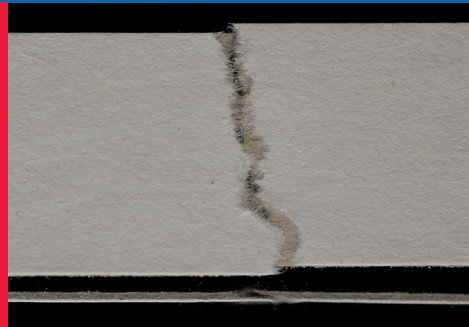


PAUL-PHILIPP POST
HRSG. SAMUEL SCHABEL

BESTIMMUNG UND BEEINFLUSSUNG DES DREIDIMENSIONALEN KRAFT-VERFORMUNGS-VERHALTENS VON PAPIER UNTER VARIATION VON FEUCHTE UND TEMPERATUR

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

17



**Bestimmung und Beeinflussung des dreidimensionalen
Kraft-Verformungs-Verhaltens von Papier
unter Variation von Feuchte und Temperatur**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

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

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Paul-Philipp Post
aus Warburg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Mitberichterstatter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Bauer

Tag der Einreichung: 06.05.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2020

Darmstadt 2020

D 17

PAUL-PHILIPP POST
HRSG. SAMUEL SCHABEL

BESTIMMUNG UND BEEINFLUSSUNG DES DREIDIMENSIONALEN KRAFT-VERFORMUNGS-VERHALTENS VON PAPIER UNTER VARIATION VON FEUCHE UND TEMPERATUR

FORTSCHRITT-BERICHTE
PAPIERTECHNIK

17

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., 2020

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 978-3-8440-7698-1

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

Diese Arbeit entstand von 2010 bis 2015 am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik der TU Darmstadt sowie im Anschluss während der Tätigkeit bei der Sappi Ehingen GmbH.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Samuel Schabel, der mir die Erstellung der Arbeit ermöglichte und mir stets fördernd und unterstützend zur Seite stand. Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Bauer danke ich für die Bereitschaft, die Mitberichterstattung zu übernehmen.

Allen Kollegen und Mitarbeitern am PMV danke ich für die Diskussionsbereitschaft, die Hilfestellungen und Ideen.

Den studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitern, die mich direkt oder indirekt unterstützt haben, möchte ich ebenfalls herzlich Danke sagen. Hervorzuheben sind hier Robert Göttinger und Bernhard Jetses.

Klaus Villforth danke ich vielmals für die initiale Erstellung der Auswerteprogramme sowie für die stetige, anregend positive Begleitung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit und auch der verschiedenen damit verbundenen Abschlussarbeiten beigetragen hat.

Dominik Huttel danke ich für die fruchtbare Zusammenarbeit im Rahmen der Tiefzieh-Projekte.

Meiner Frau Bettina danke ich für die Geduld, die Motivation und das Verständnis. Danke für den Ansporn genauso wie das Zurückhalten in den richtigen Momenten.

Ehingen, den 06.05.2020

A handwritten signature in blue ink, reading "Paul-P. Taß". The signature is written in a cursive, flowing style.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
2.1	Varianten, Struktur und Bestandteile von Papier.....	5
2.1.1	Faserstoffe und ihre Gewinnung.....	6
2.1.2	Füllstoffe, Additive und Wasser.....	7
2.1.3	Klassifizierung von Papieren.....	8
2.2	Herstellungsprozess von Papier.....	9
2.2.1	Stoffaufbereitung.....	9
2.2.2	Papiermaschine.....	10
2.2.3	Streichen, Glätten, Weiterverarbeiten.....	12
2.3	Grundlegendes zu den mechanischen Eigenschaften von Papier.....	13
2.3.1	Mechanisches Verhalten auf Mikro- und Makro-Ebene.....	13
2.4	Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier in der Blattebene.....	14
2.4.1	Bruchdehnung und -spannung in MD und CD.....	15
2.4.2	Weitere wichtige mechanische Kenngrößen von Papier.....	16
2.4.3	Werkstoffgesetze für Papier.....	17
2.5	Einfluss von Feuchte und Temperatur auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier.....	18
2.5.1	Hygroskopische Eigenschaften von Papier.....	19
2.5.2	Einfluss der Feuchte auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier.....	20
2.5.3	Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge Feuchte – Papier.....	22
2.5.4	Einfluss der Temperatur auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier.....	23
2.5.5	Kombinierter Einfluss der Feuchte und Temperatur auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier.....	25

2.5.6	Modellierungsansätze zum Einfluss von Temperatur und Feuchte auf die mechanischen Papiereigenschaften.....	27
2.6	Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier in Z-Richtung	28
2.7	Poissonzahlen von Papier	29
2.7.1	Bestehende Messverfahren und Modelle zur Dickenänderung von Papier unter Zugbelastung.....	31
2.7.2	Bestehende Messverfahren zur Breitenänderung von Papier unter Zugbelastung.....	37
2.8	Möglichkeiten zur Dehnungssteigerung bei Papier.....	39
2.9	Optische Messverfahren – Dehnung und Temperatur.....	41
2.9.1	Optische Dehnungsmessung	42
2.9.2	Thermographie.....	42
3	Problemstellung und Zielsetzung	45
4	Entwicklung eines Messverfahrens zur Detektion der Dicken- und Breitenänderung von Papier im Zugversuch.....	47
4.1	Aufbau und Funktion des entwickelten Versuchsstands.....	47
4.2	Ablauf einer Messung	49
4.3	Vorgehen bei der Bildanalyse.....	51
4.4	Voraussetzungen, Grenzen und Herausforderungen des entwickelten Messverfahrens.....	54
5	Apparate und Methoden.....	57
5.1	Verwendete Faserbehandlungsverfahren.....	58
5.1.1	Jokro-Mühle	58
5.1.2	Laborrefiner Voith LR 40.....	58
5.1.3	Kneter und Disperger.....	58
5.1.4	Enzymatische Faserbehandlung.....	60
5.2	Verwendete Methoden zur Fasereigenschaftsbestimmung.....	60
5.2.1	Mahlgradmessung nach Schopper-Riegler.....	60
5.2.2	Kajaani FiberLab.....	60

5.3	Blattbildung und -konditionierung sowie kontrollierte Trocknung	61
5.3.1	Laborblattbildung	61
5.3.2	Biaxiales Trockengestell	62
5.3.3	Klimatisierung und Befeuchtung	63
5.4	Epoxidharzverstärkung der Probestreifen	64
6	Ergebnisse und Diskussion	67
6.1	Ermittlung der Querkontraktionszahlen beispielhafter Papiere in Breiten- und Dickenrichtung.....	67
6.1.1	Referenzkarton (Schuster-Karton)	67
6.1.2	Laborblätter Husum Kraft (14 SR und 25 SR).....	71
6.1.3	Sackpapier Mondi Advantage	74
6.2	V Versuchsergebnisse im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen der Querkontraktionszahlen in Breiten- und Dickenrichtung.....	77
6.3	Durchführung von Zugversuchen an Papier bei erhöhter Feuchte und Temperatur.....	79
6.4	Betrachtung der mechanischen Eigenschaften des Referenzkartons in der Blattebene unter Variation von Feuchte und Temperatur.....	82
6.5	Einfluss von Faserstoffauswahl und -behandlung auf die Bruchdehnung von Papier.....	87
6.5.1	Enzymatische Faserbehandlung.....	88
6.5.2	Knetende Faserbehandlung.....	89
6.5.3	Kombination von enzymatischer, mahlender und knetender Faserstoffbehandlung.....	91
6.6	Kontrollierte Schrumpfung von Laborblättern aus verschiedentlich behandeltem Zellstoff	95
6.6.1	Schrumpfungsverhalten sowie resultierende Bruchspannungen und Bruchdehnungen der Versuchszellstoffe	97
6.7	Mehrdimensionales Kraft-Verformungs-Verhalten von Papier unter Variation von Feuchte und Temperatur	100

6.7.1 Einfluss der Feuchte auf das mehrdimensionale Kraft-Verformungs-Verhalten des Referenzkartons bei 23 °C	101
6.7.2 Einfluss der Temperatur auf das mehrdimensionale Kraft-Verformungs-Verhalten des Referenzkartons bei Gleichgewichtsfeuchte.....	107
6.7.3 Kombinerter Einfluss von Temperatur und Feuchte auf das mehrdimensionale Kraft-Verformungs-Verhalten des Referenzkartons	110
6.7.4 Mehrdimensionales Kraft-Verformungs-Verhalten der schrumpfungsfrei getrockneten Versuchsblätter.....	112
6.7.5 Mehrdimensionales Kraft-Verformungs-Verhalten der mit freier Schrumpfung getrockneten Versuchsblätter.....	117
6.7.6 Vergleich des mehrdimensionalen Kraft-Verformungs-Verhalten der schrumpfungsfrei und der bei freier Schrumpfung getrockneten Versuchsblätter	122
6.8 Fazit.....	124
7 Zusammenfassung.....	125
7.1 Einsatzmöglichkeiten und Ausblick.....	128
8 Abbildungsverzeichnis	IX
9 Tabellenverzeichnis	XVII
10 Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	XIX
11 Literaturverzeichnis	XXIII
12 Lebenslauf	XXXVII