Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 229

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 229

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

bei der Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M. Sc. Florian Baumann

Tag der mündlichen Prüfung:	17.12.2019
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7234-1
ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Zunächst gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats, die fachliche Betreuung der Thematik, die konstruktiven und freundschaftlich geführten Diskussionen und das entgegengebrachte Vertrauen bei meinen verschiedenen Tätigkeiten am Institut. Unter seiner Anleitung konnte ich am wbk sehr viel lernen und mich sowohl beruflich als auch persönlich weiterentwickeln.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen in Stuttgart dafür danken, dass er die Übernahme des Korreferats angeboten und bereitwillig übernommen hat, mich bereits in einem frühen Stadium der Arbeit mit konstruktiver Kritik unterstützt hat und in verschiedenen Projekten und Arbeitsgruppen für eine angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt hat.

Ein besonderer Dank geht auch an die ARBURG GmbH, in deren Auftrag die in dieser Arbeit vorgestellte Faserzuführung entstand und welche mich auf vielfältige Weise bei den Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten unterstützt hat. Insbesondere möchte ich hier dem damaligen technischen Geschäftsführer Herrn Heinz Gaub, dem Entwicklungsleiter Herrn Dr. Eberhard Duffner, dem Leiter der freeformer-Abteilung Herrn Martin Neff, Frau Dr. Agnes Kloke, Herrn Marcus Wörner, Herrn Lothar Link und Herrn Wolfgang Gebele für die herausfordernde, aber stets freundschaftliche Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen danken.

Auch allen Kollegen am wbk, sowohl aus den verschiedenen Arbeitsgruppen, als auch den Servicecentern für Werkstatt, IT, Personal und Finanzen sowie aus den Sekretariaten möchte ich für ihre Unterstützung danken. Vor allem die Kollegen aus der Gruppe Leichtbaufertigung und die Bürokollegen konnten mir stets mit Fachwissen und neuen Blickwinkeln weiterhelfen.

In diesem Zusammenhang möchte ich auch allen Studenten und Studentinnen danken, die durch ihre Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskraft oder durch das Anfertigen ihrer Abschlussarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich hier Herrn Benjamin Wirth danken, der in seiner Bachelorarbeit die Inbetriebnahme eines ersten Prototyps der Faserzuführung bearbeitete, mich danach als wissenschaftliche Hilfskraft bei der Weiterentwicklung unterstützte und letztendlich in seiner Masterarbeit eine erste Möglichkeit zur automatischen Erzeugung der Fertigungsdaten für additiv zu fertigende faserverstärkte Bauteile entwickelte.

Zudem möchte ich mich beim KA-RaceIng Team bedanken, dass es mir mit dem DRS-Aktorgehäuse einen Demonstrator zur Verfügung gestellt hat.

Schlussendlich gilt ein ganz besonderer Dank meiner Familie:

Meinen Schwiegereltern Margret und Rolf Kirschbaum inkl. Oma Lotte, welche durch ihre Unterstützung das alltägliche Leben vereinfachen und welche einen großen Teil dazu beigetragen haben, dass ich auch abseits des Instituts gut mit dem Schreiben der Arbeit vorwärtsgekommen bin.

Meinem Bruder Jens-Stefan Baumann, seiner Frau Esra und Tochter Amira, welche mir immer wieder eine willkommene Abwechslung vom Arbeitsalltag bieten.

Meinen Eltern Dr. Anne-Kristina Baumann und Dr. Uwe Baumann, die mir das Studium und die Promotion erst ermöglicht haben, mir stets mit Rat und Tat zur Seite stehen und mich bei allen Entscheidungen unterstützen.

Meiner Frau Julia, die mit viel Liebe, Verständnis und Geduld dafür gesorgt hat, dass ich die Arbeit auch zu Hause konzentriert fertig schreiben konnte.

Murrhardt, Dezember 2019

Florian Baumann

Abstract

Over the last few years additive manufacturing (AM) processes underwent a development from a niche process for rapid prototyping to a well-established manufacturing process for end-user parts. Opposed to conventional manufacturing processes like subtractive (milling, drilling) or formative (casting, forging) processes, where material is taken away or just formed into another shape, in additive manufacturing processes new material is added to the part during the production without the need for any tools or molds. Therefore AM-processes offer a high degree of part complexity and freedom of design combined with low costs for single parts and low volume production.

Most AM-processes for metal parts can produce components which can compete with conventionally manufactured parts in regard to mechanical properties like Young's modulus or tensile strength. Parts made from polymers like thermoplastics however are inferior to conventionally manufactured parts in regard to mechanical properties. Therefore, the aim of this doctoral dissertation is the development, commissioning and parameter analysis of an AM-process for thermoplastics with superior mechanical properties.

This goal can be achieved by implementing continuous fiber reinforcements during the AM-process of an ARBURG freeformer by use of a fiber-feeding-module. In order to develop the aforementioned module, the current state of the art of additively manufactured fiber-reinforced-polymers (FRP) is evaluated and different assessment-criteria are defined. Based on those criteria and the boundary conditions given by the ARBURG freeformer and a demonstration-part from the formula student team *KA-RaceIng* the fiber-feeding-module is developed and commissioned.

Using an analysis of variances (ANOVA) approach, a study of dependence between different manufacturing parameters and mechanical values is conducted. The best Young's modulus of 16.2 GPa is achieved with an fibre-volume-content (FVC) of 21.1 %. The best tensile strength of 168 MPa is achieved with an FVC of 9.7 %. With this, 94 % of the calculated Young's modulus (FVC 21.1 %) and 56 % of the calculated tensile strength (FVC 9.7 %) were achieved. Processes from the state of the art achieved a maximum of 69 % (Young's modulus) and 62 % (tensile strength).

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungen IV

Formelzeichen VI

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 2

2 Grundlagen und Stand der Technik 4

2.1 Faserverstärkte Kunststoffe 4

2.1.1 Kunststoffmatrices 4

2.1.2 Verstärkungsfasern 5

2.1.3 Wirkungsweise 5

2.1.4 Berechnung mechanischer Eigenschaften von FVK 6

2.1.5 Fertigungsverfahren für FVK 8

2.2 Additive Fertigung 8

2.2.1 Allgemeines Funktionsprinzip der additiven Fertigung 9

2.2.2 Auswahl additiver Fertigungsprozesse für Thermoplaste 12

2.2.3 Aufbau des Maschinencodes für AKF 16

2.3 Additive Fertigung von FVK 19

2.3.1 Additive Fertigung von kFVK 20

2.3.2 Additive Fertigung von eFVK 25

2.3.3 Weitere Forschungsarbeiten zur additiven Fertigung von FVK 30

2.4 Prozessvergleich 30

2.4.1 Additiv gefertigte kFVK 0°-Orientierung 33

2.4.2 Additiv gefertigte kFVK 90°-Orientierung 34

2.4.3 Additiv gefertigte eFVK 35

3 Bewertung des Stands der Technik 37

4 Zielsetzung 43

5 Lösungsansatz 46

6 Ergebnisse 49

6.1 Definition einer Demonstratorgeometrie 49

6.1.1 Analyse der Randbedingungen und Anforderungen 49

6.1.2 DRS-Aktorgehäuse 51

6.2 Verfahrensentwicklung 53

6.2.1 Ableitung der Anlagengrundstruktur 54

6.2.2 Prozessentwicklung 55

6.2.3 Mechanik für die Zuführung von Endlosfasern 57

6.3 Parameterstudie an UD-Probekörpern 75

6.3.1 Definition der Zielgrößen 75

6.3.2 Definition der Einflussfaktoren 76

6.3.3 Versuchsplan 89

6.3.4 Beschreibung der Zugprobekörper 90

6.3.5 Herstellung der Probekörper 93

6.3.6 Ermittlung der Probeneigenschaften 94

6.3.7 Auswertung der Parameterstudie 96

6.3.8 Diskussion der Ergebnisse 109

6.3.9 Zusammenfassung der Parameterstudie 112

6.4 Auswahl der optimalen Verarbeitungsparameter 113

6.5 Validierung 114

6.5.1 Ermittlung mechanischer Kennwerte 114

6.5.2 Vergleich zwischen AKF-FVK und Stand der Technik 117

6.5.3 Fertigung des Demonstrators 122

7 Bewertung 126

7.1 Methodik 126

7.1.1 Verfahrensentwicklung 126

7.1.2 Parameterstudie 127

7.2 Anlage und Prozess 127

7.2.1 Modul für die Faserimplementierung 128
7.2.2 Prozess für lineare FVK-Pfade 129
7.2.3 Prozess für nicht-lineare FVK-Pfade 130
7.2.4 Bewertung auf Basis der Zielsetzung 131
8 Zusammenfassung und Ausblick 136
8.1 Zusammenfassung 136
8.2 Ausblick 138
Literaturverzeichnis I
Abbildungsverzeichnis XIII
Tabellenverzeichnis XVI
Anhang XVIII