

# rapid.tech 3D

ADDITIVE MANUFACTURING HUB

## PROCEEDINGS OF THE 19<sup>TH</sup> RAPID.TECH 3D CONFERENCE

ERFURT, GERMANY, 9-11 MAY 2023

### Editors

Michael Kynast

Michael Eichmann

Prof. Dr. Gerd Witt



HANSER

[rapidtech-3D.com](http://rapidtech-3D.com)



Kynast / Eichmann / Witt (Ed.)

**Rapid.Tech 3D**



**Blieben 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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Michael Kynast (Ed.)  
Michael Eichmann (Ed.)  
Gerd Witt (Ed.)

# **Rapid.Tech 3D**

Proceedings of the 19th Rapid.Tech 3D Conference  
Erfurt, Germany, 9–11 May 2023

**HANSER**

The use of general descriptive names, trademarks, etc., in this publication, even if the former are not especially identified, is not to be taken as a sign that such names, as understood by the Trade Marks and Merchandise Marks Act, may accordingly be used freely by anyone. While the advice and information in this book are believed to be true and accurate at the date of going to press, neither the authors nor the editors nor the publisher can accept any legal responsibility for any errors or omissions that may be made. The publisher makes no warranty, express or implied, with respect to the material contained herein.

The final determination of the suitability of any information for the use contemplated for a given application remains the sole responsibility of the user

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co.KG, Munich  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Printed and bound by BoD - Books on Demand, Norderstedt  
Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47941-8  
E-Book-ISBN: 978-3-446-47942-5

## Table of Contents

The proceedings contain scientific articles and user case articles. Scientific articles had to pass a scientific quality assurance by the review committee. Those articles who have passed the double-blind review of abstract and paper successfully are marked accordingly.

Scientific articles with passed double-blind review..... **SDB**  
User case articles..... **U**

Greeting ..... 7

Advisory Board & Review Committee ..... 8–9

### SECTION I

#### Scientific articles

##### Articles with double-blind signet

Umsetzung einer optimierten Oberflächenschlitzung zur  
Wirbelstromverlustreduktion auf der Oberfläche eines additiv gefertigten  
Permanentmagnet-Rotors  
Implementation of optimized surface slitting for eddy current loss reduction  
on the surface of an additively manufactured permanent magnet rotor  
Michael Haase, Maximilian Bieber, Frederik Tasche, Mirko Schaper,  
Kay-Peter Hoyer, Bernd Ponick, Balázs Magyar ..... 12–21

Entfernbarkeit von Stützstrukturen im pulverbettbasierten  
Laserstrahlschmelzen von Ti-6Al-4V  
Removability of support structures in laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V  
Maria Isabelle Maiwald, Katharina Bartsch, Tim Röver,  
Claus Emmelmann ..... 22–31

Drahtbasierte additive Fertigung von Kupfer mittels Elektronenstrahl Wire-based electron beam additive manufacturing of copper <u>Dr. Bernd Baufeld, Alejandro Zamorano Reichold</u> .....	<b>32–40</b>
Metallpulver für die Additive Fertigung aus Nebenprodukten der Stahlindustrie Metal powder for additive manufacturing from by-products of the steel industry <u>Andreas Walter, Sebastian Platt, Gerd Witt, Stefan Kleszczynski</u> .....	<b>42–59</b>
Umwandlung von bio-basierten Reststoffen in AM-Werkstoffe als nachhaltiger und kosteneffizienter Ansatz: Beispiel Wasserhyazinthen in Kenia Conversion of bio-based residues into AM materials as a sustainable and cost-effective approach: example of water hyacinths in Kenya <u>Leif Micke, Lisa Kühnel, Wamai Mwangi, Kabini Karanja, Henning Zeidler</u> .....	<b>60–67</b>
Einsatz von Papierfasern aus der Verpackungsindustrie in der Additiven Fertigung zur Produktion von Verpackungseinlegern Application of paper fibres from the packaging industry in Additive Manufacturing for the production of packaging inlays <u>Katja Brauer, Lisa Kühnel, Leif Micke, Henning Zeidler</u> .....	<b>68–76</b>
Einfluss der Bauteilstruktur auf die mechanischen Eigenschaften von dual- aushärtenden Multimaterialien in der additiven Fertigung Influence of component structures on mechanical properties of dual-curing multi-material additive manufacturing <u>Philip Obst, Lasse Reusch, Martin Friedrich, Jan-Marvin Schäfer, Joel Bachmann, Lukas Knorr, Gerd Witt</u> .....	<b>78–91</b>
Einfluss einer variierenden Scanvektorenlänge auf die orts aufgelöste Schmelzbadtemperatur und die resultierende Porosität in Bauteilen im pulverbettbasierten Schmelzen von Polyamid 12 mittels Laserstrahlung Influence of a Varying Scan Vector Length on the Spatially Resolved Melt Pool Temperature and the Resulting Porosity of Components in Laser- Based Powder Bed Fusion of Polyamide 12 <u>Joseph Hofmann, Kirsten Taphom, Julia Herzen, Katrin Wudy</u> .....	<b>92–101</b>
Flammgeschütztes Polyamid 6 für das Lasersintern von Kunststoffen Flame-retardant Polyamide 6 for Powder Bed Fusion of Polymers <u>Simon Cholewa, Andreas Jaksch, Dietmar Drummer</u> .....	<b>102–111</b>

<p>Verbesserung der Alterungsbeständigkeit von Polyamid 6-Pulver für das Lasersintern von Kunststoffen durch Zugabe von Antioxidantien                  Improvement of the Ageing Resistance of Polyamide 6 Powder for PBF-LB/P by Addition of Antioxidants  <u>Andreas Jaksch</u>, Simon Cholewa, Dietmar Drummer.....</p>	<p><b>112–121</b></p>
<p>Einfluss des chemischen Glätteverfahrens auf mechanische Eigenschaften und Oberflächenrauheit von lasergesinterten Polyamid 12 Bauteilen                  Influence of chemical smoothing on mechanical properties and surface roughness of laser sintered polyamide 12 parts  <u>Paul Oehlmann</u>, Marius Strauß, Dr.-Ing. Martin Friedrich, Dr.-Ing. Tobias Grimm, Prof. Dr.-Ing. Jan T. Sehr.....</p>	<p><b>122–132</b></p>
<p>Mechanische Eigenschaften mittels selektiver Zementaktivierung gedruckter Betonbauteile                  Mechanical properties of concrete components manufactured by selective cement activation  <u>Christiane Richter</u>, Jörg Jungwirth.....</p>	<p><b>134–143</b></p>
<p>Möglichkeiten zur Individualisierung von Ösophagusstents durch die additive Fertigung                  Possibilities for the individualization of esophageal stents through additive manufacturing  <u>Daniel Michael Berger</u>, Prof. Dr.-Ing. Jan T. Sehr, Prof. Dr.-Ing. Thomas Brinkmann, Oguzhan Bilec, Niclas Heinrichs.....</p>	<p><b>144–157</b></p>

## **User case articles**

### **Forum Aviation**

Entwicklung von kryogenen Raketentriebwerkskomponenten durch additive  
Fertigung

Cryogenic Rocket Propulsion component development with Additive  
Manufacturing

Maximilian Strixner ..... **160–172**

### **Forum Design**

Kann die additive Fertigung zur Nachhaltigkeit beitragen, ohne die  
Rentabilität zu beeinträchtigen?

Can Additive Manufacturing help Sustainability without damaging  
Profitability?

Alexander Herking ..... **176–185**

Digitale Assistenzsysteme für die effiziente Entwicklung einer neuen  
Produktgeneration

Digital Assistance Systems for the Efficient Development of a New Product  
Generation

Carsten Putz, M.Sc.; Johannes Willkomm, M.Sc.; Stefan Reich, M.Sc.;

Dr.-Ing Stephan Ziegler; Prof. Dr.-Ing. Dipl.Wirt.-Ing. Johannes

Henrich Schleifenbaum ..... **186–195**

### **Forum Chemistry & Process Engineering**

Renaissance der additiven Fertigung in der chemischen Industrie

Renaissance of additive manufacturing in the chemical industry

Götz Erhardt ..... **198–202**

## Forum Mobility

Additive Fertigung, große Metallbauteile für Schienenfahrzeuge bei  
ALSTOM

Additive Manufacturing, large metal components for railway vehicles at  
ALSTOM

Dr.-Ing. Uwe Jurdeczka ..... 206–212

Wie Sie mit 3D-Druck Probleme lösen, bevor sie entstehen –

AMS – Additive Manufacturing Solutions

How 3D-printing solves problems before they arise - AMS - Additive  
Manufacturing Solutions

Ralf Anderhofstadt, Daniela Rehm ..... 214–219

## Forum Software & Processes

AddiMap – Datenökonomie für den Metall 3D-Druck – effiziente Nutzung von  
Prozessparametern

AddiMap – Data Economy for Metal Additive Manufacturing – efficient use of  
process parameters

Johannes Eckstein ..... 222–226



Dear readers,

It gives me great pleasure to present you the official proceedings of the 19<sup>th</sup> Rapid.Tech 3D conference in Erfurt.

Within this year's Rapid.Tech 3D conference more than 70 scientists, users and industry experts are presenting current research results and application examples. The lectures have been selected by the Advisory Board and the scientific lectures 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 in 3D printing since 2004.

It is important for us 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 AM Science, Aviation, Design, Chemistry, Mobility and Software & Processes.

Enjoy these proceedings and please contact us for your notes and proposals for our upcoming conference and exhibition Rapid.Tech 3D 2024.

Best regards,

Michael Kynast  
CEO  
Messe Erfurt GmbH



## Advisory Board & Review Committee

### Advisory Board

- Dr. Guido Adam, **DMG MORI Additive GmbH**
- Prof. Dr. Christiane Beyer, **Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**
- Dr. Stephan Beyer, **nFRONTIER GmbH**
- Frank Cremer, **3D Systems GmbH**
- Stephan Eelman, **Boeing Digital Aviation Solutions**
- Michael Eichmann, **Stratasys GmbH**
- Carl Fruth, **FIT AG**
- Christoph Hauck, **toolcraft AG**
- Dr. Martin Holland, **PROSTEP AG**
- Daniel Hund, **RÖSLER Oberflächentechnik GmbH**
- Dr. Simon Jahn, **Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH**
- Peter Jain, **freemelt**
- Dr. Eric Klemp, **Eisenhuth GmbH & Co. KG**
- Ulli Klenk, **SIEMENS Energy**
- Wolfgang Mildner, **MSWtech**
- Dr. Bernhard Müller, **Fraunhofer Kompetenzfeld Additive Fertigung (Fraunhofer IWU)**
- Martin Neff, **ARBURG GmbH & Co. KG**
- Dr. Dominik Rietzel, **BMW Group**
- Prof. Dr. Stefan Roth, **Hochschule Schmalkalden**
- Dr. Özlem Weiss, **Expertants GmbH**
- Prof. Dr. Gerd Witt, **Universität Duisburg-Essen**

## Scientific Review Committee

### Coordination scientific review process:

Dr.-Ing. Stefan Kleszczynski, **Universität Duisburg-Essen**

- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christiane Beyer, **Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**
- Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**
- Univ.-Prof. Dr. Peter Mayr, **Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Additiven Fertigung, Technische Universität München**
- Prof. Dr.-Ing. Stefan Roth, **Fachbereich Maschinenbau, Hochschule Schmalkalden**
- Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**
- Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner, **Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn**
- Prof. Dr.-Ing. Jan Torsten Sehart, **Lehrstuhl für Hybrid Additive Manufacturing, Ruhr-Universität Bochum**
- Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, **Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen**
- Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy, **Professur für Laser-based Additive Manufacturing, TU München**
- Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler, **Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung, TU Bergakademie Freiberg**



# **SECTION I**

## **Scientific Articles**

Articles with  
double-blind signet

## Umsetzung einer optimierten Oberflächenschlitzung zur Wirbelstromverlustreduktion auf der Oberfläche eines additiv gefertigten Permanentmagnet-Rotors

### Implementation of optimized surface slitting for eddy current loss reduction on the surface of an additively manufactured permanent magnet rotor

Michael Haase<sup>1,2</sup>, Maximilian Bieber<sup>3</sup>, Frederik Tasche<sup>2,4</sup>, Mirko Schaper<sup>2,4</sup>, Kay-Peter Hoyer<sup>2,4</sup>, Bernd Ponick<sup>3</sup>, Balázs Magyar<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>University Paderborn – Chair of Design and Drive technology, KAt, Paderborn

<sup>2</sup>University Paderborn – Direct Manufacturing Research Center, DMRC, Paderborn

<sup>3</sup>Leibniz University Hannover – Institute for Drive Systems and Power Electronics, IAL, Hannover

<sup>4</sup>University Paderborn – Chair of Materials Science, LWK, Paderborn

### Kurzfassung

Das Laser Powder Bed Fusion-Metallverfahren ist eine Technologie der additiven Fertigung, welche aufgrund der vielversprechenden Vorteile mittlerweile für die Herstellung elektrischer Maschinen von großem Interesse ist. Allerdings ist die additive Fertigung im Vergleich zu konventionellen Verfahren in diesen Bereichen nicht weit verbreitet. Eine große Herausforderung ist, die im Rotor entstehenden Wirbelströme zu reduzieren. Konventionell kommen zueinander isolierte Bleche zum Einsatz, welche die senkrecht zur Feldrichtung entstehenden Strombahnen auf schmale Bereiche der Blechquerschnitte beschränken und dadurch die Verluste stark reduzieren. In dieser Studie wurde eine Alternative entwickelt, mit der durch Anpassung von Prozessparametern und konstruktive Maßnahmen eine Oberflächenschlitzung umsetzbar ist, die zu einer wirksamen Reduktion von Wirbelströmen bei additiv gefertigten Rotoren von Synchronmaschinen eingesetzt werden kann.

### Short Abstract

The Laser Powder Bed Fusion of metals is an additive manufacturing technology which is now of great interest for the production of electrical machines due to its promising advantages. However, additive manufacturing is not widespread in these fields compared to conventional processes. A major challenge is to reduce the eddy currents generated in the rotor. Conventionally, insulated laminations are used which restrict the current paths arising perpendicular to the field direction to narrow areas of the laminations' cross-sections and thus greatly reduce the losses. In this study, an alternative was developed with which, by adapting process parameters and design modifications, a surface slot can be implemented in order to effectively reduce eddy currents in additively manufactured rotors of synchronous machines.

## 1 Einleitung und Motivation

Elektrische Maschinen finden in vielen Bereichen wie der Industrie, der Energieversorgung oder in Konsumgütern Anwendung [2–5]. Das Wachstum der Elektromobilität erhöht die Bedeutung zusätzlich. [2, 3, 5]. Elektromotoren stellen eine Kernkomponente elektrischer Antriebe dar [2]. Diese zeichnen sich unter anderem durch hohe Wirkungsgrade und eine lokal emissionsfreie Energiewandlung aus. Auf diese Weise ermöglichen sie eine energieeffiziente Nutzung und können zusätzlich die Umweltbelastung beispielsweise in Städten verringern [2, 6].

Die Anforderungen an elektrische Maschinen in Bezug auf den Wirkungsgrad steigen stetig. Trotz der hohen Wirkungsgrade gehen hohe spezifische Leistungen der Maschinen mit hohen lokalen Verlustleistungsdichten einher, welche sich insbesondere in einem Temperaturanstieg innerhalb der Maschinen äußern [3]. Um die maximale Betriebstemperatur aller Maschinenkomponenten nicht zu überschreiten und diese nicht zu schädigen, ist ein wirksames Kühlsystem notwendig [2, 7]. Bei kleinen Maschinen werden Kühlsysteme im Statorgehäuse eingesetzt. Jedoch treten mit wachsender Maschinengröße insbesondere im Rotor elektrische Verluste in Form von Stromwärmeverlusten in der Rotorwicklung sowie durch Wirbelströme auf, sodass für einen sicheren Betrieb eine zusätzliche Kühlung des Rotors notwendig ist [3, 8–10]. Hier sei für eine vorteilhafte Auslegung beispielhaft ein geringer Abstand zwischen Kühlstruktur und dem Ort der Wärmeentstehung genannt [3]. Innenliegende Kühlkanäle sind mit klassischen Fertigungsverfahren je nach Komplexität nicht oder nur unter hohem Aufwand herstellbar. Im Hinblick auf einen Einsatz der E-Maschinen in der E-Mobilität spielen neben einem hohen Wirkungsgrad zudem die Leichtbaugestaltung sowie die wirtschaftlichen Einsparungen eine entscheidende Rolle.

Hier greifen die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren, welche die Möglichkeit bieten, nahezu beliebig komplexe Bauteile zu fertigen. Die additive Fertigung zeichnet sich durch einen schichtweisen Aufbau der Bauteile aus, sodass auf den Einsatz bauteilabhängiger Werkzeuge oder Formen verzichtet werden kann [11]. Somit sind auch kleine Stückzahlen, beispielsweise individualisierter Bauteile, mithilfe additiver Verfahren wirtschaftlich herstellbar [12]. Durch die Gestaltungsfreiheiten hinsichtlich der Bauteilkomplexität kann zudem ein hohes Maß an Funktionsintegration realisiert werden. Die Möglichkeit, topologieoptimierte Strukturen sowie Bauteile mit integrierten Hohlräumen oder Gitterstrukturen zu fertigen, zeigt das Potential der additiven Fertigung für die Leichtbaugestaltung von E-Maschinenkomponenten.

Jedoch ergeben sich neben den vielfältigen Vorteilen auch Herausforderungen bei der Fertigung von Motorkomponenten, speziell der Fertigung von Permanentmagnet-Synchronrotoren (PMSM), mittels additiver Fertigung. Ein entscheidender Punkt ist die Reduzierung von Wirbelströmen, welche sich aufgrund von Oberfeldern (z.B. Nutungsoberfeldern) im Luftspalt ausbilden. Bei konventionell gefertigten, geblechten Rotoren werden die Strombahnen der Wirbelströme durch Isolierschichten zwischen den Blechen unterbrochen. Mit den additiven Fertigungsverfahren lässt sich eine solche zueinander elektrisch isolierte Struktur bislang nicht bzw. nur sehr schwer realisieren [12]. Vor allem bei den verbreiteten Pulverbettverfahren wie dem Laser Powder Bed Fusion

(LPBF) ist eine elektrische Isolierung nur durch nachgelagerte Bearbeitungsschritte realisierbar. Durch den in dieser Arbeit dargestellten Ansatz ist es allerdings möglich, mittels der entwickelten Parametersätze sowie der konstruktiven Anpassungen die Oberflächenstruktur dahingehend zu verändern, dass die Entstehung von Wirbelströmen drastisch reduziert werden kann.

## 2 Darstellung der Ausgangssituation

Wirbelströme entstehen durch magnetische Wechselfelder, welche nach dem Induktionsgesetz elektrische Spannungen induzieren, die wiederum Ströme senkrecht zur Magnetachse zur Folge haben. Konventionell wird der Magnetkreis im Rotor und Stator einer elektrischen Maschine aus dünnen, zueinander elektrisch isolierten Blechen gefertigt, die die Ausbreitung von Wirbelströmen verhindern [13]. Eine solche Isolierung ist mittels des LPBF-Verfahrens nicht möglich. Demzufolge sind die Wirbelströme in massiven, additiv gefertigten, flussführenden Bereichen deutlich größer als in den konventionell geblechten Strukturen. In additiv gefertigten Rotoren elektrischer Maschinen lassen sich Wirbelströme dennoch stark eindämmen. Durch die Einbringung von radial umlaufenden Schlitzen in der Rotoroberfläche werden die Strombahnen der Wirbelströme unterbrochen [14, 15]. Der Effekt ist ähnlich dem der Isolierung von Blechen in konventionell hergestellten Maschinen. In vorangegangenen Arbeiten [14–16] konnten bereits die positiven Effekte von additiv gefertigten Oberflächenschlitzen qualitativ gezeigt werden. Um eine maximale Unterdrückung der Wirbelströme einzustellen, müssen die Schlitze auf Schnittkurven orthogonal zur Rotationsachse entlang der Rotoroberfläche verlaufen. Da der Rotor aufgrund von Rundheitsanforderungen in der Regel stehend gefertigt werden muss, bedeutet dies, dass die Schlitze im Fertigungsprozess horizontal in Form von Leerschichten eingebracht werden müssen (siehe Abbildung 2). Da über den Leerschichten die Geometrie des Rotors fortgesetzt wird, müssen im Fertigungsprozess viele horizontale Überhänge gefertigt werden, was eine größere Herausforderung in der pulverbettbasierten additiven Fertigung darstellt.

In Abbildung 1 ist der additiv gefertigte Rotor eines PMSM von *URBANEK et al.* [16, 17] dargestellt. In Abbildung 2 sind die Abmessungen der Schlitze dargestellt, wie diese in das CAD-Modell des Rotors integriert wurden. Über die gesamte Länge des Aktivteils des Rotors (80 mm) wurden insgesamt 18 Schlitze eingebracht. Die Tiefe der Schlitze betrug 1,4 mm und die axiale Höhe 0,6 mm. Der Abstand der Schlitze zueinander betrug 4,0 mm was der daraus resultierenden Blechstärke im äußeren Bereich des Rotors entspricht. Wie in Abbildung 1 jedoch deutlich zu erkennen ist, weisen vor allem die nach unten gerichteten Flächen der Überhangbereiche deutliche Rauigkeiten auf. Dies ist auf die Schmelzbadtiefe zurückzuführen, welche so ausgelegt ist, dass ein Verschmelzen mit den Ebenen unterhalb der Belichtungsebene gewährleistet wird. Dadurch kommt es bei den nach unten gerichteten Flächen in den Überhangbereichen zu Pulveranhaftungen, welche eine raue und undefinierte Oberfläche bewirken. Wiederum hat dies zur Folge, dass im Fall einer derart ausgelegten Schlitzung die Schlitzbreite abnimmt und die resultierende Blechstärke dicker, als im CAD-Modell ausgelegt, vorliegt.

In der Studie von *HULLMANN et al.* [14] wurden Untersuchungen zur theoretischen Auslegung solcher Oberflächenschlitzungen durchgeführt. Betrachtet wurden Schlitzbreiten von 0,01 mm, 0,5 mm und 1,0 mm. Festgestellt wurde, dass sowohl die Erhöhung der Schlitzbreite als auch die Erhöhung der Schlitzanzahl einen Einfluss auf die Wirbelstromausbreitung haben. Zu beachten ist, dass mit wachsender Schlitzbreite demzufolge die maximal mögliche Anzahl von Schlitz pro Längeneinheit abnimmt. Die vorteilhaftesten Resultate wurden bei 1,78 Schlitz pro mm bei einer Schlitzbreite von 0,01 mm in FEM-Untersuchungen erzielt. Allerdings konnten auch bei den breiteren Schlitz deutliche Reduzierungen festgestellt werden. Als optimales Verhältnis von Schlitz zu weichmagnetischem Material in der Oberfläche wurde in der Studie ein Wert von 1/3 Luft zu 2/3 weichmagnetischem Material angegeben. *URBANEK et al.* [15] konnten zudem feststellen, dass durch Einbringen solcher Oberflächenschlitze die Wirbelströme tiefer ins Material eindringen. Dementsprechend ist es vor allem für niedrige Frequenzen aufgrund des Skin-Effekts notwendig, die Schlitze möglichst tief ins Bauteil einzubringen. Aus diesen Erkenntnissen wurde als Ziel gesetzt, durch Anpassungen der LPBF-Prozessparameter und der Konstruktion die Eindringtiefe der Oberflächenschlitze ins Material zu erhöhen und gleichzeitig die Abstände zueinander zu reduzieren.

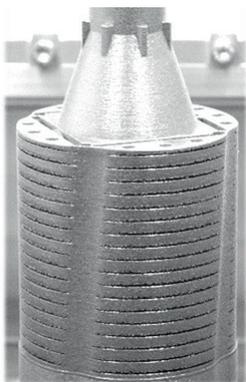


Abbildung 1: Additiv gefertigter Rotor einer PMSM aus FeSi3 mit integrierten umlaufenden Oberflächenschlitz [17]

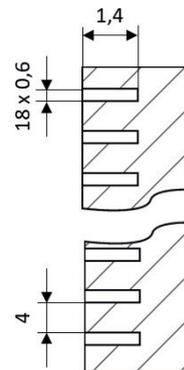


Abbildung 2: Abmessungen der im CAD generierten Schlitz

### 3 Entwicklung von Lösungsansätzen

Aus den vorausgegangenen Studien konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Tiefe der Schlitz sowie eine Reduzierung der Abstände mit den vorhandenen Prozessparametern nicht möglich ist. Um den Einfluss der Eigenspannungen und die prozessinhärent vorliegenden hohen Rauheit der Oberflächen zu untersuchen, insbesondere im Bereich der Überhänge, wurden einfache Geometrien, wie in Abbildung 3 dargestellt, hergestellt und die Einflussfaktoren bewertet. Insbesondere bei filigranen Bauteilen und Bauteilbereichen mit dünnwandigen Überhangbereichen, wie bei den Schlitz, tritt ein signifikanter Verzug durch prozessbedingte Eigenspannungen auf.



Abbildung 3: Proben zur Identifikation der resultierenden Rauheit und Ermittlung optimaler Prozessparameter für Überhänge. Links Soll-Geometrie im CAD, rechts gefertigte FeSi3 Proben mit unzulässigen Parametereinstellungen.

Durch eine Adaption der Prozessparameter wurden sowohl die auftretenden Verformungen durch Eigenspannungen als auch die Schmelzbadtiefe reduziert. Für jeweils sieben Downskin-Schichten wurden eine Laserleistung von 70 W und eine Scangeschwindigkeit von 700 mm/s genutzt. In den Standardparametern, die bei dem Rotor aus Abbildung 1 verwendet wurden, betrug die Anzahl an Downskin-Schichten vier. Für diese Schichten betrug die Laserleistung 200 W und die Scangeschwindigkeit 600 mm/s.

Tabelle 1: Veränderungen der LPBF-Downskin-Prozessparameter für das Material FeSi3

	Downskin-Schichten	Laserleistung in W	Scangeschwindigkeit in mm/s
Standard	4	200	600
Modifikation	7	70	700

Jedoch haben die durchgeführten Adaptionen zur Folge, dass die Rauheit der nach unten ragenden Oberflächen (Abbildung 4) stark zunimmt, wie ein Vergleich von Abbildung 5 und Abbildung 6 deutlich macht. Dementsprechend sollten bei der Fertigung von Rotoren mit Oberflächenschlitzungen zwei unterschiedliche Parametersätze für die jeweiligen Bereiche festgelegt werden. Den modifizierten Parametersatz gilt es, vorrangig nur für Bauteilbereiche zu nutzen, welche einen Überhangwinkel  $\delta$  kleiner  $45^\circ$  aufweisen und nicht mit Stützstrukturen versehen werden sollen.

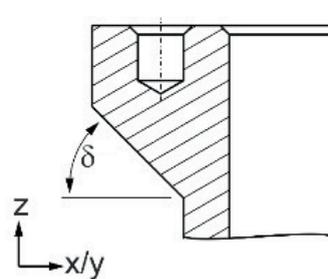


Abbildung 4: Überhangwinkel  $\delta$  der nach unten ragenden Oberflächen [1]

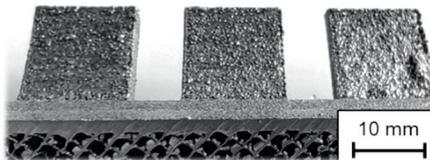


Abbildung 5: 45° Überhänge mit Standard-Downskin-Parametern

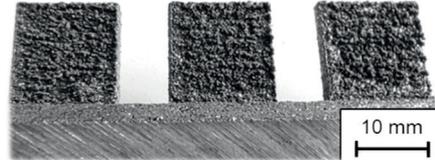


Abbildung 6: 45° Überhänge mit modifizierten Downskin-Parametern

Da eine lokale Zuteilung von Prozessparametern für bestimmte Bereiche in der Software nicht möglich ist, müssen einzelne Bauteile für die jeweiligen Bereiche generiert und mit den jeweiligen Parametersätzen festgelegt werden. Am Beispiel des Rotors (Abbildung 10) wurden so die Polkappen als separate Einzelbauteile ausgelegt und mit dem modifizierten Parametersatz gefertigt. Um zu gewährleisten, dass in dem Übergangsbereich der beiden Bauteile mit den unterschiedlichen Parametersätzen eine vollständige Verschmelzung zueinander stattfindet, wurden unterschiedliche Abstände bzw. Überlappungen der Bauteile zueinander untersucht. Anhand der Schlibbilder konnte festgestellt werden, dass bei einer Überlappung der Bauteilbereiche von 0,15 mm nahezu keine Porosität mehr festzustellen ist (Abbildung 7).

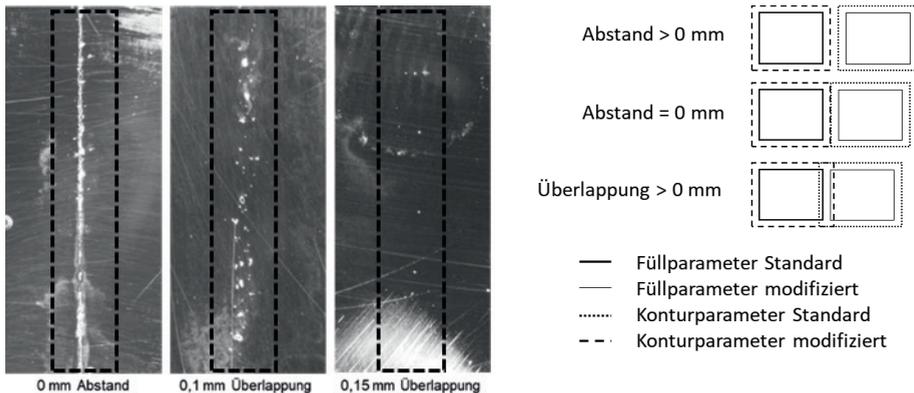


Abbildung 7: Schlibbilder (links) und skizzenhafte Veranschaulichung (rechts) aus den Überlappungsuntersuchungen beider Parametersätze

Als unterstützenden Ansatz wurde die Verformung der horizontalen Bleche konstruktiv verhindert. Dabei wurden um 180° rotierte Pyramidenstümpfe an der Rotoroberfläche in die Leerschichten eingebracht (Abbildung 8), um die durch Eigenspannungen entstehenden Kräfte aufzunehmen. Die Abmessung der Pyramidenstümpfe betragen unten 0,2 mm x 0,2 mm und oben 0,4 mm x 0,6 mm. Der Abstand der Pyramidenstümpfe zueinander betrug 0,4 mm. Die Schlitze sind derart ausgelegt, dass sie 2,0 mm ins Bauteil reinragen.

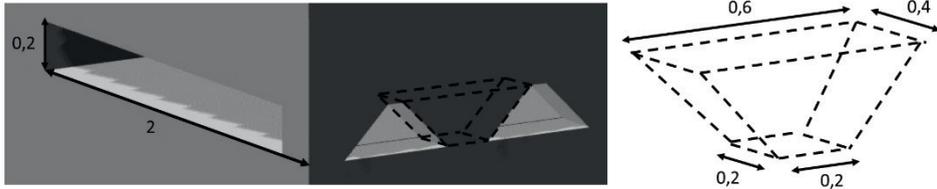


Abbildung 8: Darstellung der gewählten Schlitzung mit um 180° gedrehten Pyramidenstümpfe in der Leerschicht zur Reduktion des Verzugs (gestrichelte Kanten)

Die in Abbildung 8 dargestellten Schlißbilder zeigen von links nach rechts den Optimierungsverlauf der additiv gefertigten Schlitzte. Beginnend von links, bei dem der Standardparametersatz verwendet wurde und ein deutliches Verziehen aufgrund der Eigenspannungen zu erkennen ist, konnte durch das Einbringen der pyramidenartigen Stützstrukturen eine deutlich verbesserte Schlitzgestaltung realisiert werden. Durch Hinzunahme der modifizierten Parameter konnte zudem die Anzahl der Schlitzte deutlich erhöht werden. Die in Abbildung 8 dargestellten Schlißbilder zeigen für die jeweiligen Entwicklungsstadien einen Vergleich für 0,15 mm (links) und 0,2 mm (rechts) hohe Schlitzte. Der in den Bildern dargestellte Pfeil stellt die Aufbaurichtung (engl. *building direction*) (BD) der Proben dar.

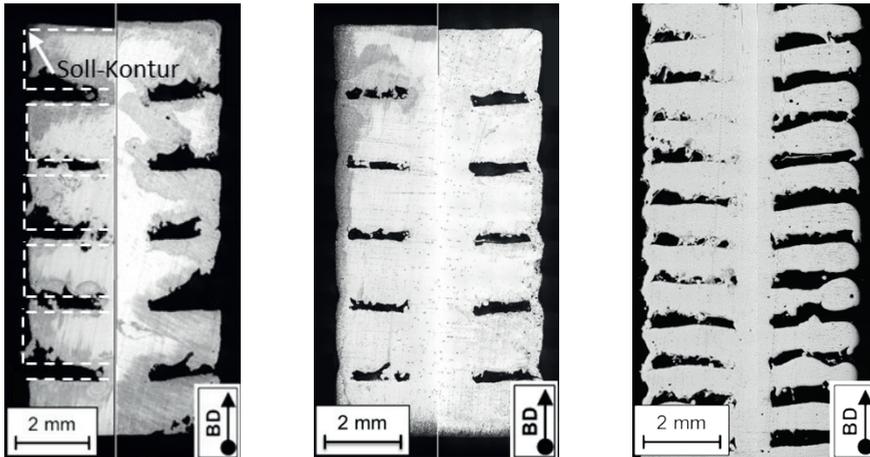


Abbildung 9: Exemplarische Schlißbilder von Prüfkörpern mit horizontalen Leerschichten, links: offene Leerschichten, Mitte: Leerschichten mit Pyramiden-Support an Außenseite, rechts: Leerschichten mit optimierten Parametern und Pyramiden-Support

Zum Schluss wurden 0,2 mm hohe Schlitzte mit einem Abstand von 0,5 mm zwischen den einzelnen Leerschichten in der finalen Geometrie des Rotors gefertigt. Dabei wurde im geschlitzten Bereich eine relative Dichte von 68 % erzielt, was nahezu dem von HULLMANN *et al.* [14] identifizierten Verhältnis von 1/3 Luft zu 2/3 weichmagnetischem Material entspricht.

Die erzielten Resultate aus den Parameterentwicklungen in Kombination mit den Konstruktionsanpassungen sowie den notwendigen Überlappungen der mit