

FREDERIC KREPLIN
HRSG. SAMUEL SCHABEL

ADDITIV GEFERTIGTE PAPIERE: DESIGN, HERSTELLUNG UND EIGENSCHAFTEN

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

21



Additiv gefertigte Papiere: Design, Herstellung und Eigenschaften

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Frederic Kreplin, M.Sc.

aus Fulda

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Tag der Einreichung: 24.10.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 31.01.2023

Darmstadt 2023

D 17

FREDERIC KREPLIN
HRSG. SAMUEL SCHABEL

ADDITIV GEFERTIGTE PAPIERE: DESIGN, HERSTELLUNG UND EIGENSCHAFTEN

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

21

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.: Darmstadt, Techn. 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 978-3-8440-9189-2

ISSN 1865-7419

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

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) der TU Darmstadt entstanden. Ich bedanke mich herzlich bei meinem Doktorvater, Herr Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel, für die Möglichkeit diese Arbeit zu erstellen sowie die Unterstützung und Förderung während meiner Zeit am PMV.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam danke ich für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Ich möchte mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am PMV für die Hilfsbereitschaft und stets anregenden Diskussionen bedanken. Im Besonderen möchte ich Antje Kersten, Heinz-Joachim Schaffrath, Klaus Villforth und Hans-Joachim Putz für die fachliche und organisatorische Unterstützung im Rahmen der Forschungsprojekte danken. Ebenso bedanke ich mich bei den Doktoranden-Kollegen für die Unterstützung, konstruktiven Diskussionen und schönen gemeinsamen Momente.

Ein besonderer Dank gilt Torsten Beer und Matthias Schaschek für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung der Versuchsanlage. Ebenfalls ein besonderer Dank an die Kolleginnen und Kollegen in den Laboren, ohne deren umfassenden Arbeiten das Pensum der Forschungsprojekte nicht zu erfüllen gewesen wäre.

Ein weiterer Dank gilt allen Studierenden, die mich im Rahmen ihrer Tätigkeit als studentische Hilfskraft und ihrer Abschlussarbeit unterstütz haben. Insbesondere die Arbeiten von Faris Sa'di, Linda Endres und Joseph Weig haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Nicht zuletzt danke ich insbesondere meiner Freundin und meiner Familie für die Geduld und Unterstützung während meines Studiums und der Promotion.

Fulda, Juli 2023

Frederic Kreplin

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist, Papiere aus Fasersuspensionen mit Hilfe der additiven Fertigungstechnologie herzustellen. Das Schichtbauprinzip der additiven Fertigung in Kombination mit der lokalen Faserablage bietet die Möglichkeit, maßgeschneiderte Papiere mit angepassten Struktureigenschaften herzustellen.

Die Literaturrecherche betrachtet daher papiertechnologische Einflussgrößen auf die Anordnung von Fasern im Papiergefüge sowie die Möglichkeiten der additiven Fertigung, strukturelle Eigenschaften zu beeinflussen.

Die recherchierten Erkenntnisse und Effekte fließen maßgeblich in die Entwicklung und Konstruktion des Faserdruckers und seiner Steuerungssoftware ein. Mit Hilfe des Faserdruckers ist es möglich, die Prozesskette der additiven Fertigung auf die Papierherstellung zu übertragen und Papiere entsprechend der Vorgaben eines CAD-Modells herzustellen. Die Faserauftragsdüse appliziert die hochverdünnte Fasersuspension entsprechend der im Slicing erzeugten Routen auf ein Sieb. Unterhalb des Siebes wird eine Absaugdüse synchron bewegt, welche die Suspension entwässert. Die eigens entwickelte Steuerungssoftware erlaubt den Import extern erzeugter Bewegungsbefehle und kann zudem Bewegungsbefehle für runde und rechteckige Proben durch Eingabe der Maße und Fertigungseinstellungen generieren.

Im Rahmen der Inbetriebnahme des Faserdruckers wurden prozesstechnische Grenzen und Abhängigkeiten in Bezug auf den Suspensionsmassenstrom, die Breite der Faserbahn und der Entwässerungsgrenze identifiziert. Die anschließenden experimentellen Untersuchungen zur Charakterisierung der Eigenschaften additiv gefertigter Papiere zeigen, dass deutliche Unterschiede der Papierstruktur durch den Auftreffwinkel der Suspension auf das Sieb hervorgerufen werden.

Strukturelle Unterschiede durch den Auftreffwinkel, die Prozessparameter und die Routen des Faserauftrags spiegeln sich ebenfalls in den mechanischen Eigenschaften wider.

Der Faserdrucker bietet somit neue Freiheitsgrade für die Gestaltung maßgeschneiderter Papierstrukturen. Abschließende Tastversuche verdeutlichen das Potential der Technologie zur Erschließung innovativer Anwendungsfelder, wie lastpfadgerecht gestaltete Papierverbundbauteile und strukturoptimierte Mikrofluidikpapiere.

Abstract

The objective of this work is the production of papers from fiber suspensions using additive manufacturing. The layer building principle of additive manufacturing in combination with the deposition of fibers with predetermined orientation offers the possibility to produce tailor-made papers with locally customized structural properties. The literature review therefore considers paper technological factors influencing the arrangement of fibers in the paper structure as well as the possibilities of additive manufacturing to influence structural properties.

The developed fiber printer applies the additive manufacturing process chain to paper production and therefore enables papers to be manufactured according to the specifications of a CAD model. The horizontally moving nozzle applies the highly diluted fiber suspension to a screen according to the routes created in slicing. Below the wire, a suction nozzle is moved synchronously, which dewateres the suspension and fixes the fibers on the wire. The control software allows the import of externally generated motion commands. In addition, motion commands for round and rectangular samples can be generated directly by entering the dimensions and production settings.

During the commissioning of the fiber printer, process limitations and constraints were identified with respect to the suspension mass flow, the width of the fiber path and the dewatering limit. Subsequent experimental investigations to characterize the properties of additively manufactured papers show that significant differences in paper structure are caused by the impingement angle of the suspension on the wire. The perpendicular impingement angle produces fiber accumulations at the web edges with high fiber orientation. A flatter impingement angle, on the other hand, results in a more even fiber deposition.

Structural differences due to the impingement angle, process parameters and routes of fiber application are also reflected in the mechanical properties. Tensile testing shows that fibers applied in the direction of load (0°) result in higher strength properties than fibers applied at an angle of 45° or 90° .

The fiber printer thus offers the required new degrees of freedom for designing customized paper structures. Concluding trials demonstrate the potential of the technology to open innovative fields of application, such as load-path-compatible paper composites and structurally optimized microfluidic papers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation.....	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	3
2.1	Lösungsansatz	3
2.2	Arbeitshypothesen	4
3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	7
3.1	Papier.....	7
3.1.1	Papierherstellungsprozess	7
3.1.2	Beeinflussung struktureller Papiereigenschaften	8
3.1.3	Blattbildungskonzepte von Laborverfahren	17
3.1.4	Zusammenfassung Papierherstellung	24
3.2	Additive Fertigung.....	25
3.2.1	Verfahrensgrundlagen und Anwendungsgebiete	25
3.2.2	Additive Fertigungsverfahren zellulosehaltiger Materialien.....	29
3.2.3	Beeinflussung von Bauteileigenschaften durch Material und Slicing	38
3.2.4	Zusammenfassung additive Fertigung	42
4	Faserdruck: Additive Fertigung von Papier.....	45
4.1	Funktionsprinzip	45
4.2	Hardware	47
4.2.1	Suspensionsversorgung	48
4.2.2	Faserauftrag und Absaugung.....	49
4.3	Steuerungssoftware.....	56
4.3.1	Grafisches User Interface.....	57
4.4	Prozesskette der Probenherstellung	60
4.4.1	Prozesskette der additiven Fertigung: CAD - Slicing - G-Code	61
4.4.2	Manuelle Programmierung des G-Codes	61
4.4.3	Erzeugen von G-Code mit dem Faserdrucker G-Code-Generator	62
4.4.4	Probenherstellung und Trocknung	67
5	Prozessgrenzen und Abhängigkeiten	69
5.1	Beschleunigung, Geschwindigkeit und Bauraum	69
5.2	Höhendifferenz und Massenstrom	70
5.3	Faserauftrag und Linienbreite.....	74
5.3.1	Linienbreite bei einmaligem Faserauftrag	75
5.3.2	Linienbreite bei mehrfachem Faserauftrag	83
5.3.3	Berechnung der Linienbreite in der Faserdrucker GUI.....	89
5.4	Entwässerung	91

5.5	Ablösen der Proben vom Sieb	95
5.6	Zusammenfassung der Prozessgrenzen und Abhängigkeiten	96
6	Eigenschaften additiv gefertigter Papiere	97
6.1	Material und Methoden	97
6.1.1	Versuchsplanung	97
6.1.2	Material und Probenherstellung	99
6.1.3	Probenuntersuchungen	102
6.2	Ergebnisse Prozessvariation	103
6.2.1	Abmessungen, flächenbezogene Masse und Dichte	103
6.2.2	Optische Eigenschaften und Faserorientierung	107
6.2.3	Zugprüfung	113
6.3	Ergebnisse Lagenaufbau	118
6.3.1	Abmessungen, flächenbezogene Masse und Dichte	118
6.3.2	Optische Eigenschaften und Faserorientierung	119
6.3.3	Zugprüfung	121
6.4	Ergebnisdiskussion	123
7	Anwendungspotentiale	125
7.1	Lastpfadgerechte Bauteilgestaltung	125
7.2	Papiere für Mikrofluidikanwendungen	127
7.3	Weitere Anwendungsbeispiele	129
8	Zusammenfassung und Ausblick	131
	Abkürzungsverzeichnis	137
	Formelzeichen	138
	Literaturverzeichnis	139
	Anhang	157