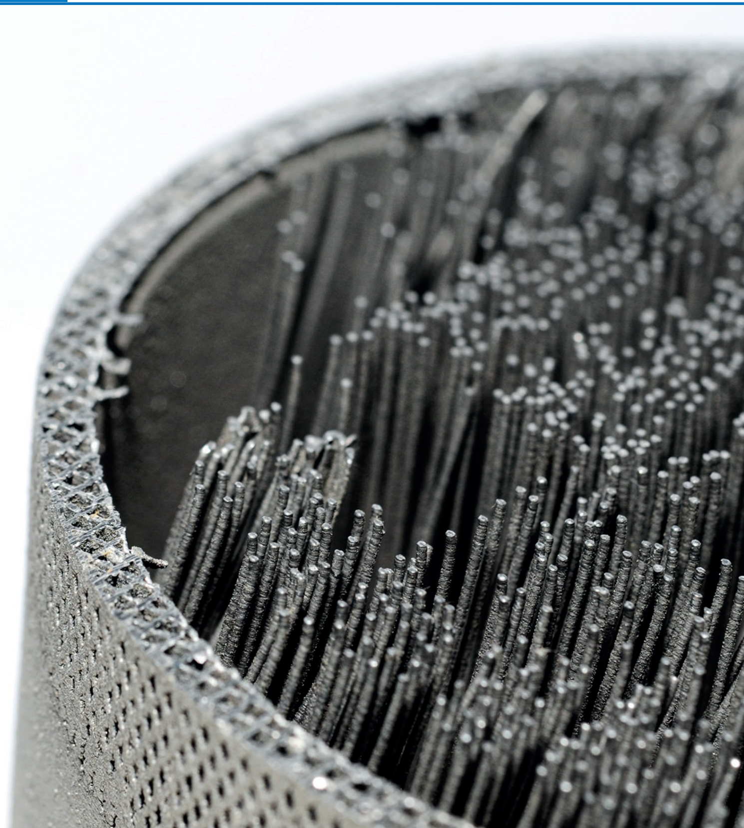
Support Structure Design in Additive Manufacturing

A parametric approach on support structure design for the laser-based powder bed fusion of metals

Sebastian Weber



Produktentwicklung

Sebastian Weber

Support Structure Design in Additive Manufacturing

A parametric approach on support structure design
for the laser-based powder bed fusion of metals

Shaker Verlag
Düren 2023

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.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2022

Compliant version of the dissertation "Support Structure Design in Additive Manufacturing", TU Dresden, November 25th, 2022.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8925-7
ISSN 1866-1742

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preface

The dissertation at hand on the support structure design in metal additive manufacturing (AM) emerged from a research project on the re-design of spare parts for AM. Samples manufactured for this project demonstrated the need for an increased knowledge of support design to diminish build failures, leading to the topic of this dissertation. Due to the limited resources of the university regarding AM machines at this time, AM process simulations played a huge role in this study.

First of all, I would like to thank my supervisor and former head of the Institute for Technical Product Development (ITPE) *Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold* for her excellent guidance throughout my time as a doctoral student and for her support on decisions made concerning my dissertation. At this point, I also want to thank my second reviewer *Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause* for his commitment and dedication.

Further, I like to express my sincere gratitude to *Dr. Matthias Bleckmann*, the initial project coordinator, for his outstanding guidance and all the helpful feedback on publications and this dissertation, which has truly enriched my work. Thank you for all your valuable time and the project initiation.

I would also like to thank my colleagues for the pleasant time at the institute. Especially my AM teammates *Joaquin Montero* and *Laura Wirths* for their ideas and assistance, and *Alexander Atzberger, Jan Mehlstäubl, Simon Nicklas, Julian Schönwald, Anne Wallisch, Emir Gadzo, Martin Denk* and *Marvin Michalides*. Not to forget the ITPE friends *Lea Strauß, Michael Ascher* and *Alexander Schmidt*. For all the support with printed AM parts, I want to specifically thank *Christoph Petroll* and *Felix Zimmer*, as well as *Stefan Brenner* and *Martin Moser*.

Last but not least, I would like to thank my family and friends, especially my parents, for always having my back and supporting me wherever they could.

Sebastian Weber
Augsburg, February 25th, 2022

Abstract

Additive manufacturing (AM) is known for the ability to create complex features, commonly referred to as *design freedom*. Especially for the laser-based powder bed fusion of metals, support structures are often still required for printability reasons or increased process reliability. Currently, there is a lack of knowledge about support structure design, leading to the risk of build failures or increased material consumption.

The primary aim of this study was the development of an approach for the design of tree-like support structures to help designers achieve the best mechanical behavior of an additively manufactured part. For this, experimental studies on the printability, geometrical accuracy and strength of thin struts were performed and an AM process simulation model was set up for four generic overhang geometries. This model was then used for parameter optimization to determine support structure design parameters, resulting in Pareto optimal support designs regarding the support volume and the part's deformation. Based on these results, recommendations were derived to further increase the understanding of support structure design. Measurements of printed samples were used to verify simulation results and the suitability of tree-like support. In addition, two case studies on the additive manufacturing of discontinued spare parts were used for an initial validation of the approach and derived recommendations.

This research was the first to consider thermal and structural loads in a parameter optimization for the design of support structures with the objective of an increased mechanical behavior of the part. The potential of the presented approach to achieve a successful print on the first attempt was shown by a case study. In addition, the optimization results showed a reduced warping of the part for an increased diameter at the upper section of the support structure. The understanding of support structure design was further enhanced by the identified effect of the diameter on the geometrical accuracy of thin struts. The presented approach forms the basis for fully automated support generation tools, which require little to no user input.

Kurzfassung

Die additive Fertigung (AM) ist dafür bekannt, die Herstellung komplexer Strukturen zu ermöglichen, was allgemein als Gestalungsfreiheit bezeichnet wird. Dennoch sind, insbesondere beim laserbasierten Pulverbettschmelzverfahren von Metallen, häufig Stützstrukturen erforderlich, um die Druckbarkeit zu gewährleisten oder die Prozesssicherheit zu verbessern. Derzeit existiert ein Wissensdefizit in der Gestaltung von Stützstrukturen, was zu einem erhöhten Materialverbrauch oder sogar zu Fertigungsabbrüchen führt.

Das Hauptziel dieser Studie war die Entwicklung eines Ansatzes für die Gestaltung baumartiger Stützstrukturen, um Konstrukteuren zu erleichtern, das beste mechanische Verhalten eines additiv gefertigten Teils zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden experimentelle Versuche zur Druckbarkeit, geometrischen Genauigkeit und Festigkeit dünner Stäbe durchgeführt und ein Simulationsmodell des AM-Prozesses für vier generische Überhanggeometrien erstellt. Dieses Modell wurde anschließend zur Parameteroptimierung verwendet, um Parameter der Stützstruktur zu bestimmen, die zu Pareto-optimalen Ergebnissen bezüglich des Stützstrukturvolumens und der Bauteilverformung führen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden Empfehlungen abgeleitet, die den Wissensstand über die Auslegung von Stützstrukturen weiter verbessern. Messungen an gedruckten Proben dienten zur Verifizierung der Simulationsergebnisse und Überprüfung der Eignung von baumartigen Strukturen als Stützstrukturen. Darüber hinaus wurden zwei Fallstudien zur additiven Fertigung von nicht mehr verfügbaren Ersatzteilen für eine erste Validierung des Ansatzes und der abgeleiteten Empfehlungen verwendet.

In diesem Forschungsprojekt wurden erstmals thermische und strukturmechanische Lasten in einer Parameteroptimierung berücksichtigt, die der Auslegung von Stützstrukturen mit dem Ziel eines verbesserten Bauteilverhaltens dient. Das Potenzial des vorgestellten Ansatzes, im ersten Versuch einen erfolgreichen Druck zu erzielen, wurde durch eine Fallstudie bewiesen. Die Ergebnisse der Parameteroptimierung zeigten einen reduzierten Bauteilverzug bei größeren Durchmessern an der Spitze der Stützstruktur. Neue Erkenntnisse wurden auch über den Einfluss des Durchmessers von dünnen Stäben auf die geometrische Genauigkeit erlangt. Mit dem vorgestellten Ansatz wird die Grundlage für vollautomatische Tools zur Erzeugung von Stützstrukturen geschaffen, die wenig bis gar keine Benutzereingaben erfordern.

Contents