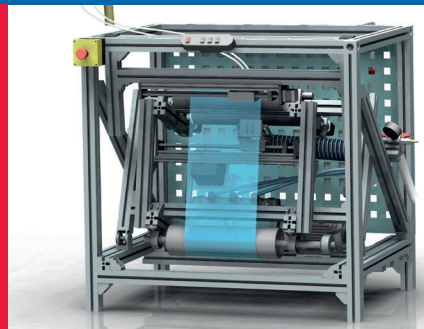


ROBERT GÖTZINGER  
HRSG. SAMUEL SCHABEL

# ENTWICKLUNG EINES BLATTBILDNERS ZUR ERZEUGUNG HOCHORIENTIERTER PAPIERE FÜR DAS BAUEN MIT PAPIER SOWIE KOMPOSITE FÜR DEN LEICHTBAU MIT PAPIER

FORTSCHRITT-BERICHTE  
PAPIERTECHNIK

19



**Entwicklung eines Blattbildners zur Erzeugung hochorientierter Papiere  
für das Bauen mit Papier sowie Komposite für den Leichtbau mit Papier**

Am Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

**Herrn Robert Götzinger, M.Sc.**

aus Kirchheimbolanden

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. S. Schabel  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. P. Groche  
Tag der Einreichung: 09.11.2020  
Tag der mündlichen Prüfung: 26.01.2021

Darmstadt 2021

D17



ROBERT GÖTZINGER  
HRSG. SAMUEL SCHABEL

# ENTWICKLUNG EINES BLATTBILDNERS ZUR ERZEUGUNG HOCHORIENTIERTER PAPIERE FÜR DAS BAUEN MIT PAPIER SOWIE KOMPOSITE FÜR DEN LEICHTBAU MIT PAPIER

FORTSCHRITT-BERICHTE  
PAPIERTECHNIK

# 19

**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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8046-9

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) an der Technischen Universität Darmstadt. Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel für die Möglichkeit zur und die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit herzlich bedanken.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche danke ich für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Ich möchte mich bei allen Kollegen am PMV für die Hilfsbereitschaft und die zielführenden Diskussionen bedanken. Ein besonderer Dank gilt Frederic Kreplin für seine Hilfe und die gute Zusammenarbeit, zunächst im Rahmen seiner Master-Thesis und später als Kollege. Bei Klaus Villforth möchte ich mich für die Unterstützung in allen EDV-Fragen bedanken. Ein weiterer Dank gilt Andreas Striegel für die gute Zusammenarbeit.

Ich möchte mich bei allen Kollegen des BAMP! Teams bedanken. Besonders bei Andreas Geißler für die guten fachlichen Diskussionen und die tolle Unterstützung, bei Paul Töws für die Unterstützung bei der Bildung von Laminaten und bei Marcus Pfeiffer für die fruchtbaren Diskussionen und die Unterstützung rund um Prüfung und Auswertung. Bei Benjamin Hiller von der PTS möchte ich mich für die gute Kooperation im Rahmen des Projektes BAMP! bedanken.

Auch danke ich meinen Studierenden und Hiwis, insbesondere Christiane Helbrecht, Andreas Hoff und Sven-Eric Engel.

Bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, die mich motiviert und inspiriert haben. Ohne deren finanzielle Unterstützung wäre mir zudem schon das Studium in dieser Form nicht möglich gewesen. Mein Vater hat alle meine Arbeiten von Beginn an mit großem Interesse verfolgt und mehrfach Korrektur gelesen.

Der größte Dank gilt meiner Frau Lisa und meinem Sohn Silas. Lisa stand mir immer zur Seite und hielt mich selbst in schwierigen Zeiten aus. Silas schaffte es stets durch seine fröhliche Art und Neugier mich auf andere Gedanken zu bringen.



## Kurzfassung

Motiviert durch das Projekt „BAMP! Bauen mit Papier“ wurden zunächst verschiedene Einflussgrößen auf die Orientierung von Fasern bei der Blattbildung, und der Zusammenhang zwischen Faserorientierung im Papier und Papiereigenschaften, recherchiert.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde in mehreren Iterationsschritten ein neuartiger Blattbildner zur Herstellung hochorientierter Papiere entwickelt. Der sogenannte UD-Blattbildner zeichnet sich durch eine traversierende Düse und eine parallel dazu traversierende Absaugung aus. Hierdurch kann der auf ein umlaufendes Sieb aufgebrachte Suspensionsstrahl direkt entwässert werden.

Die Messung des Grades der erreichten Faserorientierung im UD-Papier erfolgte durch bildanalytische Erfassung von fluoreszierenden Fasern im Papier. Als Kennzahlen zur Beschreibung der so ermittelten Häufigkeitsverteilung der Faserorientierungswinkel dienten der von-Mises-Parameter  $\kappa$ , der mittlere Faserorientierungswinkel und die Anisotropie, gemessen am Hauptachsenverhältnis einer Ellipse. Die gebildeten UD-Papiere wurden zudem durch Tensile Stiffness Index, Nullreißlänge und Zugprüfung charakterisiert. Das Ziel, Papiere mit einem MD/CD-Festigkeitsverhältnis von  $>4$  zu bilden, wurde mit dem UD-Blattbildner erreicht.

Mit den UD-Papieren wurden Epoxidharz-Lamine gebildet und ebenfalls durch eine Zugprüfung charakterisiert. Die Bruchspannungen der UD-Papier-Lamine konnten mit dem Festigkeitsmodell von Kröling berechnet werden.

Die Arbeit schließt mit einer Diskussion des im neu entwickelten Blattbildungsverfahrens steckenden Innovationspotenzials.



## Abstract

Motivated by the project "BAMP! Building with Paper", various factors influencing the orientation of fibers during sheet formation and the relationship between fiber orientation in the paper and paper properties were researched.

Based on these findings, a novel sheet former to produce highly oriented papers was developed in several iteration steps. The so-called "UD sheet former" is characterized by a traversing nozzle and a parallel traversing suction unit. This allows the suspension jet applied to a rotating wire to be dewatered directly.

The degree of fiber orientation achieved in the "UD paper" was measured by image-analytical detection of fluorescent fibers in the paper. In order to describe the frequency distribution of the fiber orientation angles determined in this way, the following parameters were used: The von-Mises-parameter  $\kappa$ , the mean fiber orientation angle and the anisotropy, measured as the major axis ratio of an ellipse. The UD papers formed were also characterized by tensile stiffness index, zero span tear strength and tensile test. The UD sheet former reached the goal of forming papers with a MD/CD strength ratio of  $>4$ .

The papers produced on the UD sheet former were used to manufacture epoxy laminates. These were also characterized by tensile testing. The failure stresses of the UD paper laminates could be calculated using Kröling's strength model.

The thesis concludes with a discussion of the innovation potential inherent in the newly developed sheet formation process.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Problemstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>7</b>
3.1 Einflussfaktoren auf Faserorientierung und Anisotropie .....	7
3.1.1 Suspensionseigenschaften und Strömungsbedingungen .....	7
3.1.2 Maschinenparameter .....	13
3.1.3 Fasereigenschaften .....	20
3.1.4 Weitere Einflussgrößen auf die Anisotropie .....	22
3.2 Laborblattbildner zur Herstellung von orientierten Papieren .....	22
3.2.1 Kommerziell verfügbare Blattbildner .....	23
3.2.2 Versuchsaufbauten zur Herstellung von orientierten Papieren .....	27
3.2.3 Zusammenfassung / Fazit Blattbildner .....	32
3.3 Methoden zur Messung von Faserorientierung .....	32
3.3.1 Mikroskopische und bildanalytische Messverfahren .....	34
3.4 Papiereigenschaften .....	42
3.5 Papier-Lamine .....	43
3.6 Zusammenfassung zum Stand der Technik .....	49
<b>4 Erzeugung hochorientierter Papiere: UD-Blattbildner .....</b>	<b>51</b>
4.1 Aufbau und Funktionsweise .....	51
4.2 Einordnung des Systems .....	54
4.3 Entwicklungsprozess des UD-Blattbildners .....	58
4.3.1 Ausgangssituation .....	58

4.3.2	Gesamtaufbau und Stuhlung .....	60
4.3.3	Stoffzuführung und Düsenauswahl.....	62
4.3.4	Formiersieb.....	66
4.3.5	Absaugzone und Vakuumsystem .....	68
4.3.6	Elektronische Komponenten .....	75
4.3.7	Programmierung, Steuerung, Regelung und Sensorik .....	76
4.3.8	Skalierbarkeit.....	82
<b>5</b>	<b>Bildanalytische Messung der Faserorientierung .....</b>	<b>87</b>
5.1	Kurzbeschreibung.....	87
5.2	Methodenentwicklung.....	88
5.2.1	Markieren einzelner Fasern .....	88
5.2.2	Kameraaufbau.....	89
5.2.3	Bildvorverarbeitung .....	90
5.2.4	Testbilder.....	91
5.2.5	Bildanalysealgorithmus.....	94
<b>6</b>	<b>Einfluss der Maschinen- und Prozessparameter auf Blattbildung und Papiereigenschaften des UD-Papiers .....</b>	<b>103</b>
6.1	Material und Methoden .....	103
6.2	Einfluss von Additiven .....	104
6.2.1	Einfluss von CMC als Dispergiermittel .....	105
6.2.2	Einfluss des Farbstoffs .....	109
6.3	Prozessparameter .....	109
6.3.1	Stoffdichte.....	109
6.3.2	Temperatur.....	110
6.3.3	Fasertypen und -eigenschaften.....	111
6.4	Maschinenparameter.....	119
6.4.1	Strahlgeschwindigkeit .....	119

---

6.4.2	Traversiergeschwindigkeit und Strahlüberlappung .....	122
6.4.3	Siebgeschwindigkeit und Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsdifferenz ...	125
6.5	Papiereigenschaften und Interpretation der Ergebnisse .....	135
6.5.1	Wiederholbarkeit und Streuung.....	135
6.5.2	Spannungs-Dehnungs-Verhalten .....	138
6.5.3	Vergleich der Messmethoden .....	143
<b>7</b>	<b>Faserverbunde aus UD-Papier .....</b>	<b>147</b>
7.1.1	Zugeigenschaften.....	147
7.1.2	Biegeeigenschaften .....	156
<b>8</b>	<b>Innovationspotenzial .....</b>	<b>159</b>
8.1	Industrie 4.0: Individualisierte Papiere in Losgröße 1 .....	159
8.2	Bauen und Architektur.....	163
8.3	Papierbasierte Komposite .....	166
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>169</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>XVI</b>
A1.	UD-Blattbildner – ergänzende Informationen .....	XVI
A2.	Erzeugung von Mustern durch Abstimmung von Traversier- und Siebgeschwindigkeit .....	XXIX
A3.	Bildanalytische Messung der Faserorientierung – ergänzende Informationen.....	XXXI
A4.	Mahlprotokolle .....	XLVI
A5.	Herstellung von Papieren mit Carbonfaseranteil .....	LI
A6.	UD-Papiere - Ergebnistabellen und ergänzende Informationen .....	LIII
A7.	Herstellung und Prüfung von Papier-Epoxidharz-Laminaten .....	LIX
A8.	Relationsdiagramm Faserorientierung .....	LXXI