

RAPID.TECH **FABCON 3.D**

International Trade Show + Conference for Additive Manufacturing

PROCEEDINGS OF THE 15TH RAPID.TECH CONFERENCE ERFURT, GERMANY, 5–7 JUNE 2018

Herausgeber

Michael Kynast

Michael Eichmann

Prof. Dr. Gerd Witt

www.rapidtech-fabcon.com

HANSER

M. Kynast, M. Eichmann , G. Witt (Hrsg.)

**Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show &
Conference for Additive Manufacturing**

Michael Kynast
Michael Eichmann
Gerd Witt (Hrsg.)

Rapid.Tech + FabCon 3.D

International Trade Show &
Conference for Additive Manufacturing

Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference
Erfurt, Germany, 5 – 7 June 2018

HANSER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Print-ISBN 978-3-446-45811-6

E-Book-ISBN 978-3-446-45812-3

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2018 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Druck und Bindung: Books on Demand, Norderstedt

Printed in Germany

Table of Contents

The proceedings contain scientific articles (S) and user's articles (U).
 Scientific articles had to pass a scientific quality assurance (double-blind review of abstract and paper) by the review committee.

Greeting	7
Advisory Council & Review Committee	8

Part 1: Forum Tool, Mould & Fixture Making

Hybride Prozesse – Potenziale der Integration einer subtraktiven Bearbeitungseinheit bei der lichtbogenbasierten additiven Fertigung mit dem 3DMP®-Prozess Hybrid Processes - potential of integrating a subtractive machining unit in the arc-based additive manufacturing with the 3DMP® process <u>Georg Fischer</u> , Felix Kroll, Martin Lange, Tobias Röhrich	U 13
Additive Fertigung von temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen- und Diffusionsschweißtechnik Additive Manufacturing of tempered large tools with wire arc and diffusion welding technology Jörg Hildebrand	U 29
Direct Polymer Additive Tooling – Verwendung von Polymerwerkzeugen für den Einsatz im Kleinserien Spritzguss Direct Polymer Additive Tooling – Use of polymer tools for small series injection moulding Achim Kampker, Johannes Triebs, Sebastian Kawollek, <u>Peter Ayvaz</u> ...	U 45

Part 2: Forum Design

Einfluss des Topologieoptimierungsaufbaus und -ziels für eine maximale Materialausnutzung zur Weiterentwicklung eines Luftfahrtbauteils Impact of optimization target definition for maximizing the utilization of weight reduction to enhance an aircraft bracket <u>Michael Süß</u> , Robert Richter, Dirk Hofmann, Christine Schöne, Ralph Stelzer	S 65
---	--

Part 4: Users Conference

3D-Druck und Großserienproduktion - Überwindung eines Widerspruchs	U
3D-Printing and Mass Production – Overcoming a Contradiction	
Srdan Vasic.....	173

Part 5: Forum AM Science

Prozessüberwachung des Laserstrahlschmelzens mittels aktiver Thermografie: eine ex-situ sowie in-situ Machbarkeitsstudie	S
Active Thermography as a Process Monitoring Technology for Laser Beam Melting: An ex-situ and in-situ Feasibility Study	
<u>C. G. Kolb</u> , F. Bayerlein, M. F. Zaeh.....	183
Einfluss des Einfallswinkels der Laserstrahlung auf die Positionsabhängigkeit der Bauteilqualität im L-PBF-Prozess	S
Position-dependent part quality of the L-PBF process resulting from the laser's angle of incidence	
<u>Maximilian Schniedenharn</u> , Johannes Henrich Schleifenbaum.....	198
Struktur-Eigenschafts-Beziehungen additiv gefertigter thermoplastischer Polymere am Beispiel der ARBURG-Freeformer-Technologie	S
Structure–property relationship of additive manufactured thermoplastic polymers processed with ARBURG Freeformer Technology	
<u>Franziska Kaut</u> , Valentin Cepas, Wolfgang Grellmann, Ralf Lach.....	217
Entwicklung alternativer Polyamidwerkstoffe für das Laser-Sintern	S
Development of alternative polyamide materials for the laser sintering process	
<u>Andreas Wegner</u> , Marc Oehler, Timur Ünlü.....	236
Einfluss des Schichtaufbaus auf das mechanische Verhalten von selektiv lasergesinterten Bauteilen	S
Influence of the Layerwise Manufacturing on the Mechanical Properties of Selective Laser Sintered Parts	
<u>Andreas Wörz</u> , Katrin Wudy, Dietmar Drummer.....	254
Chemisches Nachbehandeln von Laser-Sinter-Proben – Einflussuntersuchung von verschiedenen Säuren auf die Oberflächentopologie	S
Chemical post-treatment of laser sintered samples – Examination of the influence of different acids on the surface topology	
<u>Livia C. Wiedau</u> , Lars Meyer, Andreas Wegner, Gerd Witt.....	267

Part 6: Forum Medical, Dental & Orthopaedic Technology

Der Einfluss offenporiger, lastragender Strukturen auf die Primärstabilität von Press-Fit Hüftpfannen The influence of open-porous load-bearing structures on the primary stability of acetabular press-fit cups <u>Volker Weißmann</u> , Rainer Bader, Harald Hansmann, Christian Boss ..	U 379
Gittergenerierung auf Basis diskreter Voxeldaten Lattice structure generation based on discrete voxel data <u>Stefan Holtzhausen</u> , Peter Koch, Stefan Dahlke, Ralph Stelzer	U 393
Entwicklung von steifigkeitsangepassten, lasergeschmolzenen Kurzschaft-Hüftendoprothesen Development of stiffness-adapted lasermelted short stem hip implants <u>L. Risse</u> , B. Schramm, J.-P. Brüggemann, G. Kullmer, H.A. Richard ...	U 405
Verbesserte Lösungen für personalisierte Gesundheitsanwendungen durch das Additive Manufacturing von Silikonelastomeren Enhanced AM solutions for personalized health care applications with silicones Elastomers <u>Jean-Marc Francès</u> , Damien Djian, Karsten Schlichter, Rémi Thiria, E.-J.Courtial, C.Marquette, C.Perrinet, R.Fulchiron, A.Jaffard, J.Troccaz.....	U 418

Part 7: Forum 3D Printed Electronics & Functions

Funktionalisierung von additiv gefertigten Bauteilen mittels laserstrukturierbarer MID-Lacke Functionalization of additively manufactured components using laser-structurable MID coatings <u>Thomas Mager</u> , Christoph Jürgehake, Roman Dumitrescu	U 437
Integration beweglicher und sensorischer Elemente in additiv gefertigte Bauteile am Beispiel eines Greifers Integration of flexible and sensory elements in additively manufactured components using the example of a gripper <u>Richard Kordaß</u> , Elisa Starruß, Torsten Schnabel, Franz Marquardt ...	U 458
3D gedruckte eingebettete lichtführende Strukturen für Sensor- und Kommunikationsanwendungen 3D Printing of Embedded Light Guiding Structures towards Sensing and Communication Applications <u>Oliver Stübbe</u> , Franz-Josef Villmer, Andrea Huxol.....	U 473

Part 8: Forum 3D Metal Printing

Auswirkung der Gasatmosphäre während des Laserstrahlschmelzens	U
Effect of the gas atmosphere during the laser beam melting process	
Coralie Charpentier, <u>Markus Effinger</u> , Philippe Lefebvre, Francis Briand, Francois Edy, Stéphane Abed	491

Part 9: Forum Aviation

Mit Industrie 4.0 zur Lebensdauervorhersage additiv gefertigter Bauteile	U
Lifespan prognosis for additively manufactured parts using Industry 4.0	
Claus Emmelmann, <u>Sandra Zühlke</u> , Jan-Peer Rudolph, Felix Güntzer	507
Online-Prozesskontrolle bei der LBM-basierten Fertigung von Raumfahrtantriebskomponenten	U
Online process monitoring for LBM based manufacturing of space propulsion components	
<u>Mathias Sebastian Palm</u> , Fabian Riß, Michael F. Zäh	522

Part 10: Forum Contract Additive Manufacturing

Urheberrecht, Lizenzierung, PLM Datenversorgung und Plagiatschutz in der additiven Lieferkette	U
Copyright, Licensing, PLM Data Delivery and Counterfeit Protection in the Additive Supply Chain	
<u>Josip Stjepandić</u> , Martin Holland	539

Greeting

Dear readers,

Now in its 15th edition, the international trade show and conference for Additive Manufacturing Rapid.Tech + FabCon 3.D is well on its way to another record-breaking year. This growth is a further indication that Additive Manufacturing is still expanding and that Erfurt is the right place to present the latest developments in this technology of the future.

With the support of the distinguished experts from industry and research on our Advisory Board, we were one of the first trade fair organizers worldwide to focus on this topic and, thanks to our consistency and commitment, have established ourselves as a leading European destination for exhibitors, visitors and conference participants since 2004.

Within the Rapid.Tech conference more than 90 scientists, users and industry experts are presenting current research results and application examples. The lectures have been selected by the advisory board and some of them have been double-blind reviewed by the review committee to receive a scientific quality assurance.

The submissions of these proceedings belong to the Users Conference as well as the forums 3D Printed Electronics & Functions, 3D Metal Printing, AM Science, Aviation, Contract Additive Manufacturing, Design, Medical, Dental & Orthopaedic Technology, on Law and Tool, Mould & Fixture Making.

Michael Kynast
CEO
Messe Erfurt GmbH

Advisory Council & Review Committee

Organizer of the specialist conference

Verein der Ingenieure und Techniker in Thüringen e.V. – VITT

Organizer and venue Rapid.Tech + FabCon 3.D

Messe Erfurt GmbH
Gothaer Straße 34
99094 Erfurt / Germany
www.messe-erfurt.de

Advisory Council

- Frank Cremer, **3D Systems GmbH**
- Michael Eichmann, **Stratasys GmbH**
- Prof. Dr. Claus Emmelmann, **Fraunhofer IAPT**
- Carl Fruth, **FIT AG**
- Dietmar Frank, **EOS GmbH**
- Dr. Günter Hartmann, **VITT e.V.**
- Florian Horsch, **HypeCask**
- Daniel Hund, **Concept Laser GmbH, a GE company**
- Dr. Simon Jahn, **Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH**
- Peter Jain, **Desktop Metal**
- Dr. Eric Klemp, **voestalpine Additive Manufacturing Center**
- Ulli Klenk, **SIEMENS AG**
- Holger Löffler, **Vorwerk Elektrowerke GmbH & Co. KG**
- Wolfgang Mildner, **MSWtech**
- Dr. Bernhard Müller, **Fraunhofer-Allianz GENERATIV (Fraunhofer IWU)**
- Dr. Sabine Sändig, **Thüringer Aufbaubank**
- Ralf Schumacher, **Medartis AG**
- Prof. Dr. Gerd Witt, **Universität Duisburg-Essen**
- Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer, **Universität Paderborn**

Scientific Review Committee

- Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer
Lehrstuhl für Kunststofftechnik, FAU Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik, TU Hamburg-Harburg
- Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe
Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen
- Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner
Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn
- Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt
Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen
- Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München
- Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung, TU Bergakademie Freiberg
- Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer
Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

Part 1:

Forum Tool, Mould &
Fixture Making

Hybride Prozesse – Potenziale der Integration einer subtraktiven Bearbeitungseinheit bei der lichtbogenbasierten additiven Fertigung mit dem 3DMP®-Prozess

Hybrid Processes - potential of integrating a subtractive machining unit in the arc-based additive manufacturing with the 3DMP® process

Georg Fischer, Felix Kroll, Martin Lange, Tobias Röhrich
GEFERTEC GmbH, Schwarze-Pumpe-Weg 16, 12681 Berlin,
www.gefertec.de

Kurzfassung

Die lichtbogenbasierte additive Fertigung ermöglicht eine bisher nicht mögliche effiziente und kostengünstige Fertigung von Kleinserien beginnend ab Losgröße 1. Als erstes additives Verfahren überhaupt lassen sich mit dem 3DMP®-Prozess auch einfache Bauteile wirtschaftlich herstellen – auch im direkten Vergleich mit konventionellen zerspanenden Bearbeitungsmethoden. Durch die 5-Achs Bearbeitung ergeben sich vielfältige geometrische Freiheiten bei gleichzeitigem Verzicht auf bisher notwendige Stützstrukturen, so dass eine optimale Werkstoffausnutzung gewährleistet ist.

Diese vielfältigen Möglichkeiten können ab sofort durch integrierte subtraktive Bearbeitungseinheiten noch erheblich erweitert werden, da es nun – in Verbindung mit der speziell dafür angepassten CAM-Software - ermöglicht wird, subtraktive Bearbeitungsschritte im Wechsel mit der additiven Bearbeitung durchzuführen. So können gezielt Bereiche bearbeitet werden, die im späteren Fertigungsverlauf nicht oder nur sehr aufwändig bearbeitet werden können. Hierzu zählen zum Beispiel Kühlkanäle und andere Hohlstrukturen.

Die subtraktive Bearbeitung kann dabei individuell in den additiven Fertigungsprozess integriert werden, so dass eine höhere Bauteilqualität bei gleichzeitig optimaler Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann.

Im Rahmen der hier gezeigten Vorstellung sollen die technologischen Möglichkeiten der kombinierten additiven und subtraktiven Bearbeitung in einem hybriden Prozess sowie CAM-softwaretechnischen Lösungen tiefergehend erläutert werden.

Short Abstract

The wire arc-based additive manufacturing enables a so far impossible efficient and cost-effective production of small series starting from batch size 1. As the first additive process ever the 3DMP® process allows the economical production of even simple components - even in direct comparison with conventional machining methods. The 5-axis additive

machining results in a wide variety of geometrical degrees of freedom while at the same time previously necessary support structures can be prevented, so that optimum material utilization is guaranteed.

These versatile options can now be considerably extended by the subtractive machining unit upgradable on GEFERTEC machines, since - in combination with the specially adapted CAM software - it is now possible to carry out subtractive machining steps alternating with additive machining. In this way, it is possible to specifically process areas that cannot or only very laboriously be processed later in the production process. These include, for example, cooling channels and other hollow structures.

The subtractive processing can be integrated individually in the additive manufacturing process, so that a higher component quality can be achieved with optimal cost-effectiveness.

As part of the presentation presented here, the structure and technological possibilities of the retrofit solution and the CAM software will be explained in more detail.

Einleitung

Im wettbewerbsorientierten Industrieumfeld sind Ressourcenschonung und Kosteneffizienz stets Themen für Fortschritt und Innovation.

Bei der Metallzerspanung zum Beispiel durch Drehen oder Fräsen entstehen Kosten für die Lagerhaltung der Rohling, die Bearbeitung in der Maschine sowie für die Wiederaufbereitung der Späne durch Recycling und Transport.

Essentiell für eine hohe Produktivität sind hierbei eine hohe Auslastung der Produktion und effiziente Maschinennutzung. Weitere kostenrelevante Faktoren der schnellen Fertigungsverfahren sind kurze Stand- und Rüstzeiten.

Darüber hinaus führt der weiter zunehmende Trend zur Leichtbauweise im Automobil- und Luftfahrtbereich bei steigenden Anteil an schwer zerspanbaren und teuren Metallen zu einer Erhöhung der Fertigungskosten.

Aus diesem Grund gewinnt die additive Fertigung bei der industriellen Herstellung komplexer Teile zunehmend an Bedeutung. Die Vorteile liegen in der endkonturnahen und damit ressourcenschonenden Produktion. Für die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien eignen sich dabei additive Fertigungsverfahren besonders.

Dem Konstrukteur wird es dabei ermöglicht, bisher bewährte Konventionen der fertigungsgerechten Gestaltung von Bauteilen, welche oft im Konflikt zur optimalen Gestalt für die Funktion steht, zu umgehen und neue Bauteildesigns zu erschaffen.

Dem Fertigungsplaner bietet sie Möglichkeiten in der Produktionsoptimierung. Bedeutend für diese Entwicklung sind die auf Pulverbett basierenden Elektronen- und Laserstrahlverfahren. Obwohl in der Form- und Maßhaltigkeit als auch der Oberflächenqualität Maßstabe

gebend, so sind die Aufbaugeschwindigkeit und die Materialvielfalt begrenzt. So ist das Fertigen von geschlossenen Hohlkörpern bei pulverbettbasierten Verfahren aufgrund der zu entfernenden Pulverrückstände und Stützstrukturen nicht möglich.

Die Alternative bietet das auf dem Lichtbogenbogenschweißen mit Draht basierende additive Verfahren 3D Metal Printing (3DMP®) der Firma GEFERTEC. Die dafür eigens entwickelten Maschine GTarc ermöglicht eine effiziente Herstellung von Bauteilen bei signifikant höheren Aufbauraten und einer sehr großen Auswahl am Markt erhältlicher Werkstoffe. Der Prozess, beruhend auf dem Metall-Schutzgas-Schweißen, kommt dabei ohne aufwändige Vakuumtechnik oder optische Strahlführungssysteme aus und ermöglicht zudem die Herstellung von geschlossenen Hohlkörpern. Weiterhin kann hierbei auf ein umfassendes Know-How im Bereich der Schweißtechnik zurückgriffen werden.

Der Schweißprozess bringt jedoch auch einige verfahrensspezifische Probleme, wie Bauteilverzug aufgrund der Wärmeinbringung, mit sich. Darüber hinaus ist sowohl die Bauteiloberfläche, als auch die Gesamtgeometrie nicht in der Genauigkeit herstellbar, wie es bei pulverbettbasierten Verfahren möglich ist, und macht daher zwangsweise eine zusätzlich subtraktive Bearbeitung mittels Fräsen oder Drehen notwendig. Damit können jedoch nur Bereiche des fertig additiv hergestellten Bauteils mit guter Zugänglichkeit bearbeitet werden, eine Bearbeitung von Hinterschnitten oder Hohlräumen ist nicht mehr möglich. Aus diesem Grund bietet eine Integration einer subtraktiven Bearbeitungseinheit, die im sequentiellen Wechsel mit der additiven Bearbeitungseinheit eingesetzt wird verschiedene Vorteile:

- Optimale Zugänglichkeit während des Bauteilaufbaus,
- Möglichkeit einer direkten Korrektur von Bauteilabweichungen.

Demgegenüber stehen jedoch auch verschiedene Nachteile:

- Kein Effektiver Einsatz von Kühlschmierstoffen möglich,
- Keine vollständige Korrektur von Verzügen bei Bearbeitung auf Endmaß möglich.

Insbesondere die Bearbeitung später unzugänglicher Bereiche wie Kühlkanäle ermöglicht eine interessante Erweiterung des Anwendungsgebietes. Dies bildet den Ansatz zur Kombination aus beiden Verfahren in einer Maschine und das Ziel zur Erweiterung der GTarc um ein Fräsmodul zur GTarc+.

Stand der Technik

Die additive Fertigung definiert ein Verfahren, welches durch stoffschlüssiges Auftragen von Material die Form eines Werkstücks erzeugt. Im Gegensatz hierzu wird beispielsweise beim Trennen (wie z.B. Fräsen oder Drehen) die Form des Werkstücks durch Materialabtrag erzeugt. Durch diese Art der Herstellung bieten sich neue Möglichkeiten der Bauteilherstellung. Durch das Auftragen von Material zur Erzeugung

der Geometrie kann auf konventionelle Fertigungsabläufe zum Teil oder ganz verzichtet werden. [1]

Das erste für die Industrie qualifizierte additive Fertigungsverfahren war die Stereolithographie im Jahre 1988. Dieses Verfahren basiert auf einem Laserstrahl, welcher schichtweise Kunstharz aushärtet. [2]

Die Verfahren, Aufgabengebiete und Materialvielfalt haben sich seitdem erheblich erweitert. Neben Kunstharzen und Keramiken sind auch verschiedenste Metalllegierungen additiv verarbeitbar und finden sowohl in der Luft- und Raumfahrt, der Werkzeugherstellung, im Automotivbereich als auch in der Medizin und Architektur Anwendung. Eine Möglichkeit der Unterteilung ist nach der Art der Energieform, der Energieübertragung und der Form des zu verarbeitenden Werkstoffs. Dies geschieht bei metallischen Werkstoff zum einen in Form eines Laserstrahls (LBM), eines Elektronenstrahls (EBM) oder Lichtbogens (WAAM), als auch die verwendeten Ausgangsstoffe als Rohstoff, z.B. in Pulver- oder Drahtform.

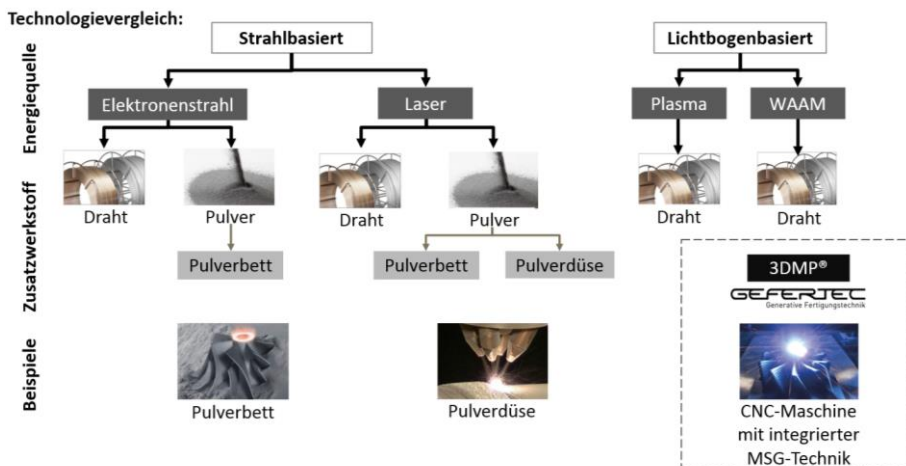


Abbildung 1: Technologievergleich metallbasierte additive Fertigungsverfahren

Diese Einteilung kann, neben den technologischen Unterschieden auch aus ökonomischen Gesichtspunkten erfolgen, da sich Unterschiede in Herstellungs-, Anschaffungs- und Unterhaltungskosten ergeben.

Außer diesen Kriterien lassen sich die gängigen Verfahren auch noch in anderer Weise einteilen oder differenzieren. Dies lässt sich jedoch nur im Rahmen eines detaillierten Beispiels praktikabel anwenden und soll an dieser Stelle lediglich die Vielfältigkeit der Technologie aufzeigen. Eine Möglichkeit zum Erlangen eines Überblicks der Verfahren geben hierbei die VDI-Richtlinie 3405 sowie die Norm DIN EN ISO/ASTM 52900.

Das WAAM- bzw. 3DMP®-Verfahren basiert auf dem Schmelzschweißprozess mit Lichtbogen als Energiequelle und Draht als Zusatzmaterial. Der Lichtbogen erzeugt dabei die notwendigen Temperaturen zum Aufschmelzen des Draht- und des Grundwerkstoffs.

Das Schutzgas trennt die Schmelze von der Atmosphäre und schützt diese vor Oxidation.

3DMP® Prozesskette

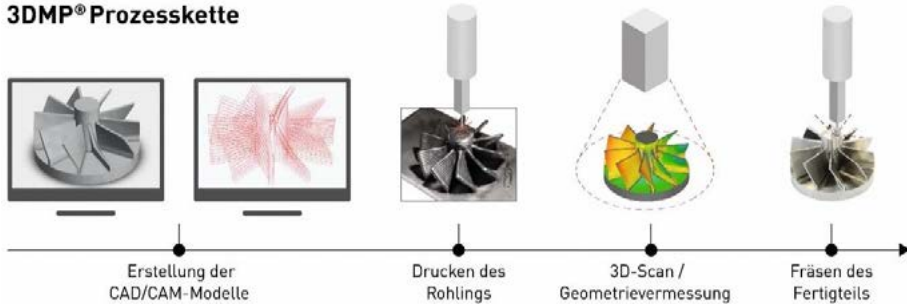


Abbildung 2: konventionelle Prozesskette 3DMP®-Verfahren

Der durch den Lichtbogen aufgeschmolzene Draht wird Bahn für Bahn und Schicht-für-Schicht aufgetragen. Die erstarrten Schweißraupen bilden dann die Bauteilgeometrie. Der 3DMP®-Prozess zeichnet sich durch sehr hohe Aufbauraten und große Materialvielfalt aus. [1]

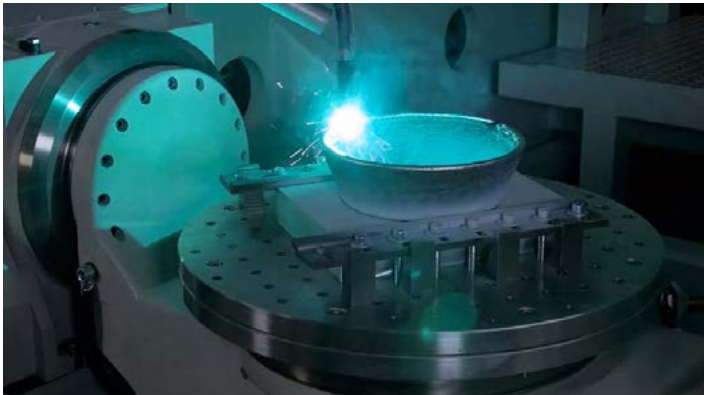


Abbildung 3: WAAM-Verfahren am Beispiel von 3D Metal Print (3DMP®) der Firma GEFERTEC

Beim 3DMP® werden die Schweißbahnen zunächst auf eine Substratplatte (artähnlicher Werkstoff) aufgebracht und dann sukzessive übereinander geschweißt, um Höhe aufzubauen. Bei entsprechender Maschinenkonfiguration mit Dreh-Kipp-Tisch lassen sich Werkstücke mit Überhängen und Hinterschnitten ganz ohne Stützstrukturen herstellen. Die Grenzen dieses Prozesses liegen demzufolge anders als bei den Pulverbettverfahren nicht mehr bei den Abmessungen des Pulverbettes (SLM) oder notwendigen Vakuumkammern (EBAM). Die in den generativen Verfahren auf Pulverbasis eingesetzten Pulver sind zudem in der Vielfalt begrenzt und teuer in der Herstellung. All diese Faktoren können bei dem 3DMP® Prozess ausgeschlossen werden.

Die Vielfalt in Verbindung mit einer guten Verfügbarkeit des Schweißzusatzdrahtes macht das Verfahren flexibel und erschließt ein umfangreiches Anwendungsgebiet. Zudem ist es möglich in einem Prozess unterschiedliche Metalle zu verarbeiten. Anders als bei den pulverbettbasierten Verfahren entstehen so gut wie keine Rückstände.

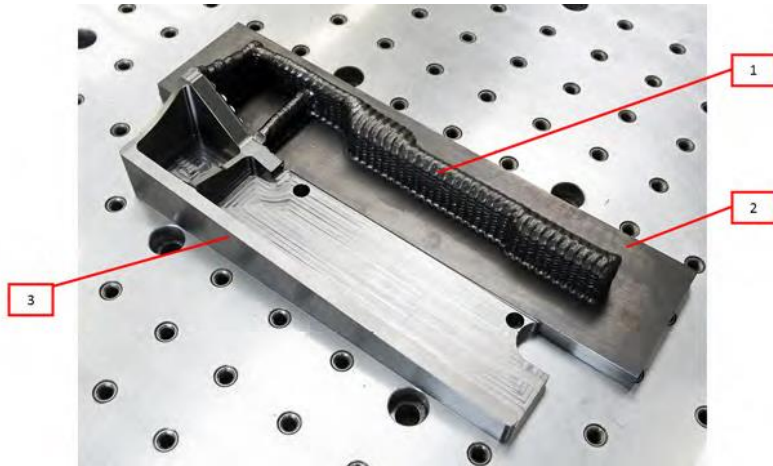


Abbildung 4: Ausstellungsteil aus Titan (TiAl6V4), nach 3DMP®-Verfahren [1] auf eine Substratplatte [2] hergestellt und anschließend auf einer Fräsmaschine [3] zur Hälfte auf Endmaß gefräst.

Am Markt wurden bereits verschiedene Maschinen mit einem Hybridkonzept vorgestellt. So hat die Firma Hermle AG mit der Tochterfirma Hermle Maschinenbau GmbH (HMG) in Ottobrunn mit der MPA40 eine Hybridmaschine im Einsatz, welche nach dem Verfahren des Kaltgasspritzens arbeitet. Dabei wird das Pulver durch eine Lavaldüse auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt und auf das Bauteil gebracht. Durch den Aufprall werden die Partikel auf die Oberfläche verschweißt. Der Vorteil ist eine geringe thermische Wärmebelastung des Bauteils. Hermle bietet die Maschine und das Verfahren lediglich zum Fertigen von Kundenaufträgen an. Die Maschine selbst wird nicht vertrieben. [3] [4]

Die Firma Mazak bietet derzeit drei Hybridmaschinen mit unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren an. Die Integrex i-200S AM mit dem M-LMD-Verfahren, die INTEGREX i-400 AM mit dem LMD-Verfahren und die VARIAXIS j-600 AM mit dem WAAM-Verfahren. Die VARIAXIS ist zudem eine CNC 5-Achs-Maschine und hat somit eine hohe Variabilität in der Herstellung komplexer Bauteile. [5]

Der japanische Maschinenbauer MATSUURA ist Spezialist auf dem Gebiet der CNC-Bearbeitungszentren und bietet mit der LUMEX-Reihe ebenfalls Hybridmaschinen an. Mit der LUMEX Avance-25 und LUMEX Avance-60 geht MATSUURA den Weg über die SLS-Technologie. Die Maschinen verfügen weiterhin über eine 3-Achs-HSC-Fräsbearbeitung. [3]

Alle Systeme haben die Gemeinsamkeit, dass ihre technologische Basis im Bereich der subtraktiven Bearbeitung zu finden ist.

Tabelle 1: Vergleich der additiven und subtraktiven Maschinenparameter zwischen MATSUURA und GEFERTEC

		Hersteller / Typenbezeichnung	
Nr.	Kriterium	MATSUURA / LUMEX Advanced-60	Gefertec / GTarc+
1.1	Konstruktion	Fahrständer	Fahrständer
1.2	Bauraumvolumen [dm ³]	180	850
1.3	Achsen	3	5
2.1	Additives Verfahren	SLS	WAAM
2.2	Aufbaurrate [cm ³ /h]	40	bis zu 1.300
2.3	Schichthöhe [mm]	0,015 - 0,015	> 3
2.4	Schichtbreite [mm]	µm-Bereich	3-8
2.5	Materialvielfalt	durchschnittlich	sehr groß
3.1	Subtraktives Verfahren	Fräsen	Fräsen
3.2	Simultachssteuerung	3	5
3.3	max. Spindeldrehzahl [U/min]	45.000	30.000

Aufbau Fräsmodul GTarc+

Die GTarc+ ist eine um ein Fräsmodul erweiterte GTarc800-5 mit einem Werkzeugmagazin mit 13 Plätzen. Während des additiven Arbeitsschrittes ist die Werkzeugspindel über ein Spannsystem oberhalb des Schweißbrenners mit diesem gekoppelt. Ein Verschluss schützt die Aufnahme der Werkzeugspindel vor Verunreinigungen. Beim Wechsel von additiver zu subtraktiver Fertigung fährt die Spindel-Brenner-Kombination durch Anwahl eines Werkzeugwechselprogramms in der Maschinensteuerung zum Ablageplatz (4) des Schweißbrenners. Dort wird der Brennerhalter mit Schweißbrenner an ein Spannsystem, welches sich an dem Maschinengestell der Z-Achse befindet, abgelegt. Das pneumatische Spannsystem nimmt den Brenner auf und löst die Spindel von der Spindel-Brenner-Halterung (5). Die Werkzeugspindel verfährt anschließend ohne Schweißbrenner in X- und Y-Richtung von der Ablageposition. Anschließend wird durch Programmanwahl in der Steuerung der Spindelverschluss durch eine Werkzeughaltung mit Werkzeug gewechselt.

In der Auslegung dieses Systems wurden die bereits genannten Vor- und Nachteile der hybriden Bearbeitung umfassend berücksichtigt, so dass der Fokus in der Anwendung nicht in der finalen Endbearbeitung der Bauteile besteht, sondern im Einsatz bei der Bearbeitung von später nicht mehr zugänglichen Bereichen. Dieser Ansatz führt dazu, dass die Maschine auch weiterhin überwiegend additiv und nur zu einem geringen Anteil subtraktiv arbeitet. Der Ansatz ist daher nicht, anders als bei anderen Anbietern, eine subtraktive Bearbeitungseinheit um eine additive Bearbeitungseinheit zu erweitern, sondern genau umgekehrt. Dies begründet sich vor allem in den Fertigungszeiten, die in der additiven Bearbeitung, auch bei Hochleistungsverfahren wie dem 3DMP® teilweise

immer noch länger sind, als in der subtraktiven Bearbeitung (gerechnet in kg/h).

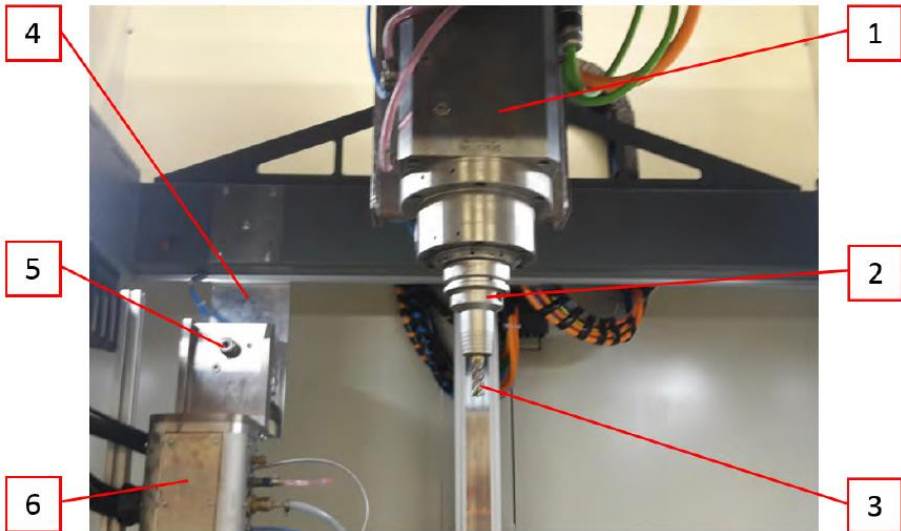


Abbildung 5: Fräsmodule der GTarc+, 1 Werkzeugspindel, 2 Werkzeughalter, 3 Schaftfräser, 4 Ablageplatz für Schweißbrenner, 5 Aufnahme für Spannsystem, 6 Schweißbrenner

Mit diesem System wird es nun möglich, eine exakt definierte Werkstückhöhe nach einer Schweißlage zu erzeugen. In der nachfolgenden Abbildung ist zu sehen, dass nach dem additiven Arbeitsschritt ein Unterschied zwischen der Soll-Höhe aus der Bahngenerierung und der Ist-Höhe des gefertigten Bauteils entsteht.

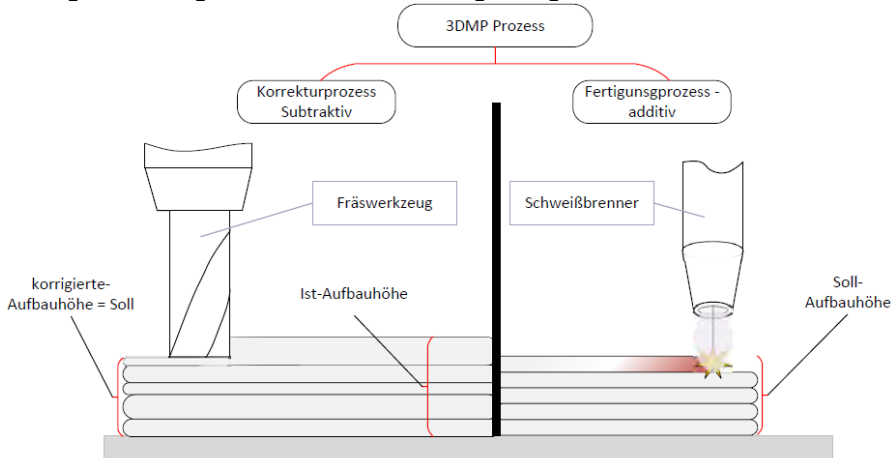


Abbildung 6: Höhenkorrektur des Werkstücks mit Fräsen, 3DMP im Soll-Ist-Vergleich (Abbildung nicht maßstabgetreu)

Dieser Unterschied entsteht durch den Lichtbogenschweißprozess, bei dem die Schweißraupe zu Schweißbeginn und am Ende Geometrieabweichungen aufzeigen kann. Dieser Effekt kann bereits durch abwechselnde Startpositionen korrigiert werden, jedoch nur in definierten Grenzen.

Diese Unebenheiten können außerhalb der üblichen Fertigungstoleranzen nach DIN ISO 2768 liegen, haben jedoch nur geringen Einfluss auf den weiteren Fertigungsprozess. Mit diesem subtraktiven Zwischenschritt soll die tatsächliche Aufbauhöhe dem Soll-Wert in den üblichen Fertigungstoleranzen entsprechend erreicht werden. Ein weiterer Anwendungsfall ist das Bearbeiten von Funktionsflächen, welche zum Zeitpunkt der Werkstückgenerierung noch für die maschinelle Bearbeitung zugänglich sind. So lassen sich ggf. Hohlräume mit definierter Oberflächenrauheit herstellen, und anschließend durch additives Auftragen verschließen. Eine Herstellung von frei gestalteten Kühlkanälen ist somit möglich.

Versuchsdurchführung zur Bewertung des Fräsmoduls GTarc+

Für die Versuche wurde eine Aluminiumlegierung mit wenig Silizium (Si) verwendet. Der Schweißdraht mit der Werkstoff-Nr. 3.3548 besitzt einen Si-Anteil <0,7%, ist schweißgeeignet und zugleich gut spanend bearbeitbar.

Für die Substratplatte wird Aluminium mit der Werkstoff-Nr. 3.3547 gewählt. Der Schweißdraht ist etwas höher legiert als der Grundwerkstoff (Substratplatte) um den Abbrand von Legierungsbestandteilen beim Schweißen auszugleichen und die mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes auch in der Schweißnaht sicher zu stellen. [6] Es ist anzumerken, dass es sich bei dieser Aluminiumlegierung um ein langspanendes Material handelt. Das bedeutet, dass er beim Spanen zur Aufbauschneidbildung neigt.

Für die Proben wurde auf Grundlage der Maße für Durchmesser, Wandstärke und Aufbauhöhe ein NC-Programm mit Hilfe der 3DMP-DCAM-Software der Firma SKM erstellt.

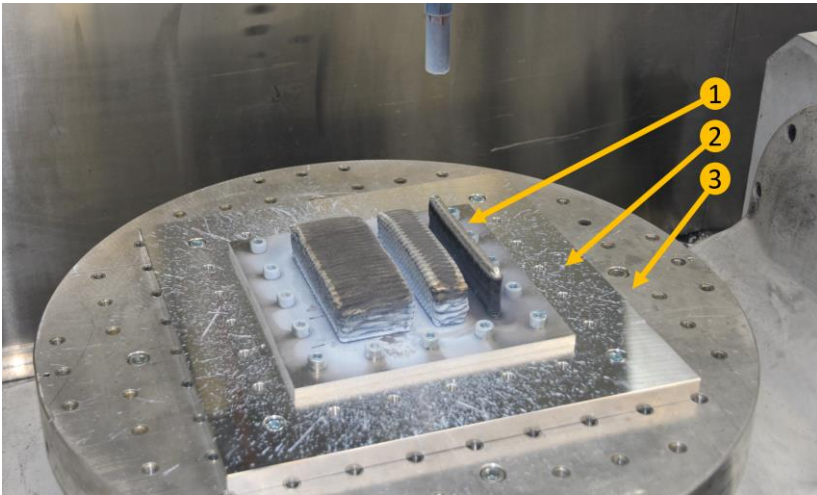


Abbildung 7: Versuchsaufbau Fräsbearbeitung [1] Substratplatte, [2] Adapterplatte, [3] Maschinentisch

Eine Substratplatte wird mit Spannmittel auf dem Maschinentisch der GTarc aufgespannt und auf ca. 150°C vorgewärmt. Diese Temperatur wird später als Zwischenlagentemperatur gemessen und von der Maschine automatisch eingestellt. Die Zwischenlagentemperatur muss auch zwischen den Schweißlagen eingehalten werden um eine ausreichende Materialanbindung herzustellen.

Nach dem Programmstart wird der Prozess über eine automatisierte Temperaturkontrolle überwacht. Das hierfür verwendete Pyrometer am Schweißbrennerhalter misst aufgrund der verzünderten und dadurch kaum reflektierenden Bauteiloberfläche hinreichend genau.

Ergebnisse

Nachfolgend sollen einige Ergebnisse aus den Versuchen vorgestellt werden. Hierbei lag der Fokus insbesondere auf der Bewertung der Schwingungseigenschaften der Maschine und des Bauteils.

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass insbesondere bei dünnwandigen Stegen die Schwingung des Bauteils stark dominiert. Um die Krafterwirkung beim Fräsen zu reduzieren wurde bereits in der Auslegung der Maschine darauf geachtet, eine Spindel mit hoher Drehzahl einzusetzen.

Bei der Bearbeitung von Aluminium war im Rahmen der Versuche sehr stark die Bildung von Aufbauschneiden zu beobachten, die aufgrund des nicht möglichen Einsatzes von Kühlschmierstoffen auftreten. Der Einsatz von Kühlschmierstoffen ist nicht möglich, da aufgrund des Öl- und Wassergehaltes keine fehlerfreie additive Bearbeitung des Bauteiles mehr möglich ist.

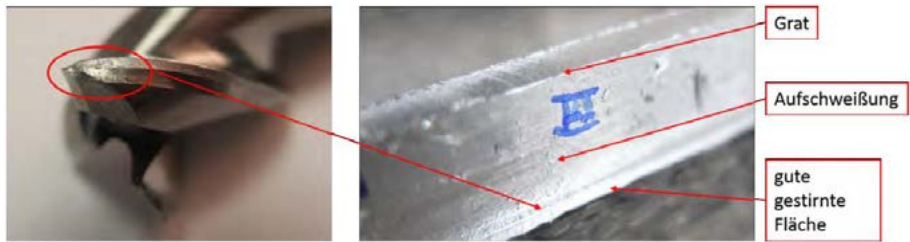


Abbildung 8: Materialaufschweißungen am Fräser und auf dem Steg, Höhe 60mm

Die Oberflächenauswertung hat dann ergeben, dass Gegenlauf (Seite A), bessere Resultate erzielt. Um diese genauer zu betrachten sollen die Balken auf Seite A und B auf 60 und 20mm Bauteilhöhe mit Hilfe der nachfolgenden Aufnahmen in verglichen werden.



Abbildung 9: Steg mit Gegen- (A) und Gleichlaufräsen (B) 60 und 20mm Höhe, $a_p=10$ mm, $a_e=0,5$ mm,

Die Versuche zeigen, dass mit sinkender Probenhöhe die Oberflächen aufgrund geringerer Schwingungen des Bauteils deutlich besser werden. Das Ergebnis kann auch für Fräser mit unterschiedlicher Schneidenzahlen bestätigt werden. Eine weitere Erkenntnis sind bessere Oberflächen im Gegenlauf schon ab einer Höhe von 60 mm. Auf 20 mm Höhe zeigt sich dies im Gegensatz zum Gleichlauf besonders, da hier die Rillen nicht oder nur schwach auftreten.

In einer Veröffentlichung zum Thema Zerspanung von Leichtmetallen wie Aluminium [7] beschreibt Tönshoff, da die Bildung von Scheinspänen und das Verschweißen von Werkstoff an der Fräserfreifläche mit der Schnittlänge l_c zusammenhängt. Erklären lässt sich dies durch die steigende Wärme am Fräser.

Tönshoff nennt zur Unterdrückung dieses Problems und dem Erreichen hoher Oberflächenqualitäten die Verwendung PDK-beschichteten

Werkzeugen. Fräser mit weniger Schneiden erzeugen bessere Oberflächen. Kritisch sind der Ein- und Austritt an den Stegseiten, da es hier zu besonders großen Amplituden in der Werkstückschwingung und damit zu tiefen Oberflächenwellen kommt. In diesen Bereichen ist eine Parametersteuerung zu empfehlen. Die Fräser mit drei und vier Schneiden hatten mit aufgrund der Erwärmung Probleme mit aufgetragenem Material auf der Oberfläche.

Tabelle 2: Empfehlungen zur Verbesserung der Oberflächen

Höhe [mm]	Seite	v_c [m/min] v_f [mm/min]	Steg 1 (z=2)		Steg 2 (z=3)		Steg 3 (z=4)	
			180 645	Empfehlung	190 1021	Empfehlung	180 1289	Empfehlung
100	A	GL	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗	-	Kühlung, Beschichtung	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗
	B	GG	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗
60	A	GL	0	a_p ↘ v_c, v_f ↗	-	Kühlung, Beschichtung	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗
	B	GG	0	a_p ↘ v_c, v_f ↗	-	Kühlung, a_p ↘ Beschichtung	-	Kühlung, a_p ↘ Beschichtung, v_c, v_f ↗
20	A	GL	+		-	Kühlung, Beschichtung	+	
	B	GG	0	a_p ↘ v_c, v_f ↗	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗	-	a_p, a_e ↘ v_c, v_f ↗

Um die Zerspanungseigenschaften weiter zu verbessern, ist der Einsatz einer öl- und wasserfreien Kühlung des Bauteils notwendig. Ein vielversprechendes Konzept bietet hierbei die Kühlung durch expandierte Druckluft. Bei ausreichend großem Druckunterschied kühlt der Venturi-Effekt die auströmende Luft. Diese wird direkt auf den Fräser gerichtet. Auch Systeme auf CO₂-Basis könnten entsprechende Kühlleistungen erreichen. Bei diesem Prinzip wird flüssiges CO₂ in Kristalle verwandelt, welche bei Umgebungstemperatur rückstandslos sublimieren. [8] Die Möglichkeit des Verfahrens als Kühlung der Fräser wird in Zukunft weiter untersucht.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass sich Fräser mit polierten Oberflächen stark erwärmen und damit das Material am Werkzeug haftet und zusetzt. Ein Wechsel zu PKD-Schneidstoffen und Schnittgeschwindigkeiten über 600m/min können bei Trockenbearbeitung zu besseren Oberflächenresultaten führen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Gefahr der Aufbauschneidenbildung hierbei besonders gering ist. [7]

Auch der Einsatz schwingungsdämpfender Werkzeuge ist vielversprechend. Parallel zu diesen Untersuchungen fand eine Weiterentwicklung der Maschinensoftware im Hinblick der spanenden Bearbeitung statt. Darauf basierend können Frässtrategien wie bspw. das tochoidale Nutenfräsen oder das Tauchfräsen zur Senkung der Schnittkraft und damit zur Schwingungsminderung untersucht werden.

Eine geeignete Messtechnik zur Aufzeichnung und Regelung des Prozesses, zeigt sich gerade zur Einführung der spanenden Bearbeitung als empfehlenswert zum Beispiel in Form eines Schnittkraftdynamometers. Normierte Werte wie Axialkraft, Torsions- und Biegemoment werden über die Messkarte ausgegeben.

Der Werkzeugverschleiß und die Prozessstabilität können direkt ermittelt werden. Durch Regelung kann noch im Prozess auf die Parameter Einfluss genommen werden. In der neuen Ausführung ist der Spike® zusätzlich in der Lage die Temperaturen der Werkzeugschneide zu messen. Dies bietet die Möglichkeit eine Kühlungsregelung zu

integrieren. Diese würde nur eingeschaltet, wenn die Schneidentemperatur einen kritischen Wert übersteigt.

Zusammenfassung

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass eine Integration einer subtraktiven Bearbeitungseinheit in ein bestehendes System zur additiven Fertigung mittels Lichtbogen und Draht möglich ist und verschiedene Vorteile mit sich bringt. Hierzu gehören die Bearbeitung von später nicht mehr zugänglichen Stellen, sowie der Höhenausgleich der Bearbeitungsebenen. Ebenso zeigt dieses System, dass der Fokus in der Maschinenauslegung stets auf der additiven Fertigung liegen sollte, da eine klassische Hybridauslegung (50/50) die unvereinbaren Nachteile beider Systeme mit sich bringt. Eine Lösung im Sinne einer subtraktiven Zwischenbearbeitung kann diese Nachteile erfolgreich umgehen und ermöglicht einen kostengünstigen und effizienten Einsatz des Gesamtsystems in Verbindung mit einer anschließenden finalen subtraktiven Endbearbeitung des Bauteiles in einer weiteren Bearbeitungsmaschine.

Neben der reinen Maschinenauslegung ist hierbei auch eine umfassende Anpassung der CAM-Software nötig, da gerade die Zwischenbearbeitung den Einsatz verschiedener CAM-Systeme (additiv/subtraktiv) verhindert. Hierzu werden derzeit Lösungen erarbeitet, die auf einer Oberfläche mit kürzesten Bearbeitungszeiten die Erstellung der Maschinenprogramme ermöglichen.

Quellenangabe

- [1] Alfred Herbert Fritz und Günter Schulze. Fertigungstechnik. 10. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] Klocke. Fertigungsverfahren 5. Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. 4. Aufl., Springer Vieweg, 2015.
- [3] Maschine+Werkzeug. Hermles Hybrid. Technik/Maschinen. Hrsg. von Verlag-Henrich. 5/2013. url: <https://www.maschinewerkzeug.de/> (besucht am 20. 04. 2018).
- [4] Rudolf Derntl. Additive Fertigung mit der Hermle MPA Technologie. Hermle Maschinenbau GmbH, 2015. (Besucht am 02. 04. 2018).
- [5] Mazak. Hrsg. von Mazak. 2018. url: <https://www.mazakeu.de/> (besucht am 20. 04. 2018).
- [6] Ulrich Dilthey und Annette Brandenburg. Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Gestaltung und Festigkeit von Schweißkonstruktionen. 3. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [7] H. K. Tönshoff, B. Karpuschewski und J. Winkler. Leichtmetallzerspanung am Beispiel von Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover: Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund, 1997. url:

http://www.isf.de/archiv/tagungen/tagung_1997/tagung/toensh.htm
(besucht am 20. 04. 2018).

[8] Apc-Micron, Hrsg. CO2 Schneestrahlnreinigung quattroClean.
Technologie. 2018. url: <http://www.acp-micron.com/co2-schneestrahln-technologie/> (besucht am 19. 04. 2018).

Danksagung

Die Entwicklung der subtraktiven Bearbeitungseinheit erfolgte mit Unterstützung der Investitionsbank Berlin (IBB) aus den Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE). Für diese Unterstützung wird hiermit ausdrücklich gedankt.

Additive Fertigung von temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen- und Diffusionsschweißtechnik

Additive Manufacturing of tempered large tools with wire arc and diffusion welding technology

Dr.-Ing. Jörg Hildebrand

Forscherguppe "TemGro" (2016 FGR 0035) HS Schmalkalden, ifw Jena, TU Ilmenau

1 Kurzfassung

Im Fall von Werkzeugen und Formen sind Temperierungen aus unterschiedlichsten Gründen notwendig bzw. steigern die Prozesseffizienz und Bauteilqualität. Der Ansatz beruht darauf, das formgebende Lichtbogenschweißen und Diffusionsschweißen so zu entwickeln, dass Formwerkzeuge mit integrierten Temperierkanalstrukturen größerer Abmessungen erzeugt werden können. Im Vorhaben werden die Werkstoffe 1.2343 (X37 CrMoV 5-1) und 1.2083 (X40 Cr14) bzw. die entsprechenden Zusatzwerkstoffe experimentell untersucht. Es werden erste Ergebnisse zur Vorgehensweise und Herstellung eines Funktionsmusters mit Temperierstrukturen, die runde und quadratische Querschnitte bei gerader bzw. mäanderförmiger Kanalführung aufweisen, vorgestellt. Dabei werden auf die Besonderheiten der Werkstoffe und Eigenschaften des Funktionsmusters, z. B. Homogenität des Härteverlaufes, nach der additiven Herstellung eingegangen. Die Funktionsmuster werden in einer variothermen Ventilstation mit Temperaturänderungen beaufschlagt und mittels Thermografie bezüglich Temperaturhomogenität und Temperaturänderungsgeschwindigkeit untersucht.

2 Short Abstract

The temperature control of molding tools, in this case injection molding, plays a critical role in the quality of manufactured plastic articles. Key parameters such as shrinkage, warpage, crystallinity, etc. can be significantly influenced by the temperature control concept. Variothermal process control in particular delivers good results in terms of flow path length and part quality. For tools in the small to medium size range, these structures can be additively generated by methods such as selective laser sintering. For large workpieces however, such as automobile bumpers or containers, the currently available manufacturing technologies reach the limits of their geometry. Up to now, it has not been possible to additively manufacture such large-format tools while generating temperature control channels at the same time. This paper

presents a method of manufacturing large-scale molding tools with temperature control channels by combining the additive manufacturing techniques of arc welding and diffusion bonding with conventional processes.

3 Langfassung

1.1 Einführung

Die Branche des Werkzeug- und Formenbaus verfügt aufgrund ihrer hohen Fertigungstiefe und durch Herstellung von Unikaten klassischerweise über ein breit gefächertes Spektrum an Fertigungstechnologien. Temperierung von Formwerkzeugen hat einen maßgeblichen Einfluss auf Qualität der gefertigten Bauteile und die Gesamtprozesszeit. Bei Anwendung von vario-thermer Prozesstechnik spielt Lage und Anzahl der Kühlkanäle eine entscheidende Rolle. Hierbei finden zunehmend additive Verfahren Einzug. Im Bereich von konturnaher Temperierung werden durch Lasersinterprozesse und Löttechnologien oberflächennahe Kühlkanäle erzeugt, aber diese sind kostenintensiv und im Bauraum begrenzt. Der Einsatz derartiger Technologien ist auf bestimmte Anwendungen und Spritzgießwerkzeuggrößen beschränkt. In der Forschergruppe „TemGro“, die von Oktober 2016 bis September 2019 läuft, werden Grundlagenerkenntnisse zum generativen Aufbau großformatiger Werkzeuge mit integrierten Temperierkanälen erarbeitet und die Verfahren - Lichtbogenschweißen und Diffusionsschweißen - genutzt.

1.2 Temperierung von Spritzgießwerkzeugen

Die Temperierung bestimmt maßgebend die Funktion des Spritzgießwerkzeugs und die Qualität der gefertigten Bauteile. Sie ist verantwortlich für die Zykluszeit des Prozesses und kann bei falscher Auslegung auch zum Versagen des Gesamtsystems führen [Mic11seu]. Dies wird oft nicht genau genug betrachtet und führt zu zahlreichen Änderungsschleifen während der Werkzeugfertigung [DIN13]. Auch die Bauteilqualität wie Kristallinität, Binde- und Fließnähte, Schwindung und Verzug werden maßgebend durch das Temperierkonzept beeinflusst. Der Abstand zwischen Kavitätswand und Temperierkanal muss dabei nicht so gering wie möglich konstruiert werden. Wichtig ist eine optimale Lage der Kanäle zueinander und zur Oberfläche [Men07]. Nur so kann eine homogene Oberflächentemperatur und folglich auch ein gleichmäßiges Temperaturprofil über die Kunststoffartikelwand erreicht werden. Weiterhin muss eine gezielte Wärmezufuhr und -abfuhr an genau den Stellen platziert werden, die es bauartbedingt benötigen. Hierbei darf sich nicht nur auf die kavitätsnahen Bereiche konzentriert werden, auch Lager- und Koppelstellen, beispielsweise zwischen Heißkanal und

Formaufbau, können kritische Stellen sein, an denen gezielt ein Temperierkanal erforderlich ist. Mit Blick auf diese Bereiche eines Spritzgießwerkzeuges wird bewusst, dass die Größendimensionen hier stets zunehmen. Bei Werkzeugen zur Blechverarbeitung von Pkw-Seitenteilen, wird bewusst, dass derzeit verfügbare additive Fertigungsverfahren geometrisch an ihre Grenzen kommen. Dadurch kann im Prozess nicht immer eine optimale Bauteilqualität erzeugt werden.

Im ersten Schritt mussten die anwendungs- und fertigungsspezifischen Anforderungen ermittelt werden. Es wurden Spritzgießwerkzeuge hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe analysiert und die Materialien 1.2343 (X37 CrMoV 5-1) und 1.2083 (X40 Cr14) ausgewählt.

Es wurden runde, rechteckige und ovalförmige Querschnitte als Kanalgeometrien in Abstimmung mit den vorgesehenen Fertigungsverfahren festgelegt. Hinsichtlich des Kanalverlaufs wurden unterschiedliche Konzepte betrachtet. Konzept 1 ist ein gerader, konventionell herstellbarer Kanalverlauf, Abb. 1 oben. Konzept 2 ist ein mäanderförmiger Verlauf, Abb. 1 unten. Vom mäanderförmigen Kanal wird eine schnellere Wärmez- und -abfuhr erwartet im Vergleich zum konventionellen Kanal. Die additiven Kanalstrukturen sollen durch eine Kombination der Fertigungsverfahren Lichtbogen- und Diffusionsschweißen hergestellt werden.

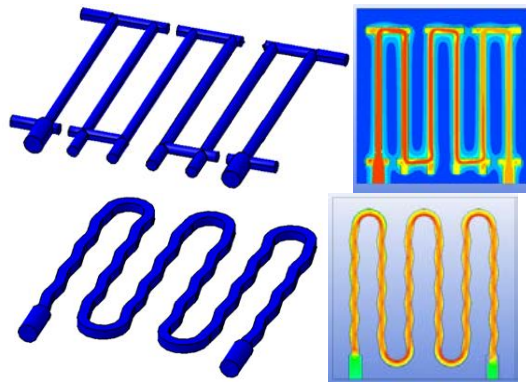


Abb. 1: oben: konventionell gefertigter Temperierkanal mit zugehöriger Simulation, unten: mäanderförmiger additiv gefertigter Temperierkanal mit zugehöriger Simulation

1.3 Einsatz additiver Fertigungsverfahren

1.3.2 Diffusionsschweißen im Bereich Werkzeugbau

Die Bedeutung von temperierten Werkzeugen ist in den letzten Jahren stark gestiegen [Böh92]. Gerade das Diffusionsschweißen bietet Möglichkeiten, großformatige bzw. großflächige Bauteilgeometrien mit

qualitativ hochwertigen Verbundeigenschaften zu fügen. Einsatzgebiete finden diese Verfahren gerade in Bereichen der Energie-Speicherung und -Rückgewinnung, aber auch wenn es gilt Wärmebelastungen zu reduzieren bzw. zu kontrollieren (Wärmemanagement), sowie in Prozessen der Luftkonditionierung (Be- und Entfeuchtung, Vorwärmen/Kühlen).

Das Diffusionsschweißen wird zwar bereits seit den 1950er Jahren vor allem in der Wehrtechnik eingesetzt und durch die Weiterentwicklung im Anlagen- und Werkzeugbau und in der Werkstofftechnik bietet es heute Lösungen für komplexe Schweißaufgaben, wobei die Verbindung im festen Zustand ohne schmelzflüssige Phase erfolgt. Voraussetzung für den Fügeprozess ist ein Grenzflächenkontakt der zu verschweißenden Oberflächen. Die Verbindungsausbildung erfolgt durch Oberflächenreaktionen und Festkörperdiffusion, die in einer inerten Prozessatmosphäre durch Anwendung von Wärme und Druck bewirkt werden.

Das Diffusionsschweißen erlaubt die Herstellung temperaturbeständiger, hochfester und vakuumdichter Verbunde. Ein Vorteil des Diffusionsschweißens besteht darin, dass ohne Zwischenschichten (Lote) gearbeitet werden kann. Dadurch wird ein chemischer Fremdeintrag vermieden und die Verbundeigenschaften sind vergleichbar mit denen eines kompakten Werkstoffes. Die Herstellung von hochkomplexen Werkzeugen über konventionelle Fertigungstechnologien stoßen an ihre Grenzen – neue Ansätze in den Fertigungstechnologien sind gefragt. Gerade in der Fertigung von temperierten Werkzeugen bietet das Diffusionsschweißen neben anderen Schweißverfahren innovative Ansätze im Bereich der additiven Fertigung [Jah15]. Im Verfahrensablauf werden zwei oder mehrere Platten übereinandergestapelt. Dabei kann es sich um verschiedene Materialien wie Metalle, z.B. Stahlwerkstoffe oder Titan, aber auch Keramiken handeln. In Diffusionsschweißanlagen werden diese im Hochvakuum oder Schutzgasatmosphäre, bei erhöhten Temperaturen und gleichzeitiger Kraftaufbringung aneinandergespreßt.

Ein wichtiges Tool im Vorfeld der Konzeptionierung von Hochleistungswerkzeugen stellt neben der CAD-Konstruktion die FEM-Simulation dar. Fertigungstechnische Prozessabläufe, angepasste konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten des Werkzeugdesigns und die Verfahrenstechnik werden somit optimiert und abgestimmt. Spezifische Fragenstellungen zur homogenen Kraft- bzw. Temperaturverteilung am Bauteil oder Diffusionsschweißanlagen mit unterschiedlichen Pressstempelkonzepten wurden berücksichtigt. Im Ergebnis dieser wurde eine Prozesskette bzw. Prozessauslegung zur additiven Fertigung erarbeitet, wie im nachfolgenden Abb. 2 dargestellt.

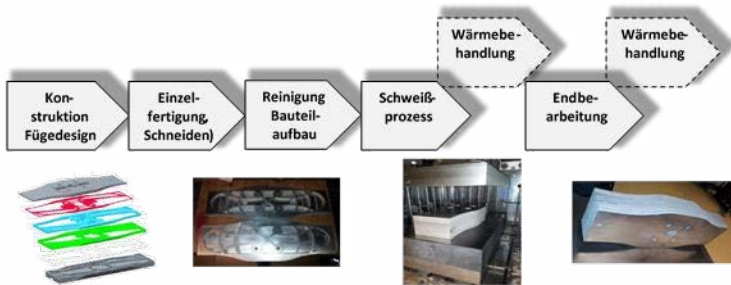


Abb. 2: Prozesskette (Bauteil- und Prozessauslegung)

In der ersten Fertigungsstrategie zur Prozessentwicklung wurden zwei Stahlplatten der Abmessung (100 x 100 x 38) mm mit mäanderförmiger Kanalgeometrie (runde sowie Vierkantquerschnitt) gefertigt (siehe Abb. 3 und 4). Das Fräsen der Kavität erfolgte auf der Bauteiloberfläche. Hierbei handelt es sich um den korrosions- und verschleißbeständigen Werkzeugstahl 1.2083, der eine Wärmeleitfähigkeit von 21 W/mK bei Raumtemperatur aufweist.

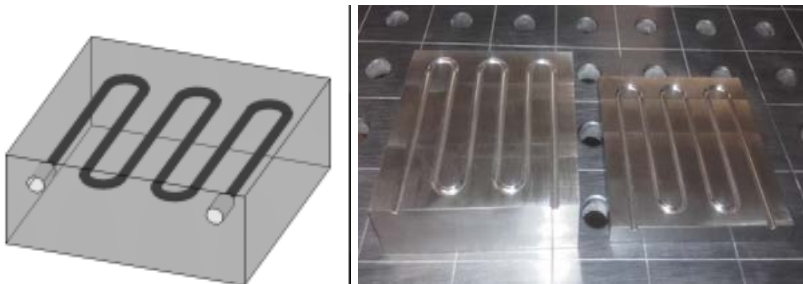


Abb. 3: CAD-Modelldarstellung (links) und gefräste Bauteilhälften (rechts)



Abb. 4: Additive Fertigung über zwei Bauteile

In experimentellen Voruntersuchungen an kleineren Bauteilgeometrien wurde das Schweißparameterfeld eingegrenzt. Variiert wurden die Schweißtemperatur, die Flächenpressung und die Schweißzeit. Da es sich hierbei um einen umwandlungsfähigen Werkzeugstahl handelt, wurden die Schweißprozesse oberhalb der Austenitisierungstemperatur

bei 1050 °C durchgeführt. Nach dem Schweißen erfolgte ein Wärmebehandlungsprozess zum Weichglühen. Eine bearbeitbare Härte von kleiner 50 HRC konnte eingestellt werden, um die Gewindeanschlüsse der Kanalöffnungen einzuarbeiten. Gegenstand weiterer Arbeiten waren metallographische Untersuchungen hinsichtlich der Schweißqualität. Es konnte eine Anbindung der Schweißoberfläche ebenso nachgewiesen werden wie die zielführende Beeinflussung des Kornwachstums durch Wärmebehandlungsprozesse.

Ein weiterer Ansatz in der Fertigungsstrategie ist der additive Aufbau über mehr als zwei Bauteilhälften aus n-Blechen mit unterschiedlicher Dicke. Ziel hierbei ist es, eine Kanalführung nicht nur eben 2-dimensional sondern auch 3-dimensional aufzubauen und abzubilden. Hierzu werden die Kanäle im Bauteil in unterschiedlichen Neigungswinkeln angeordnet, der auch bis zu 90° betragen kann. Die Fertigung solcher Kanalführungen erfolgt durch Slicing der Bauteilgeometrie in Scheiben, deren Dicke der Blechdicke entspricht. Die Fertigung der strukturierten Einzelbleche erfolgt über Wasserstrahl- oder Laserschneidprozesse (siehe Abb. 5). In einer vorgegebenen Stapelfolge erfolgt der Aufbau des Bauteils entsprechend seiner funktionalen Anforderung. Anschließend wird der Blechstapel in einem Fügeprozess geschweißt.

Die Oberflächenstruktur der Kanalwände beeinflusst maßgeblich die Strömungsmechanik. Auf Grund von Kanten entstehen Bereiche, in denen der Strömungsfluss zum Erliegen kommen kann. Dies ist durch die Feinskalierung der Blechquerschnitte beeinflussbar. Auch hier bieten Simulationsprozesse zur numerischen Strömungsmechanik Lösungsansätze und sind Bestandteil weiterer Forschungsarbeiten, die noch am realen Bauteil verifiziert werden müssen.

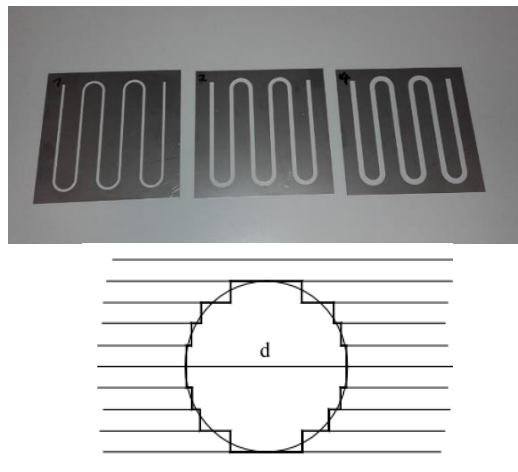


Abb. 5: Lasergeschnittene Bleche (links) und Aufbau eines Kanalquerschnittes über Bleche (rechts)

Entsprechend der Prozessauslegung erfolgte der Nachweis dieser Fertigungstechnologie an einen nichtrostenden, austenitischen CrNi-Stahl (1.4404). Dieser Stahlwerkstoff ist polierbar, korrosionsbeständig und weist eine gute Verschweißbarkeit auf. Realisiert wurde ein Bauteil mit der Abmessung (100 x 100) mm, Bauteildicke 34 mm. Der Gesamtaufbau erfolgte über 11 Bleche mit 0,5 mm Blechdicke im Kanalbereich und am restlichen Bauteil mit 2 mm Blechdicken, siehe Abb. 6. Diffusionsgeschweißt wurde dieses Bauteil bei 1100 °C.

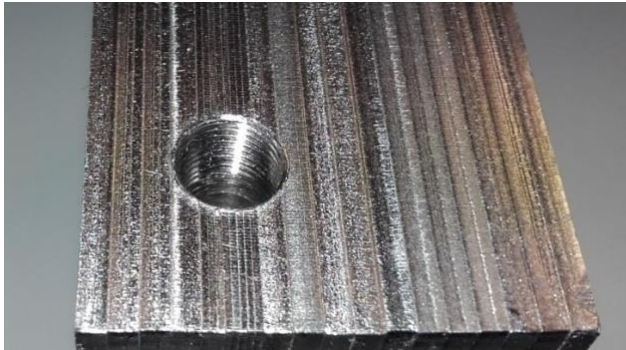


Abb. 6: Additiv gefertigtes Bauteil über Bleche

Zurzeit werden Simulationsuntersuchungen zur numerischen Strömungsmechanik durchgeführt, um das Strömungsverhalten und die Temperaturhomogenität am Bauteil zu klassifizieren. Auch die Betrachtung der Kanalgeometrie ist Gegenstand weiterer Untersuchungen, um effiziente Anforderungen zum Wärmemanagement ableiten zu können. Diese Ergebnisse dienen als Basisgrößen zur Fertigung von großformatigen Bauteilgeometrien in Bezug von Skalierungseffekten zur Bauteilmaximierung.

1.3.2 Additives Lichtbogenschweißen

Das Lichtbogenschweißen ist ein bekanntes und implementiertes Verfahren [ISO02]. Klassischerweise findet es in der manuellen Handhabung Einsatz. Wird die menschliche Hand durch einen Roboter ersetzt, sind mit diesem Verfahren vollkommen neue Einsatzmöglichkeiten gegeben. Durch CAD-Modelle die mittels CAM in entsprechende Maschinencodes und Schweißfolgepläne umgewandelt werden können, ist der Roboter in der Lage, 3D-Strukturen aufzubauen. Dabei ist die Bauraumgröße der Anlage lediglich auf den verwendeten Roboter beschränkt.

Dieses wurde bereits in der Vergangenheit erprobt [Bau12, Din14]. Dabei wurden Strukturen geschweißt und anschließend durch Fräsen nachbearbeitet. Als Ergebnis liegt am Ende des Fertigungsprozesses ein Stahl-Massivkörper vor, der genauso wie ein bearbeitetes Werkstück aus

Vollmaterial anzusehen ist, nur das die additive Fertigung mehr Freiheitsgrade bei der Formteilgestaltung zulässt [Ber18, Har14, Hen17a, Hen17b]. Abb. 7 zeigt solche Werkstücke, die additiv durch Lichtbogenschweißen hergestellt worden sind.



Abb. 7: Hergestellte Strukturen – links: Schaufelrad, mitte: Säulenquerschnitt, rechts: Tisch

Die Herausforderung im Forschungsprojekt besteht einerseits darin aus, dass die entsprechenden Standardwerkstoffe für den Werkzeug- und Formenbau schweißtechnisch erprobt werden müssen. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf einer homogenen Gefüge- und Härtestruktur und dem Erzeugen eines lunkerfreien Werkstücks. Letzteres ist insbesondere im Bereich der Kavität von Formeinsätzen bedeutsam. Andererseits muss erforscht werden, wie exakt die Abbildegenauigkeit insbesondere beim gleichzeitigen Einbetten von Temperierkanälen in das Werkstück ist. Die erreichbaren Lagetoleranzen und Kanalgeometrien sind hier von Bedeutung. Nicht zuletzt muss das Fertigungsverfahren auch den geforderten Kostenaspekten und Fertigungszeiten der Branche standhalten.

Nach der Bestimmung der zu untersuchenden Werkstoffe wurden entsprechende Schweißzusatzstoffe ausgewählt. Es wurden nach einen Versuchsplan die Parameter wie Drahtvorschub, Schweißgeschwindigkeit, Streckenenergie und Zwischenlagentemperatur verändert und die Auswirkungen auf die erzeugten Strukturen untersucht. Die Versuche beschränkten sich zunächst auf die Erzeugung einfacher Schweißbahnen (1D), Abb. 9 links. Später folgen Versuche im Bereich von Flächen (2D) bevor die Erkenntnisse auf 3D-Strukturen übertragen wurden. Untersucht wurden die mittlere Nahtbreite und -höhe in Abhängigkeit vom Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit. Hierbei handelt es sich um Untersuchungen an einzelnen Schweißnähten (1D), siehe Abb. 8.

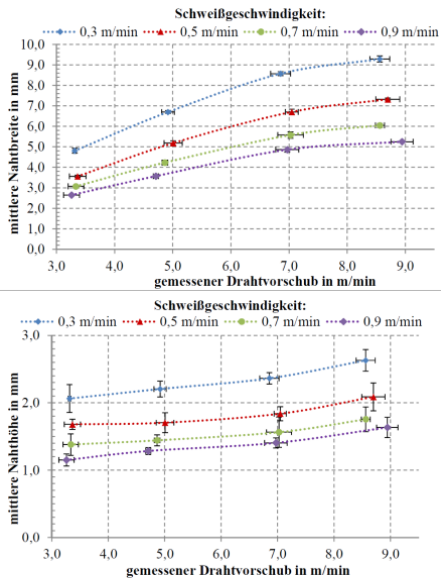


Abb. 8: Abhängigkeit der Nahtbreite und Nahthöhe von Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschub

Anschließend wurden 2D-Strukturen erzeugt, indem mehrere Schweißlagen übereinander zu einer Wand generiert wurden. Dabei wurde mit unterschiedlichen Vorschüben, Schweißgeschwindigkeiten und Zwischenlagentemperaturen gearbeitet, siehe Abb. 9 und 10. Es wurde festgestellt, dass ein geringerer Drahtvorschub, Schweißgeschwindigkeit und niedrige Zwischenlagentemperatur die besten Ergebnisse hinsichtlich der erzeugbaren geometrischen Struktur lieferten.



Abb. 9: links: 1D-Strukturen, mitte: 2D-Struktur

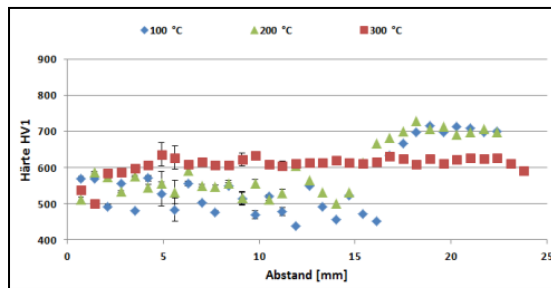


Abb. 10: Härteverlauf in der 2D-Struktur bei unterschiedlicher Zwischenlagentemperaturen

An den 2D-Strukturen sind anschließend Härtemessungen vorgenommen worden, Abb. 10. Es ist festzustellen, wenn die Zwischenlagentemperatur unter 300°C ist, dann sind deutliche Härteunterschiede und in den letzten Lagen auch eine deutliche Erhöhung der Härte vorhanden. Es zeigt sich, dass ab einer Zwischenlagentemperatur von 300°C die Schwankungen der Härteverläufe über die Struktur mit mehreren Schweißlagen sehr gering sind. Durch die Anpassung der Zwischenlagentemperatur lässt sich eine homogene Gefügestruktur herstellen. Zur Generierung der Funktionsmuster war es notwendig, für jedes Muster einen eigenen Schweißfolgeplan zu erstellen. Eine Anpassung der Schweißparameter war notwendig, um horizontale Flächen und Temperierkanäle zu erzeugen. Es konnte in Zwangslage bis 90° geschweißt werden, Abb. 11.

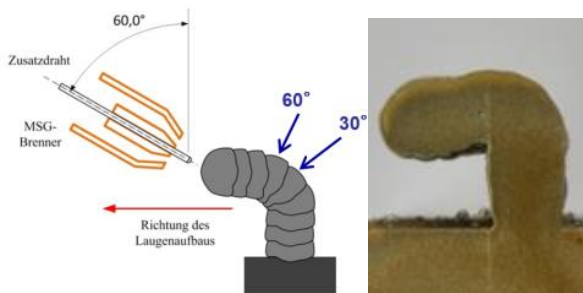


Abb. 11: in Zwangslage geschweißte Struktur

Die bisherigen Erkenntnisse der Lichtbogenschweißversuche lassen sich in fünf Punkte zusammenfassen. Die Herstellung von 3D-Bauteilen mit integrierten Temperierkanälen ist möglich. Die Geometrie der Kanäle ist noch nicht gleichmäßig. Eine Nahtbreite von 2,8 bis 9,5mm und eine Nahthöhe von 1,1 bis 2,6 mm bei einer Schweißlage sind möglich. Die mechanischen Eigenschaften sind durch die Schweißprozessparameter einstellbar. Homogene Eigenschaften in der Struktur sind temperatur- und energieabhängig. Nach Generierung der Funktionsmuster mit integrierten Kanälen, siehe Abb. 12, konnten diese zur weiteren Untersuchung mittels Thermografie genutzt werden.

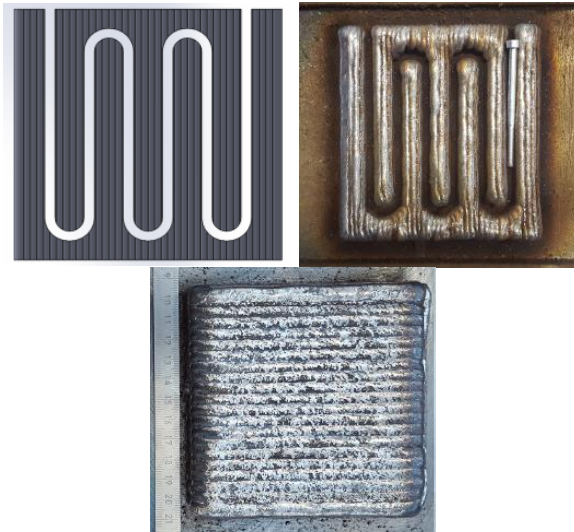


Abb. 12: CAD-Modell Temperierkanäle Funktionsmuster

1.4 Entwicklung von Funktionsmustern

Es wurden Funktionsmuster (Fläche: 100 x 100 mm) entwickelt, die sowohl im Lichtbogen- als auch im Diffusionsschweißverfahren herstellbar sind, um Thermografieuntersuchungen während einer Temperierung durchzuführen und Konstruktionsrichtlinien für derartige Bauteile abzuleiten. Vor der Fertigung der Funktionsmuster wurden diese mit zwei Analyseprogrammen Moldex-3D und Ansys bezüglich thermischen Verhalten simuliert. Zur Ermittlung des Einflusses der verschiedenen Temperierkonzepte auf ein konzipiertes Kunststoffbauteil aus Polypropylen und zur Festlegung der räumlichen Anordnung der Temperierkanäle diente Moldex-3D. Es wurden verschiedene Kriterien wie Schwindung, Verzug, Zykluszeit, etc. bei der Simulation eines variothermen Zustandes betrachtet, siehe Abb. 13 und 14. Hinsichtlich der Bindahtqualität konnte festgestellt werden, dass die Länge der Bindenähte bei der mäanderförmigen Variante gegenüber der konventionellen Variante um 37% geringer ist. Bezüglich der Bauteilkristallinität erreichte die mäanderförmige Werte von 38,5%, die Konventionelle 32,5%. Es können bessere Werte bei der mäanderförmigen Bauweise festgestellt werden. Im Programm Ansys wird die Temperierung auf Grundlage von CFD-Modelle simuliert. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die additiven Temperierkonzepte einen um 52% geringeren Druckverlust aufweisen. Durch die vielen kleinen Umlenkungen im Kanal der mäanderförmigen Variante ergeben sich an diesen Stellen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten,

Verwirbelungen und somit eine turbulenterere Strömung und bessere Wärmeübertragung. Der mäanderförmige Formeinsatz benötigt ca. 399 s und der konventionelle Formeinsatz ca. 460 s, um bei der Temperaturerhöhung von 40°C auf 60°C wieder eine homogene Oberflächentemperatur zu erreichen.

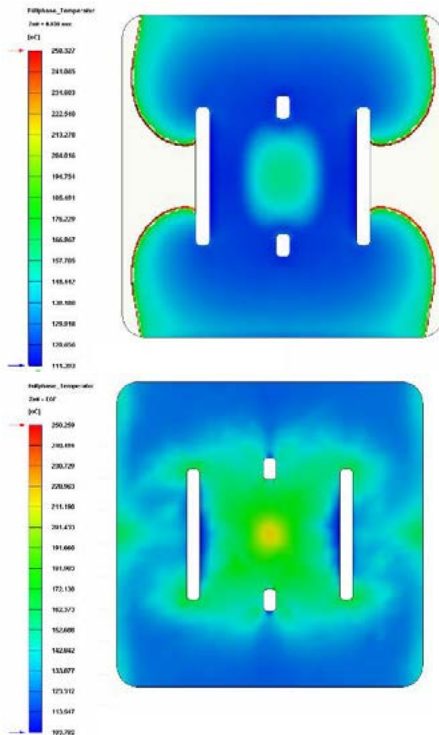


Abb. 13: Temperaturverteilung, links: während der Füllphase, rechts: am Ende der Füllphase

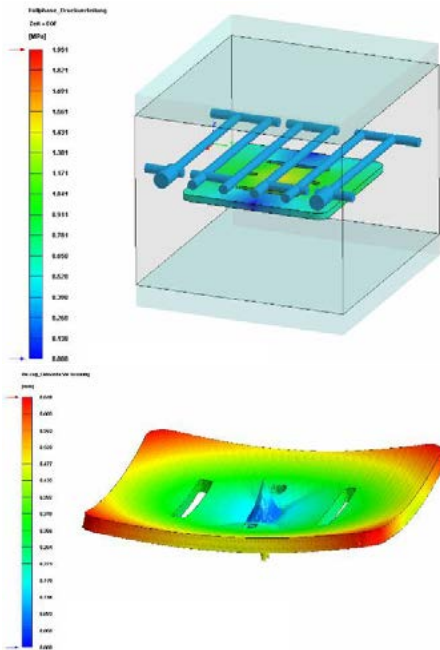


Abb. 14: links: Simulationsmodell mit Werkzeug und Temperierkanal, rechts: Verzug nach vollständiger Abkühlung

1.5 Thermografieuntersuchungen

In einem entwickelten Versuchsstand wurden die gefertigten Einsätze angeschlossen und jeweils von 40°C auf 60°C durch eine Flüssigkeit aufgewärmt und umgekehrt abgekühlt. Die Einsätze wurden dabei mit einer Thermografiekamera betrachtet und erste Ergebnisse der Simulationen bestätigt werden, siehe Abb. 15. Die Oberfläche des konventionell gefertigten Einsatzes erwärmt sich nicht homogen. Die additiv gefertigten Einsätze, besonders der mäanderförmige, erwärmen sich oberflächennah gleichmäßiger. Zur Erwärmung und Abkühlung um 20 K benötigte der Mäanderförmige ca. 53 s, wohingegen alle anderen Varianten bei gleichem Kanalquerschnitt eine Zeit von ca. 67 s benötigen. Bei der gleichzeitig stattfindenden Erfassung des Volumenstroms konnte gemessen werden, dass die mäanderförmige Variante einen Volumenstrom von 116 cm³/s die Runde und Rechteckige ca. 110 cm³/s und die konventionelle Variante 81 cm³/s erreicht. Somit ergeben sich auch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen. Im direkten Vergleich der Versuche erreicht die mäanderförmige Variante eine homogenere Oberflächentemperatur, bei schnellerer Erwärmung und höherem Volumenstrom im Vergleich zu den anderen Varianten. Die anderen additiven Einsätze (rund, rechteck) benötigen mehr Zeit zur Erwärmung wie die mäanderförmige Variante, bei etwas geringerem Volumenstrom aber homogener

Oberflächentemperatur. Die konventionelle Variante benötigt die gleiche Zeit wie die runden und rechteckigen Varianten, bei allerdings inhomogener Oberflächentemperatur und dem geringsten Volumenstrom. Es kann in den ersten Untersuchungen festgestellt werden, dass die Mäandervariante bezüglich einer variothermen Temperierung besser geeignet ist, als die anderen Bauweisen.

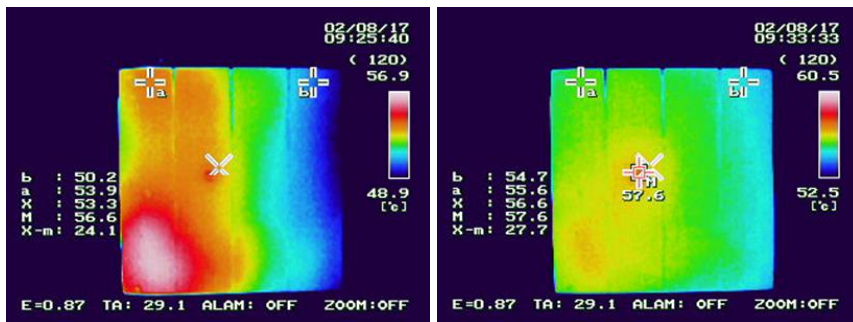


Abb. 15: links: Startphase - instationärer Zustand, rechts: Endphase - stationärer Zustand

1.6 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „TemGro“ konnte bisher nachgewiesen werden, dass es durch Anpassung der Prozessparameter mit den Verfahren Lichtbogen- und Diffusionsschweißen möglich ist, Bauteile aus Werkstoffen des Werkzeug- und Formenbaus additiv zu fertigen und die bisherigen Größenbeschränkungen bei generativen Fertigungsverfahren zu überwinden [Seu17, Ull17]. Dadurch können auch bei Großwerkzeugen derartige Verfahren zum Einsatz kommen. Danksagung: Die Autoren danken der Thüringer Aufbaubank, dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft. Das Forschungsprojekt «Temperierte Großwerkzeuge» (Laufzeit: 1. Oktober 2016 bis 30. September 2019, Projekt-Nr.: 2016 FGR 0035) wird durch das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds gefördert.

1.7 Literaturverzeichnis

- [Bau12] Baufeld, B.: Effect of deposition parameters on mechanical properties of shaped metal deposition parts. Journal of Engineering Manufacture, 2012 pp. 126-136.
- [Ber18] Bergmann, J. P.; Henckell, Ph.; Reimann, J.; Ali, Y.; Hildebrand, J.: Grundlegende wissenschaftliche Konzepterstellung zu bestehenden Herausforderungen und

- Perspektiven für die Additive Fertigung mit Lichtbogen. DVS-Berichte Band 345 (2018), ISBN 978-3-96144-038-2.
- [Böh92] Böhme, D., Hermann, F.-D.: Handbuch der Schweißverfahren – Teil II: Autogentechnik, thermisches Schneiden, Elektronen-/Laserstrahlschweißen, Reib-, Ultraschall- und Diffusionsschweißen, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1992.
- [DIN13] Standard DIN 16742, 10.2013: Plastics moulded parts - Tolerances and acceptance conditions.
- [Din14] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.: A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73(2014) 1–4, pp 173–183.
- [Har14] Hartke, M.; Günther, K.; Bergmann, J.P.: Untersuchung zur geregelten, energiereduzierten Kurzlichtbogentechnik als generatives Fertigungsverfahren. DVS-Bericht, Band 306 (2014), S. 31–35.
- [Hen17a] Henckell, P.; Ali, Y.; Günther, K.; Bergmann, J. P.: Wire based additive manufacturing with GMAW - Researches on temperature and time towards homogeneous material properties. IIW International Conference, Shanghai, China, 2017.
- [Hen17b] Henckell, P.; Günther, K.; Ali, Y.; Bergmann, J. P.; Scholz, J.; Forêt, P: The Influence of Gas Cooling in Context of Wire Arc Additive Manufacturing—A Novel Strategy of Affecting Grain Structure and Size. TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, Springer International Publishing, 2017, pp. 147–156
- [ISO02] Guideline ISO 857-1:1998, 11.2002: Welding and allied processes.
- [Jah15] Jahn, S., Gemse, F., Broich, U., Sändig, S.: Efficient Diffusion Bonding of Large Scale Parts. Materials Science Forum, 2015, pp. 838–839.
- [Men07] Menges, G., Michaeli, W., Mohren P.: Spritzgießwerkzeuge – Auslegung, Bau, Anwendung, 6, Carl Hanser Verlag, München, 2007.
- [Mic11] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 6, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [Seu17] Seul, Th., Ullrich, J., Bergmann, J. P., Hildebrand, J., Ali, Y., Jahn, S., Dahms, St., Eilenberger, D.: Additive Fertigung von

temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen- und Diffusionsschweißtechnik. VDWF im Dialog 2/2017, S. 30-33.

- [Ull17] Ullrich, J., Seul, Th., Eilenberger, D., Dahms, St., Jahn, S., Ali, Y., Hildebrand, J., Bergmann, J. P.: Additive Fertigung von temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen- und Diffusionsschweißtechnik. Technomer 2017, Tagungsband, S.105, ISBN: 978-3-939382-13-3.

Direct Polymer Additive Tooling – Verwendung von Polymerwerkzeugen für den Einsatz im Kleinserien Spritzguss **Direct Polymer Additive Tooling – Use of polymer tools for small series injection moulding**

*Achim Kampker, Johannes Triebs, Sebastian Kawollek und Peter Ayvaz
PEM der RWTH Aachen University*

1 Kurzfassung

Rapid Tooling ist ein in der Literatur nicht eindeutig definierter Begriff der ganz allgemein die schnelle Werkzeugherstellung unter Verwendung verschiedener Fertigungsverfahren beschreibt. Die Gliederung der Fertigungsverfahren für die Werkzeugherstellung in konventionelle und additive Verfahren stellt einen möglichen Ansatz dar. Entlang der Prozesskette zur Werkzeugherstellung können weiterhin direkte und indirekte Verfahren unterschieden werden. Direct Polymer Additive Tooling umschließt hierbei die direkte additive Fertigung von Formwerkzeugen und –einsätzen aus Polymermaterialien für verschiedene Endbauteilherstellungsprozesse.

Die hier vorgestellte vergleichende Studie zeigt das wirtschaftliche Potenzial additiv hergestellter Kunststoff-Spritzgussformen unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Eigenschaften der Werkzeuge und der daraus resultierenden Bauteilqualität.

Die PolyJet-Technologie wird genutzt, um zwei Polymer-Spritzgussformen in "Digital ABS" und "Rigur" zu drucken; ein konventionell gefrästes Werkzeug aus Aluminium dient als Referenz. Um Formstabilität, Oberflächenrauigkeit, Werkzeugstandzeit und Wirtschaftlichkeit zu ermitteln, werden Formgebungsversuche mit ABS-Teilematerial durchgeführt.

Bei beiden PolyJet-Werkstoffen konnte ähnliches Verhalten beobachtet werden. Das Werkzeug aus "Rigur" hielt 166 Zyklen, "Digital ABS" mehr als 250 Zyklen stand. Formteile aus beiden Werkzeugen erreichten über alle produzierten Teile hinweg eine Maßhaltigkeit, die mit den Referenzbauteilen vergleichbar ist. Vergleichbare Oberflächenrauigkeiten konnten nicht erzielt werden. Insgesamt erreicht "Digital ABS" eine Gesamtkostenersparnis von 10 %, "Rigur" von 15 % für die betrachtete Anwendung.

Unterschiede in den Formteileigenschaften und geometrischen Grenzen wurden nicht untersucht. Weitere Versuchsreihen werden die resultierenden Formteileigenschaften untersuchen und die geometrischen Grenzen gedruckter Polymerwerkzeuge berücksichtigen. Diese Studie liefert einen direkten technologischen und wirtschaftlichen Vergleich zwischen konventionell gefrästen Aluminiumwerkzeugen und additiv hergestellten Polymer-Formeinsätzen. Die erzielten Ergebnisse

zeigen das Potenzial von additiv hergestellten Polymerwerkzeugen für Spritzgussanwendungen.

2 Short Abstract

Rapid tooling is a term which is not clearly defined in literature. The term describes the fast tool production using different manufacturing processes. The categorisation of manufacturing processes for tool production into conventional and additive processes represents a possible approach. A further distinction can be made between direct and indirect processes along the process chain for tool manufacture. Direct Polymer Additive Tooling encompasses the direct additive production of moulds and inserts from polymer materials for various final component manufacturing processes.

The comparative study presented here demonstrates the economic potential of additive manufactured polymer injection moulds, taking into account mechanical and thermal performance of the moulds and the resulting part quality.

PolyJet technology was used to 3D-print injection moulding tools in "Digital ABS" and "Rigur", a conventionally milled tool in aluminium served as a reference. Moulding tests with ABS part material were carried out to determine form stability, surface roughness, tool life and economic potential.

Similar behaviour and part quality were observed for both PolyJet tool materials. The "Rigur" tool lasted 166 cycles before failure, "Digital ABS" more than 250 without failure, but with noticeable tool wear. Moulded parts from both tools achieved dimensional accuracy over all parts produced comparable to the reference. Comparable surface roughness could not be reached. All in all, "Digital ABS" achieves total cost savings of 10 %, "Rigur" of 15 % for the considered application.

Differences in moulded part properties and geometric limits were not investigated. Further investigations will examine resulting moulded part properties and consider geometric limitation of printed polymer tools.

This study provides a direct technological and economic comparison between conventionally milled aluminium tools and additive manufactured polymer mould inserts. The obtained results show the potential of additive manufactured polymer tools for injection moulding applications.

3 Langfassung

Introduction

The growing speed of innovation leads to an ever-increasing variety of product variants with shorter product lifecycles that forces product development to develop an ever-increasing number of product variants

faster and more cost-efficiently (Kampker *et al.*, 2016b). For all tool-bound manufacturing processes this results in demanding requirements for tool manufacturing as costs and time-to-market need to be reduced (Altan *et al.*, 2001; Levy *et al.*, 2003; Rahmati, 2014). New process technology combinations, such as additive tooling for polyurethane-reaction injection moulding or traditional injection moulding can be used to decrease costs and shorten time-to-market (Kampker *et al.*, 2016a).

A variety of technologies and materials for rapid tool manufacturing are available which can be used to face the challenges of increasing product variants and shorter product lifecycles by decreasing cost and lead times of conventional tool manufacturing techniques like milling or electro-discharge machining (Rahmati, 2014). In the literature, these technologies are often referred to as Rapid Tooling. However, the term “Rapid Tooling” is neither clearly defined nor is there a common understanding in what structure tool manufacturing technologies should be organized under this expression. Chua *et al.* (1999) defines rapid tooling as the adoption of rapid prototyping techniques for tool manufacturing. The used technologies can be generally categorized by anticipated length of manufacturing run into soft tooling and hard tooling; and by their manufacturing process chain into indirect tooling and direct tooling. Rosochowski and Matuszak (2000) suggest a practical classification of rapid tooling into patterns for casting, indirect tooling and direct tooling defining rapid tooling as multi-step procedures involving various tooling options. According to Levy *et al.* (2003) rapid tooling, in contrast to rapid prototyping, aims only at tools able to withstand several thousand or even million parts before final wear out. A classification into direct and indirect technologies as well as a distinction in mould material into polymer and metal moulds is given to categorize the process chains for mould manufacturing highlighting the importance of the right mould material selection for a given use case. For Rahmati (2014) rapid tooling is the use of additive manufacturing technologies for production moulds, further distinguishing between direct and indirect tooling technologies as well as soft and hard tooling. Eqbal *et al.* (2015) defines rapid tooling as a progression of rapid prototyping where fast tooling production is achieved using prototypes manufactured with rapid prototyping technologies. Their given structuring is the same Rosochowski and Matuszak (2000) use. All the above mentioned definitions and classifications use the term “rapid tooling” to some extent as a synonym for the application of additive manufacturing technologies for tool manufacturing, whereas the term actually describes the quick manufacturing of tools. Traditional milling technologies such as high speed cutting can also be considered as manufacturing technology for rapid tool manufacturing and would therefore also be a rapid tooling technology. Gibson *et al.* (2015) emphasizes this common blurriness in terminology when discussing the term rapid prototyping as synonym for the use of additive manufacturing. The term does not consider the basic

principle in these technologies in that they all use an additive approach to fabricate parts. As a common consensus the use of the term Additive Manufacturing is adopted.

Equally one could summarize the entirety of additive manufacturing technologies for tooling within all tooling technologies as Additive Tooling. From a technological point of view, it makes sense to further distinguish the material fabricated with the additive manufacturing process. Along the process chain in tool manufacturing, the use of additive manufacturing technologies can be further distinguished into direct and indirect applications. Using the final part material as an additional classification gives an idea of the possible area of application of the additive manufacturing technology. Figure 1 shows the proposed categorisation. For small series injection moulding, the highest lead time and cost potentials can be achieved with fast and cheap tool production. Due to the small part quantities, cycle time and tool life have a smaller impact on overall lead time and cost. Direct tool production processes tend to have a shorter process chain and thus shorter tool lead times, while polymer additive manufacturing technologies tend to have a cost advantage compared to metal additive manufacturing technologies. Hence, the paper focuses on Direct Polymer Additive Tooling (DPAT) in the following.

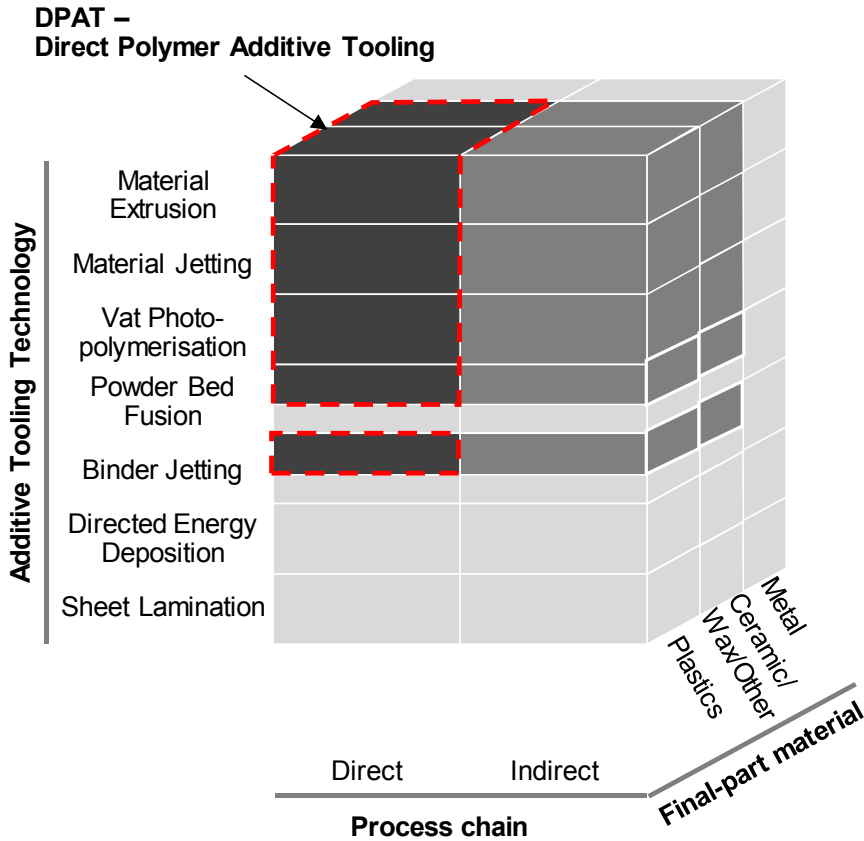


Figure 1: Categorization of Direct Polymer Additive Tooling

Previous work on PolyJet moulds

Prior case studies on DPAT-technologies such as the PolyJet technology have investigated the technological potential with respect to resulting part quality of different tooling materials in comparison to conventional manufactured tools for different applications. Oroszlany *et al.* (2010) shows that materials from PolyJet technology can withstand more cycles in injection moulding than a Al_2O_3 -filled epoxy resin (20 compared to 10 from the epoxy resin). Noble *et al.* (2014) found, that resin coated 3D-printed tools using PolyJet technology show a potential for use in injection moulding for optical components. Volpato *et al.* (2016) demonstrated that dimensional stability and surface roughness of moulds printed with PolyJet technology remained stable over a period 50 cycles. Further, resulting mechanical part material properties differed little compared to material properties from parts manufactured with a conventional steel mould. Tábi *et al.* (2016) showed, that the thermal conductivity behaviour of PolyJet printed tools could be used for small

series production of nucleated PLA and achieve similar thermomechanical properties as in temperature controlled moulds for mass production.

Very little work investigating technological and economic potential in combination was done. Existing case studies evaluating economic potential for specific use cases are nearly exclusively done by equipment manufacturers and cannot be seen as completely neutral. In this work, mould inserts for a specific use case manufactured via PolyJet technology are compared to a conventional milled aluminium tool. The effect of the different mould material properties on the part dimensions, surface roughness and insert performance throughout the cycles were evaluated. An economic comparison with respect to cost and lead time was additionally undertaken. This work addresses the technological and economic implications of using DPAT-technologies for small series production for injection moulding.

Methodology

Reference part and application requirements

The reference part used for this case is an exterior part of the e.GO Kart - a new generation of electric bicycle with four wheels for inner-city mobility. The part itself is a design element on the steering wheel, which also provides a covering function for the adjustment mechanism of the steering rod. The required material is ABS (Novodur P2MC). According to DIN 16742 a general manufacturing accuracy of TG6 applies for this part and material. Figure 2 shows the reference part and tolerated manufacturing dimensions to determine whether the produced parts are within tolerance. Absolute tolerance bandwidth was derived according to DIN 16742 depending on actual dimension size and type. Nominal dimensions and tolerances are summarized in Table 1. A total of 120 parts were to be manufactured.

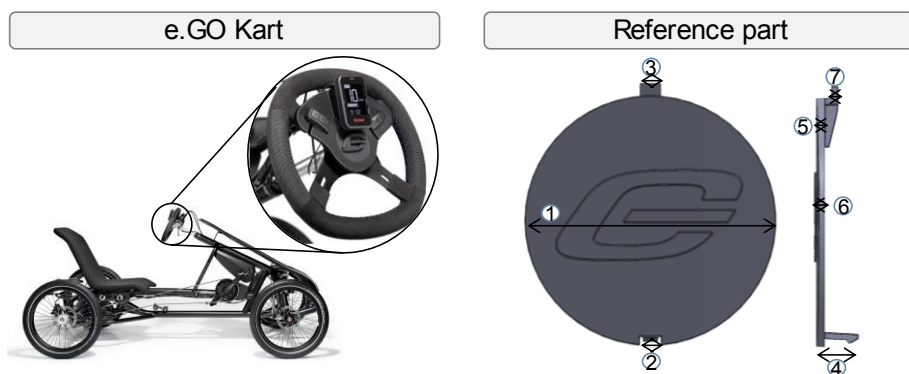


Figure 2: Reference Part

Table 1: Tolerated dimensions of reference part

Dimension	Type	L _{CAD} [mm]	TG6 [mm]
1. Diameter	T	58,8	± 0,37
2. Recess for disassembly	T	5,09	± 0,12
3. Width of guide hook	T	4,82	± 0,12
4. Length of snap hook	NT	9,90	± 0,22
5. Thickness top edge	NT	1,90	± 0,12
6. Thickness left edge	NT	1,33	± 0,12
7. Thickness of guide hook	NT	1,50	± 0,12
T: tool-bound		NT: non tool-bound	

Mould insert and mould base geometry

The mould insert geometry used in this study is shown in Figure 3. For ease of mounting and to support the printed moulds during the injection process a mould base with 140 mm x 100 mm in length and width was used. Depth of the mould base is adjustable to allow for a broader variety of parts to be manufactured. Dimensions of the printed mould inserts were adjusted to fit into the mould base geometry. There was no active cooling system integrated.

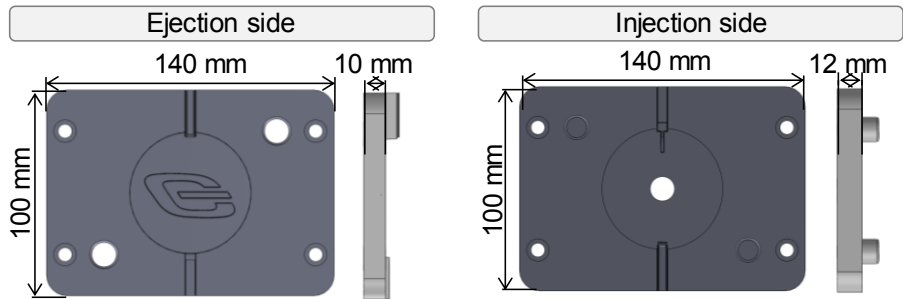


Figure 3: Mould insert geometry

Two mould inserts were printed, one in Digital ABS and one in Rigur both using PolyJet technology. It should be noted, that only the two printed mould inserts were used in combination with the mould base since the use case study was undertaken after the original parts were produced