



Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Herausgeber: Ralph Stelzer

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.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel
Eckhard Richter & Co. OHG
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>



© 2016 SAP SE oder ein SAP-Konzernunternehmen. Alle Rechte vorbehalten.



KOMPLEXITÄT DREHT SICH IMMER NUR IM KREIS.



EINFACH TRIFFT ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf sap.de/runsimple

SAP
Run Simple

Elektronenstrahlschmelzen – ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren

Burghardt Klöden · Alexander Kirchner · Thomas Weißgärber ·
Bernd Kieback · Michael Süß · Christine Schöne · Ralph Stelzer

1 Einleitung

1.1 Die Technologie

Das selektive Elektronenstrahlschmelzen (engl. Electron Beam Melting (EBM®)) ist ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren, mit dessen Hilfe metallische Bauteile schichtweise hergestellt werden können. Der schematische Aufbau einer entsprechenden Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei erfolgt die Strahlerzeugung im Bereich 1 (die Kathode besteht entweder aus Wolfram oder bei den neuesten Systemen aus ein-kristallinem LaB_6). Die Strahlablenkung durch ein elektromagnetisches Linsensystem erfolgt im Bereich 2. Der Bereich 3 ist die eigentliche Baukammer, in der sich unter anderem die Vorratsbehälter für das Pulver, das Rakelsystem sowie die Komponenten des Bauraums (Käfig mit Hitzeschild, Bauplattform mit Startplatte) befinden.

Die wesentlichen Eigenschaften des Verfahrens sind folgende:

- Der Elektronenstrahl wird sowohl für das selektive Aufschmelzen als auch das Vorheizen des Pulverbetts genutzt. Aufgrund der hohen Energiedichte kann ein weiter Bereich von Werkstoffen (z.B. Ti- und Ni-Basis, Refraktärmetalle) prinzipiell voll verdichtet werden. Weiterhin kann aufgrund der Vorheizung eine werkstoffspezifische erhöhte Temperatur im Bauraum eingestellt werden, was z.B. bei der Reduktion thermischer Spannungen vorteilhaft sein kann.
- Die Prozessatmosphäre ist Vakuum. Einerseits ist dies Voraussetzung für den Betrieb des Elektronenstrahls, andererseits lassen sich dadurch insbesondere hoch reaktive Werkstoffe verarbeiten und weiterhin sorgt das Vakuum für einen hohen Grad an thermischer Isolation.

- Die Strahlablenkung erfolgt trägheitsfrei, wodurch vergleichsweise hohe Scangeschwindigkeiten und Bauraten [Arcam 2016] erreicht werden.

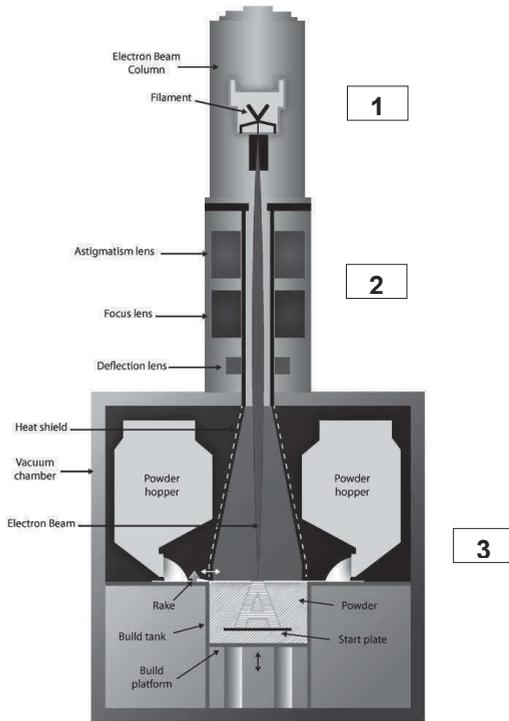


Abbildung 4: Aufbau einer EBM-Anlage

1.2 Literaturstand - Werkstoffe für EBM

Titan-basiert

Vom Anlagenhersteller Arcam sind die Titanwerkstoffe Ti-6Al-4V (Grade 5), Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) und CP-Titan (Grade 2) für die Verarbeitung mittels selektivem Elektronenstrahlschmelzen qualifiziert [Arcam 2016]. Das bedeutet, dass der Anlagenhersteller für die von ihm gelieferten Pulver die Prozessparameter liefert und die mechanischen Eigenschaften des verarbeiteten Materials verifiziert hat. Als Anwendungsgebiete werden Luft- und Raumfahrt, sowie die Medizintechnik genannt. Unter Nutzung des EBM-Verfahrens sind mittlerweile einige zehntausend Stück Hüftimplantate aus Titan kommerziell hergestellt worden. Für Ti-6Al-4V wird eine Streckgrenze

von 950 MPa, eine Zugfestigkeit von 1020 MPa und eine Bruchdehnung von 14 % als typischer Wert angegeben. Durch die höhere Abkühlrate ist das Gefüge von EBM-gefertigtem Ti-6Al-4V deutlich feinkörniger als das von gegossenem Material. Die Ermüdungsfestigkeit von heißisostatisch nachverdichteten und mechanisch polierten Proben wird mit 600 MPa benannt (10^7 Zyklen).

Insbesondere für Ti-6Al-4V sind der Einfluss der EBM-Prozessparameter auf die Eigenschaften des verarbeiteten Materials in einer Vielzahl von Untersuchungen veröffentlicht. Eine kleine, beispielhafte Auswahl soll hier vorgestellt werden:

Murr et al. untersuchen die Verarbeitung von gasverdünsten Ti-6Al-4V-Pulvern mittels EBM [Murr 2009]. Die erzielten Zugfestigkeiten lagen bei 1200 MPa. Im Vergleich zu LBM (Laserstrahlschmelzen, engl. Laser Beam Melting) zeichnet sich das EBM-Material durch eine höhere Duktilität bei leicht verringerter Festigkeit aus. Es wird beschrieben, dass sich die mittels EBM erzielten Gefüge durch Gießen, Schmieden und Wärmebehandlung nur schwer erreichen lassen, was die near-net-shape Fertigung von medizinischen Implantaten durch EBM vorteilhaft erscheinen lässt.

Juechter et al. untersuchten verschiedene Parameterkombinationen aus Strahlleistung und Scangeschwindigkeit, wobei Dichte und chemische Zusammensetzung analysiert wurden [Juechter 2014]. Es wurde eine minimale Linienenergie von circa 200 J/m bestimmt, die notwendig für die Herstellung dichter Proben ist. Dieser Wert ist nur schwach von der Scangeschwindigkeit abhängig. Eine deutliche Abhängigkeit besteht zwischen der Linienenergie und der selektiven Verdampfung einzelner Elemente. Dies betrifft vor allem Aluminium. Mittels hochauflösendem Elementmapping wurden deutliche räumliche Unterschiede in der Zusammensetzung identifiziert.

Scharowsky et al. beschreiben den Einfluss der Prozessparameter auf die erzielten Gefüge und mechanischen Eigenschaften von Ti-6Al-4V [Scharowsky 2015]. Eine Korrelation wird zwischen der Volumenenergie und der Dicke der -Platten hergestellt. Diese variiert zwischen 0.5 und 2.5 μm . Entsprechend der Hall-Petch-Beziehung wurden Unterschiede in den Festigkeitswerten registriert.

Die Verarbeitung verschiedener -TiAl-Legierungen mittels EBM wurde untersucht [Biamino 2011, Biamino 2014, Schwerdtfeger 2014]: Ti-48Al-2Cr-2Nb (GE-Legierung, übliche Anwendung Gasturbinen), Ti-48Al-2Nb-0,7Cr-0,3Si (RNT650, übliche Anwendung automobile Turbolader) und Ti-48Al-2Cr-8Nb. Die Herstellung von TiAl-Turbinenschaufeln mittels EBM hat bei

der Firma Avio GE einen Stand erreicht, dass Testtriebwerke mit additiv hergestellten Teilen ausgerüstet werden können.

Sonstige

Vom Anlagenhersteller Arcam ist die CoCr-Legierung gemäß ASTM F75 für den EBM-Prozess qualifiziert [Arcam 2016]. Anwendungsgebiet sind orthopädische und dentale Implantate sowie Gasturbinen. Geeignet wärmebehandelte EBM-Bauteile weisen 960 MPa Zugfestigkeit, 20 % Bruchdehnung und 610 MPa Dauerfestigkeit auf und erfüllen damit die ASTM-Vorgaben. Murr et al. fanden in den EBM-Proben Cr_{23}C_6 -Karbide, die eine Vorzugsorientierung in Baurichtung und einen mittleren Abstand von 2 μm aufwiesen [Murr 2011a]. Außerdem wurde der Zusammenhang zwischen Steifigkeit und Dichte bei erzeugten Gitterstrukturen aus CoCr beschrieben. Sun et al. ermittelten die Festigkeiten von EBM-CoCr in Abhängigkeit von der Orientierung zur Baurichtung [Sun 2014]. Die geringsten Festigkeiten wurden rechtwinklig zur Baurichtung ermittelt. Oberhalb einer bestimmten Bauhöhe kommt es zur Texturausbildung.

Eine Reihe von Nickelbasislegierungen wurde auf ihre Verarbeitbarkeit mittels EBM und die erzielbaren Werkstoffeigenschaften untersucht [Murr 2011b, Strondl 2008, Strondl 2011, Helmer 2014, Murr 2013, Ramsperger 2015]: INCONEL 625, INCONEL 718, Rene 142 und CMSX-4. Die Entwicklungen sind primär für Hochtemperaturanwendungen in Gasturbinen gedacht.

1.3 Literaturstand – Konstruktionsrichtlinien für EBM

Um additive Fertigungsverfahren für Industrieanwendungen zu etablieren, ist es notwendig dem Konstrukteur die Eigenheiten und Charakteristika des Verfahrens und deren Umgang durch Richtlinien und Empfehlungen vorzugeben [Wohlers 2015, Gausemeier 2011]. Bisher gibt es im Bereich der laserbasierenden generativen Fertigung ausführliche Konstruktionsempfehlungen sowohl aus der Forschung [Thomas 2009, Zimmer 2013, Sempari 2014, Kranz 2014] als auch von Seiten der Anlagenhersteller [EOS 2016, Stratasys 2016]. Bei genauer Betrachtung dieser Richtlinien sind Unterschiede innerhalb der Verfahren sowie zwischen den jeweilig genutzten Anlagen ersichtlich. Demnach können Konstruktionsempfehlungen nur an speziellen Anlagen mit dafür erprobten und empfohlenen Materialien sowie entsprechenden Prozessparametern appliziert werden. Daher ist davon auszugehen, dass es beim EBM-Verfahren andere konstruktive Möglichkeiten im Vergleich zu Laserstrahlschmelzverfahren gibt. Derzeit existieren jedoch keine umfassenden Designrichtlinien für das EBM-Verfahren.

Bei der Erforschung von Materialkennwerten wie bspw. Festigkeiten und thermisches Materialverhalten gibt es erste Erkenntnisse über Geometriegrenzwerte. Vayre et al. haben festgestellt, dass der minimal mögliche Zylinderdurchmesser in Strahlrichtung 0,6 mm beträgt und sich Überhänge ohne Supportstruktur bis zu einer Länge von 8 mm verzugsfrei fertigen lassen [Vayre 2013]. Suard et al. beschreiben die Geometriegenauigkeit von Gitterstrukturen in verschiedenen Winkelabstufungen bei 1 mm ohne Support und zeigen damit deren Fertigbarkeit. Zusätzlich werden winkelabhängige Rauigkeiten der Zylinder erfasst [Suard 2015].

2 Fallstudien am Fraunhofer IFAM Dresden

2.1 Prozessentwicklung

Sowohl für bereits qualifizierte, aber insbesondere für im EBM-Verfahren noch nicht verarbeitete Werkstoffe sind Untersuchungen zu Eigenschaften in Abhängigkeit von den verwendeten Prozessparametern notwendig. Im ersten Schritt sollen die Proben eine möglichst hohe Dichte (>99%) und eine möglichst niedrige interne Defektdichte aufweisen. Nachfolgende Schritte beinhalten bspw. die Herstellung von Testmustern bei unterschiedlichen Parametern für weiterführende Analysen (z.B. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften). Der erste Schritt soll anhand des Werkstoffs Ti-6Al-4V beschrieben werden. Es handelt sich hier zwar um einen seitens des Anlagenherstellers Arcam qualifizierten Werkstoff, aber es wird üblicherweise nur ein Satz von Prozessparametern zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer Studie ein Prozessfenster erstellt. Hierbei handelt es sich um die Auftragung zweier wesentlicher Prozessparameter, des Strahlstroms und der Scangeschwindigkeit.

Das Pulver in der Fraktion 45 – 105 μm wurde vom Anlagenhersteller bezogen. Es wurden quaderförmige Proben (50 x 10 x 14 mm³) im EBM-Prozess aufgebaut. Dabei wurde in einer Serie zu 10 Proben der Strahlstrom konstant gehalten, während die Scangeschwindigkeit variiert wurde. Die verwendeten Prozessparameter und deren Bereiche sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Parameter	variiert/konstant	Variationsbereich/Festwert
Scangeschwindigkeit	variiert	500–16 000 mm/s
Beschleunigungsspannung	konstant	60 kV
Strahlstrom/ Beam Current	variiert	3–24 mA
Focus Offset	konstant	3 mA
Hatch-Abstand	konstant	100 µm
Schichtdicke	konstant	50 µm
Vorheiztemperatur	konstant	700–750° C

Tabella 1: Prozessparameter für die Erstellung des Prozessfensters von Ti-6Al-4V.

Die Auswertung der Proben soll an einem Beispiel erläutert werden. Die entsprechende Probenserie (Strahlstrom: 24 mA, Scangeschwindigkeit: 4 – 16 m/s) ist in Abbildung 5 zu sehen.

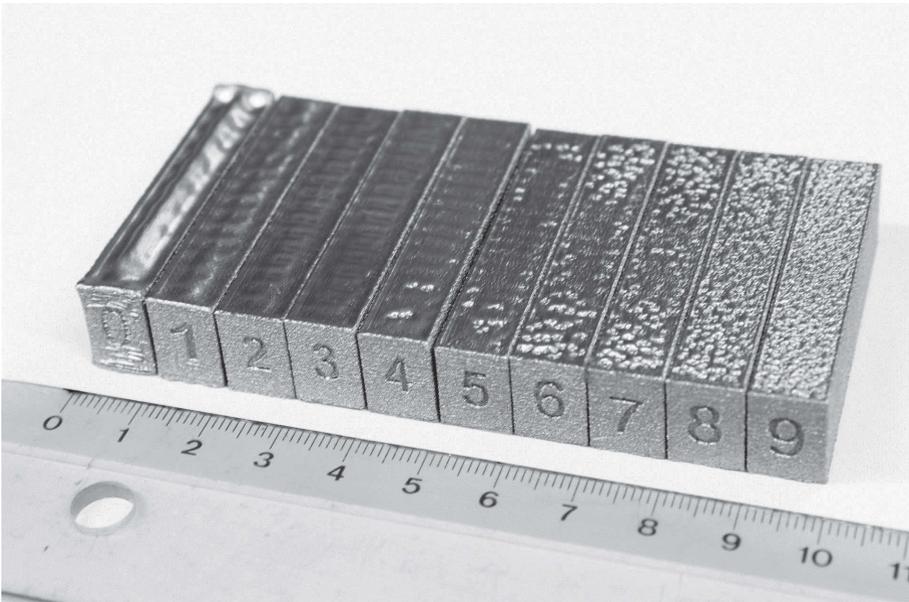


Abbildung 5: Probenserie EBM (Werkstoff Ti-6Al-4V)

Der visuelle Eindruck anhand der Probenoberfläche zeigt im Wesentlichen drei unterschiedliche Gebiete:

- Für die niedrigsten Scangeschwindigkeiten (Proben 0 und 1) sind Aufwüchse auf der Oberfläche zu beobachten. Der Grund dafür ist, dass aufgrund der sehr hohen eingebrachten Energie die Proben so weit erhitzt werden, dass das jeweils neu aufgerakelte Pulver zumindest partiell geschmolzen wird.
- Für mittlere Scangeschwindigkeiten (Proben 2 – 4) ist die Oberflächenqualität wesentlich verbessert (hierbei ist zu beachten, dass die jeweils letzte Schicht senkrecht zum Elektronenstrahl eine sehr gute Oberflächenqualität besitzt. Diese ist jedoch für alle Flächen parallel zum Elektronenstrahl mit mittleren Rauigkeiten von ca. 30 – 40 μm wesentlich schlechter).
- Für die höchsten Scangeschwindigkeiten (Proben 5 – 9) ist zunehmend Porosität an der Probenoberfläche nachweisbar. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass die eingebrachte Energie nicht mehr ausreichend für eine vollständige Verdichtung ist. In diesem Fall sind auch interne Baufehler in Form von Porosität zu erwarten.

Für alle aufgebauten Proben wurde die Dichte analysiert. Die Werte sind für die oben genannte Probenserie in als Funktion der Scangeschwindigkeit dargestellt Abbildung 6.

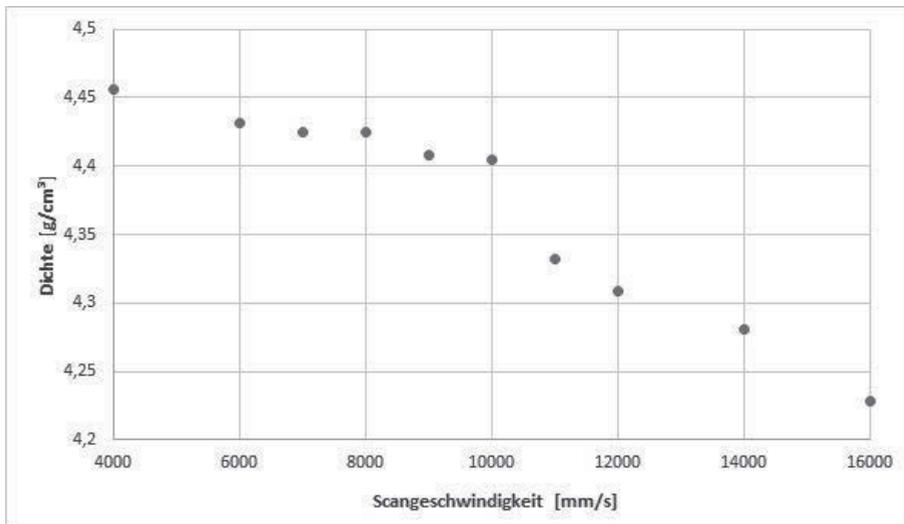


Abbildung 6: Dichtewerte für Probenserie (Ti-6Al-4V), Strahlstrom 24 mA

Auch hier sind drei Bereiche unterscheidbar:

- Zwischen 6–10 m/s (Proben 1–5) ist die Dichte im Bereich der theoretischen Dichte für den Werkstoff (4.43 g/cm³), was auf eine vollständige Verdichtung im Prozess hindeutet
- Für 4 m/s (Probe 0) ist die Dichte im Vergleich zum theoretischen Wert leicht erhöht. Ein Grund dafür kann sein, dass aufgrund des hohen Energieeintrags das Element Aluminium in geringer Menge abdampft.
- Für Scangeschwindigkeiten > 10 m/s ist ein signifikanter Abfall der Dichte bestimmt worden. Dies ist ein weiterer Hinweis sowohl auf externe als auch interne Porosität in Folge eines zu geringen Energieeintrags.

Die Zusammenfassung der Analysen ist als Prozessfenster in Abbildung 7 zu sehen. In Bezug auf die sogenannte Linienenergie (Leistung / Scangeschwindigkeit, Einheit [J/m]) sind drei Bereiche unterscheidbar, wobei insbesondere zwischen 100–200 J/m dichte und intern defektfreie Proben herstellbar sind. Diese Daten dienen als Grundlage einerseits für das verbesserte Verständnis zwischen Eigenschaften und Prozess: beispielsweise sind die Mikrostruktur und damit z.B. mechanische Eigenschaften abhängig von den Prozessparametern. Andererseits kann eine Prozessoptimierung, z.B. in Bezug auf die Baurate vorgenommen werden.

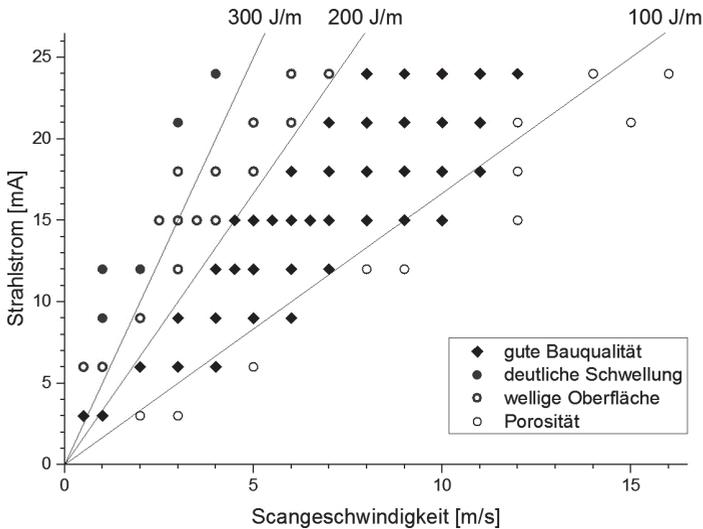


Abbildung 7: Prozessfenster Ti-6Al-4V

2.2 Konstruktion – Topologieoptimierung

Die additive Fertigung von Funktionsbauteilen ist nach heutigem Stand der Technik vor allem für Einzelteil- bzw. Prototypen- und Kleinserienbauteilen relevant. Aufgrund der prozessbedingten Designfreiheiten bei der Fertigung von Bauteilen ist ein Umdenken im Entwicklungsprozess notwendig. Wo üblicherweise werkzeugbedingte Restriktionen wie minimale Radien von Schnittwerkzeugen und Entformungsschrägen bei der Gussfertigung relevant werden, sind bei der metall-additiven, schichtbasierten Fertigung vor allem Themen wie Stützstrukturen, Eigenspannungen, Pulverentfernung und raue Oberflächen zu thematisieren. Diese Möglichkeiten und Einschränkungen sind bei der Entwicklung von Bauteilen einflussgebend. Als Beispiel dafür soll im Folgenden die Topologieoptimierung einer Getriebehalterung – dem Main Gearbox Bracket – für ein Helikoptergetriebe dienen. Ziele dieser Optimierung sind:

- eine signifikante Massereduktion im Vergleich zur bisherigen Konstruktion,
- die Zusammenführung der bestehenden Baugruppe zu einem Bauteil,
- die Ausnutzung der additiven Fertigung mittels Elektronenstrahlschmelzen,
- die Beachtung der Montagegegebenheiten zur angrenzenden Struktur,
- und die Auslegung auf statischen Lastfälle sowie Zeit- und Dauerfestigkeitslasten.

Die bisherige Baugruppe besteht aus zwei Einzelteilen – dem sogenannten Upper Bracket und dem Counter Bracket – die miteinander über 4 Schrauben verbunden sind, wie in Abbildung 8 dargestellt. Über das Lager im Upper Bracket werden die Lasten auf das Counter Bracket und über Nieten in die umliegende Struktur eingeleitet.

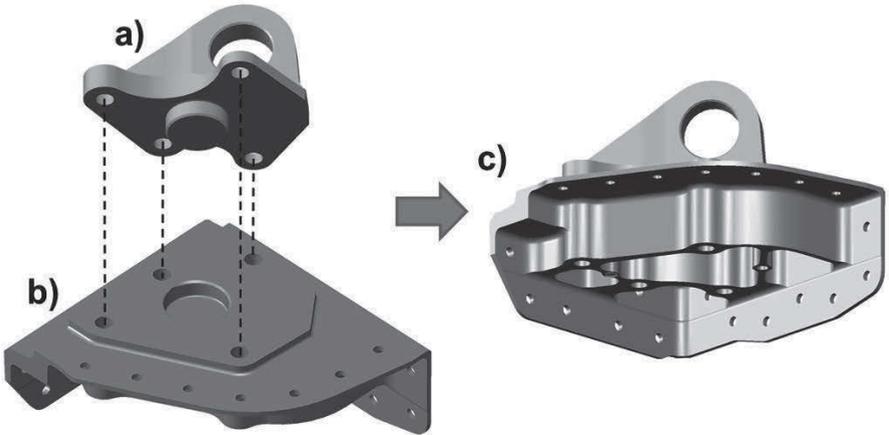


Abbildung 8: a) Upper Bracket, b) Counter Bracket und das c) Main Gearbox Bracket

Die Prozesskette für die Optimierung der Getriebehalterung ist in Abbildung 9 dargestellt. Im Folgenden werden die Teilschritte dieser Prozesskette erläutert und Einflüsse in Bezug auf das Fertigungsverfahren im Gegensatz zur konventionellen Fertigung dargestellt

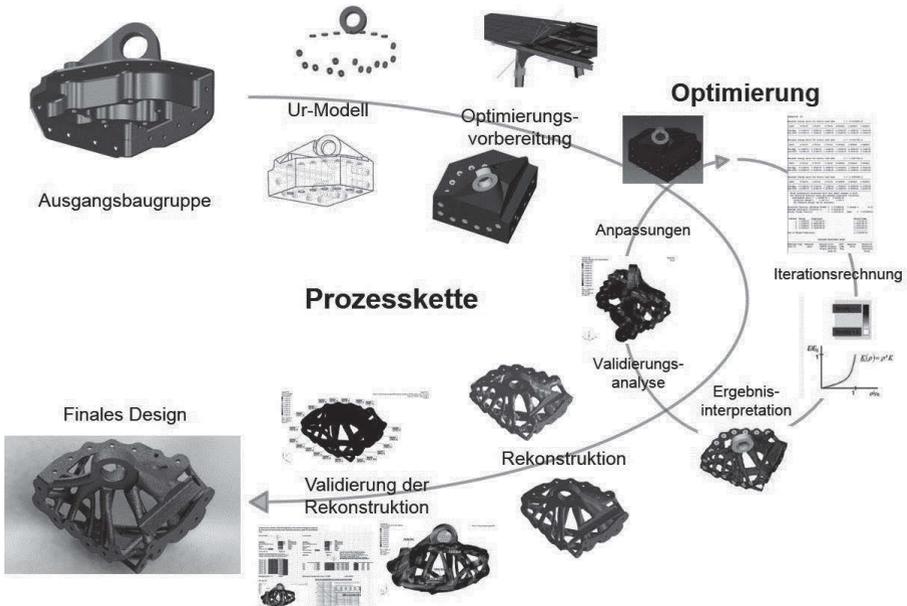


Abbildung 9: Prozesskette des Optimierungsproblems

Um die Baugruppe strukturell zu optimieren, ist es notwendig eine Art Ausgangsform, im Folgenden Ur-Modell genannt, zu gestalten. Dieses Ur-Modell legt den maximalen für die Strukturoptimierung zur Verfügung stehenden Raum fest. Darüber hinaus werden die Anschlussmaße und -geometrien zu umgebenden Strukturen berücksichtigt. In der Regel muss im Zuge dessen auch die Montierbarkeit zu diesen umliegenden Strukturen beachtet werden. Im Falle dieser Fallstudie handelt es sich um Niete, deren Zugänglichkeit zu den Bohrungen im unteren Bereich des Bauteiles beachtet werden müssen.

Diese Herangehensweise führte nach ersten Simulationen zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Eine Änderung im Ur-Modell mit Einbezug der Freiheiten der additiven Fertigung führte zum Ziel. Erste Simulationsergebnisse zeigten, dass es nicht notwendig ist die Zugänglichkeit für die Niete einzuschränken, wenn sichergestellt werden kann, dass die entstehende Struktur nicht zu dicht ist. Dies lässt sich mit entsprechenden Optimierungsparametern einstellen. Ausschließlich der Freiraum für die Niete, um diese ins Loch zu führen, wurde berücksichtigt. Das Ur-Modell als Drahtgittermodell zur Veranschaulichung zeigt dies in Abbildung 10.

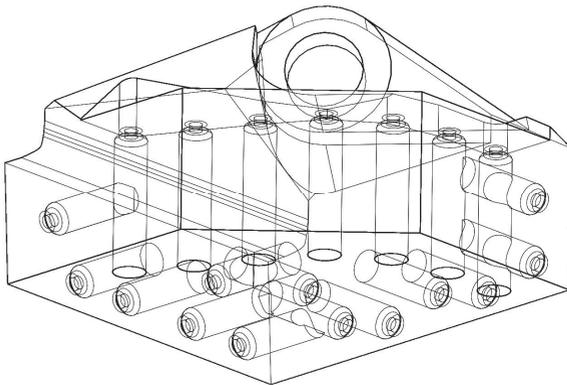


Abbildung 10: Drahtgittermodell des Ur-Modells

Das Ur-Modell wird danach in der Simulationsumgebung für die Analyse und Optimierung vorbereitet. Dies umfasst das Auswählen von veränderlichen und nicht veränderlichen Designbereichen, sowie das Umwandeln des Bauteilvolumens in finite Elemente für die Berechnung. Das entstehende Netz wird um weitere 1- und 2-dimensionale Elemente ergänzt um die Lasteinleitung und Weitergabe an die Niete sowie die Niete selbst zu simulieren. Zusätzlich zu diesem Modell werden Optimierungsparameter definiert. Neben dem Optimierungsziel – der Massereduktion – werden

Randbedingungen festgelegt. Beispielhaft seien hierbei maximale ertragbare Spannungen bei entsprechenden Lastfällen und minimale Strukturgrößen zur Gewährleistung der Montagezugänglichkeiten genannt. Darüber hinaus lassen sich auch Werkzeugzugänglichkeiten und Entformungsrichtungen definieren, die allerdings in Anbetracht der additiven Fertigung keine Relevanz haben und den Lösungsalgorithmus unnötig einschränken.

Die Optimierungssoftware errechnet anhand dieser Vorgaben in mehreren Iterationsschleifen eine Lösung für das Optimierungsproblem, was beispielhaft in Abbildung 11 dargestellt ist. Diese Ergebnisse werden interpretiert und mit den zugrundeliegenden Vorgaben (Lastzyklenzahlen, etc.) verglichen. Mitunter sind Optimierungsparameter zu präzisieren, sollte die Lösung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern.

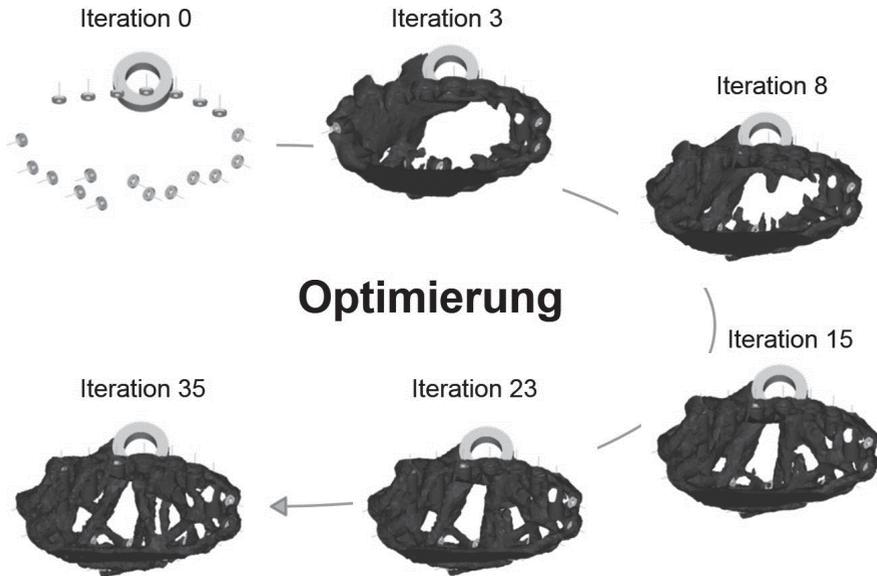


Abbildung 11: Iterationsschritte bei der Optimierung

Ist eine Lösung gefunden, muss der Entwurf für die Fertigung aufbereitet werden. Dafür lässt sich typischerweise nicht direkt der Optimierungsentwurf verwenden. Der Entwurf muss vor allem bei konventionellen Fertigungsverfahren neu konstruiert werden. Grund dafür sind u.a.:

- raue Oberflächen durch die Umwandlung in finite Elemente,

- fehlerhafte und unveränderliche Datenformate bei dem Austausch zwischen CAE und CAD Umgebungen,
- keine parametrisierten, formtreuen Strukturen und Informationen für den Werkzeugeinsatz,
- deformierte und dimensional nicht fertiggabare Strukturen,
- sowie bewusste Änderungen im Design aufgrund von Fertigungsvereinfachungen.

Einige dieser Gründe, wie beispielsweise parametrisierte, formtreue Strukturen und Unveränderlichkeit durch Datenformataustausch sind in Bezug auf die additive Fertigung irrelevant und können vernachlässigt werden. Für die additive Fertigung mit Elektronenstrahlschmelzen wird derzeit das *.stl-Format genutzt. Diese Beschreibung der Oberfläche ähnelt der finiten Elemente Oberfläche der Optimierung. Durch diese Tatsache und die Möglichkeit unregelmäßige und nicht-parametrisierte Strukturen zu fertigen, wird die Übergabe des Optimierungsentwurfs und weiterführend die Änderung des Entwurfes ohne eine neue Konstruktion begünstigt.

Werden im Zuge dessen Arbeiten am Design vorgenommen, wird das finale Design nochmals analysiert, um sicherzustellen, dass die Optimierungsergebnisse und damit die Auslegungskriterien erfüllt werden. Das digitale, finale Modell ist danach für die Fertigung vorzubereiten. Nach Erstellung der fertiggabaren STL-Datei, Festlegen der Baurichtung, der Positionierung im Bauraum und Anbringen von Supportstruktur an kritischen Strukturen wird das Bauteil gefertigt. Abbildung 12 zeigt die gefertigte Getriebehalterung als Demonstrator.



Abbildung 12: Demonstrator der Main Gearbox Bracket

Unter Anbetracht dessen, dass die bisherige Baugruppe bereits für die konventionelle Fertigung optimiert wurde, ist mit der Reduktion der Masse um mehr als 40% im Zuge dieser Arbeit nochmals eine signifikante Steige-

rung erreicht worden. Der Einfluss der additiven Fertigung auf die Topologieoptimierung hat dabei nicht nur Einfluss auf die Optimierung und das Einsparpotenzial. Vielmehr sind die Einflüsse bei der Prozesskette an sich zum Tragen gekommen. Beispielhaft dafür sind der Umdenkprozess im Ur-Modell und die Freiheiten bei der Optimierung genannt.

Mit dem Verständnis des Fertigungsprozesses, den Möglichkeiten von Simulations- und Optimierungssoftware und eines Umdenkens zu einem frühen Zeitpunkt im Designprozess können somit die Potenziale der additiven Fertigung voll ausgeschöpft werden.

Literaturverzeichnis

- Arcam Datenblätter 2016. <http://www.arcam.com/technology/products/metal-powders/>, abgerufen am 07. April 2016
- Murr, LE et al 2009: Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications, *J Mech Behav Biomed* 2, 20-32.
- Juechter V et al 2014: Processing window and evaporation phenomena for Ti-6Al-4V produced by selective electron beam melting, *Acta Mater* 76, 252-258.
- Scharowsky, T et al 2015: Influence of the scanning strategy on the microstructure and mechanical properties in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V, *Adv Eng Mater* 17 (11), 1573-1578
- Biamino, S et al 2011: Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation, *Intermetallics* 19, 776-781.
- Biamino, S et al 2014: Titanium aluminides for automotive applications processed by electron beam melting, *World PM2014 Proc*, 03-96 – 03-103.
- Schwerdtfeger, J et al 2014: Selective electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: Microstructure and aluminium loss, *Intermetallics* 49, 29-35.
- Murr, LE et al 2011a: Microstructure and mechanical properties of open-cellular biomaterials prototypes for total knee replacement implants fabricated by electron beam melting, *J Mech Behav Biomed* 4, 1396-1411.
- Sun, SH et al 2014: Build direction dependence of microstructure and high-temperature tensile property of Co-Cr-Mo alloy fabricated by electron beam melting, *Acta Mater* 64, 154-168.
- Murr, LE et al 2011b: Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting, *Metall Mater Trans A* 42, 3491-3508.
- Strondl, A et al 2008: Investigations of MX and ' / ' precipitates in the nickel-based superalloy 718 produced by electron beam melting, *Mater Sci Eng A* 480, 138-147.
- Strondl, A et al 2011: Microstructure and mechanical properties of nickel based superalloy IN718 produced by rapid prototyping with electron beam melting, *Mater Sci Tech* 27, 876-883.

- Helmer, HE et al 2014: Additive manufacturing of nickel-based superalloy Inconel 718 by selective electron beam melting: Processing window and microstructure, *J Mater Res* 29, 1987-1996.
- Murr, LE et al 2013: Microstructures of Rene 142 nickel-based superalloy fabricated by electron beam melting, *Acta Mater* 61, 4289-4296.
- Ramsperger, M et al 2015: Solution heat treatment of the single crystal nickel-base superalloy CMSX-4 fabricated by selective electron beam melting, *Adv Eng Mater* 17 (10), 1486 – 1493
- Wohlers Report 2015, 3D Printing and Additive Manufacturing, State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report, ISBN 978-0-9913332-1-9
- Gausemeier et al 2011: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries, Internet: http://www.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06_Downloads/01_Studies/DMRC_Study_Part_1.pdf, 6.01.2016.
- Thomas, D 2009.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting, University of Wales, Internet: <http://hdl.handle.net/10369/913>, 10.04.2015.
- Zimmer, D et al. 2013, Design Rules for Additive Manufacturing, *Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*, Volume7/8-2013, pp. 77-82.
- Sempari, M. T. 2014: Development of design guidelines for metal additive manufacturing and process, Internet: <https://etda.libraries.psu.edu/paper/21832/22475>, 6.01.2016
- Kranz, J. et al. 2014: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4, *Journal of Laser Applications* 27, S. 14001 9.04.2015
- EOS, Additive Fertigung - Basis Designrichtlinien für die Additive Fertigung, Internet: https://www.eos.info/werkstoffe-p/designrichtlinien_additive_fertigung.pdf, 6.01.2016
- Stratasys, Laser Sintering – Design Guidelines, Unter: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xCP8ytKELi4J:https://www.stratasysdirect.com/resources/laser-sintering/+&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=de>, 06.01.2016
- Vayre, B. et al. 2013: Identification on some design key parameters for additive manufacturing: application on Electron Beam Melting, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems
- Suard M. et al. 2015: Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting, Internet: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01241583/document>, 11.01.2016

Kontakt

Dr. rer. nat. Burghardt Klöden
Dr.-Ing. Alexander Kirchner
Dr.-Ing. Thomas Weißgärber
Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback

Fraunhofer IFAM, Institutsteil Dresden
Winterbergstr. 28
01217 Dresden
www.ifam-dd.fraunhofer.de

Michael Süß
Dr.-Ing. habil. Christine Schöne
Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
Zeunerbau, Zi. 217
George-Bähr-Straße 3c
01062 Dresden

*[https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/
fakultaet_maschinenwesen/imm/ktc](https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/imm/ktc)*