

JENS-PETER BÖSNER  
HRSG. SAMUEL SCHABEL

# FRAKTIONIERUNG VON STEIFEN UND FLEXIBLEN FasERN IN SCHLITZKÖRBE UND IHRE AUSWIRKUNG AUF DIE QUALITÄT VON UNTERSCHIEDLICHEN PAPIEREN

FORTSCHRITT-BERICHT  
PAPIERTECHNIK

# 13

### **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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4508-6

ISSN 1865-7419

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

# Vorwort mit Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an dem Lehrstuhl „Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik“ an der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Herrn Professor Samuel Schabel. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Forschung an der Universität wurden von mir in der Papierfabrik Hollingsworth and Vose in Hatzfeld, meinem aktuellen Arbeitgeber, fortgesetzt. Hier können die gewonnenen Erkenntnisse bei der Herstellung von Spezialpapieren und synthetischen Filtermedien eingesetzt werden.

Einen besonderen Dank möchte ich den Kollegen am Lehrstuhl für die Unterstützung, Diskussionsbereitschaft und die wertvolle Hilfe mit eigenen Erfahrungen aus anderen Projekten und Gebieten der Papierfabrikation aussprechen ebenso wie den Diplom- und Masterarbeitern Silvana Meister-Sommer, Lorena Garcia und Jochen Pffirmann, die mit ihren Abschlussarbeiten einen großen Beitrag geleistet haben.

Ein besonderen Dank geht an meine Eltern für die Finanzierung des Studiums und an meine Frau Katharina und an meinen Bruder Jörg für Beratung, fachliche Diskussion und Korrekturlesen.

Vielen herzlichen Dank auch an Herrn Hans Bosse, der mit seiner Erfahrung und seinem Wissen um die Literaturrecherche im Bereich der Papierherstellung stets eine wertvolle Hilfe war.

Den Geldgebern für die Forschungsvorhaben, aus denen die Ergebnisse für die vorliegende Arbeit erzielt wurden sei ebenfalls gedankt. Darunter ist besonders ECOTARGET zu nennen, das mit 26 Partnern in 9 Ländern unter dem Titel „New and innovative processes for radical changes of the European pulp and paper industry“ zwischen 2004 und 2008 im Rahmen von internationaler und interdisziplinärer Forschung einen besonders großen Beitrag geleistet hat, aber auch die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Ressourcenoptimierte Produktdesigns“ INFOR 143 R, die Möglichkeiten zur Simulation und Optimierung von Zukunftsszenarien gegeben hat.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in das Thema</b>	<b>1</b>
1.1	Hypothese für die Fraktionierung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Wissenschaft</b>	<b>7</b>
2.1	Drucksortierer als Sortier- und Fraktionieraggregate . . . . .	7
2.1.1	Lochsiebe und Schlitzsiebe . . . . .	12
2.1.2	Durchgangswahrscheinlichkeit . . . . .	13
2.1.2.1	Plug-Flow-Modell . . . . .	14
2.1.2.2	Mixed-Flow-Modell . . . . .	14
2.1.3	Passiermechanismen . . . . .	15
2.1.4	Mögliche Qualitätsverbesserung im Endprodukt Papier durch Fraktionierung . . . . .	18
2.1.5	Kartonagen . . . . .	22
2.2	Filterpapiere . . . . .	23
2.2.1	Filterpapiere und ihre besonderen Anforderungen . . . . .	24
2.2.2	Luftdurchlässigkeit und Filterstandzeit . . . . .	24
2.2.3	Fraktionierung von steifen und flexiblen Fasern . . . . .	30
2.2.4	Oberflächenkontur der Schlitzsiebkörbe . . . . .	30
2.3	Simulationen zur Fraktionierung . . . . .	37
2.3.1	Modellierung einer Einzelfaser . . . . .	37
2.3.2	Faserverhalten in gekrümmten Trajektorien . . . . .	40
2.3.3	Auswirkung der Fraktionierung auf das gesamte Altpapier . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Zielstellung der Arbeit</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>Durchgeführte Experimente</b>	<b>45</b>
4.1	Betrieb Verdünnungswasserfraktionierer . . . . .	45
4.2	Betrieb eines Sortierers im Labormaßstab . . . . .	49

4.3	Auswertung der Faseranalyse mit dem Kajaani FiberLab . . . . .	50
4.4	Coarseness der Fasern als Maß für die Steifigkeit . . . . .	51
4.5	Fasersteifigkeit nach Steadman und Luner . . . . .	51
4.6	Labormahlung mit den Voith-Refiner . . . . .	53
4.7	Eingesetzte Materialien . . . . .	54
4.8	Laborblattbildung . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Experimente</b>	<b>55</b>
5.1	Ergebnis der Mischungsversuche Luftdurchlässigkeit . . . . .	55
5.2	Messung der Luftdurchlässigkeit . . . . .	57
5.3	Korrelation zwischen Fibrillierung und Steifigkeit . . . . .	57
5.4	Ergebnisse Verdünnungswasserfraktionierer . . . . .	58
5.5	Ergebnisse der Fraktionierung im Laborsortierer . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Simulation des Kreislaufverhaltens</b>	<b>61</b>
6.1	Ziele der Modellierung . . . . .	61
6.2	In der Modellierung betrachtete Stoffströme . . . . .	62
6.3	Betrachtete Produkte . . . . .	62
6.4	Veränderungen im Fasermaterial . . . . .	63
6.5	Sonderstellung von Füll- und Störstoffen . . . . .	64
6.6	Prinzipieller Aufbau der Simulation . . . . .	65
6.7	Berechnung Füllstoffanteile - Störstoffanteile im Papier . . . . .	66
6.7.1	Verhalten der Fasern . . . . .	66
6.7.2	Faserumwandlung . . . . .	67
6.8	Simulationsprinzip . . . . .	68
6.9	Arbeitsweise und Programmaufbau . . . . .	68
6.10	Die Berechnung der einzelnen Programmteile . . . . .	70
6.11	Aufbau der einzelnen Programmschleifen . . . . .	72
6.12	Das durchschnittliche Faseralter . . . . .	73
6.13	Sonderstellung der Luftdurchlässigkeit . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Simulation</b>	<b>77</b>
7.1	Fraktionierung und mehrlagiges Produkt . . . . .	77
7.2	Abreichern der wenig wertvollen Fasern . . . . .	80
7.3	Flexible, hoch ausgemahlene Fasern . . . . .	84
7.4	Rohstoffaufbereitung Filterpapiere . . . . .	86
7.5	Leistungsumfang der Simulation . . . . .	89

8	Diskussion der Ergebnisse	91
9	Schlussfolgerung und Ausblick	95





# Abbildungsverzeichnis

1.1	Die Vielzahl von unterschiedlichen Filtern in einem modernen PKW [24] . . .	2
1.2	Staubbelastung der Luft in unterschiedlichen Anwendungsbereichen [24] . . .	3
1.3	Skizze zum Verhalten von Fasern in laminarer Strömung mit gekrümmten Trajektorien . . . . .	6
2.1	Aufbau und Wirkungsweise eines Drucksortierers, übersetzt nach [7]. . . . .	8
2.2	Stickyreduzierung in Abhängigkeit der Siebdurchtrittsgeschwindigkeit, übersetzt nach [33] . . . . .	8
2.3	Möglichkeiten der Partikelabscheidung in Abhängigkeit der jeweiligen Partikelgröße [7] . . . . .	9
2.4	Partikelgrößenverteilung in einer Papiersuspension, überarbeitet und übersetzt nach [95] . . . . .	10
2.5	Stickyreduzierung in Abhängigkeit von dessen Verformbarkeit gemessen mit einer Modellsuspension nach [63] . . . . .	11
2.6	Entwicklung der Spaltbreite im Siebkorb über 40 Jahre und die damit einhergehende Verbesserung in der Abscheideleistung, aufbereitet nach [72] . .	11
2.7	Die Sortierwirkungsgrade von unterschiedlichen Siebkörben bei Stickies [72]	12
2.8	Die Darstellung einer Sortierkennlinie und einer Vorwärts- bzw. einer Kaskadenschaltung [89] . . . . .	13
2.9	Bedeutung der Bezeichnung Profilhöhe . . . . .	15
2.10	Von Dong verwendete Siebgeometrien mit einer Faserbewegung als Momentaufnahme zu verschiedenen Beobachtungszeiten vergleichbar einer Stroboskopaufnahme bei $2,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [22] . . . . .	16
2.11	Von Dong aufgestellter Zusammenhang zwischen Siebdurchtritt und Siebdurchtrittsgeschwindigkeit für seine steifen 1 mm Modellfasern [22] . . . . .	17
2.12	Faserbreite von den beiden Rohmaterialien für ein SC Papier, das aus zwei unterschiedlichen Refinerlinien kommt und der Einfluss auf Druckfehler, nach [50] . . . . .	18
2.13	Ein Missing dot und das Oberflächenprofil in der unmittelbaren Umgebung, nach [50] . . . . .	19

2.14	Einfluss der relative bonded area auf die Papierfestigkeit [64] . . . . .	20
2.15	Messaufbau zur dynamischen Messung der Papiersteifigkeit [96] . . . . .	21
2.16	Dynamische Messung der Papiersteifigkeit von Wanske [96] . . . . .	22
2.17	Verschiedene Tragstrukturen aus dem Maschinenbau, vereinfachte Darstellung nach [46] . . . . .	23
2.18	Aufbau eines mehrlagigen Kartons für gute Steifigkeit und Bedruckbarkeit, Skizze und Übersetzung nach [39] . . . . .	23
2.19	Papierdicke im Zusammenhang mit der Luftdurchlässigkeit - eigene Datensammlung . . . . .	26
2.20	Fasercurl im Zusammenhang mit der Luftdurchlässigkeit - eigene Datensammlung . . . . .	26
2.21	Faserdurchmesser im Zusammenhang mit der Luftdurchlässigkeit - eigene Datensammlung . . . . .	27
2.22	Querschnitt durch ein Filterpapier [58] . . . . .	28
2.23	Querschnitt durch zwei unterschiedliche Blätter mit HighBulk und Standardzellstoff . . . . .	28
2.24	Kollabiertes Filterelement durch mangelnde Steifigkeit im Faltenbalg [24] . . . . .	29
2.25	Verschleiß verursacht durch mangelhafte Filterwirkung und demzufolge einem ungeeigneten Partikelspektrum im Schmieröl [24] . . . . .	30
2.26	Durchgangswahrscheinlichkeit durch einen Siebkorb in Abhängigkeit der Faserlänge, übersetzt nach [57] . . . . .	31
2.27	Faserverhalten in Wandnähe vor einer Öffnung im Sortierer, übersetzt nach [57] . . . . .	31
2.28	Versuchsaufbau nach Jokinen für eine Laborfraktionierung, übersetzt nach [4] . . . . .	33
2.29	Anwortebene für verschiedene Betriebszustände und Einflussfaktoren am Sortierer, übersetzt nach [57] . . . . .	34
2.30	Betriebspunkt eines Sortierers, übersetzt nach [38] . . . . .	35
2.31	Unterschiedliche Profile und die Visualisierung einer Turbulenzwalze . . . . .	35
2.32	Verschleiß und Wirkungsgrad eines Sortierers [74] . . . . .	36
2.33	Unterschiedliche Faserausrichtung in Abhängigkeit der Scherrate [85] . . . . .	37
2.34	Sphäroid als Faserbestandteil mit den berücksichtigten Kräften [22] . . . . .	38
2.35	Wirbel bei der Ablösung an einen erhöhten Faserprofil nach Suqin Dong [22] . . . . .	39
2.36	Faserverhalten in einer Strömung nach M. Gosz [17] . . . . .	40
2.37	Wechselwirkung Faser-Fluid in einer Strömung, bearbeitet nach J. M. Stokie und S. I. Green [82] . . . . .	41
4.1	Foto und Prinzipzeichnung des Verdünnungswasserfraktionierers . . . . .	46
4.2	Visualisierung von Turbulenzen bei einer Staupunktströmung, die entlang einer Wand auf eine ebene Platte trifft [65] . . . . .	47

4.3	Prinzipskizze Aufbau des Verdünnungswasserfraktionators . . . . .	48
4.4	Prinzipskizze Aufbau Strömungskanal mit Siebkorbeinsätzen [59] . . . . .	49
4.5	Prinzipskizze Aufbau Strömungskanal mit Siebkorbeinsätzen . . . . .	50
4.6	Verformte Faser in der Faserflexibilitätsmessung . . . . .	52
4.7	Verformte Faser in der Auswertung mit dem Mikroskop . . . . .	53
4.8	Voith Laborrefiner . . . . .	53
5.1	Mischung aus Zellstoff mit $250 \text{ l/m}^2\text{s}^{-1}$ und $1600 \text{ l/m}^2\text{s}^{-1}$ . . . . .	56
5.2	Mischung aus Zellstoff mit $250 \text{ l/m}^2\text{s}^{-1}$ und $50 \text{ l/m}^2\text{s}^{-1}$ (Flash-Dried) . . . . .	56
5.3	Vergleich unterschiedlicher Messverfahren für die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit . . . . .	57
5.4	Veränderung der der Faserflexibilität mit unterschiedlichem Mahlgrad . . . . .	58
5.5	Veränderung der Fibrillierung mit unterschiedlichem Mahlgrad . . . . .	58
5.6	Veränderung der Fasermischung in dem Verdünnungswasserfraktionierer . . . . .	59
5.7	Veränderung der Fasermischung in dem Verdünnungswasserfraktionierer bei erhöhter Viskosität . . . . .	59
5.8	Massenverhältnisse für den Laborfraktionierer . . . . .	60
6.1	Die einzelnen Programmschritte der Simulationssoftware . . . . .	63
6.2	Die beiden sich durchdringenden Kreisläufe in der Simulation . . . . .	65
6.3	Die Möglichkeiten, die eine Faser in der Simulation nehmen kann . . . . .	67
6.4	Übersicht Programmaufbau der einzelnen aufeinanderfolgenden Schleifen . . . . .	70
6.5	Entwicklung einer Veränderung mit zunehmender Anzahl der Zyklen im Recycling . . . . .	74
6.6	Luftdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der quadratischen Näherung als Funktion des Faseranteils der steifen Faser mit hoher Luftdurchlässigkeit . . . . .	75
7.1	Verbleibende Fasern im Endprodukt bei unterschiedlicher Effizienz der Sortierung - Ausgabe . . . . .	83
7.2	Wasserrückhaltevermögen mit unterschiedlichem Anteil an verbleibenden Fasern - Ausgabe . . . . .	85
7.3	Schopper-Riegler mit unterschiedlichem Anteil an verbleibenden Fasern - Ausgabe . . . . .	86
7.4	Veränderung der Zielgröße Luftdurchlässigkeit bei unterschiedlicher Sortierereffizienz und mehreren Durchgängen - Ausgabe . . . . .	88



# Tabellenverzeichnis

7.1 Rohstoff mehrlagig „Zellstoff“ - Eingabe . . . . .	78
7.2 Rohstoff mehrlagig „Holzschliff“ - Eingabe . . . . .	78
7.3 Zusammensetzung des Stoffes in der Simulation - Eingabe . . . . .	78
7.4 Ergebnisse der Simulation eines mehrlagigen Produktes - Ausgabe . . . . .	79
7.5 Ergebnisse der Simulation eines mehrlagigen Produktes bis zum Gleichgewichtszustand - Ausgabe . . . . .	79
7.6 Rohmaterial Zellstoff - Eingabe . . . . .	80
7.7 Rohmaterial Holzschliff - Eingabe . . . . .	80
7.8 Zusammensetzung der Papiere in der Simulation - Eingabe . . . . .	81
7.9 Entwicklung des Schwarzsatinageindex beim Kalandrieren von fraktionierten Stoffproben - Eingabe . . . . .	81
7.10 Ergebnis der Simulation für graphisches Altpapier bei störenden dicken Fasern - Ausgabe . . . . .	82
7.11 Ergebnis der Simulation für Verpackungsaltpapier bei störenden dicken Fasern - Ausgabe . . . . .	82
7.12 Zusammensetzung des Graphischen Altpapieres nach der Fraktionierung - Ausgabe . . . . .	83
7.13 Zusammensetzung Zellstoff bei der energetischen Optimierung . . . . .	84
7.14 Zusammensetzung Holzschliff bei der energetischen Optimierung - Eingabe . . . . .	84
7.15 Zusammensetzung der Altpapiersorten bei energetischer Optimierung - Eingabe . . . . .	85
7.16 Rohstoffzusammensetzung Zellstoff als Ausgangsmaterial für hochdurchlässige Filterpapiere - Eingabe . . . . .	87
7.17 Ausgangswerte für das Filterpapier nach der Stoffaufbereitung - Eingabe . . . . .	87
7.18 Notwendige Einstellungen für das Filterpapier - Eingabe . . . . .	87



# Abkürzungsverzeichnis

_GA	Wird in graphisches Altpapier umgewandelt
_LK	Umwandlung langer Fasern zu kurzen Fasern
_LM	Umwandlung langer Fasern zu mittleren Fasern
_MK	Umwandlung mittlerer Fasern zu kurzen Fasern
_VA	Wird in Verpackungsaltpapier umgewandelt
$\beta$	Spezifische Konstante
$\eta$	Der Trenngrad im Plug-Flow-Modell
AGA	Variable für Anteil Graphisches Altpapier im Simulationsmodell
AHS	Variable für Anteil Holzschliff im Simulationsmodell
AVA	Variable für Anteil Verpackungsaltpapier im Simulationsmodell
AZS	Variable für Anteil Zellstoff im Simulationsmodell
AZT	Aufgebessertes Zeitungsdruckpapier
CMC	Carboxy-Methyl-Zellulose
$c_{1,f}$	Die Konzentration im Einlauf
$c_{1,o}$	Die Konzentration im Überlauf
$c_{1,t}$	Die Konzentration im Durchlauf
ED	Eindickfaktor
E1 bis E3	Präfix Variable für variable Eigenschaften 1-3
$E_R$	Effizienz
F	Präfix Variable für Fibrillierungsindex
Flex	Variable für Flexible Fasern
FS	Füllstoff
GA	Graphisches Altpapier
HS	Holzschliff
Kurz	Variable für kurze Fasern
LD	Luftdurchlässigkeit
P	Die Durchgangswahrscheinlichkeit
$R_m$	Das Überlaufverhältnis
R	Überlaufmasse/Rejektrate
SS	Störstoff
Steif	Variable für steife Fasern
T	Trenngrad
VA	Verpackungsaltpapier
W	Präfix Variable für Wasserrückhaltevermögen
ZS	Zellstoff