



Tobias Rosnitschek

**Digitale Materialentwicklung
am Beispiel strukturgefüllter
metallischer Komponenten
in der extrusionsbasierten
additiven Fertigung**

**Digitale Materialentwicklung am Beispiel strukturgefüllter
metallischer Komponenten in der extrusionsbasierten
additiven Fertigung**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Tobias Wolfgang Rosnitschek, M.Sc.

aus

Tirschenreuth

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel

Tag der mündlichen Prüfung: 27.01.2023

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Universität Bayreuth

2023

Fortschritte in Konstruktion und Produktion

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg und
Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Band 59

Tobias Rosnitschek

**Digitale Materialentwicklung am Beispiel
strukturgefüllter metallischer Komponenten
in der extrusionsbasierten additiven Fertigung**

Shaker Verlag
Düren 2023

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.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9014-7

ISSN 1612-2364

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Geleitwort der Herausgeber

Das erfolgreiche Industrieunternehmen von heute ist ein aktives Element der global zunehmend vernetzten Welt.

Mit hohem Innovationstempo steigern neue Märkte und Technologien die Arbeitsanforderungen, vergrößern neue Werkstoffe und Verfahren, die Informationstechnik und ein Wertewandel der Kundenwünsche aber auch die Gestaltung- und Entfaltungsmöglichkeiten des Ingenieurs.

Die Konstruktion ist die Königsdisziplin des Ingenieurs. Die Produktion ist die technische Dienstleistung am König Kunde. Beide Aufgabenfelder zusammengekommen bilden den Kern des industriellen Wertschöpfungsprozesses.

Mit der hier vorgelegten Reihe "Fortschritte in Konstruktion und Produktion" ist es den Herausgebern ein Anliegen, Beiträge von wissenschaftlicher Seite zu fördern, die durch Entwicklung neuer Denkansätze, methodischer Vorgehensweisen und zugehöriger Instrumente die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung verbessern und erweitern. Nicht nur technische Lösungen, sondern auch ökonomische, ökologische und soziale Fortschritte stehen hierbei im Blickpunkt oder zumindest am Horizont.

Hierfür bietet die Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften mit ihrer interdisziplinären Ausrichtung und Einbindung in die Universität Bayreuth ein glückliches Umfeld.

Das Engagement der beiden Herausgeber ist dort vertreten als

- Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
- Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik.

Mögen also die von uns betreuten Dissertationen, die in dieser Buchreihe erscheinen, zu den wünschenswerten Fortschritten in Konstruktion und Produktion beitragen.

Den Autoren der einzelnen Bände dieser Reihe sei für Ihre wissenschaftliche und redaktionelle Arbeit gedankt, den Lesern wünschen wir eine interessante Lektüre und hoffentlich manch wertvolle Anregung für eine erfolgreiche Anwendung der Forschungsergebnisse in ihrer beruflichen Praxis.

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Kurzfassung

In der additiven Fertigung werden häufig strukturgefüllte Bauteile gefertigt. Die Strukturfüllung führt in der Regel zu richtungsabhängigem, orthotropem effektivem Materialverhalten im mesoskopischen Bereich und beeinflusst daher das effektive mechanische Verhalten der Bauteile maßgeblich. Eine Methode, um dieses effektive Bauteilverhalten effizient zu beschreiben ist folglich von bedeutendem Nutzen, um das volle Potential strukturgefüllter Bauteile in der virtuellen Produktentwicklung zu nutzen. In dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, um strukturgefüllte Bauteile durch die Kombination von Finite Elemente Analysen und datengetriebenen Methoden in die virtuelle Produktentwicklung zu integrieren. Aus deren Anwendung ergeben sich Metamodelle für die Bestimmung effektiver orthotroper elastischer Konstanten. Die Finite Elemente Analysen auf Basis repräsentativer Volumenelemente wurden experimentell validiert, sodass die Daten für die datengetriebenen Methoden rein simulativ erstellt werden konnten. Für die Metamodelle wurden Ansätze des automatisierten maschinellen Lernens evaluiert, dadurch ist das Vorgehen systematisiert und kann weitgehend anwenderunabhängig transferiert und eingesetzt werden. Die besten Modelle konnten mit zweistufig optimierten künstlichen neuronalen Netzen erreicht werden, die orthotrope effektive elastische Konstanten mit guter Genauigkeit innerhalb von Millisekunden ermitteln.

Abstract

Additive manufacturing enables the manufacturing of structure-filled components. The infill structure usually leads to direction-dependent, orthotropic effective material behavior in the mesoscale and therefore, significantly influences the effective mechanical behavior of the components. Hence, a method to efficiently describe this effective component behavior is mandatory to exploit the full potential of structurally filled components in virtual product development. This work has developed a method for integrating structure-filled components into virtual product development by combining finite element analysis and data-driven methods. This approach results in metamodels for determining effective orthotropic elastic constants. The finite element analyses based on representative volume elements were validated experimentally so that the data for the data-driven methods could be generated purely by simulation. Approaches to automated machine learning were evaluated for the metamodels. Thus, the procedure is systematized and can be transferred and used mainly user independent. Two-stage optimized artificial neural networks showed the best results and enabled the determination of orthotropic effective elastic constants with reasonable accuracy within milliseconds.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zielsetzung.....	4
2	Stand der Technik	6
2.1	Additive Fertigung.....	6
2.1.1	Grundlagen und Verfahren der additiven Fertigung	6
2.1.2	Extrusionsbasierte additive Fertigung metallischer Komponenten.....	12
2.2	Produktentwicklung in der additiven Fertigung	19
2.2.1	Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung	19
2.2.2	Exklusive Optimierungspotentiale in der additiven Fertigung.....	22
2.3	Rechnergestützte Entwicklung und Optimierung.....	29
2.3.1	Finite Elemente Analyse	30
2.3.2	Repräsentative Volumenelemente.....	32
2.3.3	Metamodelle auf Basis datengetriebener Methoden	35
2.4	Zusammenfassung des Stands der Technik	39
3	Kombination physikalischer Simulationen und datengetriebener Methoden	41
3.1	Grundlegender Ansatz	41
3.2	Betrachtete Füllstrukturen	43
3.3	Experimentelle Methoden.....	45
3.3.1	Uniaxialer Zugversuch	45

3.3.2	Resonanz-Ultraschallspektroskopie	50
3.4	Fertigung der Probekörper	55
3.5	Simulative Methoden.....	56
3.6	Generierung des digitalen Datensatzes.....	61
3.7	Datengetriebene Methoden.....	63
3.7.1	Untersuchte Metamodelle.....	63
3.7.2	Evaluation der Metamodelle und Fehlerabschätzung ..	74
4	Ergebnisse	76
4.1	Experimentelle Methoden zur Bestimmung effektiver elastischer Konstanten bei strukturgefüllten Bauteilen	76
4.1.1	Uniaxiale Zugversuche.....	76
4.1.2	Resonanz-Ultraschallspektroskopie	81
4.1.3	Vergleich der experimentellen Methoden	82
4.2	Simulative Methode zur Bestimmung effektiver elastischer Konstanten bei strukturgefüllten Bauteilen	84
4.2.1	Bestimmung der effektiven elastischen Konstanten	84
4.2.2	Validierung der Simulationsergebnisse.....	85
4.3	Digitaler Datensatz	87
4.4	Metamodelle zur Bestimmung effektiver elastischer Konstanten bei strukturgefüllten Bauteilen	90
4.4.1	Support-Vektor-Maschinen	90
4.4.2	Ensemble Learning.....	95
4.4.3	Künstliche neuronale Netze.....	100
4.4.4	Vergleich der datengetriebenen Methoden.....	104
4.5	Diskussion der Ergebnisse.....	108

5	Zusammenfassung und Ausblick	114
6	Synopsis and Outlook	116
	Literaturverzeichnis	118
	Danksagung	128
	Lebenslauf	129
	Eigene Veröffentlichungen	130