



Daniel Mandlez, BSc

Fraktionierte Mahlung zur Optimierung der Papiereigenschaften und des Energieverbrauches

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Verfahrenstechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Rene Eckhart

Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik

Graz, Juli 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Die Technik von heute ist das Brot von
morgen - die Wissenschaft von heute ist
die Technik von morgen.

RICHARD VON WEIZSÄCKER (1920-2015)
Bundespräsident der BRD (1984-94)

Danksagung

Der Weg zu diesem Punkt konnte nicht im Alleingang bewältigt werden. Aus diesem Grund möchte ich all jenen danken, die mich auf dem Weg durch das Studium und dieser Masterarbeit unterstützt haben.

An erster Stelle möchte ich meiner großen Liebe Eva dafür danken, dass sie mich wenn es notwendig war, antrieb in meinem Studium voran zu kommen und während des gesamten Studiums an meiner Seite stand und hoffentlich weiter, während aller guten aber auch schlechten Zeiten, an meiner Seite stehen wird.

Dabei möchte ich mich vorweg bei Prof. Dr. Ulrich Hirn bedanken, der mich vor nun schon vier Jahren an das Institut für Papier- Zellstoff- und Fasertechnik geholt hat um als studentischer Projektmitarbeiter mit zu wirken. Durch die Arbeit am Institut wurde mir der Abschluss meines Studiums erst ermöglicht, wofür ich auch dem Institutsleiter Prof. Dr. Wolfgang Bauer meinen Dank aussprechen möchte.

Weiters möchte ich Dr. Rene Eckhart und Dr. Rafael Giner Tovar für die Möglichkeit zur- und Unterstützung bei dieser Masterarbeit danken.

Während der Arbeit tauchten immer wieder Probleme auf, die es zu lösen galt. Dabei konnte ich stets auf die Unterstützung von Heidi, Bianca, Irmi, Manu, Kerstin, Harry und Christian aus den Bereichen Labor und Werkstatt zählen, wofür ich mich recht herzlich bedanken möchte.

Auch in organisatorischen Problemen war Unterstützung von großer Bedeutung und stets allgegenwärtig. Dafür möchte ich im Sekretariat bei Claudia und Kerstin ein ganz liebes Danke sagen.

So viele Namen stehen nun hier nicht geschrieben, dennoch bin ich jedem vom Institut der mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist zu größtem Dank verpflichtet.

„Last but not least ...“ —alle die dabei waren, wird diese Phrase zum Schmunzeln bringen— möchte ich noch meinen lieben Freunden vom und und rund um den APV Activitas Graz für den tollen Zusammenhalt und für die gegenseitige Unterstützung danken.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Untersuchung der fraktionierten Mahlung hinsichtlich der Papiereigenschaften, sowie der Reduktion des Energiebedarfs. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Parametern Reißlänge, Blattichte und Luftdurchlässigkeit.

Untersucht werden drei Zellstoffe: ein ungebleichter und ein gebleichter Langfaser Sulfatzellstoff, sowie ein Sulfitzellstoff. Diese werden mit einem Labordrucksortierer über ein 1,2 mm Lochsieb in unterschiedliche Massenverhältnisse aufgetrennt. Die groben Fraktionen werden in einer PFI Mühle gemahlen, die feine ungemahlene Fraktion wird nachfolgend wieder zugemischt und der Faserstoff evaluiert.

Der ungebleichte Kraftzellstoff ($\kappa \sim 45$) zeigt erhöhte Reißlänge bei gegebener Luftdurchlässigkeit und gleichzeitiger Energieeinsparung für ein Fraktionsverhältnis von 70/30, da nur 70 % des Stoffes gemahlen werden muss. Für den gebleichten Langfasersulfat und den Sulfitzellstoff konnten keine signifikanten Verbesserungen erreicht werden.

Weiterführende Versuche zeigen, dass das Verhältnis zwischen Reißlänge und Porosität bzw. Reißlänge und Blattichte einen Faserstoffabhängigen linearen Zusammenhang aufweist. Je nach Faserstoff und gegebener Steifigkeit bzw. Flexibilität der groben Fraktion erlaubt der Ansatz der Fraktionierung einen gewissen Handlungsspielraum in diesen Eigenschaften, der Effekt ist jedoch durch die intrinsischen Eigenschaften des Faserstoffes limitiert.

Abstract

The target of this master thesis is the investigation of fractionated refining regarding paper properties, as well as reduction of the energy consumption. The main focus is set on breaking length, density and air permeability.

Three pulps are investigated: unbleached und bleached softwood kraft pulp, as well as bleached sulfite pulp. These are separated in different mass fractions, by use of a laboratory pressure screen equipped with a 1,2 *mm* hole screen. The coarse fraction is beaten in a PFI mill, afterwards the fine fraction is added again and the blended pulp is evaluated.

The mass fraction of 70/30 of the unbleached kraft pulp ($\kappa \sim 45$) shows higher breaking length at a given air permeability and inherent energy savings, because only 70 % of the pulp have to be refined. For the bleached softwood kraft and the bleached sulfite pulp no significant improvements are evident.

Further trials shows, that the relationship between breaking length and porosity respectively breaking length and density show a pulp dependent linear correlation. Depending on the pulp and given stiffness respectively flexibility of the coarse fraction the approach of fractionated refining allows a certain scope of action within this properties, but the effect is limited by intrinsic properties of the pulp material.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Überblick	1
2	Theorie	3
2.1	Faserstoffe	3
2.1.1	Aufbau eines Baumstammes	3
2.1.2	Fasertypen	4
2.1.3	Zellwandaufbau der Faser	5
2.1.4	Chemische Zusammensetzung der Faser	6
2.1.5	Aufschlussverfahren	6
2.2	Morphologie	9
2.2.1	Definition von Feinstoffen	9
2.2.2	Arten von Feinstoffen	9
2.3	Faserstoffmahlung	10
2.3.1	Auswirkungen der Mahlung	11
2.3.2	Mahlaggregate	15
2.3.3	Spezifischer Energieverbrauch	16
2.3.4	Fraktionierte Mahlung	18
2.4	Fraktionierung	20
2.4.1	Klassierung als Trennprozess	20
2.4.2	Labor Faserstoffklassierer	22
2.4.3	Industrieller Faserstoffklassierer	22
3	Materialien und Methoden	26

3.1	Probenmaterial	26
3.2	Versuchskonfigurationen	26
3.2.1	Fraktionierte Mahlung	27
3.2.2	Vergleich separat verarbeiteter grober und feiner Fraktion	28
3.2.3	Erstellung hochporöser Blätter	28
3.3	Prozessschritte	29
3.3.1	Desintegration vor der Fraktionierung	29
3.3.2	Fraktionierung	29
3.3.3	Stoffeindickung nach der Fraktionierung	31
3.3.4	Mahlung mittels PFI-Mühle	32
3.3.5	Mischung	32
3.4	Zellstoffprüfung	32
3.4.1	Stoffdichte und Trockengehalt	32
3.4.2	Faserlängenverteilung	32
3.4.3	Mahlgrad	34
3.5	Laborblattherstellung	35
3.6	Papierprüfung	35
3.6.1	Flächenbezogene Masse	35
3.6.2	Dicke	35
3.6.3	Dichte	36
3.6.4	Luftdurchlässigkeit nach Gurley	36
3.6.5	Reißlänge	36
4	Ergebnisse	37
4.1	Fraktionierte Mahlung	37
4.1.1	Ungebleichter Langfaser Sulfat Zellstoff (UBSK)	37
4.1.2	Gebleichter Langfaser Sulfat Zellstoff (BSK)	43
4.1.3	Gebleichter Sulfit Mischzellstoff (ECO)	47
4.1.4	Fazit	52
4.2	Vergleich separat verarbeiteter grober und feiner Fraktion	54
4.3	Herstellung hoch poröser Blätter	58

5 Zusammenfassung	62
Abbildungsverzeichnis	66
Tabellenverzeichnis	66
Abkürzungsverzeichnis	67
Literaturverzeichnis	68

Einleitung

1.1 Motivation

Oftmals vernommene Schlagworte der heutigen Zeit sind Qualitätssteigerung und Umweltschutz. Das Streben geht in Richtung Effizienzsteigerung der Anlagen um weniger Emissionen zu erzeugen und den Energieverbrauch zu senken, dabei aber die Qualität der Erzeugnisse immer weiter zu steigern, um am Markt konkurrenzfähig zu bleiben. Dazu gehört auch die Innovation hinsichtlich der Aufwertung von Nebenerzeugnissen.

Das Forschungsprojekt Flippr^o nimmt sich dieser Themen für den Bereich der Papier- und Zellstofftechnik an. Ein Teil des Projektes beschäftigt sich mit der physikalischen Modifikation des Faserstoffes. Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen dieses Projektes und der assoziierten Dissertation von RAFAEL GINER TOVAR [1] durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wird die fraktionierte Mahlung als Option für die Optimierung untersucht. Dabei sollen einerseits bessere Produkteigenschaften erzielt werden. Andererseits soll durch diesen Ansatz auch der hohe Energieverbrauch der Mahlung gesenkt werden.

1.2 Überblick

Der in dieser Masterarbeit angewandte Ansatz besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird ein Faserstoff in zwei Fraktionen geteilt und anschließend im zweiten Schritt gemahlen. Beide Vorgänge haben eine starke Abhängigkeit von der Beschaffenheit des eingesetzten Faserstoffes. Um ein Verständnis für das verwendete Material zu erhalten, werden im

nachfolgenden Thorierteil die unterschiedlichen Fasertypen besprochen. Diese unterscheiden sich je nach Holzart und Aufschlussverfahren in ihrer Form und ihren Eigenschaften. Neben den Fasern beinhaltet der Stoff auch Feinstoffe, die sich in Gestalt und Zusammensetzung unterscheiden, je nachdem wo im Prozess sie angefallen sind. Diese Feinstoffe haben wesentlichen Einfluss auf den Verarbeitungsprozess und das Endprodukt.

Der zweite Teil des Literaturkapitels (Kapitel 2) beschäftigt sich mit den Verarbeitungsprozessen Mahlung und Fraktionierung. Dabei werden die Vorgänge bei der Mahlung erläutert und die dadurch erzielbaren Stoff- und Papiereigenschaften aufgezeigt. Im Anschluss werden die Möglichkeiten der Fraktionierung diskutiert.

Im Zuge der Literaturlaufbereitung wird gezeigt, dass das Thema der fraktionierten Mahlung keine völlig neue Idee ist. Die Teilung der Faserstoffsuspension vor der Mahlung in zwei Fraktionen wurde bereits in den neunziger Jahren untersucht. Im Laufe der Jahre wurden Untersuchungen an Holzstoffen, Kurzfasernstoffzellen und zum Teil auch an Langfasernstoffzellen durchgeführt. Ähnlich dem in der Literatur gewählten Ansatz wird in dieser Arbeit spezifisch auf drei Faserrohstoffe eingegangen. Es sind dies ein ungebleichter und ein gebleichter Sulfatlangfasernstoff sowie ein gebleichter Sulfatzellstoff.

Im Kapitel 3 werden die durchgeführten Arbeiten beschrieben. Dazu zählen die Fraktionierung mit dem Labordrucksortierer am Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnologie (IPZ) an der Technischen Universität Graz sowie auch alle Vorbereitungs- und Weiterverarbeitungsschritte. Zudem werden die im Zuge dieser Arbeit angewandten Analyseverfahren besprochen.

Die aus den Versuchsreihen erhaltenen Erkenntnisse werden in Kapitel 4 ausführlich diskutiert und in der anschließenden Zusammenfassung übersichtlich dargestellt.

Theorie

2.1 Faserstoffe

Faserstoff ist das Grundmaterial der Papiererzeugung, wobei man dabei hauptsächlich von Fasern pflanzlicher Herkunft und weniger von synthetischen oder mineralischen Faserstoffen spricht. Diese pflanzlichen Faserstoffe werden vorwiegend aus Holz bzw. in gewissen Regionen auch aus Einjahrespflanzen gewonnen und als Primärfaserstoffe bezeichnet. Dabei unterscheidet man weiter chemisch aufgeschlossenen Zellstoff und mechanisch zerfaserten Holzstoff. Erzeugnisse aus Faserstoffen sind recyclebar und bilden damit die sekundären Faserstoffe. [2]

2.1.1 Aufbau eines Baumstammes

Wie bereits erwähnt wird der größte Teil an primären Faserstoffen aus Holz gewonnen. Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau eines Holzstammes, welcher sich in die drei Hauptbereiche Rinde (1), Kambium (2) und Holz (3) gliedern lässt. [2]

Rinde

Die Rinde unterteilt sich in Borke, welche die äußere Rinde bildet und dem inneren Teil der Rinde, dem Bast. Die primäre Zweck der Borke ist es den Baum vor äußeren Einwirkungen zu schützen. Der Bast ist eine sehr dünne und kurzlebige Schicht, welche die Versorgungsaufgabe im Baum erfüllt. Wenn der Bast abstirbt wird er, nach Wandlung zu Kork, Teil

der Borke. Die Rinde wird für die Faserstoffherzeugung nicht herangezogen, da sie einen sehr hohen Extraktstoffanteil aufweist, welcher in der Verarbeitung zu großen Problemen führen würde. [2, 3]

Kambium

Der relativ schmale Bereich zwischen Holz und Rinde ist der lebende Teil eines Baumstammes und wird als Kambium bezeichnet. Diese Schicht bedingt das Wachstum des Baumes. Nach außen hin wird neuer Bast und nach innen hin neues Holz gebildet. Für dieses Zellwachstum sind Auxine (Hormone) verantwortlich, welche in den Blattknospen gebildet werden. Am Kambium setzt die Entrindung an, da diese Schicht noch unverholzt und weich ist. [2]

Holz

Im Inneren des Stammes befindet sich das Kernholz. Dieser Teil des Baumes ist als tot anzusehen. Dennoch spielt das Netzwerk der mit Lignin umgebenen harten Fasern eine wesentliche Rolle bezüglich der Stabilität des Baumes. Der Teil zwischen Kernholz und Kambium wird als Splintholz bezeichnet und bildet den lebendigen Teil des Holzes. Im Bereich des Splintholzes erfolgt die Wasserversorgung bis in die Baumkrone. Das absterbende Splintholz bildet das Kernholz. [2]

2.1.2 Fasertypen

Das Holz macht den größten Teil des Stammes aus, das die für die Papierherzeugung notwendigen Fasern beinhaltet. Im Holz befinden sich verschiedene Gewebe, die eine bestimmte Funktion erfüllen. Zu diesen Funktionen gehören einerseits Leiten und Speichern von Nährstoffen und Wasser und andererseits die Erzeugung von Festigkeit. Diese Aufgaben werden in Nadelhölzern (Softwood) und Laubhölzern (Hardwood) unterschiedlich realisiert.

Nadelholz

Das Holz der Nadelbäume besteht aus Tracheiden, Holz- und Markstrahlparenchymzellen. Die Tracheiden machen den größten Teil des Nadelholzes aus. Abbildung 2.2 zeigt die

Frühjahrstracheiden (a) und die Sommertracheiden (b) im Vergleich zu den Libriformfasern (c) der Laubhölzer. Die Frühholztracheiden dienen vorwiegend zum Wassertransport, während die Spätholztracheiden eine Festigkeitsfunktion erfüllen und aus diesem Grund auch einen geringeren Durchmesser aufweisen, wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist. Die Parenchymzellen dienen vorwiegend zur Speicherung. Die Tracheiden machen ca. 90% der Substanz von Nadelhölzern aus. Sie weisen eine Länge von 1,4..6 mm und einen Durchmesser von 20..50 μm auf und werden aufgrund dieser Dimensionen als Langfasern bezeichnet. [2, 3]

Laubholz

Für die Festigkeit der Laubhölzer sind die Libriformzellen verantwortlich. Sie weisen Dimensionen von 0,4..1,6 mm Länge und Durchmesser von 10..40 μm auf. Da diese Fasern deutlich kürzer sind als die Fasern der Nadelhölzer werden sie als Kurzfasern bezeichnet. Diese Fasern sind der für die Papiererzeugung relevante Teil der Laubhölzer. Daneben existieren jedoch noch Zelltypen wie Gefäßzellen (Tracheen), die für Transport zuständig sind, sowie Holz- und Markstrahlparenchymzellen, deren Aufgabe vorwiegend in der Speicherung liegt. Die Tracheen weisen sehr große Durchmesser bis hin zu 300 μm auf und sind daher für die Papiererzeugung sehr störend, wenn man bedenkt, dass ein normales Blatt Kopierpapier nur eine Dicke von ca. 100 μm aufweist. [2, 3]

2.1.3 Zellwandaufbau der Faser

Betrachtet man eine einzelne Faser so sieht man, dass sie in mehreren Schichten um das hohle Lumen herum aufgebaut ist (Abbildung 2.3). Die äußerste Schicht wird Primärwand (P) genannt und ist im Gegensatz zur inneren Sekundärwand sehr dünn. Die Sekundärwand besteht in sich ebenfalls aus drei Schichten (S1–S3), wobei die S3 Schicht oftmals auch als Tertiärwand (T) bezeichnet wird. Die Zellwände bestehen aus Microfibrillen, welche unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Da die S2 Wand die größte Wandstärke besitzt, ist die Orientierung der Microfibrillen in dieser Schicht am bedeutensten. Die Orientierung ist in diesem Fall sehr stark längs der Faser gerichtet, was durch den Winkel θ in Abbildung 2.3 gezeigt wird. Diese Ausrichtung ist ausschlaggebend für die Richtung der Faserquellung und die physikalischen Eigenschaften der Faser. Die einzelnen Fasern werden durch die Mittellamelle (ML) zusammen gehalten. [2–5]

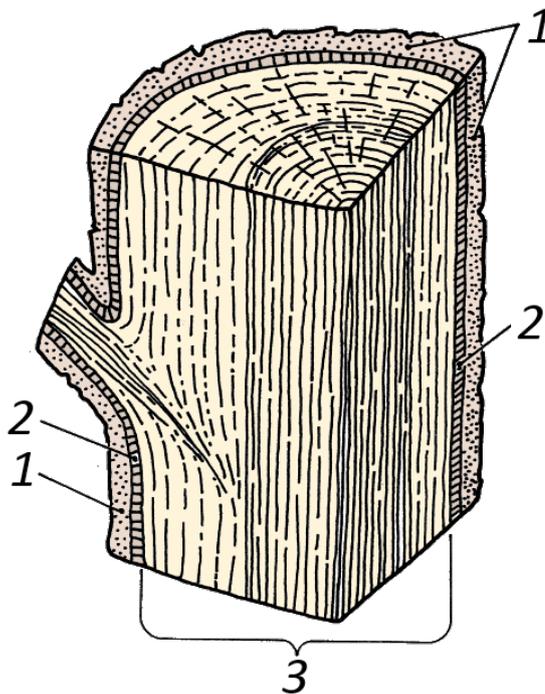


Abbildung 2.1 Allgemeiner Holzaufbau
(1) Rinde, (2) Kambium, (3) Holz
adaptiert aus [2]

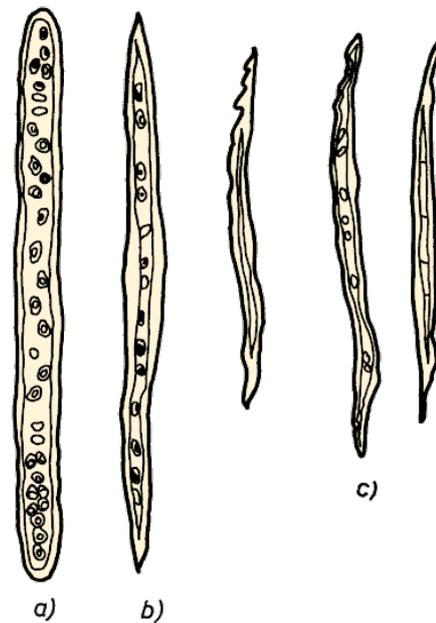


Abbildung 2.2 Faserformen
a) Frühjahrstracheiden, b) Sommertracheiden, c)
Libriformfasern
adaptiert aus [2]

2.1.4 Chemische Zusammensetzung der Faser

Das Fasermaterial besteht aus verschiedenen chemischen Komponenten, deren Zusammensetzung sich über die den Faserquerschnitt hin ändert. Die Hauptbestandteile sind Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Abbildung 2.4 zeigt, dass die Mittellamelle vorwiegend aus Lignin besteht. Da die Primärwand sehr dünn ist spielt sie keine wesentliche Rolle. Die Sekundärwand besteht zu größtem Teil aus Cellulose und Hemicellulose. Neben diesen Hauptbestandteilen liegen in geringen Mengen jedoch auch Extraktstoffe, Harze, Fette und Wachse in der Faser vor. [2, 3, 5]

2.1.5 Aufschlussverfahren

Im vorigen Abschnitt 2.1.2 wurde der Aufbau und die Zusammensetzung der für die Papierindustrie relevanten Fasern beschrieben. Zudem wurde auch gezeigt, dass diese Fasern über die ligninhaltige Mittellamelle zusammengehalten werden. Nun werden Verfahren benötigt um diese Fasern aus dem Netzwerk zu lösen. Dazu gibt es übergeordnet zwei mögliche Verfahren. Einerseits besteht die Möglichkeit der mechanischen Zerkleinerung und andererseits die Möglichkeit des chemischen Aufschlusses.

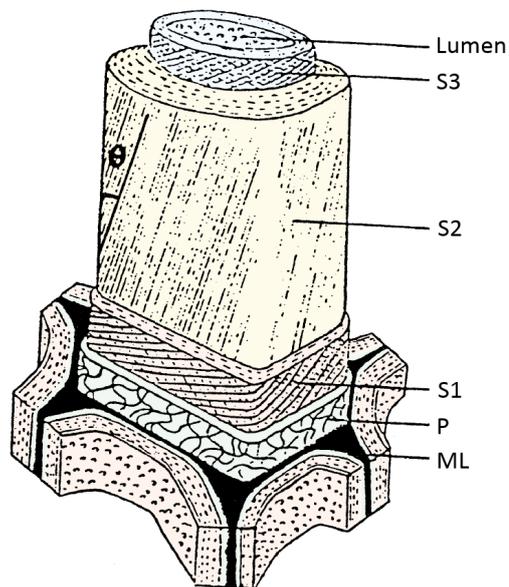


Abbildung 2.3 Faseraufbau am Beispiel einer Nadelholzfaser adaptiert aus [6]

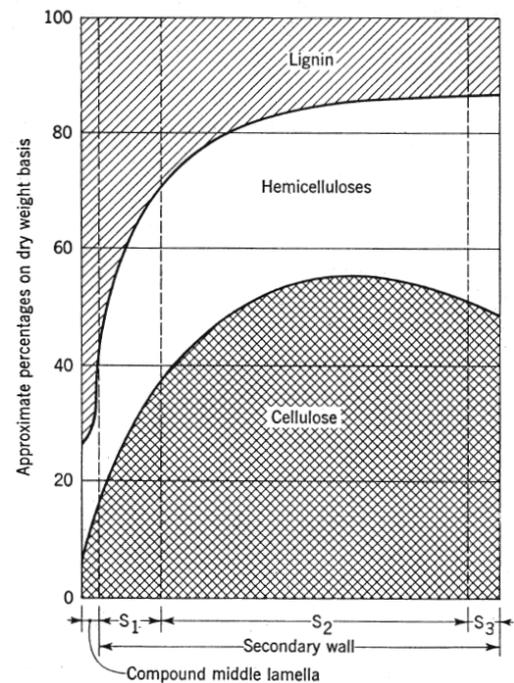


Abbildung 2.4 Chemische Zusammensetzung über den Faserquerschnitt [6]

Mechanische Zerkleinerung

Die mechanische Zerkleinerung von Holz wurde von FRIEDRICH GOTTLIEB KELLER und CHARLES FENTERY im Jahre 1843 erfunden. KELLER beobachtete Wespen, die für den Nestbau feines Holzmehl mit ihrem Speichel vermengten. Diese Beobachtung inspirierte ihn dazu, Holz als Rohstoff für Papier zu verwenden. Er erzeugte seinen ersten Holzschliff (groundwood pulp) indem er ein Stück Holz mit einem feuchten rotierenden Schleifstein bearbeitete. [7]

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird auch heute noch Holzschliff (Stone Groundwood (SGW) und Pressure Groundwood (PGW)) hergestellt. Neben den Schliffverfahren wurden noch die Holzstoffverfahren eingeführt, wobei Hackschnitzel mittels Refinern zerkleinert werden. Je nach Einsatz von bloßer mechanischer Energie oder thermischer und chemischer Einwirkungen unterscheidet man zwischen Refiner Mechanical Pulp (RMP), Thermo Mechanical Pulp (TMP) und Chemo-(Thermo) Mechanical Pulp (C(T)MP).[2, 7]

Chemischer Aufschluss

Im Gegensatz zu den mechanischen Verfahren, bei denen man maximal eine Erweichung des Lignins hervorruft, wird beim chemischen Aufschluss das Lignin mit einer sogenannten Kochlauge in Lösung gebracht und dadurch entfernt. Je nach verwendeten Chemikalien unterscheidet man zwischen Sulfit- und Sulfatverfahren. Der aus diesen Verfahren gewonnene Faserstoff wird als Zellstoff bezeichnet. [2, 5, 8]

Da in dieser Arbeit nur chemisch aufgeschlossene Zellstoffe zum Einsatz kommen wird nun etwas genauer auf die Unterschiede der aus den beiden Verfahren gewonnenen Zellstoffe eingegangen.

Sulfitverfahren: Das Verfahren kommt aus dem Jahr 1867, in dem von B. C. TILGHAM ein Patent zur Zellstoffherstellung angemeldet wurde. Der Prozess wird nach dem für den Aufschluss zuständigen Sulfit SO_3^{-2} benannt. Die Aufgabe des Sulfitions ist es, die komplexe Struktur des Lignins aufzubrechen und so in eine hydrophilere Form zu überführen. Die Gefahr bei zu geringer SO_3^{-2} -Konzentration ist die Rekondensation des Lignins. Diesen Fall nennt man Schwarzkochung und führt zu dem Problem, dass Ligninverbindungen gebildet werden, welche nicht mehr lösbar sind. [2, 5, 8]

Der Aufschluss erfolgt direkt an der Mittellamelle, wodurch ein sehr hoher Anteil an Lignin entfernt wird. Dabei wird jedoch die Primärwand stark angegriffen und kann dadurch im Kochprozess vollständig entfernt werden. Sulfitzellstoff zeichnet sich aus durch gute Bleichbarkeit, hohe Ausbeute und geringe Mahlresistenz. Die geringere Mahlresistenz wird jedoch durch das spröde Verhalten der Faser und geringere Einzelfaserfestigkeiten begründet.[2, 5, 8]

Sulfatverfahren: Entwickelt wurde das Sulfatverfahren schon in den Jahren zwischen 1879 und 1884 von C.F. DAHL, es konnte sich jedoch erst durchsetzen als die Chlordioxidbleiche eingeführt wurde. Der große Nachteil des Verfahrens ist geringe Zellstoffweiße nach der Kochung. Der Name Sulfatverfahren stammt in diesem Fall von der Make-up Chemikalie Natriumsulfat Na_2SO_4 (Glaubersalz). Die für den Aufschluss notwendigen Ionen sind das Hydroxidion OH^- und das Hydrogensulfidion HS^- . [2, 5, 8]

Das Sulfatverfahren hat große Vorteile im Bereich der Faserfestigkeiten, weshalb es auch als „Kraft“-Verfahren bezeichnet wird. Zudem ist auch die Chemikalienrückgewinnung

wesentlich einfacher gestaltet als beim Sulfitverfahren. Schwächen zeigt der Kraftzellstoff wie bereits erwähnt jedoch hinsichtlich Weiße. [2, 5, 8]

Ein weiterer Aspekt des Kraftzellstoffes ist die höhere Flexibilität und Zähigkeit der Fasern, da er vorwiegend eine amorphe Struktur aufweist, wohingegen Sulfitzellstoff einen hohen Anteil an kristalliner und parakristalliner Cellulose beinhaltet [5].

2.2 Morphologie

In Folge des Faserstoffgewinnungsprozesses und der Weiterverarbeitung entsteht Feinstoff. Feinstoffe werden bereits auf dem Holzplatz bei der Herstellung der Hackschnitzel, welche zur Holz- und Zellstoffherzeugung notwendig sind, generiert. Diese werden jedoch durch entsprechende Trennaggregate bereits vor der Weiterverarbeitung ausgeschieden. [9]

In den Folgeprozessen werden wieder Feinstoffe kreiert und man unterscheidet im Wesentlichen zwischen Primär- und Sekundärfeinstoff. Diese Feinstoffe finden sich am Ende im Produkt wieder.

2.2.1 Definition von Feinstoffen

Die Grenzen für die Definition von Feinstoffen sind nicht so klar gesteckt. Quer durch die Literatur findet man unterschiedliche Definitionen von diversen Autoren. So definiert z.B. PAAVILAINEN , dass alles was kleiner ist als $100\ \mu\text{m}$ als Feinstoff. Die am weitesten verbreitete Methode zur Bestimmung des Feinstoffanteils ist eine gravimetrische. Dabei wird der Gewichtsanteil ermittelt, welcher ein $200\ \text{Mesh}$ ($76\ \mu\text{m}$) Sieb eines Sortieraggregates passiert, was auch der TAPPI Test Methode T261 Cm-94 (1994) entspricht.[10]

2.2.2 Arten von Feinstoffen

Primäre Feinstoffe

Infolge der Faserstoffgewinnung entstehen die sogenannten primären Feinstoffe. Im Falle der mechanisch erzeugten Faserstoffe spricht man von Mehl- und Schleimstoffen [11]. Der Gewichtsanteil an primären Feinstoffen in Holzstoff liegt im Bereich von 20..35 % [12]. Da diese Arbeit sich ausschließlich mit Zellstoff beschäftigt wird darauf nicht näher eingegangen.

Im Zuge der Zellstoffkochung entstehen ebenfalls primäre Feinstoffe. Diese kleinen Partikel sind zum Teil bereits vor der Kochung im Holz präsent, wie zum Beispiel kurze Faserteile, oder Bruchstücke von Gefäßzellen, Parenchymzellen und Teile der Mittellamelle [9, 13]. Abbildung 2.5a zeigt eine Mikroskopaufnahme von primären Feinstoffe. Im Gegensatz zur mechanischen Faserstoffherzeugung wird im Falle des chemischen Aufschlusses kaum mechanische Energie eingebracht. Diese Tatsache führt dazu, dass der Anteil an primären Feinstoffen in Zellstoffen um eine Zehnerpotenz geringer ist und damit im Bereich um die 2 %gew [14] liegt.

Sekundäre Feinstoffe

Die sekundären Feinstoffe werden durch mechanische Einflüsse im Weiterverarbeitungsprozess, vor allem im Refiner, gebildet [15]. Dabei kann der gesamte Feinstoffanteil im Zellstoff im Extremfall auf bis knapp über 15 %gew ansteigen [14, 16].

Die sekundären Feinstoffe sind kleine Faserbruchstücke, welche durch mechanische Einwirkungen vorwiegend aus der Primär- und Sekundärwand herausgerissen werden. Somit bestehen sekundäre Feinstoffe aus flachen Faserwandfetzen, Faserbruchstücken und kolloidalen Material [9] im Gegensatz zu den eher kompakten Primärfeinstoffen (Abb. 2.5).

Vergleicht man nun die Aufnahmen aus Abbildung 2.5 a und b erkennt man deutlich den Unterschied zwischen den eher kompakten primären Feinstoffen und die stark fibrillierten Faserwandbruchstücke.

2.3 Faserstoffmahlung

Die Zellstoffmahlung stellt einen unerlässlichen Produktionsschritt in der Papierherzeugung dar. Sie dient zur Steuerung von Qualitätsparameter wie Festigkeit, Formation und Oberflächenbeschaffenheit, um nur einige zu nennen. Der für die Mahlung notwendige Energieaufwand ist erheblich [17]. Dieser Umstand und das Verlangen, die Produkteigenschaften durch die Mahlung noch gezielter und feiner steuern zu können, soll in dieser Arbeit behandelt werden.

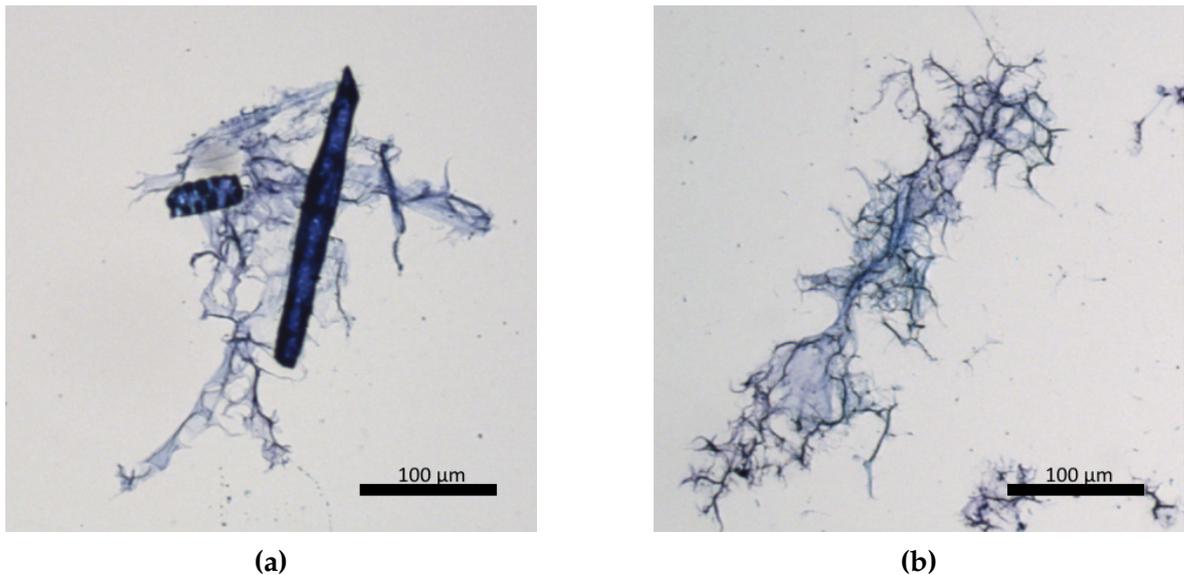


Abbildung 2.5 Microskopbilder von unterschiedlichen Feinstoffen, zur Verfügung gestellt von Melanie Mayr, TU Graz (2017), **a)** Primärer Feinstoff BSK, **b)** Sekundärer Feinstoff UBSK, Feinstoffe

2.3.1 Auswirkungen der Mahlung

Im Zuge der Mahlung werden die Fasern zwischen zwei Mahlwerkzeugen mechanisch beansprucht. Abhängig von der Konfiguration des Prozesses, hinsichtlich mechanischer Beschaffenheit der Mahlwerkzeuge und Stoffdichte, wird die Faser geschädigt. Diese Schädigung äußert sich einerseits durch reine Kürzung der Faser und andererseits kommt es zur Fibrillierung der Faser, wobei zwischen interner und externer Fibrillierung unterschieden wird. [2, 17]

Externe Fibrillierung

Externe Fibrillierung bedeutet, dass Teile der Faserwand, wie in Abbildung 2.6 (links) zu sehen, herausgerissen werden und in Fetzen an der Faser hängen. Dieser Effekt führt zur Verbesserung der mechanischen Blatteigenschaften hinsichtlich Zugfestigkeit und der Scott Bond Festigkeit aufgrund der Vergrößerung möglicher Bindungsflächen [18].

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erwähnt wurde, ergibt fibrilläres Material, welches sich von der Faser löst, sekundären Feinstoff.

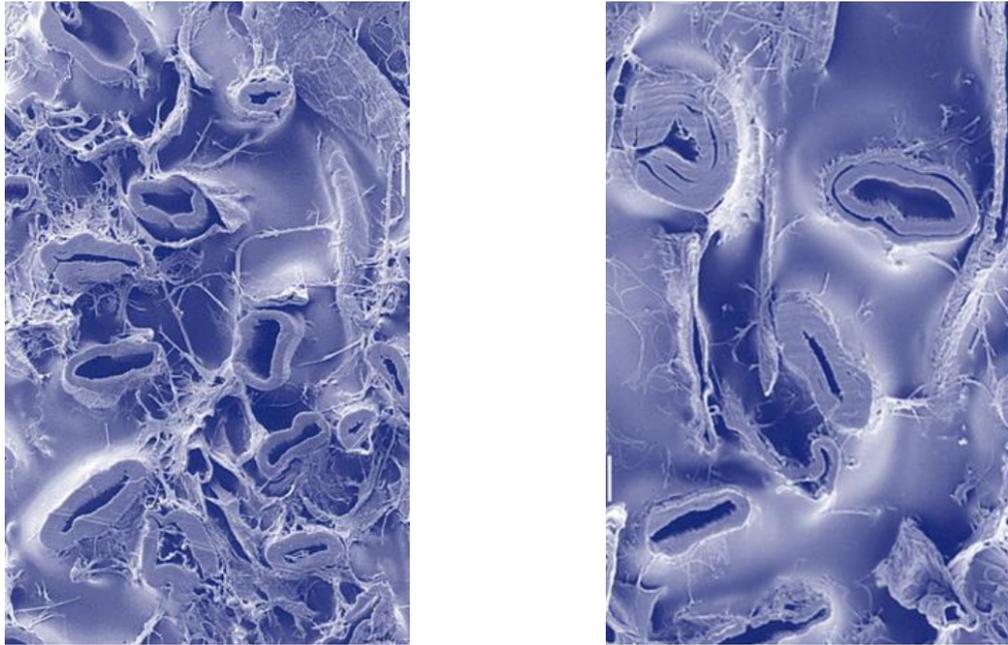


Abbildung 2.6 Darstellung externer (links) und interner (rechts) Fibrillierung durch Fasermahlung [1]

Interne Fibrillierung

Ein weiterer Effekt der Mahlung ist die interne Fibrillierung. Durch Quetschen der Faser kommt es zur Delamination der internen Struktur, wo Bindungen zwischen Lignin, Cellulose und Hemicellulose bestehen (Abb. 2.6 rechts). [1]

Das äußerst erwünschte Ergebnis ist eine flexibilisierte Faser, die dadurch mehr Bindungsfläche aufweist [18]. Die Flexibilität der Faser ist mitunter maßgeblich für mechanische und optische Eigenschaften des daraus hergestellten Papiers verantwortlich [1], wie in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.1 noch gezeigt wird.

Entscheidend für die höhere Bindefähigkeit der Faser ist die Quellung durch die Delamination der Faserschichten. Wasser dringt zwischen die Schichten der Faser ein. Im Prozess der Blatttrocknung kollabieren diese Fasern und erzeugen so großflächige Bindungen und ein sehr dichtes Netzwerk.[1]

Reduzierung des Fasercurls

Diese Flexibilisierung ist auch besonders für BSK und UBSK sehr wichtig, da im Zuge des Kochens und der Bleiche ein mehr oder weniger starke Faserkrümmung (Curl) eingebracht wird. Dieser Curl wird durch die Mittel- und Hochkonsistenzprozesse teilweise

verschlimmert, was zu Faserknicken führt (Kink). Durch die Niederkonsistenzmahlung (LC-Mahlung) wird der Fasercurl entfernt. [17]

Faserkürzung

Kürzung von Fasern hat einen großen Einfluss auf die Formation, da durch kürzeres Fasermaterial geringere Flockenbildungstendenz vorliegt. Die Kürzung tritt nicht zwingend durch Schnitt ein, vielmehr sind es Scherbeanspruchung und axiale Zugbeanspruchung, die zum Bruch der Faser führt. Sind die Bruchstücke sehr klein, so beeinflussen sie die Entwässerung in gleicher Weise negativ wie es Feinstoffe tun.[1]

Veränderung der Stoffeigenschaften

Abbildung 2.7 zeigt die Auswirkungen der Mahlung auf den Zellstoff als Funktion der spezifischen Mahlarbeit. Während durch die Faserkürzung der Anteil an Faserlangstoff abnimmt, steigt infolgedessen natürlich der Faserkurzstoffanteil. Durch die externe Fibrilierung und dem darauf folgenden Ablösen von Faserbruchstücken steigt der Feinstoffanteil mit zunehmender Mahlarbeit ab einem gewissen Punkt linear an.[19]

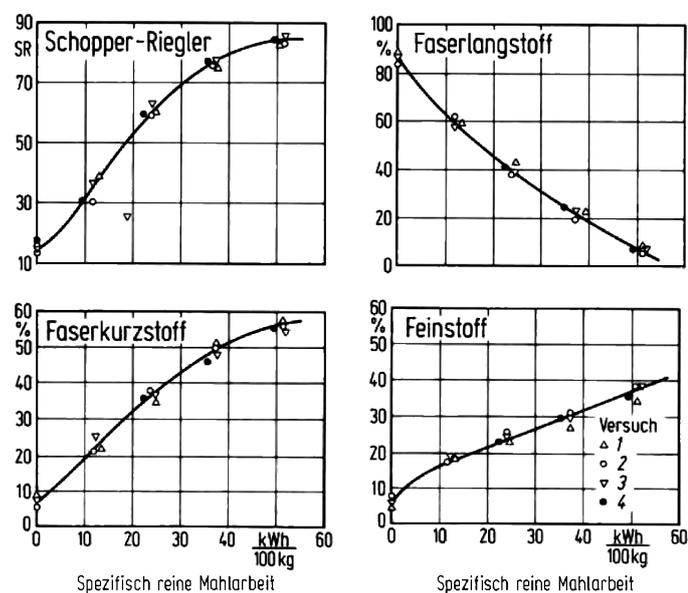


Abbildung 2.7 Faserstoffeigenschaften abhängig von der Eingebachten spezifischen Mahlarbeit (für ungebleichten Fichten Sulfitzellstoff) [19]

Aufgrund der Zunahme von Faserkurzstoff und Feinstoff sowie der Flexibilisierung und der daraus resultierenden Bildung eines dichteren Fasernetzwerkes steigt der Entwässerungswiderstand an. Daraus ergibt sich der steigende Schopper-Riegler Wert.[19]

Veränderung der Papiereigenschaften

Aufgrund der Veränderung der Faserstoffeigenschaften kommt es auch zu Veränderungen der physikalischen Eigenschaften des daraus hergestellten Papiers. So zeigt die Abbildung 2.8, dass sich die mechanischen Eigenschaften Reißlänge und Berstdruck mit steigender Mahlarbeit erhöhen. Jedoch erreichen beide Eigenschaften ihr Maximum. Der Hauptgrund für die steigenden Festigkeiten ist die Faserflexibilisierung aufgrund der internen Fibrillierung.[19]

Während Reißlänge und Berstdruck steigen nimmt die Fortreißarbeit gerade zu Beginn stark ab. Dieser Umstand ist der Faserkürzung und dem dadurch abnehmenden Anteil an Faserlangstoff geschuldet.[19]

Neben den mechanischen Eigenschaften wird auch der Weißgrad beeinflusst. Durch die Zunahme an Feinstoffen und des dichteren Fasernetzwerkes aufgrund der flexibleren Fasern sinkt die Anzahl an Fasergrenzflächen im Papier. Dadurch nimmt die Streuung ab, was zur Folge hat, dass mehr Licht durch das Papier transmittieren kann und somit weniger reflektiert wird.[19]

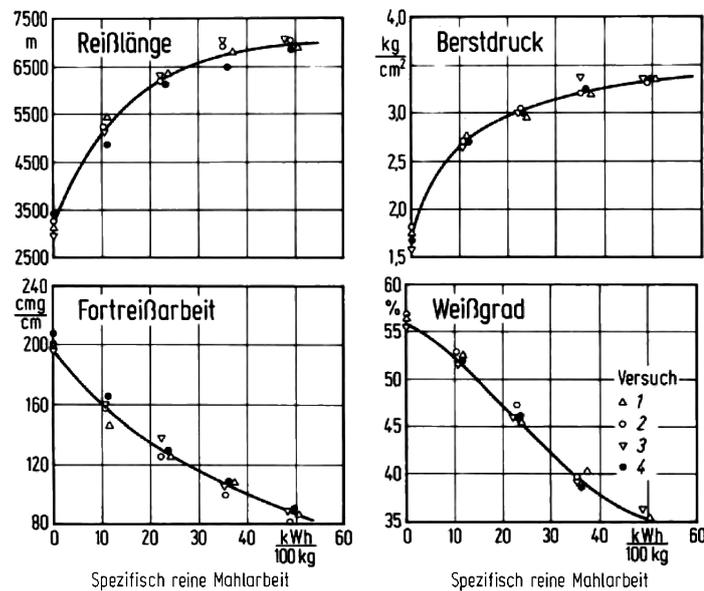


Abbildung 2.8 Papiereigenschaften abhängig von der Eingebachten spezifischen Mahlarbeit (für ungebleichten Fichten Sulfitzellstoff) [19]

2.3.2 Mahlaggregate

Funktionsweise von Mahlaggregaten

Moderne Mahlaggregate arbeiten mit Messergarnituren, wobei sich jeweils eine Stator- und eine Rotorgarnitur gegenüberstehen. Die Messer stehen topographisch hervor, während die sogenannten Nuten die Täler zwischen den Messern bilden. [2, 17]

BLECHSCHMIDT [2] beschreibt drei Zonen, welche in Abbildung 2.9 dargestellt werden. **Zone 1** stellt jeweils den Bereich der Nut dar. In diesen Tälern geschieht vorwiegend der Transport des Faser- und Feinstoffmaterials. Die entstehenden Turbulenzen sorgen für den Zerfall von Fasernetzwerken, wofür ca. 40..90 % des gesamten Energiebedarfs notwendig sind. **Zone 2** beschreibt die Begegnung der Messerkanten. Durch die radiale Scherung kommt es eher zur Faserkürzung und weniger zur Fibrillierung. Durch Weiterlauf des Rotors entsteht **Zone 3** in der die Konsistenz gegenüber der vorhergehenden Zone noch weiter auf ein Maximum steigt. Es kommt zur Fibrillierung der Faser. Je nach Messerabstand kann es im Extremfall zur vollständigen Zerstörung der Faser kommen.[2]

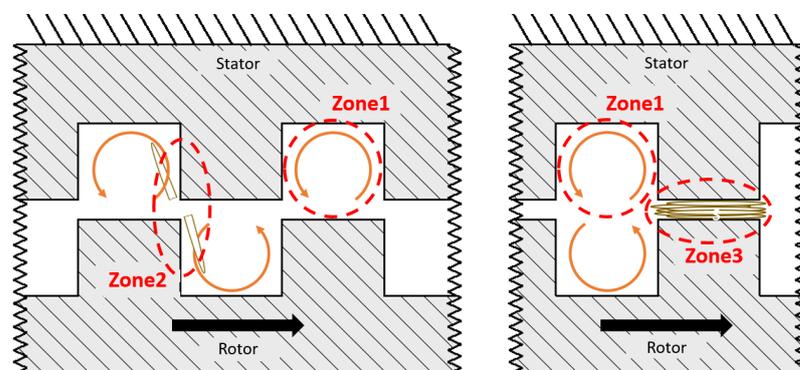


Abbildung 2.9 Darstellung des Funktionsprinzips eines Refiners, erstellt nach Vorlage [2]

Industrielle Mahlaggregate

Heutzutage kommen verschiedene Bauarten von Refinern zum Einsatz. Sie unterscheiden sich vorwiegend durch ihre Geometrie und reichen vom Scheibenrefiner über Kegelrefiner bis hin zum Papillon Refiner, welcher einen Kegelwinkel von null Grad aufweist, was einem Zylinder entspricht. Bis auf den Scheibenrefiner, der auch im HC-Bereich betrieben werden kann, findet für alle anderen Refiner der LC-Bereich Anwendung. Der Durchsatz bei Scheibenrefinern liegt bei $2,5..23 \text{ m}^3/\text{min}$. [2, 17]

Mahlaggregate für Labormaßstab

Während industrielle Refiner für große kontinuierliche Durchsätze konzipiert sind, werden Labor-Mahlapparate für sehr kleine Mengen und vorwiegend für diskontinuierlichen Betrieb entworfen.

Die am weitesten verbreiteten Labormühlen sind der Valley-Beater und die PFI-Mühle. Am Rande seien auch die Lampén Ball Mühle und die Jokro-Mühle [17] erwähnt.

Im Zuge dieser Arbeit wird die Mahlung ausschließlich mit der PFI-Mühle durchgeführt, weshalb nur auf diese im Detail eingegangen wird. Sie zeichnet sich darin aus, eine eher quetschende Mahlung gegenüber anderen Mahlaggregate zu generieren [19]. Dadurch wird die interne Fibrillierung gefördert und es kommt weniger zu externer Fibrillierung und Faserkürzung [17, 20]. Realisiert wird diese quetschende Mahlung durch die glatte Innenseite der Buchse. Der Faserstoff wird nun zwischen Buchsenwand und Rippe des Mahlkörpers mechanisch beansprucht. Wie in Abbildung 2.10 rotiert der gerippte Mahlkörper exzentrisch aus dem Mittelpunkt der separat rotierenden Buchse. Mahldruck und -spalt können mittels Gewicht und Trieb eingestellt werden. Eingesetzt werden 30 g[otro] bei einer Konsistenz von 10 % gleichmäßig verteilt über den gesamten Innenumfang der Buchse. [19]

Die Mahlung in der PFI Mühle ist ein Batch-Prozess. Der wählbare Parameter für die gewünschte Mahlintensität ist die Anzahl der Umdrehungen. Über die Drehzahl kann die spezifische Energie für die Mahlung mittels Gleichung 2.1 berechnet werden, wobei der Wert von 0,18 kWh nur für BSK gültig ist. Die Mahlleistung einer PFI Mühle ist ca. 10 mal höher als jene, die üblicherweise mittels Industrierefiner eingebracht wird.[20]

$$E = \frac{0,18 \text{ [kWh]}}{\text{Masse [t]} \cdot \text{Umdrehungen [1/min]}} \quad (2.1)$$

2.3.3 Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch SEC (Gl. 2.2 [17]) ist ausschließlich von der effektiven Leistung P_{eff} [kW], dem Volumenstrom \dot{V} [l/min] und der Stoffkonsistenz C [kg/m³] abhängig.

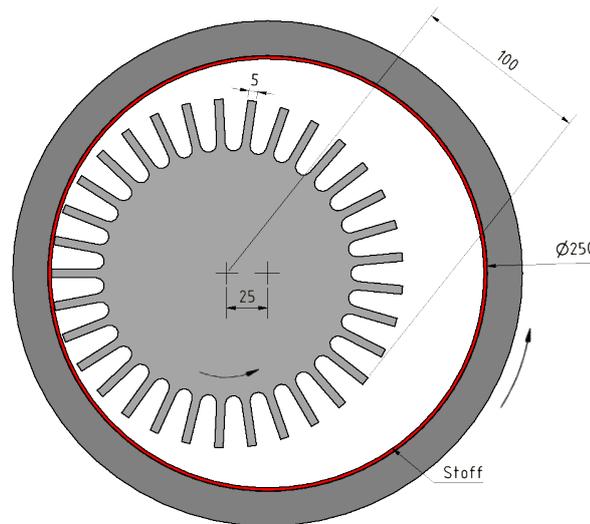


Abbildung 2.10 Funktionsprinzip PFI-Mühle; Abmessungen entnommen[19]

$$SEC = \frac{P_{eff}}{\dot{V} \cdot C} [kWh/t] \quad (2.2)$$

Die effektive Leistung kann nicht direkt gemessen werden. Um diesen Parameter zu erhalten wird der Refiner mit reinem Wasser betrieben und so für jeweils einen gewissen Betriebszustand die „Leerlaufleistung bei Wasserumtrieb“ P_{leer} aufgezeichnet, welche der elektrischen Leistung in diesem Betriebszustand entspricht. Da die elektrische Leistung im Normalbetrieb ebenfalls gemessen werden kann, wird so die effektive Leistung über die Gleichung 2.3 berechnet. [2, 17]

$$P_{eff} = P_{ges} - P_{leer} [kW] \quad (2.3)$$

HERBERT und MARSCH [21] zeigten, dass die Leerlaufleistung aus zwei Komponenten besteht (Gl. 2.4). Die erste Komponente sind die Reibungsverluste P_{fric} (Gl. 2.5), welche durch das strömende Wasser im Spalt der gerillten rotierende Mahlplatten erzeugt werden. K_d ist eine Konstante, welche für einen großen Bereich von Mahlplattendurchmessern gilt. Wichtig in diesem Punkt ist, dass die Drehzahl n und der Plattendurchmesser D hier kubisch bzw. in der fünften Potenz in den Verlust eingehen. Die zweite Komponente sind die Verluste durch Pumpwirkung P_p (Gl. 2.6). Die Pumpwirkung entsteht durch die Beschleunigung des Fluids vom Einlauf des Refiners zum Auslauf hin. Die Konstante K_p beinhaltet unter anderem die Gravitation und die Fluiddichte. Drehzahl und Scheibendurchmesser haben

hier quadratischen Einfluss. Jedoch ist dieser Verlust auch vom Volumenstrom \dot{V} abhängig. [21]

$$P_{leer} = P_{fric} + P_P \text{ [hp]} \quad (2.4)$$

$$P_{fric} = K_d \cdot n^3 \cdot D^5 \text{ [hp]} \quad (2.5)$$

$$P_P = K_P \cdot \dot{V} \cdot n^2 \cdot D^2 \text{ [hp]} \quad (2.6)$$

Geht man nun von einer festgelegten Plattenbeschaffenheit aus und betrachtet man nun die Parameter Drehzahl und Scheibendurchmesser als konstant, bleibt zur Reduzierung des Energieverbrauchs nur die Verringerung des Volumenstrom übrig. Es ist damit auf jeden Fall als sinnvoll zu erachten, nur den Stoffanteil durch den Refiner zu leiten, für den eine Mahlung eine Verbesserung nach sich zieht. Damit wird die eingebrachte Energie auch nur dazu verwendet, den Stoffanteil mit Mahlarbeit zu beaufschlagen, für den es auch Sinn macht um die Eigenschaften des Endproduktes zu verbessern. Um dieses Potential ausschöpfen zu können bedient man sich der Methode der fraktionierten Mahlung.

2.3.4 Fraktionierte Mahlung

Nachdem nun, wie festgestellt, der Energiebedarf bei der Mahlung erheblich ist und zudem der Wunsch besteht, die Mahlung grundsätzlich besser steuern zu können, kommt an diesem Punkt die fraktionierte Mahlung ins Spiel. Dabei soll der Gesamtstrom in einem bestimmten Verhältnis geteilt werden, um eine kurze Faserfraktion und eine zu mahlende lange Fraktion zu erhalten.[1]

Die Idee den Faserstoff vor der Mahlung in zwei Fraktionen zu teilen ist nicht neu. VOMHOFF und GUNDSTRÖM erzeugten 2002 mittels Hydrozyklon eine feine und eine grobe Fraktion um diese anschließend getrennt voneinander zu Mahlen. Der Stoff wurde mittels der Zyklone so getrennt, dass die feine Fraktion 7 % und die grobe Fraktion 38 % der eingesetzten Masse ergaben. Die restlichen 55 % wurden verworfen. Dabei zeigte sich, dass der Feinstoff schon vor der Mahlung den zweieinhalb fachen Tensile Index gegenüber dem Ausgangsstoff aufweist und gegenüber der Groben Fraktion bereits den dreieinhalb fachen. Es ist schon einiges an Energie notwendig um die grobe Fraktion so hoch zu mahlen, dass

der selbe Tensile Index erreicht werden kann. Neben der wesentlich höheren Festigkeit weist die feine Fraktion auch eine geringere Oberflächenrauigkeit auf. [22] Durch die stärkere Mahlung ergibt sich jedoch an dieser Stelle, die schlechter werdende Entwässerung.

Die getrennte Mahlung von BSK Faserfraktionen bringt erhebliche Vorteile in Punkto Festigkeit und Oberflächengüte, gegenüber der Mahlung des gesamten Faserstoffes. Mahlung der langen Fraktion mit geringer Intensität verbessert das Zugfestigkeits- zu Entwässerungsverhältnis. Dieser Stoff hat günstige Voraussetzungen als Reinforcement Zellstoff, wie es später auch von ASIKAINEN bestätigt wurde. Die feine Fraktion könnte für die Verbesserung der Oberflächengüte von Karton verwendet werden. [23]

ASIKAINEN zeigte 2013, dass eine Fraktion dickwandiger BSK Fasern eine sehr hohe Mahlresistenz aufweist und gegenüber dem Ausgangsstoff nahezu die doppelte Mahlergie notwendig ist, dabei jedoch die Zugfestigkeit wesentlich verbessert werden konnte. Im Zuge dieser Versuche konnte gezeigt werden, dass der Einsatz der groben Fraktion als Reinforcement Zellstoff für Holzstoffe sehr große Vorteile bringt. Es ergab sich durch leichte Mahlung eine hoher Tear-Index und eine hohe Bruchzähigkeit. Entwässerbarkeit und Wasserrückhaltevermögen lagen ebenfalls in einem sehr vorteilhaften Bereich.[24]

Die Abtrennung der Feinstoffe und der feinen Faserfraktion bringt große Vorteile für Kraft-Sack Papiere, deren wichtigste Parameter Festigkeit und Porosität sind. Durch die Abwesenheit des feinen Materials ergibt sich ein wesentlich günstigeres Verhältnis zwischen Festigkeit und Porosität.[25]

Durch die fraktionierte Mahlung entsteht der Vorteil, dass die feine Faserfraktion, welche sich ohnehin im Zuge der Mahlung kaum entwickelt, nicht gemahlen werden muss [1]. Dadurch sinkt der zu mahlende Stoffstrom je nach Trennungsverhältnis relativ stark, wodurch die zur Mahlung notwendige Energie maßgeblich sinkt [26].

Auch für Eukalyptus Kraft Zellstoff konnten Vorteile in der fraktionierten Mahlung ausgemacht werden. So konnte bei der Mahlung der groben Fraktion mit geringer Specific edge load (SEL), der Erhalt eines hohen Tear-Index für einen bestimmte Tensile-Index festgestellt werden. Zudem ergibt sich eine höhere Entwässerbarkeit als bei Mahlung des Gesamtstoffes.[27]

Bei der fraktionierten Mahlung werden die Fasern der langen Fraktion, aufgrund des Fehlens von feinem Material, intensiver behandelt. Dadurch können die Festigkeiten der groben Fraktion gesteigert werden. Dies führt auch dazu dass der Mix aus gemahlener grober

Fraktion und ungemahlener feiner Fraktion eine höhere Reißlänge und eine bessere Luftdurchlässigkeit aufweisen als bei Mahlung des Gesamtstoffes.[1]

Ein sehr wichtiger Aspekt bei der fraktionierten Mahlung ist es für den eingesetzten Faserstoff, abhängig von der hergestellten Fraktion, immer sehr sorgfältig die geeignete Mahlintensität zu bestimmen. Nur so kann ein ein Vorteil aus der fraktionierten Mahlung gezogen werden. [23]

2.4 Fraktionierung

Am Ende des Abschnittes 2.3.4 wurde über die Vorteile der fraktionierten Mahlung gesprochen. Diese Fraktionen werden, mittels in der Papierindustrie gebräuchlichen Trennaggregaten wie Drucksortierern oder Hydrozyklonen, hergestellt. Es hat sich gezeigt, dass Drucksortierer für die Fraktionierung nach der Faserlänge effizienter arbeiten. [23]

2.4.1 Klassierung als Trennprozess

Klassierung ist ein Trennprozess, der nach Größe und geometrischer Form trennt, im Gegensatz zum Sortieren, wo die Dichte und die Benetzbarkeit ausschlaggebend sind[2]. Das bei Hydrozyklonen wichtige Abscheidokriterium der Dichte wird im Falle von Zellstofffasern durch die Faserwandstärke definiert[24]. In der Papiertechnik hat sich über die Jahre der Ausdruck Druck-„sortierer“ manifestiert, der jedoch eine Klassierung vornimmt.[2] Die Aufteilung des Zulaufstromes \dot{m}_A erfolgt in erster Linie aufgrund der Faserlänge, wobei daneben auch die Faserflexibilität eine gewisse Rolle spielt [28]. Der Zulaufende Faserstoff wird in einen Akzeptstrom \dot{m}_F , welcher die feine Fraktion darstellt und den Grobfraction führenden Rejektstrom \dot{m}_G aufgeteilt (Abb. 2.11).

Aus der Massenbilanz (Gl. 2.7) können die Massenanteile für Grobgut (Gl. 2.8) und Feingut (Gl. 2.9) berechnet werden. Die Summe der Massenanteile muss logischer weise 1 ergeben (Gl. 2.10).[29]

$$\dot{m}_A = \dot{m}_G + \dot{m}_F \quad (2.7)$$

$$g = \dot{m}_G / \dot{m}_A \quad (2.8)$$

$$f = \dot{m}_F / \dot{m}_A \quad (2.9)$$

$$g + f = 1 \quad (2.10)$$

Diese Massenströme weisen jeweils eine bestimmte Dichteverteilung $q(x)$ auf, welche anschließend beschrieben wird. Das x bezeichnet in diesem Fall die Faserlänge.

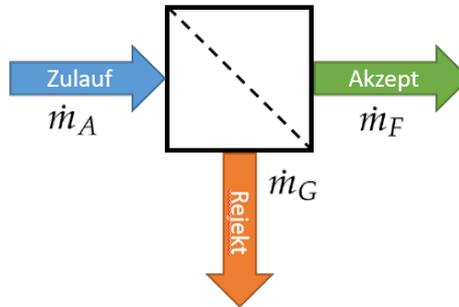


Abbildung 2.11 Schema eines Drucksortierers

Trennung

Für die Trennung wird ein bestimmtes Trennkriterium x_T festgelegt. Idealerweise (Abb. 2.12 links) ist alles, was kleiner ist als das Trennkriterium, in der feinen Fraktion und alles, was größer ist als das Trennkriterium, in der groben Fraktion. Die Realität zeigt allerdings, dass diese Trennung nicht so genau vonstatten geht (Abb. 2.12 rechts). Es herrscht eine gewisse Überlappung der Klassen zwischen Grob- und Feingut. Je nachdem, welche Trennschärfe (TS) das verwendete Trennaggregat erreichen kann, wird die reale Verteilung sich an die ideale annähern.

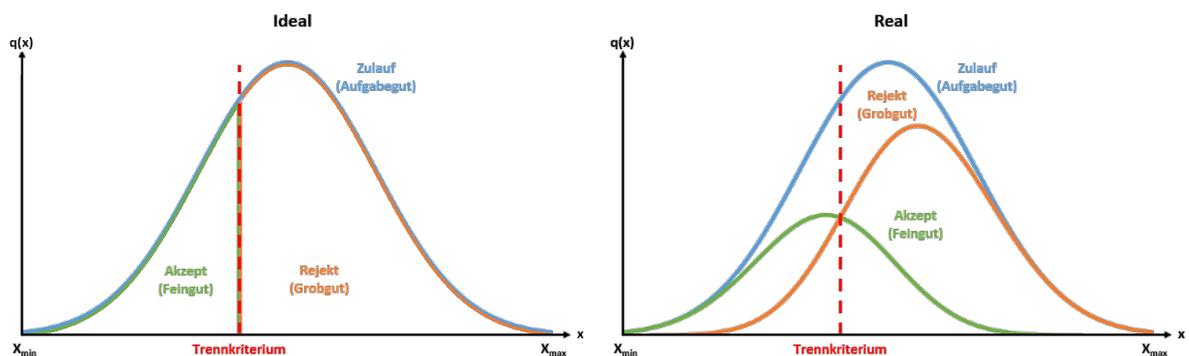


Abbildung 2.12 Verteilung einer idealen Trennung (links) und realen Trennung (rechts) [2]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit findet die Faserlängenverteilung Verwendung. Somit ist die Eigenschaft, welche durch x beschrieben wird, die Faserlänge.

2.4.2 Labor Faserstoffklassierer

Faserstoffklassierer im Labormaßstab sind kleine Aggregate, die im Patchbetrieb arbeiten und nur mit sehr kleinen Mengen beaufschlagt werden können. Der Zweck dieser Geräte liegt ausschließlich in der Analyse von Faserstoffe. Neben den folgend beschriebenen Bauer McNett und Britt Dynamic Drainage Jar gibt es auch noch den Somerville- Haindl- und Brecht-Holl Fraktionierer, deren Zweck ebenfalls ausschließlich im Bereich der Analyse liegt. [19]

Bauer McNett:

Im Labormaßstab kommt zur Klassierung von Faserstoffen der Bauer McNett Fraktionierer zum Einsatz. Dieser Klassierer dient dazu, eine Faserlängenverteilung mit fünf Längenklassen zu erstellen (TAPPI T233). Die ersten vier Fraktionen werden gravimetrisch bestimmt die Fünfte welche über den Überlauf verloren geht, wird über das Einsatzgewicht zurückgerechnet. Der Bauer McNett wird mit einer Stoffmasse von 10g [otro] beschickt. Die Fraktionierung erfolgt über vier Siebe mit jeweils sinkender Maschenweite. [1]

Britt Dynamic Drainage Jar

Der Britt Dynamic Drainage Jar (BDDJ) wird eingesetzt um Feinstoffe ab zu trennen (SCAN CM 66:05). Für einen Durchgang werden 5g [otro] eingesetzt. In erster Linie wird der BDDJ eingesetzt um den Feinstoffanteil eines Faserstoffes zu Bestimmen.[1] Dabei ist alles was ein Sieb mit der Maschenweite von $76 \mu m$ passiert als Feinstoff definiert wie es schon in Abschnitt 2.2.1 erwähnt wurde.

2.4.3 Industrieller Faserstoffklassierer

„Drucksortierer“

Wo auch immer Faserstoffe im industriellen Bereich der Papier- und Zellstofftechnik klassiert werden sollen, kommt der Drucksortierer zum Einsatz. Abbildung 2.13 zeigt die Explosionszeichnung eines industriellen Drucksortierers. Das Gehäuse mit den Hauptanschlüssen Zulauf, Akzept, Rejekt und möglichen diversen weiteren Anschlüssen wie z.B. Junktrap oder Verdünnungswasser, sitzt zusammen mit der Motoraufnahme und dem Riemtrieb auf der Hauptplattform. Im Gehäuse sind der statische Siebkorb und die rotie-

rende Rotorwelle, welche den Rotor selbst antreibt untergebracht. Abgeschlossen wird das System mit dem Deckel an der Oberseite.[30]

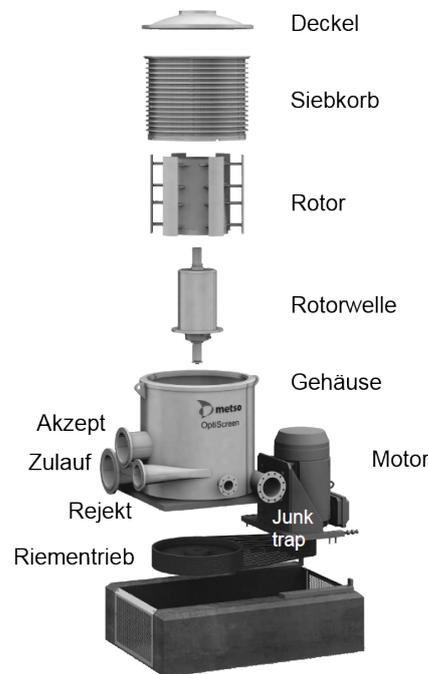


Abbildung 2.13 Explosionszeichnung eines Drucksortierers adaptiert [30]

Die Klassierung erfolgt mittels Sieb, welches sich über den gesamten Umfang des Siebkorbess erstreckt. Es werden grundsätzlich Loch- und Schlitzsiebe unterschieden, wobei Schlitzsiebe je nach Schlitzweite gefräst oder gesteckt ausgeführt werden. Im Zuge des Klassiervorganges im Drucksortierer bildet sich am Sieb eine Filterschicht, welche es zunehmend verhindert, dass Material das Sieb passieren kann. Um diese Filterschicht zu eliminieren kommt der Rotor zum Einsatz. [30]

Der Rotor dient zur Unterstützung des Klassiervorganges. Es existieren verschiedenste Rotortypen, jedoch wird in dieser Arbeit nur auf den Foilrotor (deutsch: Flügelrotor) eingegangen. Der Flügel wird wie in Abbildung 2.14 in einem gewissen Abstand s am Sieb vorbei geführt. Durch die hohe Geschwindigkeit V_u erzeugt er zu Beginn einen kurzen Druckpuls zum Sieb hin und anschließend einen langen Saugpuls, welcher das Sieb freiräumt (Abb. 2.15). Um zu starkes Eindicken am Rejekt zu verhindern sollte der Saugpuls möglichst lange dauern. Die Rotordrehzahlen werden abhängig von der Siebweite gewählt und liegen bei $100..1000 \text{ }^1/\text{min}$. [30]

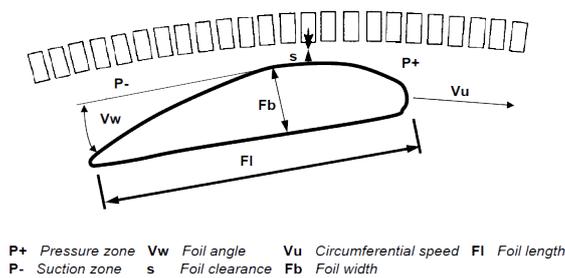


Abbildung 2.14 Maßangaben für Drucksortierer Flügel adaptiert [30]

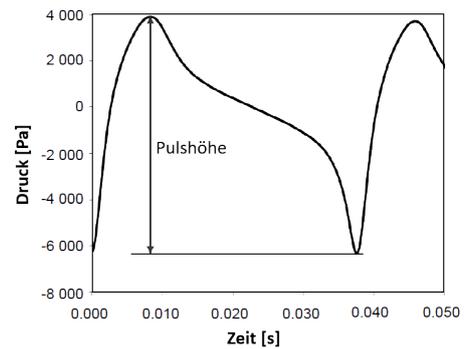


Abbildung 2.15 Durch den Rotorflügel hervorgerufene Pulscharakteristik adaptiert [30]

Drucksortierer werden für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Nach dem Faseraufschluss werden sie verwendet um z.B. Splitter aus dem Stoff zu entfernen. Dabei handelt es sich im Vergleich zur Gesamtmenge um eher geringe Mengen im einstelligen Prozentbereich, welche über das Rejekt ausgeschleust werden. Der Großteil der Fasern verlässt den Sortierer über das Akzept. Da das Wasser sehr leicht das Sieb passieren kann, tendiert es zur Akzeptseite, wodurch es zu einer Eindickung am Rejekt kommt [30]. Bei der Fraktionierung hingegen können sehr hohe Mengen des Fasermaterials über das Rejekt ausgetragen werden. Das Wasser tendiert weiterhin den Sortierer eher über das Akzept zu verlassen. Damit kann es zu einer sehr hohen Eindickung am Rejekt kommen.

Der Eindickungsfaktor lag im Zuge von Fraktionierungsversuchen von Eukalyptus Zellstoff mit einem ANDRITZ MODUSCREEN F bei Einsatz eines 0,6 mm Lochsiebkorb zwischen 1,4 und 2,1. Mit diesem Sortierer konnten für den Kurzfaserstoff jedes beliebige Massenverhältnisse zwischen Akzept und Rejekt —von 10/90 bis 90/10— erzeugt werden.[27]

Bei einem Fraktionierungsversuch von gebleichtem Langfaser Kraft Zellstoff mit einem METSO FS 03 Drucksortierer, wurden bei einer Rejekttrate von 25 vol – % eine Fasermasse von 63 % über das Rejekt abgeführt. Dadurch ergab sich ein Eindickungsfaktor von 2,5. Für die durchschnittlichen Faserlängen ergaben sich 2,45 mm für die Langfaserfraktion und 2,01 mm für die Kurzfaserfraktion bei 2,27 mm im Zulauf.[23]

Diese Ergebnisse konnten mit industriellen Sortierern erreicht werden, welche über einen Siebkorb (Abb. 2.16) verfügen. Die Siebfläche solcher Körbe erstrecken sich über den gesamten Zylinderumfang. Im Zuge dieser Masterarbeit steht ein solcher Sortierer nicht zur Verfügung. Anstatt dessen wird ein kleiner Laborsortierer mit einer Siebblende von nur we-

nigen Zentimeter Größe verwendet. Eine genauere Beschreibung dieses Aggregates folgt in Abschnitt 3.3.2.

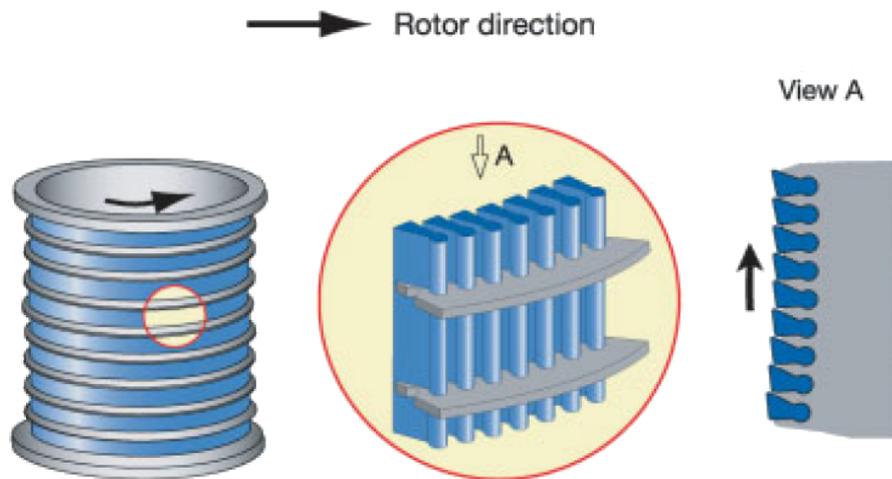


Abbildung 2.16 Darstellung eines Stabsiebkorbes [31]

Materialien und Methoden

Der Methodenteil beschäftigt sich mit der Beschreibung des eingesetzten Probenmaterials sowie den angewandten Versuchskonfigurationen und Analyseverfahren. Analysiert werden die Zellstoffsuspensionen laut Angaben aus dem Abschnitt 3.4. Weiters werden Laborblätter gebildet und die physikalischen Eigenschaften gemäß Abschnitt 3.6 bestimmt.

3.1 Probenmaterial

Als Probenmaterial werden drei verschiedene Zellstoffe eingesetzt. Diese sind ein initial nasser ungebleichter Nadelholz Sulfat Zellstoff (UBSK), ein initial nasser gebleichter Nadelholz Sulfat Zellstoff (BSK) und ein getrockneter Mischholz Sulfit aus 10 % Buche und 90 % Fichte (ECO).

3.2 Versuchskonfigurationen

Die Forderung an die ersten Versuchsreihen ist die Fraktionierung zu verschiedenen Massenverhältnissen und die darauf folgende Mahlung der groben Fraktion. Im Anschluss an die Mahlung soll durch Zumischen der zuvor abgetrennten feinen Fraktion das ursprüngliche Massenverhältnis wieder hergestellt werden. Untersucht werden die in Tabelle 3.1 angegebenen drei Zellstoffe. Aufgrund der aus diesen ersten Versuchen anfallenden Ergebnissen werden zwei weiterer Versuche durchgeführt deren Konfiguration von der ursprünglichen abweicht.

Tabelle 3.1 Versuchspunkte für die Fraktionierte Mahlung

Stoff	Fraktionsverhältnis [kg/kg]	Mahlintensität [Umdrehungen PFI]
UBSK	REF	2000, 4000, 6000
	80 / 20	
	70 / 30	
	60 / 40	
BSK	REF	2000, 4000, 6000
	80 / 20	
	70 / 30	
	60 / 40	
Sulfit	REF	1500, 3000, 4500
	80 / 20	
	70 / 30	
	60 / 40	

3.2.1 Fraktionierte Mahlung

Abbildung 3.1 zeigt, welche Hauptverfahrensschritte die einzelnen Stoffströme bei der Fraktionierten Mahlung durchlaufen. Der Gesamtstoff wird mit dem Drucksortierer in zwei Fraktionen geteilt. Dazu wird ein 1,2 mm Lochsieb verwendet. Die grobe Fraktion wird in einer PFI-Mühle mit in Tabelle 3.1 angegebene Intensitäten gemahlen und anschließend wieder mit der ungemahlene feinen Fraktion gemischt. Die einzelnen Haupt- und Nebenverfahrensschritte werden im Abschnitt 3.3 erläutert. Die Fraktionierte Mahlung wird für alle drei Stoffe UBSK, BSK und ECO durchgeführt. Neben den in Tabelle 3.1 angeführten Versuchspunkten werden auch die jeweils ungemahlene Referenzstoffe der vollständigen Analyse unterzogen.

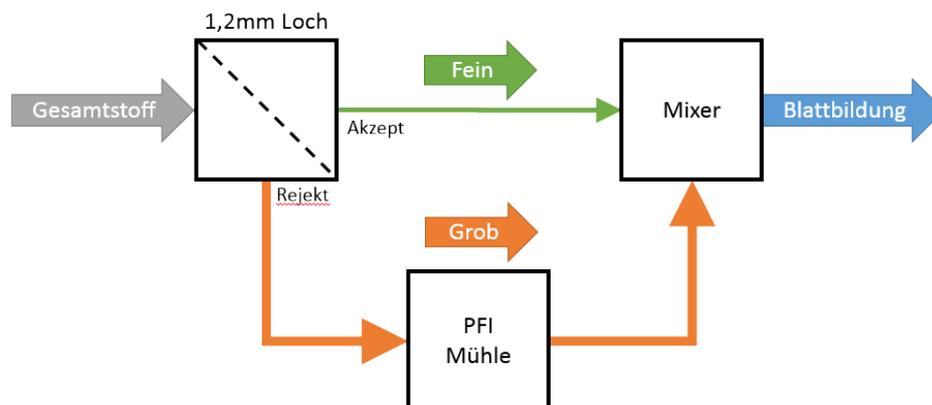
**Abbildung 3.1** Schema des Massenflusses für die Fraktionierte Mahlung

Tabelle 3.2 Versuchspunkte für die separat verarbeitete grobe und feine Fraktion

Stoff	Fraktionsverhältnis [kg/kg]	Mahlintensität [Umdrehungen PFI]
UBSK	70 / - - / 30	2000, 4000, 6000

3.2.2 Vergleich separat verarbeiteter grober und feiner Fraktion

Aus den Ergebnissen der Fraktionierten Mahlung, welche in Abschnitt 4.1 gezeigt werden, ergibt sich die Anforderung weitere Versuche mit abgeänderter Konfiguration durchzuführen. In diesem Versuch soll der UBSK Faserstoff in zwei Fraktionen geteilt werden (Abb. 3.2). Das vorgegebene Verhältnis ist 70/30. Der eingesetzte Stoff wird wie im Hauptversuch mittels Drucksortierer über ein 1,2 mm Lochsieb aufgetrennt und anschließend getrennt voneinander in der PFI Mühle bei den laut Tabelle 3.2 angegebenen Intensitäten gemahlen. Für den Sulfitstoff werden aufgrund der geringeren Mahlresistenz geringere Mahlintensitäten gewählt. Für die angegebenen Versuchspunkte werden Stoffanalysen durchgeführt und Laborblätter zur Untersuchung der physikalischen Blatteigenschaften angefertigt. Als Referenzpunkte werden die ungemahlene Fraktionen ebenfalls den beschriebenen Analysen unterzogen.

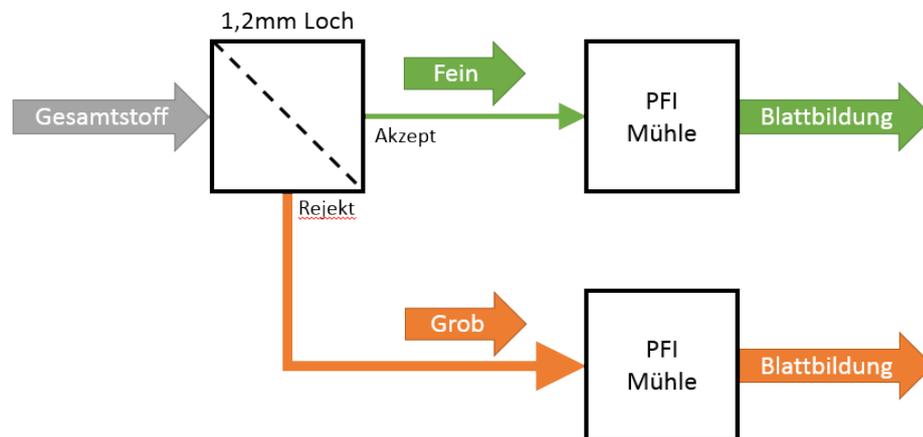


Abbildung 3.2 Schema des Massenflusses für den Vergleich separat verarbeiteter grober und feiner Fraktion

3.2.3 Erstellung hochporöser Blätter

Als Abschließender Versuch wird versucht Laborblätter herzustellen, welche eine möglichst hohe Porosität aufweisen. Dazu wird in im Drucksortierer mittels 1,6 mm Lochsieb

in zweistufiger Fahrweise gemäß Abbildung 3.3 die feine Fraktion abgetrennt und verworfen. Die übrig gebliebene sehr grobe Fraktion wird in der PFI Mühle bei 4000 und 6000 Umdrehungen gemahlen. Im Anschluss darauf wird der durch die Mahlung entstandene Feinstoff mit dem Drucksortierer und einem darin verbauten $100\ \mu\text{m}$ Sieb abgetrennt. Durch diese Verfahrensweise sollten vorwiegend flexibilisierte lange Fasern mit äußerst geringem Kurzfasern- und Feinstoffanteil zurück bleiben. Es werden wie in den vorangegangenen Versuchen Laborblätter gebildet und geprüft. Der Faserstoff wird ebenfalls analog zu den anderen Versuchen untersucht.

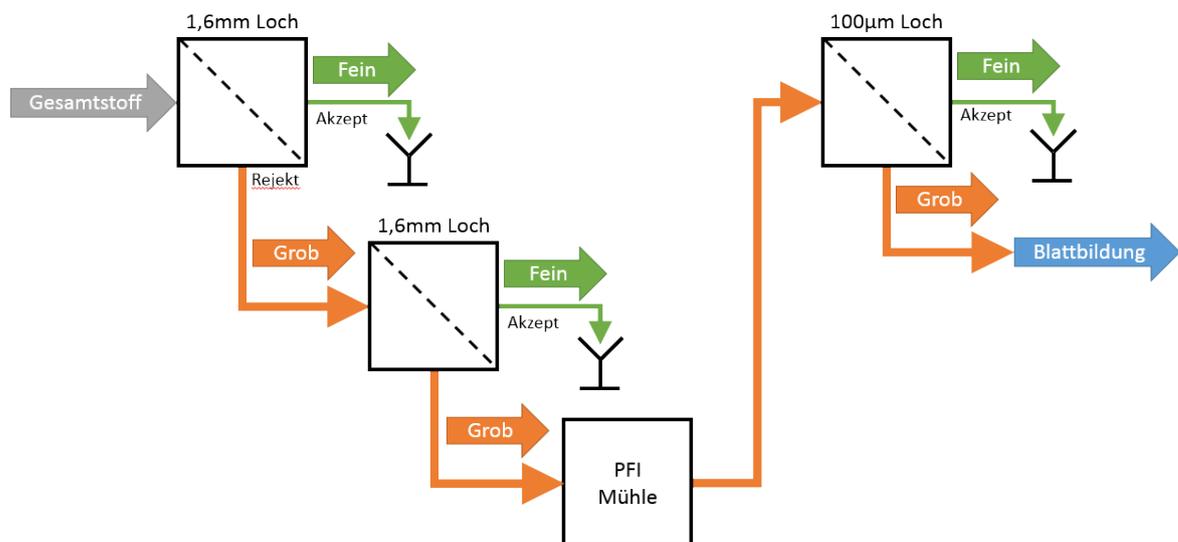


Abbildung 3.3 Schema des Massenflusses für Herstellung hochporöser Blätter

3.3 Prozessschritte

3.3.1 Desintegration vor der Fraktionierung

Um ausreichend Stoff zur Verfügung zu haben werden 300g [*otro*] bei einer Konsistenz von 1% im Laborpulper des IPZ Technikums für $20\ \text{min}$ desintegriert. Der Stoff wird vor der Desintegration für einen vom Trockengehalt abhängigen Zeitraum zur Quellung gebracht.

3.3.2 Fraktionierung

Als Trennaggregat kommt der von LUKAS JAGIELLO im Zuge seiner Dissertation [32] gebaute Drucksortierer des Institutes für Papier-,Zellstoff- und Fasertechnik (IPZ) der Technischen Universität zum Einsatz. Dieser Drucksortierer wurde entwickelt um größerer Men-

gen an Feinstoffe herstellen zu können. Das grundlegende Funktionsprinzip entspricht dem eines industriellen Drucksortierers. Die Faserstoffsuspension wird über die Pumpe tangential in den Drucksortierer eingeleitet und durch die rotierenden Flügel radial beschleunigt. Das Feingut wird über das Sieb zur Akzeptleitung hin abgetrennt und das übrig gebliebene grobe Material wird über die Rejektleitung abgeführt. Der Unterschied zum industriellen Drucksortierer liegt darin, dass ein verhältnismäßig kleines Sieb verbaut ist. Zur Feinstoffabtrennung wird hier ein Lochsieb mit $100\ \mu\text{m}$ Lochdurchmesser verwendet. Die erhaltenen Ergebnisse entsprechen, dem des BDDJ. [32]

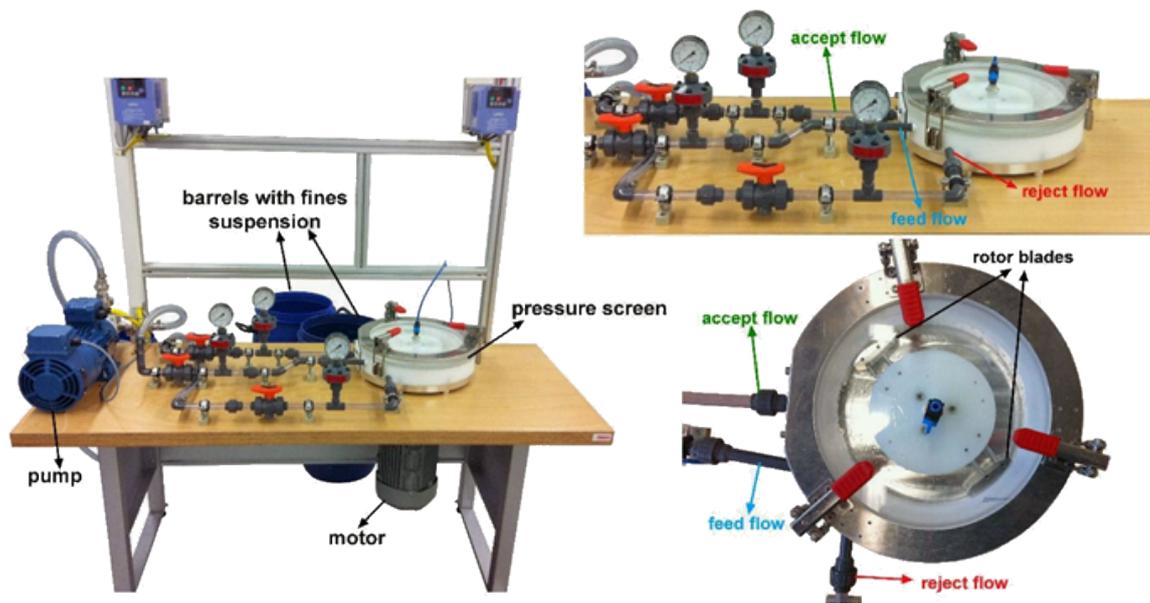


Abbildung 3.4 IPZ Drucksortierer von LUKAS JAGIELLO [32]

Für die Versuche dieser Masterarbeit wird der Sortierer dahingehend modifiziert, dass das $100\ \mu\text{m}$ Lochsieb durch ein $1,2\ \text{mm}$ Lochsieb ersetzt wird. Das Sieb weist eine Größe von $57\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ auf, und ist damit nicht wie bei einem industriellen Sortierer rundumlaufend. Der Sortierer wird mittels Impellerpumpe mit $5\ \text{l}/\text{min}$ beschickt. Die Fraktionierung erfolgt bei einer Stoffkonsistenz von $0,1\ \%$. Die Faserstoffsuspension wird in einem $450\ \text{l}$ Vorlagebehälter mit externem Rührer zur Verfügung gestellt.

Es werden für jede Versuchsreihe verschiedene Fraktionsverhältnisse (Gl. 3.1) erzeugt, welches sich aus den Trockenmassen der Fraktionen ergeben. Dieses Verhältnis wird regelmäßigen Abständen kontrolliert, indem gleichzeitig jeweils am Akzept und Rejekt eine Probe gezogen und daraus die Trockenmasse bestimmt wird.

$$\text{Fraktionsverhältnis} = m_{\text{Grob}} : m_{\text{Fein}} \quad (3.1)$$

Das Abtrennverhalten wird mittels Ventileinstellung für Akzept und Rejekt getrimmt. Da durch diese Betriebsweise nicht für alle eingesetzten Stoffe die geforderten Fraktionsverhältnisse erzeugt werden können muss in diesem Fall eine mehrstufige Fraktionierung durchgeführt werden (Abb. 3.5). Dabei wird das Grobgut nochmals auf eine Konsistenz von 0,1 % verdünnt und in einem zweiten Durchgang fraktioniert. Die Akzeptströme aus beiden Durchgängen werden gemischt und ergeben zusammen die feine Fraktion.

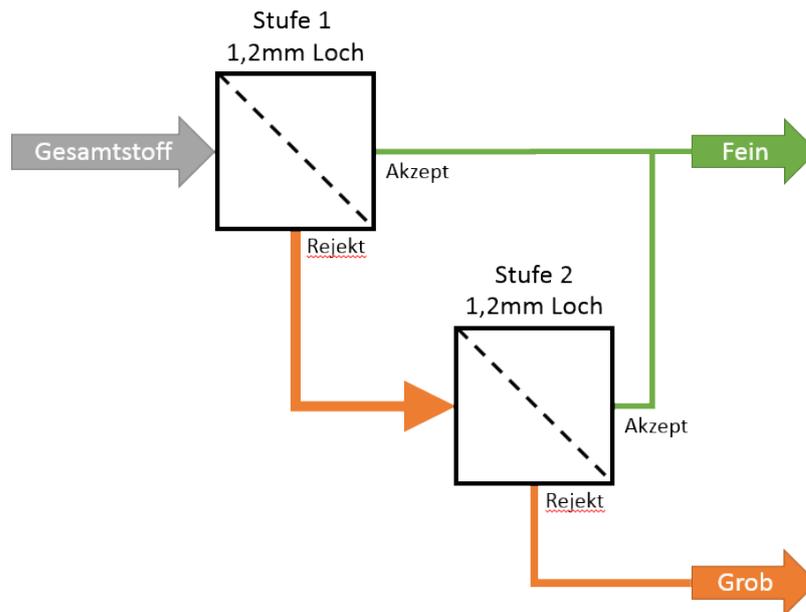


Abbildung 3.5 Schema der zweistufigen Fraktionierung

Die anfallenden Akzept- und Rejektströme werden getrennt in verschließbaren 50 l und 150 l Gebinden gefahren.

3.3.3 Stoffeindickung nach der Fraktionierung

Vor der Weiterverarbeitung muss die Stoffdichte der Fraktionen drastisch erhöht werden. Dazu werden die Faserstoffe für zwei Tage absedimentiert und anschließend das klare Wasser von oben her mittels einer Pumpe abgesaugt.

In einem zweiten Eindickungsschritt wird der Stoff mittels Behälter mit Siebboden unter Einsatz von Unterdruck an der Siebunterseite weiter eingedickt um eine Stoffkonsistenz von über 10 % zu erreichen.

Anschließend wird der Trockengehalt der Fraktionen laut DIN EN 20638 bestimmt. Mittels Trockengehalt und Gesamtmasse luro der Fraktionen kann das erreichte Fraktionsverhältnis berechnet werden.

3.3.4 Mahlung mittels PFI-Mühle

Die Mahlung der groben Fraktion wird mit der PFI-Mühle durchgeführt. Für die Mahlung in der PFI-Mühle werden 30 g [*otro*] eingesetzt. Die Desintegration und die Mahlung erfolgen laut DIN EN ISO 5263 Teil 1 und ÖNORM EN ISO 5264/2.

Die auf den Faserstoff eingebrachte Mahlenergie ist proportional der für die Mahlung angewendeten Umdrehungen, wobei für jede Versuchsreihe mehrere Mahlpunkte mit unterschiedlicher Mahlintensität erstellt werden.

3.3.5 Mischung

Nach der Mahlung werden die Fraktionen in ermitteltem Fraktionsverhältnis wieder gemischt. Die Mischung und Homogenisierung der gemahlten groben Fraktion und der feinen Fraktion erfolgt mittels Noram C371 Desintegrator mit 30.000 Umdrehungen.

3.4 Zellstoffprüfung

3.4.1 Stoffdichte und Trockengehalt

Die Stoffdichte wird nach EN ISO 4119 ermittelt und der Trockengehalt wird unter Verwendung von DIN EN 20638 ermittelt. Die Gemeinsamkeit liegt darin, dass die Masse im feuchten Zustand (m_{lutro}) gemessen wird und anschließend im trockenen Zustand (m_{otro}). Das Verhältnis dieser beiden Massen ergibt den Trockengehalt TG bzw. die Stoffdichte (Gl. 3.2) [2].

$$TG = \frac{m_{otro}}{m_{lutro}} \quad (3.2)$$

3.4.2 Faserlängenverteilung

Verteilungen können auf verschiedene Arten dargestellt werden. In diesem Abschnitt werden die Verteilungsdichte $q(x)$ und Verteilungssumme $Q(x)$ kurz erläutert (Abb. 3.6).

Das Ergebnis der Summenverteilung für eine gewisse Eigenschaft x ist das Verhältnis der Anzahl an Elementen, welche diese Eigenschaft erfüllen im Verhältnis zur Gesamtmenge

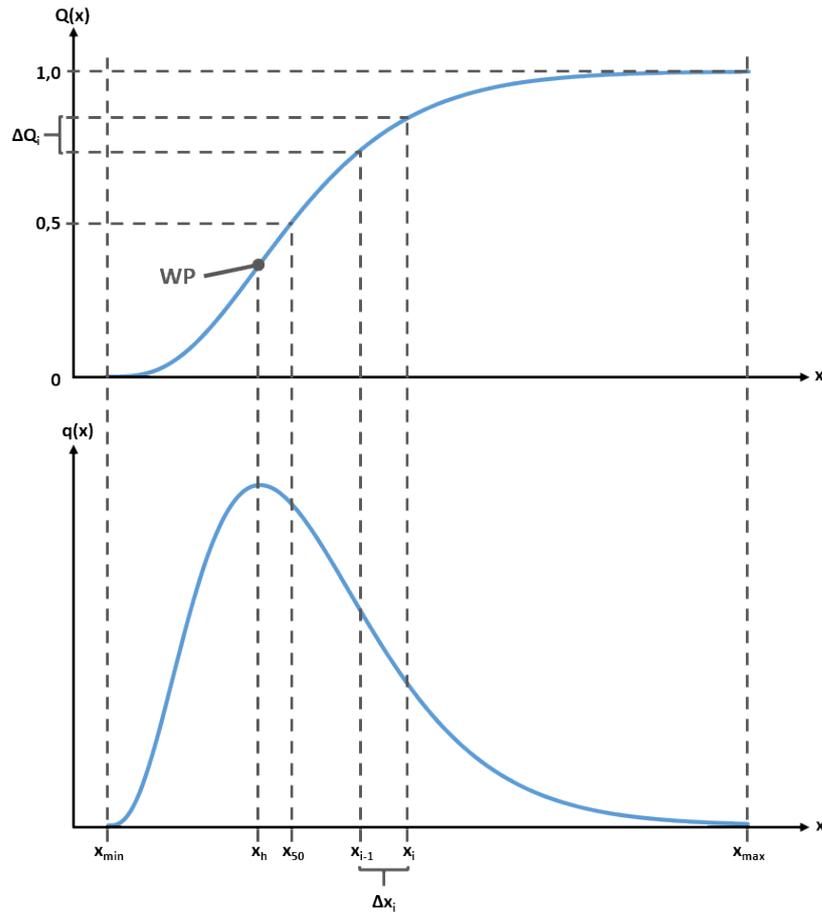


Abbildung 3.6 Darstellung einer Verteilungsdichte $q(x)$ (unten) und der dazugehörigen Verteilungssumme $Q(x)$ (oben)

(Gl. 3.3). Die Dichteverteilung ergibt sich aus der Differenz zweier benachbarter Summenverteilungsbereiche gebrochen durch den Bereich der entsprechenden Eigenschaft (Gl. 3.4). [29]

$$Q(x_i) = \frac{\text{Teilmenge } x_{\min} \dots x_i}{\text{Gesamtmenge } x_{\min} \dots x_{\max}} \tag{3.3}$$

$$q(x_i) = \frac{Q(x_i) - Q(x_{i-1})}{\Delta x_i} \tag{3.4}$$

Wird der Bereich Δx_i infinitesimal klein gemacht erhält man eine kontinuierliche Summenverteilung $Q(x)$ deren Ableitung nach x die kontinuierliche Verteilungsdichtefunktion $q(x)$ (Gl. 3.5) ergibt. [29]

$$q(x) = \frac{dQ(x)}{dx} \tag{3.5}$$

Bestimmt wird die Faserlängenverteilung unter Verwendung des L&W Fiber Tester Plus (Abb. 3.7) ermittelt. Dazu werden $0,1\text{g[otro]}$ mit 300 ml deionisiertem Wasser verdünnt. Abbildung 3.8 zeigt ein vom Fiber Tester aufgenommenes Bild. Aus einer Vielzahl von solchen Bildern werden die darauf sichtbaren Fasern und Partikel hinsichtlich Länge, Breite, und vielen weiteren Parametern vermessen.



Abbildung 3.7 L&W Fiber Tester Plus

Abbildung 3.8 Bildausschnitt aufgenommen mit L&W Fiber Tester Plus

Im Zuge dieser Arbeit wurde nur die Faserlängenverteilung ermittelt. Dazu werden pro Datenpunkt drei Messungen durchgeführt. Das Gerät wird dahin gehend parametrierd, dass eine Mindestanzahl von 5000 Fasern vermessen wird. Weiters werden im Zuge dieser Arbeit alle Elemente kleiner als $200\ \mu\text{m}$ als Feinstoff definiert. Sämtliche nachfolgende Angaben zu Faserlängenverteilungen sind nach Gleichung 3.6 [33] längengewichtet.

$$L_l = \frac{\sum n_i \cdot l_i^2}{\sum n_i \cdot l_i} \quad (3.6)$$

3.4.3 Mahlgrad

Der Mahlgrad SR wird nach dem Verfahren von Schopper-Riegler DIN EN ISO 5267-1 ermittelt. Der aus der Messung erhaltene Wert gibt die Entwässerungsgeschwindigkeit in $^{\circ}SR$ an. Er entspricht der Differenz von 1000 ml und der Menge an schnell ablaufendem Wasser gebrochen durch 10 (Gl.)3.7). [19]

$$SR = \frac{1000 \text{ ml} - z}{10} [^\circ SR] \quad (3.7)$$

3.5 Laborblattherstellung

Um eine Reproduzierbarkeit für die nachstehenden Papierprüfungen zu erhalten, werden die Laborblätter nach ÖNORM EN ISO 5269-2 mit dem Rapid-Köthen Verfahren hergestellt.

Die mit dem Rapid-Köthen Blattbildner erstellten Laborblätter weisen eine Fläche von $0,0317 \text{ m}^2$ auf. Die Laborblätter aller in dieser Arbeit enthaltenen Versuchsreihen werden mit einem Zielflächengewicht von $80 \text{ g}/\text{m}^2$ erstellt, um eine Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten.

3.6 Papierprüfung

Alle nachstehend beschriebenen Papierprüfungen werden nach 24 stündiger Konditionierung der Probestätter im Normklima bei einer Temperatur von 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % durchgeführt.

3.6.1 Flächenbezogene Masse

Das Flächengewicht FbM (Gl. 3.8) ist definiert als das Verhältnis der Masse m des Papiers bezogen auf die Fläche A des Blattes nach DIN EN ISO 536.

$$FbM = \frac{m}{A} [\text{g}/\text{m}^2] \quad (3.8)$$

Die Fläche der Laborblätter ist wie bereits erwähnt mit $0,0317 \text{ m}^2$ durch das Herstellungsverfahren festgelegt.

3.6.2 Dicke

Zur Messung der Blattdicke d [μm] gibt es die Normen EN ISO 534 für die Messung eines einzelnen Blattes und die Norm EN ISO 12625-3 für Dickebestimmung im Stapel. Die Stapelmessung findet bevorzugt bei der Dickemessung von Tissue-Erzeugnissen Verwendung. Die Einzelblattmessung wird für Papier und Karton eingesetzt und somit auch im Zuge

der nachfolgenden Versuchsreihen angewendet. Abweichend von dieser Norm werden pro Laborblatt drei Punkte vermessen.

3.6.3 Dichte

Die Dichte lässt sich aus dem Flächengewicht und der Blattdicke laut Gleichung 3.9 berechnen.

$$\rho = \frac{FbM}{d} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (3.9)$$

3.6.4 Luftdurchlässigkeit nach Gurley

Die Luftdurchlässigkeit ist in dieser Arbeit von großer Bedeutung und wird in den vorliegenden Versuchsreihen mit dem Verfahren nach Gurley ISO 5636-5 vermessen. Dabei wird ein definiertes Luftvolumen unter einem definiertem Druck — Eigengewicht des Kolbens — in z-Richtung durch das Probenblatt gepresst. Das Ergebnis der Messung trägt die Einheit *Gurley Sekunden* und ist mit ein Maß für die Porosität des Blattes.

3.6.5 Reißlänge

Die Reißlänge R ist in Meter angegeben und wird über die Bruchkraft F_B ermittelt mittels Gleichung 3.10 wobei g die Gravitation mit dem Wert $9,81 \text{ m/s}^2$ ist. Die Bruchkraft wird mittels Zugprüfmaschine L&W SE062 nach ISO 1924-2 ermittelt und trägt die Einheit Newton N . Die Messung wird an Streifen mit einer Breite b von 15 mm durchgeführt.

$$R = \frac{F_B}{b \cdot FbM \cdot g} \text{ [m]} \quad (3.10)$$

Ergebnisse

Im Zuge dieser Arbeit wurden drei Versuchsblöcke durchgeführt. Der erste Versuchsblock hatte die fraktionierte Mahlung von drei Zellstoffen für verschiedene Fraktionsverhältnisse zu jeweils aufsteigenden Mahlintensitäten zum Inhalt. Im zweiten Versuchsblock wurde die getrennte Verwendung von feiner- und grober Fraktion untersucht. Abschließend ergab sich auf Grund der Ergebnisse aus den beiden anderen Versuchsblöcken ein dritter abschließender Durchgang. Hierbei wurde ein Stoff hergestellt, welcher bei der Mahlung kaum kurze Fasern und Feinstoffe enthielt. Nach der Mahlung wurden die Feinstoffe zu größtem Teil entfernt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den Versuchen diskutiert. Dabei ist zu beachten das zur besseren Übersicht der eingesetzte Referenzstoff in den Legenden immer angegeben ist auch wenn die Daten der Referenz nicht immer dargestellt werden. Für die Faserlängenverteilung wird, wie in Abschnitt 3.4.2 definiert, ausschließlich die längengewichtete Faserlängenverteilung verwendet.

4.1 Fraktionierte Mahlung

4.1.1 Ungebleichter Langfaser Sulfat Zellstoff (UBSK)

Die praktische Durchführung und die Analyse dieses Faserstoffes erfolgte in Kooperation mit RAFAEL GINER TOVAR der sich im Zuge seiner Dissertation [1] mit der Fraktionier-

ten Mahlung auseinander setzte. Einige der nachfolgend gezeigten Ergebnisse wurden für diese Diplomarbeit entnommen um das Gesamtbild zu vervollständigen

Untersucht wird initial nasser UBSK mit einer Kappa-Zahl $\kappa \sim 45$, entnommen an der Waschpresse nach der Kochung bei einem Trockengehalt von ca. 35 %. Die Fraktionierung erfolgt wie in Abschnitt 3.2 beschrieben einstufig für die Fraktionsverhältnisse laut Tabelle 4.1.

Für die in Abschnitt 3.2.1 vorgegeben Fraktionen ergeben die erhaltenen Massenverhältnisse entsprechend Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1 Erstellte Fraktionen der Versuchsreihe UBSK

Probe	Fraktionsverhältnis	
	Vorgabe	Erhalten
REF	unfraktioniert	
1	80 / 20	80,8 / 19,2
2	70 / 30	72,4 / 27,6
3	60 / 40	58,6 / 41,4

Abbildung 4.1 zeigt die Faserlängenverteilung der groben und feinen Fraktionen nach der Trennung. Für die Fraktion 80/20 liegen leider keine Daten vor da die Messung für diese Proben aufgrund eines technischen Gebrechens ohne Ergebnis blieben.

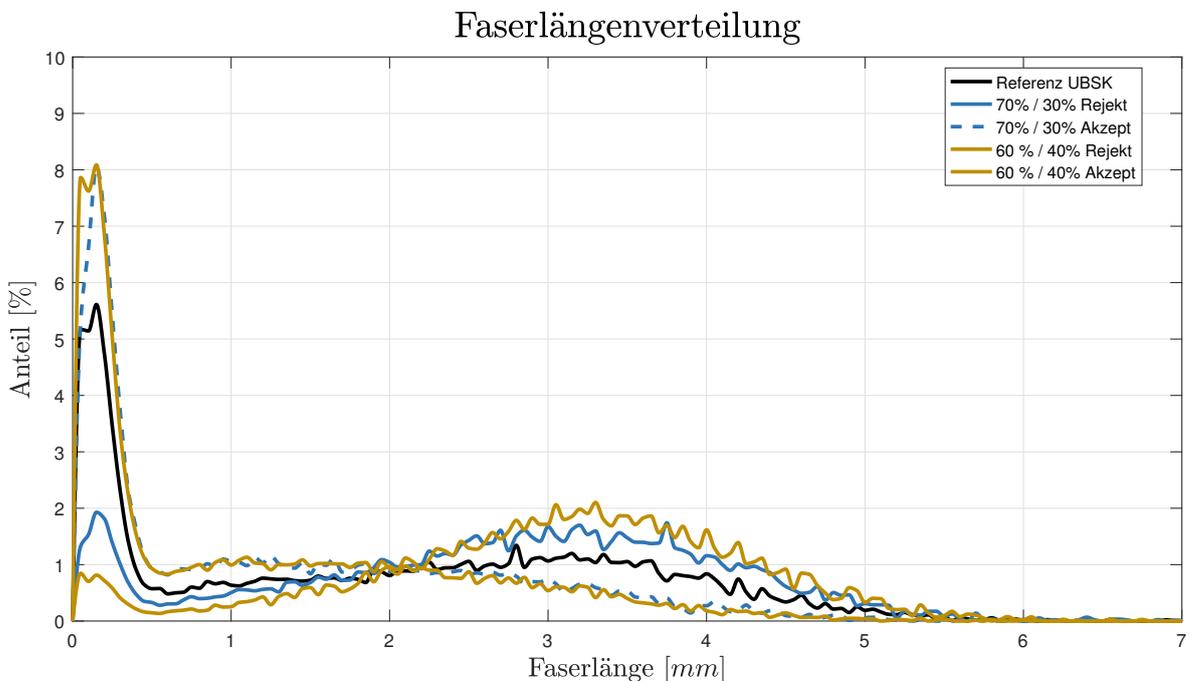


Abbildung 4.1 Faserlängenverteilung durch die Fraktionierung im Vergleich zur unfraktionierten Referenz für UBSK

Die Schlussfolgerungen zu dieser Versuchsreihe entstammen zum Teil wie auch der Versuch selbst der Dissertation[1] von RAFAEL GINER TOVAR .

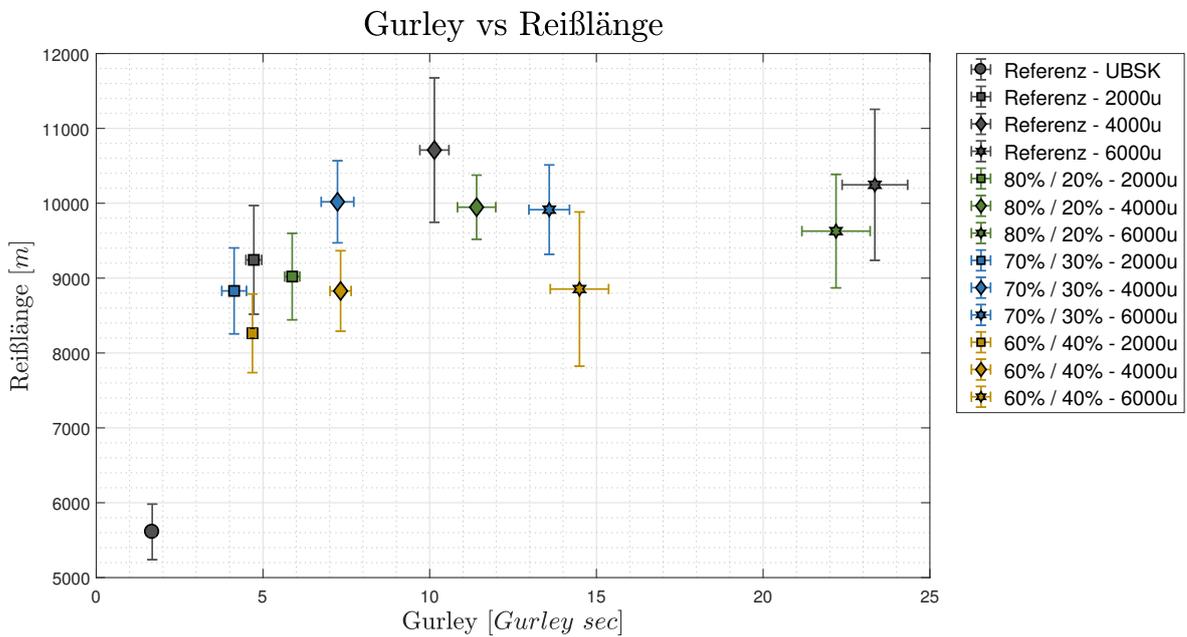


Abbildung 4.2 Gurley vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von UBSK

Es kann gezeigt werden, dass der unfraktionierte Stoff für jeden Mahlpunkt die höchste Reißlänge aufweist (Abb. 4.2). Die Reißlänge entwickelt sich bei höherer Fraktionierung deutlich schlechter [1]. Dies ist dadurch zu begründen, dass ein immer geringerer Anteil an Fasern flexibilisiert wird und dadurch die Bindungsfähigkeit aufgrund der steifen Fasern sinkt. Allgemein zeigt sich, dass die Reißlänge ab 4000u nicht weiter entwickelt [1] und sich nur noch die Luftdurchlässigkeit verschlechtert. Auffällig ist das der Gurley für die Fraktionen 70/30 und 60/40 wesentlich besser ist als für die Referenz und die Fraktion 80/20. Dieser Umstand lässt sich dadurch erklären, dass für die beiden erst genannten Fraktionen deutlich weniger Feinstoff entsteht [1]. Für die Fraktion 70/30 ist jedoch eine bessere Luftdurchlässigkeit bei 2000u und 4000u im Vergleich zur Referenz bei ähnlicher Reißlänge gegeben [1]. Ein Optimum zwischen hoher Reißlänge bei hoher Porosität ist für das Fraktionsverhältnis 70/30 und 4000u auszumachen[1].

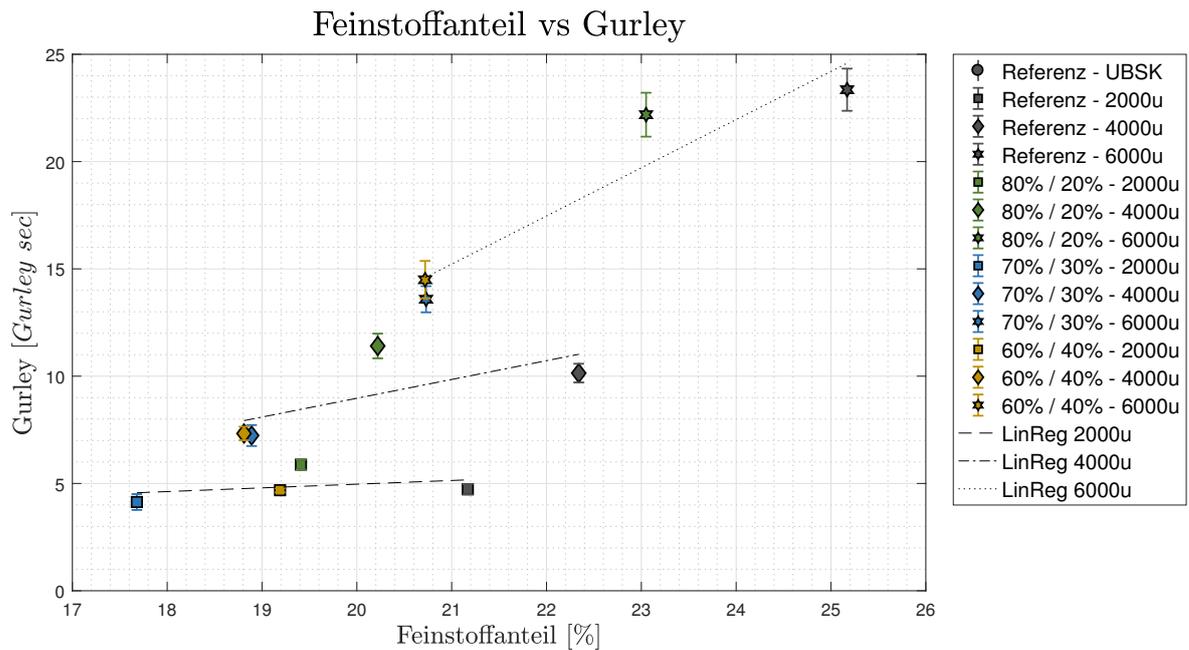


Abbildung 4.3 Feinstoffanteil vs Gurley der fraktionierten Mahlung von UBSK

Betrachtet man den Gurley als Funktion des Feinstoffanteils (Abb. 4.3), so kann gezeigt werden, dass sich je nach geleisteter Mahlarbeit ein linearer Zusammenhang der Luftdurchlässigkeit zum Feinstoffanteil einstellt. Bei geringerer Mahlintensität ist durch den Feinstoffanteil kaum Einfluss auf den Gurley gegeben. In diesem unteren Bereich kann die Annahme getroffen werden, dass sich neben möglichen anderen Parametern die Faserflexibilität dominierend auf die Luftdurchlässigkeit auswirkt. Der Schluss auf die Faserflexibilität kann gezogen werden, da aus Abbildung 4.5 hervorgeht, dass es kaum zu Faserkürzung kommt. Somit hat die Mahlung hauptsächlich auf die Flexibilität der Faser Auswirkung.

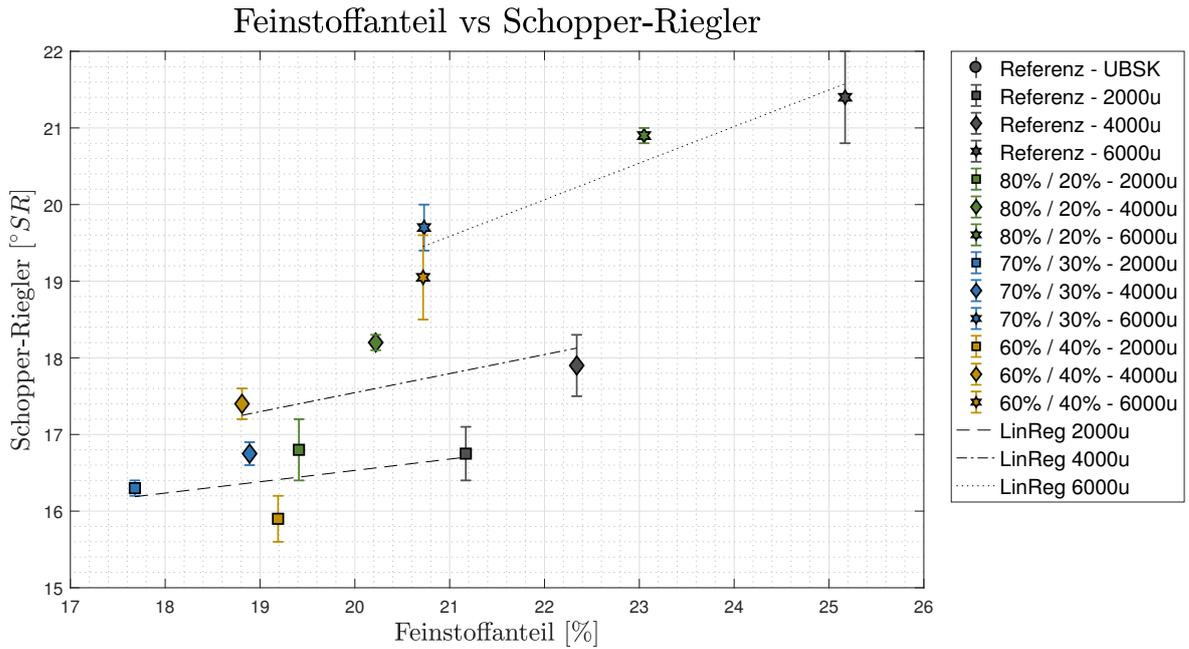


Abbildung 4.4 Feinstoffanteil vs Schopper-Riegler der fraktionierten Mahlung von UBSK

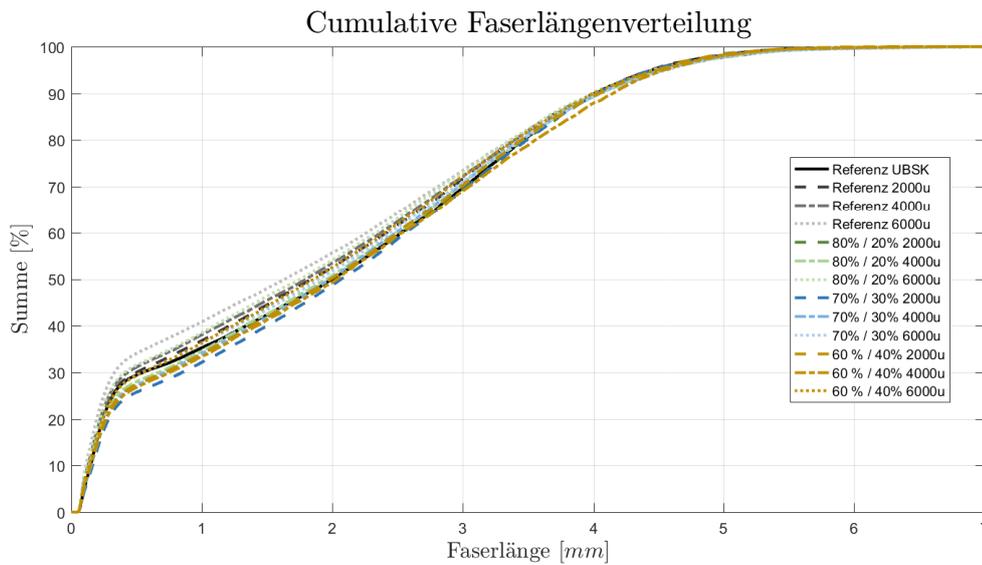


Abbildung 4.5 Kumulative Faserlängenverteilung der fraktionierten Mahlung von UBSK

Der Mahlgrad zeigt analoges Verhalten zur Luftdurchlässigkeit vergleicht man ihn mit dem Feinstoffanteil (siehe Abb. 4.4). Diese Analogie legt nahe, dass sich für das Fraktionsverhältnis 70/30 bei 4000u eine akzeptable Reißlänge bei sehr guter Entwässerbarkeit ergibt. Diese Annahme wird durch Abbildung 4.6 bestätigt.

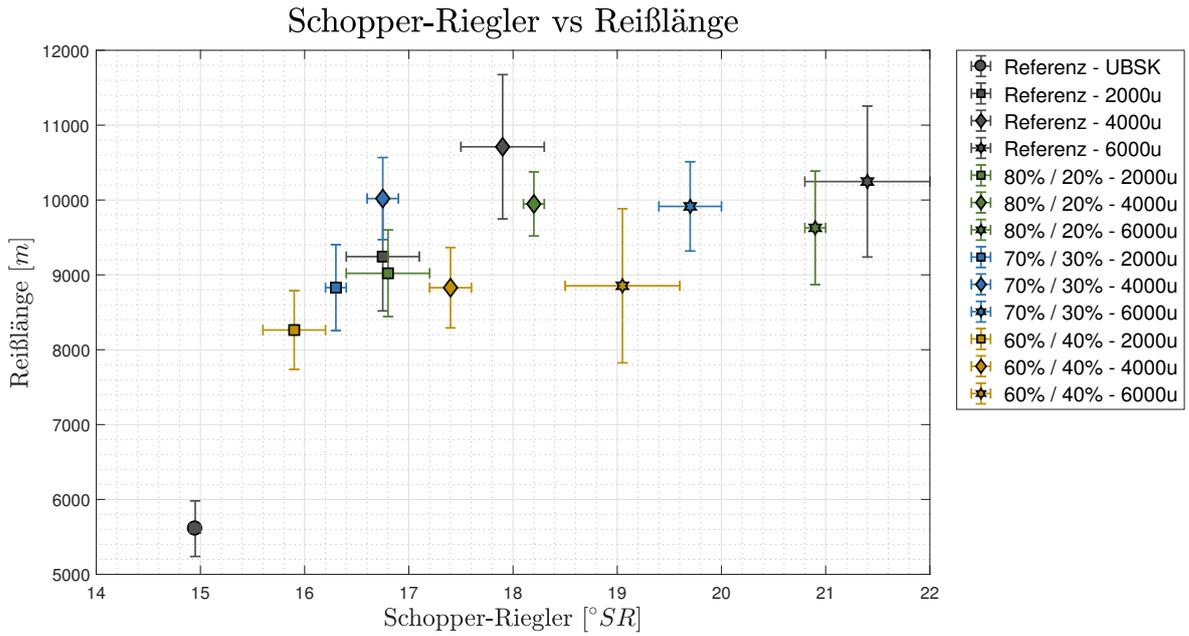


Abbildung 4.6 Schopper-Riegler vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von UBSK

Für die Reißlänge ergibt sich eine lineare Abhängigkeit von der Dichte mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9133 (siehe Abb. 4.7). Diese Erkenntnis motiviert den Folgeversuch, welcher im Abschnitt 4.2 durchgeführt wird.

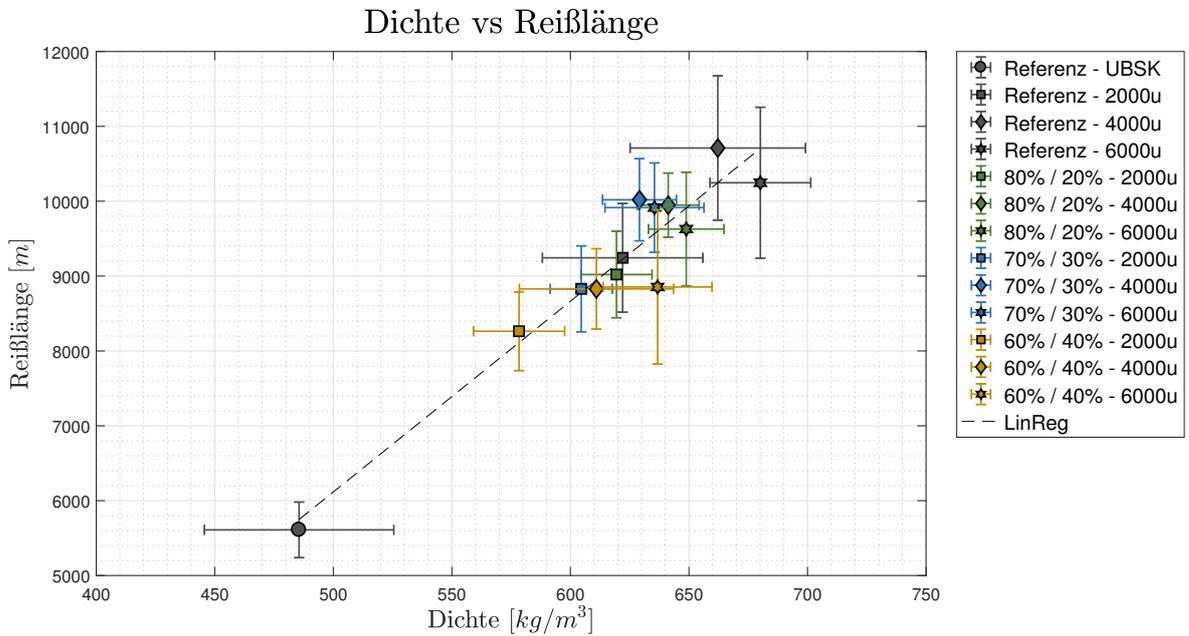


Abbildung 4.7 Dichte vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von UBSK

4.1.2 Gebleichter Langfaser Sulfat Zellstoff (BSK)

Für den gebleichten Sulfat Zellstoff ergeben sich die Fraktionen laut Tabelle 4.2. Dies entspricht nicht der Vorgabe aus Abschnitt 3.2.1. Es war nicht möglich mit der einstufigen Konfiguration ein Fraktionsverhältnis von 60/40 herzustellen. Aufgrund dessen, wurde entschieden stattdessen eine Fraktion mit dem Verhältnis 90/10 herzustellen.

Tabelle 4.2 Erstellte Fraktionen der Versuchsreihe BSK

Probe	Fraktionsverhältnis	
	Vorgabe	Erhalten
REF	unfraktioniert	
1	90 / 10	90,7 / 9,3
2	80 / 20	78,8 / 21,2
3	70 / 30	72,3 / 27,7

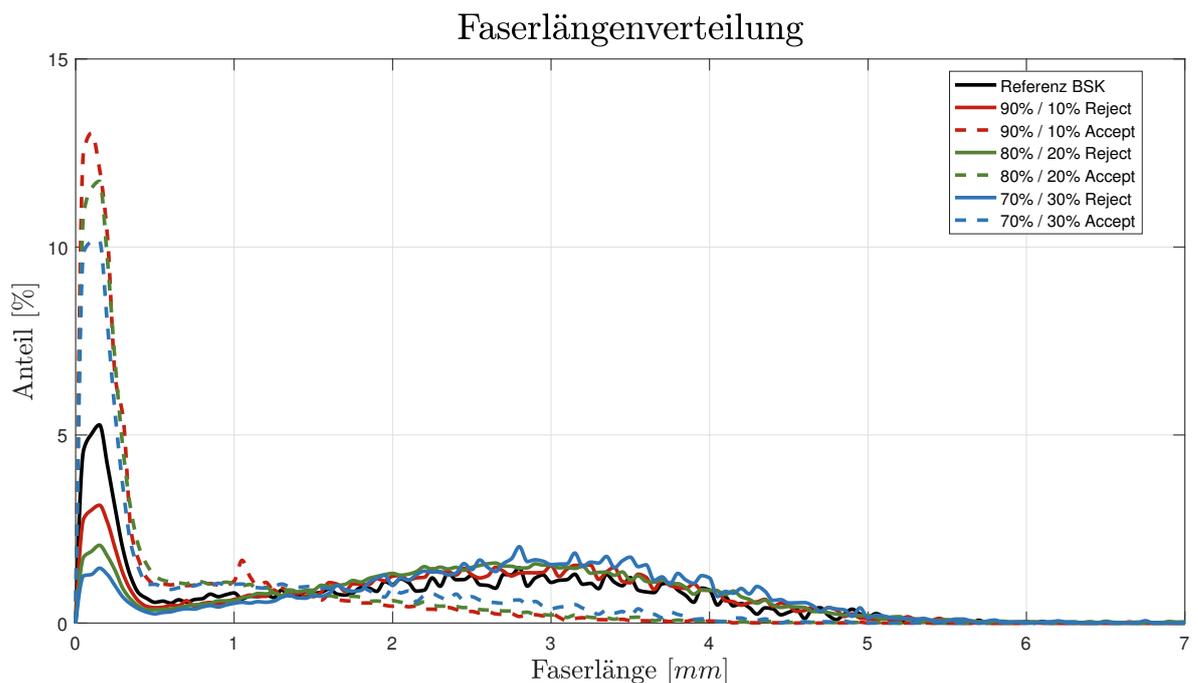


Abbildung 4.8 Faserlängenverteilung durch die Fraktionierung im Vergleich zur unfraktionierten Referenz für BSK

Vergleicht man die Faserlängenverteilung von diesem Zellstoff (Abb. 4.8) mit der des vorangegangenen Versuches (Abb. 4.1), so wird deutlich, dass sich für den BSK weniger lange Fasern im Akzept wieder finden als für den UBSK. Der Grund dafür könnte paradoxer Weise die Faserflexibilität sein. Normalerweise möchte man annehmen, dass eine flexiblere Faser

leichter das Sieb passieren würde als eine steife. Die Siebe von industriellen Sortieren sind mit profilierten Siebstäben ausgestattet. Diese erzeugen ein sehr ausgeprägtes Strömungsprofil, welches die Faser um die Stabkante durch den Siebschlitz führt. Im Gegensatz dazu ist das Sieb des Versuchssortierers ein Lochsieb. Das gebohrte Siebblech weist nur eine Stärke von $0,6 \text{ mm}$ auf und die $1,2 \text{ mm}$ Bohrungen liegen sehr nahe nebeneinander. Dadurch stellt sich kein so ausgeprägtes Strömungsprofil ein. Beobachtungen am Sieb nach dem Fraktioniervorgang zeigen, dass sich die Fasern um die Stege zwischen den eng beieinander liegenden Bohrungen gewickelt haben. Dadurch wird die Durchtrittsfläche des Siebes verringert. In diesem Fall ist der Saugpuls des Rotors nicht in der Lage das Sieb von diesen Fasern zu befreien wodurch sich die vorliegende Abtrennung ergibt.

Für die Reißlänge ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim UBSK. Wie zu erwarten erreicht auch für diesen Stoff die Referenz die höchsten Werte (Abb. 4.9). Über $4000u$ kann die Reißlänge für die Referenz und die Fraktionen 90/10 und 70/30 nicht mehr weiter gesteigert werden. Es kommt lediglich zu einer drastischen Abnahme der Luftdurchlässigkeit die ohnehin bereits geringer ist als für den UBSK. Dies ist durch die deutlich höhere Dichte (Abb. 4.13) zu erklären, die von der höheren Flexibilität der gebleichten Fasern ($\kappa \sim 3$), im Gegensatz zum ungebleichten Stoff mit $\kappa \sim 45$, herrührt.

Ein Optimum für das Verhältnis Reißlänge zu Gurley ist für diesen Stoff durch fraktionierte Mahlung in dieser Versuchsreihe nicht auszumachen. Weiters ist auch keine Energieersparnis zu erreichen. Mit geringeren Fraktionsverhältnissen erreicht man annehmbare Reißlängen auch nur durch hohe spezifische Mahlarbeit. Dies deckt sich nicht mit den Beobachtungen von KOSKENHELY ET AL. [23], wo eine Verbesserung der Festigkeiten durch fraktionierte Mahlung erreicht wurde. Dazu verschlechtert sich die Luftdurchlässigkeit durch die hohe Mahlung.

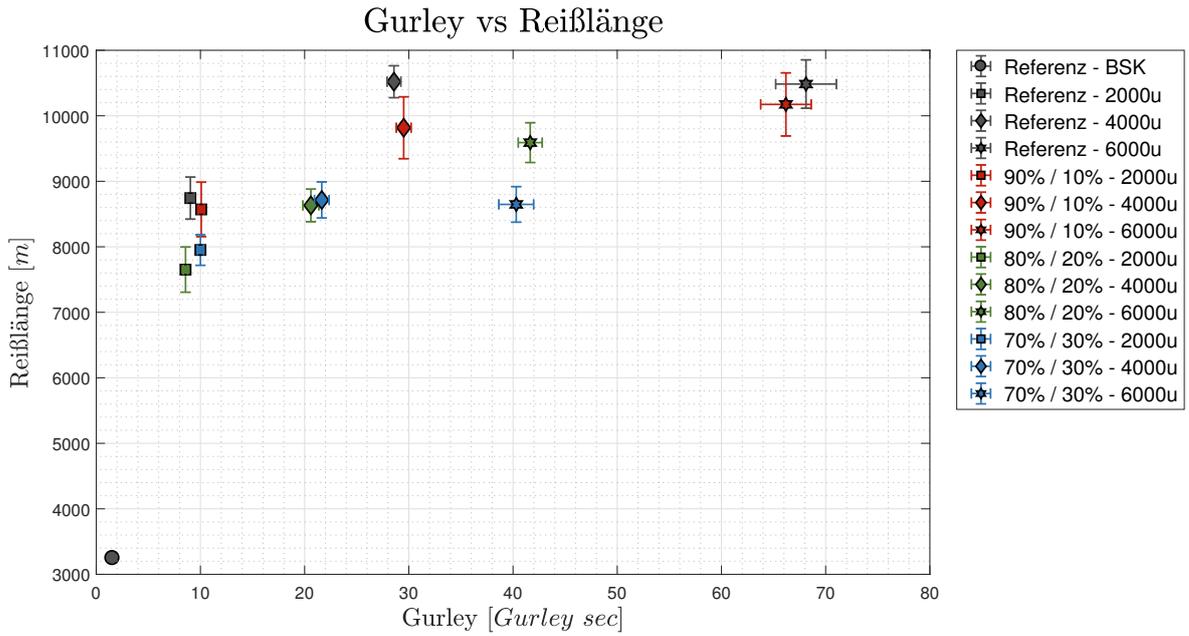


Abbildung 4.9 Gurley vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von BSK

Der Schopper-Riegler (Abb. 4.10) geht auch hier wieder Hand in Hand mit der Luftdurchlässigkeit. Damit ist durch die fraktionierte Mahlung für diesen Stoff auch im Bereich der Entwässerung keine Profit zu erzielen.

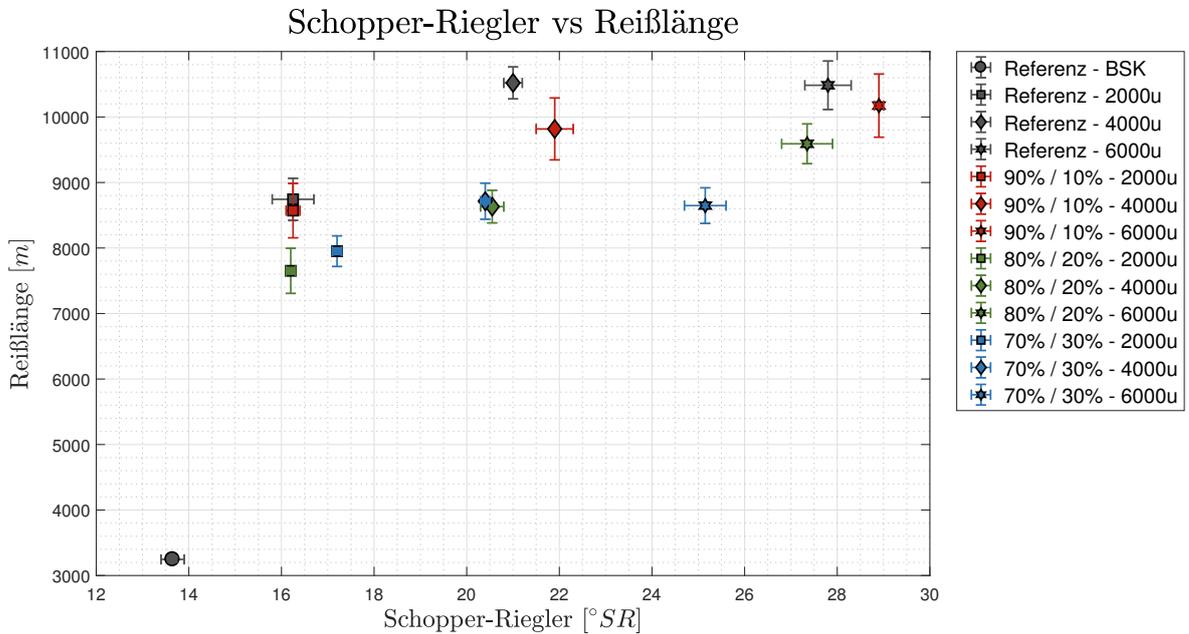


Abbildung 4.10 Schopper-Riegler vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von BSK

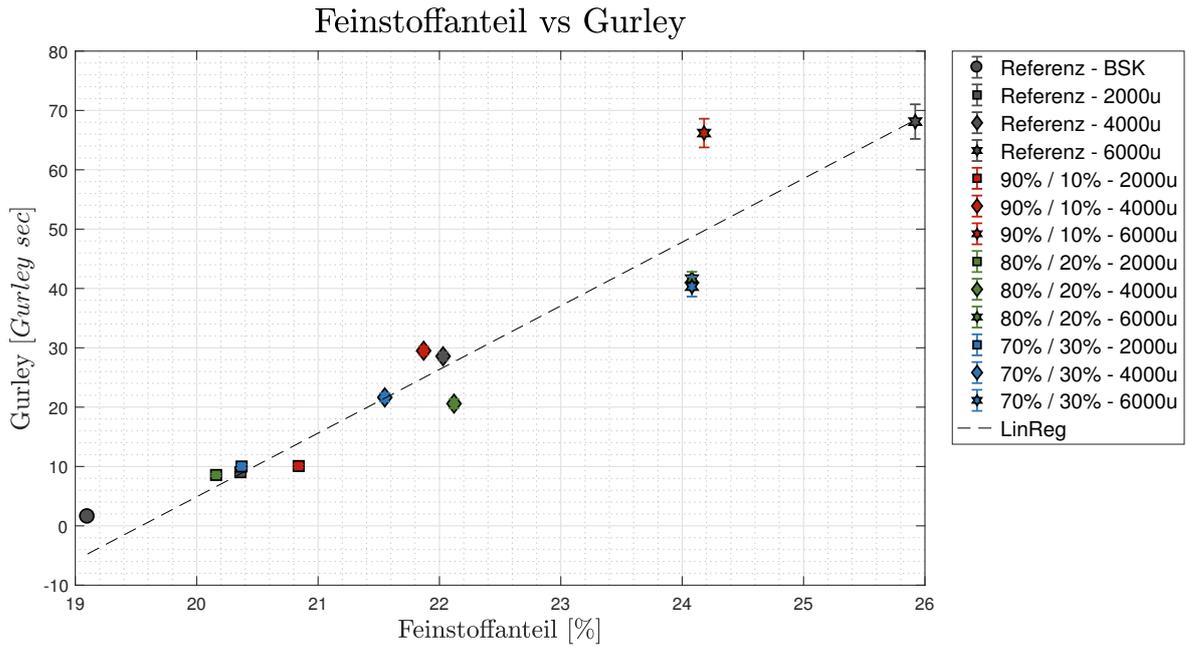


Abbildung 4.11 Feinstoffanteil vs Gurley der fraktionierten Mahlung von BSK

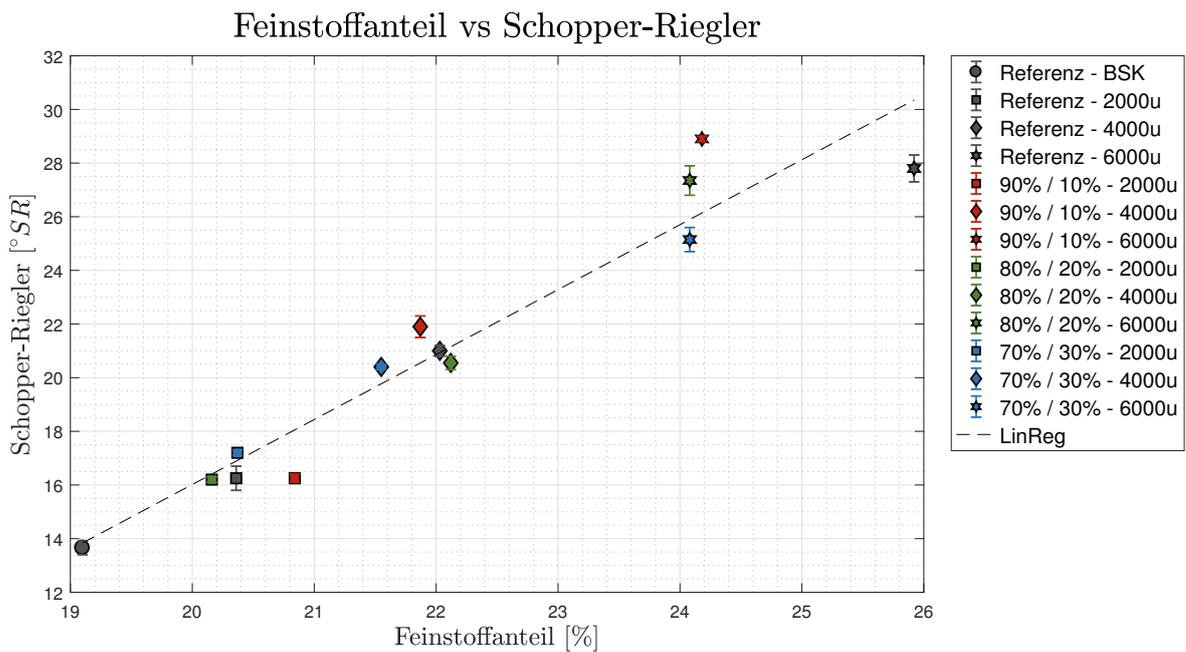


Abbildung 4.12 Feinstoffanteil vs Schopper-Riegler der fraktionierten Mahlung von BSK

Interessant ist das vollständig anderes Beeinflussungsverhalten vom Feinstoff hinsichtlich Gurley (Abb. 4.11) und Schopper-Riegler (Abb. 4.12) im Vergleich zum ungebleichten Sulfatstoff. Während beim UBSK eine die Luftdurchlässigkeit und das Entwässerungsverhalten erst bei hoher Mahlung vom Feinstoff beeinflusst wird, ergibt sich für den BSK eine

sehr gute Korrelation zum Feinstoff mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von knapp über 0,9 über die gesamte Mahlkurve.

Abbildung 4.13 zeigt für diese Versuchsreihe wieder den eindeutigen Zusammenhang zwischen Dichte und Reißlänge. Es ist zu erwarten, dass auch andere Stoffe dieses Verhalten aufweisen, was in der nächsten Versuchsreihe mit dem gebleichten Sulfitstoff im Abschnitt 4.1.3 geprüft werden kann.

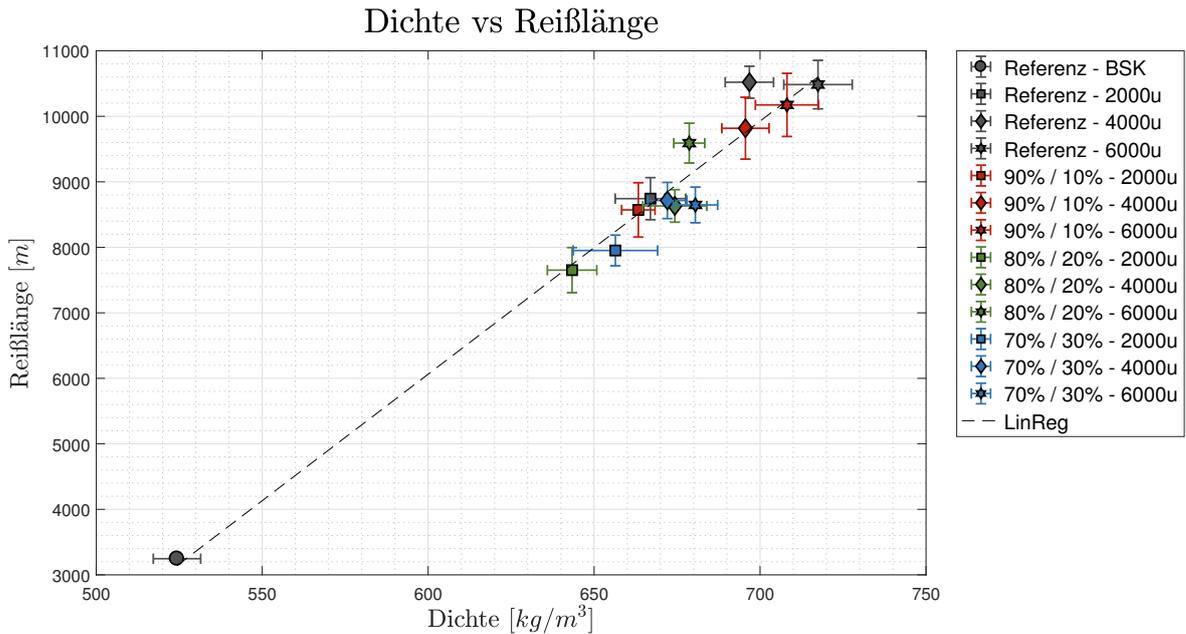


Abbildung 4.13 Dichte vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von BSK

4.1.3 Gebleichter Sulfit Mischzellstoff (ECO)

Für den gebleichten Sulfitmischzellstoff (ECO) wurden nur zwei Fraktionsverhältnisse 80/20 und 70/30 untersucht. Tabelle 4.3 zeigt die tatsächlich erreichten Teilungsverhältnisse, welche die Faserlängenverteilung laut Abbildung 4.14 aufweisen. Der Kurzfaserteil der Mischkochung mit 10 *gew* % Laubholz ist in der Faserlängenverteilung bei ca. 0.8 μm deutlich auszumachen.

Tabelle 4.3 Erstellte Fraktionen der Versuchsreihe gebleichter Sulfit Mischzellstoff

Probe	Fraktionsverhältnis	
	Vorgabe	Erhalten
REF	unfraktioniert	
1	80 / 20	83,3 / 16,6
2	70 / 30	72,6 / 27,4

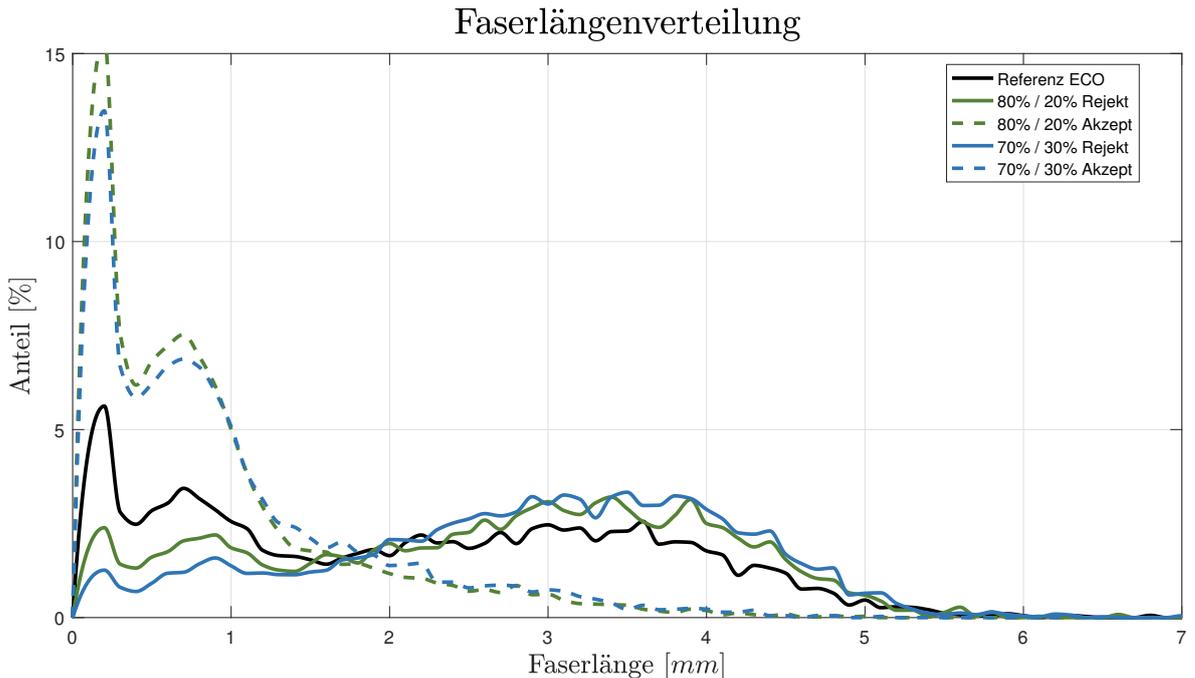


Abbildung 4.14 Faserlängenverteilung durch die Fraktionierung im Vergleich zur unfraktionierten Referenz für ECO

Während die unterschiedlichen Fraktionen für die Sulfat Zellstoffe durch Betrieb mit unterschiedlichen Druckverhältnissen zwischen Akzept und Rejekt erzielt wurden, können die beiden unterschiedlichen Fraktionen für den Sulfite Stoff ausschließlich durch zweistufige Fahrweise, wie sie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wird, erreicht werden. Nun ist Zellstoff der nach dem Sulfiteverfahren hergestellt wird, eher spröde und wenig flexibel gegenüber Sulfatzellstoff [5]. Im Gegensatz zum BSK kommt es hier nicht zum dauerhaften Verlegen des Siebes, dennoch scheinen die Sulfitezellstofffasern dem Akzeptstrom schlechter folgen zu können als die UBSK Fasern. Das verwendete Sieb scheint bezüglich der Faserflexibilität sehr sensibel zu sein und dadurch Stoffabhängig sehr unterschiedliche Fraktionsverhalten aufzuweisen. Unterschiedliche Druckverhältnisse können das Verhalten für diesen Zellstoff nicht beeinflussen, wodurch unterschiedliche Trennverhältnisse nur durch unterschiedliche Stufenzahlen erreicht werden.

Für Gurley und Reißlänge ergeben sich übereinander liegende Kurvenscharen, welche in Abbildung 4.15 durch die von Hand gezogenen Linien illustriert werden sollen. Umso größer die Aufteilung der Fraktionen wird, desto schlechter wird auch die Reißlänge. Umso weniger vom Stoff gemahlen wird, desto weniger feines Material entsteht. Für den Sulfitezellstoff ist es notwendig die gesamte Masse der Mahlung zu unterziehen um die maximale mechanische Festigkeit zu erzielen.

Mit steigender Mahlarbeit bleibt lediglich die Luftdurchlässigkeit bei einem Fraktionsverhältnis von 72,6 % / 27,4 % deutlich höher als bei der Referenz. Vorteil durch die fraktionierte Mahlung bleibt für den gebleichten Sulfitzellstoff aus. Das Erreichen des Reißlängenmaximums wird, wie erwartet aufgrund der geringeren Mahlresistenz des Sulfitzellstoffes [2, 5, 8] schon bei geringeren Mahlintensitäten als bei Kraftzellstoffen erreicht. Um den Teil des Stoffes

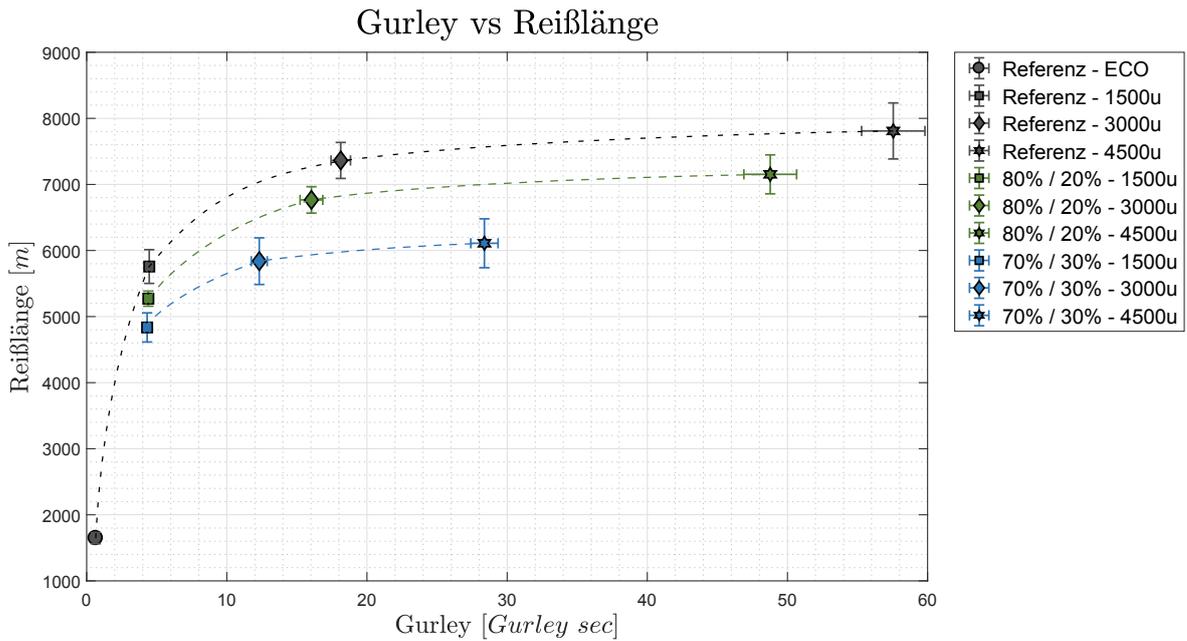


Abbildung 4.15 Gurley vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von ECO

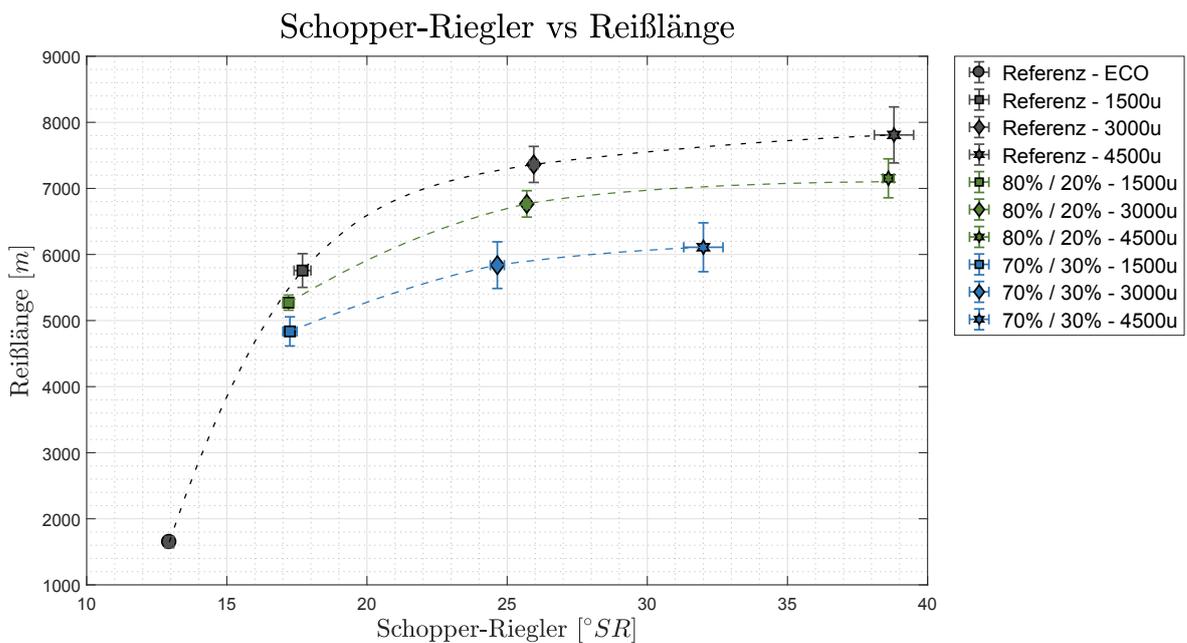


Abbildung 4.16 Schopper-Riegler vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von ECO

Die Handgezogenen Linien in Abbildung 4.16 zeigen, dass das Entwässerungsverhalten der Luftdurchlässigkeit folgt.

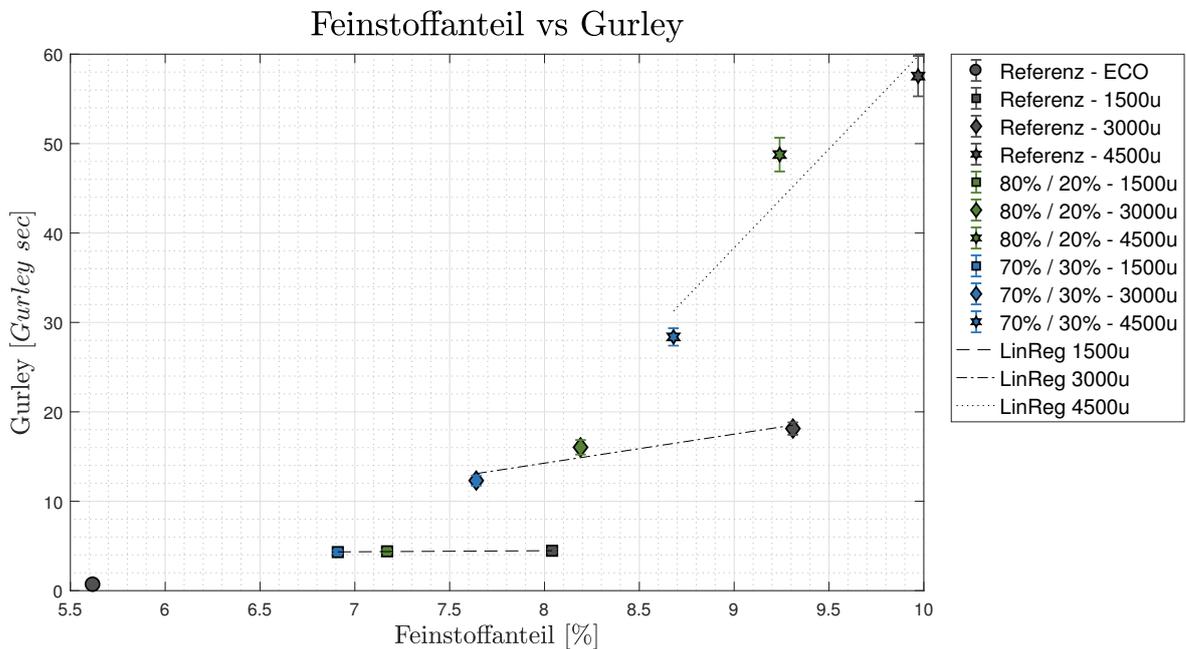


Abbildung 4.17 Feinstoffanteil vs Gurley der fraktionierten Mahlung von ECO

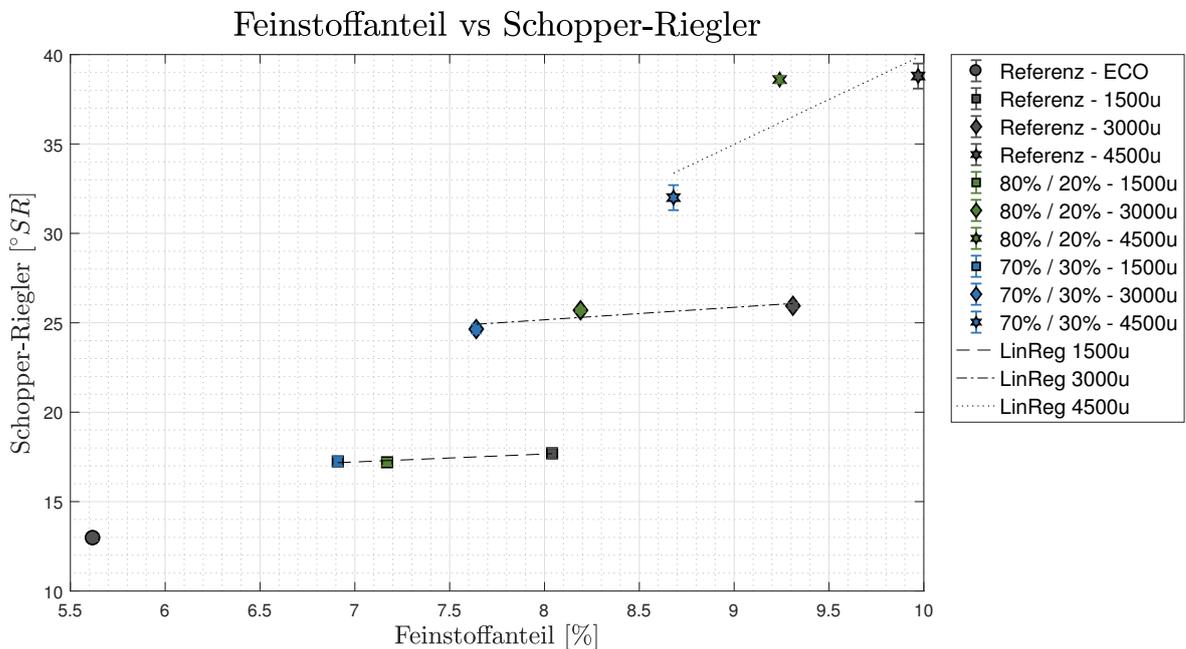


Abbildung 4.18 Feinstoffanteil vs Schopper-Riegler der fraktionierten Mahlung von ECO

Für Gurley und Schopper-Riegler in Bezug auf Feinstoff ergibt sich ein ähnliches Bild wie für den UBSK ist. Jedoch ist es in diesem Fall nicht die Faserflexibilisierung durch die stei-

gende Mahlarbeit für dieses Ergebnis maßgebend. Aufschluss darüber gibt die Abbildung 4.19, worin deutlich wird das mit steigender Mahlintensität die Faserkürzung zu nimmt.

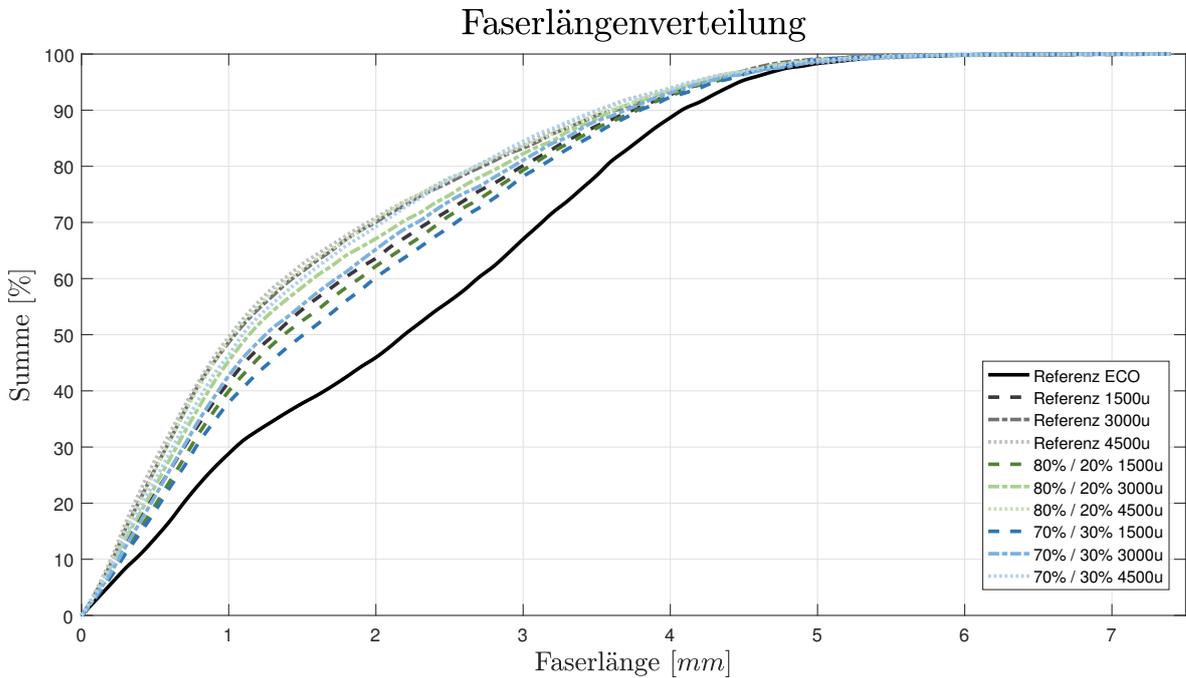


Abbildung 4.19 Kumulative Faserlängenverteilung der fraktionierten Mahlung von ECO

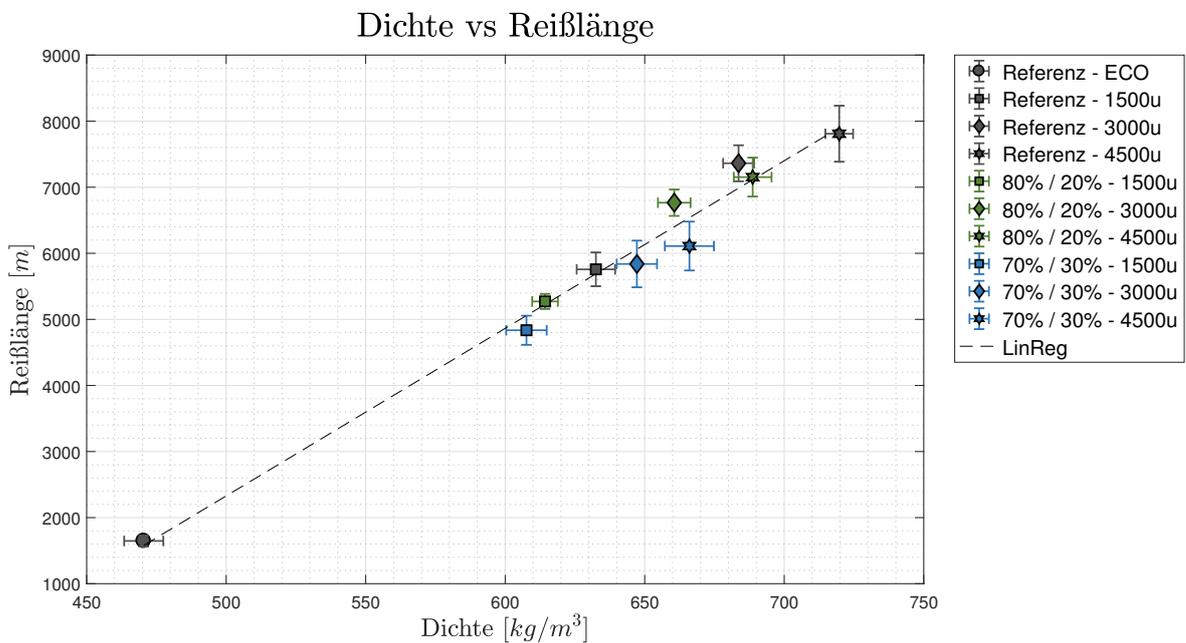


Abbildung 4.20 Dichte vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von ECO

An dieser Stelle kann durch Abbildung 4.20 bewiesen werden dass der eindeutige Zusammenhang zwischen Dichte und Reißlänge für Langfasernetzwerke gilt. Es ergibt sich jedoch ein Unterschied in den Absolutwerten zwischen den drei Versuchsreihen. Aus die-

sem Grund kann festgehalten werden, dass die Steigung und der Ordinatenabstand der Regressionsgeraden von den jeweiligen Stoffeigenschaften abhängig sind.

4.1.4 Fazit

Um den Unterschied im Verhalten der Luftdurchlässigkeit und Entwässerung im Hinblick auf Feinstoffe, Faserflexibilität und Kurzfasergehalt erklären zu können zeigt Abbildung 4.21 die Formation der Laborblätter aus den drei verwendeten Stoffen, welche durchaus für die Unterschiede mitverantwortlich sein könnte. Bei rein visueller Beurteilung der Aufnahmen ist das Sinken der Wolkigkeit vom ungebleichten- (Abb. 4.21a) über den gebleichten Kraftzellstoff (Abb. 4.21b) hin zum gebleichten Sulfitmischzellstoff (Abb. 4.21c) deutlich wahr zu nehmen. Der Sulfitstoff scheint durch den deutlich höheren Anteil an Kurzfasern eine bessere Formation zu erreichen und damit ein homogeneres Blatt zu bilden, welches keine hohen Entwässerungsraten und auch keine gute Luftdurchlässigkeit zulässt.

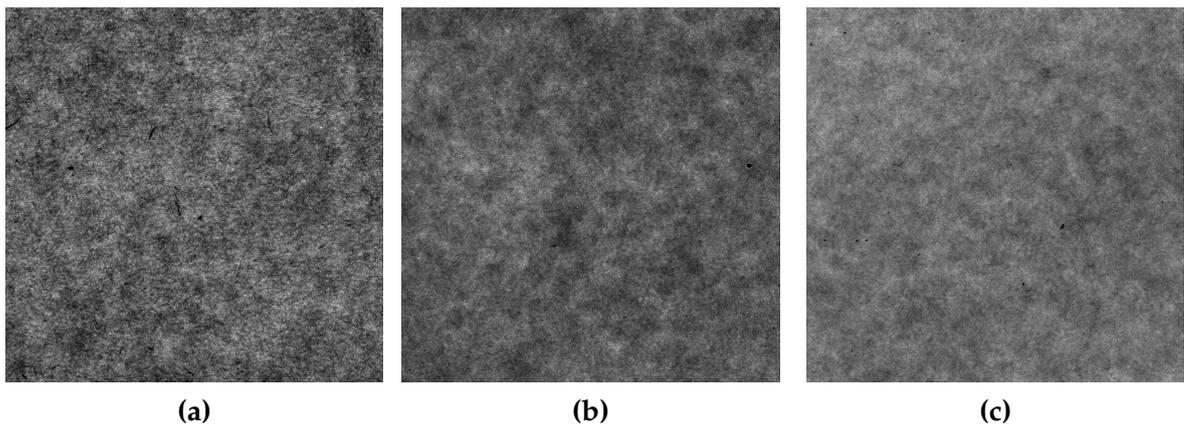


Abbildung 4.21 Vergleich der optischen Formation für a) UBSK, b) BSK und c) Sulfitzellstoff bei einem Fraktionsverhältnis von 70/30 und mittlerer spezifischer Mahlintensität

Abschließend ist zu dieser Versuchsreihe festzuhalten, dass die Fraktionierte Mahlung nur für den ungebleichten Kraftzellstoff einen Vorteil hinsichtlich Luftdurchlässigkeit zu Reißlänge bringt. Da sich dieses Optimum für die Fraktion 70/30 ergibt, kann für den Mahlvorgang selbst eine Energieersparnis von bis zu maximal 30 % erreicht werden, da nur noch 70 % des ursprünglichen Volumenstrom vom Refiner bewältigt werden müssen. Für die gebleichten Sulfit- und Sulfatzellstoffe kann durch die Fraktionierte Mahlung in dieser Versuchskonfiguration keine signifikante Verbesserung der Blatteigenschaften ausgemacht werden.

Die Fasern des ungebleichten Sulfatkraft mit einer Kappa-Zahl von ca. 45 weist im unge-

mahlen Zustand sehr steife Fasern auf. Die Mahlung dieses Stoffes hat einen sehr hohen Effekt auf das Fasermaterial, dem durch diesen Vorgang eine hohe Flexibilität verliehen wird. Im Gegensatz dazu hat der gebleichte Sulfatstoff bei einer Kappa-Zahl von ca. 3 bereits sehr flexible Fasern. Damit fällt dieser Effekt für den BSK wesentlich geringer aus. Damit muss der gesamte Stoff gemahlen werden, um sicherzustellen, dass ausreichend Fasern beansprucht und fibrilliert werden, um die notwendige Dichte zu erreichen. Wird nun die Reißlänge höher, steigt gleichzeitig jedoch auch der Gurley an. Für den gebleichten Sulfatstoff ergibt sich ein ähnliches Endergebnis, wenn auch aufgrund einer völlig anderen Ursache. Der Sulfatstoff ist wie bereits öfters in dieser Arbeit erwähnt als sehr spröde einzustufen. Bei der Mahlung dieses kaum flexiblen Stoffes kommt es vorwiegend zu Faserkürzungen. Je mehr Fasern gekürzt werden desto höher wird die Dichte des Blattes werden. Durch das kurze Fasermaterial steigt auch der Entwässerungswiderstand und der Gurley an. Wird durch die Fraktionierung weniger Stoff gemahlen, ergibt sich auch weniger kurzes Material, das die Luftdurchlässigkeit und den Schopper-Riegler negativ beeinflusst. Der Nebeneffekt ist aber auch die geringere Blattdichte, und diese ist wie eindeutig gezeigt für die Reißlänge verantwortlich.

Nachdem die Reißlänge von der Dichte abhängt, stellt sich die Frage ob die beiden Fraktionen für sich allein stehend nutzbare Eigenschaften aufweisen. Kann eine grobe Fraktion alleine eine akzeptable Reißlänge erzeugen und stellt sich dadurch eine sehr hohe Luftdurchlässigkeit ein? Die Ergebnisse aus dem Abschnitt 4.1.1 legen nahe, dass die Abwesenheit des feinen Materials bei der Mahlung, einen Vorteil für das Mahlergebnis der verbleibenden längeren Fasern erzeugt. Der hohe Grad der Flexibilisierung bringt eine gute Blattdichte und somit eine hohe mechanische Festigkeit. Ohne das feine Material wieder bei zu mischen, sollte die Porosität dadurch höher sein und somit ein Gewinn bezüglich Entwässerung und Luftdurchlässigkeit erzielbar sein. Sollte dieses Ziel erreicht werden können muss natürlich auch geklärt werden, ob die feine Fraktion für sich Verwendung findet, denn trennt man beispielsweise 30 % des Faserstoffes ab, würde das einen drastischen Verlust darstellen, könnte dieses Material nicht alternativ eingesetzt werden. Die nachfolgende Versuchsreihe soll diese Fragen klären.

4.2 Vergleich separat verarbeiteter grober und feiner Fraktion

Um ein Gefühl dafür zu bekommen wie sich die die Fraktionen unabhängig von einander verhalten wurde im Zuge der Dissertation[1] von RAFAEL GINER TOVAR die Grobe und die feine Fraktion getrennt untersucht. Dafür wird die im Abschnitt 4.1.1 als vielversprechend befundene Fraktionsverhältnis 70/30 gewählt.

Nach der Fraktionierung ergibt sich ein Massenverhältnis von 72,4 % grobes Material zu 27,6 % feines Material. Die beiden Fraktionen deren Faserlängenverteilung der Abbildung 4.22 zu entnehmen sind, werden wie in Abschnitt 3.2.2 separat gemahlen und hinsichtlich Stoffeigenschaften und physikalische Papiereigenschaften untersucht wie es auch für die vorausgegangene Versuchsreihe durchgeführt wurde. Während für die grobe Fraktion die Mahlpunkte bei 2000u, 4000u und 6000u durchgeführt werden, wird für die feine Fraktion der Punkt bei 6000u nicht evaluiert, da eine äußerst schlechte Entwässerung und stark verringerte Luftdurchlässigkeit zu erwarten sind.

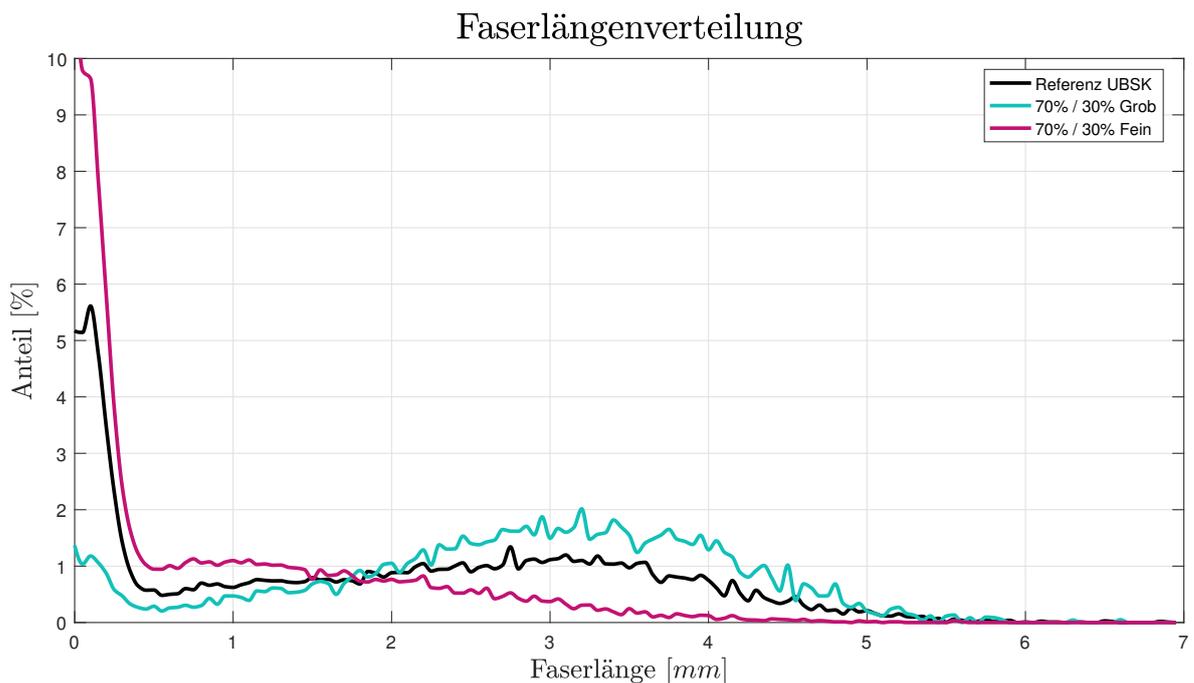


Abbildung 4.22 Faserlängenverteilung von UBSK für die separate Untersuchung von grober und feiner Fraktion

Abbildung 4.23 zeigt das Verhältnis zwischen Reißlänge und Gurley für die beiden Fraktionen sowie auch zum Vergleich die Referenz und die Ergebnisse für 70/30 aus den vorausgegangenen Versuchen. Der detaillierte Bereich der groben Fraktion wird in Abbildung 4.24 dargestellt.

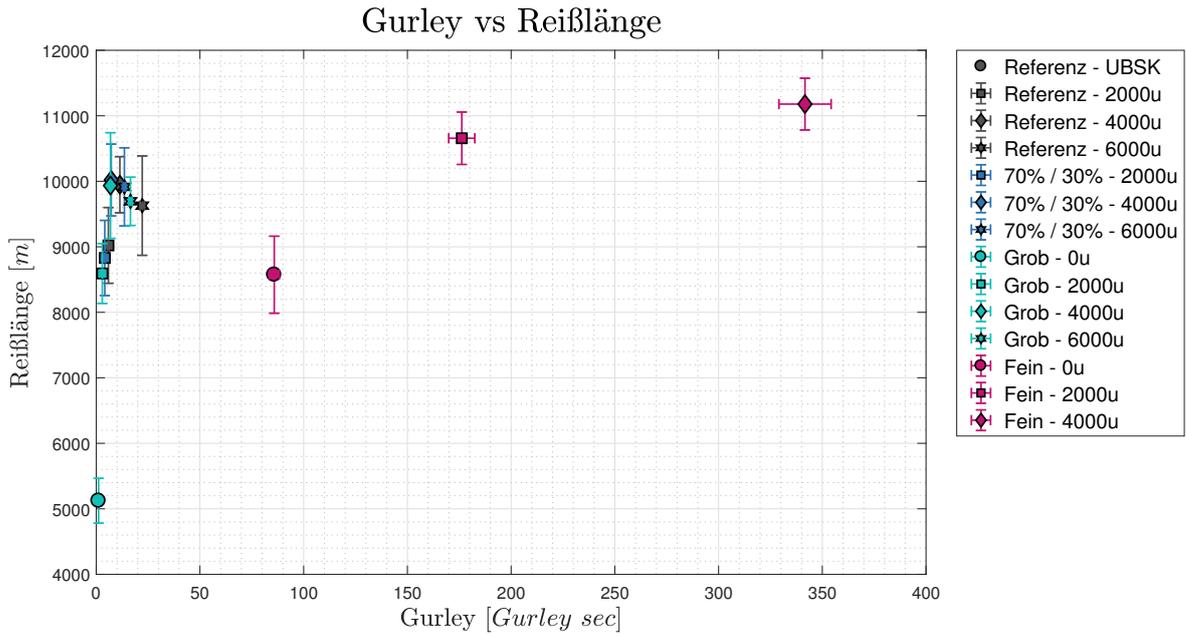


Abbildung 4.23 Gurley vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion

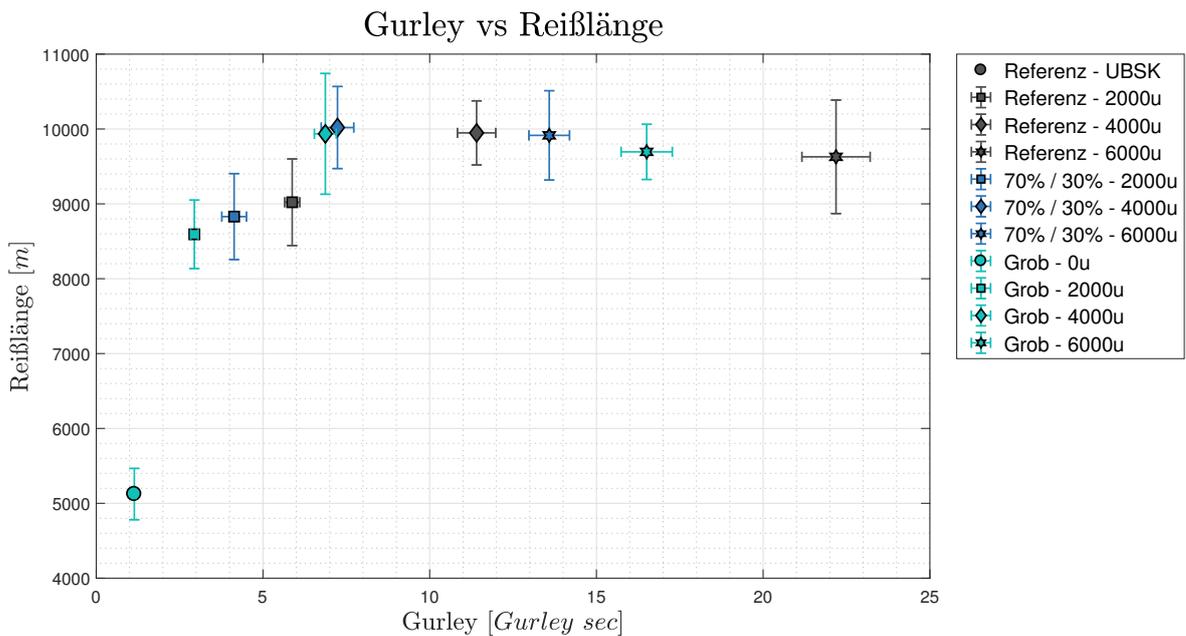


Abbildung 4.24 Gurley vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion

Auf den ersten Blick ergibt sich für die feine Fraktion eine deutlich höhere Reißlänge. Schon die ungemahlene feine Fraktion erzeugt eine Reißlänge auf Niveau der gemahlene groben Fraktion. Die sich in dieser Versuchsreihe ergebende maximale Reißlänge der feinen Fraktion bei 4000u ist um 10 % höher als die hoch gemahlene lange Fraktion.[1]

Die Luftdurchlässigkeit und der Entwässerungswiderstand sind, wie zu erwarten war, für

die kurze Fraktion drastisch schlechter [1]. Das eher kurze Material erzeugt eine wenig poröses Blatt. Für ein Produkt, welches hohe Glätte fordert und die Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit egal sind, oder gar eine sehr luftundurchlässiges Papier gewünscht wird, ergibt die feine Fraktion ein optimales Einsatzmaterial[1]. Bevor diese Fragestellung im Detail behandelt wird sollte geprüft werden ob überhaupt der Bedarf besteht. Die Abbildung 4.24 gibt Aufschluss in diesem Punkt. Ein direkter Vergleich des Mahlpunktes bei $4000u$ mit dem Punkt $70/30$ bei ebenfalls $4000u$ aus der Versuchsreihe in Abschnitt 4.1.1 bringt zumindest keinen Nachteil in dieser Betrachtung. Die Luftdurchlässigkeit kann tendenziell minimal verbessert werden.

Es kann dadurch Sinn machen, wenn zwei Papiermaschinen vorhanden wären, eine davon mit dem feineren Material zu beschicken. Die deutlich schlechtere Entwässerung sollte kein zu großes Problem darstellen, da die zu bewältigende Menge um einiges geringer ist und damit die Kurzfasermaschine langsamer betrieben werden kann und dabei den anfallenden Stoff dennoch zu verarbeiten vermag. Dies müsste natürlich anhand umfangreicher Bilanzen und detaillierten Untersuchungen des Entwässerungsverhaltens auf der Maschine geprüft werden.

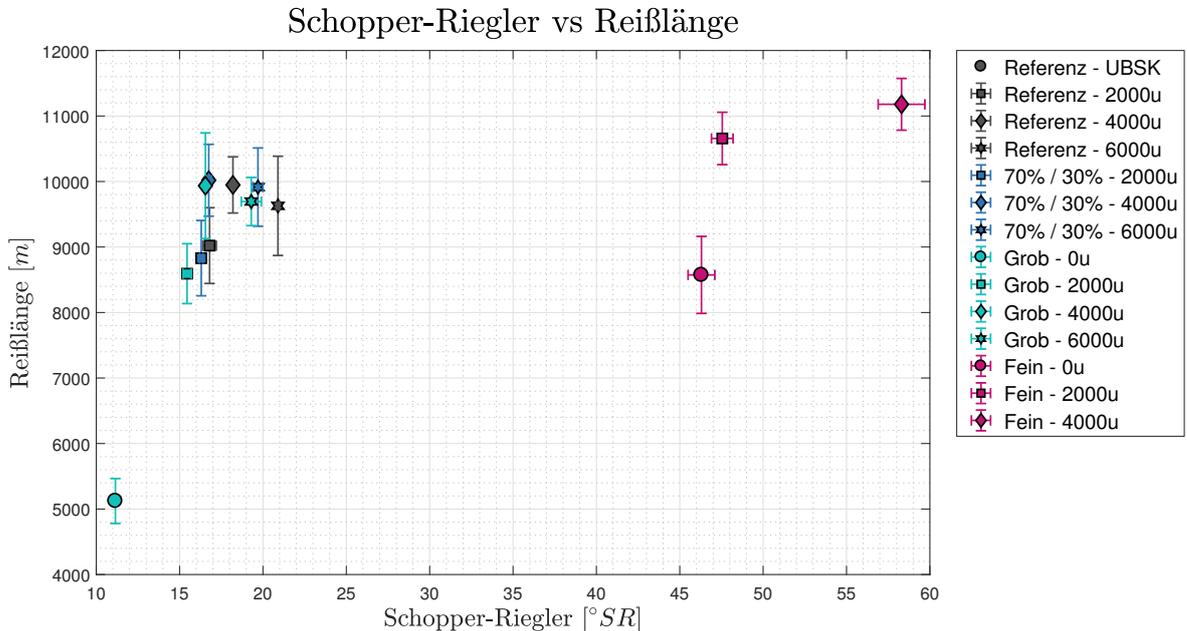


Abbildung 4.25 Schopper-Riegler vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion

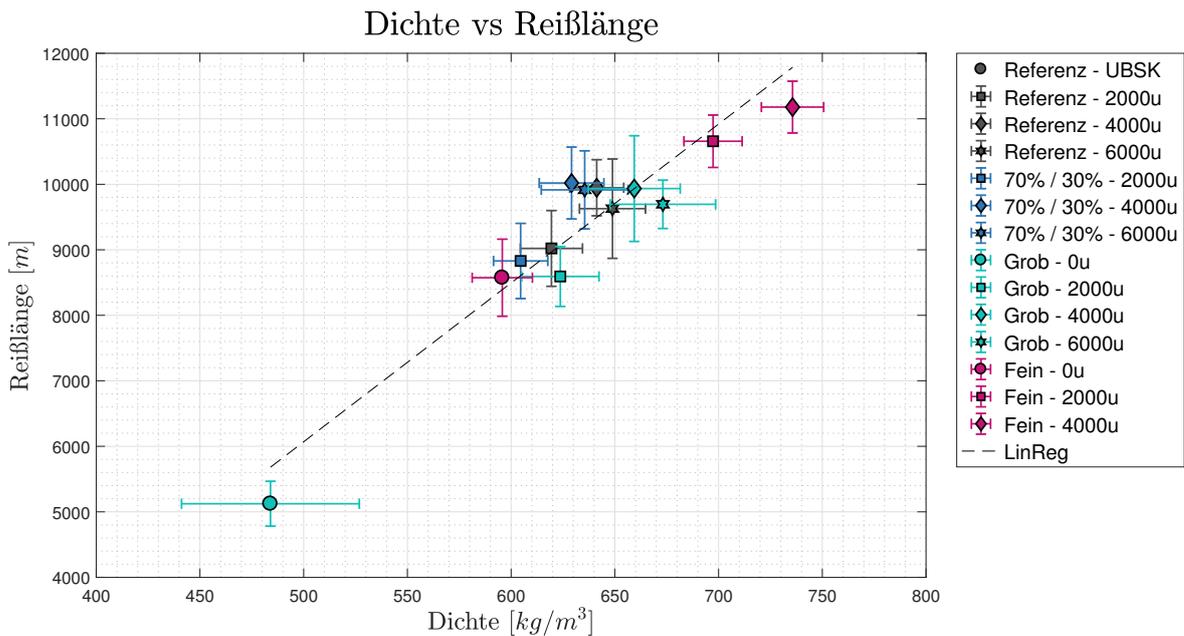


Abbildung 4.26 Dichte vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion

Der lineare Zusammenhang zwischen Reißlänge und Dichte kann auch für die aufgetrennten Fraktionen gezeigt werden. Mit der feinen Fraktion lässt sich wie erwartet, die höchste Blattdichte erzeugen und diese führt dazu, dass diese Blätter auch die höchste Reißlänge aufweisen. Für den ungemahlene grobe Stoff lässt sich durch den Mangel an feinem Material nur eine sehr geringe Dichte erzielen. Dadurch sind auch die mechanischen Festigkeiten sehr gering.

Diese lineare Abhängigkeit zwischen Dichte und Reißlänge wird allerdings nur unter Betrachtung eines Ausgangsstoffes erfüllt. Untereinander lassen sich die Stoffe kaum vergleichen, denn der gebleichte Sulfstoff kann bei gleicher Dichte nicht die mechanischen Eigenschaften des ungebleichten Sulfatstoffes erreichen. Damit sind Steigung und Ordinatenabstand der Geradengleichung stoffabhängige Parameter.

Die gemahlene grobe Fraktion enthält noch relativ große Mengen an Feinstoff und kurzen Fasern. Die Ergebnisse, die mit dieser Fraktion erzielt werden können liegen im Bereich der 70/30 Fraktion zu der der feine Anteil wieder beigemischt wurde. Mit Ausnahme der feinen Fraktion wo bis zu 11 km Reißlänge erreicht werden können, stellt sich das Festigkeitsniveau für diesen Stoff immer bei ca. 10 km Reißlänge ein.

Offen bleibt jedoch, ob sich dieser Trend verschiebt wenn man den Extremfall der Abwesenheit von Feinstoff und kurzen Fasern betrachtet. Es stellt sich somit die Frage, wel-

ches Fenster sich für die Parameter Reißlänge und Gurley ergibt. Wird die lange Faser schon ohne feinem Material stark gemahlen sollte diese sehr stark flexibilisiert werden. Die Faser-Faserbindungen müsste dadurch sehr ausgeprägt sein. Für die Dichte konnte gezeigt werden, dass der Feinstoffanteil keine übergeordnete Rolle spielt. Wird der Feinstoff nun nach der Mahlung entfernt müsste sich ein eher dichtes Blatt ergeben welches dennoch eine sehr hohe Porosität aufweist, was zu einer sehr guten Luftdurchlässigkeit führen müsste.

4.3 Herstellung hoch poröser Blätter

Nachdem im vorigen Abschnitt die Frage aufgeworfen wurde, welche Blatteigenschaften in Abwesenheit von Feinstoffen und kurzen Fasern für den UBSK erzielbar sind, wird nun im Zuge dieser Versuchsreihe der Extremfall gebildet und vor der Mahlung ein möglichst hoher Anteil der kurzen Fraktion aus dem Stoff entfernt. Nach zweistufiger Fraktionierung über das 1,6 mm Sieb, bleiben nur noch 47,45 gew% des eingesetzten Stoffes über. Abbildung 4.27 zeigt den Fraktionierungsfortschritt von der Referenz bis nach der zweiten Stufe. Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben wird das Akzept, welches die feine Fraktion darstellt, verworfen. Die grobe Fraktion aus dem Rejekt der zweiten Stufe wird gemahlen bevor anschließend in einem Durchlauf so viel Feinstoff entfernt wird wie möglich.

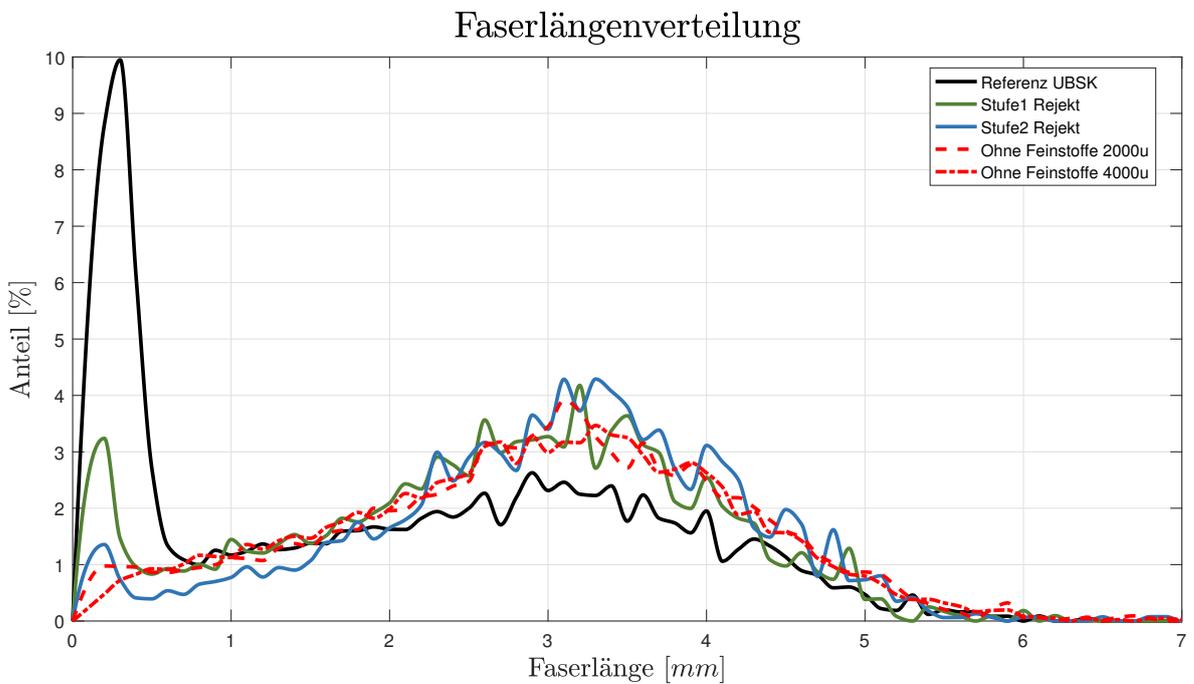


Abbildung 4.27 Faserlängenverteilung vor und nach der Fraktionierung des UBSK mit einem 1,6mm Lochsieb und die Verteilung der Faserlänge des gemahlten Stoffes nach Reduktion der Feinstoffe mittels 100 μm Sieb

Abbildung 4.28 zeigt die Reißlänge als Funktion der Luftdurchlässigkeit. Verglichen werden die vorangegangenen Werte für den ungebleichten Sulfatstoff mit den beiden erstellten Mahlpunkten des hoch ausgewaschenen Stoffes. Die beiden Punkte mit 4000u und 6000u liegen im Bereich zwischen 2000u und 4000u der Vergleichsproben. Die beiden Datenpunkte zeigen, dass das Fenster in dem sich Reißlänge und Gurley bewegen deutlich enger ist als anzunehmen war, wohingegen sich für die Entwässerung ein drastischer Unterschied ergibt, was später durch die Abbildung 4.30 deutlich wird.

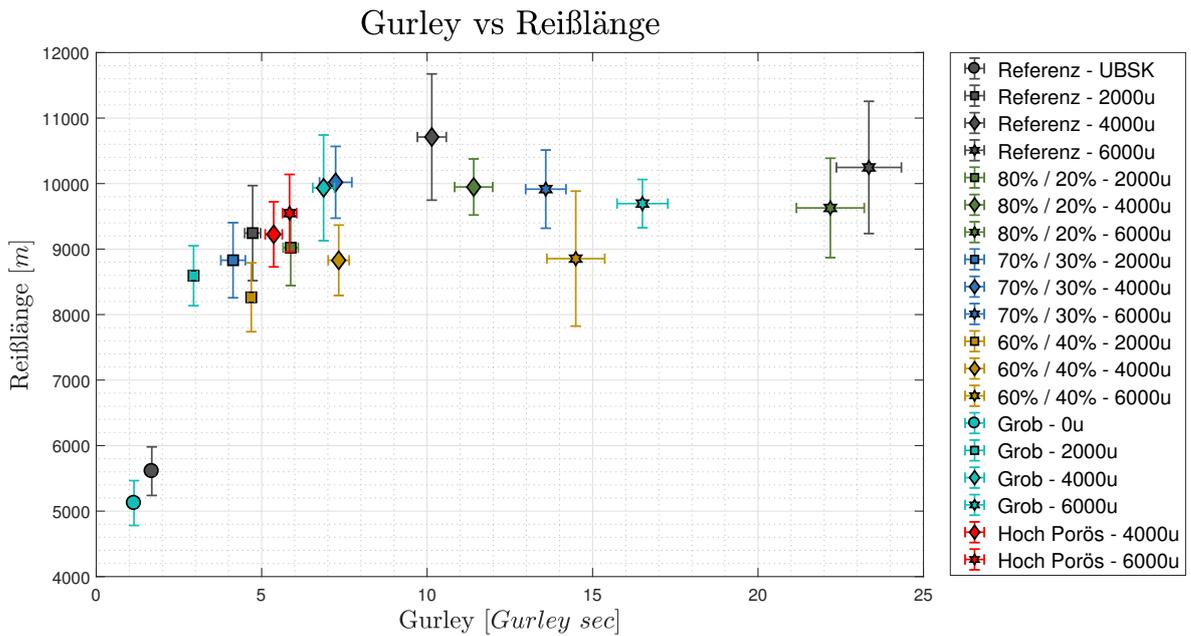


Abbildung 4.28 Zusammenhang zwischen Reißlänge und Gurley des Stoffes für hochporöse Blätter im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen mit UBSK

Durch den hohen Grad der Flexibilisierung ist es gar nicht möglich ein so poröses Blatt her zu stellen wie angenommen, wenn auch die Luftdurchlässigkeit höhere ist als für die in Abschnitt 3.2.1 durchgeführte fraktionierte Mahlung bei 4000u. Obwohl der Feinstoffanteil keinen direkten Einfluss auf die Reißlänge hat, so scheint aufgrund des so geringen Anteils an Feinstoffen und feinem Material kein ausreichend dichtes Blatt erstellen zu lassen um eine höhere Reißlänge zu erzielen.

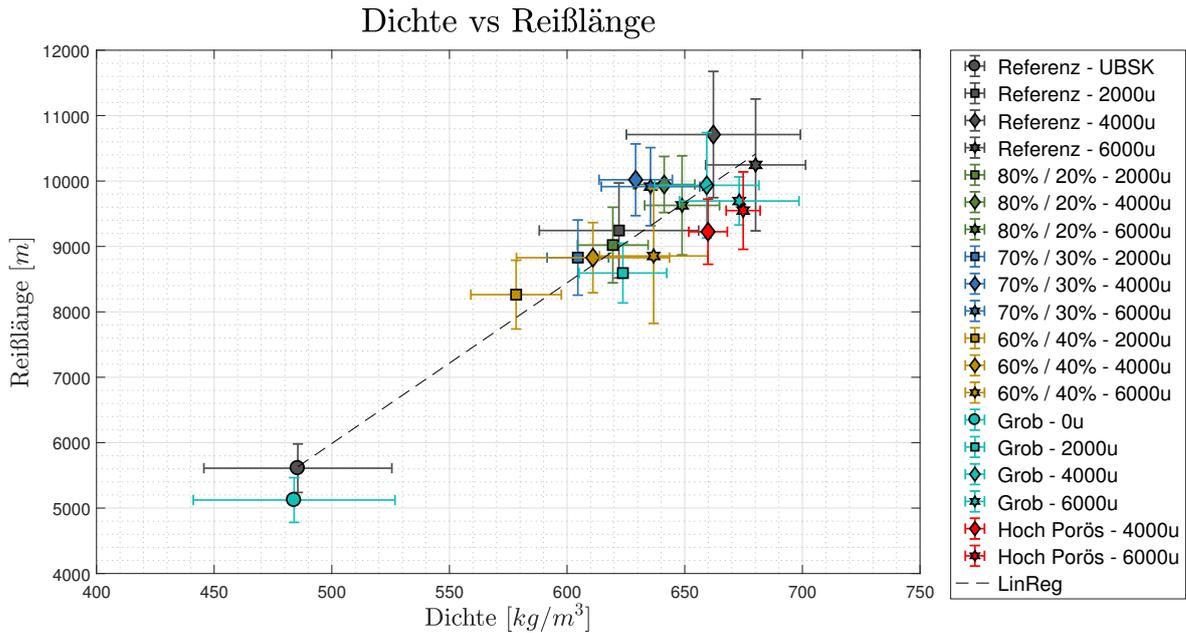


Abbildung 4.29 Zusammenhang zwischen Reißlänge und Dichte des Stoffes für hochporöse Blätter im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen mit UBSK

Das Bild in Bezug auf die Abhängigkeit von Dichte und Reißlänge bleibt grundsätzlich erhalten. Das Bestimmtheitsmaß R^2 sinkt nach hinzufügen dieser Messreihe unter 0,9 auf einen Wert von 0,89. Es kann an dieser Stelle gezeigt werden, dass das Dichte zu Reißlängen Verhältnis ein Stoffparameter ist. Die stoffspezifischen Parameter dieses Zusammenhangs werden durch die Steigung und den Abszissenabstand beschrieben. In ganz geringem Maße kann der Abszissenabstand möglicherweise auch durch den Feinstoffanteil mit beeinflusst werden, da wie in Abbildung 4.29 die Punkte mit sehr geringem Feinstoffanteil eher unter der Ausgleichsgeraden angesiedelt sind.

Während sich für den Gurley keine Verbesserung für den stark Feinanteilarmen Stoff ergibt, wird die Entwässerungsfähig trotz sehr starker Flexibilisierung sehr gut. Mit einem Schopper-Riegler von ca 14 liegen die Werte unter des ungemahlten Referenzstoffes. Ein mögliche Wirtschaftlichkeit für diese Option müsste im Einzelfall geprüft werden. Es ist wie auch schon in Abschnitt 4.2 zu überlegen, ob es möglich ist die feine Fraktion alternativ zu nutzen. Für diesen Fall könnte die sehr gute Entwässerung ein mögliches Bottle-Neck öffnen.

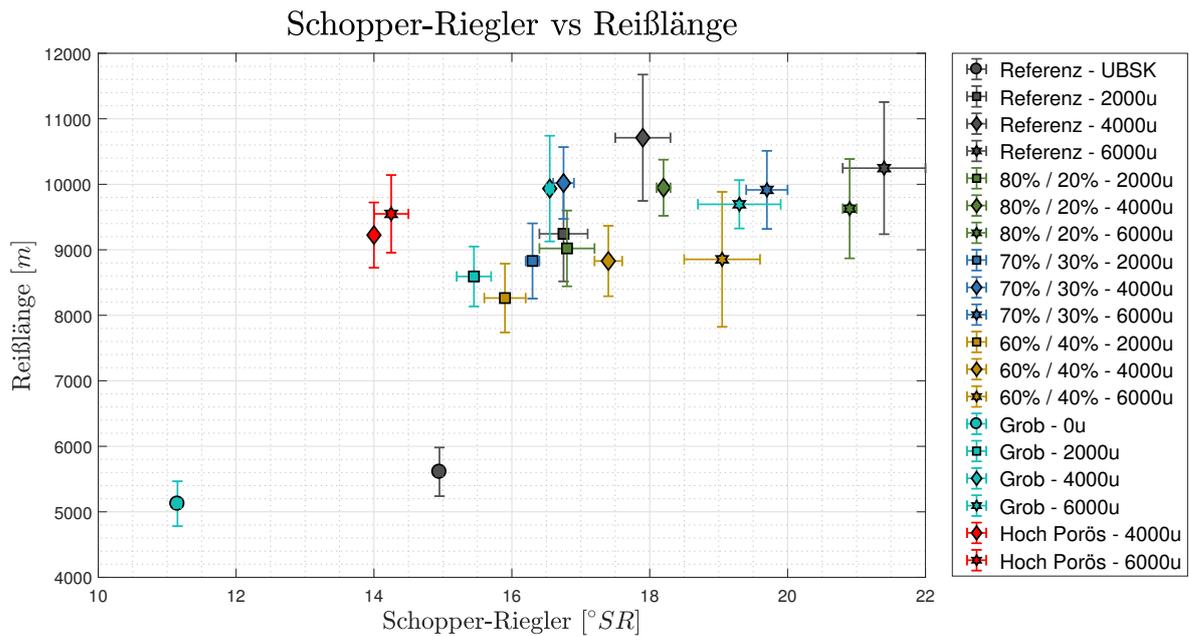


Abbildung 4.30 Zusammenhang zwischen Reißlänge und Schopper Riegler des Stoffes für hochporöse Blätter im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen mit UBSK

Deutlich wird am Ende dieser Versuche, dass der Ansatz der fraktionierten Mahlung des Faserstoffes Grenzen gesetzt sind, welche von der chemischen und strukturellen Faserbeschaffenheit bestimmt werden. Möglicherweise besteht die Möglichkeit durch chemische Behandlung des Zellstoffes noch mehr Festigkeiten zu erzeugen und dabei eine höhere Luftdurchlässigkeit zu generieren. Auf physikalischem Weg ist dieses Ziel nur in sehr begrenztem Rahmen zu erreichen.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen zeigt sich ein positiver Effekt für die fraktionierte Mahlung des ungebleichten Kraftzellstoffes (Abschnitt 4.1.1). Für das Fraktionsverhältnis 70/30 kann bei einer Mahlarbeit von 4000u auf der PFI Mühle eine angemessene Reißlänge von 10 km erreicht werden, wobei die Luftdurchlässigkeit einen Wert von ca. 7 Gurley Sekunden nur knapp überschreitet. Für den unfraktionierten Stoff ergibt sich bei gleicher Mahlarbeit nur eine unwesentlich höhere Reißlänge, jedoch bei einer bereits deutlich verringerten Luftdurchlässigkeit. Der weitere Benefit ergibt sich durch die beträchtliche Energieeinsparung bei der Mahlung, da nur 70 % des ursprünglichen Volumens über das Mahlaggregat gefahren werden müssen.

Für die beiden gebleichten Zellstoffe aus den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.3 kann in dieser Versuchskonfiguration kein signifikanter Benefit hinsichtlich Papiereigenschaften oder Energieeinsparung gefunden werden.

Über alle Versuche hinweg wird für einen jeweiligen Faserstoff ein linearer Zusammenhang zwischen Dichte und Reißlänge deutlich. Dieser Zusammenhang ist jedoch eindeutig stoffabhängig, stellt also eine spezifische Eigenschaft des jeweiligen Faserstoffes dar. Abschnitt 4.2 behandelt die getrennte Verwendung von grober und feiner Fraktion. Für die gemahlene feine Fraktion ergibt sich eine hohe Dichte, was eine sehr hohe Reißlänge von bis über 11 km bringt. Die Luftdurchlässigkeit und die Entwässerbarkeit leiden auf der anderen Seite sehr stark, jedoch bringt das feine Material auch hohe Oberflächenglätte. Die grobe Fraktion aus diesem Trennverhältnis 70/30 erzielt wider Erwarten bei gleicher Mahlintensität nahezu dieselbe Reißlänge bei gegebener Luftdurchlässigkeit wie die wieder mit

der feinen Fraktion gemischte Probe. Darüber hinaus wurde in einem Versuch basierend auf den groben 50 Massenprozent des Faserstoffes nach erfolgter Mahlung der gesamte Feinstoff wieder abgetrennt mit dem Ziel Blätter mit maximaler Porosität bei gegebener Festigkeit herzustellen. Auch in diesem Versuch zeigte sich, dass die Porosität dieser besonders groben Fraktion bei gegebener Festigkeit nicht höher ausfiel, als das für die bereits genannten Proben der Fall war. Diese Versuche zeigen, dass der genannte lineare Zusammenhang zwischen Festigkeit und Blattdichte nur einen geringen Bewegungsspielraum hinsichtlich der Erhöhung der mechanischen Festigkeit bei gegebener Luftdurchlässigkeit zulässt, auch wenn durch den Ansatz der Fraktionierung die Entwässerung (der Mahlgrad) des Faserstoffes bei gegebener Festigkeit deutlich verbessert werden kann.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Allgemeiner Holzaufbau	6
2.2	Faserformen	6
2.3	Faseraufbau	7
2.4	Chemische Zusammensetzung über den Faserquerschnitt	7
2.5	Microskopbilder von unterschiedlichen Feinstoffen	11
2.6	Darstellung externer (links) und interner (rechts) Fibrillierung durch Faser- mahlung	12
2.7	Faserstoffeigenschaften abhängig von der Eingebachten spezifischen Mahl- arbeit	13
2.8	Papiereigenschaften abhängig von der Eingebachten spezifischen Mahlarbeit	14
2.9	Darstellung des Funktionsprinzips eines Refiners	15
2.10	Funktionsprinzip PFI-Mühle	17
2.11	Schema eines Drucksortierers	21
2.12	Verteilung einer idealen Trennung(links) und realen Trennung (rechts)	21
2.13	Explosionszeichnung eines Drucksortierers	23
2.14	Maßangaben für Drucksortierer Flügel	24
2.15	Durch den Rotorflügel hervorgerufene Pulscharakteristik	24
2.16	Darstellung eines Stabsiebkorbes	25
3.1	Schema des Massenflusses für die Fraktionierten Mahlung	27
3.2	Schema des Massenflusses für den Vergleich separat verarbeiteter grober und feiner Fraktion	28
3.3	Schema des Massenflusses für Herstellung hochporöser Blätter	29
3.4	IPZ Drucksortierer	30
3.5	Schema der zweistufigen Fraktionierung	31
3.6	Darstellung einer Verteilungsdichte $q(x)$ (unten) und der dazugehörigen Ver- teilungssumme $Q(x)$ (oben)	33
3.7	L&W Fiber Tester Plus	34

3.8	Bildausschnitt aufgenommen mit L&W Fiber Tester Plus	34
4.1	Faserlängenverteilung durch die Fraktionierung im Vergleich zur unfraktionierten Referenz für UBSK	38
4.2	Gurley vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von UBSK	39
4.3	Feinstoffanteil vs Gurley der fraktionierten Mahlung von UBSK	40
4.4	Feinstoffanteil vs Schopper-Riegler der fraktionierten Mahlung von UBSK	41
4.5	Kumulative Faserlängenverteilung der fraktionierten Mahlung von UBSK	41
4.6	Schopper-Riegler vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von UBSK	42
4.7	Dichte vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von UBSK	42
4.8	Faserlängenverteilung durch die Fraktionierung im Vergleich zur unfraktionierten Referenz für BSK	43
4.9	Gurley vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von BSK	45
4.10	Schopper-Riegler vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von BSK	45
4.11	Feinstoffanteil vs Gurley der fraktionierten Mahlung von BSK	46
4.12	Feinstoffanteil vs Schopper-Riegler der fraktionierten Mahlung von BSK	46
4.13	Dichte vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von BSK	47
4.14	Faserlängenverteilung durch die Fraktionierung im Vergleich zur unfraktionierten Referenz für ECO	48
4.15	Gurley vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von ECO	49
4.16	Schopper-Riegler vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von ECO	49
4.17	Feinstoffanteil vs Gurley der fraktionierten Mahlung von ECO	50
4.18	Feinstoffanteil vs Schopper-Riegler der fraktionierten Mahlung von ECO	50
4.19	Kumulative Faserlängenverteilung der fraktionierten Mahlung von ECO	51
4.20	Dichte vs. Reißlänge der fraktionierten Mahlung von ECO	51
4.21	Vergleich der optischen Formation	52
4.22	Faserlängenverteilung von UBSK für die separate Untersuchung von grober und feiner Fraktion	54
4.23	Gurley vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion	55
4.24	Gurley vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion	55
4.25	Schopper-Riegler vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion	56

4.26 Dichte vs. Reißlänge der separaten Untersuchung der groben und feinen UBSK Fraktion	57
4.27 Faserlängenverteilung vor und nach der Fraktionierung des UBSK mit einem 1,6mm Lochsieb und die Verteilung der Faserlänge des gemahlten Stoffes nach Reduktion der Feinstoffe mittels 100 μm Sieb	58
4.28 Zusammenhang zwischen Reißlänge und Gurley des Stoffes für hochporöse Blätter im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen mit UBSK	59
4.29 Zusammenhang zwischen Reißlänge und Dichte des Stoffes für hochporöse Blätter im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen mit UBSK	60
4.30 Zusammenhang zwischen Reißlänge und Schopper Riegler des Stoffes für hochporöse Blätter im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen mit UBSK	61

Tabellenverzeichnis

3.1 Versuchspunkte für die Fraktionierte Mahlung	27
3.2 Versuchspunkte für die separat verarbeitete grobe und feine Fraktion	28
4.1 Erstellte Fraktionen der Versuchsreihe UBSK	38
4.2 Erstellte Fraktionen der Versuchsreihe BSK	43
4.3 Erstellte Fraktionen der Versuchsreihe gebleichter Sulfit Mischzellstoff	47

Abkürzungsverzeichnis

BDDJ Britt Dynamic Drainage Jar

BSK Bleached Softwood Kraft

C(T)MP Chemo-(Thermo) Mechanical Pulp

gew Gewicht

IPZ Institut für Papier,-Zellstoff- und Fasertechnologie

HC High Consistency

LC Low Consistency

lutro lufttrocken

otro ofentrocken

PGW Pressure Groundwood

RMP Refiner Mechanical Pulp

SEC Specific energie consumption

SEL Specific edge load

SGW Stone Groundwood

TMP Thermo Mechanical Pulp

TS Trennschärfe

UBSK Unbleached Softwood Kraft

Literaturverzeichnis

- [1] Rafael Giner Tovar. *Fractionated refining and sulphonation as a tool to reduce the energy consumption during refining*. PhD thesis, Technical University of Graz, Institute of Paper-, Pulp- and Fibertechnology, 2016.
- [2] Jürgen Blechschmidt, editor. *Taschenbuch der Papiertechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2 edition, oct 2013. ISBN: 978-3-446-43802-6.
- [3] Stefan Willför, Raimo Alén, Jan van Dam, Zhiming Liu, and Miia Tähtinen. *Chemical Pulping Part1, Fibre Chemistry and Technology*, chapter Raw materials, pages 12–187. Number 6 (Part 1) in *Papermaking Science and Technology*. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2. edition, 2009. ISBN: 978-952-5216-41-7.
- [4] Marianne Harders-Steinhäuser. *Faseratlas zur mikroskopischen Untersuchung von Zellstoffen und Papieren*. Güttinger-Verlag, 1974.
- [5] Herbert Sixta. *Handbook of Pulp*, volume 1. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006. ISBN: 978-3-527-30999-3.
- [6] Lennart Salmén, Mikael Lucander, Esko Härkönen, and Jan Sundholm. *Mechanical Pulping*, chapter Fundamentals of mechanical pulping, pages 36–67. Number 5 in *Papermaking Science and Technology*. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2. edition, 2009. ISBN: 978-952-5216-35-6.
- [7] Jan Sundholm. *Mechanical Pulping*, chapter History of mechanical pulping, pages 23–34. Number 5 in *Papermaking Science and Technology*. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2. edition, 2009. ISBN: 978-952-5216-35-6.
- [8] Jan Gustavson, Raimo Alén, Johan Engström, Risto Korpinen, Petteri Kuusisto, Aaron Leavitt, Krister Olsson, Jussi Piira, Anders Samuelsson, and Jorma Sundquist. *Chemical Pulping Part1, Fibre Chemistry and Technology*, chapter Pulping, pages 188–381. Number 6 (Part 1) in *Papermaking Science and Technology*. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2. edition, 2009. ISBN: 978-952-5216-41-7.
- [9] Nora Odabas, Ute Henniges, Antje Potthast, and Thomas Rosenau. Cellulosic fines: Properties and effects. *Progress in Materials Science*, 83:574–594, oct 2016.

- [10] Leena Paavilainen. Importance of particle size - fibre length and fines - for the characterization of softwood kraft pulp. *Paper and Timber* 72, 72(5):516–526, 1990.
- [11] W Brecht and K.-H. Klemm. Das strukturgemisch eines holzschliffes als schlüssel für die kenntnis seiner technologischen eigenschaften. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 80, 1952.
- [12] E. Retulainen, P. Moss, and K. Nieminen. Effect of fines on the properties of fibre networks. In *10th Fundamental Research Symposium, Oxford*, pages 727–769, 1993.
- [13] R. S. Seth. The measurement and significance of fines. *Pulp and Paper Canada*, 104:2:41–44, 2003.
- [14] Hanna Lindqvist, Kristian Salminen, Janne Kataja-aho, Elias Retulainen, Pedro Fardim, and Anna Sundberg. The effect of fibre properties, fines content and surfactant addition on dewatering, wet and dry web properties. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 27(01):104–111, mar 2012.
- [15] Paulo J. Ferreira, Sandra Matos, and Margarida M. Figueiredo. Size characterization of fibres and fines in hardwood kraft pulps. *Particle and Particle Systems Characterization*, 16:20–24, 1999.
- [16] Leena Paavilainen. The possibility of fractionating softwood sulfate pulp according to cell wall thickness. *Appita Journal*, 45:319–326, 1992.
- [17] Kari Koskenhely. *Papermaking Part1, Stock Preparation and Wet End*, chapter Refining of chemical pulp fibres, pages 92–139. Number 8 in Papermaking Science and Technology. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2. edition, 2007. ISBN: 978-952-5216-25-7.
- [18] T. Kang and H. Paulapuro. Effect of External Fibrillation on Paper Strength. *Pulp and Paper Canada*, 107(8):51–54, 2006.
- [19] Otmar Töppel. *Physikalisch-technologische Prüfung*. Number 3 in Prüfung von Papier Pappe Zellstoff und Holzstoff. Springer Berlin Heidelberg, 1993. ISBN: 3-540-55896-9.
- [20] Richard J. Kerekes. Characterisation refining action in PFI mills. *TAPPI Journal*, 4(3):9–14, mar 2005.
- [21] William Herbert and P.G. Marsh. Mechanics and Fluid Dynamics of a Disk Refiner. *TAPPI Journal*, 51(5):235–239, May 1968.
- [22] Hannes Vomhoff and Karl-Johan Grundström. Fractionation and separate refining of a bleached softwood pulp. Technical Report PUB 6, STFI, nov 2002.

- [23] Kari Koskenhely, Hannu Paulapuro, Ari Ämmälä, and Hanna Jokinen. Effect of refining intensity on pressure screen fractionated softwood kraft. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 20(02):169–175, jun 2005.
- [24] Sari Asikainen. Reinforcing ability of fractionated softwood kraft pulp fibres. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 28(2):290–296, 2013.
- [25] James Olson, Bruce Allison, Tim Friesen, and Christine Peters. Fibre fractionation for high porosity sack kraft paper. *TAPPI Journal*, 84, jun 2001.
- [26] Youfeng Lin and Robert Lanouette. Production of mechanical pulp from pine: selective refining or whole-pulp refining. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 3(1):23–31, 2013.
- [27] Khalil El-Sharkawy, Kari Koskenely, and Hannu Paulapuro. The fractionation and refining of eucalyptus kraft pulp. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 23(2):172–180, 2008.
- [28] A. Karnis. Pulp fractionation by fibre characteristics. *Paperi ja Puu - Paper and Timber*, 79(7):480–486, 1997.
- [29] Matthias Stieß. *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer Berlin Heidelberg, 3 edition, 2009. ISBN: 978-3-540-32551-2.
- [30] Jouko Hautala, Ismo Hourula, Tero Jussila, Markku Pitkänen, Jouko Niinimäki, Hanna Jokinen, Juhani Leppinen, and Ari Ämmälä. *Mechanical Pulping*, chapter Screening and cleaning, pages 282–326. Number 5 in Papermaking Science and Technology. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, 2. edition, 2009. ISBN: 978-952-5216-35-6.
- [31] Herbert Holik. *Handbook of Paper and Board*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006. ISBN: 3-527-30997-7.
- [32] Lukas Jagiello. *Separation and Thickening of Pulp Fibres and Fines in the Lab Scale and Application Thereof*. PhD thesis, Technical University of Graz, Institute of Paper-, Pulp- and Fibertechnology, 2017.
- [33] M. Graça Carvalho, Paulo J. Ferreira, Alexandre A. Martins, and M. Margardia Figueiredo. A comparative study of two automated techniques for measuring fiber length. *TAPPI*, 80(2):137–142, feb 1997.