Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

DOI 10.37544/1436–4980–2021–11–12–42

Reduktion von Bereitstellungsaufwänden im Werkzeugbau

Tiefziehen mit additiv gefertigten Werkzeugen

G. Schuh, G. Bergweiler, F. Fiedler, N. Lackner, B. Löffler

Additiv gefertigte Tiefziehwerkzeuge versprechen aufgrund kürzerer Fertigungszeiten und geringerer Kosten erhebliche Vorteile bei der Produktion von Prototypen und Kleinserien. Am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University wird erstmals ein additiv gefertigtes Kunststoffwerkzeug für das Tiefziehen eingesetzt. Durch das Verknüpfen dieser Technologie mit flexiblen Fertigungsverfahren lassen sich vollfunktionsfähige Tiefziehbauteile auch bei kleinen Stückzahlen wirtschaftlich herstellen.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Umformtechnik, Werkzeug-/Formenbau

Deep drawing with additively manufactured tools – Reduction of tooling cost

Additively manufactured deep drawing tools offer considerable advantages in the production of prototypes and small series due to shorter manufacturing times and lower costs. The Werkzeugmaschinenlabor (WZL) of RWTH Aachen University is using for the first time an additively manufactured polymer toolfor deep drawing. By combining this technology with flexible manufacturing processes, it is possible to produce fully functional deep-drawn parts economically, even for small series.

1 Einleitung

In der Kleinserienfertigung und dem Prototypenbau werden häufig Tiefziehwerkzeuge aus Kunststoff oder niedrigschmelzenden Legierungen sowie Verfahren mit Wirkmedien eingesetzt, um die relativ zur Stückzahl sehr hohen Werkzeugkosten zu reduzieren. [1] Diese Werkzeugwerkstoffe sind vor allem aufgrund einer im Vergleich zu konventionellen Stahlwerkstoffen einfachen Bearbeitbarkeit vorteilhaft. Durch eine höhere Nachgiebigkeit der Kunststoffwerkzeuge kann meist zusätzlich auf eine Einarbeitung der Werkzeugoberfläche verzichtet werden, wodurch eine weitere Kostenreduktion bei der Werkzeugherstellung möglich ist [2]. Die vergleichsweise geringe Härte und Verschleißbeständigkeit begrenzen den Einsatz von Kunststoffwerkzeugen aber bei größeren Stückzahlen. Zudem kann die erhöhte Nachgiebigkeit vor allem bei hochfesten Stählen und scharfen Konturen im Bauteil zu geringeren Bauteilgenauigkeiten führen. Trotz der genannten Vorteile sind die benötigte Anlagentechnik, die manuellen Bearbeitungsschritte oder die spanende Bearbeitung nach wie vor signifikante Kostentreiber, sodass für tiefgezogene Blechbauteile die Fertigung kleiner Stückzahlen mit hohem Aufwand verbunden ist.

Neben der spanenden oder gießtechnischen Herstellung von Kunststoffwerkzeugen gibt es weitere Ansätze, welche die additive Fertigung zur direkten Herstellung der Werkzeuge nutzen. In verschiedenen Arbeiten konnte bereits die grundsätzliche Anwendbarkeit der additiven Kunststofffertigung zur Werkzeugherstellung gezeigt werden. Bisherige Forschungsaktivitäten im Bereich der additiven Fertigung von Umformwerkzeugen untersuchen etwa das Biegen von Aluminium und Stahlblechen [3], das Hohlprägen von komplexen Geometrien [4] beziehungsweise von Sickengeometrien [5], das Gummikissen-Pressen [6] sowie das Tiefziehen einer Napfgeometrie [7].

In der vorliegenden Untersuchung wird erstmals ein additiv gefertigtes Kunststoffwerkzeug mit Niederhalter für das Tiefziehen eingesetzt und erprobt.

2 Entwicklung und Konstruktion des Werkzeugsatzes

Die Werkzeugtechnologie soll anwendungsnah an einem Fallbeispiel erprobt werden. Als Bauteil dient die Geometrie einer Sicherheitsgurtverstärkung einer B-Säule. Neben der klassischen Tiefziehoperation, dem Ziehen der Kavität, ist bei der Herstellung des Bauteils auch das Einbringen verschiedener Sickengeometrien notwendig, sodass diese Bauteilgeometrie als geeignet betrachtet werden kann. Für den Einsatz in einer Fahrzeugkarosserie wird dieses Bauteil typischerweise aus hochfesten Stählen gefertigt. In diesem Anwendungsfall wird das Bauteil lediglich als Beispielgeometrie genutzt und aus dem unlegierten Stahl DC04 gefertigt. **Bild 1** zeigt den Prozess der Werkzeugauslegung und -konstruktion. Dieser umfasst zunächst die Konstruktion des Blechbauteils. Im Anschluss erfolgt die simulationsgestützte Auslegung und Konstruktion des Werkzeugsatzes mit der Simulationssoftware „Autoform“. Dafür wird im ersten Schritt das sogenannte Addendum hinzugefügt, welches das Werkzeug so vergrößert, dass beim Tiefziehen von allen Seiten Material eingespannt und nachgezogen werden kann. Es folgt die Definition der Niederhalterfläche und anschließend die Simulation der Formbarkeit. Diese zeigt in den Sickenbereichen eine für Kaltverfestigung ausreichende

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

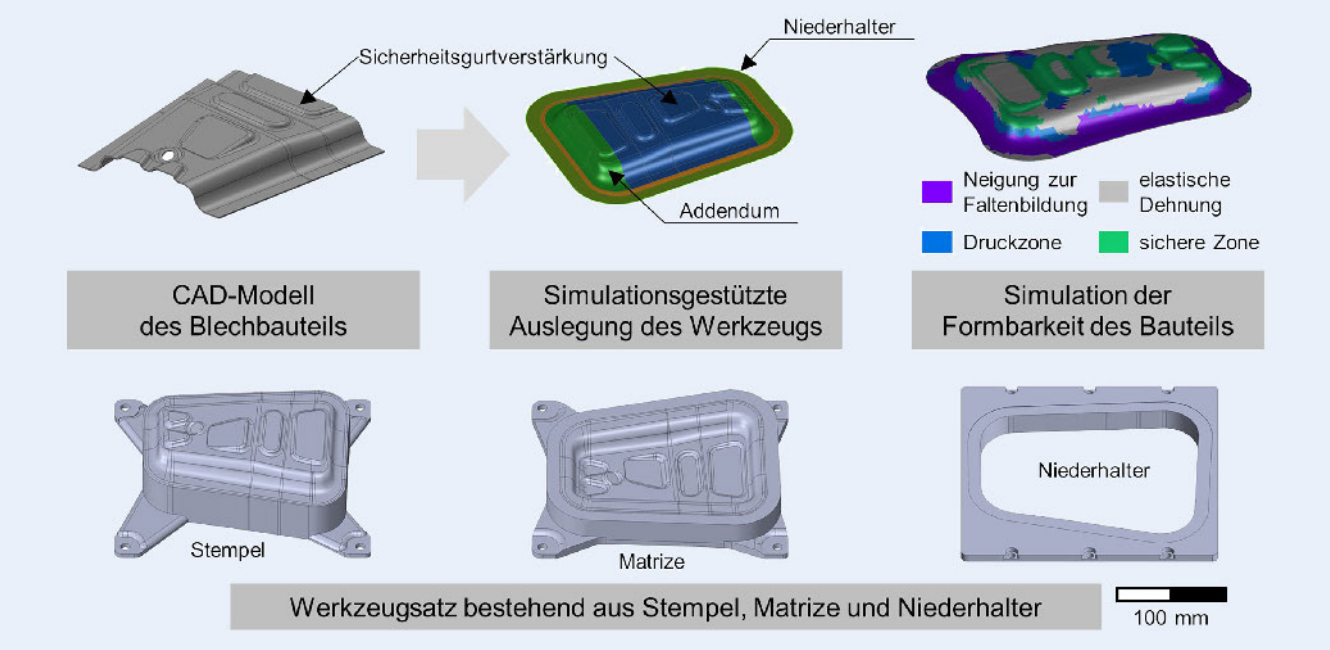


Bild 1. Werkzeugauslegung und -konstruktion: CAD-Modell der Sicherheitsgurtverstärkung (oben links), simulationsgestützte Auslegung des Werkzeugs (oben Mitte) und Simulation der Formbarkeit (oben rechts) sowie der Werkzeugsatz bestehend aus Stempel, Matrize und Niederhalter (unten). *Grafik: WZL*

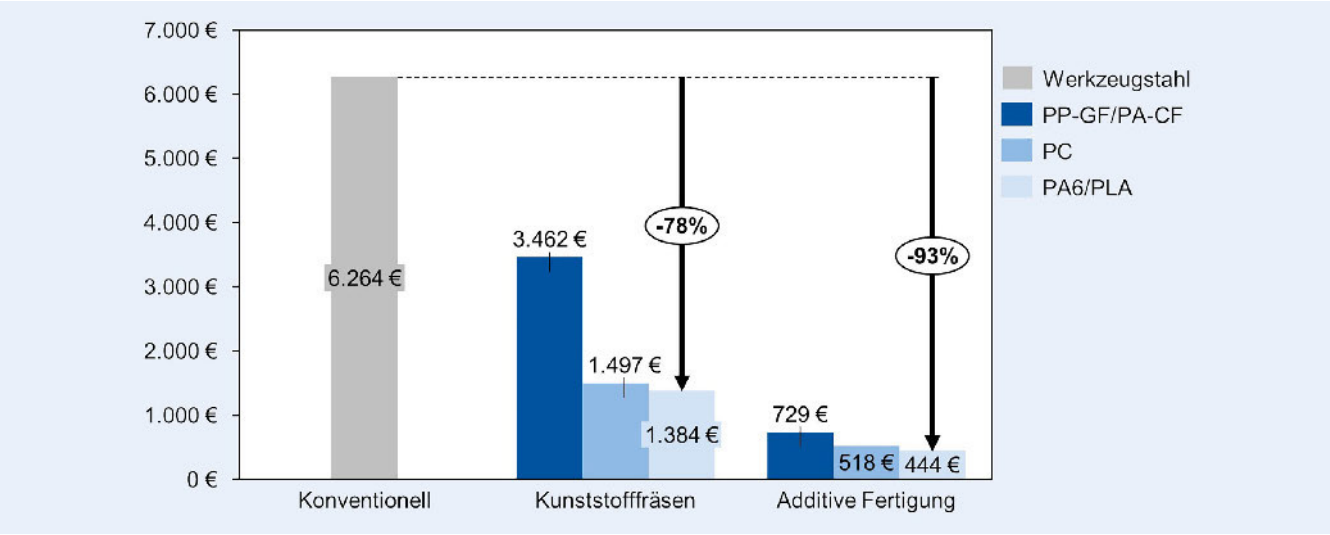


Bild 2. Vergleich von Herstellkosten des Werkzeugsatzes bei unterschiedlichen Fertigungsverfahren und Materialien. Verwendete Abkürzungen: Polypropylen-Glasfaser (PP-GF), Polyamid-Carbonfaser (PA-CF), Polycarbonat (PC), Polyamid (PA), Polylactid (PLA). *Grafik: WZL*

Streckung des Materials (sichere Zone) und eine erhöhte Verdickung des Blechmaterials im Flanschbereich, welcher jedoch größtenteils nicht Teil des Bauteils darstellt. Das Ergebnis wird als ausreichend angesehen, insbesondere da keine Risse und Faltenbildung im eigentlichen Bauteil auftreten.

Auf die Verwendung von Ziehwulsten zur Steuerung des Materialflusses wird bei der untersuchten Beispielgeometrie verzichtet, um die Komplexität des Aufbaus zu reduzieren. Diese könnten beispielsweise durch Stahl-Inlays in die gedruckten Werkzeuge eingelegt werden, um den Verschleiß der Kunststoffwerkzeuge an diesen hochbelasteten Stellen zu minimieren. Die Konstruktion des Werkzeugsatzes bestehend aus Stempel, Matrize und Niederhalter erfolgt unter den Gesichtspunkten einer 3D-druckgerechten Konstruktion. Um den Materialeinsatz zu reduzieren werden sowohl die Außenmaße der Werkzeuge minimiert, als auch weniger stark belastete Bereiche im Inneren der Werkzeuge ausgespart.

Im Anschluss an die Konstruktion des Werkzeugsatzes wurde das wirtschaftliche Potenzial der Werkzeugtechnologie bestimmt. Hierfür werden die Kosten für die Herstellung der Werkzeuge durch additive Fertigung, dem Fräsen von Kunststoff und der konventionellen Fertigung, dem Fräsen von Werkzeugstahl, verglichen. **Bild 2** zeigt eine Übersicht der Herstellkosten von verschiedenen Fertigungsverfahren und Materialien.

Während durch das Fräsen von Kunststoffmaterialien schon eine deutliche Kostenreduktion von bis zu 78 % im Vergleich zur konventionellen Fertigung erreichbar sind, können durch die additive Fertigung mittels Fused Filament Fabrication (FFF) die

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

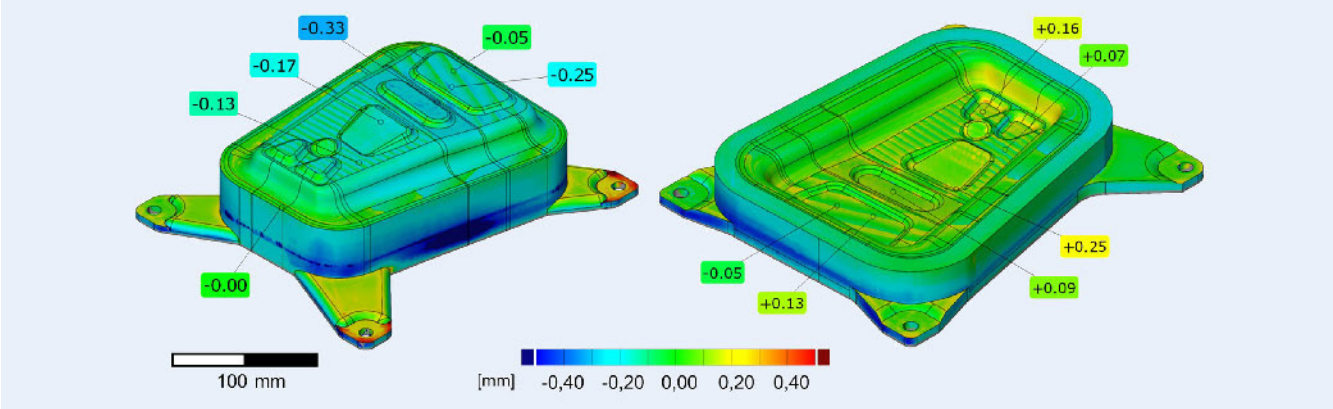


Bild 3. Maßabweichung der additiv gefertigten Werkzeuge Stempel (links) und Matrize (rechts) im Vergleich zum CAD-Modell. Die Abweichungsfähnchen wurden beispielhaft und zur Veranschaulichung an charakteristischen Stellen gesetzt. *Grafik: WZL*

Kosten zusätzlich bis auf 93 % der konventionellen Fertigung reduziert werden. Die hier ermittelten Kosten sind die reinen Werkzeugkosten. Sofern eine Bauteilserie hergestellt werden soll, müssen entsprechend die Werkzeugstandzeiten und Bauteilstückkosten ermittelt werden. Da additiv gefertigte Kunststoffwerkzeuge einen höheren Werkzeugverschleiß aufweisen, ist diese Technologie insbesondere auf sehr kleine Stückzahlen oder den Prototypenbau begrenzt.

Bei der Ermittlung der Herstellkosten für die konventionelle Fertigung und das Fräsen von Kunststoff wurde die 3D-druckgerechte Werkzeuggestaltung durch eine fräsgerechte Geometrie ersetzt, um keine zusätzlichen Kosten beim Fräsen zu erzeugen. Die Kosten der konventionellen Fertigung wurden mit der Simulationssoftware „Autoform“ ermittelt, die auch in der Industrie häufig als Basis für die Angebotserstellung genutzt wird. Dabei wurden die Maschinen- und Materialkosten berücksichtigt. Fertigungsschritte wie etwa das Härten und Polieren (Tryout) der Werkzeugoberfläche, die insbesondere für Serienwerkzeuge eine Rolle spielen, wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Bei der Ermittlung der Herstellkosten für das Fräsen von Kunststoffen wurden jeweils die Angebotspreise von insgesamt fünf verschiedenen Lohnfertigern gemittelt. Diese enthalten sämtliche Kosten zur Herstellung der Werkzeuge wie etwa Personal-, Maschinen, und Materialkosten. Die Herstellungskosten für die additive Fertigung lassen sich durch die Addition der Kosten des verbrauchten Materials und der Druckzeit multipliziert mit einem in der Industrie gängigen Maschinenstundensatz für FFF-Drucker von 2,5 €/h berechnen.

Die Fertigung der Werkzeuge erfolgt mit dem FFF-Drucker „S5“ des Herstellers Ultimaker und dem Material Polylactid (PLA), welches sich bereits in verschiedenen Untersuchungen als geeigneter Werkzeugwerkstoff für die Blechumformung herausgestellt hat [8]. Weitere Druckparameter sind nach *Bergweiler et. al.* für das Material PLA gewählt [9]. Diese enthalten unter anderem ein Infill-Volumen von 80 %, eine Schichthöhe von 0,2 mm und ein Dreiecks-Infillmuster. Die Maßabweichung von Stempel und Matrize im Vergleich zum CAD-Modell sind in **Bild 3** dargestellt.

Die maximalen Maßabweichungen des Stempels liegen in einem Bereich zwischen - 0,33 mm und 0,00 mm sowie für die Matrize zwischen - 0,05 mm und 0,25 mm. Dass die Maßabweichungen im Wesentlichen im negativen Bereich liegen, ist vor allem auf Schrumpfungseffekte während der Abkühlphase des Druckprozesses zurückzuführen. Durch eine weitere Iteration lassen sich die Maßabweichungen reduzieren, indem die gemessenen Abweichungen durch Anpassung der Werkzeuggeometrie kompensiert werden. Zudem ist der sogenannte Treppenstufeneffekt Ursache für die periodischen Abweichungslinien, die vor allem an dem Stempelwerkzeug deutlich zu erkennen sind. Die maximale Abweichung, die von dem Treppenstufeneffekt verursacht werden kann, entspricht der Schichthöhe von 0,2 mm. Durch eine Anpassung der Aufbaurichtung des Druckprozesses lässt sich dieser Effekt reduzieren. Da die Werkzeuge während des Tiefziehens insbesondere Druckkräfte senkrecht zur Niederhalterfläche erfahren, sollte die Aufbaurichtung entsprechend gewählt werden, um verbesserte mechanische Eigenschaften zu erhalten. Insgesamt liegen die Maßabweichungen der gefertigten Werkzeuge für den Prototypenbau in einem tolerierbaren Bereich, sodass die Werkzeuge für die nachfolgenden Versuche verwendet werden können.

3 Ergebnisse der Tiefziehversuche

Für die Tiefziehversuche wird der Werkzeugsatz in ein Säulenführungsgestell einer einfachwirkenden hydraulischen Presse montiert. Das Aufbringen der Niederhalterkraft erfolgt über Druckfedern. Die maximale Niederhalterkraft, die sich aus den Federkräften bestimmen lässt, beträgt 2,9 kN und die Pressenkraft wird auf 16 Tonnen eingestellt. In der Versuchsserie wurden insgesamt sieben Bauteile hergestellt und dann sowohl die Genauigkeit der Blechbauteile als auch der Werkzeugverschleiß mit dem handgeführten optischen Messsystem des Herstellers Nikon „MCAx35+“ mit „ModelMaker H120“ erfasst. Als Blechwerkstoff kommt hier ein elektrolytisch verzinkter Stahl DC04+ZE mit 1 mm Dicke zum Einsatz. **Bild 4** zeigt die Maßabweichung im Flächenvergleich des ersten tiefgezogenen Bauteils mit der CAD-Sollgeometrie sowie die Maßabweichung der markierten Messstellen im Verlauf der Versuchsserie.

Die Ausrichtung erfolgt hierbei an dem äußeren Fügeflansch, da dieser auch im Zusammenbau als Referenz dienen soll. Die maximal gemessene Maßabweichung liegt für das erste tiefgezogene Bauteil bei - 1,45 mm, wobei die Soll-Ziehtiefe an dieser Stelle 19,35 mm beträgt. Im Verlauf der Versuchsserie der sieben Bauteilen nimmt die Maßabweichung nur geringfügig um maximal 0,08 mm an der Messstelle E ab.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

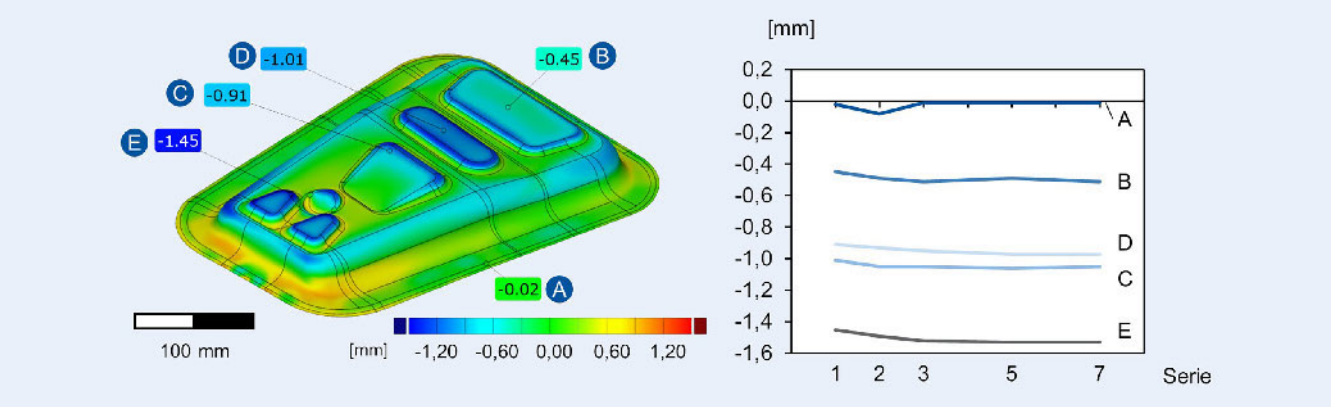


Bild 4. Maßabweichung des ersten tiefgezogenen Blechbauteils im Vergleich zur Sollgeometrie (links) und Verlauf der Maßabweichung der markierten Messstellen über die Versuchsserie an den Bauteilen 1, 2, 3, 5 und 7 (rechts). *Grafik: WZL*

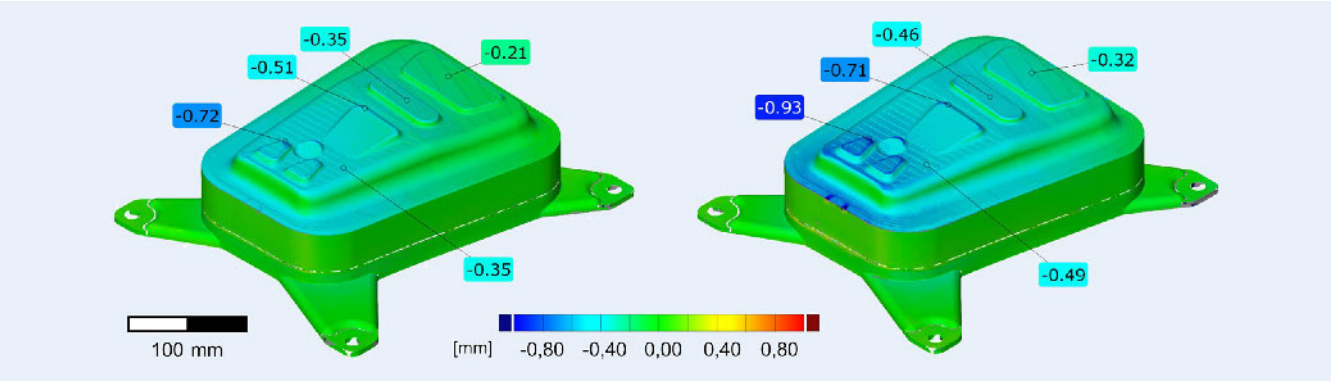


Bild 5. Maßabweichung des Stempels nach der ersten (links) und nach der siebten (rechts) Umformung im Vergleich zur initialen Stempelgeometrie. *Grafik: WZL*

Der Werkzeugverschleiß beziehungsweise die plastische Verformung des Stempels ist im nachfolgenden **Bild 5** dargestellt.

Nach der ersten Umformung weißt das Stempelwerkzeug eine plastische Verformung von maximal - 0,72 mm auf. Nach der siebten Umformung erhöht sich die Verformung an derselben Stelle auf - 0,93 mm. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der größte Anteil der plastischen Verformung bereits nach der ersten Umformung erfolgt und es anschließend zu einer Verringerung des Verschleißes kommt. Die Auswertung der Messungen der Matrize zeigt einen deutlich geringeren Verschleiß im Vergleich zum Stempelwerkzeug. Im Wesentlichen liegen die gemessenen Werte im Bereich der Messungenauigkeiten des Messsystems. Die maximal gemessene Maßabweichung im Vergleich zur initialen Matrizengeometrie beträgt - 0,16 mm. Als ein Grund für den geringeren Verschleiß an der Matrize im Vergleich zum Stempel kann die deutlich niedrigere Werkzeughöhe der Matrize gesehen werden. Die absolute plastische Verformung fällt somit an dieser Stelle geringer aus. Insgesamt konnte eine Bauteilserie von sieben Stück ohne Werkzeugversagen hergestellt werden. Der gemessene Verschleiß an den Werkzeugen, der im Wesentlichen auf die plastische Verformung der Werkzeuge zurückzuführen ist, machen diese Werkzeugtechnologie nur für einen begrenzten Stückzahlbereich wie etwa dem Prototypenbau interessant. Für höhere Stückzahlen können konventionelle Stahl- oder auch Kunststoffwerkzeuge, die einen deutlich geringeren Werkzeugverschleiß aufweisen, eingesetzt werden [10].

4 Integration der Werkzeugtechnologie in eine flexible Prozesskette

Neben der Kleinserienfertigung sind auch bei der Fertigung von Funktions- oder Technikprototypen in der Regel seriennahe Eigenschaften des Endprodukts erforderlich. Vor allem werden beim Tiefziehprozess die Bauteileigenschaften maßgeblich durch den Prozess, etwa durch die Kaltverfestigung während der Umformung, beeinflusst. Aus diesem Grund kann für die Produkt- und Prozessvalidierung auch in einer frühen Entwicklungsphase die Herstellung mit dem Fertigungsverfahren der Serienproduktion notwendig sein. Alternative Technologien zur Herstellung von Blechbauteilen wie etwa die inkrementelle Blechumformung oder die direkte additive Fertigung sind in dieser Hinsicht nachteilig.

Durch die additive Fertigung der Tiefziehwerkzeuge lassen sich nun auch bei kleinen Stückzahlen der Tiefziehprozess kostengünstig abbilden und Blechbauteile mit seriennahen Eigenschaften herstellen. Um die gesamte Fertigungsprozesskette flexibel und kostengünstig abbilden zu können, ist die Integration von werkzeugungebundenen Fertigungsverfahren, wie etwa das Laserschneiden, sinnvoll. **Bild 6** zeigt eine flexible Prozesskette zur Herstellung von Tiefziehbauteilen.

Im Anschluss an die Werkzeugauslegung kann in einem parallelen Schritt sowohl die Blechplatine durch 2D-Laserschneiden zugeschnitten, als auch der Druckprozess zur Werkzeugherstellung gestartet werden. Nachfolgend kann der eigentliche Tiefziehprozess mit den additiv gefertigten Kunststoffwerkzeugen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

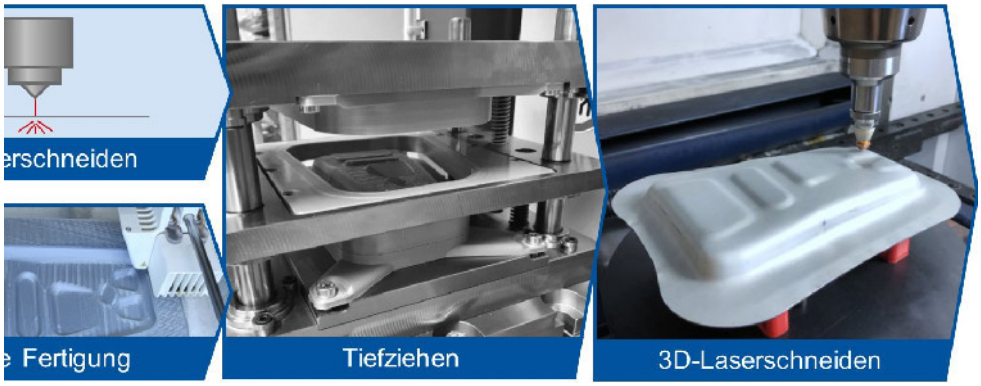


Bild 6. Flexible Prozesskette zur Herstellung von tiefgezogenen Blechbauteilen. *Grafik: WZL*

durchgeführt werden. Ist ein Zuschneiden der tiefgezogenen Blechbauteile nötig, kann in einem letzten Schritt die Endkontur durch das 3D-Laserschneiden hergestellt werden. Die hierfür benötigte Vorrichtungstechnik kann ebenfalls durch die additive Fertigung hergestellt werden, um Zeit und Kosten zu sparen [11]. Durch diese Vorgehensweise lassen sich auch bei sehr kleinen Stückzahlen vollfunktionsfähige Tiefziehbauteile kosteneffizient herstellen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der Versuche haben gezeigt, dass der Einsatz von additiv gefertigten Polymerwerkzeugen für das Tiefziehen von Feinblech möglich ist. Auch nach sieben Umformung lag die maximale Maßabweichung des Werkzeugsatzes bei - 0,93 mm. Die Fertigungstoleranzen des ersten tiefgezogenen Blechbauteils lag dabei zwischen - 1,45 mm und 0,78 mm.

Durch die Integration der vorgestellten Werkzeugtechnologie in eine flexible Prozesskette mit werkzeugungebundenen Fertigungsverfahren lassen sich individuelle und vollfunktionsfähige Tiefziehteile vor allem in sehr kleinen Stückzahlen wirtschaftlich herstellen. Insgesamt konnte eine Einsparung der Werkzeugkosten im Vergleich zur konventionellen Fertigung von 93 % erzielt werden.

Der Schwerpunkt weiterer Forschungsarbeiten liegt in der Vorhersage und Optimierung der Fertigungstoleranzen, um die Werkzeugtechnologie auch bei hohen Toleranzanforderungen anwenden zu können. Ein wesentlicher Stellhebel ist hierfür die Vorhersage und Kompensation der elasto-plastischen Werkzeugverformung. Der erhöhte Werkzeugverschleiß im Vergleich zu konventionellen Verfahren begrenzt den Einsatz der vorgestellten Werkzeugtechnologie auf sehr kleine Stückzahlen oder den Prototypenbau. Inwiefern sich additiv gefertigte Kunststoffwerkzeuge für großformatiges Tiefziehen eignen, sollte ebenfalls in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

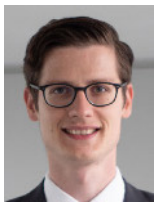
DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) für die Förderung des Projekts „CONVertER for Trucks“ (ConverT) – Förderkennzeichen 16EM4009–2 und der Anlauffabrik der RWTH Aachen University für die Nutzung der Infrastruktur.

Literatur

[1] Kolbe, J.: Thermisch beschichtete, faserverstärkte Polymerwerkzeuge für die Umformung höherfester Blechwerkstoffe. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2012
[2] Deiler, G.: Untersuchungen zum Eignungsprofil polymerer Werkzeugwerkstoffe für das Tiefziehen von Feinblechen. Dissertation, Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, 2005
[3] Nakamura, N.; Mori, K.-I.; Abe, F. et al.: Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer. Procedia Manufacturing 15 (2018), pp. 737–742
[4] Cheah, C. M.; Chua, C.-K.: Rapid Sheet Metal Manufacturing. Part 2: Direct Rapid Tooling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19 (2002) 7, pp. 510–515
[5] Schuh, G.; Bergweiler, G.; Fiedler, F. et al.: Small Series Production and Geometric Analysis of Sheet Metal Car Body Parts Using Forming Tools Made of Fused Filament Fabricated PLA. Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, 2020, pp. 156–160
[6] Frohn-Sörensen, P.; Geueke, M.; Tuli, T. B. et al.: 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 115 (2021), 7–8, pp. 2623–2637
[7] Bergweiler, G.; Fiedler, F.; Shaukat, A. et al.: Experimental Investigation of Dimensional Precision of Deep Drawn Cups Using Direct Polymer Additive Tooling. Journal of Manufacturing and Materials Processing 5 (2021) 1, p. 3
[8] Nakamura, N.; Mori, K.-I.; Abe, Y.: Applicability of plastic tools additively manufactured by fused deposition modelling for sheet metal forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108 (2020), 4, pp. 975–985
[9] Schuh, G.; Bergweiler, G.; Bickendorf, P. et al.: Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools. Procedia CIRP 93 (2020), pp. 20–25
[10] Frank, C.: Kunststoff als Werkzeugwerkstoff für das Tiefziehen von Feinblechen. Dissertation, Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, 1999
[11] Bergweiler, G.; Heinze, F.; Lichtenthäler, K. et al.: Ressourceneinsparung durch additiv gefertigte Umformwerkzeuge und Schweißvorrichtungen. ATZproduktion 7 (2020), 1, S. 44–47

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND



Bernd Löffler, M.Sc.
Foto: WZL

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. **Günther Schuh**

Dr.-Ing. **Georg Bergweiler**

Falko Fiedler, M.Sc.

Nikolaus Lackner, M.Sc.

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
Tel. +49 175 6425208
b.loeffler@wzl.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de
www.anlauffabrik-aachen.de

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-11-12-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND