



INFOR-Projekt Nr. 152

**Erarbeitung von faserbezogenen Zusammenhängen zur
Steuerung des Falzbruchverhaltens von gestrichenen
Graphischen Papieren
Schlussbericht**

April 2012

PTS Papiertechnische Stiftung

Dr. Frank Miletzky

Projektleiterin:
Dipl.-Ing. Sabine Hottmann

Abschlussbericht INFOR 152

Erarbeitung von faserbezogenen Zusammenhängen zur Steuerung des Falzbruchverhaltens von gestrichenen Graphischen Papieren

Dipl.-Ing. S. Hottmann
Dipl.-Ing. (FH) J. Kretzschmar
Dipl.-Ing. J. Schulz
M.Sc. T. Arndt

***Bitte vertraulich behandeln,
Weitergabe an Dritte erst nach Zustimmung
durch INFOR-Forschungsrat zulässig***

Heidenau, April 2012

Projektbegleiter: ■ Heiner Grussenmeyer, Storaenso Research, Mönchengladbach ■ Christof Horstmann, Nordland Papier GmbH, Dörpen ■ Silvia Reichelt, Sappi Alfeld GmbH, Alfeld, ■ Erik Schulz, Papierfabrik Scheufelen GmbH & Co. KG, Lenningen	Das Forschungsprojekt wurde gefördert durch das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), Bonn
--	---

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Ausgangssituation	5
3	Zielstellung des Vorhabens	5
4	Stand des Wissens.....	6
5	Material und Methoden.....	9
5.1	Herstellung gestrichener Laborblätter	9
5.2	Herstellung gestrichener Blätter im Technikumsmaßstab.....	11
5.3	Prüfmethoden	11
6	Ergebnisse	13
6.1	Eigenschaften der Faserstoffe	13
6.2	Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes des Papiers auf die Falzbruchneigung (Laborblätter)	14
6.3	Einfluss des Mischungsverhältnisses der eingesetzten Faserstoffe auf die Falzbruchneigung (Laborblätter).....	16
6.4	Einfluss der Mahlung des Langfasersulfatzellstoffs (Laborblätter)	20
6.5	Einfluss von Füllstoffgehalt und ausgewählten Additiven (kleintechnisch hergestellte Papiere)	23
6.6	Mikroskopische Bewertung des Bruchfalzes an der Außenseite	26
7	Literaturverzeichnis	29

1 Zusammenfassung

Projektziel Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung von Zusammenhängen zwischen Faserstoffauswahl, Faserbehandlung und resultierender Gefügefestigkeit für die Verbesserung des Falzbruchverhaltens von Streichrohpapieren und damit gestrichenen Papieren unter Herleitung der Behandlungsmöglichkeiten in der Stoffaufbereitung und Blattbildung.

Zielgruppen

Grad der Nutzbarkeit in verschiedenen Branchenbereichen →	1	2	3	4	5 (stärkste Nutzbarkeit)
Graphische Papiere					
Verpackungspapiere					
Hygienepapiere					
Spezialpapiere					

Lösungsweg

Im Folgenden ist die Vorgehensweise dargestellt:

- Schritt 1 – Faserstoffbehandlung: Im ersten Schritt wurden in Absprache mit den Projektbegleitern die Faserstoffe hinsichtlich festgelegter Kriterien ausgewählt. Für unterschiedliche physikalische Eigenschaften der Faserstoffe wurden diese mit unterschiedlichen Mahlintensitäten beaufschlagt.
- Schritt 2 – Laborblätter: Mit den in Schritt 1 ausgewählten und bearbeiteten Faserstoffen wurden Laborblätter (Rapid-Köthen) erzeugt und mit einer Offsetstrichformulierung gestrichen. Die ungestrichenen und gestrichenen Laborblätter wurden auf ihre physikalischen Eigenschaften hin untersucht. Die gestrichenen Muster wurden bezüglich ihrer Falz- und Strichbrucheigenschaften bewertet.
- Schritt 3 – Einflussfaktor Blattbildungsbedingungen: Aufgrund der Ergebnisse wurde eine Faserstoffmischung für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Auf der Versuchspapiermaschine (VPM) wurde an dieser der Einfluss von Füllstofftyp, Füllstoffmenge und Hilfsmittel untersucht. Die VPM Papiere wurden auf einer Versuchsstreichmaschine gestrichen und analog zu Schritt 3 untersucht.
- Schritt 4 – Auswertung: Die Auswertung soll den Zusammenhang zwischen Faserstoff- und Rohpapiereigenschaften und der Falzfestigkeit aufzeigen sowie weitergehende Ansätze für Optimierungsmaßnahmen geben.

Schlussfolgerungen

Für die Festigkeit der Papiere nach ihrer Falzung wurden erwartungsgemäß deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Faserstoffmischungen beobachtet. Die armierende Wirkung von Langfaser-Sulfatzellstoff wurde für die Masseanteile 0, 10, 20 und 40% dargestellt. Ein völliger Verzicht auf Langfaser-Sulfatzellstoff (LF-Sa) in den Papieren führte zu deutlichen Festigkeitseinbußen (bis zu 50% Festigkeitsverlust). Der Austausch von Holzschliff gegen Kurzfaser-Sulfatzellstoff verringerte den, infolge der Falzung eintretenden Festigkeitsabfall. Zwischen den beiden eingesetzten Fichten/Buchen-Sulfatzellstoffen wurden ebenfalls Unterschiede beobachtet.

Durch die Wahl günstiger Mahlungsbedingungen, insbesondere eine geringen Mahlkantenlast (hier 1,15 Ws/m), konnten die Bruchkraft nach der Falzung positiv beeinflusst werden. In Abhängigkeit der spez. Mahlergie wurde ein faserstofftypisches Maximum durchlaufen.

In den Versuchen konnten, bei einer Reduzierung des Langfaseranteils auf 20% und gleichzeitig optimierten Mahlungsbedingungen, gute Festigkeitswerte erreicht werden.

Die Gleichgewichtsfeuchte des Fasergefüges übte einen signifikanten Einfluss auf das Verhalten des Papiers während des Bruchvorganges aus. Nahezu trocken gefalzte Papiere zeigten nach der Falzung um etwa 15% geringere Bruchfestigkeit und eine, um die Hälfte verringerte Bruchdehnung gegenüber im Normklima (50% rel. Luftfeuchte) gefalzten Papieren. Besonders drastisch wirkte sich dies auf das Arbeitsaufnahmevermögen aus, also diejenige Arbeit, die zum Zerreißens des Papiers in der Papierebene benötigt wird. Das Arbeitsaufnahmevermögen ging um mehr als die Hälfte zurück.

Der Füllstoffgehalt und die Festigkeit nach Falzung verhielten sich für die, auf der Technikumpapiermaschine erzeugten Papiere umgekehrt proportional. Der Füllstoffeinfluss war hierbei dominant gegenüber der Art des verwendeten Füllstofftyps (GCC/PCC), und der Art des verwendeten Flockungsmittels (PEI/PAA).

Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung

Die Ergebnisse ermöglichen es, die standortspezifischen Möglichkeiten bei der Rohstoffauswahl, der Faserstoffbehandlung und der Prozessführung bei der Blattbildung für ein kostenoptimiertes Streichrohpapier mit einer hohen resultierenden Falz- und Rillfestigkeit, zu nutzen und somit eine kostenoptimierte Herstellung der Produkte zu erreichen.

Förderung & Danksagung

Das Projekt wurde gefördert durch das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP.

Ein besonderer Dank gilt den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses PBA (in alphabetischer Reihenfolge)

- Heiner Grussenmeyer, Storaenso Research, Mönchengladbach
- Christof Horstmann, Nordland Papier GmbH, Dörpen
- Silvia Reichelt, Sappi Alfeld GmbH, Alfeld,
- Erik Schulz, Papierfabrik Scheufelen GmbH & Co. KG, Lenningen

für die Diskussionsbereitschaft und die wertvollen Hinweise während der Projektbearbeitung.

2 Ausgangssituation

Hintergrund

Gestrichene Druckpapiere werden nach dem Drucken einem intensiven Verarbeitungsprozess unterzogen. Hierzu gehört unter anderem das Falzen der bedruckten Papiere. Dieser Prozess stellt einen der häufigsten Weiterverarbeitungsprozesse dar. Für eine einwandfreie Verarbeitung der bedruckten Papiere und, um ein Produkt mit hohem Gebrauchswert zu liefern, sind daher die Falzeigenschaften der Papiere von besonderer Bedeutung. Die Falzeigenschaft ist eine sogenannte „need to have“- Eigenschaft, ohne dass gewisse Mindestanforderungen erfüllt werden, ist ein Papier unverkäuflich [1].

Neben den Verarbeitungseigenschaften werden stetig die Bedruckbarkeitseigenschaften verbessert. Dies geschieht vor allem durch das Aufbringen höherer Mengen an mineralischen Pigmenten.

Falzbruch – „Gestrichenes Papier“

Durch die steifen und nicht kompressiblen Striche treten auf der Oberfläche der Papiere beim Falzen zusätzliche Kräfte auf. Diese können zum Aufplatzen der Papieroberfläche führen u.a. bedingt durch das nicht ausreichende Arbeitsaufnahmevermögen des Streichrohpapiers. Dies kann zu Reklamationen führen und somit zu hohen Kosten für die betroffene Papierfabrik. Im Rollenoffsetbereich sind vorwiegend Papiere mit niedrigem Flächengewicht, im Bogenoffsetbereich Papiere mit hohen Flächengewichten und hohen Strichaufträgen betroffen [1].

Die physikalischen Vorgänge im Verbundwerkstoff „Gestrichenes Papier“ beim Falz- und Rillvorgang sind komplex. Die Erfahrung zeigt, dass die mechanischen Festigkeiten und Kompressionseigenschaften über den Papierquerschnitt gänzlich unterschiedlich und stark von den verwendeten Fasermaterialien abhängig sind. Diese komplizierten Wechselwirkungen sind nicht zufriedenstellend untersucht.

Operative Lösungen

Die Problematik Falzbruch wird bis jetzt häufig empirisch gehandhabt. Operative Lösungsmöglichkeiten sind beispielsweise

- das Überlackieren,
- die relative Luftfeuchtigkeit in den Verarbeitungs- und Lagerräumen geeignet einzustellen (z.B. 50%) [2] beziehungsweise
- die Papierbahn im Falzbereich gezielt rück zu befeuchten [3].

3 Zielstellung des Vorhabens

Ziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung von Zusammenhängen zwischen Faserstoffauswahl, Faserbehandlung und resultierender Gefügefestigkeit für die Verbesserung des Falzbruches von Streichrohpapieren und damit gestrichenen Papieren unter Herleitung der Behandlungsmöglichkeiten in der Stoffaufbereitung und Blattbildung.

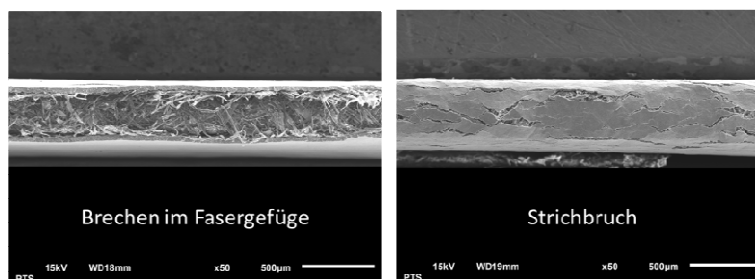
4 Stand des Wissens

Falzbruch

Das Falzen ist ein Weiterverarbeitungsschritt, der üblicherweise dem Druckprozess folgt. Während dieses Prozesses kann es zum Brechen im Falz kommen. Der Falzbruch (Brechen im Falz) wird in zwei verschiedene Erscheinungsbilder unterteilt:

- Bruch durch einen Teil oder des gesamten Fasergefüge
- Bruch des Strichs (Strichbruch)

Der Bruch durch das Fasergefüge bedingt stets eine starke Gefügeschwächung und somit eine deutliche Verringerung der verbleibenden Papierfestigkeit in diesem Bereich. Beim Strichbruch kommt es nicht zwingend zu einem teilweise oder vollständigen Bruch des Fasergefüges, sondern lediglich zum Aufbrechen des Strichs. Das Fasergefüge wird freigelegt. Dadurch wird die optische Qualität des Produktes beeinträchtigt – vor allem bei bedruckten Stellen mit hohem Kontrast.



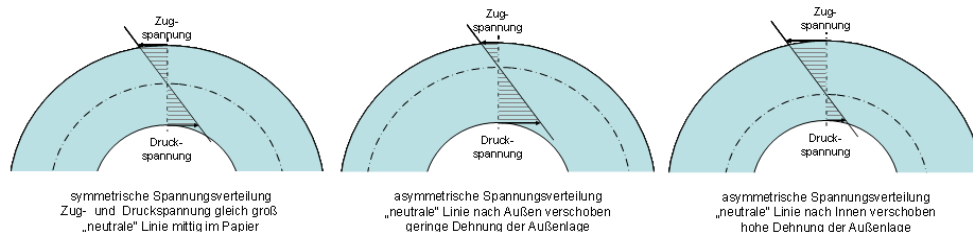
Vorgänge beim Falzen [4]

Beim Falzen wird das Papier um einen Winkel von 180° gelegt. Die Außenzone wird überdehnt (Zugspannungen) und die Innenzone gestaucht (Druckspannungen). Dies führt zu einer irreversiblen plastischen Deformation im Papiergefüge, die abhängig ist von den elastischen Eigenschaften der Faser/Strichstruktur.

Nach Dähling et al [5] und Pantel [6] stehen die auftretenden Druck- und Zugkräfte im Gleichgewicht (Hebelgesetz):

$$\text{Druckspannung} \cdot \text{Stauchweg} = \text{Zugspannung} \cdot \text{Dehnweg}$$

Die Summe von Stauch- und Dehnweg ergibt die Papierdicke. Das Verhältnis beider Spannungskräfte bestimmt die Lage der neutralen Biegelinie im Papier:



Bei einem homogenen, symmetrischen Materialaufbau (z.B. einlagig, ungestrichenes Papier) werden die beiden Spannungen gleich groß sein (symmetrische Spannungsverteilung). Lediglich in diesem Fall wird sich die neutrale Biegelinie, d.h. jene Zone im Papier, die weder Dehnung noch Stauchung erfährt, in der Mitte des Papiers einstellen. Bei einem mehrlagigen Werkstoff ergibt sich die Lage der neutralen Biegelinie aus dem Aufbau des Materials in Abhängigkeit von der Anordnung der einzelnen Lagen, ihrer Anordnung in z-Richtung, ihrer Dicke

und ihres E-Moduls. Folge davon ist eine in der Regel asymmetrische Spannungsverteilung im Papier, wobei insbesondere die Zugspannung in der Außenlage kritisch ist. Überschreiten die Zugspannungen die Dehnfähigkeit der Schicht, führt dies zum Bruch.

FEM-Simulationen zeigen, dass das Falzbrechen nicht zwangsläufig mittig der Falzlinie verläuft. Meist finden sich die Belastungsspitzen links oder rechts der Symmetrielinie [7].

Einflussfaktoren

Die Austrocknung des Papiers ist einer der Risikofaktoren für das Auftreten von Falzbruch. Dies ist vor allem im Rollenoffset relevant, da hier das Papier nach dem Druck einer sehr hohen thermischen Belastung ausgesetzt wird; dazu ist das Zeitintervall zwischen Druck, Trocknung und Falzung sehr kurz. Vor allem bei Rollenoffsetpapieren mit niedrigen Flächengewichten kann dies zu Falzbruch führen [1]. Aufgrund des Feuchtigkeitsverlusts versprödet das Papier und verliert damit seine Elastizität. Die Festigkeit in der Falznaht wird dadurch erheblich verringert [8–10]. Um dem Papier die entzogene Feuchtigkeit wieder zurückzugeben und somit die Festigkeit zu steigern, wird das Papier vor dem Falzvorgang rückbefeuchtet. So genannte „fold softening“ Systeme, bei denen ein dünner Wasserfilm nur im Bereich des Falzes aufgetragen wird, sind mittlerweile etabliert und Stand der Technik.

Ein weiterer Einflussfaktor bildet laut Dähling et al. [5] sowie Rudat et al. [3] die Dicke des Papiers. So soll ein voluminöseres und damit kompressibleres Streichrohrpapier in der Lage sein, den Dehnweg zu verkürzen und damit die Gefahr der Überdehnung zu vermindern. Durch die stärkere Penetration der Streichfarbe (im Gegensatz zu einem dichteren Papier) sinken die auf der Oberfläche auftretenden Kräfte. Babier et al. [11] sowie Yang et al. [12] dagegen stellen fest, dass eine Reduzierung der Papierdicke zu einer Reduzierung der Dehnungsbeanspruchung der Strichschicht führt.

Ausgangspunkt des Bruches ist immer die äußere Schicht des Papiers im Falz, dessen Dehnfähigkeit entscheiden ist ob eine Gefügeschwächung (Brechen im Papier) oder lediglich ein Brechen im Strich stattfindet [4]. Dazu sollte das Material in der Lage sein, Druckspannungen innen im Falz aufzubauen. Eine Delaminierung der Einzellagen des Materials inkl. Wulstbildung im Falz sorgt für eine Reduzierung der Zug und Druckspannungen, dies ist jedoch nur für Papiere mit hohen flächenbezogenen Massen relevant [13]. Barbier et al. [11, 13] konnten keine Korrelation zwischen Delamination und Falzbruch bei gestrichenen Papieren aufzeigen.

Weitere Einflussfaktoren bilden die Rohpapier- und Strichzusammensetzungen. So haben die Faserstoffmahlung, die Faserorientierung und die Streichfarbenzusammensetzung einen starken Einfluss auf die Falzbruchneigung [5, 11, 12, 14–16].

Hinsichtlich des Mahlens der Faserstoffe ist ein Optimum zwischen Fibrillierung und Faserkürzung anzustreben [14]. Ziel sollten wenig gekürzte, biegsame Fasern mit guten Bindungseigenschaften sein. Durch eine niedrige Kantenlast und geeignete Schnittwinkel können bei niedriger spezifischer Mahlergie bessere Festigkeitseigenschaften sowie Oberflächen- und optische Eigenschaften erzielt werden [17]. Das Brechen im Papiergefüge ist jedoch nicht allein vom Rohpapier abhängig. So kann es u.a. zu einem Bruch im Papier durch eine Kombination

von einem „schwachen“ Rohpapier und einer steifen Strichschicht kommen.

Bei gestrichenen Papieren geht der entscheidende Einfluss vom innen liegenden Strich aus [5]. Von den Strichkomponenten sollen die eingesetzten Pigmente einen größeren Einfluss auf die Falzbruchneigung besitzen als Bindemittel. Dabei sind reine Calciumcarbonat-Striche Kaolin-Strichen vorzuziehen [15]. Der Zusatz von Kaolin zu Calciumcarbonat-Strichen hat jedoch einen positiven Einfluss auf das Falzbruchverhalten [9, 16]. Hinsichtlich der Strichbinder wird vor allem Stärke ein negativer Einfluss zugesprochen, da diese durch ihre speziellen Filmbildungseigenschaften zur Ausbildung einer spröderen Papierstruktur beiträgt [4]. Jüngere Untersuchungen [4, 18] haben jedoch gezeigt, dass die in der Praxis eingesetzten Stärkedextrine keinen negativen Einfluss auf das Falzbruchverhalten besitzen. Die Erhöhung des Binderanteils soll die Falzbrucheigenschaften verschlechtern [3].

5 Material und Methoden

5.1 Herstellung gestrichener Laborblätter

Faserstoffe, Faserstoff- mischungen und Mahlung

Die Tab. 1 gibt einen Überblick über die eingesetzten Faserstoffe.

Tab. 1 Eingesetzte Faserstoffe

	KF-Sa A	LF-Sa B	FiBu-Si2 C	FiBu-Si3 D	BCTMP E
Typ	Kurzfaser	Langfaser	Kurz- und Langfaser	Kurz- und Langfaser	BCTMP (high Volume)
Aufschluss	Sulfat	Sulfat	Sulfit	Sulfit	Holzschliff
Holzart	Eukalyptus	Fichte, Kiefer	Fichte (50%), Buche (50%)	Fichte (50%), Buche (50%)	Pappel
	Markt-ZS	Markt-ZS	Integriert erzeugter ZS	Integriert erzeugter ZS	Markt-HS

Die beiden Fichten-Buchen-Sulfit-Zellstoffe wurden als integriert erzeugte und initial feuchte Materialien bezogen. Alle weiteren Faserstoffe waren getrocknete Marktstoffe.

Die Faserstoffe wurden gemäß Tab. 2 und Abb. 1 gemischt. Die Mahlung des Langfaserzellstoffes (LF-Sa) wurde hierbei variiert. Der Kurzfaserzellstoff (KF-Sa) wurde stets mit einer spezifischen Mahlkantenlast von 1,15 Ws/m und einer spezifischen Mahlergie von 150 kWh/t behandelt.

Tab. 2 Faserstoffmischungen und Mahlbedingungen

Faserstoffmischung [%]						Mahlung	
Nr.	A	B (1-6)	C	D	E	LF-Sa Kantenlast [Ws/m]	LF-Sa spez. Mahlergie [kWh/t]
01	60	40				2,13	100
02	60		40				
03	40	20			40		
04	20	20	60				
05	30	10	60				
06	40	10	50				
11	20	20	60			1,15	100
12							150
13							200
14						2,13	150
15							200
16				60			100
17							150
18							200

Die Mahlung wurde im Technikumsrefiner der PTS mit Scheibengarnituren (Schnittwinkel 60°) durchgeführt.

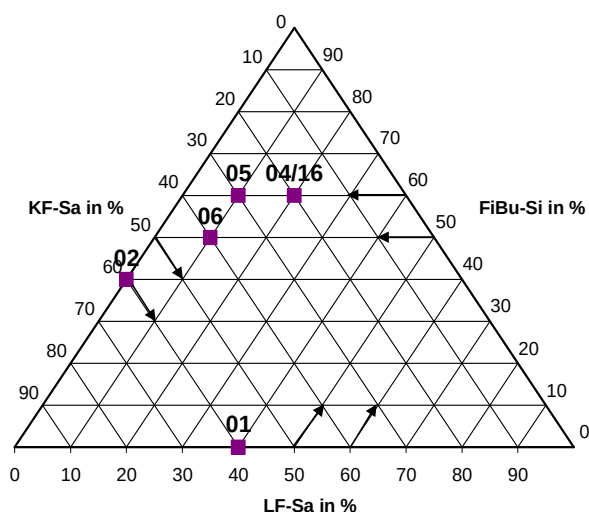


Abb. 1 Faserstoffmischungen (graphisch)

**Laborblatt-
bildung**

Die Laborblätter wurden mit Hilfe eines Rapid-Köthen-Blattbildner nach DIN EN ISO 5269-2 hergestellt, wobei die Trocknungszeit auf 10 min verlängert wurde. Die flächenbezogene Masse der Rohpapiere betrug nach DIN EN ISO 536 $120 \pm 2 \text{ g/m}^2$.

Streichfarbe

Als Streichfarbe wurde eine Offset-Deckstreichrezeptur verwendet:

- 80T Calciumcarbonat (Hydrocarb 90 ME)
- 20T Kaolin (CCWZ)
- 10T Latex (Styronal 809)
- 0,3T CMC (Finnfix 10)
- 0,14T Verdicker (Sterocoll FD)

Der Feststoffgehalt betrug 69%, die Brookfield-Viskosität (BV100) 1074 mPas und der pH-Wert 8,5.

**Strichauftrag
und Trocknung**

Die Streichfarbe wurde beidseitig mit einem Filmziehgerät „Coatmaster 509 MC“ (Fa. Erichsen) auf die Laborblätter gestrichen. Der flächenbezogene Strichauftrag betrug 25 g/m^2 je Seite.

Nach dem Auftrag des Vorderseitenstrichs wurden die Papiere im Trockenschrank für 90 s bei einer Temperatur 105°C getrocknet. Für die notwendige Planlage wurden die getrockneten Blätter rückbefeuchtet (entionisiertes Wasser, zerstäubt mit Sprühflasche, ein Sprühstoß je Seite) und gemäß der in DIN EN ISO 5269-2 beschriebenen Trocknung im Blattdrockner getrocknet (Dauer 2 min).

Die anschließende Trocknung des Rückseitenstrichs erfolgte analog.

5.2 Herstellung gestrichener Blätter im Technikumsmaßstab

Faserstoffe, Faserstoff- mischungen und Mahlung

Die Tab. 3 gibt einen Überblick über die hergestellten Papiere (Versuche Nr. 21 bis 35).

Tab. 3 Faserstoffmischungen

Nr.	Pigment	Füllstoff- gehalt	Hilfsmittel (HM)	Längs-/Quer- verhältnis	Strich	m _A [g/m²]
21	GCC	26,3 %	PEI	1,9	ohne	121
22	PCC	24,6 %	PEI	2,2	ohne	118
23	GCC	19,8 %	PEI	2,1	ohne	120
24	GCC	17,6 %	PAA	1,8	ohne	120
25	GCC	12,9 %	PEI	1,8	ohne	128
31	GCC	26,3 %	PEI	1,9	+ Strich	197
32	PCC	24,6 %	PEI	2,2	+ Strich	195
33	GCC	19,8 %	PEI	2,1	+ Strich	189
34	GCC	17,6 %	PAA	1,8	+ Strich	186
35	GCC	12,9 %	PEI	1,8	+ Strich	191

Für die Herstellung dieser Papiere wurde die Faserstoffmischung 12 (vgl. Tab. 2) verwendet.

Folgende Hilfsmittel wurden, in jeweils fixer Dosierung (Masse Feststoff bezogen auf Masse otro Faserstoff) eingesetzt:

- kationische Stärke (35844; Fa. Cargill) 1%, Einsatz in allen Papieren
- PEI (HM Polymix; Fa. BASF) 0,15%
- PAA (Percol 121; Fa. BASF) 0,015%

5.3 Prüfmethoden

Überblick

Die Faserstoffe wurden hinsichtlich ihrer chemische-morphologischen Eigenschaften, die Papiere hinsichtlich Struktur- und Festigkeitseigenschaften untersucht.

Faserstoff- prüfung

Die Faserabmessungen (Faserlänge, -durchmesser, -wandstärke) wurden in Anlehnung an TAPPI 271 om-98 mittels optischer Faserlängenmessung (Fiber-Lab; Fa. Metso) bestimmt.

Die Oberflächenladung (Gehalt an negativ geladenen, für Polyelektrolyte zugänglichen Gruppen) wurde mit Hilfe der Polyelektrolyttitration nach Wägberg und Ödberg [19] bestimmt. Die Gesamtladung (Gehalt alle negativ geladenen Gruppen des Faserstoffs) wurde mit Hilfe einer Säure-Base-Titration ermittelt.

Der Entwässerungswiderstand wird mittels Schopper-Riegler Verfahren bestimmt. Die Vorgehensweise hierfür ist in der Norm DIN ISO 5267 Teil 1 beschrieben.

Falzung

Die Falzung wurde mit einem Laborfalzgerät der Fa. Prüfbau (Peißenberg, D) mit einem einstellbaren Liniendruck von 80 N/cm Falzbreite durchgeführt. Für ein einwandfreies Falzergebnis wurden die Muster vorgefalzt. Die Abb. 2 zeigt beide Geräte.



Abb. 2 Vorfalzer und Laborfalzgerät [20]

Die Muster wurden in drei unterschiedlichen Trocknungszuständen gefalzt.

- 1) nach Klimatisierung im Normklima (23 °C / 50% rel. Luftfeuchte)
- 2) getrocknet im Trockenschrank bei 105 °C / 30 min ,
anschließende Abkühlung im Exsikkator (über Kieselgel; 30 min)
- 3) getrocknet im Trockenschrank bei 130 °C / 5 min,
anschließende Abkühlung im Exsikkator (über Kieselgel; 30 min)

Zugprüfung

Die Zugprüfung gefalzter und ungefalzter Proben wurde gemäß DIN EN ISO 1924-2 durchgeführt. Sie war die maßgebliche Methode zur Bewertung des infolge der Papierfalzung auftretenden Festigkeitsverlustes.

Als wesentliche Kenngrößen wurden die Bruchkraft sowie die Bruchdehnung herangezogen. Hierbei wurde zwischen dem Absolutwert der Bruchkraft nach der Falzung bzw. der relativen Bruchkraft nach der Falzung (im Verhältnis zur Bruchkraft vor der Falzung) unterschieden.

Weitere Struktur- und Festigkeits-eigenschaften

Folgende weitere Struktureigenschaften und Festigkeitseigenschaften der Papiere wurden bestimmt:

- scheinbare Dichte, DIN EN ISO 534
- Luftdurchlässigkeit (Gurley), ISO 5636-5
- Glätte (Bekk), DIN 53107
- Durchreißfestigkeit (Elmendorf), DIN EN 21974
- 2-Punkt-Biegesteifigkeit, DIN 53121

Weiterhin wurden mikroskopische Aufnahmen der, infolge des Falzens aufgebrochenen Zone mit Hilfe eines Raster-Elektronen-Mikroskops gemacht.

Klimatisierung

Alle Papierprüfungen wurden im Normklima gemäß DIN EN 20187 durchgeführt. Lediglich für die Falzung wurden – wie oben angegeben – auch abweichende Klimate verwendet.

6 Ergebnisse

6.1 Eigenschaften der Faserstoffe

Eigenschaften

In der folgenden Tabelle sind die Eigenschaften der eingesetzten Faserstoffe aufgezeigt. Für den Langfaserzellstoff ist zusätzlich die Abhängigkeit der Faserstoffeigenschaften von der Mahlung dargestellt.

Tab. 4 Faserstoffeigenschaften

Bez.	Typ	Kantenlast [Ws/m]	Mahlenergie [kWh/t]	Faserlänge L (l) c [mm]	GL [μmol/g]	OFL [μeq/g]	EW
A	KF-Sa	1,15	150	0,7	-73	-44	32
B1	LF-Sa	2,13	100	1,7	-37	-32	20
B2	LF-Sa		150	1,5		-38	25
B3	LF-Sa		200	1,3		-43	37
B4	LF-Sa	1,15	100	2,1		-28	32
B5	LF-Sa		150	2,1		-31	48
B6	LF-Sa		200	2,0		-35	64
C	FiBu-Si2	k.A.	k.A.	1,0	-51	-33	26
D	FiBu-Si3	k.A.	k.A.	1,0	-54	-31	33
E	BCTMP	k.A.	k.A.	0,7	-149	-48	37

Die Gesamtladung (GL) ist mahlungsunabhängig und gibt die insgesamt im Faserstoff verfügbare Ladungsmenge an. Insbesondere der BCTMP zeichnete sich (als einziger Holzstoff) durch eine hohe Gesamtladung aus.

Die Oberflächenladung (OFL) ist ein Maß für die Wechselwirkungsmöglichkeiten der Faser mit Additiven bzw. anderen Fasern und repräsentiert die, für Polyelektrolyte zugängliche Faseroberfläche. Die Unterschiede zwischen den eingesetzten Faserstoffen waren gering.

OFL und Entwässerungswiderstand (EW) erhöhten sich erwartungsgemäß mit der Mahlung, wohingegen die Faserlänge zurückging,

Faserlänge vs. Feinstoffanteil

Ein hoher Feinstoffanteil sollte sich positiv auf die Formation und Oberfläche auswirken, eine hohe Faserlänge positiv auf die Festigkeitswerte. Hierzu stellt die Abb. 3 den Feinstoffanteil (Anteil der Fasern kürzer 0,2 mm) und die mittlere Faserlänge gegenüber.

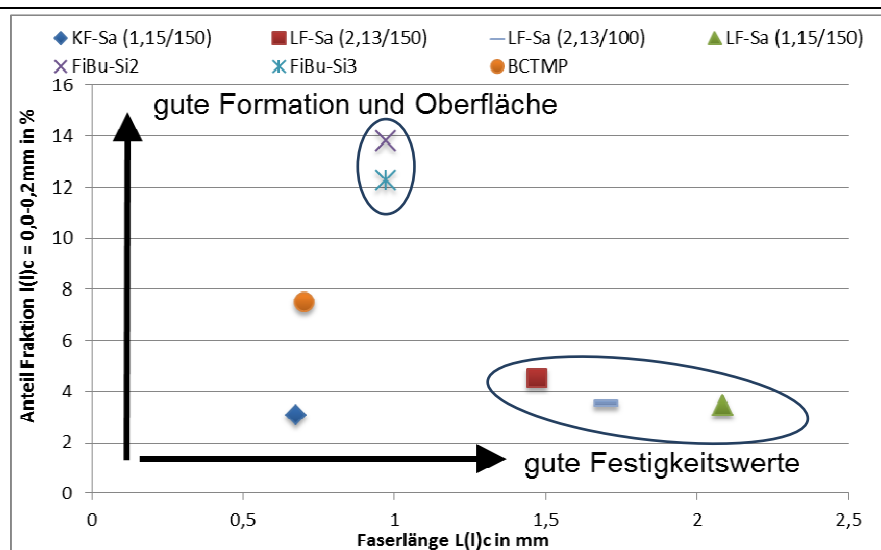


Abb. 3 Faserstoffe: Feinstoffanteil und Faserlänge

Bei den LF-Sulfat-Zellstoffen sind in Klammern die Mahlkantenlast in Ws/m und die spezifische Mahlenergie in kWh/t angegeben. Die FiBu-Si Zellstoffe wiesen den höchsten Feinstoffanteil von den eingesetzten Zellstoffen auf. Dies führt zu einer guten Formation und Oberfläche des Papiers. Betrachtet man die LF-Zellstoffe so ist deutlich zu erkennen, dass eine geringere Mahlkantenlast (1,15 Ws/m statt 2,13 Ws/m) bei gleicher spezifischer Mahlenergie die Fasern weniger stark kürzt und weniger Feinstoffanteil anfällt. Dies sollte zu einer Verbesserung der Festigkeitswerte führen.

6.2 Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes des Papiers auf die Falzbruchneigung (Laborblätter)

Bruchkraft nach Falzung

Die Austrocknung des Papiers ist einer der Risikofaktoren für das Auftreten von Falzbruch. Aufgrund des Feuchtigkeitsverlusts verlieren die Fasern an Biegsamkeit, ihre Steifigkeit steigt an und das Fasergefüge neigt infolge der Falzbelastung stärker dazu Festigkeit (lokal) zu versagen. Wie zu erwarten, hatte die Trocknung einen deutlichen Einfluss auf die Bruchkraft nach Falzung. So fällt die Bruchkraft nach Falzung nach der Trocknung bei erhöhter Temperatur ab. Hierbei war es unerheblich, ob bei 105 °C oder 130 °C getrocknet wurde.

Der Faserstoffanteil der Papiere enthält im Normklima üblicherweise etwa 6-8% Wasser. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Muster in den Fällen 2 und 3 infolge der Trocknung nahezu absolut trocken waren.

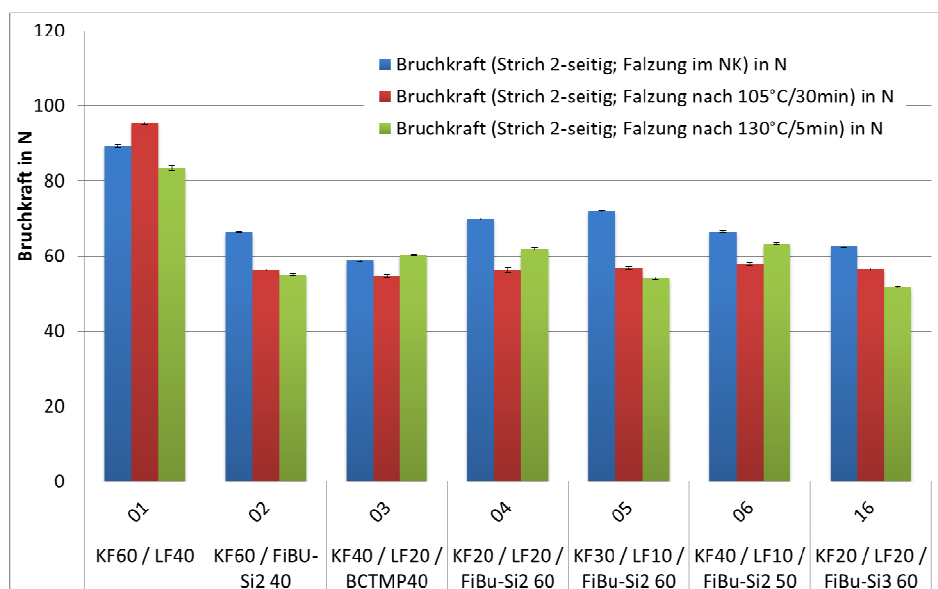


Abb. 4 Einfluss der Trocknung auf die Bruchkraft nach der Falzung

Eine chemische Veränderung bzw. thermische Alterung infolge der thermischen Belastung war, nach den an der Forschungsstelle vorliegenden Erfahrungen, nicht zu erwarten. Die beobachteten Effekte sind also rein auf den Feuchtigkeitsgehalt des Fasergefüges zurückzuführen und nicht auf chemische Veränderungen der Faserstoffe.

Bewertung des Festigkeitsverlustes infolge der Trocknung

Die Abb. 5 stellt die Bruchkraft nach Falzung für die im Normklima gefalzten und die im trockenen Zustand gefalzten Papiere gegenüber. Für die untersuchten Papiere lag die Bruchkraft nach der Falzung im trockenen Zustand etwa 15% unterhalb der Bruchkraft nach Falzung im Normklima.

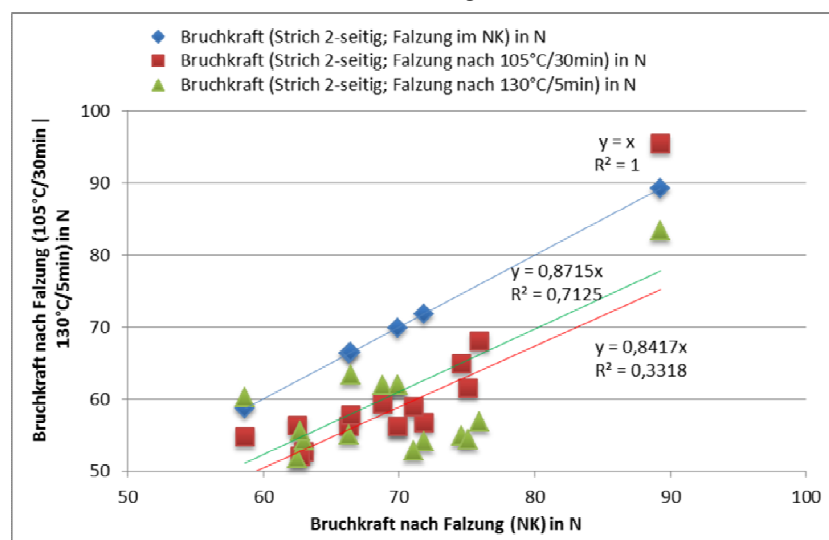


Abb. 5 Gegenüberstellung Bruchkraft nach Falzung (Normklima, getrocknet)

Noch weit größer als der Verlust an Bruchkraft wirkte sich der Verlust an Bruchdehnung der Papiere infolge der trockenen Falzung aus. Wie Abb. 9 (Seite 18) zeigt, ging die Bruchdehnung nahezu um die Hälfte zurück. Das verbleibende

Arbeitsaufnahmevermögen (proportional der Fläche unter der Kraft-Dehnungs-Kurve), das von Bruchkraft und Bruchdehnung abhängt, betrug für eine Falzung im trockenen Zustand weniger als die Hälfte (!) des ungefalteten Zustandes.

Da in der Druckmaschine die Trocknung in kurzer Zeit aber mit hohen Temperaturen durchgeführt wird, ist die Trocknung für 5 min bei 130 °C näher an den Praxisbedingungen und wird für die weitere Darstellung der Versuchsergebnisse genutzt.

Faserlänge

Die mittlere Faserlänge war für die Falzung im Normklima ein Indikator für die Bruchkraft nach der Falzung. Längere Fasern führten tendenziell zu höheren Festigkeitskennwerten. Dieser Einfluss wurde von weiteren Faserstoffcharakteristika überlagert. Die nach dem Sulfatverfahren erzeugten Faserstoffe übertrafen bei gleicher mittlerer Faserlänge erwartungsgemäß die Sulfitzellstoffe hinsichtlich der Bruchkraft nach trockener Falzung.

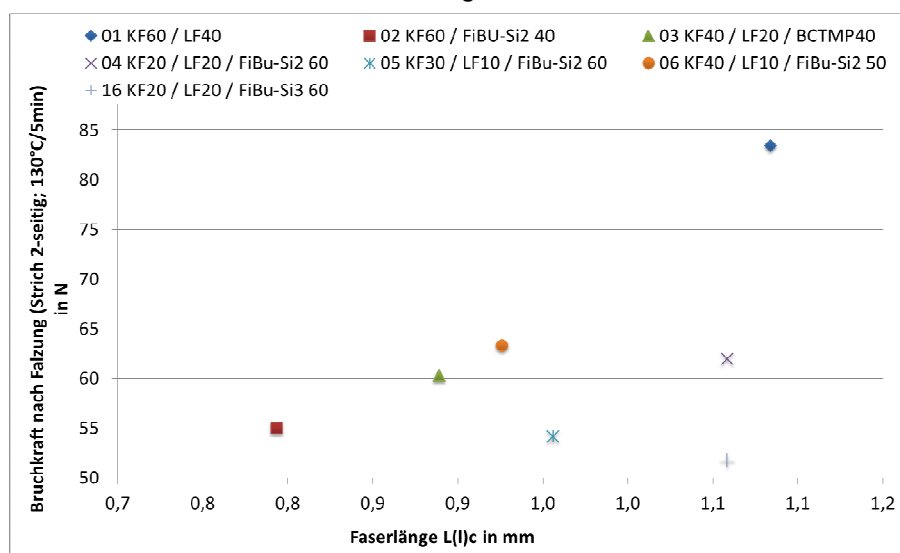


Abb. 6 Gegenüberstellung von Bruchkraft nach trockener Falzung und mittlerer Faserlänge

6.3 Einfluss des Mischungsverhältnisses der eingesetzten Faserstoffe auf die Falzbruchneigung (Laborblätter)

Einleitung

Der Einfluss unterschiedlicher Faserstoffe auf die Falzbruchneigung wurde untersucht. Als Referenzpapier wurde Mischung 01 mit 60% KF-Sa und 40% LF-Sa festgelegt. Die weiteren Zusammensetzungen wurden in Absprache mit dem PA ausgewählt.

Bruchkraft nach Falzung

In Abb. 7 ist zu erkennen, dass die Bruchkraft nach Falzung mit sinkendem Langfaseranteil (01>04>05) deutlich abgenommen hat. Gleiches wurde für den Ersatz des Kurzfasersulfatstoffes durch den Fichten/Buchen-Sulfatstoff 2 (06>05) sowie den Ersatz von Fichten/Buchen-Sulfatstoff 2 mit Fichten/Buchen-Sulfatstoff 3 (04>16) beobachtet. Um die Festigkeit bei völligem Verzicht auf Langfaserstoff zu gewährleisten, musste ein genügend hoher Anteil Kurzfa-

serzellstoff zugesetzt werden (02>05). Für den Einsatz von BCTMP (03) wurden deutlich voluminösere Papiere erhalten, die bei gleichem Langfaseranteil eine ähnliche Bruchkraft nach Falzung aufwiesen wie die Kurzfaserszellstoff oder Fichten-Buchen-Sulfitzellstoff enthaltenden Mischungen.

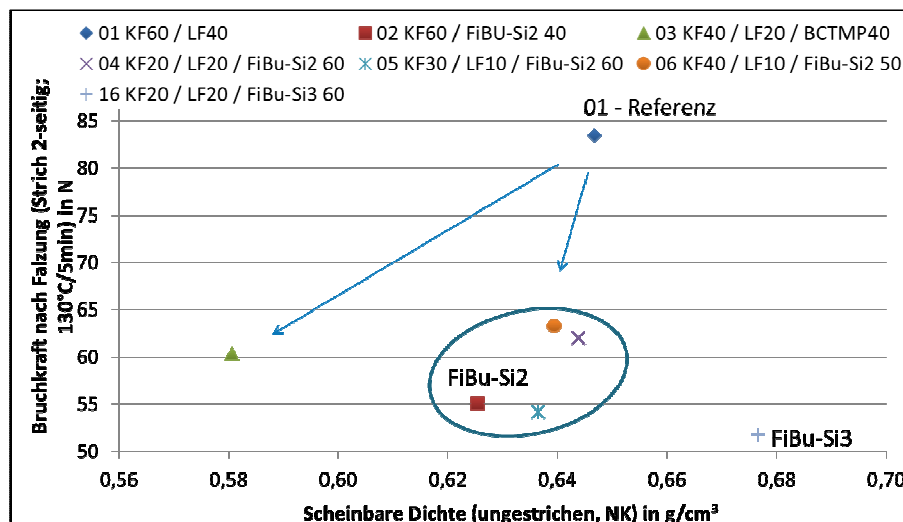


Abb. 7 Bruchkraft nach Falzung und scheinbare Dichte

Die vorliegenden Papiere wiesen stets eine konstante flächenbezogene Masse auf. Eine Veränderung der scheinbaren Dichte führte demnach stets zu einer Veränderung Papierdicke. Aus diesem Grund konnte keine Aussage über den Einfluss der scheinbaren Dichte auf die Bruchfestigkeit nach Falzung getroffen werden (Aussagen von Rudat et al. [3]).

Bruchkraft nach Falzung (relativ)

Bei der relativen Bruchkraft wird die Bruchkraft nach Falzung mit der Bruchkraft im ungefalteten Zustand der jeweiligen Mischung ins Verhältnis gesetzt. Die relative Bruchkraft zeigt an, wie stark die Bruchfestigkeit der Proben nach dem Falzen verringert wird. Die Papiere verloren bis zu 40% ihrer Ausgangsbruchkraft.

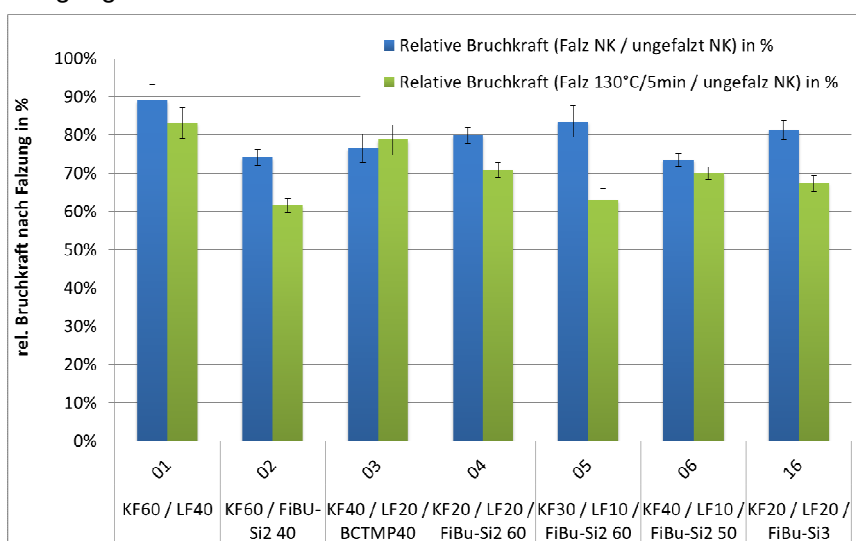


Abb. 8 Bruchkraft nach Falzung (relativ)

Bruchdehnung nach Falzung

Wie Abb. 9 zeigt, verringerte sich auch die Bruchdehnung nach Falzung deutlich. Im Normklima wiesen die Mischungen 01, 04 und 05 die besten Werte nach Falzung auf. Nach der Trocknung liegen alle Mischungen im gleichen Wertebereich der Bruchdehnung. Die bei Normklima beobachteten Unterschiede der Bruchdehnung zwischen den Faserstoffmischungen wurden also infolge der Trocknung egalisiert.

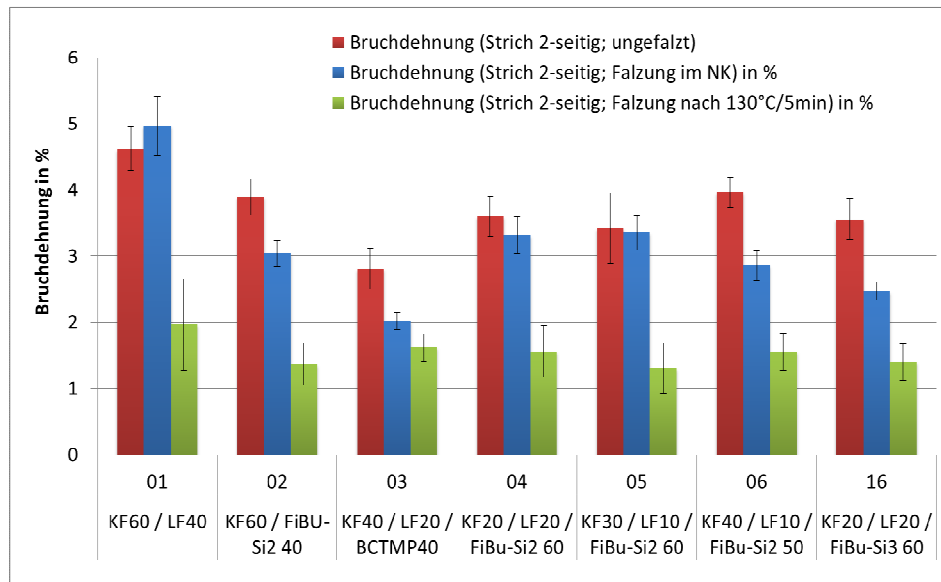


Abb. 9 Bruchdehnung nach Falzung

Durchreißwiderstand

Der Durchreißwiderstand ist die Kraft, die eine Probe dem Zerreißen aus der Papierebene heraus entgegengesetzt. Die mittlere Faserlänge war das bestimmende Kriterium für den Durchreißwiderstand der Papiere. Er war weitgehend unabhängig von der verwendeten Faserstoffart, wie die nahezu lineare Korrelation in Abb. 10 zeigt.

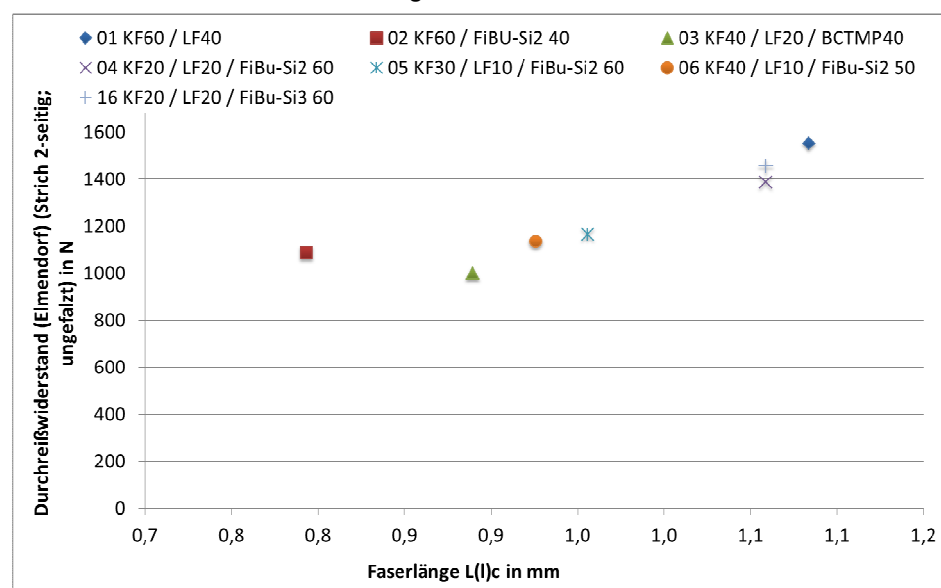


Abb. 10 Durchreißwiderstand der ungefalteten Rohpapiere

Spaltfestigkeit

Eine höhere Dichte bedingt eine bessere Faser-Faserbindung und somit eine Verbesserung der Spaltfestigkeit. Der Einfluss der Faserlänge auf die Spaltfestigkeit war gering. Entscheidend war ein ausreichender Faser-Faser-Kontakt innerhalb der Papierstruktur, was gleichbedeutend mit einem geringen Hohlraumanteil im Papier also einer hohen scheinbaren Dichte ist.

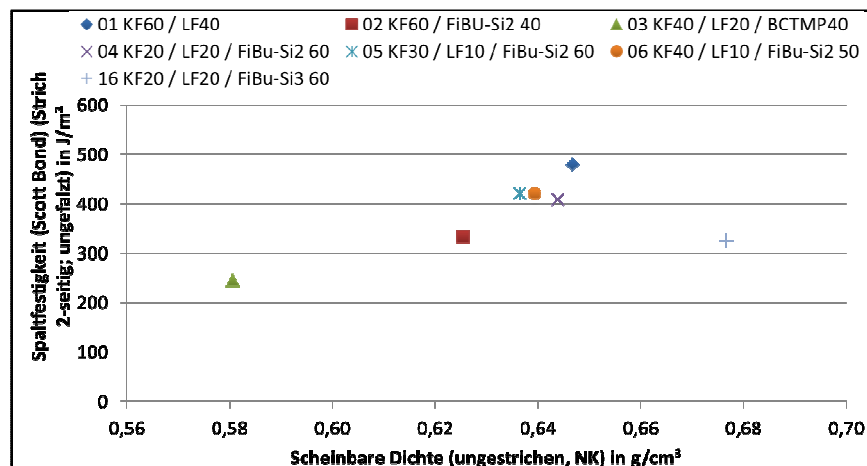


Abb. 11 Spaltfestigkeit

Insbesondere Volumen verleihende Faserstoffe wie der (ligninhaltige) BCTMP führten zu leichter zu spaltenden / delaminierenden Papieren. Inwieweit die Delaminierungsneigung Einfluss auf die Beschaffenheit des Falzes ausübte wurde nicht untersucht. Spielräume hinsichtlich der Faserstoffauswahl bei gleicher Spaltfestigkeit bestanden zwischen den Faserstoffmischungen 04, 05 und 06.

Biegesteifigkeit

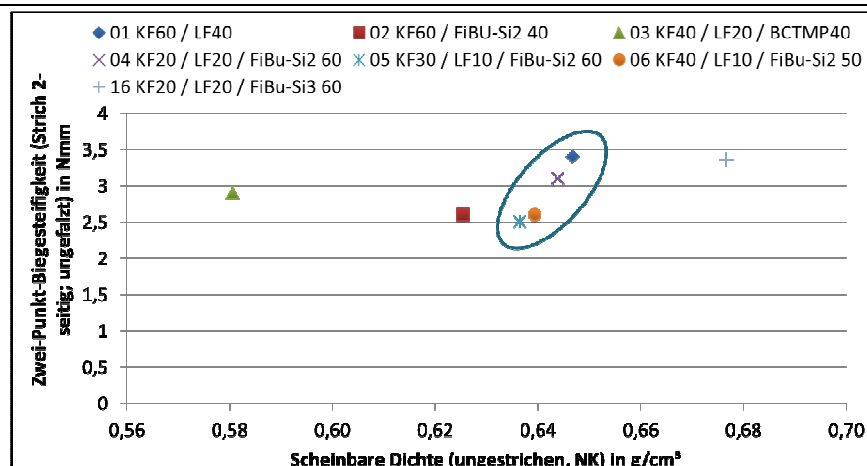


Abb. 12 Zwei-Punkt-Biegesteifigkeit

Die Referenzmischung wies die beste 2-Punkt Biegesteifigkeit auf. Durch den Vergleich der Mischungen 01, 04, 05 und 06 ist der Einfluss der Langfaser auf die Biegesteifigkeit zu erkennen. Je höher der Langfaseranteil war, desto höher war auch die Biegesteifigkeit.

Die Biegesteifigkeit S ergibt sich gemäß $S = E \cdot d^3$ aus dem E-Modul (aus der Zugprüfung) der Papiere und ihrer Dicke. Bei deutlich geringerer Dichte profitiert hiervon insbesondere das BCTMP-haltige Papier mit seiner hohen Dicke / geringen Dichte.

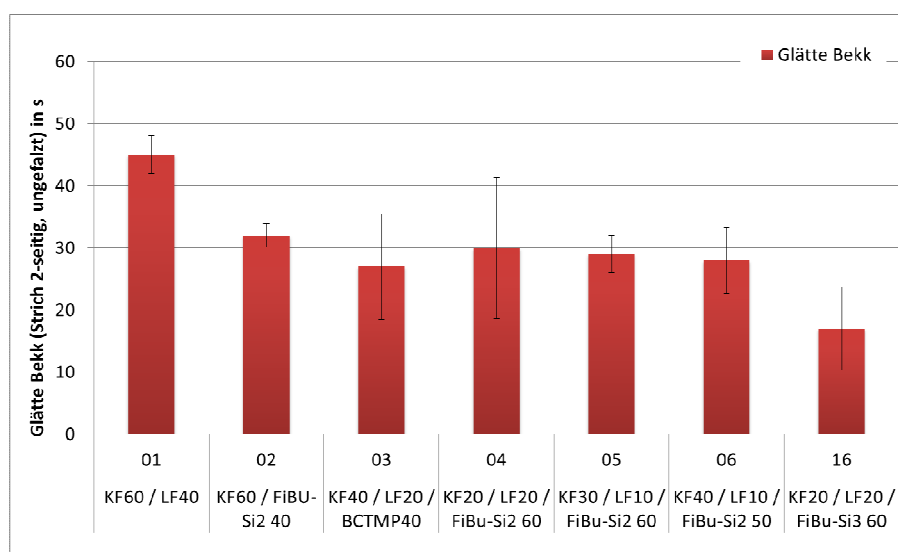
Glätte

Abb. 13 Glätte (Bekk)

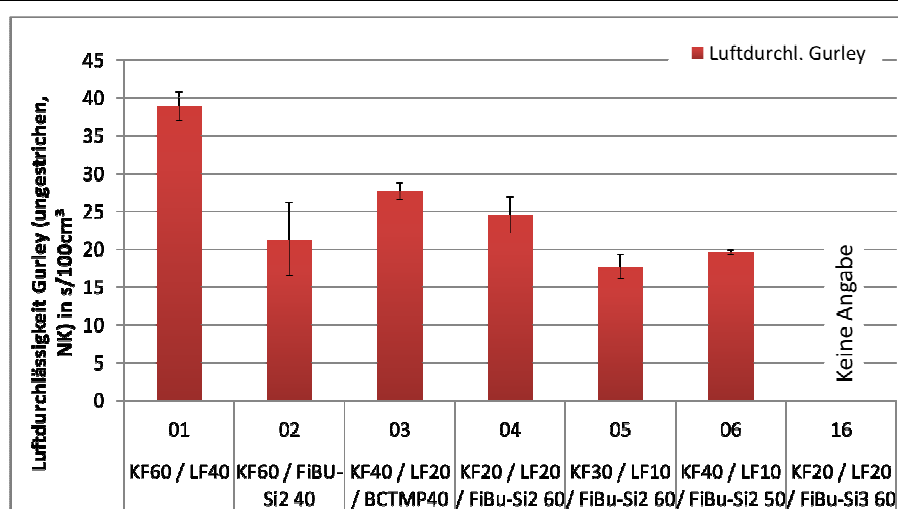
Luftdurchlässigkeit

Abb. 14 Luftdurchlässigkeit (Gurley)

6.4 Einfluss der Mahlung des Langfaserulfatzellstoffs (Laborblätter)**Bruchkraft nach Falzung vs. Mahlung (Normklima)**

Die Abb. 15 zeigt den Einfluss von spezifischer Energie und Kantenlast der Mahlung des Langfaserulfatzellstoffs sowie der Trocknung auf die Bruchkraft nach der Falzung der Laborblätter.

Als günstig für die Bruchkraft nach der Falzung erwies sich die Wahl einer geringer spezifischen Kantenlast der Mahlgarnitur. Mahlgarnituren mit einer geringeren spezifischen Kantenlast zeichnen sich durch eine höhere Gesamtkantenlänge der Mahlmesser aus. Hierdurch ist die pro Mahlereignis auf die Faser wirkende Energie geringer. Sie wird folglich tendenziell eher fibrilliert und weniger gekürzt.

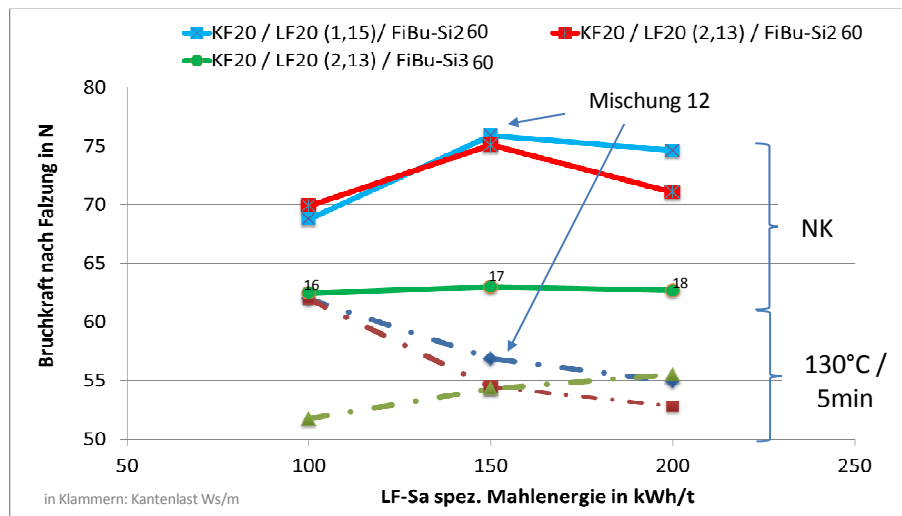


Abb. 15 Bruchkraft nach der Falzung in Abhängigkeit von Mahlung und Trocknung

Die Abb. 15 zeigt weiterhin sehr deutlich die Unterschiede zwischen den beiden integriert erzeugten Sulfitzellstoffen auf. Die stofflichen Unterschiede zwischen diesen beiden Faserstoffen äußerten sich anhand des Entwässerungswiderstandes, Unterschiede hinsichtlich Faserlänge und/oder Ladungseigenschaften wurden nicht festgestellt (vgl. Tab. 4).

Infolge der Mahlung durchlief die Bruchkraft nach Falzung ein Maximum. Für einige der dargestellten Kurven erkennt man diesen Maximadurchlauf direkt. Für andere zeigt sich ein fallender oder steigender Kurvenverlauf. Das heißt, das Maximum wurde bereits bei niedrigeren spezifischen Mahlenergien durchlaufen oder es wird erst bei höheren, als den untersuchten und dargestellten, Mahlenergien durchlaufen werden.

Durchreißwiderstand

Der Durchreißwiderstand war insbesondere von der Mahlkantenlast abhängig. Die Unterschiede zwischen FiBu-Si waren hier nur gering ausgeprägt.

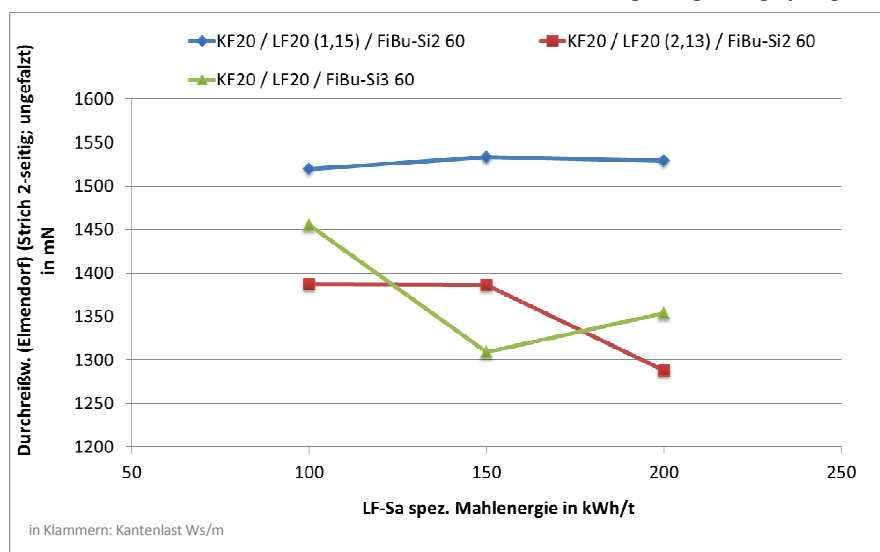


Abb. 16 Durchreißwiderstand in Abhängigkeit der Mahlung

Deutlich ist der positive Einfluss der geringen Mahlkantenlast (Vergleich grüne und blaue Kurve) auf den Durchreißwiderstand zu sehen.

Spaltfestigkeit und Biegesteifigkeit

Die Biegesteifigkeit und die Spaltfestigkeit der Papiere änderten sich infolge der Mahlung des Langfaserzellstoffes mit keinem eindeutigen Trend. Die durch die Mahlung hervorgerufene Verdichtung (Dickenreduktion) der Papiere wurde offenbar weitgehend von der eintretenden Erhöhung des E-Moduls kompensiert. Infolgedessen war durch die Mahlung nur bei geringen spezifischen Kantenlasten ein Anstieg der Biegesteifigkeit erzielbar.

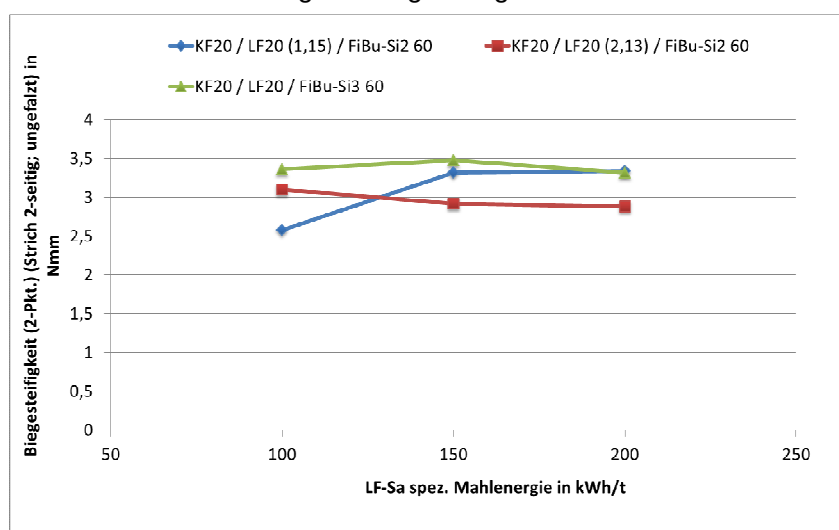


Abb. 17 Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Mahlung

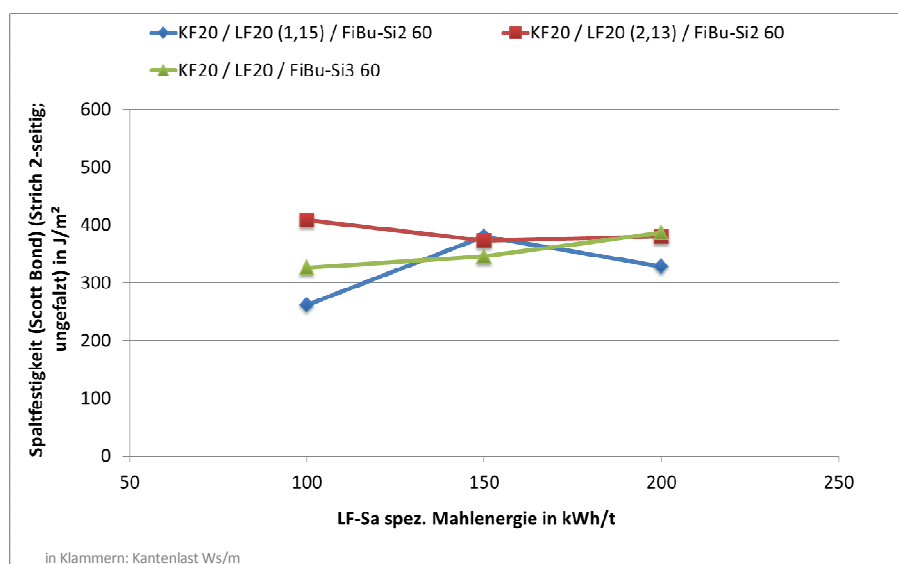


Abb. 18 Spaltfestigkeit in Abhängigkeit der Mahlung

6.5 Einfluss von Füllstoffgehalt und ausgewählten Additiven (kleintechnisch hergestellte Papiere)

Grundlegende Eigenschaften

Tab. 5 Grundlegende Eigenschaften der kleintechnisch hergestellten Papiere

Nr.	m_A [g/m ²]	Dicke [μm]	Scheinbare Dichte [g/cm ³]	Luftdurchlässigkeit Gurley [s/100cm ³]	Glätte Bekk OS [s]	Glätte Bekk SS [s]
21	121	183	0,66	6,1	1,2	5,2
22	118	207	0,57	5,2	1,0	5,6
23	120	191	0,63	7,4	0,8	5,4
24	120	189	0,63	7,9	0,8	5,0
25	128	195	0,65	8,9	1,0	4,2
31	197	246	0,80	57	3,0	2,4
32	195	255	0,76	54	1,2	3,8
33	189	217	0,87	152	3,8	3,4
34	186	221	0,84	113	4,4	2,4
35	191	229	0,83	175	5,2	5,8

Füllstoffgehalt und Bruchkraft nach Falzung

Wie die Abb. 19 veranschaulicht, war der Füllstoffgehalt die entscheidende Einflussgröße für die Bruchkraft und folglich auch für die Bruchkraft nach Falzung. Der Einfluss weitere festigkeitsrelevanter Einflüsse ist folglich nur möglich wenn die betreffenden Papiere entweder den gleichen Füllstoffgehalt ausweisen oder die Abhängigkeit zwischen Füllstoffgehalt und Festigkeit bekannt ist. Im vorliegenden Fall wurden die Papiere 31, 33 und 35 mit unterschiedlichen Füllstoffgehalten unter sonst gleichem Additiveinsatz (PCC, PEI) gefertigt. Die Ausgleichsgerade durch diese drei Punkte beschreibt demnach die Abhängigkeit der Bruchkraft nach Falzung von ihrem Füllstoffgehalt. Die Festigkeit kann für diesen Bereich interpoliert werden. Positive Abweichungen von Messpunkten von der Ausgleichsgeraden deuten auf eine bessere Festigkeit gegenüber den Papieren, die unter Einsatz von GCC und PEI gefertigt wurden, hin.

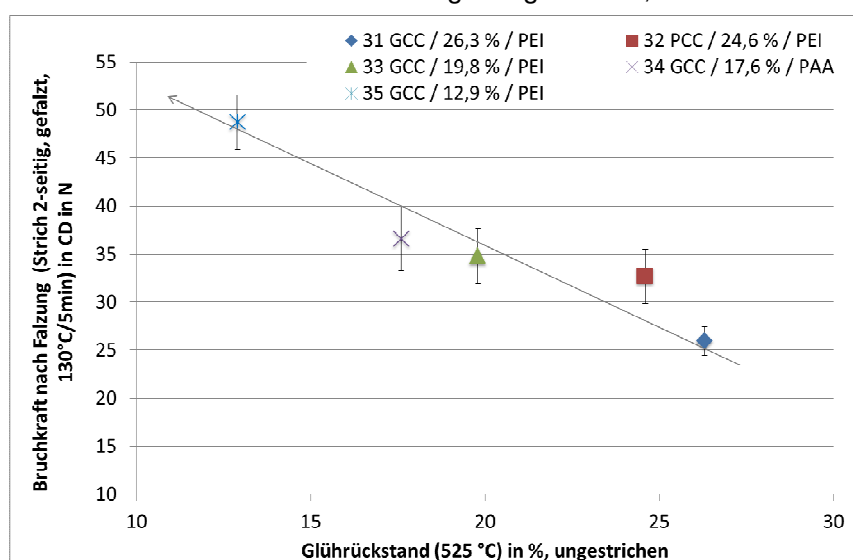


Abb. 19 Füllstoffgehalt und Bruchkraft nach Falzung der kleintechnisch hergestellten Papiere

Offenbar führte der Einsatz von gefälltem Calciumcarbonat im Versuch 32 (im Rahmen der dargestellten Genauigkeit von 1σ) bei gleichem Füllstoffgehalt zu einer höheren Bruchfestigkeit nach der Falzung als der Einsatz von natürlichem, gemahlenem Calciumcarbonat (GCC).

Für die Papiere, die unter Einsatz von 0,15% Polyethylenimin (PEI; 34) wurde hingegen eine geringere Festigkeit beobachtet als für die Papiere, die unter Einsatz von 0,015% Polyacrylamid (PAA) gefertigt wurden. Es handelte sich hierbei um praxistypische Additivdosierungen, eine Gleichdosierung der unterschiedlichen Additive wäre nicht zielführend gewesen.

Es ist zu beachten, dass die o.g. Aussagen jeweils auf einem Messpunkt basieren. Für eine Praxisumsetzung sind diese Ergebnisse geeignet zu verifizieren.

Füllstoffgehalt und Bruchkraftverlust infolge Falzung

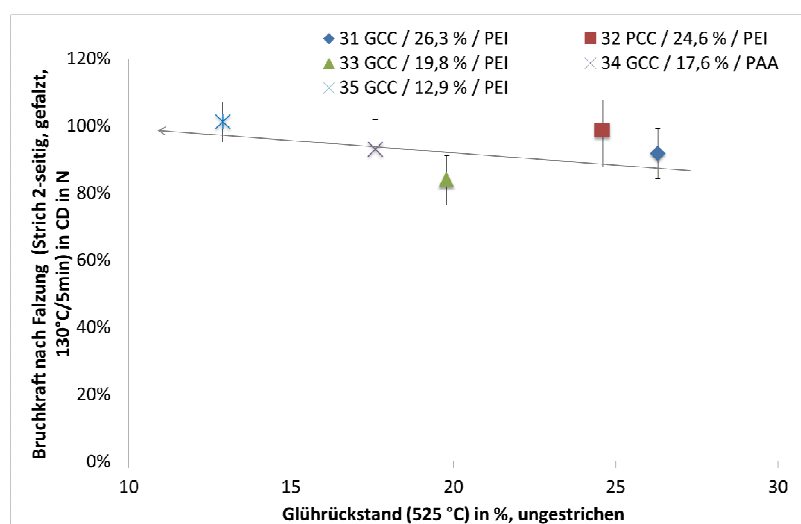


Abb. 20 Füllstoffgehalt und rel. Bruchkraft nach Falzung der kleintechnisch hergestellten Papiere

Weitere Festigkeitskennwerte

In analoger Weise zur Bruchkraft hängen auch der Durchreißwiderstand, die Biegesteifigkeit und die Spaltfestigkeit vom Füllstoffgehalt ab.

Für den Durchreißwiderstand und die Spaltfestigkeit wurde kein signifikanter Einfluss von dem Füllstofftyp beobachtet. Bei der Biegesteifigkeit führte PCC aufgrund seines Volumen steigernden Einflusses zu höheren Werten gegenüber GCC:

Für den Durchreißwiderstand und die Biegesteifigkeit wurde zudem kein signifikanter Einfluss vom Additivtyp beobachtet. PAA führte hingegen zu einer niedrigeren Gefügesteifigkeit (Spaltfestigkeit) gegenüber PEI.

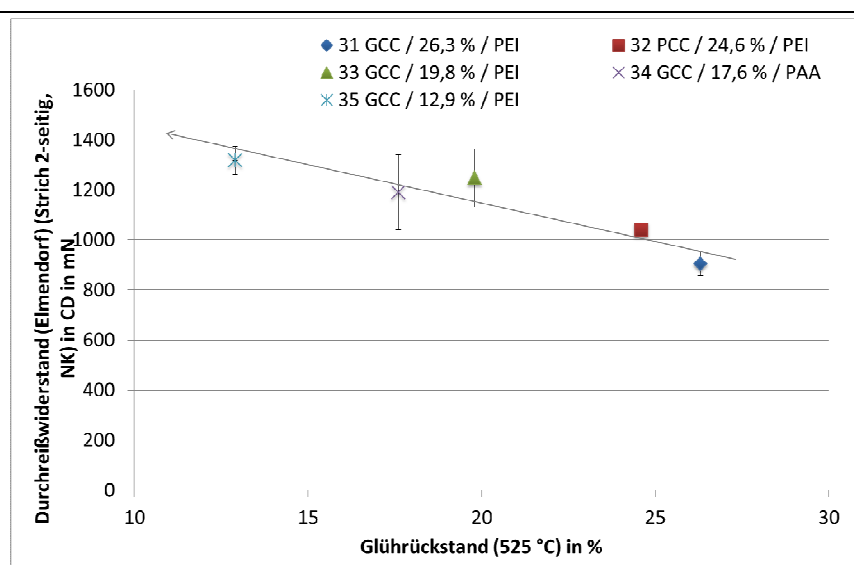


Abb. 21 Füllstoffgehalt und Durchreißwiderstand nach Falzung der kleintechnisch hergestellten Papiere

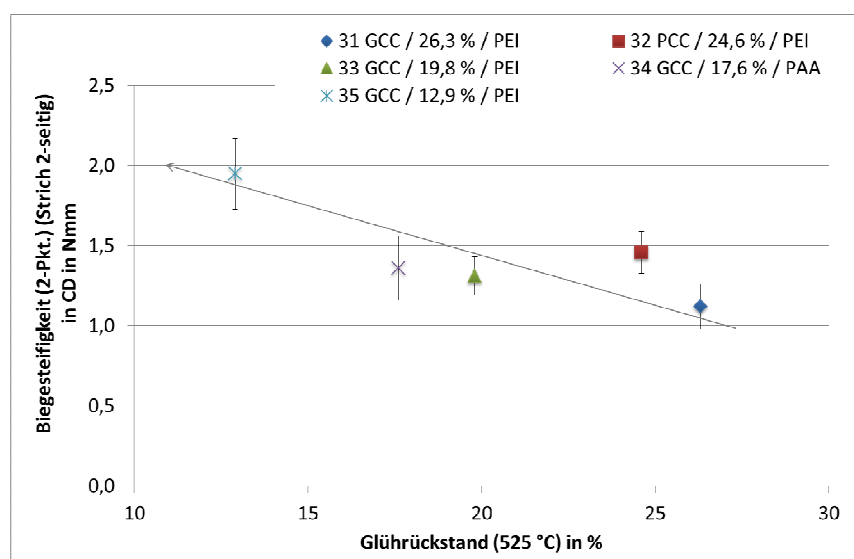


Abb. 22 Füllstoffgehalt und Biegesteifigkeit nach Falzung der kleintechnisch hergestellten Papiere

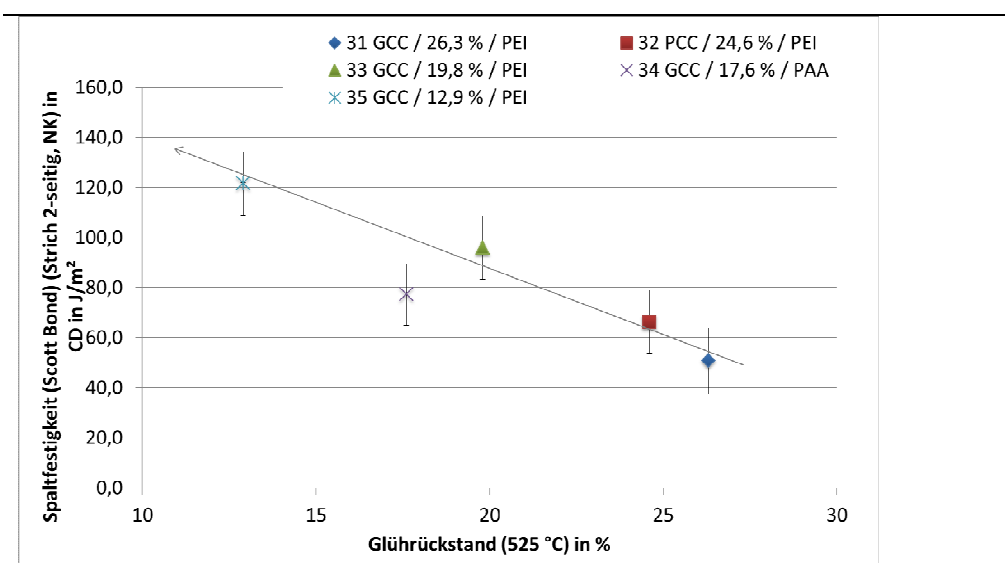


Abb. 23 Füllstoffgehalt und Spaltfestigkeit nach Falzung der kleintechnisch hergestellten Papiere

6.6 Mikroskopische Bewertung des Bruchfalzes an der Außenseite

REM Aufnahmen Vergleich Falzung

Durch die Übertrocknung der Papiere wird die Papierstruktur stark beschädigt. Für die Muster 01-06 sind im Folgenden REM Aufnahmen aufgeführt nach Falzung im Normklima bzw. im übertrockneten Zustand (105 °C / 30 min) in denen die Beschädigung durch die Trocknung deutlich wird.

01 KF60 / LF40

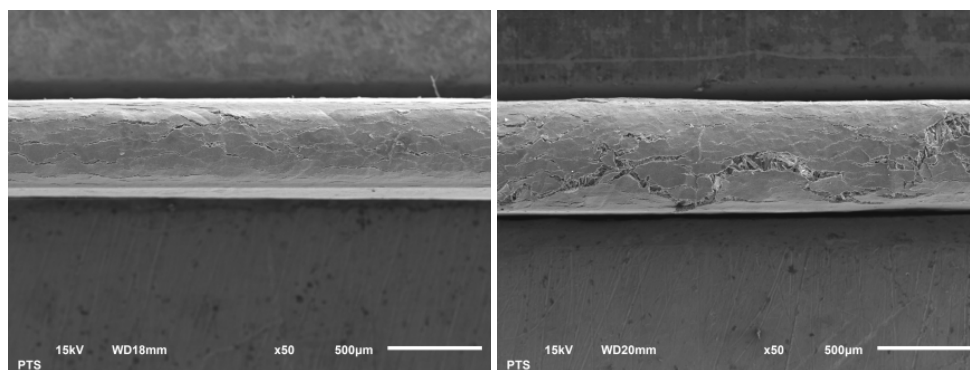


Abb. 24: Fasermischung 01
links Normklima, rechts übertrocknet (105 °C / 30 min)

02
KF60 / FiBu-Si2
40

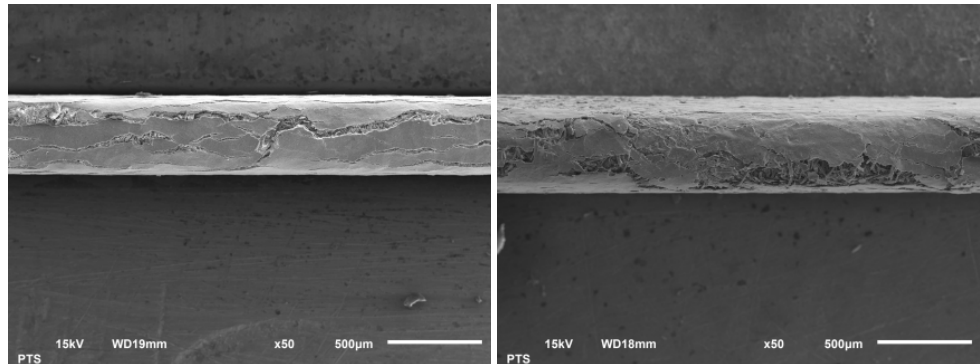


Abb. 25: Fasermischung 02
links Normklima, rechts übertrocknet (105 °C / 30 m in)

03
KF40 / LF20 /
BCTMP40

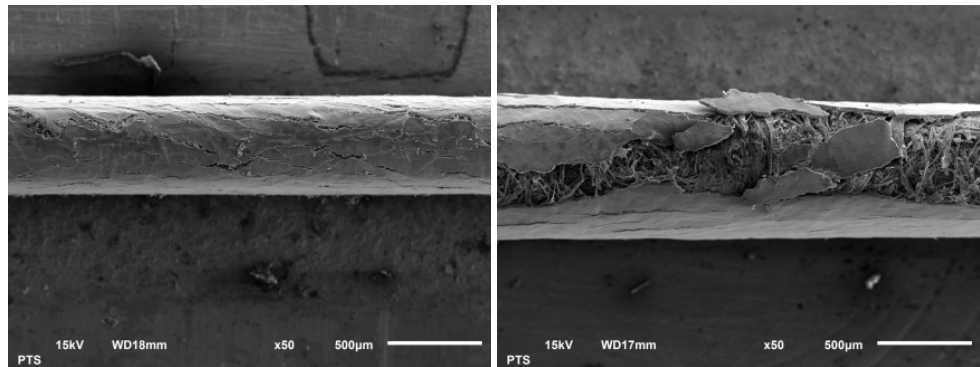


Abb. 26: Fasermischung 03
links Normklima, rechts übertrocknet (105 °C / 30 m in)

04
KF20 / LF20 /
FiBu-Si2 60

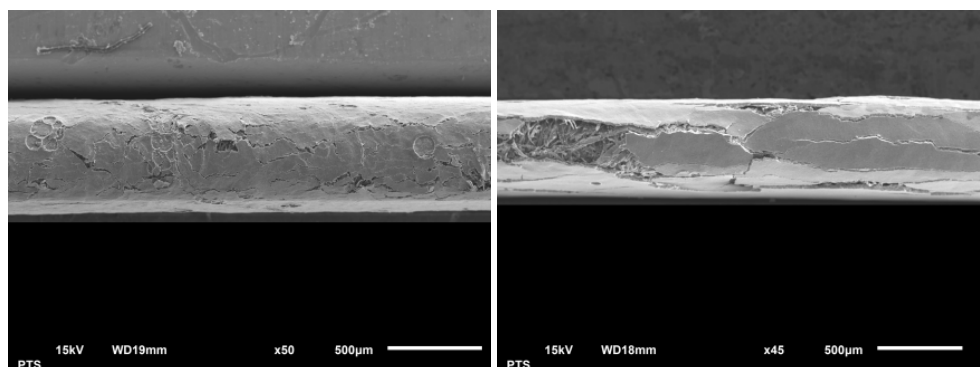


Abb. 27: Fasermischung 04
links Normklima, rechts übertrocknet (105 °C / 30 m in)

05
KF30 / LF10 /
FiBu-Si2 60

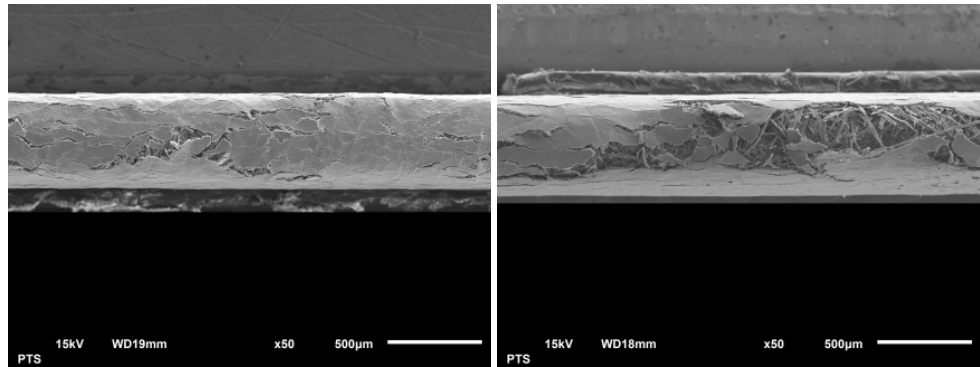


Abb. 28: Fasermischung 05
links Normklima, rechts übertrocknet (105 °C / 30 min)

06
KF40 / LF10 /
FiBu-Si2 50

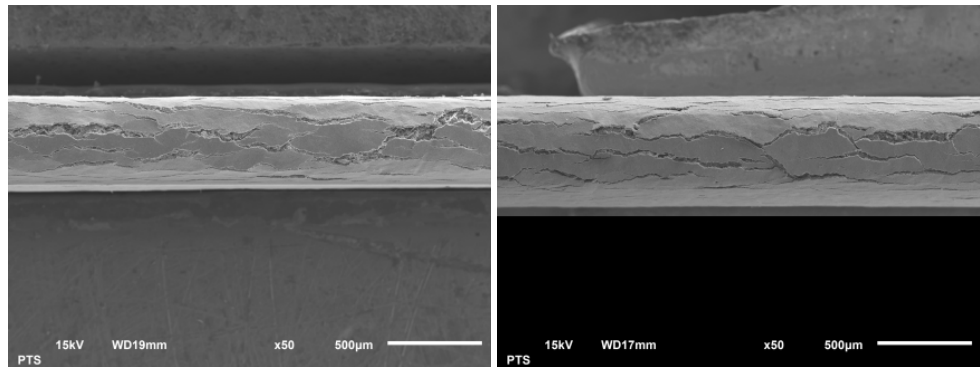


Abb. 29: Fasermischung 06
links Normklima, rechts übertrocknet (105 °C / 30 min)

7 Literaturverzeichnis

- [1] PAPIER, G. et al.: Betrachtung einiger Verarbeitungsprobleme hochwertiger gestrichener Offset-Druckpapiere aus der Sicht des Papierherstellers, *Wochenblatt für Papierfabrikation*, **2000**, 128 (19), 1314–1320.
- [2] Falzen und Rillen - *Verarbeitung von gestrichenen Papieren nach dem Bogenoffsetdruck* (Eds: Sappi Fine Paper Europe, K. Mertens), Alfeld, **2006**.
- [3] RUDAT, M., DÄHLING, D., BURKHART, H.: Der Restbruchwiderstand gestrichener Offsetpapiere: Eine Aufforderung an die Papierherstellung und Drucktechnik, *Wochenblatt für Papierfabrikation*, **1995**, 123 (11-12), 518–525.
- [4] METZ, R.: IGF 15630 - Reduzierung der Falzbruchneigung von Druckpapieren durch gezielte Vorbehandlung im Falzbereich, München, **2010**.
- [5] DÄHLING, P. H., GÜRTLER, A., KESSLER, H. J.: Zur Problematik des Falzbrechens von Papieren im Rollenoffset, *Wochenblatt für Papierfabrikation*, **1993**, 121 (19), 799–802.
- [6] PANTEL, G.: Gutachten und Beratungstätigkeit, fogra Jahresbericht 2004, München, **2004**.
- [7] BARBIER, C., LARSSON, P. L., ÖSTLUND, S.: Numerical investigation of folding of coated papers, *Composite structures*, **2005**, 67 (4), 383–394.
- [8] WEBER, P. G.: DITTRICH, K.: Erarbeiten von Maßnahmen zur Verminderung des Falzbrechens unter gegebenen Voraussetzungen in der Industrie- *Abschlussbericht INFOR-Projekt Nr. 59R*, **2005**.
- [9] GUYOT, C., BACQUET, G., SCHWOB, J. M.: Folding resistance of magazine papers, in *Tappi Proceedings, 1992 Coating Conference*, **1992**.
- [10] FALTER, K. A.: Brechen im Falz bei Rollenoffsetpapieren, *Das Papier*, **1990**, 44 (10A), V84-V91.
- [11] BARBIER, C., LARSSON, P., ÖSTLUND, S.: Experimental investigation of damage at folding of coated papers, *Issue No 1 Volume 17 2002*, **2002**, 17 (1).
- [12] YANG, A., XIE, Y., WANG, R.: From Theory to Practice: Improving the Foldcrack Resistance of Industrially Produced Triple Coated Paper, in *PaperCon 2011*, 1845-1876.
- [13] BARBIER, C., LARSSON, P. L., ÖSTLUND, S.: On dynamic effects at folding of coated papers, *Composite structures*, **2005**, 67 (4), 395–402.
- [14] COLLEY, J.: The crease cracking tendency of light-weight coated magazine papers - Part II. Factors affecting crease cracking tendency, *Appita Jounr*, **1982**, 35 (6), 299–302.
- [15] RÄTTÖ, P., HORNATOWSKA, J.: Coating The influence of coating colour composition on the crack area after creasing, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, **2010**, 25 (4), 488.
- [16] LEX, M., TAMMS, O.: Primäre Kaoline-ein breites Einsatzgebiet, *Wochenblatt für Papierfabrikation*, **2002**, 130 (7), 420–424.
- [17] FIEDLER, M. et al.: IGF 14811 - Deckung des Kurzfaserbedarfs in Spezialpapieren durch alternative Laubholzzellstoffe, Heidenau, **2008**.
- [18] ANDRES, P.: FNR 505 - Optimierung des Stärkeeinsatzes im Strich von Offsetpapieren zur Vermeidung von Brechen im Falz, München, **2010**.

- [19] WÄGBERG, L.; ÖDBERG, L.: Polymer adsorption on cellulosic fibres, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, **1998**, 4(2), 135-140
- [20] FEYRER, S.: Falzbruchverhalten von Grafischen Papieren, Bachelorarbeit, Hochschule der Medien, Stuttgart, April 2012