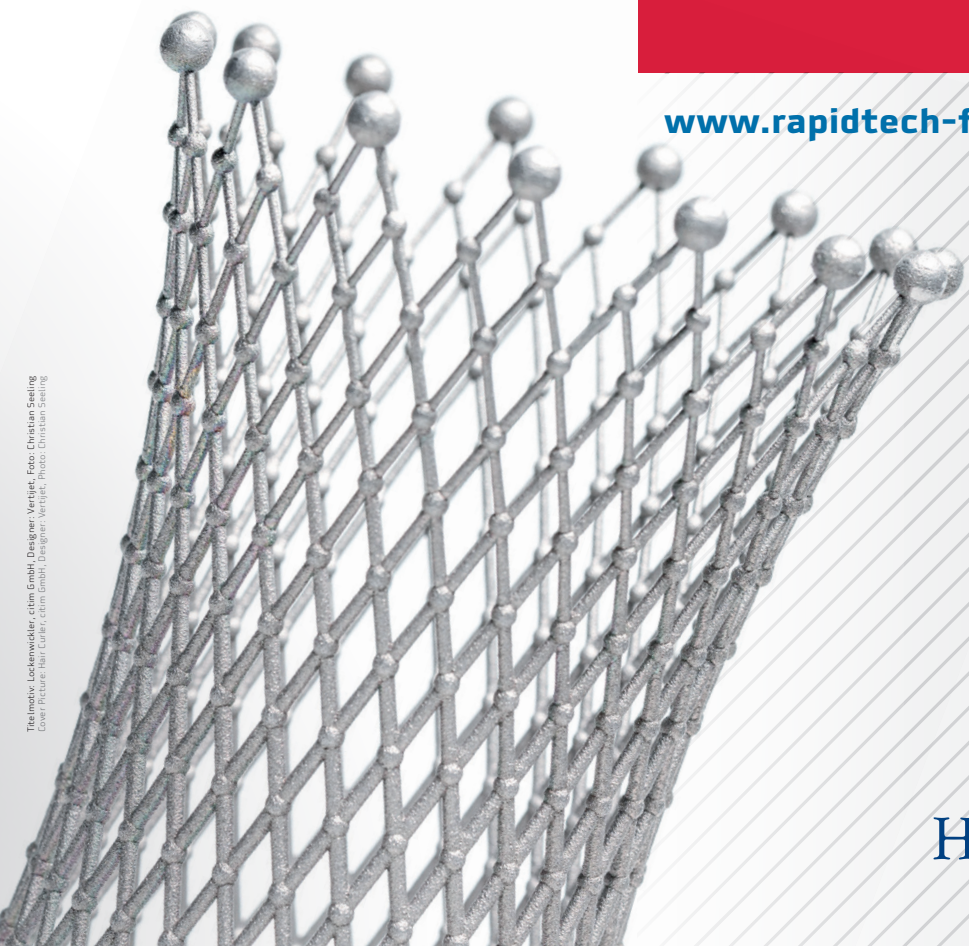
RAPID.TECH
FABCON 3.D

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



Titelmotiv: Lockenwickler, citim GmbH, Designer: Vertijet, Foto: Christian Seeling
Cover Picture: Hair Curler, citim GmbH, Designer: Vertijet, Photo: Christian Seeling

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 ***U***
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 13

Additive Fertigung von temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen- und Diffusionsschweißtechnik ***U***
Additive Manufacturing of tempered large tools with wire arc and diffusion welding technology
Jörg Hildebrand 29

Direct Polymer Additive Tooling – Verwendung von Polymerwerkzeugen für den Einsatz im Kleinserien Spritzguss ***U***
Direct Polymer Additive Tooling – Use of polymer tools for small series injection moulding
Achim Kampker, Johannes Triebs, Sebastian Kawollek, Peter Ayvaz ... 45

Part 2: Forum Design

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

Konstruktionsrichtlinien für eine softwaregestützte Anpassung von additiv gefertigten Bauteilen im Hinblick auf eine robuste Fertigung ***S***
Design guidelines for a software-supported adaptation of additively manufactured components with regard to a robust production
Stefan Lammers, Johannes Tominski, Sebastian Magerkohl, Thomas Künneke, Tobias Lieneke, Detmar Zimmer 81

Design Guidelines zur Auswahl geeigneter Supporttypen für verschiedene Anwendungsfälle im Bereich Laserstrahlschmelzen – Auf dem Weg zur automatisierten Supportgenerierung ***S***
Design Guidelines for adequate support types with regard to different use cases in the field of laser beam melting – Leading towards automated support generation
Melanie Gralow, Heiko Blunk, Philipp Imgrund, Dirk Herzog, Claus Emmelmann 95

Konstruktionsrestriktionen für das Indirect Tooling mit FDM und Feinguss ***S***
Design restrictions for indirect tooling with FDM and precision casting
F. Weiss, E. Garrelts, D. Roth, H. Binz, M. Brunetti, T. Karcher 111

Ein Beitrag zur Anpassung bestehender Konstruktionsmethodiken an die additiven Fertigungsverfahren ***S***
A contribution to the adaptation of existing design methods to additive manufacturing processes
Thomas Künneke, Sonja Bücker, Tobias Lieneke, Stefan Lammers, Detmar Zimmer 128

Neue Chancen für die Werkzeugtechnik in der Partikelschaumverarbeitung ***S***
New opportunities for the tool technology in particle foam processing
Johannes Schütz, Jonas Beck, Marcus Schmiedeck, Claus Emmelmann 144

Part 3: Forum on Law

Wie industrieller 3D-Druck die Ersatzteilfertigung der Zukunft verändern wird ***U***
Spare parts on demand – Spare part production by industrial 3D-printing
Marius Lakomiec 163

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
C. G. Kolb, 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
Maximilian Schniedenharn, 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
Franziska Kaut, Valentin Cepus, Wolfgang Grellmann, Ralf Lach 217

Entwicklung alternativer Polyamidwerkstoffe für das Laser-Sintern ***S***
Development of alternative polyamide materials for the laser sintering process
Andreas Wegner, 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
Andreas Wörz, 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
Livia C. Wiedau, Lars Meyer, Andreas Wegner, Gerd Witt 267

Innovative Pulver-Auftragsstrategien im Laser-Sinter-Prozess – Einflussuntersuchung der Packungsdichte in Korrelation zur Oberflächenrauheit ***S***
Innovative Pulver-Auftragsstrategien im Laser-Sinter-Prozess – Einflussuntersuchung der Packungsdichte in Korrelation zur Oberflächenrauheit
Lars Meyer, Livia C. Wiedau, Andreas Wegner, Gerd Witt 283

Pulverschüttungsanalyse für das selektive Laser-Sintern mittels Computertomographie ***S***
Powder Bulk Analysis for selective laser sintering by computer tomography
M. Zhao, S. Greiner, K. Wudy, J. Schmidt, W. Peukert, D. Drummer ... 299

Simulation des (quasi-)simultanen Laserstrahlschmelzens zur Herstellung von Multi-Material-Bauteilen aus Polymeren ***S***
Simulation of a new approach of laser sintering for the fabrication of multi-material polymer parts
Thomas Stichel, Tobias Laumer, Michael Schmidt 312

Herstellung von 3-D-Multimaterialbauteilen aus Kupfer-Chrom-Zirkonium und Werkzeugstahl 1.2709 ***S***
Herstellung von 3-D-Multimaterialbauteilen aus Kupfer-Chrom-Zirkonium und Werkzeugstahl 1.2709
Christine Anstätt, Christian Seidel, Gunther Reinhart 330

Parameterstudie zur Verarbeitung metallischer Gläser auf Zr-Basis mit dem Laser-Strahlschmelzverfahren ***S***
Parameter study about processing Zr-based bulk metallic glass with Laser beam melting
Jan Wegner, Stefan Kleszczynski, Maximilian Frey, Simon Hechler, Gerd Witt, Ralf Busch 345

CAD-integrierte Schichtdatenerzeugung für feine Gitterstrukturen und Bestimmung geeigneter Fertigungsparameter für Laser-Strahlschmelzen ***S***
CAD-integrated slice data generation for fine lattice structures and determination of suitable manufacturing parameters for laser beam melting
Hannes Korn, Peter Koch, Florian Bittner, Richard Kordaß, Stefan Holtzhausen, Bernhard Müller, Christine Schöne, Ralph Stelzer 361

Part 6: Forum Medical, Dental & Orthopaedic Technology

Der Einfluss offenporiger, lastragender Strukturen auf die Primärstabilität von Press-Fit Hüftpfannen ***U***
The influence of open-porous load-bearing structures on the primary stability of acetabular press-fit cups
Volker Weißmann, Rainer Bader, Harald Hansmann, Christian Boss .. 379

Gittergenerierung auf Basis diskreter Voxeldaten ***U***
Lattice structure generation based on discrete voxel data
Stefan Holtzhausen, Peter Koch, Stefan Dahlke, Ralph Stelzer 393

Entwicklung von steifigkeitsangepassten, lasergeschmolzenen Kurzschaft-Hüftendoprothesen ***U***
Development of stiffness-adapted lasermelted short stem hip implants
L. Risse, B. Schramm, J.-P. Brüggemann, G. Kullmer, H.A. Richard ... 405

Verbesserte Lösungen für personalisierte Gesundheits-anwendungen durch das Additive Manufacturing von Silikonelastomeren ***U***
Enhanced AM solutions for personalized health care applications with silicones Elastomers
Jean-Marc Francès, Damien Djian, Karsten Schlichter, Rémi Thiria, E-J.Courtial, C.Marquette, C.Perrinet, R.Fulchiron, A.Jaffard, J.Troccaz..... 418

Part 7: Forum 3D Printed Electronics & Functions

Funktionalisierung von additiv gefertigten Bauteilen mittels laserstrukturierbarer MID-Lacke ***U***
Functionalization of additively manufactured components using laser-structurable MID coatings
Thomas Mager, Christoph Jürgenhake, Roman Dumitrescu 437

Integration beweglicher und sensorischer Elemente in additiv gefertigte Bauteile am Beispiel eines Greifers ***U***
Integration of flexible and sensory elements in additively manufactured components using the example of a gripper
Richard Kordaß, Elisa Starruß, Torsten Schnabel, Franz Marquardt ... 458

3D gedruckte eingebettete lichtführende Strukturen für Sensor- und Kommunikationsanwendungen ***U***
3D Printing of Embedded Light Guiding Structures towards Sensing and Communication Applications
Oliver Stübbe, Franz-Josef Villmer, Andrea Huxol..... 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, Markus Effinger, 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, Sandra Zühlke, 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
Mathias Sebastian Palm, Fabian Riß, Michael F. Zäh 522

Part 10: Forum Contract Additive Manufacturing

Urheberrecht, Lizensierung, PLM Datenversorgung und Plagiatschutz in der additiven Lieferkette ***U***
Copyright, Licensing, PLM Data Delivery and Counterfeit Protection in the Additive Supply Chain
Josip Stjepandić, 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 ist 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.

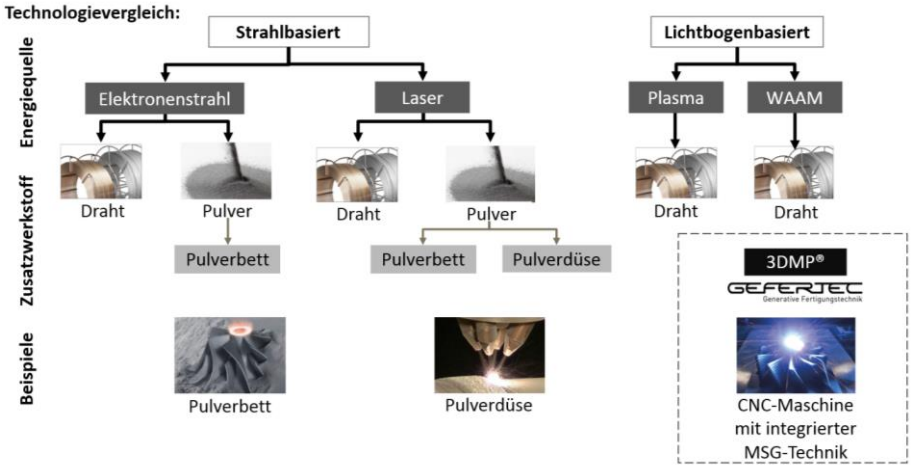


Abbildung 1: Technologievergleich metallbasierte additive Fertigungsverfahren

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.

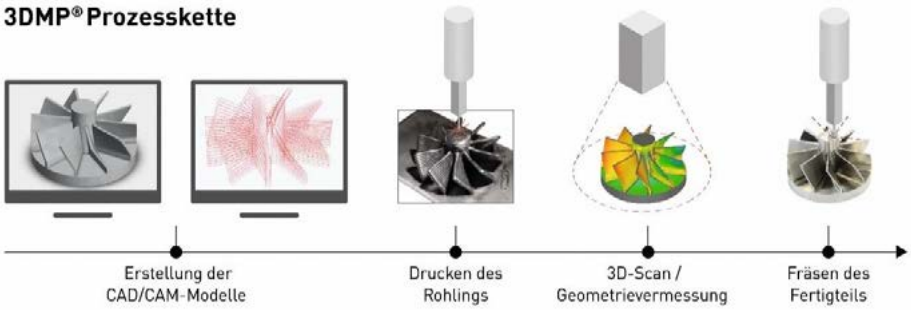


Abbildung 2: konventionelle Prozesskette 3DMP®-Verfahren

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]

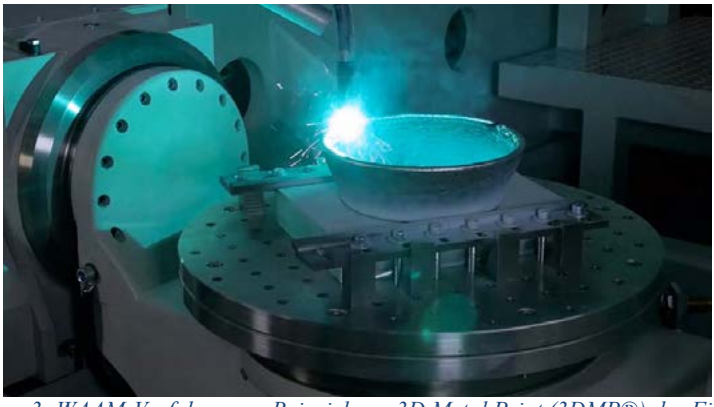


Abbildung 3: WAAM-Verfahren am Beispiel von 3D Metal Print (3DMP®) der Firma GEFERTEC

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.

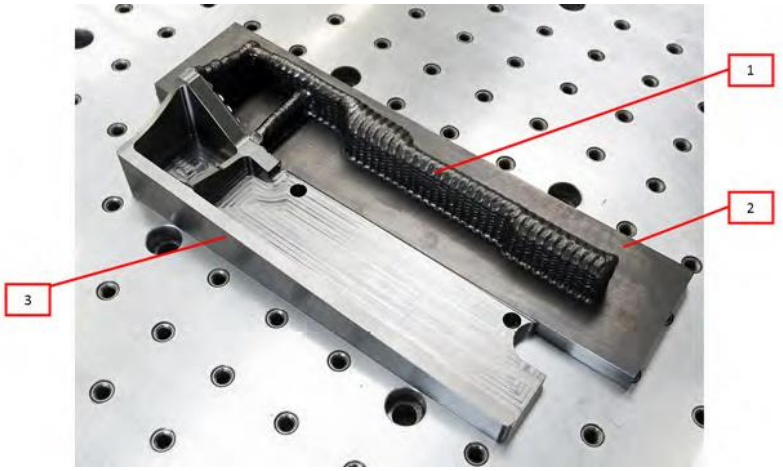


Abbildung 4: Ausstellungsteil aus Titan (TiAl6V4), nach 3DMP®-Verfahren [1] auf eine Substratplatte [2] hergestellt und anschließend auf einer Fräsmaschine [3] zur Hälfte auf Endmaß gefräst.

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 VARIAXIX 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 [dm³]	180	850
1.3	Achsen	3	5
2.1	Additives Verfahren	SLS	WAAM
2.2	Aufbaurate [cm³/h]	40	bis zu 1.300
2.3	Schichthöhe [mm]	0,015 - 0,015	> 3
2.4	Schichtbreite [mm]	µm-Breich	3-8
2.5	Materialvielfallt	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).

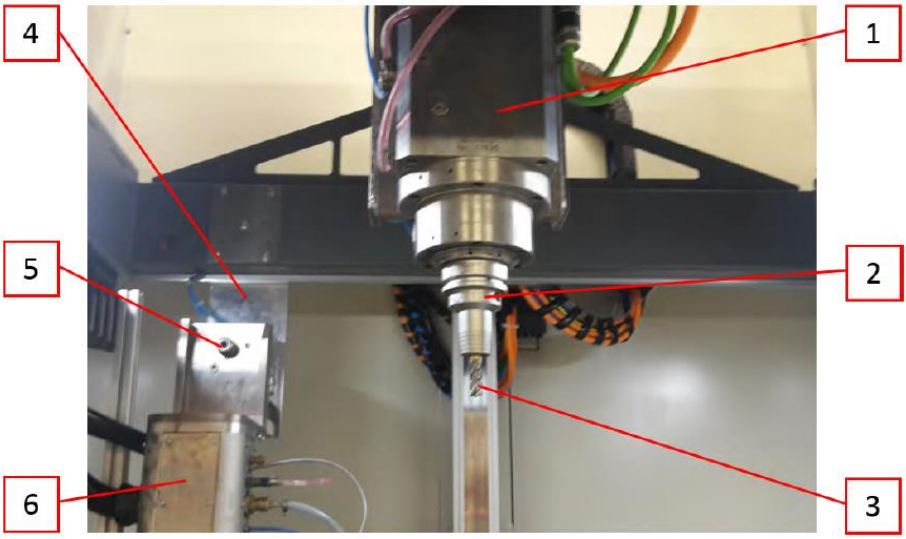


Abbildung 5: Fräsmodul der GTarc+, 1 Werkzeugspindel, 2 Werkzeughalter, 3 Schaftfräser, 4 Ablageplatz für Schweißbrenner, 5 Aufnahme für Spannsystem, 6 Schweißbrenner

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.

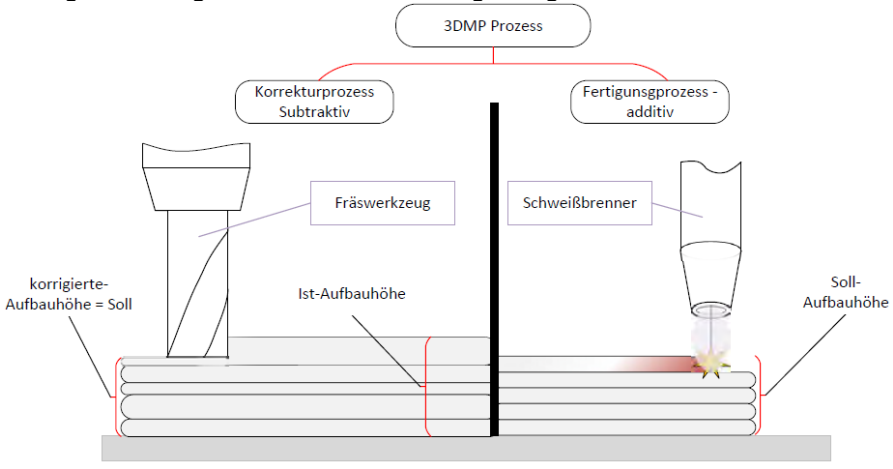


Abbildung 6: Höhenkorrektur des Werkstücks mit Fräsen, 3DMP im Soll-Ist-Vergleich (Abbildung nicht maßstabsgetreu)

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 Aufbauschneidenbildung 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.

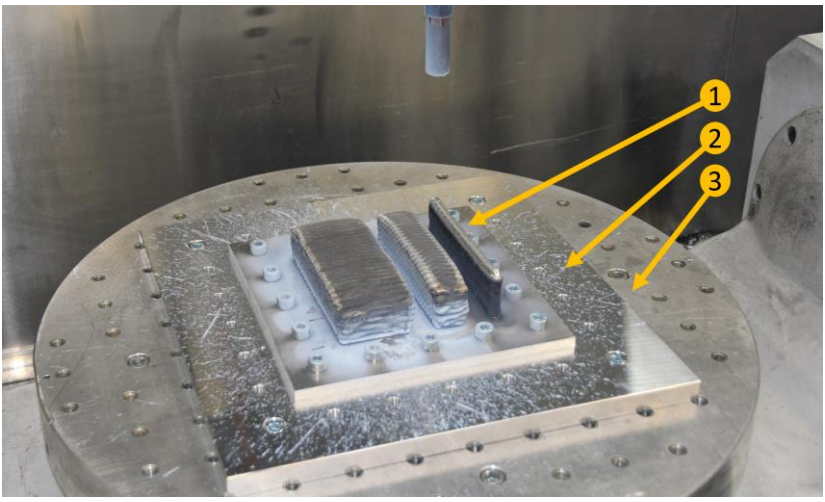


Abbildung 7: Versuchsaufbau Fräsbearbeitung [1] Substratplatte, [2] Adapterplatte, [3] Maschinentisch

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 verzunderten 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 Krafteinwirkung 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.

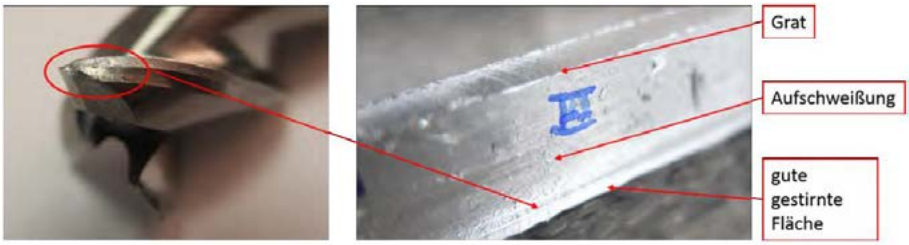


Abbildung 8: Materialaufschweißungen am Fräser und auf dem Steg, Höhe 60mm

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 Gleichlauffräsen (B) 60 und 20mm Höhe, ap=10 mm, ae=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 lc 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) 180 645	Empfehlung	Steg 2 (z=3) 190 1021	Empfehlung	Steg 3 (z=4) 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_a ↘ v_c, v_f ↗	-	a_a, 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 ausströmende Luft. Diese wird direkt auf den Fräser gerichtet. Auch Systeme auf CO_2-Basis könnten entsprechende Kühlleistungen erreichen. Bei diesem Prinzip wird flüssiges CO_2 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: