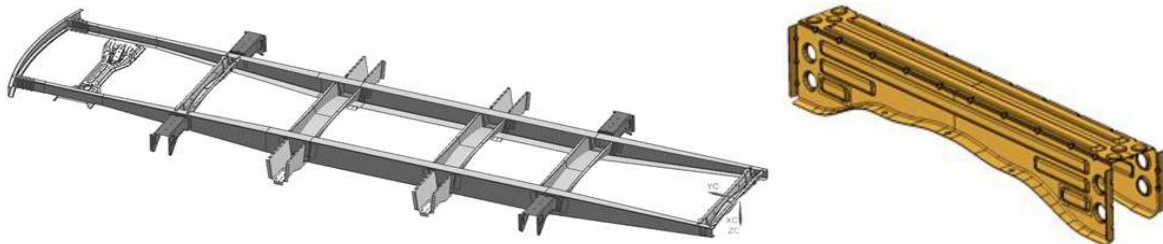


Abb. 7: Konzept und erster Entwurf eines Chassis für Nfz und verschiedene Antriebsstränge (links, Bildquelle EDAG) sowie ein auskonstruierter und detaillierter Querträger 3 (rechts)

Im Gegensatz zur üblichen werkzeuggebundenen Fertigung in 6 bis 8 Stufen im Presswerk wurden nur universelle Werkzeuge genutzt und auf einer Stanzmaschine (TruPunch 5000) sowie auf einer Abkantpresse (TruBend 3120) eingesetzt. Die Flansche wurden durch RoRoFo hergestellt. Abb. 8 zeigt einzelne Fertigungsschritte. Die Formplatte wurde auf der Stanzmaschine als erstes mit flachen Verprägungen durch Rollsicken versteift und dann ausgeschnitten. Im Weiteren wurden die beiden nicht geraden Flansche mittels des roboterbasierten Rollformens realisiert. Dabei steht der linke Flansch in Abb. 8 links nach oben, während der rechte Flansch nach unten gerichtet und damit nicht sichtbar ist.

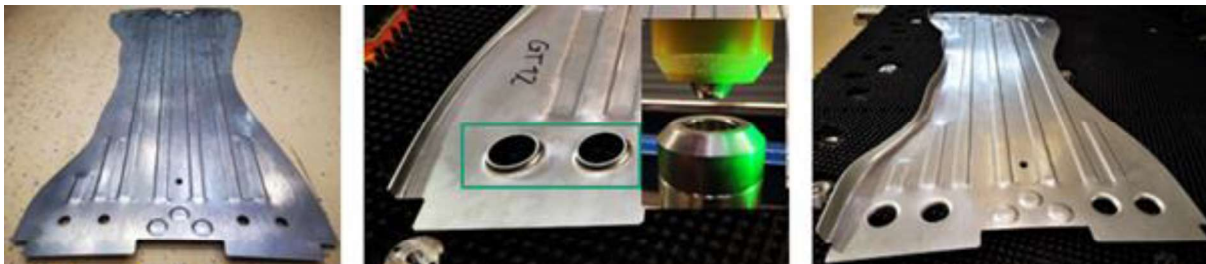


Abb. 8: Ausgewählte Fertigungsschritte des Querträgers 3, links: Platinenzuschnitt mit Rollsicken versteift, Mitte: Kragen an den runden Durchbrüchen und rechts: Bauteil mit nach oben (links) und unten geformten Flanschen (rechts)

In einem nächsten Schritt wurden die runden Durchbrüche mit Kragen versehen. Im Anschluss wurde das so vorgefertigte Bauteil konventionell abgekantet, wobei gleichzeitig Rippen in die Kanten eingepreßt wurden, die versteifend wirken und gleichzeitig die Rückfederung reduzieren.

Abb. 9 zeigt links das beim RoRoFo verwendete Spannsystem, mit dem die vorgeformte Platine mittels Spanneisen auf eine Unterlage, die der Kontur des Flansches folgt, fixiert ist. Daneben ist in Abb. 9, rechts, einer der beiden geformten Flansche dargestellt, der in das Innere des Profils gerichtet ist. Dieser ist in Abb. 10 vorn erkennbar. Der in Abb. 10 ersichtliche hintere Flansch weist über seinen Verlauf hinweg unterschiedliche Flanschbreiten auf, welche durch das Design bzw. anschließende Anbauteile und Fügstellen so erforderlich sind. Der Querträger 3 wurde aus verschiedenen hochfesten Stahllegierungen gefertigt. Eine Variante aus 2 mm dickem ZE600 mit den Abmessungen 1100 x 200 x 175 mm³ (L x B x H) zeigt Abb. 10.



Abb. 9: Bauteil in Spannvorrichtung unmittelbar vor dem roboterbasierten Rollformen (links) sowie fertig rollgeformter Flansch (rechts)



Abb. 10: Finalisierter Querträger 3, welcher ausschließlich mit universell einsetzbaren Werkzeugen gefertigt wurde

Zusammenfassung

Das roboterbasierte Rollformen erweitert das Spektrum flexibler Rollformverfahren und ist geeignet, nicht-lineare Flansche an Bauteilen zu formen. Die kinematische Formgebung erfolgt hierbei mit einem Rollenpaar, das als Endeffektor durch einen Industrieroboter mit serieller Kinematik bewegt wird. Dieser führt sowohl die Vorschub- als auch die Winkelzustellbewegungen aus, während das Bauteil ortsfest ist. Geometrische Anpassungen lassen sich durch Änderung der Bewegungsbahn realisieren und auftretende Abweichungen pro- oder reaktiv korrigieren. Anhand eines Querträgers wurde die Tauglichkeit dieses Verfahrens zur Formgebung nicht-linearer Flansche mit variierender Breite nachgewiesen. Die neuentwickelte Technologie ergänzt die Möglichkeiten etablierter Fertigungsverfahren komplexe Blechstrukturteile ohne bauteilspezifische Werkzeuge wirtschaftlich durch Umformung zu fertigen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt FlexHyBat wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Fachprogramm „Neue Fahrzeug und Systemtechnologie“ unter den Förderkennzeichen 19 I 20019 F gefördert und vom Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH betreut.



Inkrementelle
Leichtbau-Fahrzeug-
bodengruppe für
leichte Nutzfahrzeuge
auf Basis 3D
rollgeformter Profile



BETREUT VON



Literaturverzeichnis

- [1] R. Neugebauer (Hrsg.): Innovationsallianz "Green Carbody Technologies" – InnoCaT Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, - Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014, ISBN: 978-3-8396-0624-7
- [2] M. Putz: Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ – InnoCaT® (S. 175–195) in Ressourceneffizienz - Schlüsseltechnologien für Wirtschaft & Gesellschaft, Hrsg. R. Neugebauer, Springer Verlag, 2017, ISBN: 978-3-662-52889
- [3] U. Quentin, M. Werner, K. Löffler: Business success by efficiently using forming technology in design, production, and assembly; 5th International Conference on Accuracy in Forming Technology, ICAFT 2015, 2015, S.507–514.
- [4] A. Müllegger, M. Werner: Flexible and economic production of structural parts and ZSB's for small production numbers, Strategies in Car Body Engineering: 15.-16. März 2016, Bad Nauheim, 2016.
- [5] M. Werner: StaBiFü® - efficient manufacturing of structural parts: Presentation held at 5. Automotive Photonics Conference, 14.02.2019, Ditzingen, Germany.
- [6] A. Istrate, Verfahrensentwicklung zum Walzprofilieren von Strukturbauteilen mit über die Längsachse veränderlichen Querschnitten, Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- [7] Groche, P., Zettler, A., Berner, S. et al. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts. Int J Mater Form 4, 371–377 (2011), doi: 10.1007/s12289-010-0998-3
- [8] P. Beiter, M. Münster, X. Wu: Maßhaltiges Profilieren von Tailor Rolled Blanks. In: Peter Groche (Hg.): 8. Fachtagung Walzprofilieren & [und] 4. Zwischenkolloquium SFB 666. Darmstadt, 14./15. November 2012. Bamberg: Meisenbach, S. 45–56.
- [9] D. Nebeling, B. Engel: Bending profiles with variable cross section. Procedia CIRP. 112. 412-417. (2022), doi: 10.1016/j.procir.2022.09.029.
- [10] A. Sedlmaier, T. Dietl: Recent Advances in the Industrial Application of Flexible (3D) Roll Forming for Automotive Parts by the Use of Modern CAE Tools. In Proceeding of the 34th International Deep Drawing Research Group, Shanghai, China, May 31st-June 3rd 2015; Zhang, S.-H.; Cheng, M.; Shanghai, China, 2015; 633–640.
- [11] Your partner in advanced roll forming, both traditional and flexible 3D. Available online: <https://www.ortic.se/> (accessed on 03 01 2022).

- [12] Sedlmaier, A., Dietl, T. 3D roll forming center for automotive applications. *Procedia Manufacturing* 2018, 767–774, doi: 10.1016/j.promfg.
- [13] Abeyrathna, B., Rolfe, B., Harrasser, J., Sedlmaier, A., Ge, R., Pan, L., Weiss, M. Prototyping of automotive components with variable width and depth. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017, 896 012092, doi: 10.1088/1742-6596/896/1/012092
- [14] Richter, K., Gerstmann, T., Richter-Trummer, V., Ahrens, A., Abdolmohammadi, T., Werner, M, Kräusel, V. Flexible production of profile components from batch size 1 - Robotic rollforming. *WT Werkstattstechnik* 2021, 10, 709–711, <https://dx.doi.org/10.37544/1436-4980-2021-10-55>
- [15] M. Schiller, B. Engel: 3D-swivel-bending (SB³), *Procedia CIRP* Volume 112, pp. 406-411 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.09.028
- [16] DIN 8586, Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Ausgabe September 2003
- [17] T. Abdolmohammadi, V. Richter-Trummer, A. Ahrens, K. Richter, A. Alibrahim, M. Werner: Virtual Sensor-Based Geometry Prediction of Complex Sheet Metal Parts Formed by Robotic Rollforming, *Robotics* 2023, 12, 33. doi: 10.3390/robotics12020033