

RAPID.TECH **FABCON 3.D**

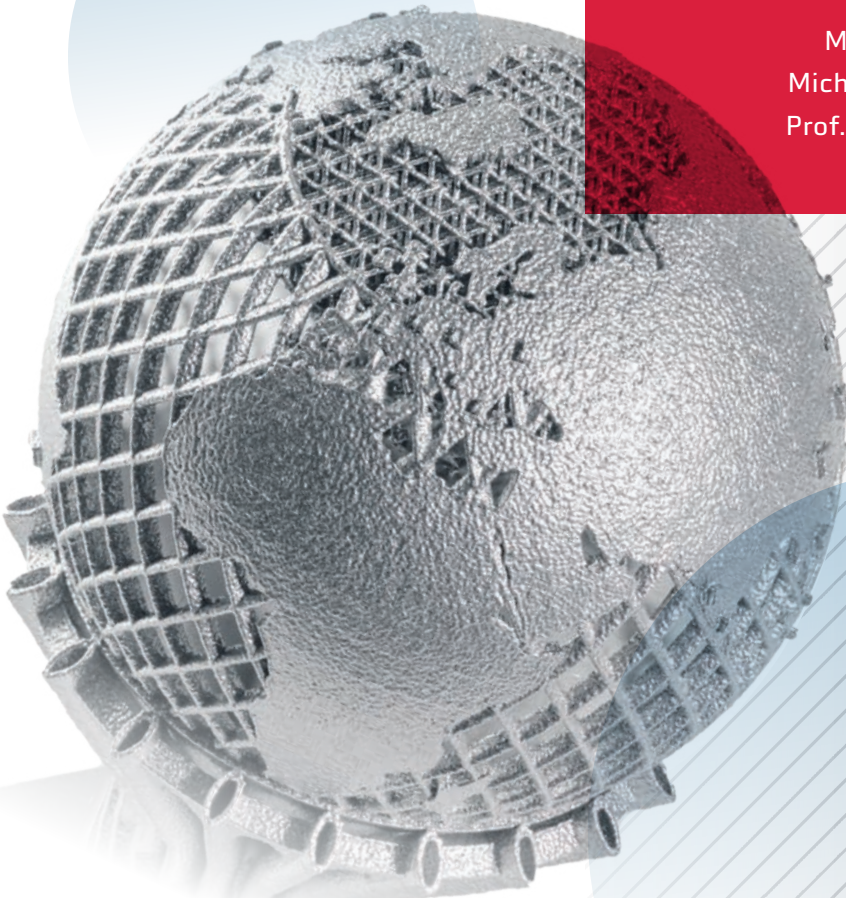
International Hub for Additive Manufacturing:
Exhibition + Conference + Networking

PROCEEDINGS OF THE 16TH RAPID.TECH CONFERENCE ERFURT, GERMANY, 25–27 JUNE 2019

Editor

Michael Kynast
Michael Eichmann
Prof. Dr. Gerd Witt

Cover picture: "Tüchlein der Globe", Turmfaser und Systemtechnik GmbH — Photo | Foto: Christian Stelling



www.rapidtech-fabcon.com

HANSER

Kynast / Eichmann / Witt (Hrsg.)

Rapid.Tech + FabCon 3.D

**International Hub for Additive Manufacturing:
Exhibition + Conference + Networking**



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Michael Kynast
Michael Eichmann
Gerd Witt (Hrsg.)

RapidTech + FabCon 3.D

International Hub for Additive Manufacturing:
Exhibition + Conference + Networking

Proceedings of the 16th Rapid.Tech Conference
Erfurt, Germany, 25–27 June 2019

HANSER

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Herausgeber, Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Herausgeber, Autoren und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. 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 Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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 Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Druck und Bindung: BoD – Books on Demand, Norderstedt

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46223-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46244-1

Table of Contents

The proceedings contain **scientific articles (S)** and **user reports (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 Medical, Dental & Orthopaedic Technology

| | |
|---|------------------------|
| Direkter Aligner für Kieferorthopädie, der eine hohe Zähigkeit aufweist und nicht gelb wird High toughness and yellowing-free Direct Aligner for Orthodontics Hiroaki Okamoto | U 11 |
|---|------------------------|

Part 2: Forum Automotive Industry

| | |
|---|------------------------|
| Additive Fertigung bei TMG - vom Windkanalmodell in den Motorsport zur Kleinserie Additive manufacturing at TMG – from wind tunnel models to motorsports to small scale production Alexander Liebold..... | U 23 |
| Additiv-Guss ein neuartiger Hybridansatz für automobile Anwendungen Additive-Casting a novel hybrid approach for automotive application Markus Oettel, Sebastian Flügel, Stefan Polenz, Andreas Kleine, Mathias Gebauer, Bernhard Müller | U 34 |
| Additive Fertigung sicherheitsrelevanter Bauteile in der Automobil-industrie – wie stabil ist die Prozesskette? Additive Manufacturing of safety-relevant Components in the Automotive Industry – how stable is the process chain? Alexander Klose..... | U 49 |

| | |
|---|----------|
| Charakterisierung lasergesinterter Bauteile aus aluminium- verstärktem Polyamid 12 am Beispiel von Schiffsmodellpropellern Characterisation of Laser Sintered Parts made of Aluminium-Reinforced Polyamide 12 for Usage in a Model Testing of Marine Screw Propellers <u>Anna Tarasova</u> , Andreas Wegner, Livia C. Wiedau, Gerrit Aßbrock, Benjamin Friedhoff, Jan Sehrt, Gerd Witt 211 | S |
| Einflussuntersuchung von verschiedenen Nachbehandlungs- methoden auf die Oberflächentopologie von laser-gesinterter Polyamid 12 Proben Examination of the influence of various post-treatment methods on the surface topology of laser sintered polyamide 12 samples <u>Livia C. Wiedau</u> , Lars Meyer, Andreas Wegner, Gerd Witt 228 | S |
| Analyse der Temperaturführung in der roboterbasierten Materialextrusion mit Polypropylen Analysis of the temperature control in extrusion-based additive manufacturing of polypropylene <u>Sebastian Hertle</u> , Andreas Wörz, Dietmar Drummer 244 | S |
| Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im FLM- Verfahren durch lokale Laservorerwärmung und Endlosfaser- verstärkung Improving the mechanical properties in FLM-processing by locally laser-preheating and continuous fiber reinforcement <u>Cornelius Kühn</u> , Bernd Niese, Gerd Witt 258 | S |
| Interaktion der Ausgangspulverkennwerte und der Belichtungsparameter im selektiven Laserstrahlschmelzen von Kunst- stoffen auf resultierende Bauteileigenschaften The interdependency of powder properties and exposure parameters in selective laser beam melting of polymers on part properties <u>Andreas Jaksch</u> , Katrin Wudy, Dietmar Drummer 274 | S |
| Pulverpartikel-Design im Laser-Sintern: Materialoptimierung von technischem Kunststoffpulver Powder particles design in laser sintering: Material optimization of technical plastic powder <u>Markus Piechotta</u> , Andreas Wegner, Timur Ünlü, Gerd Witt 287 | S |

| | |
|--|----------|
| Geometriespezifische Prozessführung zur Steigerung der Effizienz beim Laser Powder Bed Fusion (LPBF) | S |
| Geometry-specific process control to increase the efficiency of Laser Powder Bed Fusion (LPBF) | |
| <u>Tobias Pichler</u> , Johannes Henrich Schleifenbaum | 303 |

| | |
|--|----------|
| Mikroskopisches Stützdesign für die nass-chemische Nachbearbeitung von LPBF-gefertigten Bauteilen aus AISi10Mg | S |
| Microscopic support design for the wet-chemical post processing of LPBF manufactured parts made of AISi10Mg | |
| <u>Tobias Schmithüsen</u> , Johannes Henrich Schleifenbaum, Thomas Laag | 318 |

Part 6: Forum Tool, Mould & Jig Construction

| | |
|--|----------|
| Additive Fertigung von verschleißbeständigen Werkstoffen | U |
| Additive Manufacturing of wear-resistant materials | |
| <u>M. Jurisch</u> , P. Kluge, J. Boes, B. Klöden, T. Weißgärber, B. Kieback..... | 336 |

Part 7: Forum Plastics

| | |
|---|----------|
| Methodik zur Qualifizierung des Lasersinter Prozesses für die Serienfertigung | U |
| Methodology for Qualification of Laser Sintering Serial Production | |
| <u>Helge Klippstein</u> , Hans-Joachim Schmid | 350 |

Part 8: Forum Metal

| | |
|--|----------|
| Komplette Produktionslinie zur Herstellung metallischer und Multimaterial – Bauteile | U |
| Complete production line for metallic and multimaterial components | |
| Uwe Lohse | 367 |

| | |
|--|----------|
| Mechanisches Verhalten L-PBF-gefertigter Gitterstrukturen | U |
| Mechanical Properties of L-PBF-made Lattice Structures | |
| <u>Lena Farahbod-Sternahl</u> , Yasin Ugur, Christian Läßig, Anna Schulze, Tobias Thiede, Christoph Haberland, Sebastian Piegert, Martin Leary, Heinz Voggenreiter, Gerd Witt..... | 389 |

Part 9: Forum Aviation

| | |
|--|----------|
| Industrialisierung der Nachbearbeitung für Ti6Al4V additive gefertigte Bauteile | U |
| Industrialization of post-processing for Ti6Al4V additive manufacturing parts | |
| Viviane Kettermann Fernandes | 404 |

| | |
|---|----------|
| Wellenlängenabhängige Herstellung keramischer Werkstoffe für Luft- und Raumfahrtanwendungen mittels Lasertechnologie | U |
| Wavelength Dependent Laser Processing of Ceramic Materials for Aerospace and Space Applications | |
| <u>S. Polenz</u> , W. Kunz, M. Rößler, E. López, F. Brückner, C. Leyens | 418 |

Part 10: Forum Standardisation & EHS

| | |
|--|----------|
| Anwendersicherheit beim Laser-Strahlschmelzen von Metall- pulvern im Rahmen der VDI-Richtlinie 3405 | U |
| User Safety of Laser Beam Melting of Metal Powder within VDI 3405 | |
| <u>Christian Bay</u> , Alexander Mahr..... | 431 |

Greeting

Dear readers,

It gives me great pleasure to present you the official proceedings of the 16th international Rapid.Tech conference in Erfurt.

Within the Rapid.Tech conference more than 100 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.

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.

We feel it is important to offer you a balanced portfolio of contributions, so that you can obtain an overview of the state of the art in the industry while also exchanging ideas on an expert level.

The submissions of these proceedings belong to the forums Medical, Dental & Orthopaedic Technology, Automotive Industry, Design, Software & Processes, AM Science, Tool, Mould & Jig Construction, Plastics, Metal, Aviation as well as Standardisation & EHS.

Michael Kynast
CEO
Messe Erfurt GmbH

Advisory Council & Review Committee

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, **Shapertools**
- Daniel Hund, **RÖSLER Oberflächentechnik GmbH**
- 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. Dominik Rietzel, **BMW Group**
- 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. Claus Emmelmann, **Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik, TU Hamburg-Harburg**
- Dr. Dominik Rietzel, **BMW Group**
- Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, **Lehrstuhl für Photonische Technologien, FAU Erlangen-Nürnberg**
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 & 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 Medical, Dental &
Orthopaedic Technology

Direkter Aligner für Kieferorthopädie, der eine hohe Zähigkeit aufweist und nicht gelb wird

High toughness and yellowing-free Direct Aligner for Orthodontics

Hiroaki Okamoto

Okamoto Chemical Ind. Co. Ltd,

Kurzfassung

Aligner for Orthodontics erstellt derzeit ein Gebissmodell mit einem 3D-Drucker und darauf befindlichen Thermoplasten, um einen Aligner zu erstellen. Um den Prozess zu rationalisieren, haben verschiedene Unternehmen lichterhärtbare Harze für die direkte Herstellung (Direct Aligner) unter Verwendung von 3D-Druckern vorgeschlagen, aber es gibt immer noch nicht genügend befriedigende Elemente wie Zähigkeit und Farbe mit Biokompatibilität.

Photopolymer besteht aus Monomermaterialien und Initiatorsystem. Grundsätzlich verwenden wir kein Monomermaterial wie Bisphenol A, das lebende Organismen beim Design beeinflusst, aber nur sicheres Material wurde als photohärtbares Harz entwickelt. Dem neuen lichterhärtbaren Harz gelang es, Zähigkeit zu verleihen, indem ein neues Urethanmonomer neu entworfen wurde und das neue Ausgangssystem gefunden wurde, das Licht absorbiert und die Reaktion initiiert. Eine starke Stabilität der Klarheit (Gelbfärbung) wird durch Überprüfung aller Monomere zur Anpassung der Verbindung zur Strukturierung der Struktur gegen Gelbfärbung und durch Einführung eines Antigelbungsinitiatorsystems erreicht. Es ist uns gelungen, die Gelbfärbung des Formkörpers extrem zu unterdrücken.

Es ist uns gelungen, ein Aushärtungsharz für den direkten Aligner zu schaffen, der sicher ist, eine hohe Zähigkeit und eine hohe Stabilität der Klarheit aufweist. Ich werde andere Eigenschaften dieses direkten Aligners beschreiben, indem ich den chemischen und physikalischen Gesichtspunkt verwende.

Short Abstract

Aligner for Orthodontics currently produces a dentition model using a 3D printer and thermoplastics on it to create an aligner. In order to streamline the process, various companies have proposed light curable resins for directly manufacturing (direct aligner) using 3D printers, but there are not still enough satisfying items such as toughness and color with biocompatibility.

Photopolymer is composed of monomer materials and initiator system, we basically do not use monomer material such as bisphenol A which affects living organisms in designing, but only safe material was designed as a photocurable resin. The new light curable resin was succeeded in giving toughness by using newly designing a special urethane monomer and by finding the new starting

system which absorbs light and initiates the reaction. Strong stability of clearness (anti-yellowing) is acquired by reviewing all the monomers for adapting anti-yellow structure-taking compound, and by introducing anti-yellowing initiator system. We succeeded in extremely suppressing the yellowing of the shaped object.

We succeeded in creating curing resin for direct aligner which is having safe, having heavy toughness and strong stability of clearness. And I will describe other characteristics of this direct aligner by using chemical and physical view point.

1 Langfassung

A) Introduction

History of 3D printers in general¹⁾

Mr. Hideo Kodama of Nagoya City Industrial Research Institute in 1980 applied for a patent for a 3D printer in the photofabrication method using a photocurable resin (Photopolymer). This is a method (SLA) of slicing an object in the Z-axis and curing the slice by light on a stage in a bathtub container of a Photopolymer, and the world's first 3D printer concept and experiment was published. However, because no request for examination of this patent was made, American patent holder Chuck Hal, who will launch 3D Systems, will obtain a patent. Therefore, until now, when making the object, it has been made by scraping the raw material, but this method is a completely new loading method.

Feature of 3D printer

Shaped object by the 3D printer's is characterized by the additional processing that repeats the lamination in comparison to the conventional removal processing and deformation processing, but the other major characteristic is that it is possible to jump in time and place if data is installed. For example, data taken out in Europe can be processed in Asia, can be shaped in Africa, data can be stored semi-permanently, also data can be taken out at any time, and data can be formed in any place by 3D printer.

Applied to medical and dental care fields

With the progress of computers, especially with the speeding up of graphic processing speed, three-dimensional data obtained from medical imaging equipment such as X-ray CT equipment and MRI are projected three-dimensionally on a display, and this image is used for diagnosis and surgery assistance. Furthermore, at the time of planning an operation plan Using this 3D data, 3D printer was used to create a

3D biological model, and a medical treatment was started to repeat simulation and perform safe treatment. Furthermore, remote diagnosis and treatment has started using this technology. For example, in the case of surgery when there is no specialist doctor in one place, attempts are being made to create a living body model using a 3D printer elsewhere and medical specialists provide medical support for doctors from another place.

Aligner present / problems (biocompatibility, physical properties (impact, directionality))

In the field of dental care, 3D printers are also actively used. In particular, the necessary dentition model is designed using CAD / CAM, and the formed dentition model is shaped by the 3D printer with a Photopolymer. Invisalign is attracting attention as one of the leading-edge technology company in vacuum thermocompression bonding of thermoplastic resin, in removing molds, and in cutting unnecessary parts to create an orthodontic aligner.

However, as described below, it cannot be easily manufactured in the long process. (Figure 1)

When forming the aligner directly (Direct Aligner) with a 3D printer is in the following process.

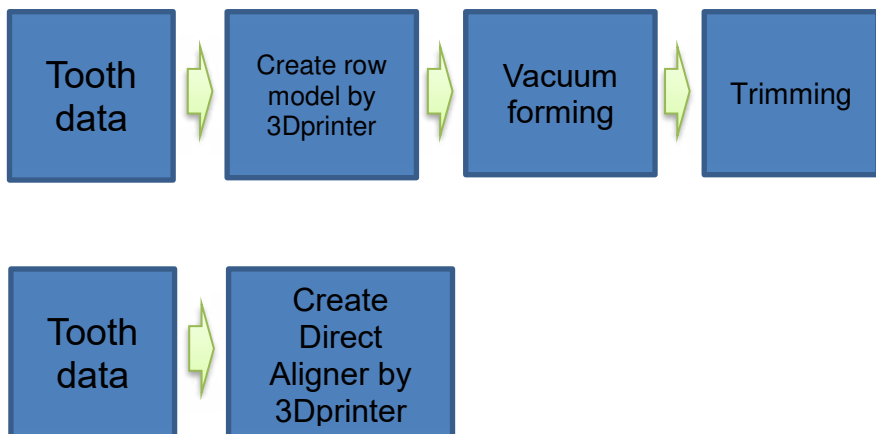


Fig.1 Normal aligner process diagram and direct aligner process diagram

The process can be significantly rationalized. As a result, when you have space for placing 3D printers and an infrastructure for receiving data, you can install and model anywhere in the world.

However, the existing Photopolymer for 3D printer has a problem in achieving both biocompatibility (ISO 10993) and physical properties. A shaped product using a Photopolymer with biocompatibility for a 3D printer is high enough in hardness but fragile, and easily yellowed and not suitable for an aligner. Currently, it is only used for temporarily used surgical guides and splints. There is a strong demand for the development of Photopolymer that simultaneously satisfy the performance, biocompatibility, toughness and yellowing resistance required for Direct Aligners.

B) Content

① Biocompatible Reign

A polymer is synthesized by polymerizing monomers, but the polymerization is usually the sum (additivity) of the properties of the monomers. For example, if a monomer that is a constituent of a polymer is safe, a polymer composed of that monomer is safe.

Polymerization reaction (Maintaining the properties of monomers)²⁾

The monomer constituting the polymer is composed by a basic skeleton, and end group having a double bond, and the nature of the monomer is that of the basic skeleton (This example is Tricyclodecane, Fig. 2). A polymerization reaction (polymerizing reaction) for producing a polymer is a radical reaction in which double bonds are opened and reacted without decomposition of monomers, and there is no structural change of the basic skeleton (Fig. 3). Therefore, the nature of the basic skeleton is maintained as it is.



Fig.2 Example Tricyclodecane dimethanol Diacrylate

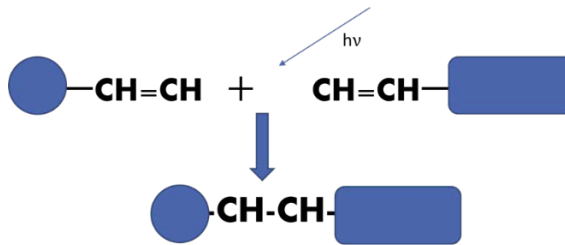


Fig. 3 Conceptual diagram of polymerization reaction

Cytotoxicity test results

With the above considerations in mind, we designed a Photopolymer that shapes the aligner. First, monomers with high safety were listed, and a Photopolymer was constituted only with the monomers. Here, the chemical world shows LD50 (oral toxicity), which is a representative safety of chemicals defined by the United Nations (Table 1).

| SDS Information | Okamoto Chemicals Resin | A | B | C |
|--------------------|---------------------------------------|--|---|---|
| Low Risk | Skin irritation | Skin irritation Toxic for aquatic organisms | Skin irritation Flammable liquid and gas | Toxic when swallowed Can cause skin allergic response Respiratory system irritation |
| High Risk | • None | • N/A | • N/A | • Severe eye damage • Organ damage • Very high toxicity to living organisms |
| Pictograms | | | | |
| Oral Toxicity LD50 | >2,000 mg/kg High safety | • N/A | • N/A | • 1,314 mg/kg |
| Biocompatibility | — | Ila(EU) | Ila(EU) | Ila(EU) |

Table 1 SDS comparison of other manufacturers

Thus, the chemical safety of the newly designed photocurable resin is excellent. Using this photocurable resin, it was shaped by a 3D printer and post-treated, and a cytotoxicity test, which is a representative index of biocompatibility, was conducted in advance. The results of cytotoxicity test (LDH-TEST) and cell proliferation test (WST1-TEST) are shown (FIG. 4).

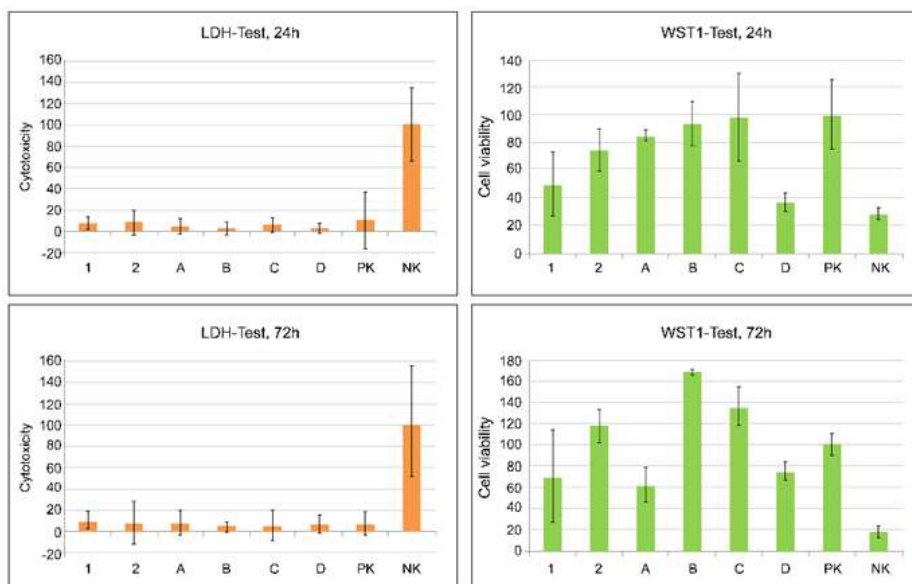


Fig. 4 Result for cellular toxicity and proliferation experiments

PK is non-cytotoxic, and NK is an indicator of cytotoxicity. The test sample is C. The results of LDH showed values equivalent to culture co-PK for 24 hours and 72 hours. In addition, the results of WST1 were approximately the same as PK for both 24 hour and 72-hour culture tests. Thus, this photocurable resin represents a very safe substance.

② Physical property

Not satisfaction of impact resistance

The physical properties of molded objects in general-purpose plastics currently used and 3D printers are compared (Table 2)³.

| | Flexural modulus (MPa) | Izod Impact Strength (J/m) | Elongation at Break (%) |
|---------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|
| D | 2470 | 50 | 9 |
| E | 9030 | 20 | 1.2 |
| PP | 1100~1600 | 2.9~7.8 | 200~700 |
| ABS | 1900~2800 | 75~640 | 1.5~80 |
| Polycarbonate | 2400 | 640~854 | 110~120 |
| Okamoto | 6600 | 24 | 4 |

Table 2 PhysiTable 2 Physical property comparison table

The flexural modulus shows larger in 3D printer but the Izod impact and breaking strain rate shows a larger value for general purpose plastics. The values show that general-purpose plastics are softer and more elastic and tougher than 3D printer models, but not hard².

The difference between Photoreaction and Polymer synthesis

The photoreaction (modeling of a 3D printer) is a radical reaction, the radical generator absorbs light and generates radicals, which attack the monomers and the monomers become radicals and react in a chain reaction. A major feature of this reaction is that high density light generates high density radicals which are explosively converted from monomer to polymer.

In contrast from the radical reaction, normal polymer synthesis is a sequential reaction using a catalyst, and monomers activated by the catalyst etc. react sequentially with the monomer and react sequentially while increasing the molecular weight.

At the radical reaction by light, the end of the reaction is collision of activated monomers, radicals of high density exist, and collision of radicals is likely to occur in high probability.

On the other hand, in the case of a sequential reaction using a catalyst, only the monomer in contact with the catalyst becomes the active species, so the concentration of the active species is relatively low density and the reaction is difficult to complete.

Molecular weight distribution

Although the distribution of molecular weight is narrow and small when the polymerization was generated by high density radicals at photoreaction. In contrast, the general polymer synthesis has a broad molecular weight distribution and a large molecular weight (FIG. 5).

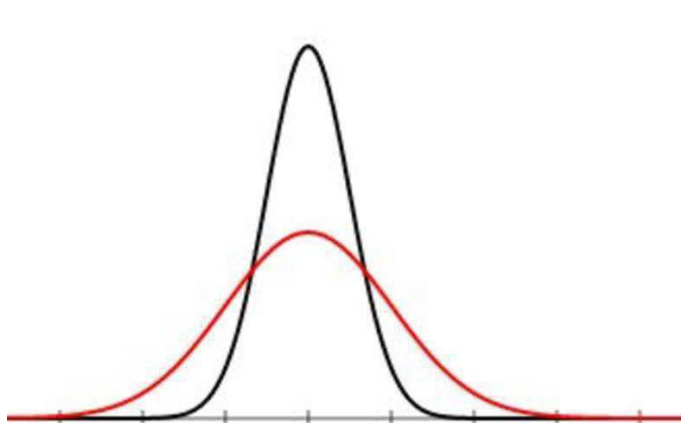


Fig. 5 Conceptual diagram of molecular weight distribution High peaks are photoreaction · Broad peaks are normal synthesize

Although it is very difficult to measure the molecular weight of the polymer solid, it is measured by GPC after being dissolved in high temperature O-dichlorobenzene⁴). The molecular weight of PP is 5,5000 with 40,000 and 70,000 for tail. On the other hand, the molecular weight of urethane acrylate by photocuring is 3,000, and the tails are at 2,800 and 3,200. In general, brittle plastics shows small molecular weight (10,000 or less) and/or shows small weight distribution.

Introduction of urethane monomer⁵).

Since the molecular weight cannot be easily increased, instead of increasing the molecular weight, the polymer chains were attracted to each other to introduce a urethane bonding to increased strength. Urethane has highly polar N and O atoms as shown by -CONH-, and can interact with the polymer chains present around it and can form hydrogen bonds.

Directionality

Direction of impact resistance

Although the formation of the 3D printer is stacked in the stacking direction, it has strength in the direction perpendicular to the stacking

surface but is much weaker in the horizontal direction than in the vertical direction (Figure 6).

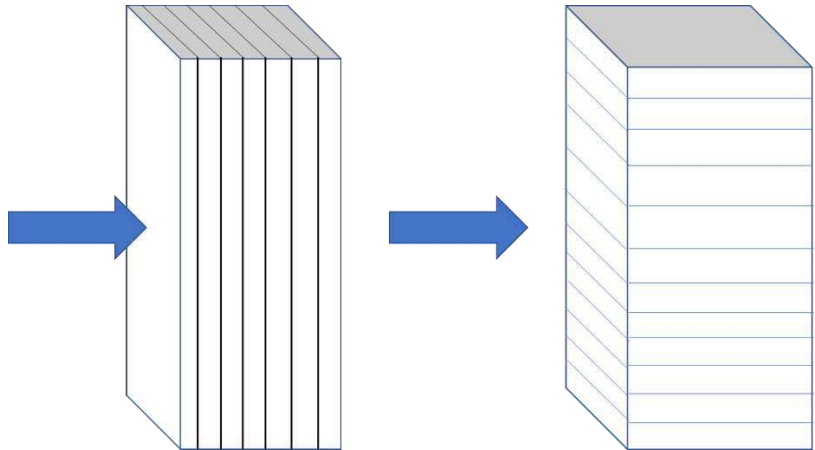


Fig. 6 Directionality of modeling of 3D printer

Anker effect

Significant improvement can be achieved by introducing a urethane group into the polymer.

③ Yellowing

The mechanism of yellowing of transparent resin is that plastic which does not absorb in the visible light region forms a conjugated system by ultraviolet light and heat etc. As a result, the absorption wavelength of the plastic is red-shifted, and absorption is moved to the visible light region and yellowed 1) 2). Here, an example of quinoid structural change, which is a typical yellowing phenomenon, is shown (Fig. 7)⁶.

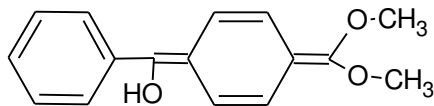


Fig. 7 Quinoid structure (yellow)

In this way, it is necessary to select a monomer and a photo initiator to utilize a structure or reaction in which the conjugated system does not increase or does not easily increase.

Physical properties of Direct Aligner

When a 0.75 mm-thick test sample formed by the 3D printer of a photopolymer prepared based on the above knowledge was bent broken with 180 degrees bent at 364 times. This Direct Aligner shows 476 J/m at Izod Impact Strength and 93 MPa at Flexural Modulus. No yellowing was observed after 24 hours of light irradiation with a 365 nm low pressure mercury lamp

C) Conclusion

The photocurable resin for 3D printer has not been able to satisfy the physical properties until now with the biocompatible resin. By devising the safety of the monomer used for the photocurable resin and the photoreaction, we were able to design a resin that achieves both biocompatibility and physical properties.

D) Acknowledgements

Direct aligner was molded by Rapid Manufacturing Akihabara Inc.

Cytotoxicity was measured by BURMS.

Aligner in general was advised by Associate Professor Haruhisa Nakano and Professor Koutaro Maki of Showa University, School of Dentistry and

We were advised Professor Takashi Karatsu of Chiba University, Faculty of Engineering, Department of Applied Chemistry & Biotechnology.

E) References

- 1) Hod Lipson et al., "The New World in 2040", Toyo Keizai INC. (2014)
So Mizuno, "How does the world change with 3D printers",
Takarajimasha Inc.(2013)
Kazuo Kadota, "Introduction to Dr. Kadota's 3D Printers", Blue Backs,
Kodansha LTD (2015)
- 2) Hiroshi Maki "The Nature of Polymers", 265, Chijin Shokan Co.,
LTD(1988)
- 3) Data released by KDA
- 4) Kaneka Research, molecular weight measurement of polyolefins
- 5) Kiyoshi Akamatsu "Applied technology of photosensitive resin", 173, CMC
Publishing Co.,Ltd., (2003).
- 6) Kenichi Koseki "UV curing trouble cause and its countermeasure
casebook", 20, Technical Information institute Co.,LTD (2011)
Hiromi Takano, Planning and Editing "Optimization of Latest UV Curing
Resin", 116, Technical Information institute Co.,LTD (2008)

Part 2:

Forum Automotive Industry

Additive Fertigung bei TMG - vom Windkanalmodell in den Motorsport zur Kleinserie

Additive manufacturing at TMG – from wind tunnel models to motorsports to small scale production

Alexander Liebold
Toyota Motorsports GmbH (TMG)

Kurzfassung

TMG ist ein einzigartiges, auf Hochtechnologie spezialisiertes Test- und Entwicklungsunternehmen im Herzen Europas - in Köln, Deutschland. Die TMG ist eine hundertprozentige Tochtergesellschaft der Toyota Motor Corporation. Die zahlreichen hochtechnologischen Dienstleistungen des Unternehmens werden nicht nur von TMG genutzt, wir bieten unseren vollen Leistungsumfang im selben Maße für Fremdkunden an, wie dies bereits für die verschiedenen Unternehmen der Toyota-Familie üblich ist.

Durch die Aktivitäten an der Spitze des internationalen Motorsports hat sich TMG zu einem Komplettanbieter für spezialisierte Dienstleistungen entwickelt, spezialisiert auf Forschung und Entwicklung im Bereich Automobilbau und Motorsport. TMG ist in der Lage auch für Ihr Projekt individuell zugeschnittene Lösungen zu entwickeln. Nicht umsonst trägt unser Unternehmen den Beinamen „The Home of High Performance“.

Zu diesen Dienstleistungen gehört seit 2001 auch die additive Fertigung bei TMG. Die beiden Verfahren des „Selective Laser Sintering“ (SLS) und der „Sterolithography“ (SLA) wurden durch die aktive und gemeinsame Entwicklung mit unseren Partnern stetig weiterentwickelt, so dass wir über die Fertigung von Windkanalmodellen schnell den Einstieg in die Fertigung von Motorsport-Prototypen und Funktionsbauteilen gefunden haben. Der Vortrag gibt Einblicke in die Historie, den Status Quo, aktuelle Themen und Problemstellungen, sowie einen Ausblick auf die Zukunft der additiven Fertigung von Kunststoffbauteilen bei TMG.

Short Abstract

TMG is a unique high-performance testing and development facility located in the centre of Europe; in Cologne, Germany.

Specialising in high technology, TMG is a wholly-owned subsidiary of the Toyota Motor Corporation and offers its services to external clients as well as members of the Toyota family.

From its roots at the pinnacle of world motorsport, TMG has developed into a one-stop shop for specialised services, not just from the automotive world but from most sectors.

We offer individually-tailored solutions to enhance your next project, from full project fulfilment to specific services – all under one roof at TMG.

Additive manufacturing is part of those individually-tailored solutions since 2001 at TMG. All started with “selective laser sintering” (SLS) and “Stereolithography” (SLA) and producing parts for wind tunnel testing. The constant development of additive manufacturing with our strong partners has led to prototype and functional part printing today. The presentation gives an overview on our history, status quo, current issues and gives an outlook in future additive manufacturing of plastic parts at TMG.

Langfassung

1.1 Historie Toyota Motorsport GmbH (TMG)

Seit 1979 betreut die in Köln ansässige Toyota Motorsport GmbH verschiedene hochrangige Motorsportprogramme und betreibt ein Tuning- und Sportzubehörgeschäft. Das Unternehmen wurde in Köln als Toyota Team Europe (TTE) gegründet und entwickelte sich rasch zum Synonym für Erfolge bei den Rallye-Weltmeisterschaften.

Unter der Leitung von Ove Andersson stand das Toyota Team Europe regelmäßig auf dem Siegereppchen. Besonders stark präsentierte sich das Team bei der Safari-Rallye, die es viermal in fünf Jahren – von 1984 bis 1988 – mit verschiedenen Versionen des Toyota Celica gewann. Zur selben Zeit weitete TTE sein Wettbewerbsengagement international aus und verhalf Mohammed Bin Sulayem zu vier aufeinanderfolgenden Nahost-Rallyemeisterschaften. Schon bald, im Jahr 1990, folgte der Weltmeistertitel, als Carlos Sainz die Fahrermeisterschaft am Steuer eines Toyota Celica GT-Four gewann, der durch TTE vorbereitet und betreut wurde. Zwei Jahre später fügte er diesem Erfolg einen weiteren Weltmeistertitel hinzu.

1993 gewann TTE seinen ersten Konstrukteurstitel. Außerdem holte Juha Kankkunen die Fahrerkrone und sorgte so für einen historischen Doppelsieg, der im Jahr darauf sogar wiederholt wurde. Im selben Jahr wurde TTE in Toyota Motorsport GmbH (TMG) umbenannt, nachdem die Toyota Motor Corporation (TMC) Alleineigentümerin geworden war.

Im Jahr darauf begann TMG seine Diversifizierung und gründete eine Tuning-Tochter mit dem Namen TTE – zu Ehren der Rallye-Erfolge, die unter diesem Banner gefeiert wurden. Das Unternehmen setzte daraufhin seine Rallye-Erfolge fort. Das Team gewann 1994 beide Weltmeisterschaften: Didier Auriol holte den Fahrertitel, und TMG gewann die Konstrukteursmeisterschaft. 1996 brachte TTE seine ersten Tuning-Produkte europaweit auf den Markt, während TMG auf der Rennstrecke mit Armin Schwarz die europäische Rallyemeisterschaft gewann. Nach seiner Diversifizierung aus dem Rallye-Sport in den Bereich der Tuning-Teile ging TMG 1998 den nächsten Schritt und beteiligte sich mit dem GT-One am 24-Stunden-Rennen von Le Mans.

Schon während des ersten Rennens bei den 24 Stunden von Le Mans fuhr der GT-One die schnellste Runde und stellte den Geschwindigkeitsrekord unter den Teilnehmern dieser Veranstaltung auf. Diese Leistungen wurden 12 Monate später wiederholt, als der GT-One außerdem von der Pole-Position startete. Am Ende aber reichte es nicht ganz: Der GT-One fuhr diesmal „nur“ auf den 2. Platz. Im selben Jahr beendete TMG seine Teilnahme am internationalen Rallyesport – verdientermaßen nicht, ohne noch einmal Konstrukteursweltmeister geworden zu sein. Während seiner internationalen

Rallyekarriere gewann das Unternehmen vier Fahrer- und drei Konstrukteurs-Weltmeisterschaften.

Das Jahr 1999 markierte eine neue Ära für TMG: Toyota gab bekannt, mit einem Team, das seinen Sitz in Köln haben sollte, in die Formel 1-Weltmeisterschaft der FIA einzusteigen. Neben den verstärkten Vorbereitungen auf dieses Ereignis arbeitete der Tuning-Bereich an seinem ersten Rennumbau: dem Lexus IS Kompressor.



Abbildung 1 - Toyota GT-One neben Formel 1 Prototyp (2001)

2001 war das Jahr der Tests und Erprobungen, an dessen Ende Toyotas Formel 1-Debüt stand. Dabei setzte das TMG-Team sofort ein Achtungszeichen, als Mika Salo gleich beim ersten Rennen für Toyota in Australien als Sechster einen Punkt herausfuhr. Zwischen 1998 und 2009 war TMG der einzige neue Konstrukteur in der Formel 1 – und eines von nur zwei Teams, die das gesamte Fahrzeug, einschließlich der Motoren, unter einem Dach fertigten. TMG entwickelte dabei seine Erfahrung und Kompetenz kontinuierlich weiter.

Im Jahr 2005 erreichte der von TMG konstruierte Rennwagen seine erste Pole-Position und seinen ersten Podiumsplatz, während im Tuning-Bereich der Sportumbau Corolla TS Kompressor in Kooperation mit TMC auf die Strecke fuhr.

In den darauffolgenden Jahren kamen weitere Pole-Positionen und Podiumsplätze hinzu. Diese Entwicklung fand 2009 in Bahrain ihren Höhepunkt, als die gesamte vorderste Startreihe aus Toyota-Fahrzeugen bestand. Am Ende der Saison gab TMC jedoch ihren sofortigen Rückzug aus der Formel 1 bekannt. Am Ende stehen für TMG in der Formel 1 dreizehn Podiumsplätze, drei Pole-Positionen, drei schnellste Runden und 278,5 Punkte zubuche.

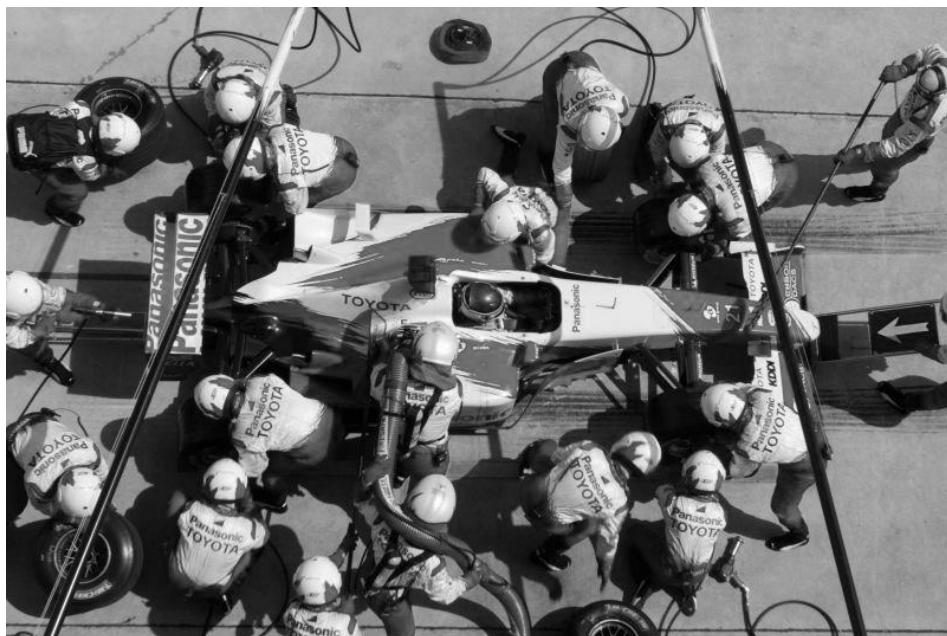


Abbildung 2 - Formel 1 Pit Stop Toyota TF103 (2003)

In Fortführung seiner Tradition der Diversifizierung, die bis in das Jahr 1979 zurückreicht, begann für TMG im November 2009 eine neue Ära als ein Kompetenz- und Hochleistungszentrum für Konstruktion, Entwicklung und Produktion. Zu unseren Kunden zählen in erster Linie die Automobilindustrie und der Motorsport.

Aktuell ist TMG aktiv in der WEC - World Endurance Championship unterwegs und wurde bereits 2014 Weltmeister. 2018 wurde der heißersehnte Sieg bei den 24h von Le Mans geholt. Auch 2018/2019 geht mit einem weiteren Weltmeistertitel in der WEC die Erfolgsgeschichte weiter.

1.2 TMG – heute

Heute ist TMG ein auf Hochtechnologie spezialisiertes Test- und Entwicklungsunternehmen im Herzen Europas - in Köln, Deutschland. Die TMG ist eine hundertprozentige Tochtergesellschaft der Toyota Motor Corporation. Die zahlreichen hochtechnologischen Dienstleistungen des Unternehmens werden nicht nur von TMG genutzt, sondern der volle Leistungsumfang wird im selben Maße für Fremdkunden angeboten, wie dies bereits für die verschiedenen Unternehmen der Toyota-Familie üblich ist.

Durch die Aktivitäten an der Spitze des internationalen Motorsports hat sich TMG zu einem Komplettanbieter für spezialisierte Dienstleistungen entwickelt, spezialisiert auf Forschung und Entwicklung im Bereich Automobilbau und

Motorsport. TMG ist in der Lage auch für Ihr Projekt individuell zugeschnittene Lösungen zu entwickeln. Nicht umsonst trägt unser Unternehmen den Beinamen „The Home of High Performance“.



Abbildung 3 - TMG-Hauptgebäude in Köln-Marsdorf

1.3 Wieso additive Fertigung bei TMG?

Die Entwicklungszyklen im Motorsport sind in der Regel sehr kurz. Dies begründet sich zum einen auf die kurzen Vorlaufzeiten von beispielsweise Reglementänderungen, sowie dem ständigen Wettbewerb zu anderen Motorsportteams und Herstellern in den jeweiligen Rennklassen und der zur Verfügung stehenden Reaktionszeiten, welche sich hauptsächlich auf die Zeit zwischen den Rennen beschränkt. Somit besteht ein ständiger Balanceakt zwischen der Entwicklung und der Fertigung.

Zum einen benötigen die Aerodynamik- und Entwicklungsabteilungen ausreichend Zeit, die verschiedenen Komponenten im Windkanal zu testen. Andererseits werden die Daten so schnell wie möglich in der Fertigung benötigt, um die Komponenten und Bauteile rechtzeitig produzieren zu können, sodass anschließend Zeit für entsprechende Tests bleibt.

Somit müssen die Produktionsverfahren zur Herstellung dieser Bauteile zum einen die uneingeschränkte Funktion dieser Bauteile ermöglichen und andererseits diese innerhalb der meist sehr kurzen Zeitfenstern produzieren können. Heutige additive Fertigungsverfahren sind durch die zunehmende

Optimierung verschiedener Verfahren und der ständigen Materialentwicklung zu gewährleisten.

2 Additive Fertigung bei TMG

Das hohe Potential der additiven Fertigung wurde bereits Ende der neunziger Jahre bei TMG erkannt, sodass neben der Serienfertigung von Komponenten, gemeinsam mit Partnern aus der Industrie an den zukünftigen additiven Technologien entwickelt wurde. Bereits in frühen Entwicklungsphasen setzten diese engen Kooperationen an, sodass auch in Alpha-Testphasen gemeinsam an Systemen und Materialien entwickelt und getestet wurde. Aktuell ist TMG in einer engen Kooperationen mit führenden Technologie- und Materiallieferanten zur Entwicklung der zukünftigen SLA- und SLS-Systeme und der nächsten Generation von Hochleistungskunststoffen.

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen es, im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren, in kürzester Zeit Bauteile mit nahezu¹ beliebiger Geometrie herzustellen. Hierbei werden in allen Verfahren die jeweiligen entsprechenden Materialien und Medien in Schichten additiv aufgetragen, sodass in Abhängigkeit des Bauteils, des Verfahrens, des Systems und des Materials ein additiv gefertigtes Bauteil entsteht.

Zu Beginn der additiven Fertigung beschränkte sich die Nutzung dieser Verfahren bei TMG auf die Erstellung von sogenannten „Mockups“ (Anschauungsmodellen) und Windkanalmodellen, welche hauptsächlich im Verfahren der Stereolithographie (SLA) hergestellt wurden. Diese SLA-Windkanalmodelle dienen auch heute noch dem Aufbau von 1:6-Modellen (60%-Modelle) für die Erprobung der Aerodynamik von entwickelten und simulierten (CFD²) Fahrzeug-Komponenten.

¹ Limitationen ergeben sich durch jeweiliges Verfahren, Material und System

² CFD - Computational Fluid Dynamics (numerische Strömungsmechanik)

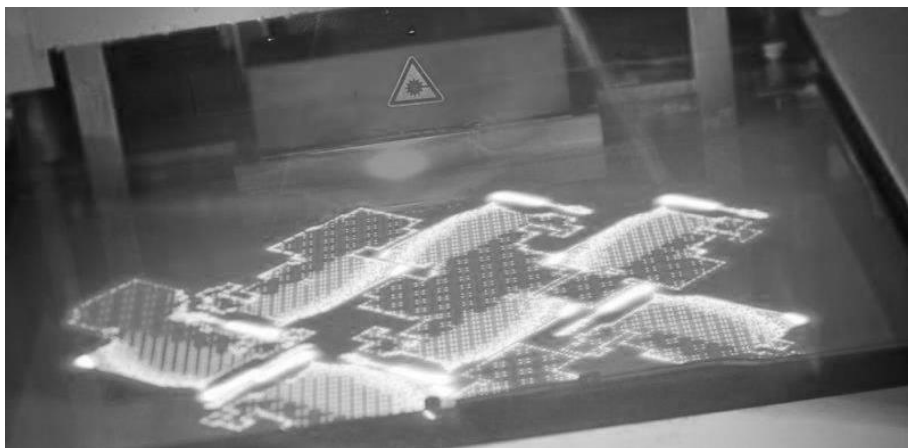


Abbildung 4 – Laserbelichtung des UV-reaktiven Harzes in einem SLA-System bei TMG

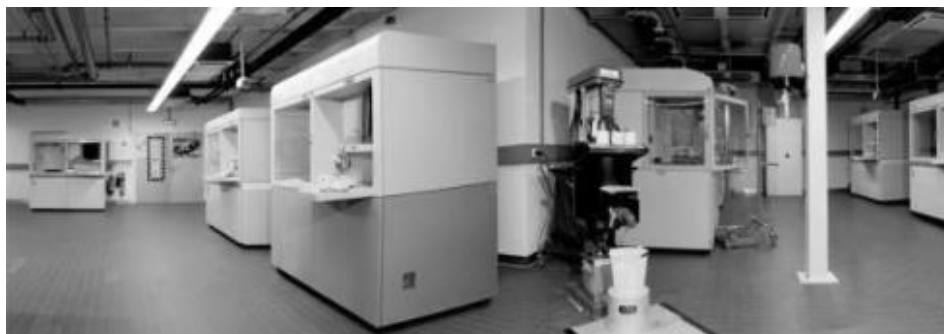


Abbildung 5 - Stereolithographie-Infrastruktur bis Ende 2018

Die Beschränkung auf Anschauungsmodelle und Windkanalmodelle war allerdings nicht der fehlenden Kreativität der Ingenieure geschuldet, sondern wurde zunächst durch die damals genutzten Materialien limitiert. SLA-Bauteile, die üblicherweise aus Silicat-gefüllten Harzen bestehen und heute noch sind, sind in der Regel steife, aber sehr spröde Materialien, sodass diese in ihren Eigenschaften sehr keramischen Materialien ähneln.



Abbildung 6 - 1:6 Windkanalmodell Toyota LMP1 WEC-Serie

Daher wurde und wird bei TMG in Parallelität auf die Fertigung im SLS-Verfahren gesetzt. Das Selective-Laser-Sintering (SLS) ermöglicht die additive Fertigung von thermoplastischen Pulvern, die es erstmals ermöglichten die Vorteile von Thermoplasten zu nutzen.

Heute gibt es in beiden Verfahren ein breites Spektrum an Materialien, sodass es sowohl flexible, klare und gefüllte SLA-Materialien gibt, sowie auch sehr steife und hochtemperaturbeständige SLS-Materialien. Besonders im SLS-Verfahren lassen sich heute verschiedenste Hochleistungsfasern in die Pulver integrieren, sodass der heutige Stand der Technik nicht die Beimischung von Fasern zu Pulvern ist, sondern die Integration der Fasern in die Partikel. Hierbei spricht man auch von sogenannten „Compounds“ bzw. compoundierten Pulvern.

Zur Verstärkung werden vor allem Kohlenstoff- und Glasfasern genutzt, aber auch die Nutzung von Aluminiumpartikeln, mineralischen Fasern und „hollow glass beads“ (hohle Glasperlen) sind möglich und verbreitet. Besonders die gefüllten SLS-Polyamid-Pulver ermöglichten erstmals den Einsatz von additiv gefertigten Bauteilen am Fahrzeug, sodass heute zahlreiche strukturelle und aerodynamische Bauteile am und im Fahrzeug in stetig steigender Zahl zu finden sind.

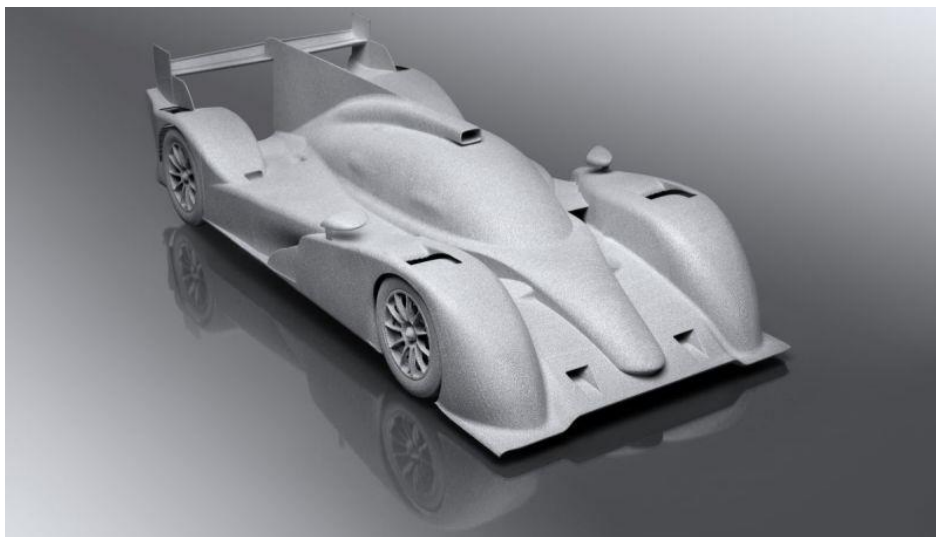


Abbildung 7 – additiv gefertigtes LMP1-Modell (Aluminium gefülltes Polyamid) im SLS-Verfahren

2.1 Integration der additiven Fertigung bei TMG

Wie bereits angeführt, beschränkte sich die additive Fertigung zu Beginn ausschließlich auf Anschauungsmodelle, Prototypen und Windkanalmodelle. Im Zuge der fortlaufenden Material- und System-Entwicklung der jeweiligen Verfahren konnten zunächst einige Applikationen auch im Motorsport als Funktionsbauteile eingesetzt werden. Hier muss gesagt werden, dass im Zuge der Nutzung in der Formel 1 wesentlich größere Freiheitsgrade hinsichtlich der Kosten waren, sodass auch über Nacht gefertigte Bauteile zum Test, Qualifying oder Rennen eingeflogen wurden.

Besonders durch den erfolgreichen Einsatz in der Formel 1 wuchsen zum einen die interne Akzeptanz und zum anderen schließlich auch die Bedeutung dieser neuen Fertigungskapazität. Besonders durch das Design und die Ingenieure wurde der Wunsch nach weiteren Applikationsmöglichkeiten laut, sodass die Intensität der Forschung und Entwicklung hinsichtlich neuer Materialien und Verfahren heute in einer eigenen Abteilung mündet. Die Abteilung „Future Production Technologies & Processes“ (FPTP) existiert seit 2016 und kümmert sich um alle fertigungsrelevanten Verfahren und Prozesse, welche für TMG und TMC und deren Derivate von Bedeutung sein könnten.

Ziel dieser neugeschaffenen Abteilung ist neben der Kombination bestehender Hochleistungs-Prozesse, wie die der additiven Fertigung, der hausinternen Composite-Fertigung und neuester CNC-Technologien, zu herausragenden Komponenten und Baugruppen, auch die mögliche Integration der Verfahren

und Prozesse in Kleinserien und Serienprozesse der Toyota Motor Cooperation.

2.2 Der Vortrag - Ausblick

Der Vortrag gibt Einblicke in die Historie, den Status Quo, aktuelle Themen und Problemstellungen, sowie einen Ausblick auf die Zukunft der additiven Fertigung von Kunststoffbauteilen bei TMG.

Über die Historie und die additiven Fertigung bei TMG in den letzten 20 Jahren sollen vor allem die Motivation hinter der Integration dieser Produktionstechnologie bei TMG beleuchtet werden und die vergangenen und aktuellen Fragestellungen näher herausgestellt werden.

Welche aktuellen Projekte und Limitationen gibt es derzeit? Ist es bereits möglich Funktions- und Strukturbauteilebauteile kosteneffizient für Kleinserien oder Großserienproduktion herzustellen? Mit welchen konventionellen Verfahren können aktuelle additive Fertigungsverfahren derzeit konkurrieren?

Auch die zunächst oftmals als „Heimwender“ belächelte Technologie, der „Fused-Filament-Fabrication“ (FFF) und deren Berechtigung als mögliche zukünftige Produktionstechnologie werden aktiv betrachtet.

Additiv-Guss ein neuartiger Hybridansatz für automobiler Anwendungen

Additive-Casting a novel hybrid approach for automotive application

Markus Oettel¹, Sebastian Flügel², Stefan Polenz³, Andreas Kleine⁴, Mathias Gebauer¹, Bernhard Müller¹

¹ *Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU*

² *EDAG Engineering GmbH*

³ *Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahltechnik IWS*

⁴ *Trimet Automotiv Holding GmbH*

Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren finden aufgrund von meist hohen Fertigungskosten und vergleichsweise langen Fertigungszeiten nur langsam ihren Weg in die Großserien der Automobilindustrie. Abhilfe schaffen da bereits erste Hybridansätze, wo konventionell gefertigte Grundkörper zur Reduzierung der additiven Verfahrenskosten eingesetzt werden.

Der neuartige hybride Fertigungsansatz adressiert die dennoch bestehenden Herausforderungen und verbindet Laser-Strahlschmelzen bzw. Laser-Auftragschweißen mit dem Druckgießen, um die Vorteile der Verfahren zu kombinieren. Damit soll eine Individualisierung und Funktionalisierung von Druckgießbauteilen für automobiler Anwendungen möglich werden. Die Umsetzung erfolgt anhand von zwei Demonstratoren aus dem Automobilbau. Im Rahmen Zielstellung soll ein grundlegendes Bauteildesign durch ein modulares Hybridprinzip mit komplexen und funktionalen Bauteilbereichen erweitert werden. Im Demonstrator 1 werden funktionalisierte Einlegeteile wie bspw. Miniaturwärmetauscher mit komplexer Kanengeometrie, individuelle Adaptergeometrien oder Bauteilverstärkungen aus höherfestem Material entwickelt, welche nur durch laser-strahlschmelzen herstellbar sind. Diese werden im Nachgang in eine Druckgießform eingelegt und damit monolithisch zu einem neuartigen Hybridbauteil verbunden. Im Demonstrator 2 erfolgt die Individualisierung und Funktionalisierung durch das Aufbauen von geometrieflexiblen Fügeelementen und individuellen Geometriebereichen auf einen Standard Druckgussbauteile durch Laser-Auftragschweißen. In beiden Demonstratoren wird dabei ein besonderes Augenmerk auf die stoff- bzw. kraftschlüssige Verbindung der zum Teil aus unterschiedlichen Materialien bestehenden Bereiche gelegt.

Short Abstract

Due to long production times and therefore high production costs, additive manufacturing only slowly finds its way into mass production of the automotive industry. One way to reduce production time is hybrid manufacturing. So far additive functional structures are built on conventionally machined base bodies.

The novel hybrid approach addresses the existing challenges and combines additive manufacturing (laser beam melting, laser metal deposition) with die casting to utilize the advantages of both processes. Objective is to customize and functionalize die-cast components for automotive applications. The idea is to extend a basic component design by a modular hybrid principle with complex and functional areas. For the first demonstrator, inserts such as a miniature heat exchanger, an individual adapter geometry and reinforcements of high-strength material have been developed, which can only be produced by laser beam melting. These inserts are subsequently casted into a novel hybrid component. The second demonstrator focuses on the customization and functionalization after the casting process. Individually developed geometries such innovative joining elements are created on a standard die-cast component by laser metal deposition. In both demonstrators, special attention is paid to the bonding at the interface areas, some of which are made from different materials.

1 Einleitung und Stand der Technik

Additive Fertigungsverfahren wie das Laser-Strahlschmelzen finden zunehmend ihren Weg in industrielle Anwendungen [1, 2]. In der Automobilindustrie wird das Laser-Strahlschmelzen bisher hauptsächlich nur für prototypische Anwendungen genutzt. Den Sprung in die automobilen Großserienfertigung hat das Verfahren auf Grund der verhältnismäßig langen Fertigungszeit und den damit einhergehenden Fertigungskosten noch nicht geschafft. Es gibt jedoch schon erste Bestrebungen dies zu ändern. So steht bei der Audi AG die additive Fertigung am Übergang von der Prototypenfertigung hin zur (Kleinst-) Serienfertigung – unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen [3]. Im Projekt „NextGenAM“ erproben Daimler, EOS und Premium Aerotec die digitale Fabrik für additive Fertigung, um diese für die Automobilfertigung zu erschließen [4]. Ebenso kooperiert GKN Powder Metallurgy mit EOS, um das Potential der additiven Fertigung mit Metall speziell für die Automobilindustrie auszuschöpfen [4]. Diese Beispiele zeigen, dass es ein großes Interesse gibt, die bestehenden Restriktionen aufzuheben, um insbesondere das Laser-Strahlschmelzen als universales Metall-3D-Druck-Verfahren mit seinen spezifischen Vorteilen in die automobilen Großserie zu überführen.

In den eingangs erwähnten Ansätzen [3–5] werden vorrangig Geometrie- bzw. Anlagenoptimierungen zur Steigerung der Produktivität bzw. Ausnutzung der Vorteile generativer Fertigung verfolgt. Das Vorhaben „CastAutoGen“ hingegen kombiniert das großserienfähige Fertigungsverfahren Druckgießen mit den additiven Fertigungsverfahren Laser-Strahlschmelzen und Laser-Pulverauftragschweißen in einer neuartigen, hybriden Prozesskette, um die Vorteile beider Verfahren zu vereinen und maximale Geometriefreiheit bei gleichzeitig hohen Stückzahlen zu ermöglichen.

1.1 Hybridfertigung

Hybride Fertigungsansätze finden im Bereich der additiven Fertigungsverfahren bereits häufig Anwendung. Die Kombination von konventionellen Halbzeugen mit additiven Fertigungsverfahren ermöglicht es, die oftmals noch langen Fertigungszeiten und damit erhöhten Fertigungskosten zu reduzieren. Bei einer hybriden Bauteilfertigung werden nur die geometrisch komplexen Bereiche durch additive Fertigungsverfahren hergestellt, während die weniger komplexen durch konventionelle Verfahren wie beispielsweise Fräsen oder Drehen gefertigt werden.

In der Hybridfertigung mit Laser-Strahlschmelzen werden, wie vorangegangen erläutert, Bauteilbereiche identifiziert, die geometrische Freiheiten benötigen, um einen Mehrwert zu erzielen. Alle anderen Bereiche, bei denen dies nicht der Fall ist, werden konventionell gefertigt. Die Trennung der Segmente muss dabei in einer Ebene erfolgen, damit der Pulverauftrag beim Laser-Strahlschmelzen ungehindert erfolgen kann. Beim Laser-Auftragschweißen kann die Trennung auch auf einer im Raum gekrümmten Fläche erfolgen, da lediglich die Zugänglichkeit für den Laser-Bearbeitungskopf gewährleistet sein muss (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Hybridfertigung beim Laser-Auftragschweißen

2 Motivation

Laser-Strahlschmelzen (Laser Beam Melting, LBM) und Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) gehören zur Gruppe der additiven Fertigungsverfahren und bieten große Vorteile bei der Fertigung von endkonturnahen, hochkomplexen Geometrien. Damit sind diese Verfahren besonders für die Herstellung von komplexen Einzelteilen bis hin zu Klein- bzw. Kleinstserien geeignet. Der Einzug in die industrielle Fertigung geht trotz der Vorteile dennoch nur schleppend voran. Grund dafür sind die verhältnismäßig langen Fertigungszeiten und damit einhergehenden Fertigungskosten.

Im Gegensatz dazu ist es mit dem etablierten Großserienfertigungsverfahren Druckgießen möglich, Bauteile in großen Stückzahlen in kurzer Zeit kostengünstig herzustellen. Die hohe Produktivität geht jedoch zu Lasten der Komplexität. Filigrane Strukturen, Hinterschneidungen und innenliegende Medienkanäle sind nur eingeschränkt, mit sehr hohem Aufwand bei der Formgestaltung bzw. gar nicht umsetzbar. Die kostenintensiven Druckgießformen erlauben jedoch stets nur eine Bauteilvariation je

Formwerkzeug und erfordern gleichzeitig eine große Fertigungsstückzahl, um die Druckgießwerkzeugkosten zu amortisieren.

Ziel des Vorhabens „CastAutoGen“ ist es vor diesem Hintergrund, die Vorteile additiver Fertigung mit den Vorteilen des Großserienverfahrens Druckgießen zu verbinden, um so eine neuartige, hybride Fertigungsprozesskette zu entwickeln. Bauteilbereiche mit großen Volumina und geringer Komplexität werden durch Druckgießen hergestellt. Funktionalisierte und filigrane Strukturen werden mit den additiven Verfahren LBM bzw. LPA gefertigt. Die neuartigen Prozessketten LBM-Druckguss und Druckguss-LPA werden abschließend in zwei Demonstratoren veranschaulicht.

3 Szenario 1: An- bzw. Eingießen komplexer laserstrahlgeschmolzener Einlegeteile

Durch die Prozesskette im Szenario 1 soll es möglich werden, mit einem einzigen, modular aufgebauten Druckgießwerkzeug verschiedenen Bauteilvarianten abzubilden. Dazu werden additiv gefertigte, komplexe Einlegeteile hergestellt und vor dem Druckgießprozess in das Druckgießwerkzeug eingelegt. Das Szenario wird anhand eines Demonstrator-Bauteils „Halter Nebenaggregate“ (vgl. Abbildung 2) erstmalig exemplarisch umgesetzt. Dabei werden drei Bauteilbereiche durch additiv gefertigte Einlegeteile ersetzt, um einen Mehrwert zu erzeugen. Es wird zum einen eine Verstärkung aus einem höherfesten Stahl im Aluminium-Druckgussbauteil integriert, zum anderen ein Adapterbereich für eine komplexe Geometrievariation, bspw. für bestimmte Fahrzeugderivate. Weiterhin wird als dritter Bereich ein konventioneller, montierter Wärmetauscher durch einen komplexen, integrierten Wärmetauscher ersetzt, welcher direkt in das Druckgießbauteil eingebettet wird. Für eine möglichst gute Anbindung wird dabei der Einfluss verschiedener Interface-Geometrien und Oberflächenmodifikationen auf die Adhäsion sowie auf die Verbindung zwischen additiv und konventionell gefertigten Bauteilbereichen durch Form- bzw. Kraftschluss untersucht.

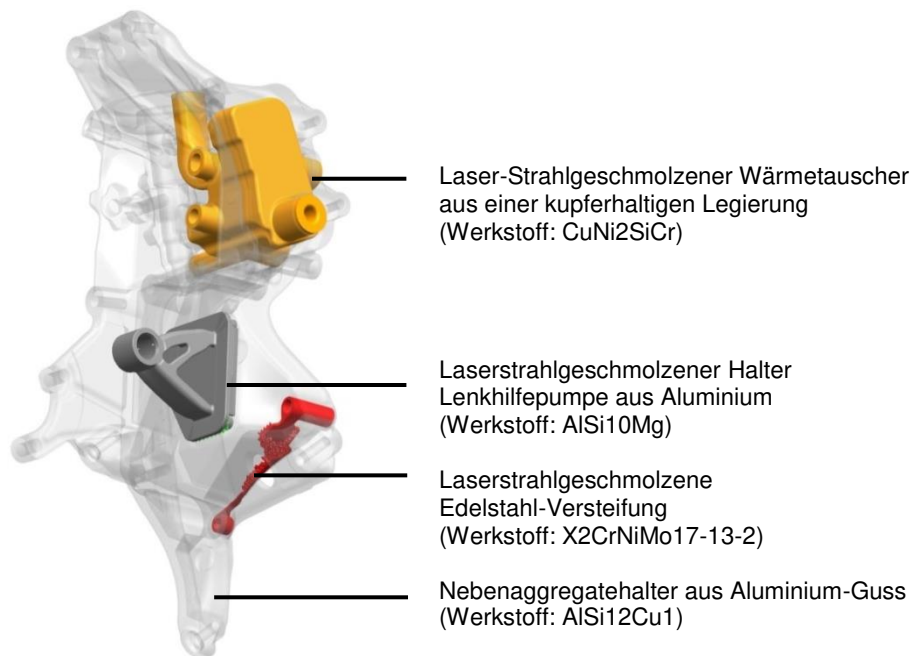


Abbildung 2: schematische Darstellung des Demonstrators 1 mit laserstrahlgeschmolzenen Komponenten (Quelle: EDAG Engineering GmbH)

Bei Entwicklung und Konstruktion der laser-strahlgeschmolzenen Einlegeteile wurde besonderes Augenmerk auf die Interface-Geometrie (vgl. Abbildung 3) und Oberflächenmodifikation in der Anbindungszone gelegt. Dabei wurden drei verschiedene Interface-Strukturen aus einer Vielzahl betrachteter Strukturtypen qualifiziert ausgewählt, um sie im Rahmen einer multikriteriellen Prüfung hinsichtlich Infiltrierbarkeit, Belastbarkeit und weiterer Eigenschaften zu evaluieren und auf ihre Eignung zu untersuchen. Die finale Auswahl erfolgte basierend auf numerischen Berechnungen der Festigkeit und auf experimentellen Untersuchungen im Rahmen von (Ein-)Gießversuchen.

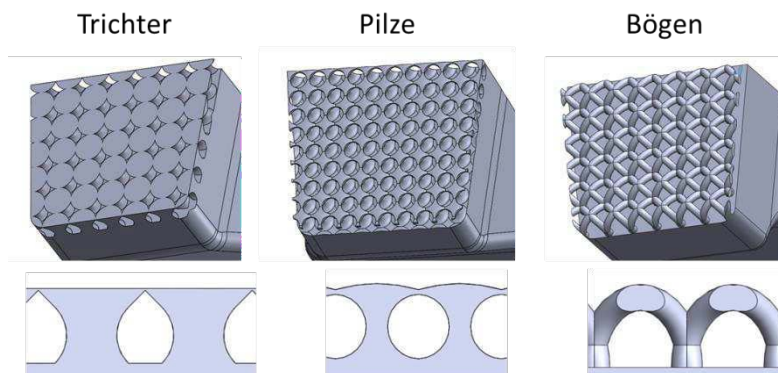


Abbildung 3: Ausgewählte Interfacestrukturen für die Anbindung zwischen laserstrahlgeschmolzenem Einlegeteil und angebundenem bzw. umschließendem Gussbauteil

Um eine bestmögliche Anbindung zwischen den additiv gefertigten Einlegeteilen und dem umgebenden Gussmaterial zu erhalten, wurden ebenso Beschichtungen zur Herstellung einer stoffschlüssigen Verbindung untersucht. Eine Literaturrecherche und entsprechende Vorerfahrungen führten dazu, dass für die Verbindung Aluminium-Aluminium (LBM-Druckguss) eine Zinkat-Zwischenschicht als zielführend eingestuft wurde [6]. Die Zinkat-Zwischenschicht wird in einem mehrstufigen Prozess auf den jeweiligen Substrat-Körper abgeschiedenen und verhindert das erneute Korrodieren des so beschichteten Körpers (vgl. Abbildung 4).

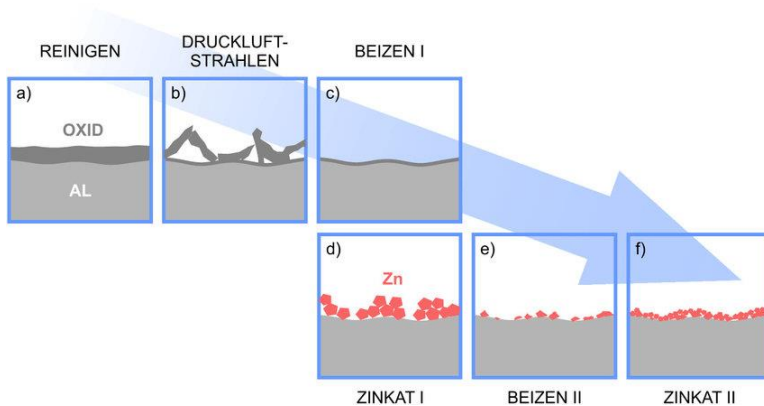


Abbildung 4: Schematischer Prozessablauf Zinkat-Zwischenschicht [6]

Es wurden zur Qualifizierung der Beschichtung spezifische Vorversuche unternommen. Dabei hat sich eine Dreifachbeschichtung mit angepassten Beschichtungsparametern als am besten geeignet erwiesen (vgl. Abbildung 5), da diese die dichteste Zwischenschicht erzielt und somit einen erneute Korrosion am besten unterbinden kann. Die Ergebnisse der Korrosionstests liegen aktuell noch nicht vor und können daher hier noch nicht mit vorgestellt werden.

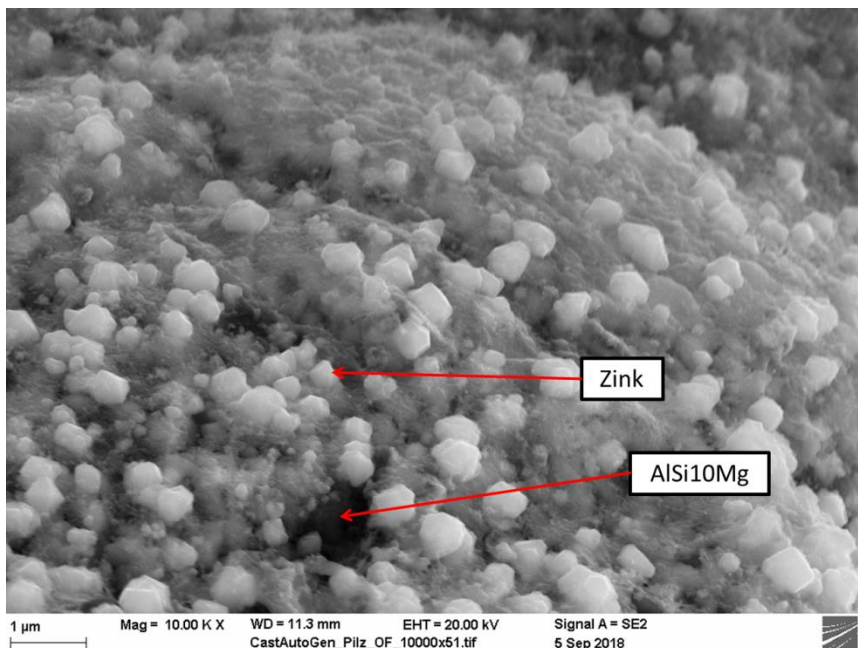


Abbildung 5: REM-Aufnahme der Zinkat-Zwischenschicht mit angepassten Beschichtungsparametern

Für die Verbindungsvariante Stahl-Aluminium (LBM-Druckguss) wurde das Beschichtungsverfahren Alfinieren für die weitere Betrachtung ausgewählt. Alfinieren ist ein Verfahren, bei dem der zu beschichtende Körper in ein Bad flüssiger Aluminiumschmelze getaucht wird und nach einer kurzen Verweildauer zur Weiterverarbeitung zur Verfügung steht. Dabei wird eine verbesserte Anbindung des Aluminium-Druckgusses an Stahl-Eingießteile ermöglicht [7]. Es wurden mehrere Testreihen unternommen, um die Parameter für die Alfin-Beschichtung von LBM-Einlegeteilen aus Stahl zu entwickeln. Dabei wurden hauptsächlich die Verweildauer, die Vorwärmtemperatur und die Bewegung in der Schmelze variiert. Ebenso wurden zwei verschiedene Prüfkörpergeometrien verwendet, um neben dem Einfluss der Beschichtungsparameter auf das Beschichtungsergebnis auch den der Geometrie mit zu untersuchen. In der Auswertung der Versuche hatte sich gezeigt, dass eine stoffschlüssige Verbindung prinzipiell erreicht werden konnte (vgl. Abbildung 6).