

Generativ gefertigte Werkzeuge mit Mehrwert für die Blechumformung

Müller, B.^{a)}; Hund, R.^{b)}; Malek, R.^{c)}; Kotzian, M.^{c)}; Gebauer, M.^{a)}; Polster, S.^{a)}; Neugebauer, R.^{a)}

- a) Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Deutschland
- b) BRAUN CarTec GmbH, Deutschland
- c) Volkswagen AG, Deutschland

Abstract

Mit dem Aufkommen des Laserstrahlschmelzens erfuhr die generative Fertigung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen einen neuen Schub. Dank dieser Technologie ist man in der Lage, vollständig dichte Bauteile und Werkzeugeinsätze aus hochlegiertem Standard-Werkzeugstahl herzustellen. Die Werkzeugfertigung für den Kunststoffspritzguss und den Aluminiumdruckguss zog als erste ihre Vorteile aus dieser Technologie und der damit verbundenen Möglichkeit der Nutzung einer konturnahen Werkzeugkühlung. Die Fertigung von Umformwerkzeugen als eine weitere mögliche Anwendung der generativen Fertigung wurde allerdings bisher kaum betrachtet.

Das Potenzial der generativen Fertigung zur Schaffung von Mehrwerten in Umformwerkzeugen wurde nun anhand der Blechwarmumformung untersucht. Der Beitrag präsentiert Ergebnisse eines Forschungsprojektes zur Anwendung des Laserstrahlschmelzverfahrens in der Fertigung von Werkzeugen für die Blechwarmumformtechnologie Presshärten. Die Fallstudie beschreibt die Defizite heute üblicher Kühlsysteme in Presshärtwerkzeugen und den daraus resultierenden unzureichenden Kühleffekt in kritischen Bauteilbereichen. Der Beitrag zeigt, wie ein innovatives Kühlsystem im Umformwerkzeug mittels laserstrahlgeschmolzener Werkzeugeinsätze implementiert wurde. Dabei wurde die konventionell gebohrte Kühlung in bestimmten Werkzeugbereichen durch speziell konstruierte, konturnah und -konforme Kühlkanäle ersetzt mit dem Ziel der Verkürzung der Zykluszeiten, verbesserter mechanischer Eigenschaften der pressgehärteten Blechteile und einer

Energieeinsparung sowohl bei der Werkzeugtemperierung als auch im Pressenbetrieb. Der Beitrag präsentiert die erreichten Ergebnisse.

1 Einleitung

Die Wirtschaftlichkeit von Leichtbaulösungen ist hinsichtlich des Ressourceneinsatzes von zentraler Bedeutung. Im Hinblick auf Ressourcenschonung ist die Einsparung von Material der wohl wichtigste Faktor. Momentan geschieht die Fertigung von Karosseriebauteilen in hoch automatisierten Presswerken durch mehrstufige Kaltumformung. Der Einsatz hochfester Stähle eröffnet enormes Leichtbaupotenzial.

Für die Erzeugung hochfester Stähle in der Karosseriefertigung wird das Presshärten angewandt. Dabei werden die Bauteile in separaten Pressenstraßen auf oberhalb der Rekristallisationstemperatur (über 950°C) erwärmt und während des Umformens rapide auf unter 200°C abgekühlt, wodurch ein martensitisches Gefüge entsteht [2]. Dieses Verfahren ist besonders vorteilhaft, wenn unterschiedliche Ansprüche an ein Bauteil gestellt werden, wenn beispielsweise in einem Bereich größere Festigkeit und Härte und in einem anderem Bereich statt dessen eine höhere Dehnung erforderlich ist [3]. Ein weiterer positiver Effekt dieses Verfahrens ist es, mit geringerem Materialeinsatz, und folglich verringertem Bauteilgewicht, die gleiche bzw. sogar eine höhere Festigkeit von Formblechteilen zu erzielen, als dies mit konventioneller Kaltumformung zu erreichen wäre. Bisher ist für Umformwerkzeuge eine gezielte Temperierung einzelner Bereiche konform zur Werkzeugkontur nur sehr aufwändig und mit Einschränkungen realisierbar. Das Resultat daraus ist ein zu hoher Energieeinsatz für die Temperiermedien (Kühlen/Heizen), um die entsprechenden Bedingungen im Werkzeug zu schaffen, bei gleichzeitig mangelhafter Solltemperaturerreichung und Wärmeabfuhr in den kritischen Bereichen.

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“, in der 60 Unternehmen und Forschungseinrichtungen gemeinsam zur Steigerung der Ressourceneffizienz entlang der gesamten Karosserie-Fertigungskette forschen, wird untersucht, wie der Prozess der Blechwarmumformung, das sogenannte Presshärten, durch eine innovative Werkzeugtemperierung mittels laserstrahlgeschmolzener Werkzeugaktivkomponenten ressourceneffizienter gestaltet werden kann. Dabei sollen einzelne Werkzeugbereiche durch Anordnung von Kühlkanälen sehr dicht unterhalb der Werkzeugkontur gezielt temperiert werden. Ziele der Forschungsarbeiten sind die

Verkürzung der Zykluszeiten, die weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der pressgehärteten Blechteile für deren weitere Wandstärkenreduzierung sowie die Reduzierung des Energieeinsatzes je Bauteil. Die Projektpartner haben nach Untersuchung der Serienfertigung im Automobil-Presswerk unter Einbeziehung bestehender Probleme gemeinsam einen repräsentativen Demonstrator entwickelt. Um eine einfache Übertragung der Projektergebnisse in die Serienfertigung zu ermöglichen, wurde das Versuchsbauteil entsprechend an ein Serienbauteil angelehnt. Das Design spiegelt ein typisches Presshärdbauteil und dessen Problemstellungen wieder.

2 Stand der Technik

Die Zykluszeit im Presshärtprozess wird meist zu über 30 % durch die Bauteilabkühlung (Haltezeit der geschlossenen Form nach der Umformung vor der erneuten Öffnung zur Bauteilentnahme) bestimmt. (siehe Bild 1)

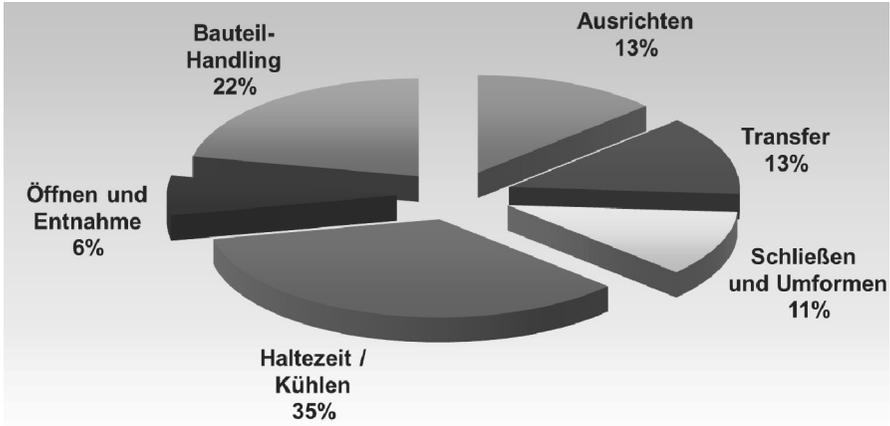


Bild 1: exemplarische Darstellung der Zykluszeit im Presshärten

Es wurde angenommen, dass durch eine mit Laserstrahlschmelzen gefertigte, optimierte Werkzeugkühlung die Zykluszeit der Warmumformung erheblich reduziert werden kann. Weiterhin wurde angenommen, dass durch eine Steigerung der Abkühlgeschwindigkeit eine Verbesserung der Bauteilfestigkeit erreicht werden

kann. Aufgrund der verbesserten mechanischen Eigenschaften würde zudem eine Verringerung der Bauteilwandstärke möglich. Dies resultiert in einem geringeren Rohstoffbedarf und damit in einer Reduzierung der eingesetzten Ressourcen. Durch die reduzierte Zykluszeit, den geringeren Energiebedarf und die mögliche Material-Einsparungen werden Energieeinsparungen von bis zu 10 Prozent je Bauteil erwartet.

Der Aufbau eines Warmumformwerkzeuges (siehe Bild 2) ist komplexer als der eines konventionellen. Dies ist begründet darin, dass in Stempel und Matrize Kühlkanäle eingearbeitet werden müssen. Das Einbringen der Kanäle erfolgt meist durch Tieflochbohren oder eine Segmentierung der Werkzeuge. Aufgrund der komplexen Geometrien der Werkzeuge stellt die Ausführung des Kühlsystems besondere Ansprüche an den Werkzeughersteller. Die zusätzliche Komplexität der Kühlbohrungen erhöht die Kosten für die Warmumformwerkzeuge. Aktuell wird der Fertigungsaufwand mit ca. 1 Stunde pro Meter Bohrloch und einem hohen Verbrauch von Ressourcen (Energie, Bohren Öl, Druckluft, etc.) angesetzt. Die meist abgewinkelten Kühlbohrungen erfordern auch zusätzliche Vorbereitung wie Spiegeln und/oder das Erzeugung einer Pilotbohrung. Daher ist der Aufwand für die Arbeitsvorbereitung, wie das Erstellen von CAM-Werkzeugwegen und Bohrprogrammen sowie die Definition des Arbeitsablaufes (z.B. Umspannen) signifikant.

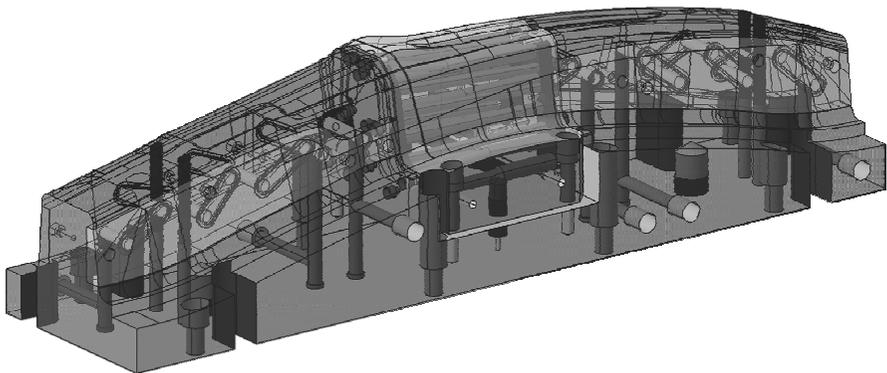


Bild 2: Presshärte-Werkzeug

Ein Weg, um den Fertigungsaufwand zu reduzieren und gleichzeitig die Freiheit in der Gestaltung von Kühlsystemen zu erhöhen, ist die Anwendung generativer Fertigungsverfahren im Werkzeugbau.

So genannte Rapid-Tooling-Anwendungen entstanden sehr bald nach der Einführung der ersten schichtbasierten Rapid-Prototyping-Technologien wie Stereolithographie oder Laminated Object Manufacturing (LOM). Da zu diesem Zeitpunkt keine metallischen oder anderen hochbelastbaren Werkstoffe direkt in einem generativen Verfahren verarbeitet werden konnten, führte die Nachfrage nach Prototypen aus Metall bzw. direkt dem Serienwerkstoff dazu, nichtmetallische generativ gefertigte Objekte als Werkzeuge wie beispielsweise Formen und Modelle für den Sand- und Feinguss [4] sowie Prototypen- und Vorserienformen für verschiedene Abformverfahren einzusetzen, um auf diesem indirekten Weg zu Teilen aus Metall bzw. dem jeweiligen Serienwerkstoff zu gelangen [5]. Direktes Rapid Tooling war auf sehr geringe Fertigungsmengen beschränkt, für größere Mengen waren nur indirekte Prozesse wie Keltool anwendbar [6]. Erste Forschungen wurden damals bereits für umformtechnische Anwendungen generativ gefertigter Werkzeuge durchgeführt [7].

Mit der Entwicklung des Lasersinter-Verfahrens (SLS) und besonders der Variante des Metall-Laser-Sinterns (DMLS) wurde dann erstmals die direkte generative Herstellung metallischer Werkzeuge möglich. Einschränkungen dieser Technologie fanden sich im erforderlichen zweiten Verfahrensschritt des Fertig-Sintern mit erheblichen Schrumpfungsraten oder alternativ in der Infiltration mit einer niedrig schmelzenden Bronze-Legierung. Dieser infiltrierte Werkstoff überstand teilweise die Fertigung kompletter Vor- oder Kleinserien bis zu einigen Tausend Abformungen in der Kunststoffverarbeitung, wie z. B. Spritzguss [8]. Die Werkstoffeigenschaften waren jedoch noch weit von denen der Standard-Werkzeug-Werkstoffe wie Warmarbeitsstahl entfernt.

Dies hat sich mit der Entwicklung der Laserstrahlschmelztechnologie geändert. Standard-Formenbau-Werkstoffe wie 1.2709 oder 1.2344 sind jetzt generativ verarbeitbar, wobei diese vollständig zu einem nahezu 100% dichten Gefüge aufgeschmolzen werden. So ist es möglich geworden, mittels Laserstrahlschmelzen vollwertige Serienwerkzeuge für die Serienproduktion herzustellen – ohne Standzeiteinschränkungen gegenüber konventionellen Werkzeugbautechnologien wie Fräsen oder Erodieren.

Generative Fertigung erlaubt die Überwindung der Grenzen heute üblicher Fertigungstechnik und eröffnet neue Möglichkeiten für die Kühlung von Umformwerkzeugen. Bauteile und Werkzeuge können direkt auf Basis von 3D-CAD-Daten aus pulverförmigen Materialien wie Warmarbeitsstahl hergestellt und schichtweise aufgebaut werden. Beim generativen Fertigungsverfahren Laserstrahlschmelzen bildet Metallpulver das Ausgangsmaterial, aus dem eine definiert konturierte

Schicht gebildet wird. Das Pulver wird Schicht für Schicht mit einem Laser selektiv aufgeschmolzen und erstarrt nach dem Abkühlen zu einem festen Körper (siehe Bild 3). Das Bauteil entsteht demgemäß durch das schichtweise Aufbringen von Material („Generierung“) und nicht durch Abtragen. Durch das Laserstrahlschmelzen ist eine konturkonforme Werkzeugkühlung zum Teil bereits Stand der Technik im Formenbau, wenn es um Spritzgießen oder Druckguss geht. In der Blechumformung ist die Werkzeugbelastung besonders hinsichtlich Druck und Zug deutlich höher und stellt somit eine neue Herausforderung für laserstrahlgeschmolzene Werkzeuge dar.

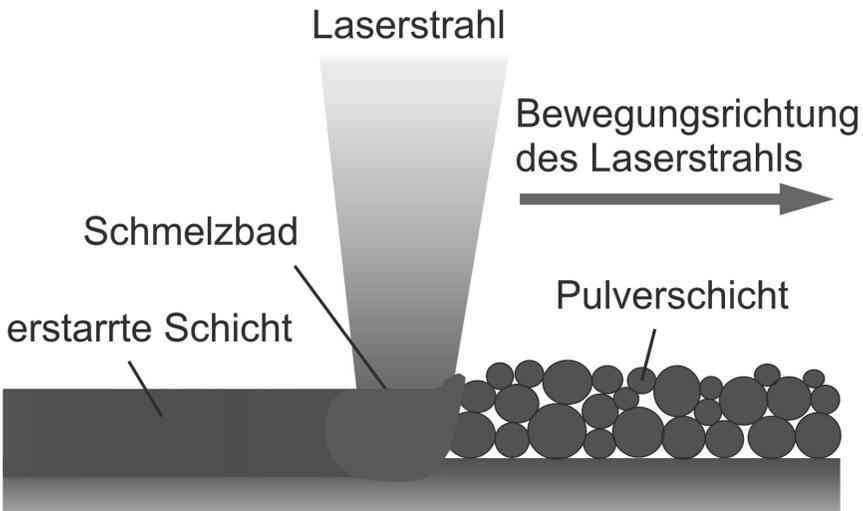


Bild 3: Prinzipdarstellung Laserstrahlschmelzen

3 Das Projekt

Das Ziel des vorgestellten Innovationsallianz-Projektes war die Entwicklung und Fertigung von Werkzeugeinsätzen mit einem optimierten Kühlsystem unter Nutzung thermo-fluidischer Simulation und der Laserstrahlschmelztechnologie, um die Ressourceneffizienz in der Blechwarmumformung zu verbessern.

Nach Untersuchung der Serienfertigung im Automobil-Presswerk wurde unter Einbeziehung bestehender Probleme gemeinsam mit den Projektpartnern ein

repräsentatives Demonstrator-Bauteil (siehe Bild 4) entwickelt. Das Design spiegelt ein typisches Presshärtbauteil und dessen Problemstellungen wieder. Es weist geometrische Besonderheiten wie geschwungene Flächen und Vertiefungen auf, die verdeutlichen, wo bisher die Grenzen der konventionell tieflochgebohrten Kühlkanäle im Hinblick auf eine gleichmäßige und schnelle Bauteilkühlung liegen.

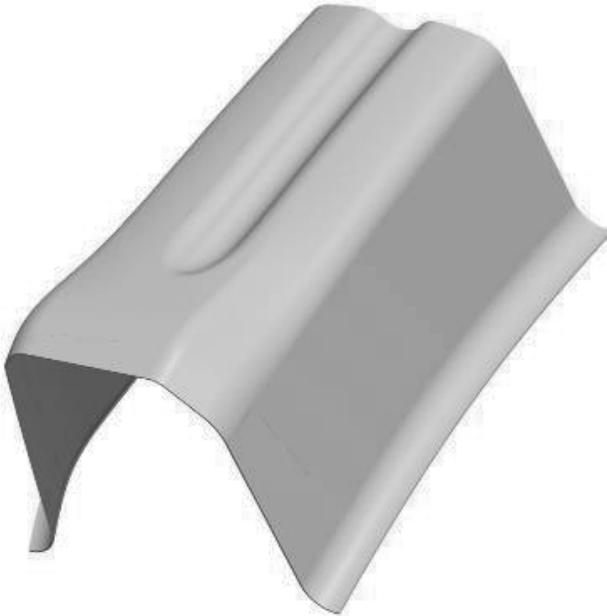


Bild 4: Demonstratorbauteil

Die Werkzeugkonstruktion sowie die Gestaltung der Kühlgeometrie erfolgten unter dem Gesichtspunkt der Werkzeugfertigung mittels konventioneller Verfahren wie Fräsen und Tieflochbohren. Parallel dazu begann im Projekt die Gestaltung der innovativen, konturnahen Werkzeugkühlung. Verschiedene Varianten der Werkzeugkühlung wurden hierfür entwickelt und mittels numerischer Simulation miteinander verglichen (siehe Bild 5).

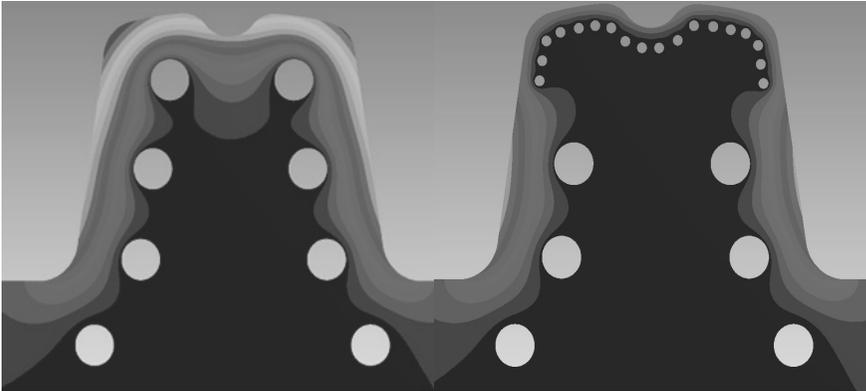


Bild 5: Thermische Simulation: Vergleich der konventionellen gebohrten Kühlkanäle (Maximaltemperatur im Werkzeug 191°C, links) und optimierte Kühlkanäle mit deutlich geringerer Temperaturbelastung (81°C, rechts)

Hierbei wurde besonders das thermische Verhalten der Kühlsysteme analysiert. Die Eingabegrößen wie Presskraft, Werkstücktemperatur, Temperatur des Kühlmediums, Volumenstrom bzw. Pumpleistung, die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe sowie die Oberflächenrauheit der Kühlkanäle wurden von der in der Serienfertigung eingesetzten Anlagentechnik übernommen. Anhand der Ergebnisse und unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Besonderheiten des Laserstrahlschmelzens konnte die optimale Kühlkanalgeometrie für die Werkzeugfertigung abgeleitet werden (siehe Bild 6).

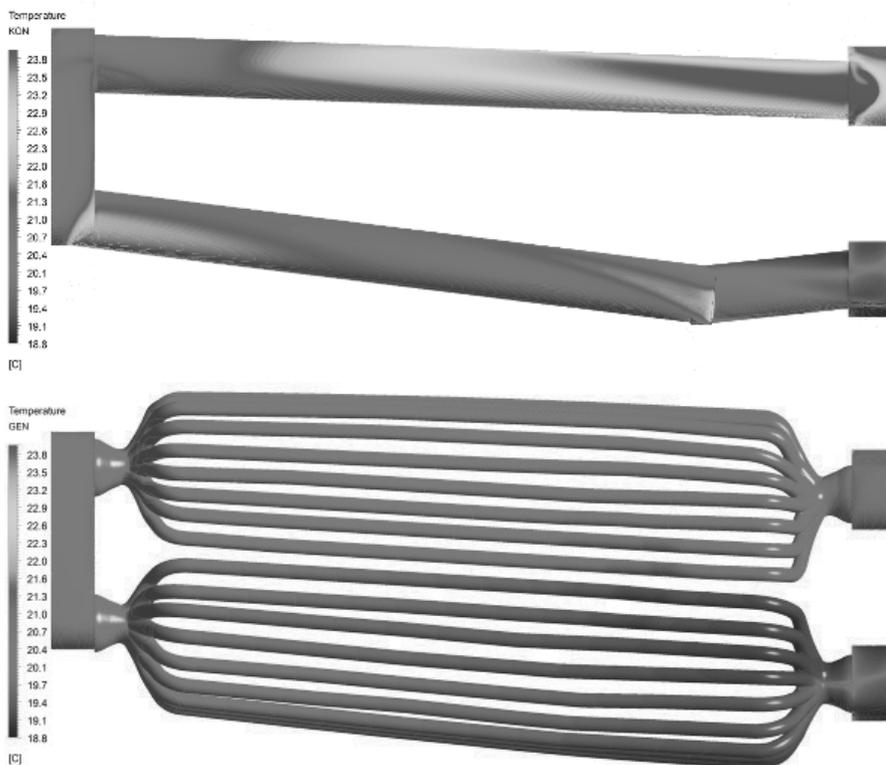


Bild 6: Vergleich des Temperaturgradienten im herkömmlichen Kühlsystem (oben) und im optimierten Kühlsystem (unten)

Die thermo-fluidische Simulation zeigte die ungleichmäßige Temperaturverteilung im Bauteil (siehe Bild 7) aufgrund der inhomogenen Abkühlung im konventionell gefertigtem Werkzeug und verdeutlicht so die Grenzen konventioneller Fertigungsverfahren, wenn es darum geht, die Kühlkanäle sehr nah und konform zur Oberfläche anzuordnen. Mit Hilfe der Simulationen konnte die Effizienz der neu entwickelten Kühlung ständig verbessert werden und führte im Ergebnis zu einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb des Blechteils (siehe Bild 7). Durch die optimierte Kühlung ist es möglich, die Blechteile schneller und auch gleichmäßiger abzukühlen. Laut Simulation ist eine Verkürzung der Haltezeit um ca. 40% von anfänglich über 10 auf ca. 6 Sekunden möglich.

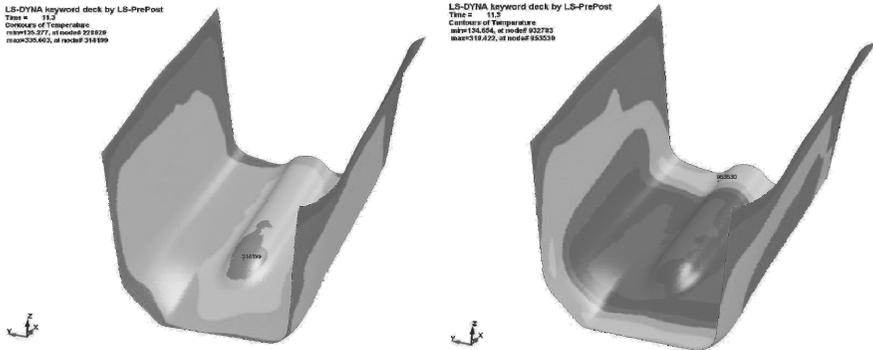


Bild 7: Vergleich der Temperaturverteilung in der Blechkomponente mit herkömmlichem Kühlsystem (Bauteiltemperatur im kritischen Bereich 335°C, links) und mit optimiertem Kühlsystem (135°C, rechts)

Der kritische Bauteilbereich mit unzureichender Kühlung befindet sich am tiefsten Punkt der Werkzeugkavität, wo aufgrund der Einschränkungen des Tieflochbohrers die Kühlkanäle den größten Abstand zur Oberfläche haben. Aufgrund dessen war eine komplette Neukonstruktion des gesamten Kühlsystems nicht notwendig. Der Grundkörper der Werkzeugeinsätze wurde unverändert belassen und die Umgestaltung der Kühlung fokussierte sich nur auf die kritischen Bereiche rund um die tiefste Kavität. Deshalb und um die beste Synthese von größtem Wert, kurzen Fertigungszeiten und geringen Kosten zu erreichen, wurde beschlossen, die Werkzeugeinsätze in der sogenannten Hybridbauweise zu fertigen. Bei der Hybridbauweise handelt es sich um eine Kombination aus einem herkömmlich durch spanende Bearbeitung gefertigtem Grundkörper und einer generativ aufgebauten Funktionsgeometrie.

In diesem Projekt wurde der Bereich mit optimierter Werkzeugkühlung (Funktionsbereich) mittel Laserstrahlschmelzen auf einem herkömmlich gefrästen Grundkörper (siehe Bild 8) aufgebaut. Hierfür wurde der Grundkörper mit einer entsprechenden Bearbeitungszugabe vorbereitet und einer Wärmebehandlung unterzogen. Um die bestmögliche Verbindung zwischen Grundkörper und generativem Aufbau zu gewährleisten, wurde die Trennfläche geschliffen und anschließend sandgestrahlt. Der Werkzeuggrundkörper wurde anschließend in der Laserstrahlschmelzanlage ausgerichtet und fixiert. Nachdem die Funktionsgeometrie generiert wurde (siehe Bild 8), erfolgte erneut eine Wärmebehandlung um die notwendigen mechanischen Eigenschaften des Aufbaus einzustellen und mögliche Eigenspannungen abzubauen.

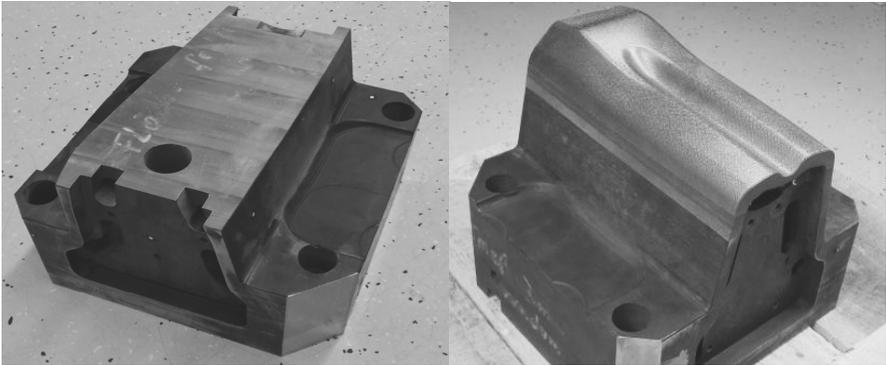


Bild 8: Werkzeugeinsatz (Matrize) - gefräster Grundkörper vor (links) und nach (rechts) dem generativen Aufbau des Konturbereichs mit optimierter Kühlung

Um die Ergebnisse der Simulationen zu bestätigen, wurden umfangreiche Umformversuche auf einer Standard-Warmumformpresse unter produktionsnahen Bedingungen durchgeführt. Die Fertigungs- und Maschinenparameter wurden dabei, ausgehend von Standardwerten aus der Serienfertigung, kontinuierlich angepasst und optimiert. Mit Hilfe neuester Messtechnik wie Temperatursensoren, Thermografie und computergestützter Analyse wurden alle relevanten Daten der Versuche aufgezeichnet und anschließend analysiert.

In einer ersten Versuchsreihe wurde das Werkzeug auf eine Ausgangstemperatur von 200°C erwärmt und im Anschluss, nach Zuschalten der Kühlung, der Temperaturverlauf (die Rückkühlung) mittels Thermosensoren und Wärmebildkamera festgehalten. Hierbei kühlte der generativ gefertigte Werkzeugeinsatz mit optimiertem Kühlsystem 6-mal schneller ab als der Werkzeugeinsatz mit konventionell gebohrten Kühlkanälen (siehe Bild 9). In weiteren Versuchen wurden verschiedene Haltezeiten mit variierendem Kühlwasserdurchsatz gefahren. Zur Dokumentation wurden wiederum Thermosensoren im Werkzeug eingesetzt und zusätzlich die Temperatur jedes einzelnen Bauteils mittels Thermografie festgehalten. Im Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass unter Nutzung der optimierten, generativ gefertigten Werkzeugeinsätze die Haltezeit (Kühlzeit) um 50% reduziert werden kann. Beim betrachteten Bauteil entspricht dies einer Gesamtzykluszeitreduzierung von 20%.

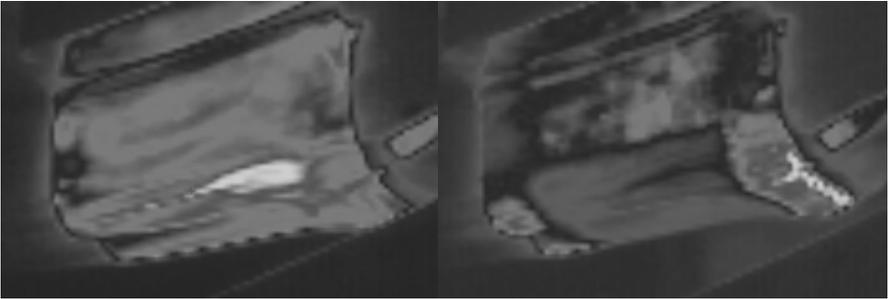


Bild 9: Thermografieaufnahme der Matrize, 5 Sekunden nach Zuschalten der Kühlung mit konventioneller Kühlung (Temperatur im Konturbereich des Werkzeugs 142°C, links) und mit generativ gefertigter Kühlung (68°C, rechts)

4 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie beschreibt, wie ein Warmumformwerkzeug mit Hilfe des generativen Fertigungsverfahrens Laserstrahlschmelzen ressourceneffizienter gestaltet werden kann. Sie gibt einen detaillierten Einblick in die Optimierung des Kühlsystems eines Werkzeuges für die Blechwarmumformung. Im beschriebenen Forschungsprojekt konnte nachgewiesen werden, dass das Laserstrahlschmelzen eine geeignete Technologie zur Herstellung von hochkomplexen Formen und Werkzeugen ist, die über die Grenzen der herkömmlichen Fertigungstechnologien hinausgehen. Die einzigartige Laserstrahlschmelztechnologie eröffnet Möglichkeiten für neue Design-Ansätze von Kühlsystemen in Umformwerkzeugen. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit in der Blechwarmumformung und stellt die Vorteile des Laserstrahlschmelzens bei der Fertigung dieser Werkzeuge heraus. Es konnte eine enorme Verbesserung der Temperaturverteilung sowohl innerhalb des Werkzeugs als auch im Blechbauteil erreicht werden. Aufgrund des Laserstrahlschmelzens können die Prozesszykluszeiten in der Blechwarmumformung erheblich reduziert werden und es ist daher möglich, die Ressourceneffizienz des gesamten Prozesses zu erhöhen sowie die Menge der Energie, die zur Herstellung jedes Teil erforderlich ist, signifikant zu reduzieren.

Literaturangaben

- [1] Neugebauer, R.; Müller, B.; Wagner, A.: *Direct Rapid Tooling for Die Forging – a new challenge for Layer-Based Technologies*. In: *Bártolo, P.J. et al.: Innovative developments in design and manufacturing – Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Taylor & Francis, Oxford (UK), 2010
- [2] Engel, B.: *Hochfeste Stähle*, IBU Vortragsreihe; Universität Siegen, URL: http://www.uni-siegen.de/fb11/fw/lehrstuhl/publikationen/pdf/ibu_hochfest.pdf, 2008
- [3] Beck, M.: *Mehr als erwärmen und umformen*, <http://www.industrieforum.net/de/blechonlinede/oktober062008/rubrik/umformen/mehr-als-erwaermen-und-umformen>, 2008
- [4] Mueller, B. & Kochan, D.: *Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry*. *Computers in Industry* 39/1 (4), 1999, S. 47-53
- [5] Chua, C. K., Hong, K. H. & Ho, S. L.: *Rapid Tooling Technology Part 2 A Case Study Using Arc Spray Metal Tooling*. *Advanced Manufacturing Technology* 15 (8), 1999, S. 609-614
- [6] Jetley, S. & Low, D. K.: *A Rapid Tooling Technique Using a Low Melting Point Metal Alloy for Plastic Injection Molding*. *Journal of Industrial Technology* 22 (3), 2006, S. 2-8
- [7] Voelkner, W.: *Untersuchung der Möglichkeit des Einsatzes der Stereolithographie zum Bau von Blechumformwerkzeugen*. DFG-Abschlussbericht. Dresden: Institut für Produktionstechnik der TU Dresden, 1997
- [8] Ferreira, J. C.: *Rapid tooling of die DMLS inserts for shoot-squeeze moulding (DISA) system*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, S. 155-156, S. 1111-1117

