
Simulation der Bauer McNett Fraktionierung anhand automatisierter optischer Faseranalyse

Master Arbeit

Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik
Technische Universität Graz

verfasst und vorgelegt von

Wolfgang Fuchs

in Zusammenarbeit mit
Norske Skog Bruck GmbH

Betreut von:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Rene Eckhart, TU Graz
Dipl.-Ing. Dr. techn. Herwig Kapeller, Norske Skog Bruck GmbH

Graz, Jänner 2012

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

date

signature

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich während der Master Arbeit unterstützen und somit den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit ermöglichten.

In erster Linie danke ich meinen Betreuern Herr Dipl.-Ing. Dr. techn. Rene Eckhart von der Technischen Universität Graz und Herr Dipl.-Ing. Dr. techn. Herwig Kapeller von Norske Skog Bruck an der Mur für die großzügige Unterstützung und fachliche Beratung während der gesamten Master Arbeit. Weiters danke ich dem gesamten Team der Laborbrücke von Norske Skog Bruck an der Mur für die gute Zusammenarbeit.

Bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Bauer bedanke ich mich ebenfalls, da die Master Arbeit durch seine Hilfe möglich wurde.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir während meines Studiums immer Rückhalt und Unterstützung schenkten.

Kurzfassung

Faserstoffcharakterisierung ist in der Papierherstellung von großem Interesse. Es gibt verschiedene Möglichkeiten und Methoden, einen Faserstoff mit Kennzahlen zu beurteilen, diese sind in eigenen Prüfnormen festgelegt. Traditionell geschieht dies anhand von Laborblättern oder direkt am Faserstoff in wässriger Fasersuspension. Ein Laborgerät zur direkten Beurteilung des Faserstoffs ist der Bauer McNett Fraktionierer. Die Fraktionierung basiert auf der Separation des Faserstoffs durch verschieden große Siebe in fünf Faserklassen, abhängig von den Faserdimensionen. Das ermöglicht, einen Faserstoff hinsichtlich Grob- und Feinstoffanteil zu analysieren. Diese Fraktionierung ist jedoch sehr zeitintensiv und nicht für eine on-line Einbindung geeignet.

In den letzten 30 Jahren gewinnt die optische Faseranalyse mehr an Bedeutung und entwickelte sich immer weiter. Damit kommt auch verstärkt die Faserstoffcharakterisierung anhand Einzelfasermorphologie zum Einsatz, deren Ziel es ist, anhand der Eigenschaften einzelner Fasern auf die Eigenschaften des gesamten Faserstoffs zu schließen. Mittels Simulationsmodellen und statistischen Auswertungen versucht man gezielt Fasereigenschaften mit Papiereigenschaften zu korrelieren.

Am Standort Norske Skog Bruck an der Mur wird ein Bauer McNett Fraktionierapparat und ein automatisches optisches Faseranalysegerät zur Faserstoffanalyse eingesetzt. Beide bewerten den dort eingesetzten Druckschliff hinsichtlich Splitter- und Feinstoffgehalt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die beiden Geräte miteinander zu verknüpfen und das Ergebnis einer Bauer McNett Fraktionierung, anhand der Daten aus dem Faseranalysegerät zu modellieren. In der Literatur existieren mehrere Ansätze, diese Korrelation zu realisieren. In der Modellerstellung werden drei Modelle ausgewertet und angepasst. Zwei der drei Modelle sind applikabel und werden am Standort eingesetzt.

Summary

Pulp Characterisation is a fundamental part in pulp and paper production. Several methods and procedures are used to assess pulp by means of key figures. Those are specified in internationally accepted testing standards. The pulp characterisation is traditionally performed on the basis of laboratory handsheets or directly by testing the wet fibre suspension. One of the methods to characterise pulp by means of the wet fibre suspension is the Bauer McNett Fractionation. Its primary use is in the study of pulp quality and the relation of fiber distribution to the behaviour of pulp on paper machines and final product quality. The Bauer McNett apparatus segregates mechanically a given fibrous sample into a number of separate groups of fibre length. This procedure is rather time consuming and therefore not applicable as an on-line control device.

In the past 30 years optical fibre analysis developed very well and today image analytical methods based on flow cells are state of the art to measure single fibre properties. Simulation models and statistical analyses are used to study the relations between fibre properties and paper properties.

Norske Skog Bruck an der Mur uses both, the Bauer McNett apparatus and an automatic optical fibre analysis device. They assess the pulp concerning size distribution, shive and fines content. This thesis' purpose is to interrelate those methods of measurement and to provide Bauer McNett data by correlation analysis. Literature review exhibits some simulation models. Three models will be developed and adjusted. Two simulation models are applicable and are implemented on site.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Faserstoffcharakterisierung	1
1.2 Aufgabenstellung	4
2 Methoden	5
2.1 Der Standort Norske Skog Bruck an der Mur	5
2.2 Faserfraktionierung nach Bauer McNett	6
2.3 Kajaani PulpExpert TM	12
3 Stand der Technik	19
3.1 Methode der Gewichtungsfaktoren	20
3.2 Methode der modifizierten Gewichtungsfaktoren	22
3.3 Multikomponentenanalyse	22
3.4 Trenngradmodell	27
4 Modellerstellung	30
4.1 Datenanalyse	30
4.2 Modellerstellung	34
4.2.1 Methode der Gewichtungsfaktoren	34
4.2.2 Multikomponentenanalyse	41
4.2.3 Trenngradmodell	45
4.3 Vergleich der Modelle	52
4.4 Anwendung in einem Sortiersuch	55
5 Zusammenfassung und Ausblick	57
Literaturverzeichnis	X

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bauer McNett Fraktioniergerät.	7
2.2	Schematische Darstellung der ersten Kammer.	7
2.3	Schematische Darstellung der Strömung in einer Bauer McNett Kammer.	8
2.4	Der Kajaani PulpExpert TM	13
2.5	Das Faser und Splitter Modul des PulpExpert TM	13
2.6	Veranschaulichung des Messprinzips des pulpexpertSHIVE module [13]	15
3.1	Faserlängenverteilung	21
3.2	Die Schiefe	24
3.3	Die Wölbung	24
3.4	Kurvenverlauf von $P(l)$	28
4.1	Vergleich der Coarseness Messung	32
4.2	Längen-Breitenverteilung	33
4.3	Eine Druckschliff Faserlängenverteilung	36
4.4	Die Intervalle in der Längen-Breitenverteilung	37
4.5	Längen-Breitenverteilung der R_{16} Fraktion	38
4.6	Vergleich der Bauer McNett Fraktionierung mit der Gewichsfaktorenberechnung	39
4.7	Schematische Darstellung der Erstellung des Konfidenzintervalls	40
4.8	Parameter Definition im Microsoft Excel Solver	42
4.9	Darstellung der Berechnung der Häufigkeitsverteilung der Masse	46
4.10	Unterschied einer Massenverteilung und einer Anzahlverteilung	47
4.11	Trenngrad für die verwendeten Bauer McNett Siebe	48
4.12	Schematische Darstellung der Fraktionierung	49
4.13	Vergleich der Bauer McNett Fraktionierung mit der Trenngradsimulation	51
4.14	Vergleich der Korrelationen der beiden Modelle	53
4.15	Vergleich der Mittelwerte der gesammelten Bauer McNett Fraktionen mit Simulationen der beiden Modelle	54
4.16	Gegenüberstellung der beiden Modelle	55

Tabellenverzeichnis

2.1	Siebnummern und Maschenweite [1]	10
2.2	Wiederholbarkeit der eigenen Bauer McNett Fraktionierung.	11
2.3	Ergebnisse der Bauer McNett Fraktionierung in 5 verschiedenen Laborato- rien [5]	12
4.1	Vergleichsmessung der Coarseness in PulpExpert TM und Kajaani FS200 . .	32
4.2	Gewichtsfaktoren Druckschliff	38
4.3	Konfidenzintervall Bauer McNett und PulpExpert TM	38
4.4	Bestimmtheitsmaß der Methode der Gewichtsfaktoren	40
4.5	Größen- und Formparameter für die jeweiligen Siebe	48
4.6	Bestimmtheitsmaß des Modells mit Trennfunktion	50
4.7	Konfidenzintervall Bauer McNett und PulpExpert TM	50
4.8	Quadrierter Korrelationskoeffizient R^2	56

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Faserstoffcharakterisierung

In der Vergangenheit basierte die Charakterisierung eines Faserstoffs hauptsächlich auf der Erstellung von Laborblättern. Die Laborblätter wurden anschließend Labortests unterzogen, um Eigenschaften wie zum Beispiel Reißlänge, Durchreißindex, Porosität, Rauigkeit und viele andere zu messen und auszuwerten. Die Idee dahinter ist, den Faserstoff auf standardisierte Weise zu bewerten. Die Anforderungen an die Faserstoffe sind sehr vielfältig, und die Tests sind auf die einzelnen Faserstoffe abgestimmt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit mechanischem Faserstoff, dem Druckschliff. Bei mechanischen Faserstoffen findet neben der Erstellung von Laborblättern, vor allem die Faserstofffraktionierung Verwendung, für diese Art von Faserstoff ist es relevant, wieviel Feinstoff und Splitter enthalten sind. Dabei wird nicht ein Laborblatt, sondern die wässrige Fasersuspension untersucht. Es werden der Splittergehalt und die Faserstofffraktionen ermittelt.

Die Fraktionierapparate werden in verschiedensten Ausführungen gebaut. Es gibt horizontale (i.e. Trennelement ist horizontal verbaut) wie Hillbom, Somerville und Haindl, und vertikale Klassierapparate wie Bauer McNett und Clark. In einem horizontalen Klassierer wird die Fasersuspension meist durch eine oszillierende Membran in Bewegung gehalten und die Fasersuspension strömt vertikal durch ein Sieb. Im vertikalen Klassierer hält ein Rührer die Strömung der Fasersuspension aufrecht und die Fasern strömen horizontal durch ein Sieb. Die Siebe werden in zwei Klassen eingeteilt: In Schlitzsiebe, bei denen die Öffnungen eine rechteckige Form besitzen und Lochsiebe, bei denen die Öffnungen rund oder quadratisch sein können.

Die Bauer McNett Fraktionierung ist in der Papier- und Zellstoffindustrie das klassische Instrument der Faserstoffcharakterisierung. Es besteht der Wunsch, die einzelnen Fraktionen mit einem gewissen Maß an Sicherheit mit physikalischen Eigenschaften wie Reißlänge,

Zugfestigkeit und Porosität korrelieren zu können [11]. Auf die der Bauer McNett Fraktionierung inhärenten Limitationen wird in Abschnitt 2.2 näher eingegangen.

Zunehmend setzt sich eine weitere Form der Faserstoffcharakterisierung durch: Die Messung der morphologischen Eigenschaften der Fasern. Als morphologische Eigenschaften werden zumeist fünf Parameter genannt: Faserlänge, Faserbreite, Coarseness, Kink und Curl [22].

Jeder Faserstoff besitzt bestimmte morphologische Eigenschaften. So beeinflusst die Art des Holzes, der Standort und das Alter des Baumes diese Eigenschaften. Zum Beispiel weist Nadelholz eine durchschnittliche Faserlänge von 3 mm bis 4 mm auf und Laubholz eine durchschnittliche Faserlänge von 1 mm. Auch saisonal bedingte Veränderungen, wie Frühholz und Spätholz (hauptsächlich bei Nadelholz) beeinflussen die Faserlänge. Ausgehend von der ursprünglichen Faserlänge verändern mechanische Prozesse wie Hacken, Schleifen und Mahlen, und Prozesse in der Stoffaufbereitung die Faserlänge. Neben der Faserlänge werden auch andere morphologische Eigenschaften beeinflusst: Faserbreite, Faserwanddicke, Curl, Kink und Coarseness [8].

Die Messung der morphologischen Eigenschaften lässt direkte Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften des hergestellten Papiers zu [10, 12]:

- Lange Fasern verbessern die Festigkeitseigenschaften des fertigen Papiers. Die Festigkeit wird aber auch von der Deformation der Faser selbst beeinflusst.
- Flexible Fasern erhöhen die Festigkeit des Blattes, indem sie die Bindungsfläche vergrößern.
- Eine breite Faserwand kann aufgrund einer damit verbundenen höheren Steifigkeit zu einem voluminöseren Blatt führen.

Obwohl die automatisierte optische Faseranalyse weit fortgeschritten ist, ist die Bauer McNett Fraktionierung trotz einiger Schwächen die Standardmethode, die Faserlängenverteilung eines mechanisch hergestellten Faserstoffs zu messen. Ein entscheidender Punkt ist, dass die Ergebnisse der automatisierten optischen Faseranalyse nicht direkt mit jenen der Bauer McNett Fraktionierung korrelieren. Die optische Faseranalyse bestimmt eine Faserlängenverteilung anhand der Faserlänge. Die Faserlängenverteilung einer Bauer McNett Fraktionierung wird auch durch andere Eigenschaften einer Faser beeinflusst. Zum Beispiel strömt eine flexible Faser eher durch ein Sieb als eine steife Faser. Dieser Einfluss ist mit einer optischen Faseranalyse nicht klar zu erkennen. Daher ist es schwierig diese beiden Messmethoden direkt zu vergleichen [11]. Die Bauer McNett Fraktionierung spiegelt

eine Massenverteilung wider, wohingegen eine Faserlängenverteilung einer optischen Faseranalyse eine Anzahlverteilung wiedergibt. Ein großer Vorteil der automatisierten optischen Analyse ist, dass sie auch on-line eingesetzt werden kann.

Die automatisierte optische Faseranalyse basiert auf der Kombination von flow cells mit Bildanalyse. Eine hochverdünnte Fasersuspension wird durch eine dünne transparente Kapillare oder zwischen zwei Glasplatten (flow cell) hindurchgepumpt und dabei von einer Kamera fotografiert. Die Auswertung der Bilder erfolgt anhand von bildanalytischen Methoden.

Es gibt eine hohe Anzahl an Faseranalysatoren, die eine Vielzahl der morphologischen Eigenschaften messen. HIRN [22] hat sechs auf flow cell basierende kommerzielle Faseranalysatoren verglichen, die fasermorphologische Eigenschaften wie Faserlänge, Faserbreite, Curl, Kink, Flexibilität, Fibrillierung, Coarseness, Faserwanddicke, Bindungsfläche, Splittergehalt und Feinstoffgehalt berechnen. Die Geräte sind grundsätzlich miteinander vergleichbar, unterscheiden sich aber oftmals bei Betrachtung der Absolutwerte.

Die Faseranalysatoren messen von 2000 (CIS) bis zu 30000 (FQA) Fasern, um die oben erwähnten morphologischen Eigenschaften zu berechnen. Diese Anzahl an untersuchten Fasern ist in einem vergleichbaren Zeitrahmen mit traditionellen Labormethoden nicht erreichbar. Ein anderer kommerzieller Faseranalysator (i.e. Kajaani Pulp ExpertTM) kann bis zu zwei Millionen Fasern in kurzer Zeit klassifizieren und analysieren. Der Vorteil der optischen Faseranalyse ist nicht nur der niedrigere Arbeitsaufwand und damit verbunden der Zeitfaktor, sondern auch die Vielzahl an Parametern, die gemessen werden können, und die Reproduzierbarkeit derselben [23].

Die Möglichkeiten, die die automatisierte optische Faseranalyse bietet, stellen eine Motivation dar, die Modellierung aus der Einzelfasermorphologie zu realisieren. Mittels Simulationsmodellen und statistischen Auswertungen werden Korrelationen zwischen Fasereigenschaften und Papiereigenschaften untersucht. Dadurch gelingt es, die Faserstoff- und Papiereigenschaften zu verbessern. Die Informationen über die einzelne Faser können auch Grundlage für automatisierte Messungen der Qualitätskontrolle bilden, noch bevor das Endprodukt getestet wird.

1.2 Aufgabenstellung

Die Arbeit wurde in Kooperation mit *Norske Skog Bruck an der Mur* durchgeführt. Der am Standort installierte Bauer McNett Apparat wird hauptsächlich zur Druckschliffcharakterisierung eingesetzt. Diese Fraktionierung dient der Kontrolle der Arbeitsweise der Sortierung der Schleiferei. Zusätzlich sind zwei Faserstofflinien der Schleiferei an den Kajaani Pulp ExpertTM angeschlossen. Beide Geräte bewerten den Druckschliff hinsichtlich des Splitter- und Feinstoffgehalts. Diese beiden Bestandteile des Druckschliffs beeinflussen die Eigenschaften des produzierten Papiers maßgeblich.

Ziel der Arbeit ist es, Messdaten des Kajaani Pulp ExpertTM mit experimentellen Daten aus dem Labor zu vergleichen und eine Umrechnung derselben in bekannte Parameter (i.e. Bauer McNett Fraktionen) zu ermöglichen. Dazu ist es nötig, eine geeignete Datenbasis für eine nachfolgende Modellbildung zu schaffen. Es sollen parallel Fraktionierungen mittels Bauer McNett und Faseranalysen mittels Kajaani Pulp ExpertTM an Stoffproben, welche die zu erwartende Bandbreite hinsichtlich der Verteilung des Faserstoffs darstellen, durchgeführt werden.

Basierend auf diesen Untersuchungen soll dann die Größenverteilung, welche vom Kajaani Pulp ExpertTM berechnet wird, in Bauer McNett Fraktionen dargestellt werden. Das entwickelte Modell soll vorerst exklusiv für Fichten Holzstoff erstellt werden.

Kapitel 2

Methoden

Dieser Teil der Arbeit widmet sich den am Standort *Norske Skog Bruck an der Mur* verwendeten Methoden zur Faserstoffcharakterisierung. Es werden die Geräte, deren Probenvorbereitung, sowie die Reproduzierbarkeit und eventuelle Fehlerquellen beschrieben. Einleitend wird kurz der Standort selbst beschrieben.

2.1 Der Standort Norske Skog Bruck an der Mur

Am Standort *Norske Skog Bruck an der Mur* sind knapp 500 Mitarbeiter beschäftigt. Auf zwei Papiermaschinen werden jährlich 128000 Tonnen Zeitungsdruckpapier und 275000 Tonnen gestrichenes Papier für Zeitschriften und Magazine produziert. Druckschliff wird auf beiden Papiermaschinen eingesetzt.

Das Holz zur Druckschliffproduktion kommt in erster Linie aus Durchforstungen steirischer Wälder und in geringen Mengen aus dem südlichen Niederösterreich, aus Unterkärnten und dem westlichem Burgenland, weil sonst die Transportkosten zu hoch wären. Nur minimale Anteile kommen aus Tschechien. Es wird auch bis zu 40 % Faserholz verwendet. Der Begriff Faserholz ist eine Qualitätsbezeichnung und ist nach Bauholz (i.e. höchste Qualität) und Schleifholz einzureihen. Die Ausbeute ist hier zwar durch braune Stämme geringer, aber der Preis ist deutlich niedriger. Zur Erzeugung werden ausschließlich Fichte und sehr kleine Anteile an Tanne verwendet. Lärche und Kiefer werden aussortiert und entweder zur Sappi Gratkorn oder zur Zellstoff Pöls AG geliefert. Durch den hohen Harzanteil sind diese Holzarten für die Holzschlifferzeugung nicht gut geeignet. Das Holz wird für die Verarbeitung circa 3 bis 4 Wochen gelagert, damit das störende Harz durch Mikroorganismen möglichst weit abgebaut wird. Längere Lagerdauer bringt aber auch höheren Splittergehalt. Das Lager reicht für circa 1,5 Monate. Es werden rund 500 Festmeter pro Tag verarbeitet.

Daraus ergibt sich ein mittlerer Lagerstand von 22.500 Festmeter. Das Lager kann maximal 38.000 Festmeter aufnehmen.

Die längeren Lagerzeiten über den Sommer erfordern, dass das lagernde Langholz besprüht wird, um einen Anstieg des Trockengehalts zu verhindern. Trotz dieser Maßnahme ist der Holzstoff im Sommer um bis zu 4 Weißpunkte dunkler.

Eine genauere Beschreibung der Schleiferei ist in Abschnitt 4.1 enthalten.

2.2 Faserfraktionierung nach Bauer McNett

Das Bauer McNett Faser Fraktioniergerät wurde 1930 von Dr. Ruff als erstes vertikales Fraktioniergerät entworfen. Das Gerät besteht aus vier separaten Kammern, die in Kaskade geschaltet sind. R.F. McNett produzierte das Instrument einige Zeit, bis Bauer Bros. die Produktion übernahm und es bis zu der heute gebräuchlichen Form weiterentwickelte [9].

Zweck der Fraktionierung ist es, den Faserstoff anhand weniger Parameter zu charakterisieren und klassifizieren, damit der Faserstoff in weiterer Folge bewertet werden kann.

In Abbildung 2.1 sieht man den Aufbau des Fraktioniergeräts mit seinen vier Kammern und vorgeschaltetem Haindl Splittersortierer. Anstatt der Haindl Splittersortierung können wahlweise auch andere Splittersortierer (i.e. Haindl, Brecht-Holl oder Somerville) vorgeschaltet werden. Abbildung 2.2 stellt den schematischen Aufbau der ersten Kammer dar.

Die wichtigsten Teile des Bauer McNett Fraktioniergerätes sind:

Funnel: Ein Einfülltrichter wird dann verwendet, wenn keine Splittersortierung vorgeschaltet ist. Er gewährleistet ein zeitlich konstantes Einfließen der Fasersuspension in die erste Kammer.

Drain Plug: Der Pfropfen verhindert, dass die Suspension bereits während der Fraktionierung in die Absaugvorrichtung fließt. Er wird erst nach erfolgter Fraktionierung gezogen, damit die fraktionierte Suspension auf die Absaugplatte fließen kann.

Control Plate: Das Blech verhindert eine direkte Anströmung des Siebes (vgl. Abbildung 2.3). Ein direktes Anströmen des Siebes beeinflusst die Faserlänge in einer Kammer, weil dadurch längsausgerichtete Fasern durch das Sieb hindurchfließen.

Wire: Das Sieb ist essentieller Bestandteil des Fraktioniergeräts. Es legt fest, welche Form die Faserlängenverteilung in der Kammer annimmt.



Abbildung 2.1: Bauer McNett Fraktioniergerät mit vorgeschalteter Haindl Splittersortierung

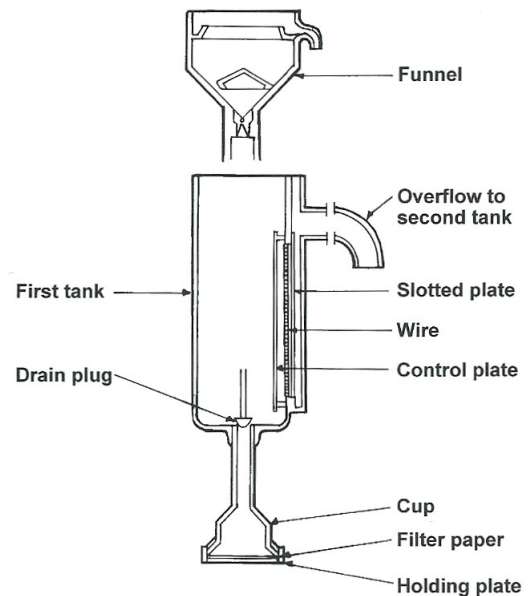


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der ersten Kammer eines Bauer McNett Fraktioniergeräts [8]

Holding Plate: Auf der Absaugplatte wird ein Weißbandrundfilter platziert, auf den der Kammerinhalt am Ende des Fraktioniervorgangs retentiert.

Motor: Auf Abbildung 2.2 nicht dargestellt, aber auf Abbildung 2.1 über den Kammern ist der Motor für das Rührwerk zu sehen. Es hat die Aufgabe, die Zirkulation in der Kammer aufrecht zu erhalten.

Die folgende Beschreibung der Durchführung ist der Arbeitsanweisung zur „Durchführung der Faserfraktionierung und Bestimmung der Splitter“ in *Norske Skog Bruck a. d. Mur* [15] entnommen.

Die Eintragsmenge von 10 g otro Faserstoff muss über eine Konsistenzbestimmung ermittelt werden. Die Konsistenzbestimmung ist in einer eigenen Arbeitsanweisung festgelegt. Die Fraktionierzeit ist auf 20 Minuten zu stellen. Die Siebfolge lautet von links (der ersten Kammer) nach rechts: Nr. 16, Nr. 30, Nr. 50 und Nr. 200. Diese Siebnummern sind ein Maßstab für die Größe der Öffnung eines Siebes. Das Sieb im Haindl Splitterfraktionierer ist ein 0,15 mm Schlitzsieb. Die verwendete Größenbezeichnung gibt die Breite des Schlitzes an. Nachdem die zuvor abgewogenen Weißbandrundfilter auf die Absaugplatten gelegt wurden und alle vier Kammern mit Wasser vollgelaufen sind, ist der in zwei Liter Wasser

suspendierte zu fraktionierende Stoff innerhalb von drei Minuten in den Fraktionierbehälter des Haindl Splitterfraktionierers einzutragen.

Nach 20 Minuten schaltet die Schaltuhr die Wasserzufuhr und nach weiteren 1,5 Minuten die RührerMotoren automatisch ab. Der Rückstand auf dem Haindl Schlitzsieb wird in einen Eimer gewaschen und anschließend über einem Glasfiberfilter abgesaugt. Die Abzugspfpopen werden entfernt und die Kammern gründlich ausgewaschen, so dass keine Rückstände auf den Kammerwänden und den Sieben zurückbleiben. Nach Entnahme der Filter aus den Abzugsplatten trocknen die fünf Filter im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C.

Die Rückstände auf dem Glasfiberfilter und auf den Filtern für die Faserstoffe, gemessen in [g] und mit 10 multipliziert, ergeben die Massenanteile in [%] der Splitter und Faserfraktionen des untersuchten Stoffes. Die Differenz der Summe aller prozentualen Massenanteile und 100 ergibt den Massenanteil in [%] des Durchlaufes durch Sieb Nr. 200.

Als Formelzeichen für die Massenanteile der Faserfraktionen wird der Buchstabe R (für Rückstand oder engl. retain) mit einem Index, der die Nummer des Siebes bezeichnet, auf dem der Rückstand gewonnen wurde, verwendet (e.g. R_{16} für den Massenanteil, der auf dem Sieb Nr. 16 gebildet wurde). Für den Massenanteil, der durch das Sieb Nr. 200 strömt, ist der Buchstabe D (Durchlauf) mit dem Index 200 zu verwenden.

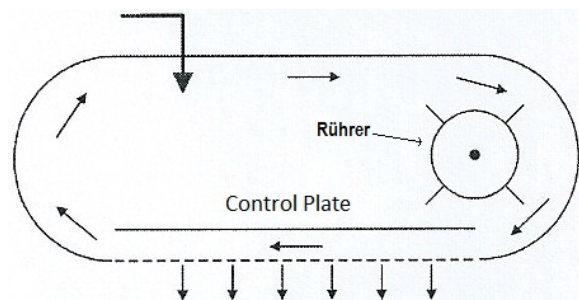


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Strömung in einer Bauer McNett Kammer, hervorgerufen durch den Rotor. [19]

Die Splitterauswertung wird in den in Abschnitt 4.2 diskutierten Modellen vernachlässigt, da der beprobte Faserstoff einen Splittergehalt von unter 1 % aufweist. Auf der einen Seite ist nicht klar wie die Splittermessung des pulpexpertSHIVE Moduls in die Faseranalyse einfließt und auf der anderen Seite befindet sich dieser Wert in der Größenordnung der Schwankungsbreite der Modelle.

Der Mechanismus der Faserfraktionierung

Der Rührer (Abbildung 2.3) hält die Zirkulation der Fasersuspension in der Kammer aufrecht. Das Prallblech sorgt dafür, dass die Fasern das Sieb nicht direkt (i.e. längsausgerichtet) anströmen, sondern orthogonal dazu zwischen Prallblech und Sieb hindurchströmen.

Das soll gewährleisten, dass der Fluss einer Faser durch ein Sieb, durch ihre größte Dimension (i.e. Länge) begrenzt ist. Strömt eine steife, ausgerichtete Faser quer am Sieb mit einem Geschwindigkeitsgradienten normal zur Faserlängsrichtung vorbei, kann die Faser durch das Sieb hindurch, solange die Faserlänge nicht doppelt so groß wie die breiteste Öffnung des Siebes ist. In Wasser suspendiert ist die Faser weder steif noch ausgerichtet, und aufgrund lokaler Wirbel an den Siebmaschen ist die Flussrichtung auch nicht immer parallel zum Sieb. Flexible Fasern oder Fasern mit Curl strömen leichter durch begrenzte Öffnungen. Sind die Siebmaschen aufgeraut oder die Fasern extern fibrilliert, behindert dies wiederum den Durchgang. Die Fibrillierung ruft noch einen weiteren Effekt hervor: kürzere Fasern können sich an die fibrillierten längeren Fasern heften und fließen somit nicht weiter.

Die Beschleunigung der Strömung in jeder einzelnen Siebmasche beeinflusst ebenfalls die Fraktionierung. Der Geschwindigkeitsgradient in der Sieböffnung bewegt die Faser zur Längsausrichtung und somit zur Durchströmung. Dies ist vergleichbar mit einem langen Haar in einer mit Wasser gefüllten Badewanne und geöffnetem Ausfluss, das quer nicht durch den Ausfluss passt, sich durch die Ausflussströmung aber der Länge nach ausrichtet und somit den Ausfluss passiert.

Eine höhere Trennschärfe wird durch eine langsamere Fließgeschwindigkeit (i.e. längere Fraktionierzeit) und durch eine langsamere Relativgeschwindigkeit der Fasersuspension am Sieb vorbei erreicht. Beides minimiert die lokal auftretenden Wirbel [9].

Die Faserlänge in einer Kammer

Sie ist abhängig von der Art und Größe der Sieböffnung (i.e. Siebnummer) sowie der Art des Faserstoffs [5]. Die verwendete Tyler Siebnummer beschreibt die Anzahl der Öffnungen pro Zoll (englisch: Inch) im Sieb. In Tabelle 2.1 sind gängige Siebnummern und deren Maschenweite dargestellt. Die U.S. Siebnummer unterscheidet sich von der Tyler Siebnummer dadurch, dass die U.S. Siebnummer willkürlich gewählt ist [1].

Die Wahl der Siebe ist entscheidend. Werden zu kleine Maschenweiten oder zu hohe Probengewichte gewählt, kann es zu Filtereffekten kommen. Bei einem zu hohen Probengewicht zirkulieren in einer Kammer zu viele Fasern. Die Fasern bilden ein loses Netzwerk und dieses kann sich im Zuge der Strömung zum Sieb, zu einer Fasermatte auf dem Sieb verdichten. Die Fasermatte behindert den Durchfluss kürzerer Fasern. Aus diesem Grund gibt es in Tappi T233 cm-06 und von LEVLIN [5] Empfehlungen, welche Tyler Siebnummern für welchen Stoff verwendet werden sollen. Eine weitere Orientierungshilfe von LEVLIN ist, dass der Massenanteil in den einzelnen Fraktionen nicht größer als 30 % bis 40 % sein soll.

Tabelle 2.1: Siebnummern und Maschenweite [1]

U.S. Sieb Nr.	Tyler Sieb Nr.	Maschenweite [mm]	Maschenweite [inch]
10	9	2,00	0,0787
12	10	1,68	0,0661
14	12	1,41	0,0555
16	14	1,19	0,0469
18	16	1,00	0,0394
20	20	0,841	0,0331
30	28	0,595	0,0234
40	35	0,420	0,0165
50	48	0,297	0,0117
60	60	0,250	0,0098
80	80	0,177	0,0070
100	100	0,149	0,0059
140	150	0,105	0,0041
170	170	0,088	0,0035
200	200	0,074	0,0029

Die Faserlängenverteilung in den einzelnen Kammern ist nach ANDERSSON [16] annähernd Gauß verteilt. Das heißt, dass die Verteilung eine Glockenkurve um die Maschenweite bildet. Die Faserlängenverteilung respektive die Faserlänge in einer Kammer ist nicht nur von der Faserlänge der Fasern, sondern auch von anderen morphologischen Eigenschaften des Faserstoffs abhängig [11, 23]:

Faserbreite: Eine lange breite Faser bleibt eher hängen als eine lange dünne Faser.

Coarseness: Eine Faser mit einer höheren Coarseness bleibt mit höherer Wahrscheinlichkeit zurück als eine mit niedrigerer Coarseness.

Flexibilität Diese Eigenschaft hängt eng mit der Coarseness zusammen. Flexible Fasern passen sich der Strömung leichter an und fließen daher auch leichter durch.

Ein weiterer Faktor der berücksichtigt werden muss ist der Aschegehalt bei wiederaufbereiteten Faserstoffen. Wird ein Faserstoff mit 10 % Aschegehalt laut Tappi T233 cm-06 mit 10 g otro fraktioniert, so beträgt der tatsächlich fraktionierte Faseranteil nur 9 g otro. Der Aschegehalt schlägt sich in der Feinstofffraktion nieder und beeinflusst damit die Massenverteilung. Bei bekanntem Ascheanteil kann auf die 10 g otro reinen Faserstoff zurückgerechnet werden.

SABOURIN & AYER [11] nennen drei Limitierungen der Faserfraktionierung nach Bauer McNett:

Mechanismus der Fraktionierung: Theoretisch beschreibt die Bauer McNett Fraktionierung die Auftrennung in Faserlängensklassen, aber wie auf Seite 8 beschrieben, hängt die Fraktionierung von mehr als nur der Faserlänge ab.

Massenanteile: Die Anteile der Fraktionsklassen sind abhängig von der Masse und nicht von der Länge der Fasern. Fehler werden dadurch über die Konsistenzbestimmung und die Abwaage eingebracht.

Zeitintensiv: Die gesamte Auswertung einer Fraktionierung einer Faserstoffprobe nimmt an die 1,5 Stunden in Anspruch. Dadurch ist die Häufigkeit des Tests beschränkt und in weiter Folge kann die Bauer McNett Fraktionierung auch nicht on-line angewandt werden.

Die Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit

Mit Reproduzierbarkeit ist der Vergleich der Fraktionierung desselben Faserstoffs in unterschiedlichen Laboratorien gemeint. Die Wiederholbarkeit beschreibt den Vergleich der Messungen eines Faserstoffs an einem Messgerät. ANDERSSON [16] untersuchte die Fraktionierung und die Wiederholbarkeit des Bauer McNett Fraktioniergeräts und kam zum Schluss, dass die Bauer McNett Fraktionierung eine geringere Standardabweichung als andere Fraktioniergeräte aufweist. LEVLIN [5] untersuchte später ebenfalls die Wiederholbarkeit der Fraktionierung mit einem Bauer McNett Fraktioniergerät und die Reproduzierbarkeit mit verschiedenen Bauer McNett Fraktioniergeräten. Er hat dabei drei Faserstoffe untersucht: einen Holzschliff, einen ungemahlene Birken Sulfat Zellstoff und einen ungemahlene Kiefern Sulfat Zellstoff. Die Ergebnisse zeigen, dass der Variationskoeffizient aus fünf Messungen für Holzschliff am niedrigsten und für die beiden Zellstoffe befriedigend ist, daher die Bauer McNett Fraktionierung auch für Zellstoffe geeignet ist. Als Vergleich dazu wurde die Wiederholbarkeit der Bauer McNett Fraktionierung mit dem in Bruck an der Mur verwendeten Fraktionierer im Labor erarbeitet. Das Ergebnis ist in Tabelle 2.2 dargestellt und zeigt bis auf die R_{16} Fraktion ähnliche Werte wie in LEVLIN für Holzschliff.

Tabelle 2.2: Wiederholbarkeit der eigenen Bauer McNett Fraktionierung anhand vier Fraktionierungen.

	R_{16}	R_{30}	R_{50}	R_{200}	D_{200}
Mittelwert [%]	2,57	15,7	17,75	27,88	35,84
Standardabweichung [%]	0,11	0,11	0,15	0,14	0,29
Variationskoeffizient []	4,11	0,67	0,86	0,49	0,80

Die Reproduzierbarkeit verschiedener Bauer McNett Fraktionierer ergab recht unterschiedliche Ergebnisse (siehe Tabelle 2.3). LEVLIN versendete fünf Faserstoffproben an fünf verschiedene Laboratorien. Alle Faserstoffe wurden auf die gleiche Weise vorbereitet und unter-

Tabelle 2.3: Ergebnisse der Bauer McNett Fraktionierung in 5 verschiedenen Laboratorien [5]

Laboratory	A	B	C	D	E		
Tester	1	1	1	1	2	3	1 2
1. Unbeaten sulphate pulp							
Sieve No. 14	4,8	28,0	0,2	5,8	14,8		11,1 1,5
20	28,9	24,8	43,3	24,0	43,3		31,9 35,1
48	44,3	29,7	35,0	63,7	27,2		37,5 36,0
200	18,9	11,8	17,1	4,6	12,6		15,8 18,0
through 200	3,2	5,7	4,4	1,9	2,1		3,1 3,9
2. Unbeaten birch sulphate pulp							
Sieve No. 14	8,8	10,7	10,2	8,7	10,1		12,4 9,3
20	29,1	54,6	38,7	38,5	64,0		42,0 24,1
48	45,6	20,5	34,2	44,9	13,2		31,5 54,4
200	9,7	5,7	10,6	1,0	7,3		7,7 6,6
through 200	6,9	8,5	6,3	6,9	5,4		6,4 5,0
3. Groundwood pulp 1							
Sieve No. 28				12,2	13,5	13,9	
48				20,6	24,0	22,6	
100				18,8	17,4	18,8	
200				11,4	14,5	13,2	
through 200				37,0	30,6	31,5	
4. Groundwood pulp 2							
Sieve No. 28		14,0			11,9	12,4	
48		20,3			22,1	21,8	
100		17,2			18,0	18,5	
200		14,8			14,8	13,4	
through 200		33,7			33,2	33,9	
5. Thermomechanical pulp							
Sieve No. 28				30,0	33,4	32,7	
48				20,7	21,5	20,7	
100				12,5	11,4	12,1	
200				7,2	8,5	8,0	
through 200				29,6	25,2	26,5	

sucht. Die Reproduzierbarkeit für Langfaser Zellstoffe ist bei einem Vergleich mit Holzschliff geringer. Dabei ist zu beachten, dass die Bauer McNett Fraktionierung üblicherweise nur zur Fraktionierung von Holschliff verwendet wird. Weiters gilt es zu berücksichtigen, dass sich manche Bauer McNett Fraktionierer in ihrer Bauweise unterscheiden [5].

2.3 Kajaani PulpExpertTM

Der Kajaani PulpExpertTM (Abbildung 2.4) von Metso automation ist ein vollautomatischer on-line Messroboter zur Messung der wichtigsten Eigenschaften von Holzschliff, Zell-



Abbildung 2.4: Der Kajaani PulpExpert™



Abbildung 2.5: Das Faser und Splitter Modul des PulpExpert™

stoff und aufbereiteten Faserstoffen. Er besitzt einen eigenen Pulper und einen Blattbildner und misst:

Konsistenz

Mahlgrad: Schopper-Riegler und CSF

fasermorphologische Eigenschaften: Faserlänge, Faserbreite, Faserlängenverteilung, Curl, Kink, Coarseness, Feinstoff und Splitter

optische Eigenschaften: Weiße, Opazität und Schmutzpunkte

Festigkeitseigenschaften: Reißlänge und Weiterreißarbeit

pH Wert und Leitfähigkeit

Diese Messungen können von bis zu 8 fixen Probenahmelinien vorgenommen werden. Die Entnahmestellen können über 100 m (in *Bruck a. d. Mur* bis 150 m) weit entfernt sein und sind über Rohrleitungen an den PulpExpert™ angeschlossen. Neben den 8 fixen Probenahmelinien kann der PulpExpert™ mit manuellen Proben beaufschlagt werden. Die Beschreibung des PulpExpert™ an dieser Stelle beschränkt sich auf das Faser und Splitter Modul (pulpexpertSHIVE module).

Das Faser und Splitter Modul ist auf der rechten Seite des PulpExpertTM angebracht und besteht aus einem Verdünnungsbehälter und dem Kameramodul mit flow cell (Abbildung 2.5). Die Arbeitsweise wurde bereits in Kapitel 1.1 kurz angedeutet. Das Modul holt sich aus dem Pulper eine Faserstoffprobe, die Menge kann manuell voreingestellt oder automatisch berechnet werden und verdünnt die Probe in dem mit Druck beaufschlagten Verdünnungsbehälter (Tank links in Abbildung 2.5). Zuerst führt der PulpExpertTM die Splitteranalyse bei einer Konsistenz von circa 0,015 % durch. Dabei wird die Faserstoffprobe durch die flow cell gepumpt und von einer hochauflösenden Kamera abgelichtet. Nach der Splitteranalyse scheidet der PulpExpertTM den analysierten Teil des Faserstoffs über ein Auslassventil aus.

Nach der Splitteranalyse verdünnt der PulpExpertTM die Faserstoffprobe nochmals auf circa 0,002 % und führt die Faseranalyse durch. Das Modul wertet bei der Splitteranalyse zwischen 3 g otro und 6 g otro mit einer Geschwindigkeit von 1 g min^{-1} und bei der Faseranalyse zwischen 500.000 und 3.000.000 Fasern mit einer Geschwindigkeit von $8.000 \text{ Fasern s}^{-1}$ aus [13, 14].

Das Messprinzip

Die Faser und Splitter Modul Messung basiert auf subpixelgenauer Erfassung der Objektstrukturen durch Messung des Schattens, den das Objekt abbildet. In diesem Fall stellt die Faser das abgelichtete Objekt dar.

Die Aufgabe der Bildanalyse bei dieser Art Klassifizierung ist, die Objekte auf jedem aufgenommenen Bild zu erfassen und deren Qualität und Größe zu bestimmen. Ein üblicher Weg, die Größe eines Objektes zu bestimmen, ist, die Umrisse des Objektes auf dem Bild approximativ zu erfassen, anschließend den Bereich innerhalb des Umrisses zu errechnen und die Kontur der Fläche auszuwerten.

Das Bild eines Objekts ist eine Kombination aus Objektfarbe, Transparenz, Kontur, Größe und Position desselben. Zwei unterschiedliche Objekte können zwei sehr ähnliche Bilder ergeben. Die Klassifizierung der Objekte ist daher immer eine Approximation. Je besser das sogenannte Mapping der Bilddaten erfolgt, desto besser nähert sich das Ergebnis der Realität an.

Zur Verdeutlichung des Prinzips der Erfassung des Objekts kann man sich analog einen dunklen Raum mit einem Fenster von 1 m^2 vorstellen. Befindet sich in diesem Fenster ein Objekt von $0,5 \text{ m}^2$, hält es 50 % des Lichteinfalls ab. Beträgt die Objektgröße $0,2 \text{ m}^2$ so hält es $\frac{1}{5}$ des einfallenden Lichts ab. Zur Erfassung des einfallenden Lichts wird ein lichtempfindlicher Sensor benötigt. Die Genauigkeit der Messung hängt von der Anzahl der

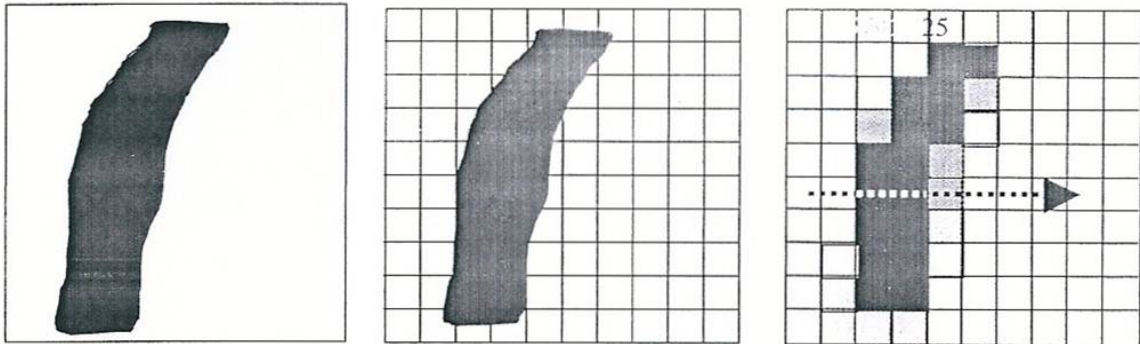


Abbildung 2.6: Veranschaulichung des Messprinzips des pulpexpertSHIVE module [13]

Grauwertstufen, die mit einem Sensor erfasst werden können, ab. Bei einem 8 bit Sensor sind das $2^8 = 256$ Werte mit einer Genauigkeit von $\frac{1\text{m}^2}{256} = 0,004 \text{m}^2$.

Mit einem Sensor ist die Objektgröße erfassbar, nicht aber dessen Kontur. Bei einer Teilung des Fensters in 10×10 Fenster, in dem jedes Fenster seinen eigenen dunklen Raum besitzt, ist es möglich, für jeden kleinen Raum mit $0,01 \text{m}^2$ den Lichteinfall unabhängig von den anderen Räumen zu messen. Verhindert ein $0,2 \text{m}^2$ großes Objekt den Lichteinfall vor dem Fenster, so sind manche Räume komplett dunkel, manche komplett hell und manche, die am Rand des Objekts liegen, teilweise verdunkelt. Die Gesamtfläche des Objekts wird durch Aufsummierung der Flächen der einzelnen Räume berechnet und bleibt gleich, aber die Auflösung mit 8 bit Sensoren erhöht sich durch $\frac{0,01 \text{m}^2}{256} = 0,00004 \text{m}^2$.

Abbildung 2.6 zeigt ein Beispiel, wie die Objektgröße nach obiger Methode berechnet wird. Im Bild mit dem Pfeil (rechts in Abbildung 2.6) nehmen die Sensoren der $0,01 \text{m}^2$ großen Räume 5 verschiedenen Grauwerte, die gleichbedeutend mit dem Lichteinfall von 0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % sind, auf. Entlang des Pfeils betragen die Werte 0, 0, 100, 100, 50, 0, 0, 0, 0 und 0. Die Berechnung der Faserbreite an dieser Stelle ergibt $\frac{(100+100+50)}{100} \times 0,1 \text{m} = 0,25 \text{m}^2$. Die Berechnung der gesamten Fläche des Objekts erfolgt durch Aufsummierung der Einzelwerte der Sensoren $\frac{(11 \times 100 + 5 \times 75 + 4 \times 50 + 11 \times 25)}{100} \times 0,01 \text{m} = 0,195 \text{m}^2$.

Diese Methode eignet sich besonders zur Erfassung von Objekten, deren größte Dimension (i.e. die Länge) zumindest einige der Fenster (Pixel) abdeckt. Daraus kann die gesamte Kontur berechnet werden, auch wenn das Objekt nur einen Teil eines Pixels abdeckt. Die Methode macht es möglich, große (i.e. Splitter) sowie auch kleine (i.e. Feinstoff) Objekte gleichermaßen zu erfassen und zu klassifizieren.

Die Berechnung des Objektes benötigt hier nicht wie bei anderen Methoden die Kontur des Objektes, sondern nur die korrekte Erfassung des Lichteinfalls, daher hat eine eventuelle Unschärfe des Bildes keine drastischen Auswirkungen auf die Messqualität [13].

Die technischen Details des pulpexpertSHIVE Moduls:

- Kleinste gemessene Partikelgröße: $100 \mu\text{m}^2$
- Auflösung der Partikellänge: 0,01 mm
- Auflösung der Partikelbreite: 0,002 mm
- Messbereich für Partikellänge: 0,01-15 mm
- Messbereich für Partikelbreite: 0,01-2 mm
- Bildbereich: 23×30 mm

Die Faseranalyse beinhaltet folgende Parameter:

- Die drei Mittelwerte der Faserlänge in [mm]
- ISO Faserlänge (Mittelwerte der Faserlänge im Bereich von 0,2-7 mm, das heißt ohne kurze Fasern)
- Faserlängenverteilung
- Feinstoffanteil [%]
- Curl [%]
- Kink Index
- Vessel cells content [Number m^{-1}]
- Coarseness [mg m^{-1}]

Die Wiederholbarkeit wurde mit Zellstoff und Holzschliff getestet und wird vom Hersteller mit einer Standardabweichung von 0,008 mm für Zellstoff und 0,003 mm für Holzschliff bei der Faserlänge angegeben und gründet auf der hohen Anzahl an gemessenen Fasern [13].

Die Ergebnisausgabe

Die Ausgabe der Ergebnisse ist benutzerfreundlich auf einem Computer, der auf Windows XP arbeitet, dargestellt. Auf diesem Computer arbeitet das Programm PePages, welches alle Ergebnisse berechnet und schließlich darstellt. Das pulpexpertSHIVE Modul berechnet die Ergebnisse in einem anderen Programm (i.e. OEVision) und sendet diese an PePages.

Einflüsse

Die Einflüsse auf das Ergebnis der Faseranalyse sind vielschichtig:

Feinstoff: Der Feinstoff beeinflusst die Messung auf zweierlei Art. Einerseits ist nicht klar, inwieweit der Feinstoff erkannt und erfasst wird, auf der anderen Seite wirkt sich die Feinstoffbelastung im Messsystem selbst negativ aus. Auch nach dem vorgeschriebenen Reinigungszyklus befindet sich Feinstoff im System. Bei einer Vergleichsmessung mit Wasser erreichen die Mittelwerte der Faserlänge (Arithmetisch und zwei Gewichtete) die Größenordnung der D_{200} und R_{200} Fraktionen, bei den ISO Faserlängen (ohne kurze Fasern) bis zur Größenordnung der R_{50} Fraktion. Eine weitere Vergleichsmessung mit dem Kajaani FS200 zeigte, dass das pulpexpertSHIVE Modul tendenziell mehr Feinstoff darstellt.

Messdrift: Wenn der PulpExpertTM 24 Stunden am Tag arbeitet und nur bei Reinigungsarbeiten keine Faserstoffproben analysiert, kann es vorkommen, dass sich Partikel in der flow cell festsetzen. Dadurch ist die Feinstoffdetektion nicht mehr ausreichend genau, der Feinstoffanteil der Messung sinkt und die Mittelwerte der Faserlängen steigen.

Splitter: In der Splitteranalyse erfolgt eine Berechnung des Splitteranteils im Faserstoff. In der nachfolgenden Faseranalyse ist nicht klar, wie das Gerät Splitter, die zuvor in der Splitteranalyse als solche erkannt wurden, definiert, weil keine Ausgabe des Splitteranteils in der Faseranalyse ersichtlich respektive möglich ist.

Parameter: Der PulpExpertTM gibt einige Werte (i.e. Coarseness, Faseranzahl und Probengewicht) aus, bei denen Unsicherheiten bezüglich deren Berechnung bestehen. Eine der Methoden zur Simulation der Bauer McNett Fraktionierung benötigt diese Werte. Die Rohdaten der Berechnung, sofern zugänglich, unterscheiden sich von den in der Ausgabe dargestellten fertigen Daten.

Durchführung der Probenanalyse

Die Beaufschlagung des PulpExpertTM mit manuellen Proben, den Bauer Mcnett Fraktionen, lief nach einem empirisch entwickelten Verfahren ab. Die Messwerte der einzelnen Fraktionen bilden die Grundlage für die nachfolgende Modellerstellung. Die generierten Messwerte werden am PulpExpertTM zwischengespeichert und anschließend für die in Kapitel 4 beschriebenen Modelle in MATLAB entsprechend präpariert.

Vor der Durchführung der Faseranalyse wurden die automatischen Probenahmelinien abgeschaltet und der Pulper des PulpExpertTM gereinigt sowie eine Messung mit Leitungswasser durchgeführt, um möglichst viel Feinstoff aus dem System zu waschen. Die Abfolge

der Probenaufgabe hat einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat der Analyse. Es hat sich gezeigt, dass bei Beprobung der R_{16} Fraktion nach vorhergehender R_{200} Fraktion der Feinstoffanteil der R_{16} Auswertung auf einem höheren Niveau lag als bei vorhergehender Wassermessung. Aus diesem Grund war die Reihenfolge der Beaufschlagung an den ansteigenden Feinstoffanteil in den Fraktionen gekoppelt, Wassermessung, R_{16} , R_{30} , R_{50} , R_{200} und zuletzt D_{200} . Die D_{200} Fraktion wurde nur anfangs gemessen. Der Aufwand, die D_{200} Fraktion aus der Bauer McNett Fraktionierung zu gewinnen, war zu groß. (Der Durchgang betrug rund 30% (i.e. bei 10 g otro rund 3 g otro). Bei einem Durchsatz im Bauer McNett von circa 11 L min^{-1} sind das 3 g otro auf 220 L Wasser.)

Die aufgegebene Probenmenge blieb für alle Fraktionen mit circa 5 g otro konstant, obwohl das pulpexpertSHIVE Modul eine optische Konsistenzmessung durchführt.

Welche der Ergebnisse, die das pulpexpertSHIVE Modul berechnet, zur Verwendung kommen, wird in Abschnitt 4.2 beschrieben.

Kapitel 3

Stand der Technik

Die Blatteigenschaften eines fertigen Papiers werden geprüft seitdem Papier hergestellt wird. Die genauere Erfassung der Fasermorphologie ist erst seit einem vergleichsweise kurzem Zeitraum möglich und wird immer weiter verbessert. Zu Beginn musste die Faserlänge mühsam und sehr zeitintensiv gemessen werden. Die getrocknete Faser wurde auf einen Projektor gelegt und der Schatten, den die Faser auf die Wand warf, wurde mit einem Messrad abgefahren und über einen entsprechenden Maßstab umgerechnet. Mittlerweile ist diese Art der Messung obsolet und die vollautomatische Messung hat sich durchgesetzt.

Da die einzelnen Fasern die Basis eines Blattes bilden, ist es von Interesse, die Eigenschaften derselben genauer zu bestimmen. Die Intention dahinter ist, durch Beschreibung der Einzelfaser auf das gesamte Fasernetzwerk zu schließen. Diese Arbeit ist nicht die erste, die sich mit diesem Thema beschäftigt. Es gibt verschiedenste Möglichkeiten, von Einzelfasereigenschaften auf die Eigenschaften des gesamten Faserstoffs zu schließen. In diesem Kapitel werden vier Modelle beschrieben, die basierend auf der automatischen optischen Faseranalyse die Bauer McNett Fraktionen berechnen:

- Methode der Gewichtsfaktoren
- Methode der modifizierten Gewichtsfaktoren
- Multikomponentenanalyse
- Trenngradmodell

Alle Modelle haben gemein, dass sie von der Faserlängenverteilung eines Faserstoffs ausgehen. Faserlängenverteilungen können sehr aussagekräftig sein, weil sie Informationen über die Ursprünge des Faserstoffs und dessen Historie in der Stoffaufbereitung wiedergeben [2].

3.1 Methode der Gewichtsfaktoren

SABOURIN & AYER [11] beschreiben den Zusammenhang zwischen der Bauer McNett Massenverteilung und der Anzahlverteilung aus automatisierter optischer Faseranalyse mittels sogenannter Gewichtsfaktoren. Für die Berechnung der einzelnen Bauer McNett Fraktionen wird ein zuvor bestimmter Satz an Gewichtsfaktoren und Faserlängenintervallen benötigt, die anschließend in die Korrelationsgleichung eingesetzt werden:

$$R_{14} = \frac{W_{14} * \sum Ni_{14}}{T} * 100 \quad (3.1)$$

$$R_{28} = \frac{W_{28} * \sum Ni_{28}}{T} * 100 \quad (3.2)$$

$$R_{48} = \frac{W_{48} * \sum Ni_{48}}{T} * 100 \quad (3.3)$$

$$R_{100} = \frac{W_{100} * \sum Ni_{100}}{T} * 100 \quad (3.4)$$

$$R, P_{200} = \frac{W_{200} * \sum Ni_{200}}{T} * 100 \quad (3.5)$$

$$T = W_{14} * \sum Ni_{14} + W_{28} * \sum Ni_{28} + W_{48} * \sum Ni_{48} + W_{100} * \sum Ni_{100} + W_{200} * \sum Ni_{200} \quad (3.6)$$

Ni_{14} ... Anzahl der Fasern im Faserlängenintervall R_{14}

W_{14} ... Gewichtsfaktor für Faserlängenintervall R_{14}

Ni_{28} ... Anzahl der Fasern im Faserlängenintervall R_{28}

W_{28} ... Gewichtsfaktor für Faserlängenintervall R_{28}

Ni_{48} ... Anzahl der Fasern im Faserlängenintervall R_{48}

W_{48} ... Gewichtsfaktor für Faserlängenintervall R_{48}

Ni_{100} ... Anzahl der Fasern im Faserlängenintervall R_{100}

W_{100} ... Gewichtsfaktor für Faserlängenintervall R_{100}

Ni_{200} ... Anzahl der Fasern im Faserlängenintervall R_{200} und R_{200}

W_{200} ... Gewichtsfaktor für Faserlängenintervall R_{200} und R_{200}

Die Vorgangsweise bei der Berechnung der Bauer McNett Fraktionen aus der optischen Faseranalyse mittels Faseranalysegerät (i.e. FiberScanTM) ist folgende:

Durchführung der Bauer McNett Laborfraktionierung: Für den zu untersuchenden Faserstoff ist zu Beginn eine Laborfraktionierung durchzuführen, um eine ge-

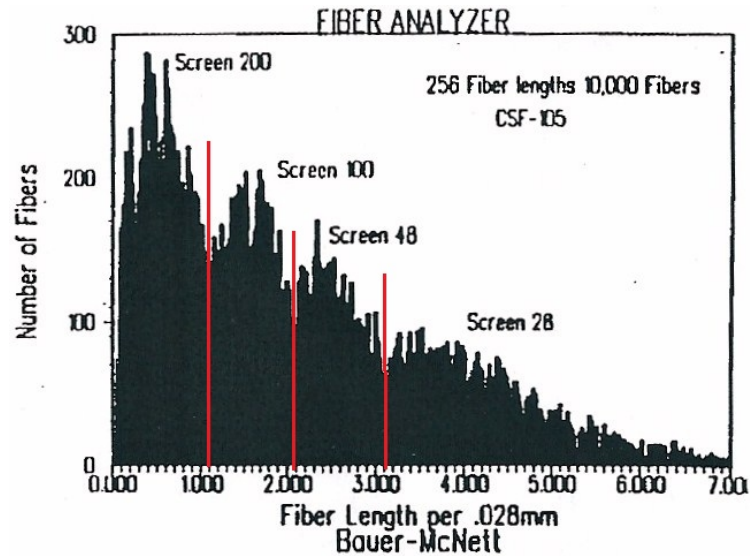


Abbildung 3.1: Die einzelnen Bauer McNett Fraktionen in einer FiberScanTM Faserlängenverteilung zusammengefasst [11].

eignete Datenbasis zu schaffen. Diese Bauer McNett Werte werden danach für die Korrelationsberechnung benötigt, um die Gewichtungsfaktoren zu berechnen.

Empirische Bestimmung der Faserlängenintervalle: Als Faserlängenintervalle werden jene Bereiche auf der Abszisse einer Faserlängenverteilung bezeichnet, in denen die jeweilige Fraktion die höchsten Anteile aufweist. Jede einzelne Fraktion der Bauer McNett Fraktionierung wird im FiberScanTM analysiert und in einer Faserlängenverteilung (siehe Abbildung 3.1) gesammelt dargestellt. In diesem Diagramm sind die für die Faserlängenintervalle notwendigen Grenzen ersichtlich.

Kalibrierung der Gewichtungsfaktoren: Nach der Wahl der Faserlängenintervalle für jede einzelne Fraktion werden die Gewichtungsfaktoren auf die gemessenen Laborfraktionen kalibriert. Jede Entnahmestelle respektive jeder Faserstoff erhält eigene Faserlängenintervalle sowie eigene Gewichtungsfaktoren.

Simulieren der Bauer McNett Fraktionierung: Der vorhandene Satz an Faserlängenintervallen und Gewichtungsfaktoren kann nun für die Simulation der Bauer McNett Fraktionierung eingesetzt werden.

SABOURIN & AYER [11] geben an, dass die Simulation mit einem Datensatz trotz Mahlgradschwankungen von 29 CSF gute Korrelationen erzielt und auch die Trends gut widergegeben werden. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei allen Bauer McNett Fraktionen über 90 %.

3.2 Methode der modifizierten Gewichtungsfaktoren

NIINIMÄKI *et al.* [6] erweitern die Methode von SABOURIN & AYER [11] um einen Einflussparameter nach der Feststellung, dass die Feinstoffdetektion der P_{200} Fraktion im Faseranalysegerät limitiert ist. Ebenso erkennen NIINIMÄKI *et al.* [6], dass unterschiedliche Mahlgradebereiche den Anteil der R_{14} Fraktion beeinflussen. Die Gewichtungsfaktoren der beiden Fraktionen R_{14} und P_{200} sind in diesem Modell abhängig vom Mahlgrad:

$$\text{Gewichtungsfaktor } P_{200} = -3,5468 \times \ln(CSF) + 34,083 \quad (3.7)$$

$$\text{Gewichtungsfaktor } R_{14} = 0,3485 \times \ln(CSF) - 0,2469 \quad (3.8)$$

Die Limitation dieses Modells liegt darin, dass es nur für Thermomechanical Pulp entwickelt wurde. Andere Faserstoffe benötigen ihre eigenen Modelle, da Anwendungen dieses Modells auf Holzschliff gezeigt haben, dass die modifizierten Gewichtungsfaktoren weiter verändert werden müssen. Thermomechanical Pulp und Holzschliff sind zwar beides Holzstoffe, jedoch werden bei ersterem Hackschnitzel in einem Refiner und bei letzterem Holzstämmen an einem Schleifstein gemahlen.

3.3 Multikomponentenanalyse

Die Methode von RING & BACON [2] ist ein mathematischer Ansatz, um die Massenanteile aus einer Fasersuspension unterschiedlicher Zusammensetzung zu berechnen. Das Modell basiert auf Verteilungsmomenten, um die Form der Faserlängenverteilung zu beschreiben. Ein weiterer wichtiger Bestandteil sind die Faserlängenmittelwerte.

Momente einer Verteilung: Momente sind Zahlen zur Charakterisierung einer Zufallsgröße X mit der Verteilungsfunktion $F(x)$, zum Beispiel: Erwartungswert (1. Moment), Varianz (2. Moment), Schiefe (3. Moment, siehe Abbildung 3.2) und Wölbung (4. Moment, siehe Abbildung 3.3) [3, 17].

$$m'_k = \frac{\sum_{i=0}^h n_i l_i^k}{\sum_{i=0}^h n} = \frac{\sum_{i=0}^h n_i l_i^k}{N} \quad (3.9)$$

m ... Moment

N ... Summe aller Fasern

h ... Anzahl der der Faserlängenklassen

n ... Anzahl der Fasern in einer Faserlängenklasse i mit dem Klassenmittel l_i

k ... Integer, der die Höhe des Moments angibt

Mittelwerte der Faserlänge: In der Literatur werden drei Faserlängenmittelwerte angegeben: der arithmetische Mittelwert und zwei gewichtete Mittelwerte. Ein gewichteter Mittelwert wird dann verwendet, wenn die Masse eines Objekts eine physikalische Eigenschaft mehr als dessen Quantität beeinflusst. Das bedeutet für Holzstoff, dass der viele Feinstoff eine hohe Anzahl an Objekten bedingt, die langen Fasern hingegen viel weniger Objekte zur Gesamtanzahl der gemessenen Objekte beitragen. In diesem Fall spiegelt nicht die Anzahl der Objekte die Bedeutung für eine physikalische Eigenschaft (i.e. Festigkeit des fertigen Papiers) wider, sondern die Masse der einzelnen Objekte. Der hohe Feinstoffanteil beeinflusst zwar auch die Festigkeit, aber bei Betrachtung des einzelnen Objektes, beeinflusst ein Feinstoffpartikel die Festigkeit weniger als eine lange Faser. Der größte Anteil der Masse kommt von den längeren Fasern [2]. Die Berechnung der Mittelwerte:

$$\bar{A} = \frac{\sum nl}{\sum n} = \frac{\sum nl}{N} \quad (3.10)$$

$$\bar{L} = \frac{\sum wl}{\sum w} = \frac{\sum (nQl)l}{\sum nQl} = \frac{Q \sum (nl)l}{Q \sum nl} = \frac{\sum nl^2}{\sum nl} \quad (3.11)$$

$$\bar{W} = \frac{\sum wl}{\sum w} = \frac{\sum (nQl)l}{\sum nQl} = \frac{\alpha \sum nl^3}{\alpha \sum nl^2} = \frac{\sum nl^3}{\sum nl^2} \quad (3.12)$$

\bar{A} ... arithmetischer Mittelwert der Faserlängenverteilung in [mm]

\bar{L} und \bar{W} ... gewichtete Faserlängenmittel [mm]

Q ... die Masse einer Faser pro Längeneinheit (Coarseness) in [mg m^{-1}]

w ... die Masse von n Fasern mit der Coarseness Q und der Länge l

α ... empirischer Proportionalitätsfaktor

Die gängigen Termini für die beiden gewichteten Mittelwerte sind **längengewichtete Faserlänge** für \bar{L} und **gewichtsgewichtete Faserlänge** für \bar{W} .

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass es unterschiedliche Möglichkeiten gibt, um die Faserlängenverteilung darzustellen. Auf der Abszisse ist immer die

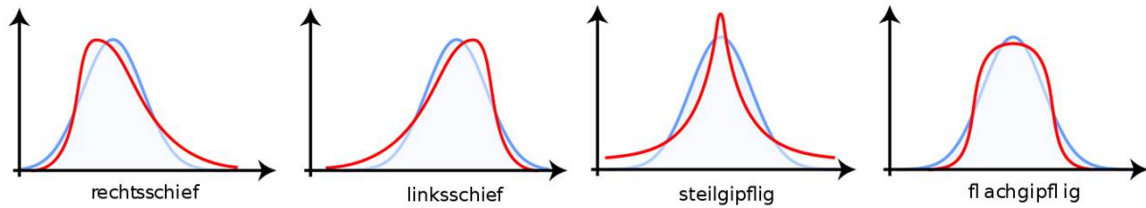


Abbildung 3.2: Die Schiefe ist ein Maß für die Symmetrie einer Verteilung

Abbildung 3.3: Die Wölbung ist ein Maß für die Steilheit einer Verteilung

Faserlänge aufgetragen. Auf der Ordinate können drei unterschiedliche Eintragungen dargestellt sein. Die erste Darstellung entspricht einer arithmetischen Verteilung (n vs. l), die zweite Darstellung erzeugt eine längengewichtete Verteilung (nl vs. l), und die dritte Darstellung bildet die gewichtsgewichtete Verteilung ab (nl^2 vs. l).

Es gibt keine generelle Übereinkunft, welches der beiden gewichteten Mittel verwendet wird [9]. CLARK [9] gibt an, dass Q nicht konstant über die Faserlänge ist, sondern proportional zur Faserlänge mit $Q = \alpha * l$ steigt. BENTLEY *et al.* [18] widersprechen dem nicht, schreiben aber, dass jenes Mittel verwendet werden soll, dass dem Fasermaterial gerecht wird. Weiters meinen BENTLEY *et al.*, dass eine proportionale Änderung der Coarseness bedeutet, dass die Faser während einer Kürzung gleichzeitig auch der Länge nach gesplittet wird, und dieses Phänomen tritt selten auf.

RING & BACON [2] verwenden nicht nur einen der Mittelwerte, sondern alle drei, da alle Mittelwerte die Verteilung beschreiben und auch durch Verhältnisse der Momente einer Verteilung darstellbar sind. Die folgende Umformung der drei Faserlängenmittelwerte zeigt, dass sie im Prinzip Funktionen der Momente einer Verteilung sind:

$$\bar{A} = \frac{\sum nl}{\sum n} = \frac{\sum nl}{\sum n} \times \frac{\sum n}{\sum n} = \frac{m'_1}{m'_0} \quad (3.13)$$

$$\bar{L} = \frac{\sum nl^2}{\sum nl} = \frac{\sum nl^2}{\sum n} \times \frac{\sum n}{\sum nl} = \frac{m'_2}{m'_1} \quad (3.14)$$

$$\bar{W} = \frac{\sum nl^3}{\sum nl^2} = \frac{\sum nl^3}{\sum n} \times \frac{\sum n}{\sum nl^2} = \frac{m'_3}{m'_2} \quad (3.15)$$

Optische Faseranalysegeräte messen zwar die morphologischen Eigenschaften einer Faser, können aber nicht unterscheiden, zu welchem Fasertyp die Faser gehört. Sie können die Massenanteile, aus dem eine Fasersuspension besteht, nicht bestimmen. Diese Information wird aus einer nachfolgenden Analyse der Daten aus einem Faseranalysegerät gewonnen,

wenn die ursprünglichen Charakteristika der einzelnen Komponenten bekannt sind. Die nächsten Schritte zeigen eine präzise Berechnung der Massenanteile in einer gemischten Fasersuspension [2].

Die gesamt gemessene Masse \hat{w} eines Faserstoffs kann als Produkt der Coarseness Q und der Summe aller Fasern mit der Länge l ausgedrückt werden:

$$\hat{w} = Q \sum nl \quad (3.16)$$

Setzt man Gleichung 3.16 in Gleichung 3.10 bis 3.12 ein, dann ergeben die Summenterme:

$$\sum n = \frac{\hat{w}}{\bar{A} Q} \quad (3.17)$$

$$\sum nl = \bar{A} \sum n = \frac{\hat{w}}{Q} \quad (3.18)$$

$$\sum nl^2 = \bar{L} \sum nl = \frac{\bar{L} \hat{w}}{Q} \quad (3.19)$$

$$\sum nl^3 = \bar{W} \sum nl^2 = \frac{\bar{W} \bar{L} \hat{w}}{Q} \quad (3.20)$$

Die Substitution der Summenterme in den Faserlängenmittelwerten (Gleichung 3.10 bis 3.12) durch Gleichung 3.17 bis 3.20 für einen Faserstoff mit j Fraktionen respektive Komponenten gibt:

$$A_{mix} = \frac{\sum_j (\sum_i nl)}{\sum_j (\sum_i n)} = \frac{\sum_j \frac{\hat{w}_j}{Q_j}}{\sum_j \frac{\hat{w}_j}{A_j Q_j}} \quad (3.21)$$

$$L_{mix} = \frac{\sum_j (\sum_i nl^2)}{\sum_j (\sum_i nl)} = \frac{\sum_j \frac{\bar{L}_j \hat{w}_j}{Q_j}}{\sum_j \frac{\hat{w}_j}{Q_j}} \quad (3.22)$$

$$W_{mix} = \frac{\sum_j (\sum_i nl^3)}{\sum_j (\sum_i nl^2)} = \frac{\sum_j \frac{\bar{W}_j \bar{L}_j \hat{w}_j}{Q_j}}{\sum_j \frac{\bar{L}_j \hat{w}_j}{Q_j}} \quad (3.23)$$

Für die Coarseness der Faserstoffmischung ergibt sich:

$$Q_{mix} = \frac{\sum_j \hat{w}_j}{\sum_j \frac{\hat{w}_j}{Q_j}} \quad (3.24)$$

Das Probengewicht \hat{w} zu verwenden ist schwierig und selten notwendig. Es ist praktikabler, die Verteilung zu normieren. Die Normierung

$$w_{mix} = \frac{w_{mix}}{\sum_j n_j} = \frac{\sum_j (Q_j \sum n_j l)}{\sum_j n_j} = Q_{mix} \bar{A}_{mix} \quad (3.25)$$

erlaubt, das Gewicht w_j einer Komponente des Faserstoffs als Anteil x_j des normierten Gesamtgewichts mit Voraussetzung $\sum x_j = 1$ darzustellen:

$$w_j = Q_{mix} \bar{A}_{mix} x_j \quad (3.26)$$

Gleichungen 3.21 bis 3.23 berechnen die Faserlängenmittelwerte von Faserstoffen, die aus einer beliebigen Anzahl an Komponenten zusammengesetzt sind. RING & BACON [2] berechnen in ihren Experimenten die Faserlängenmittelwerte aus vier verschiedenen Faserstoffen, zwei gebleichten Zellstoffen und zwei ungebleichten Holzstoffen. Die Korrelationen zwischen den berechneten und gemessenen Faserlängenmittelwerten lassen darauf schließen, dass das entwickelte Modell gut arbeitet. Sie erwähnen aber einen störenden Einfluss durch Feinstoff.

Des weiteren berechnen sie aus einem binären Gemisch mit bekannten Faserlängenmittelwerten die einzelnen Fraktionen mit Gleichung 3.21 bis 3.23 durch Ersetzen von w_j mit Gleichung 3.26. Bei einem binären Gemisch ist es möglich, mit einer einzelnen der drei Gleichungen die Fraktionen zu berechnen. Der höchste Korrelationskoeffizient wird mit Gleichung 3.22 erzielt. Das bedeutet, dass die Annahme der konstanten Coarseness Q in diesem Fall die besseren Ergebnisse liefert.

Insgesamt stellen RING & BACON fünf Gleichungen (3.27 bis 3.31) zur Verfügung, mit denen man Faserstoffe mit bis zu fünf Fraktionen berechnen kann. Die fünf Gleichungen sind ausgehend von Gleichung 3.21 bis 3.24 und $\sum x_j = 1$ umgeformt und auf null gesetzt. Die Berechnung der Fraktionen benötigt Methoden der linearen Optimierung.

$$\sum_j x_j = 1 \quad (3.27)$$

$$\sum_j \left(\frac{\bar{A}_{mix} - \bar{A}_j}{A_j Q_j} \right) x_j = 0 \quad (3.28)$$

$$\sum_j \left(\frac{\bar{L}_{mix} - \bar{L}_j}{Q_j} \right) x_j = 0 \quad (3.29)$$

$$\sum_j \left(\frac{\bar{L}_j - x_j}{Q_j} \right) (\bar{W}_{mix} - \bar{W}_j) = 0 \quad (3.30)$$

$$Q_{mix} \sum_j \frac{x_j}{Q_j} = 1 \quad (3.31)$$

Dieses Modell ist hinsichtlich der Anzahl der Fraktionen nicht limitiert. Hat man mehr als fünf Fraktionen, muss man höhere Mittelwerte berechnen, die nicht in der Faserstoffanalyse, wohl aber in der Analyse von Polymeren gebräuchlich sind.

3.4 Trenngradmodell

Die Idee dieses Modells wurzelt in der Beschreibung der Fraktionierung der Faserlänge verursacht durch Sortierer mit Schlitzplatten. Die Faserfraktionierung mittels Sortierer, im Speziellen mit Drucksortierern, ist ein wichtiges Instrument, um die Qualitätseigenschaften vom fertigen Papier zu beeinflussen. So verbessert die Faserfraktionierung von wiederaufbereitetem Faserstoff die Papierfestigkeit, optische Eigenschaften und reduziert den Energieverbrauch. Bei der Sackpapierherstellung verbessert die Faserfraktionierung die Zugfestigkeit und die Porosität. Dies wird ermöglicht, weil durch verschiedene Einsätze (i.e. Loch- beziehungsweise Schlitzkorb mit verschiedenen großen Öffnungen) in den Sortieren gezielt Fasern aussortiert werden können [7].

Mehrere Studien haben sich mit der Beschreibung eines analytischen Modells einer Bauer McNett Fraktionierung beschäftigt. Darin werden die Parameter unterschiedlich bezeichnet und berechnet. Die erste Studie von OLSON [7] beschreibt die Durchflusswahrscheinlichkeit P von Fasern mit einer Länge l in [mm] durch einen Sortierer mit einer bestimmten Schlitzweite, Durchflussgeschwindigkeit und Schlitzgeometrie. Neben anderen empirischen

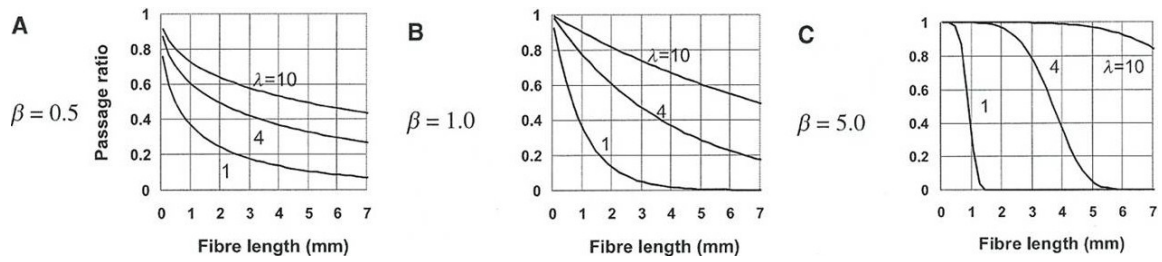


Abbildung 3.4: Kurvenverlauf von $P(l)$ für verschiedene Form- und Größenkonstanten.

Formeln beschreibt nachfolgende Gleichung¹ den Durchfluss durch einen Sortierer am Besten:

$$P(l) = e^{-\left(\frac{l}{\lambda}\right)^\beta} \quad (3.32)$$

In Gleichung 3.32 nimmt die Durchflusswahrscheinlichkeit $P(l)$ bei kurzen Fasern respektive Feinstoff den Wert 1 und bei langen Fasern den Wert 0 an. λ wurde den experimentellen Daten angepasst (i.e. Ausgleichsfaktor) und der Koeffizient β konstant gehalten. Es hat sich gezeigt, dass β in geringem Maße von der Schlitzweite abhängig ist, mehr aber noch von der Art der Sortierplatte, i. e. Schlitz oder Loch.

Eine aktuellere Studie von GOODING & OLSON [19] arbeitet ebenfalls mit Gleichung 3.32 und geht konkret auf Fragen ein, die die Fraktionierung nach Bauer McNett betreffen. $P(l)$ beschreibt wieder die Durchflusswahrscheinlichkeit einer Faser mit der Länge l durch ein Sieb. In der Studie werden λ und β als dimensionslose Konstanten verwendet. β wird als Formkonstante bezeichnet und ist, wie bereits in OLSON [7] beschrieben, abhängig von Art der Sortierplatte. Auf die Bauer McNett Siebe angewendet ist der Wert von β für die Siebe ähnlich den Werten von β für Lochplatten. λ ist, anders als in der vorherigen Studie, eine Größenkonstante und ist abhängig von der Schlitzweite respektive Lochgröße. Die Experimente von GOODING & OLSON zeigen, dass größere Schlitz- und Löcher einen höheren λ Wert ergeben. In Abbildung 3.4 (A,B,C) ist ersichtlich, dass die Durchflusswahrscheinlichkeit P bei $\lambda = 10$ für ein gegebenes β und Fasern mit der Faserlänge l am Größten ist.

Abbildung 3.4 zeigt Charakteristische Kurven für $P(l)$ mit bestimmtem β . Niedrigere Werte für β sind typisch für Sortierer mit Schlitzplatten (A) und höhere Werte für solche mit Lochplatten (B). Je größer β wird, desto mehr nähert man sich einer idealen Trennung (C) an.

¹R. GOODING verwendete diese Gleichung zur Beschreibung der Durchflussrate bereits in einem vertraulichen *Paprican* Bericht.

Die Studie zeigt, dass ein industrieller Drucksortierer und Bauer McNett aufgrund der Ähnlichkeit der Konstanten ähnlich fraktionieren. Die Erkenntnis, dass β der quadratischen Sieböffnungen im Bauer McNett und der Lochplatten im Sortierer den gleichen Wert besitzt, bestärkt die Annahme, dass β eine reine Formkonstante der Sortierung ist.

Kapitel 4

Modellerstellung

Dieses Kapitel beschreibt die Anpassung von drei der vier in Kapitel 3 aufgezählten Methoden an die am Standort vorhandenen Bedingungen und geht auf die Auswertung der gemessenen Daten ein. Die Erweiterung der Methode von SABOURIN & AYER durch NIINIMÄKI *et al.* fällt auf der einen Seite aufgrund der in Abschnitt 3.2 erwähnten Limitierung auf Thermomechanical Pulp weg und auf der anderen Seite ist das Erfassen des Mahlgradeinflusses in den Korrelationsgleichungen 3.7 und 3.8 am Standort *Norske Skog Bruck an der Mur* nicht erforderlich, da der beprobte Druckschliff einen konstanten Mahlgrad aufweist.

4.1 Datenanalyse

Die Datenbasis für die Modelle basiert auf PGW (Pressure Groundwood, dt. Druckschliff) aus zwei verschiedenen Entnahmestellen in der Schleiferei. Daher einen kurzen Überblick über die Schleiferei: Die Beschickung der vier Tampella Druckschleifer erfolgt ausschließlich mit Fichtenholz. Nach den Druckschleifern zerschlagen Hammermühlen gröbere Holzspäne, Druckfilter gewinnen das Spritzwasser zurück, und der Stoff gelangt in die Sammelbütte für die Sortierung. Die Sortierung ist wesentlicher Bestandteil der Schleiferei, da die Sortierung für die Faserlängenverteilung im fertigen Stoff verantwortlich ist.

Der Rejektstrom (i.e. jener Strom, der aussortiert wurde) aus der 3 mm Lochsortierung führt über eine Eindickung (i.e. Bogensieb und Doppelsiebpresse) in einen Refiner. Nach der Mahlung wird der Stoff nochmals mit 0,18 mm und 0,15 mm Schlitz sortiert. Dieser Gutstoff gelangt ebenfalls in den Vorratsturm der Papiermaschinen. Der Rejektstrom führt wieder vor den Refiner.

Nach der Sammelbütte stehen 3 mm Sortierer mit einem Lochkorb. Der Gutstoff gelangt weiter in eine zweistufige Sortierung mit Schlitzkörben mit 0,18 mm Schlitzweite. Dieser Gutstoff wird dem Vorratsturm für die beiden Papiermaschinen zugeführt.

Der Rejektstrom aus der ersten Stufe 0,18 mm Schlitzsortierung wird nochmals mit Schlitzkörben mit 0,18 mm Schlitzweite sortiert. Der Gutstoff kommt in die erste Sammelbütte und der Rejektstrom in den Refiner.

Die Ausbeute in der Schleiferei beträgt 100 %, da an keiner Stelle eine Ausschleusung des Rejekts stattfindet.

Die beiden Entnahmestellen in der Schleiferei sind der sogenannte Fertigstoff und Faserstoff der Rejektlinie. Der Fertigstoff ist Faserstoff aus dem Vorratsturm, der für die Papiermaschinen bestimmt ist. Der Faserstoff der Rejektlinie ist jener Faserstoff, der über den Refiner in den Vorratsturm gelangt, er ist also ein Teilstrom des Fertigstoffs.

Die Probenahme erfolgte vor Ort über Probenahmeventile. Nach kurzem Vorlauf, um konstante Verhältnisse zu schaffen, floss der Faserstoff mit einer Konsistenz von circa 1,20 % in einen 10 L Eimer.

Ein Teil der Datenbasis war schon vorhanden, was Korrelationen über einen längeren Zeitraum möglich macht. Das bedeutet, dass Daten von Fraktionierungen und Auswertungen des pulpexpertSHIVE Moduls bereits im System gespeichert sind und nur noch abgerufen und ausgewertet werden müssen. Der Hauptteil der Datengenerierung bestand aus Fraktionieren nach Bauer McNett und der Auswertung der Fraktionen im PulpExpertTM. Wie bereits in Kapitel 2 auf Seite 17 angedeutet, sind die im System vorhandenen Daten und die neu gewonnenen Daten die Basis für die Korrelation und die Simulation. Anhand dieser Daten werden die Parameter und Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Modelle berechnet und angepasst. Nach der Anpassung dieser Koeffizienten werden die Modelle auf neue Faserlängenverteilungen angewendet und simulieren die Bauer McNett Fraktionierung.

Nicht alle Daten, die das pulpexpertSHIVE Modul berechnet, kommen in der Modellerstellung zur Verwendung. Die verwendeten Parameter sind folgende:

Mittelwerte der Faserlänge: Alle drei Mittelwerte der Faserlänge, das arithmetische, das längengewichtete und das gewichtsgewichtete Mittel werden in die Berechnung miteinbezogen. Das Modul berechnet neben diesen drei Mittelwerten, sogenannte ISO Faserlängen (siehe Seite 16), welche ebenfalls miteinbezogen werden.

Coarseness: Die Coarseness ist einer jener Parameter, dessen Berechnung unklar ist. Daher wurde eine Vergleichsmessung zur Überprüfung der Werte durchgeführt. Diese

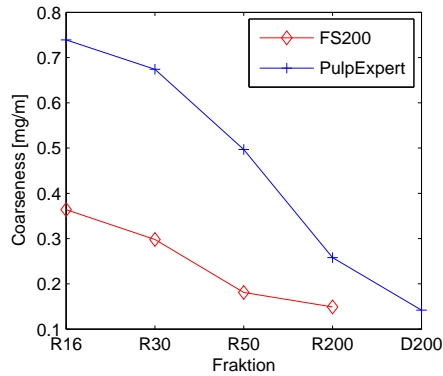


Abbildung 4.1: Vergleichsmessung der Coarseness

Coarseness [mg m^{-1}]	PulpExpert TM	FS200
R_{16}	0,739	0,364
R_{30}	0,674	0,298
R_{50}	0,497	0,181
R_{200}	0,258	0,149
D_{200}	0,142	-

Tabelle 4.1: Vergleichsmessung der Coarseness in PulpExpertTM und Kajaani FS200

Vergleichsmessung der Fraktionen eines Faserstoffs mit dem Kajaani FS200 zeigt deutliche Unterschiede (Abbildung 4.1 und Tabelle 4.1). Bereits in der Einleitung wurde darauf eingegangen, dass bei einem Vergleich zweier Analysatoren unterschiedliche Absolutwerte berechnet werden, in diesem Fall weichen die Trends der beiden Messgeräte (siehe Abbildung 4.1) ebenfalls voneinander ab. Da dieser Messwert direkt für ein Modell übernommen wird, bedingt dies einen zusätzlichen Einflussfaktor respektive eine mögliche Fehlerursache.

Längen-Breitenverteilung: Eine Faserlängenverteilung, wie sie in der Literatur verwendet wurde, steht nicht zur Verfügung. In diesem Fall gelang es, auf Rohdaten zuzugreifen, die eine Längen-Breitenverteilung darstellen. Der Vorteil einer Längen-Breitenverteilung ist, dass auch Änderungen über die Breite miterfasst werden können. Abbildung 4.2 stellt eine Längen-Breitenverteilung einer R_{16} Fraktion eines Fertigstoffs dar, die das pulpexpertSHIVE Modul erstellt hat. Auf der Abszisse ist die Faserlänge mit einer Unterteilung von $50 \mu\text{m}$ Schritten, auf der Tiefenachse die Faserbreite mit einer Unterteilung von $2 \mu\text{m}$ und auf der Ordinate die Häufigkeit in [%] dargestellt.

Diese Verteilung zeigt, dass die Faserverteilung innerhalb einer Fraktion, entgegen ANDERSSON, nicht Gauß ist. Die Verteilung weist zwei Verteilungen auf, eine mit dünnen, kurzen Fasern, den Feinstoff, und eine Verteilung mit längeren, dickeren Fasern. Die Herkunft des Feinstoffs ist nicht geklärt. Einen reinen Messfehler schloss die Vergleichsmessung mit einem Kajaani FS200 aus. Diese Messung hat gezeigt, dass der Feinstoff tatsächlich vorhanden ist. Eine mögliche Interpretation ist, dass der Feinstoff auf den fibrillierten längeren Fasern anhaftet und somit nicht durch ein Sieb strömt. Die Scherkräfte in den Bauer McNett Kammern sind zu gering, als dass der Feinstoff

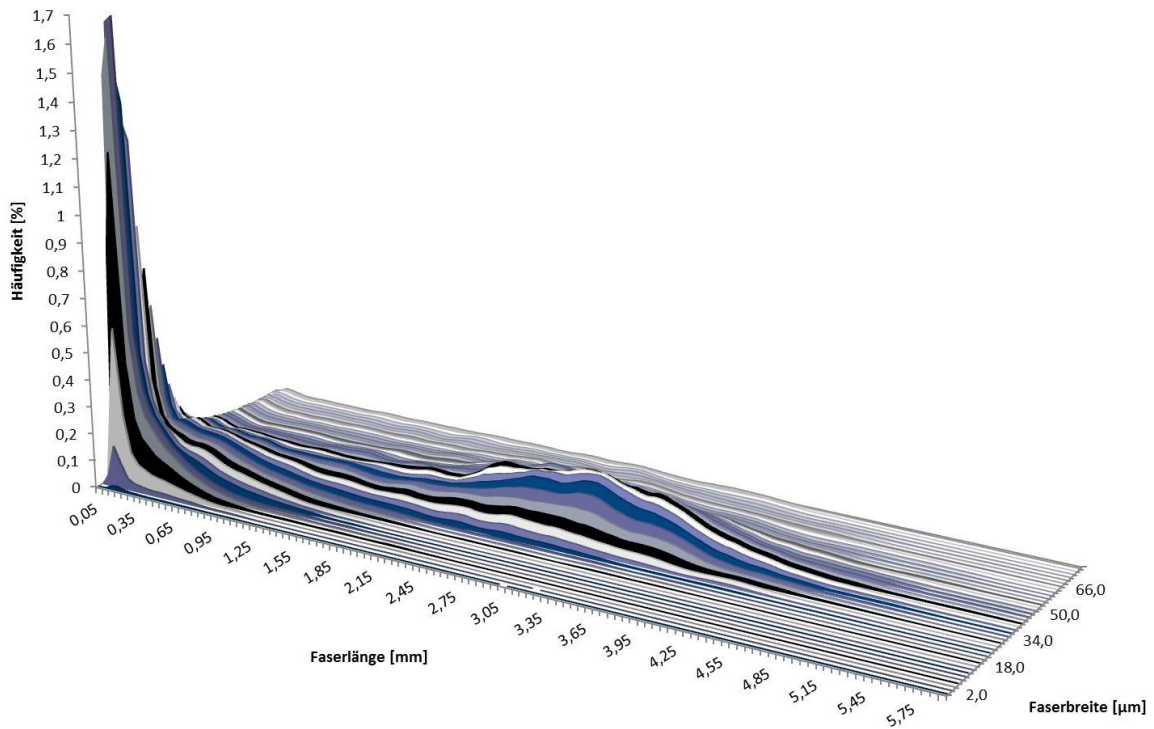


Abbildung 4.2: Beispiel einer R_{16} Längen-Breitenverteilung

sich löst. Die Desintegration (i.e. hohe Scherkräfte) bei der Probenvorbereitung für die Messung mit dem Kajaani FS200 kann den Feinstoff abscheren und denselben bei der Messung detektieren. Bei der Analyse mit dem pulpexpertSHIVE Modul könnte die Zirkulationspumpe für die Abscherung des Feinstoffs verantwortlich sein.

Die Analyse der gewonnenen Daten erfolgte in zwei Programmen, MATLAB und Microsoft Excel.

MATLAB: MATLAB (*matrix laboratory*) ist eine Programmiersprache für technische Berechnungen. Es verbindet Berechnung, Visualisierung und Programmierung in einer benutzerfreundlichen Umgebung, in der Probleme und Lösungen in bekannter mathematischer Notation dargestellt werden.

MATLAB ist ein interaktives System, dessen Berechnungen von technischen Problemen, hauptsächlich in Matrizenform und Vektorform, schneller abläuft als in anderen Programmiersprachen (i.e. C oder Fortran) [21].

Microsoft Excel: Für einige Berechnungen war es praktikabler, Microsoft Excel zu verwenden. Die vorhandenen Berechnungsmethoden führten schneller zum Ziel als mit dem Programm MATLAB.

Nachfolgend sind die statistischen Methoden zur Analyse der Daten in den beiden Programmen aufgeführt [21, 17]:

Lineare Regressionsanalyse mithilfe least squares Methode: Diese Art von Regression zielt darauf ab, eine Ausgleichsgerade so in den vorhandenen Datensatz zu legen, dass die Summe der quadratischen Fehler (Abweichungen) minimal ist. Die daraus resultierende Differenz der Messwerte von der Regressionsgeraden wird als Residuum bezeichnet.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 : Dies wird oft anstelle des Korrelationskoeffizienten R angegeben und lässt eine Aussage über die lineare Abhängigkeit zweier Variablen zu, und R kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Das Bestimmtheitsmaß ist der quadrierte Korrelationskoeffizient. Bei keinem linearen Zusammenhang nimmt R^2 den Wert 0 an, bei voller linearer Abhängigkeit nimmt das Bestimmtheitsmaß den Wert 1 an.

Konfidenzintervall: Dieses Intervall gibt Auskunft darüber, in welchem Bereich ein Parameter mit einer zuvor fixierten Wahrscheinlichkeit (i.e. 95 %) liegt.

Lineare Optimierung mittels Simplex Algorithmus: Der Simplex Algorithmus dient zur Lösung linearer Optimierungsprobleme. Er ist einer der bekanntesten Optimierungsalgorithmen. Aus geometrischer Sicht wandert der Algorithmus entlang der Ecken eines Polyeders, der durch die Randbedingungen vorgegeben wird. Bei jedem Schritt erhöht sich der Wert der Funktion. Das Verfahren beinhaltet zwei Berechnungsphasen. In der ersten Phase wird ein plausibler Startpunkt gesucht und in der zweiten Phase wird die optimale Lösung des Hauptproblems berechnet. Der Simplex Algorithmus liefert drei mögliche Antworten: Eine zulässige Lösung nach endlichen Schritten, keine Lösung durch Überschreiten der maximalen Anzahl der Iterationen und die Antwort, dass keine zulässige Lösung existiert.

4.2 Modellerstellung

4.2.1 Methode der Gewichtsfaktoren

Die Vorgangsweise von der Messung der Bauer McNett Fraktionen bis hin zur Simulation der Bauer McNett Fraktionierung ist der in Abschnitt 3.1 beschriebenen sehr ähnlich.

Die Fraktionierung des Druckschliffs nach Bauer McNett

Die Bauer McNett Fraktionierung wird nach der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methode, so lange wiederholt, bis ausreichend Probenmenge für die Analyse im pulpexpertSHIVE Modul vorhanden ist. Die notwendige Probenmenge für eine Analyse im PulpExpertTM beträgt circa 5 g otro. Die R_{16} Fraktion liefert pro Fraktionierung circa 0,4 g otro. Die Anzahl der Häufigkeit der Fraktionierung orientiert sich daher an der R_{16} Fraktion, da diese Fraktion den geringsten Massenanteil im Druckschliff aufweist. Das heißt, dass für eine Analyse im PulpExpertTM 12 Fraktionierungen durchgeführt werden müssen. Diese 12 Fraktionierungen für eine 5 g otro Charge erfolgen aus einer dementsprechend großen Druckschliffstoffprobe (i.e. mindestens 120 g otro, da eine Fraktionierung 10 g otro benötigt).

Analyse der Fraktionen im PulpExpertTM

Die Analyse der Bauer McNett Fraktionen mit dem pulpexpertSHIVE Modul ergab für die einzelnen Fraktionen gut verwertbare Längen-Breitenverteilungen. Einzig die D_{200} Fraktion wurde, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, verworfen. Der Aufwand genügend Probenmenge aus einer D_{200} Fraktion zu gewinnen, war zu groß. Es wurden zwischen vier und fünf 5 g otro Chargen pro Fraktion ausgewertet und mit dem Mittelwert aus den Längen-Breitenverteilungen weitergerechnet, um eventuelle Messungenauigkeiten auszugleichen. Zusätzlich waren die Rohdaten zu normieren, da die Gesamtfläche unter der Häufigkeitsverteilung nicht den Wert 1 ergab. Für diesen Umstand konnte keine Erklärung gefunden werden.

Empirische Bestimmung der Intervalle auf Basis Längen-Breitenverteilung

In Abbildung 4.3 ist eine Faserlängenverteilung dargestellt, in der alle analysierten Fraktionen zusammengefasst sind. Auf der Abszisse ist die Faserlänge und auf der Ordinate die Häufigkeit aufgetragen. Die D_{200} Fraktion wurde, wie in Abschnitt 2.4 erklärt, weggelassen.

Die Schwierigkeit bei der Festlegung der Intervalle liegt darin, dass die einzelnen Fraktionen nicht klar getrennt sind, sondern sich überschneiden (Abbildung 4.3). Je nachdem, wie sich der Anteil einer Fraktion ändert, ändern sich auch die Grenzen der Überschneidung. Zum Beispiel in Abbildung 4.3: Sinkt der Anteil der R_{30} Fraktion, so würde auch das auszuwählende Intervall enger. Das Hauptaugenmerk liegt darauf, die Peaks des Langfaseranteils der Fraktionen im Intervall einzuschließen, so dass Änderungen hauptsächlich in diesem Bereich erfasst werden.

Die gewählten Bereiche für die Simulation der Bauer McNett Fraktionierung sind in Abbildung 4.4 ersichtlich. Die dunkelblauen Bereiche sind Bereiche mit geringem prozentualem Anteil an Fasern und je röter der Bereich ist, desto höher ist der Anteil an Fasern in diesem

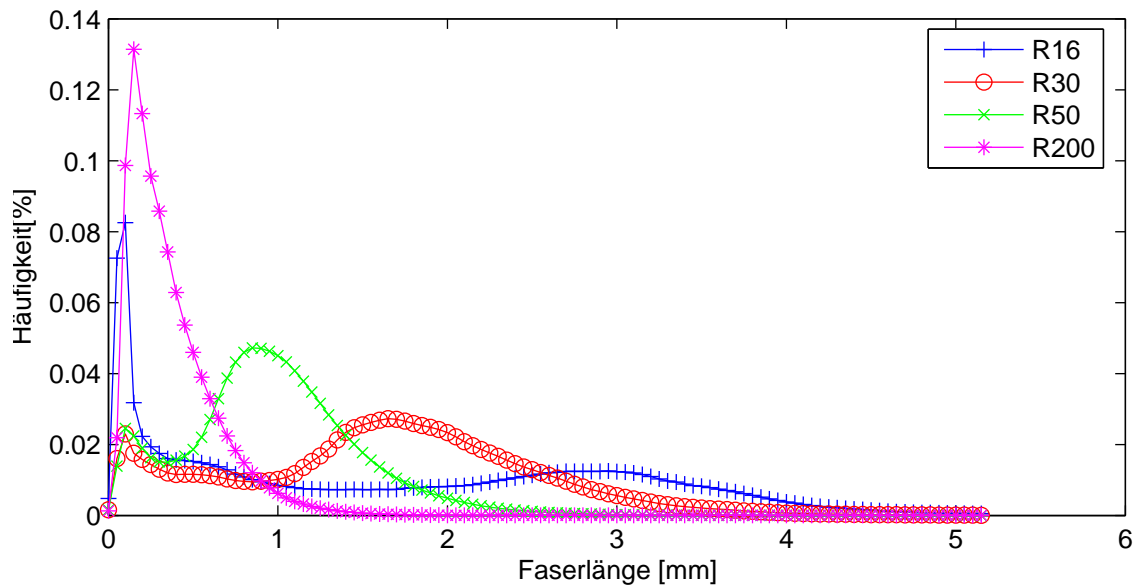


Abbildung 4.3: Eine Druckschliff Faserlängenverteilung der analysierten Fraktionen R_{16} bis R_{200} .

Bereich. Die Intervalle (rote Rechtecke in Abbildung 4.4) für die vier Fraktionen R_{16} , R_{30} , R_{50} und R_{200} sind so gewählt, dass sich die Intervallgrenzen nicht überschneiden.

Die Intervalle der Fraktionen sind für die beiden untersuchten Faserstoffe, den Fertigstoff aus dem Vorratsturm und den Rejektstrom über den Refiner in den Vorratsturm dieselben. Beim Vergleich der Faserstoffe, exemplarisch an der R_{16} Fraktion in Abbildung 4.5 dargestellt, fällt auf, dass beim Rejektstrom die Verteilung nicht mehr so breit, sondern konzentrierter (intensivere Rötung im Feinstoff- und Langfaseranteil) ist als dies im Fertigstoff der Fall ist. Dieser Effekt kann der zusätzlichen Sortierung und der Mahlung zugeschrieben werden.

Ein Problem bei der Bestimmung der Intervalle ist in Abbildung 4.4 R_{200} ersichtlich. Der Bereich, der für das Intervall der Fraktion durch das Sieb Nr. 200, P_{200} bleibt, ist sehr eng. Das hat zur Folge, dass in nachstehender Berechnung kleine Änderungen in diesem Bereich große Änderungen im Ergebnis bewirken. Ein weiterer Einfluss auf die Berechnung ist in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 zu erkennen. An der Grenze der ersten Faserlängenklasse (i.e. 0,00 bis 0,05 mm) ist eine abrupte Kante in der Verteilung zu erkennen, was auf eine Beeinträchtigung der Feinstoffdetektion schließen lässt.

Gewichtsfaktoren mithilfe least squares Methode berechnen

Die Grundlage dieser Berechnung bilden 39 Druckschliff Laborfraktionierungen ($17 \times$ Fer-

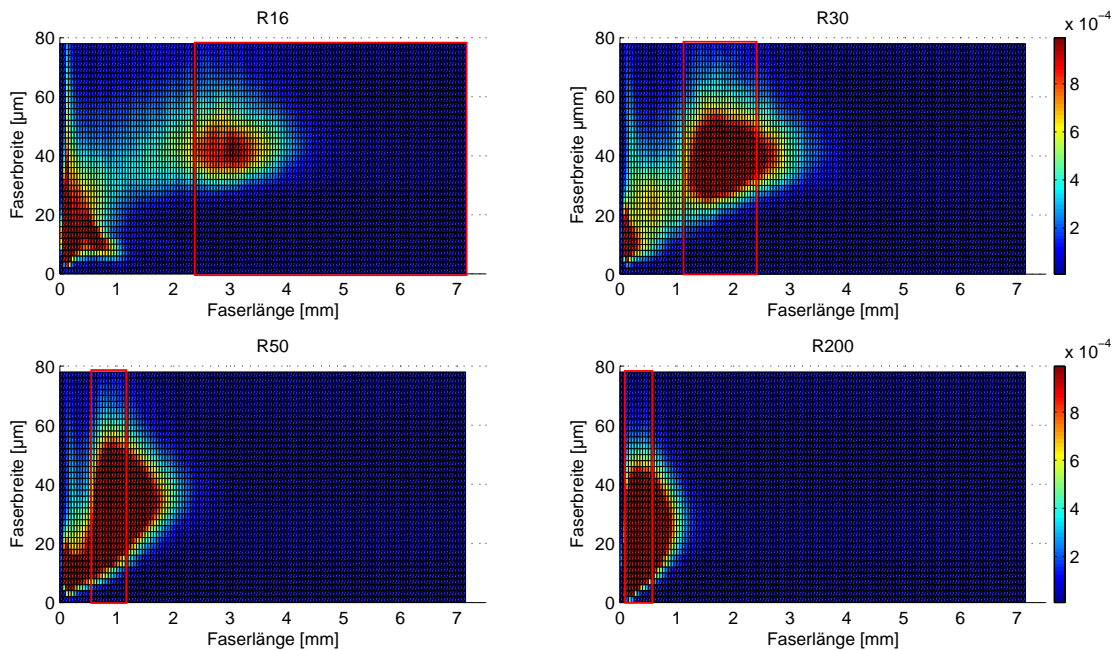


Abbildung 4.4: Die Intervalle in der Längen-Breitenverteilung

tigstoff und $22 \times$ Rejektlinie) und deren zugehörige Längen-Breitenverteilung aus der online Analyse des PulpExpertTM. Wichtiger Punkt bei der on-line Analyse ist, dass die Fraktionierung im Labor und die Untersuchung mit dem pulpexpertSHIVE Modul zeitgleich passieren sollten, sodass sichergestellt ist, dass derselbe Faserstoff analysiert wird. Da das nicht immer gewährleistet war, wurden für die Auswertung die zwei Längen-Breitenverteilungen herangezogen, die chronologisch gesehen am nächsten zum Probenahmezeitpunkt lagen (e.g. eine Analyse zwei Minuten vor und eine Analyse 10 Minuten nach dem Probenahmezeitpunkt). Die Berechnung der Gewichtungsfaktoren wurde in MATLAB durchgeführt. Die Korrelationsgleichungen (Seite 20) von SABOURIN & AYER wurden in die dafür erforderliche Matrizenform gebracht und die Gewichtungsfaktoren mit der Funktion *lsqin* (least square linear [21]) bestimmt.

Das Ergebnis der Minimierung sind fünf gemittelte Gewichtungsfaktoren für Druckschliff (Tabelle 4.2).

Simulation Bauer McNett Fraktionierung

Die fünf Gewichtungsfaktoren und die fünf Intervalle wurden in die Ausgangsgleichungen (Gleichung 3.1 bis 3.6 auf Seite 20) eingesetzt und auf die vorhandenen Druckschliff Längen-Breitenverteilungen angewendet und damit die Bauer McNett Fraktionierung simuliert.

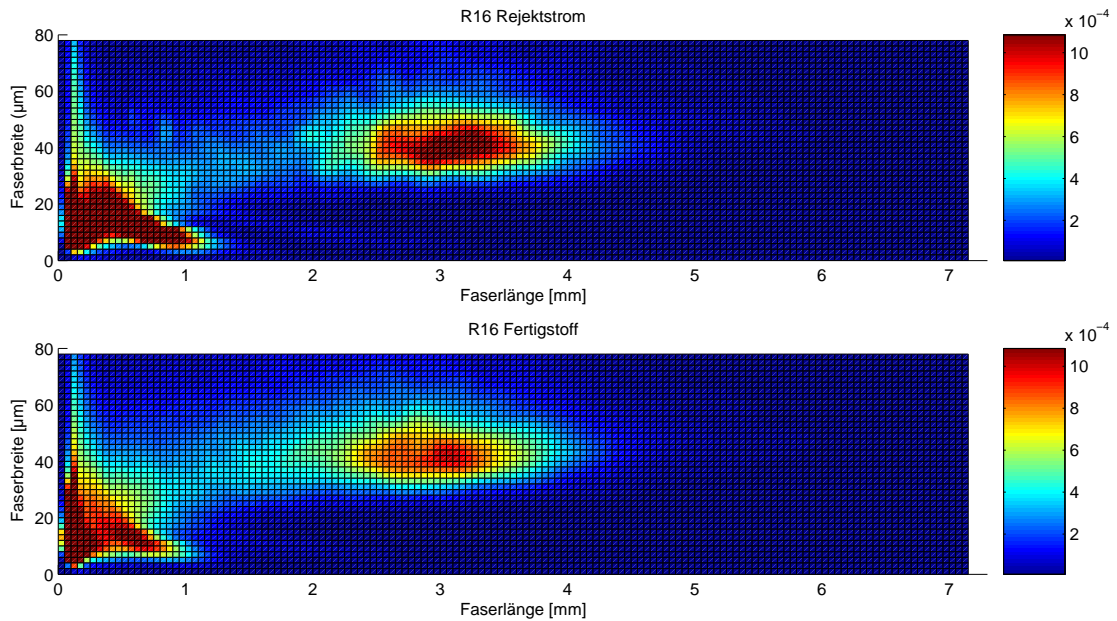


Abbildung 4.5: Längen-Breitenverteilung der R_{16} Fraktion von Rejektstrom (o.) und Fertigstoff (u.)

Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Auf der Abszisse sind die Massenanteile der Simulation und auf der Ordinate die Massenanteile der Laborfraktionierung dargestellt.

Die einzelnen Werte und die Fraktionen korrelieren erkennbar gut miteinander. Die Fraktion mit dem höchsten Massenteil, P_{200} , weist die größten Residuen (i.e. Restabweichungen von der Ideallinie) auf. Diese Abweichung ist teilweise auf das bereits angesprochene enge Intervall dieser Fraktion zurückzuführen.

Tabelle 4.2: Gewichtsfaktoren Druckschliff

Fraktion	Gewichtsfaktor
R_{16}	6,40
R_{30}	6,41
R_{50}	3,86
R_{200}	1,58
P_{200}	1,01

Tabelle 4.3: Konfidenzintervall Bauer McNett und PulpExpertTM

Fraktion	Labor [%]	PulpExpert TM [%]
R_{16}	$\pm 0,10$	$\pm 0,59$
R_{30}	$\pm 0,10$	$\pm 1,08$
R_{50}	$\pm 0,15$	$\pm 0,73$
R_{200}	$\pm 0,13$	$\pm 0,32$
P_{200}	$\pm 0,28$	$\pm 2,18$

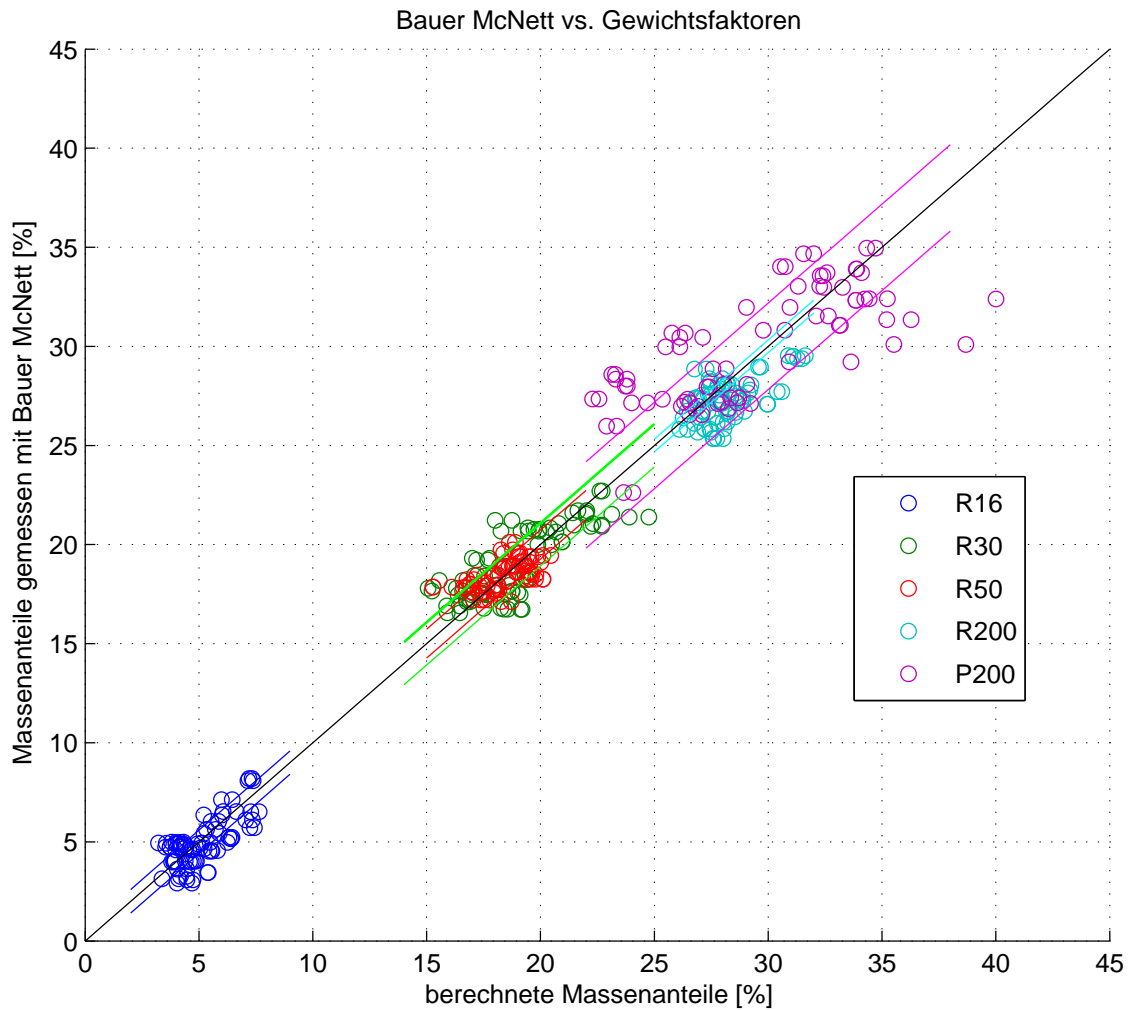


Abbildung 4.6: Vergleich der Bauer McNett Laborfraktionierung mit der Simulation mittels Gewichsfaktoren

Eine erste Abschätzung, wie gut diese Methode ist, liefert das Bestimmtheitsmaß R^2 für die gesamte Simulation und die einzelnen Fraktionen in Tabelle 4.4. Man erkennt, dass R^2 für die gesamte Simulation einen sehr hohen Wert annimmt, was bedeutet, dass zwischen berechnetem und gemessenem Wert ein hohes Maß an linearem Zusammenhang besteht. Bei Betrachtung der einzelnen Fraktionen ist ersichtlich, welches R^2 zu dem hohen R^2 für die gesamte Simulation beiträgt, wobei ein hohes R^2 einer Fraktion nicht unbedingt zu einem hohen R^2 für die gesamte Simulation führt. Vergleicht man das Bestimmtheitsmaß der einzelnen Fraktionen in Tabelle 4.4 mit der Lage der Werte der zugehörigen Fraktionen in

Abbildung 4.6, sieht man, dass ein hohes R^2 nicht unbedingt von einer exakten Simulation herrührt.

	Gesamt [-]	R_{16} [-]	R_{30} [-]	R_{50} [-]	R_{200} [-]	D_{200} [-]
R^2	0,97	0,50	0,65	0,32	0,34	0,53

Tabelle 4.4: Bestimmtheitsmaß der Methode der Gewichtsfaktoren

Deswegen ist die Bewertung der Simulation mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 hier nicht immer zweckmäßig. Die beiden Fraktionen R_{50} und R_{200} besitzen ein niedriges R^2 , obwohl die Abweichung von der 45° Achse gering ist. Der Grund dafür liegt in der Berechnungsmethode von R^2 . Das Bestimmtheitsmaß ist hoch wenn die berechneten Werte entlang einer Geraden liegen (auch wenn die Residuen höher sind) und es ist niedrig wenn das Ergebnis in einem kleinen Bereich um einen Punkt streut.

Konfidenzintervalle zu erstellen und diese in den Vergleich der Laborfraktionierung mit der Simulation zu legen, ist eine andere Möglichkeit, Aussagen über die Qualität der Simulation zu treffen. Dies lässt Rückschlüsse zu, in welchem Bereich das Ergebnis aufgrund anderer Einflüsse als Simulationseinflüsse schwankt. Die Ergebnisse der Bauer McNett Fraktionierung, sowie die Analyse der Fraktionen schwanken aufgrund der Messung an sich (i.e. Wiederholbarkeit) in einem gewissen Bereich. Die Konfidenzintervalle für die einzelnen Fraktionen sind ebenfalls in Abbildung 4.6 (Linien parallel zur 45° Achse) ersichtlich. Das

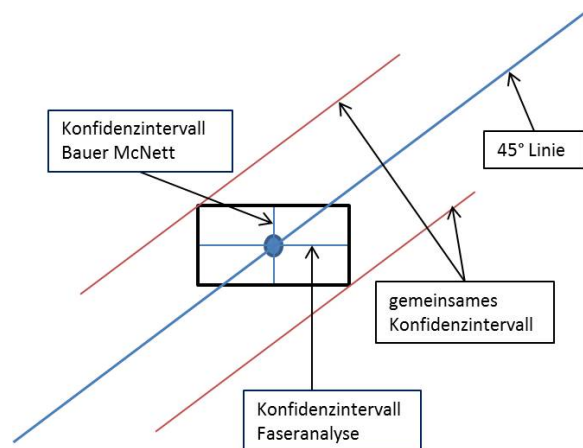


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Erstellung des Konfidenzintervalls

Konfidenzintervall der Bauer McNett Fraktionierung wurde anhand von vier Messungen aus einer Faserstoffprobe durchgeführt. Das Vertrauensintervall für die Simulation wurde aus 14 Analysen durch das pulpexpertSHIVE Modul aus einer Faserstoffprobe errechnet. Die Werte aus Tabelle 4.3 werden jeweils auf Ordinate und Abszisse aufgetragen und als parallele Linien um die Ideallinie dargestellt. Die Konstruktion der Konfidenzintervalle ist in Abbildung 4.7 schematisch beschrieben. Bei einer angenommenen Korrelation von $R^2 = 1$ schwanken die simulierten Bauer McNett Werte in dieser Bandbreite. Das Konfidenzinter-

vall spiegelt die Wiederholbarkeit der Fraktionierung nach Bauer McNett und der Analyse des pulpexpertSHIVE Moduls wider.

Die größere Streuung und das breite Konfidenzintervall der P_{200} Fraktion unterstützen die Aussage, dass die Erfassung des Feinstoffs Probleme bereitet, sei es durch das pulpexpertSHIVE Modul oder durch die empirische Bestimmung des Bereichsintervalls für die Fraktion. Alle anderen berechneten Fraktionen streuen ebenfalls, liegen aber größtenteils innerhalb des Konfidenzintervalls, das heißt in einem Bereich der natürlichen Schwankung der Messung.

Ein Punkt, der die Korrelation ebenfalls beeinflussen könnte, ist, dass die fünf Gewichtungsfaktoren Mittelwerte der Gewichtungsfaktoren beider Faserstoffe sind. SABOURIN & AYER haben für jeden Probenahmeort eigene Intervalle und Gewichtungsfaktoren empfohlen. Der hohen Ähnlichkeit der beiden Stoffe wegen wurde bei der Modellerstellung nur ein Satz an Gewichtungsfaktoren und Intervallen berechnet.

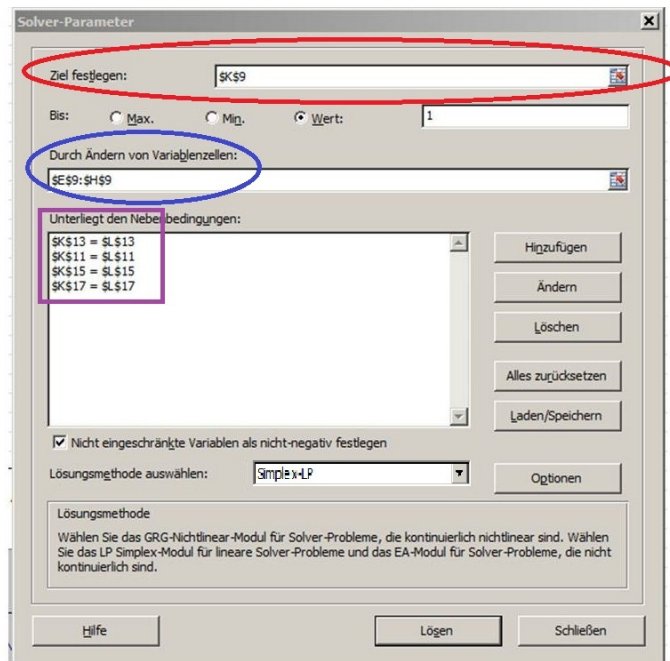
Zusammenfassend kann man für dieses Modell sagen, dass es ein einfaches Modell ist, das gute Korrelationen aufweist und die Trends wiedergibt. Den größten Einfluss auf die Berechnung hat neben der gegebenen Schwankung, die empirische Bestimmung der Intervalle für die Fraktionen. Die nachfolgende Berechnung der Gewichtungsfaktoren kann falsch gelegte Intervalle nicht mehr ausbessern. Daher ist es wichtig, bereits am Beginn der Modellerstellung die Intervalle der einzelnen Fraktionen richtig zu bestimmen.

4.2.2 Multikomponentenanalyse

Die ersten beiden Schritte in der Vorgehensweise dieser Methode sind dieselben wie im Modell der Gewichtungsfaktoren in Abschnitt 4.2.1: den Druckschliff nach Bauer McNett fraktionieren und die gewonnenen Fraktionen im PulpExpertTM analysieren. Daher konnten die Auswertungen der Fraktionen auch für dieses Modell verwendet werden.

Faserlängenverteilung anhand von Mittelwerten und Momenten charakterisieren

Die Charakterisierung des Faserstoffs und somit der Faserlängenverteilung erfolgt mit den in Kapitel 3 beschriebenen Mittelwerten der Faserlänge, den Momenten der Faserlängenverteilung und der Coarseness. Die Werte der pulpexpertSHIVE Modul Berechnung wurden nach Microsoft Excel exportiert und dort zusammengefasst. Die gesammelten und in Gleichungen 3.27 bis 3.31 eingesetzten Parameter beschreiben ein Gleichungssystem mit fünf



Summen	R16	R30	R50	R200	D200	ist	soll
Massenanteile der Fraktionen xj (zu berechnen)	1	1,00	1,00	1	1	5,000	1
Summe (Am-Aj)/(Aj*Qj)*xj	-0,822	-1,162	-1,515	-1,498	4,585	-0,411	0
Summe (Lm-Lj)/Qj*xj	-1,900	-1,826	-1,202	0,124	2,645	-2,159	0
Summe (Lj*xj/Qj)*(Wm-Wj)	-4,336	-2,380	-0,216	0,899	1,179	-4,854	0
Summe Qm*xj/Qj	1,230	1,497	2,037	3,876	9,091	17,731	1

Abbildung 4.8: Parameter Definition im Microsoft Excel Solver

Gleichungen und fünf Unbekannten (Gleichung 4.1). Die fünf Unbekannten, sind die Massenanteile der Fraktionen.

$$\begin{pmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 \frac{\bar{A}_{mix} - \bar{A}_{R16}}{\bar{A}_{R16} Q_{R16}} & \dots & \dots & \dots & \frac{\bar{A}_{mix} - \bar{A}_{D200}}{\bar{A}_{D200} Q_{D200}} \\
 \frac{\bar{L}_{mix} - \bar{L}_{R16}}{Q_{R16}} & \dots & \dots & \dots & \frac{\bar{L}_{mix} - \bar{L}_{D200}}{Q_{D200}} \\
 \frac{(\bar{L}_{R16})(\bar{W}_{mix} - \bar{W}_{R16})}{Q_{R16}} & \dots & \dots & \dots & \frac{(\bar{L}_{D200})(\bar{W}_{mix} - \bar{W}_{D200})}{Q_{D200}} \\
 \frac{Q_{mix}}{Q_{R16}} & \dots & \dots & \dots & \frac{Q_{mix}}{Q_{D200}}
 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_{16} \\ x_{30} \\ x_{50} \\ x_{200} \\ x_{D200} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Lösen des Gleichungssystems durch lineare Optimierung

Das Gleichungssystem 4.1 ist in der Form $A * x = b$ dargestellt. Mit A als Koeffizien-

tenmatrix, x als Variablenvektor und dem Störvektor b . Das Gleichungssystem wird als inhomogenes lineares Gleichungssystem bezeichnet, da der Störvektor b ungleich Null ist. Das Lösen des Gleichungssystems erfordert nach RING & BACON [2] die Anwendung einer linearen Optimierung. Die Berechnung wird in Microsoft Excel durchgeführt, das einen implementierten Solver besitzt, der nach dem Simplex Algorithmus arbeitet. Im Microsoft Excel Solver müssen verschiedene Parameter definiert werden (Abbildung 4.8). Das Berechnungsziel ist, dass die Summe der Massenanteile der Fraktionen eins wird (roter Ring in Abbildung 4.8 respektive Zeile Eins im Störvektor). Der Solver realisiert dieses Ziel durch Variation der Massenanteile (blaue Ringe in Abbildung 4.8 respektive Variablenvektor im Gleichungssystem). Die Randbedingungen sind mit den violetten Umrahmungen in Abbildung 4.8 gekennzeichnet. Das entspricht Zeile zwei bis fünf des Störvektors im Gleichungssystem 4.1. Zusätzlich kann man die Anzahl der Iterationen und die Genauigkeit der Lösung definieren. Damit ist die Abweichung der Randbedingungen vom Idealergebnis (i.e. Störvektor) gemeint.

Ergebnis der Optimierung

Der Solver bricht die Iteration nach wenigen Schritten ab und meldet, dass die Optimierung keinen Punkt finden konnte, für den alle Nebenbedingungen erfüllt sind.

Der Grund, weshalb die Optimierung keine zulässige Lösung findet, ist nicht ganz klar. Eine mögliche Erklärung ist, dass die vorhandenen Parameter $\bar{A}_{R16-D200}$, $\bar{L}_{R16-D200}$, $\bar{W}_{R16-D200}$ und $\bar{Q}_{R16-D200}$ den Faserstoff mit \bar{A}_{mix} , \bar{L}_{mix} , \bar{W}_{mix} und \bar{Q}_{mix} nicht beschreiben und daher keine Lösung für x_{R16} , x_{R30} , x_{R50} , x_{R200} und x_{D200} gefunden werden können. Diese Werte sind zwar alle von einem Faserstoff (i.e. Druckschliff), aber nicht von einer Faserstoffprobe, da es nicht möglich ist, diese Werte alle aus einer Faserstoffprobe zu erhalten. $\bar{A}_{R16-D200}$, $\bar{L}_{R16-D200}$, $\bar{W}_{R16-D200}$ und $\bar{Q}_{R16-D200}$ wurden aus mehreren Messungen einzelner Fraktionen ermittelt und \bar{A}_{mix} , \bar{L}_{mix} , \bar{W}_{mix} und \bar{Q}_{mix} aus Messungen mehrerer Gesamtstoffproben (vgl. Seite 17: Durchführung der Probenanalyse). Ist dieses Gleichungssystem zu sensibel, besteht die Möglichkeit, dass die einzelnen Fraktionen den Gesamtstoff nicht beschreiben und keine zulässige Lösung berechnet werden kann.

Nachstehend ein Beispiel einer solchen Optimierung: Das vorliegende Problem ist im Startpunkt ersichtlich. Als Startwert des Variablenvektors x wurde das Ergebnis einer Bauer McNett Laborfraktionierung gewählt. Das Gleichungssystem ist formal erfüllt, da in der Koeffizientenmatrix A die Parameter der einzelnen Fraktionen und die von ebendiesen beschriebene Gesamtstoffprobe eingesetzt wurden. Das heisst, der Störvektor b sollte bereits Werte mit geringen Abweichungen der in Gleichung 4.1 geforderten annehmen. Die größte Abweichung weist der letzte Wert des Störvektors b auf. Dieser Wert wird mit-

hilfe der Coarseness berechnet. Die Coarseness liefert bei Messung mit unterschiedlichen Messgeräten abweichende Werte (4.1). Da keine Korrelationen oder Anpassung der Werte vorgenommen, sondern die Absolutwerte der Messung des pulpexpertSHIVE Moduls verwendet wurden, könnte darin die Begründung liegen, warum die lineare Optimierung keine zulässige Lösung liefert und bereits nach der vierten Iteration abbricht. Das erhärtet den obenstehenden Verdacht, dass die vorhandenen Parameter der einzelnen Fraktionen den Faserstoff nicht korrekt beschreiben.

$$\begin{array}{l}
 \text{Startpunkt} \\
 \text{1. Iteration} \\
 \text{2. Iteration} \\
 \text{4. Iteration}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 -0,821 & -1,163 & -1,516 & -1,498 & 4,585 \\
 -1,900 & -1,826 & -1,202 & 0,124 & 2,645 \\
 -4,336 & -2,380 & -0,216 & 0,899 & 1,179 \\
 0,010 & 0,078 & 0,134 & 0,413 & 0,955
 \end{pmatrix}
 *
 \begin{pmatrix}
 0,0245 \\
 0,1536 \\
 0,1945 \\
 0,3143 \\
 0,3098
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 1 \\
 0,456 \\
 0,298 \\
 0,134 \\
 4,691
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 -0,821 & -1,163 & -1,516 & -1,498 & 4,585 \\
 -1,900 & -1,826 & -1,202 & 0,124 & 2,645 \\
 -4,336 & -2,380 & -0,216 & 0,899 & 1,179 \\
 0,010 & 0,078 & 0,134 & 0,413 & 0,955
 \end{pmatrix}
 *
 \begin{pmatrix}
 0,0842 \\
 0,0000 \\
 0,0000 \\
 0,0000 \\
 0,3098
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 0,394 \\
 1,351 \\
 0,659 \\
 0,000 \\
 0,990
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 -0,821 & -1,163 & -1,516 & -1,498 & 4,585 \\
 -1,900 & -1,826 & -1,202 & 0,124 & 2,645 \\
 -4,336 & -2,380 & -0,216 & 0,899 & 1,179 \\
 0,010 & 0,078 & 0,134 & 0,413 & 0,955
 \end{pmatrix}
 *
 \begin{pmatrix}
 0,0842 \\
 0,0000 \\
 0,0000 \\
 0,0072 \\
 0,3098
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 0,403 \\
 1,339 \\
 0,658 \\
 0,000 \\
 1,000
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 -0,821 & -1,163 & -1,516 & -1,498 & 4,585 \\
 -1,900 & -1,826 & -1,202 & 0,124 & 2,645 \\
 -4,336 & -2,380 & -0,216 & 0,899 & 1,179 \\
 0,010 & 0,078 & 0,134 & 0,413 & 0,955
 \end{pmatrix}
 *
 \begin{pmatrix}
 2,4314 \\
 -5,1070 \\
 4,4831 \\
 -1,1204 \\
 0,3098
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 0,997 \\
 0,245 \\
 0,000 \\
 0,000 \\
 1,000
 \end{pmatrix}$$

Zusammenfassend für dieses Modell ist zu sagen, dass es ein guter Ansatz ist, die Fraktionen und deren Faserlängenverteilungen mathematisch zu beschreiben; die Verwendung der Absolutwerte der Messung macht die Methode jedoch stark von der Genauigkeit der Messgeräte abhängig.

4.2.3 Trenngradmodell

Das Prinzip dieser Methode, die Durchflusswahrscheinlichkeit einer Faser mit der Länge l [mm] durch ein Sieb zu berechnen und daraus die Massenanteile verschiedener Fraktionen zu bestimmen, wurde schon in einem Forschungsbericht der Papiertechnischen Stiftung (PTS) von KUNTZSCH 2007 [20] veröffentlicht. Daraus wurde eine kommerzielle Software entwickelt. Die Methodik zur Berechnung der Bauer McNett Fraktionen ist der in KUNTZSCH ähnlich:

- Annahme eines geometrischen Modells für die Faser
- Berechnung der Massenverteilung aus der Längen-Breitenverteilung (i.e. Anzahlverteilung)
- Bestimmung des Trenngrades ($T(l)$) für die einzelnen Fraktionen
- Simulation der Bauer McNett Fraktionierung
- Lösen der Massenbilanz

Annahme eines geometrischen Modells für die Faser

Die Bauer McNett Fraktionierung als mechanisches Trennverfahren (i.e. Sieben) kann mittels Trenngradkonzept beschrieben werden. Das Trenngradkonzept der Partikelverfahrenstechnik [4] besteht aus:

- Massenbilanz der Stoffströme (Gesamtmassenbilanz und Massenbilanz nach Teilchengröße)
- Definition eines Gesamtabscheidegrades respektive Grobgutanteils und Definition eines apparatespezifischen Abscheidegrades als Funktion der Teilchengröße (Trenngrad $T(x)$)

Bei der Betrachtung mittels Trenngradkonzept wurde mit einer Massenverteilung gerechnet, und, um das zu realisieren, wurde der Faser ein Hohlzylinder als geometrischen Modell zugrundegelegt und mit einer Dichte multipliziert (Gleichung 4.2). Die Faserwanddicke kann das pulpexpertSHIVE Modul nicht messen, daher die Annahme, dass die Faserwanddicke im Allgemeinen $\frac{1}{10}$ der Faserbreite beträgt [8].

$$M = \frac{b^2}{4} * \pi * l * \rho * \frac{19}{100} \quad (4.2)$$

In Gleichung 4.2 beschreibt M die Masse einer Faser mit der Breite b in [mm], der Länge l in [mm] und der Dichte ρ [g mm^{-3}]. Das ist ein sehr vereinfachtes und idealisiertes Modell,

denn die Fasern sind sehr unterschiedlich aufgebaut. Kürzere Faserbruchstücke sind sehr kompakt und längere Fasern haben konisch verlaufende Enden, können gequetscht und hohl sein. Die Dichte, ebenfalls von Faserlänge und Faserbreite beeinflusst, wird hier konstant angenommen.

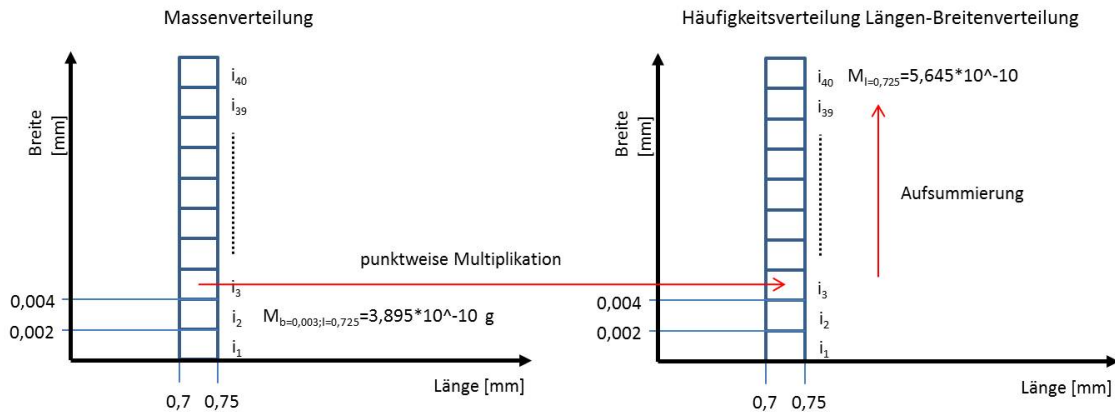


Abbildung 4.9: Darstellung der Berechnung der Häufigkeitsverteilung der Masse

Berechnung der Massenverteilung

Man kann die Masse M mit dem Klassenmittel der Breite b und Länge l der Längen-Breitenverteilung berechnen und erhält damit eine dreidimensionale Massenverteilung. Multipliziert man weiters die Massenverteilung mit der Häufigkeitsverteilung der Längen-Breitenverteilung (i.e. Anzahlverteilung) eines Faserstoffs punktweise und normiert die Verteilung, erhält man eine Häufigkeitsverteilung der Masse des Faserstoffs. Anschließend summiert man über die Breiten auf, damit man eine Häufigkeitsverteilung der Masse über der Faserlänge des Faserstoffs erhält. Exemplarisch für die Klassenmittel $b = 0,003$ mm und $l = 0,725$ mm mit der Faserdichte, die im PulpExpertTM zur Verfügung steht, ist $\rho = 0,00004$ g mm⁻³ (Abbildung 4.9 stellt die Berechnung grafisch dar):

$$M_{b=0,003,l=0,725} = \frac{0,003^2}{4} * \pi * 0,725 * 0,00004 * \frac{19}{100} \Rightarrow M = 3,895 * 10^{-10} \text{ g}$$

M wird mit dem Wert der Häufigkeitsverteilung der Längen-Breitenverteilung, der an der jeweiligen Stelle steht (i.e. $b = 0,003$ mm und $l = 0,725$ mm), multipliziert. Nachdem die gesamte Massenverteilung ausmultipliziert wurde, erfolgt die Normierung. Danach summiert man über die Breitenklassen i (40 Klassen mit 0,002 mm Klassenbreite $\Rightarrow 0 - 80 \mu\text{m}$) der Länge $l = 0,725$ mm auf:

$$\sum_{i=1}^{40} M_{l=0,725} = 5,645 * 10^{-10}$$

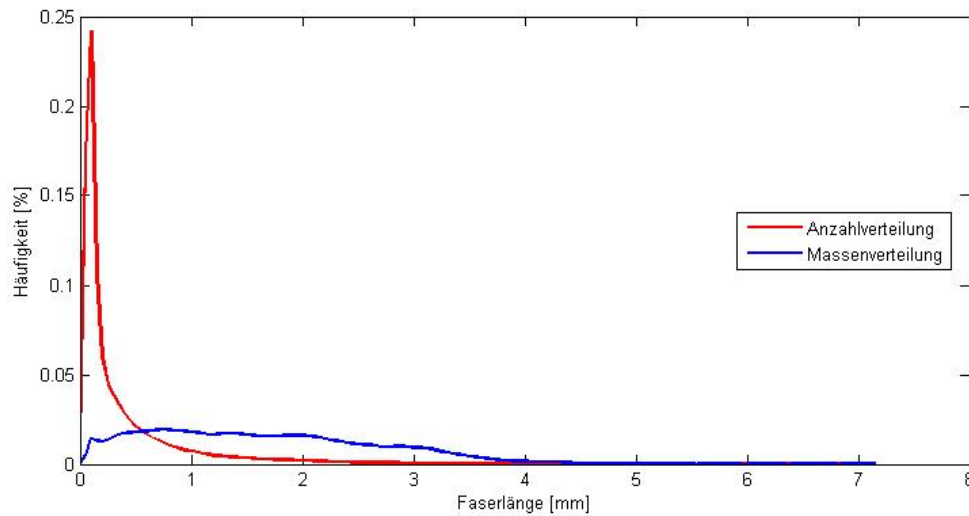


Abbildung 4.10: Unterschied einer Massenverteilung und einer Anzahlverteilung

Das bedeutet, dass $5,645 \cdot 10^{-8} \%$ der gesamten Masse in der Faserlängensklasse $l = 0,725 \text{ mm}$ vertreten sind. Für alle Faserlängensklassen durchgeführt, erhält man die gewünschte Häufigkeitsverteilung der Masse des Faserstoffs über der Faserlänge. In Abbildung 4.10 ist der Unterschied zwischen einer Anzahlverteilung und einer Massenverteilung eines Druckschliffs ersichtlich. Die Masse verteilt sich gleichmäßiger über die Faserlänge, während in der Anzahlverteilung der hohe Anteil an kürzeren Fasern das Gros ausmacht.

Bestimmung des Trenngrads $T(l)$ für die einzelnen Fraktionen

Der Trenngrad $T(l)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Faser der Länge l in einer Siebkammer hängenbleibt:

$$T(l) = \frac{m_R(l)}{m_A(l)} \quad (4.3)$$

In Gleichung 4.3 beschreibt der Trenngrad $T(l)$ das Verhältnis von der aufgegebenen Faser­masse $m_A(l)$ zu der Faser­masse, die in der Siebkammer verbleibt $m_R(l)$. GOODING & OLSON [19] berechnen die Durchfluss­wahrscheinlichkeit einer Faser mit der Länge l in Gleichung 3.32. Das Äquivalent für den Trenngrad ergibt damit:

$$T(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{\lambda}\right)^\beta} \quad (4.4)$$

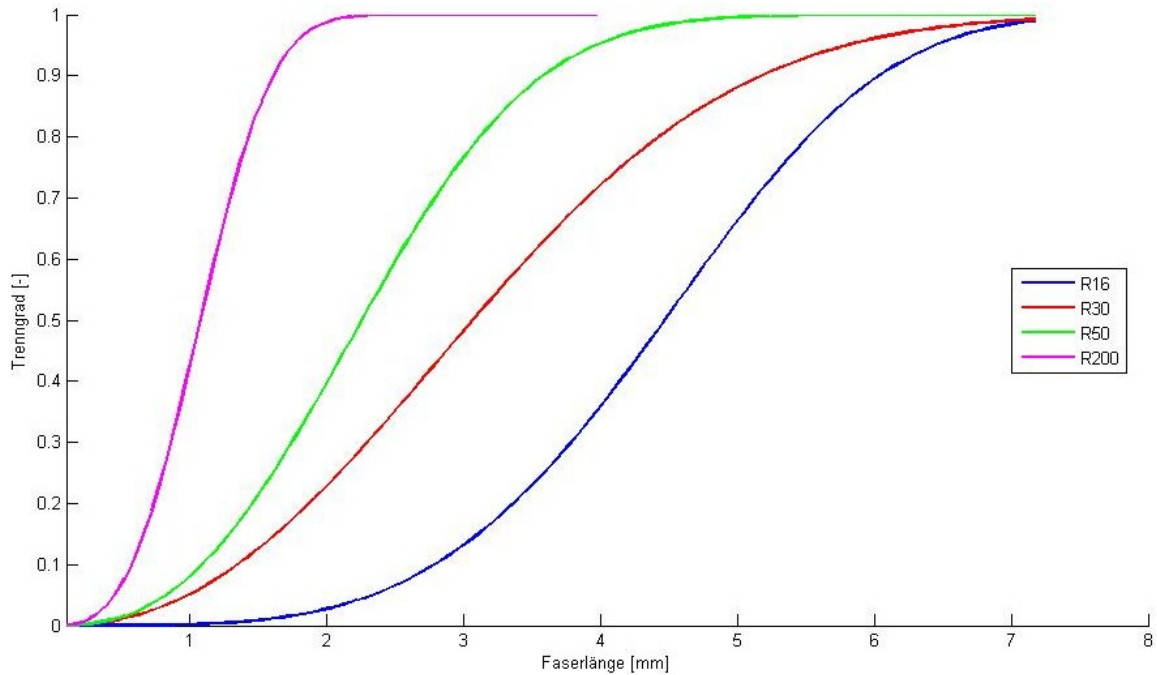


Abbildung 4.11: Trenngrad für die verwendeten Bauer McNett Siebe

Wie in Abschnitt 3.4 erklärt, benötigt jedes Sieb einen spezifischen Größenparameter λ und einen spezifischen Formparameter β . In Abbildung 4.11 sind die Trenngradfunktionen für die jeweiligen Siebe abgebildet. Die spezifischen Größen- und Formparameter wurden anhand Gleichung 4.4 an die verwendeten Siebe angepasst und sind in Tabelle 4.5 ersichtlich.

	R_{16} [-]	R_{30} [-]	R_{50} [-]	R_{200} [-]
Größenparameter λ	4,90	3,60	2,60	1,22
Formparameter β	4,00	2,30	2,60	3,00

Tabelle 4.5: Größen- und Formparameter für die jeweiligen Siebe

Simulation der Bauer McNett Fraktionierung

Nach der Bestimmung der Trenngradfunktionen für die einzelnen Siebe und Berechnung der Massenverteilung der Stoffprobe (i.e. Aufgabegutverteilung) kann die Simulation der Bauer McNett Fraktionierung durchgeführt werden. Aus der eingetragenen Masse wird mit der Trenngradfunktion für das R_{16} Sieb der Anteil berechnet, der in diesem Sieb verbleibt. Daraus ergeben sich eine Grobgutverteilung (i.e. Verteilung der Fasern, die in der R_{16} Kammer verbleiben) und eine Feingutverteilung (i.e. Verteilung der Fasern, die durch das Sieb

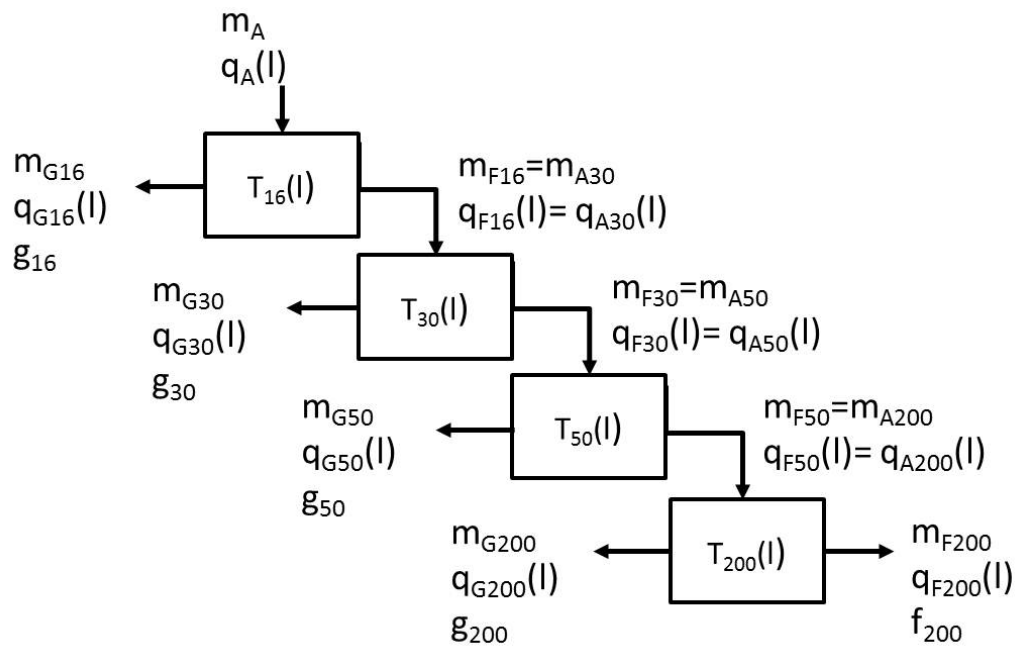


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der Fraktionierung. Indizes A, F und G...Aufgabe, Feingut und Groggut des jeweiligen Siebs (16 bis 200); m_{A-F200} ...Masse [g]; g_{16-200} ...Groggutanteil; f ...Feingutanteil; q_{A-F200} ...Massenverteilung

R_{16} gelangen). Die Feingutverteilung des R_{16} Siebs ist zugleich die Aufgabegutverteilung des R_{30} Siebs. Diese Berechnung, auf alle Siebe angewandt, liefert die Massenbilanz. Eine schematische Darstellung der Bilanz und der Massenverteilungen der Fraktionierung zeigt Abbildung 4.12.

Lösen der Massenbilanz

Die Gesamtmassenbilanz:

$$m_A = m_{G16} + m_{G30} + m_{G50} + m_{G200} + m_{F200} \quad (4.5)$$

mit der Annahme, dass $m_A = 1$, damit später nicht mehr auf 1 normiert werden muss. Die Nebenbedingungen für die Berechnung:

$$m_A = m_G + m_F \quad (4.6)$$

$$g + f = 1 \quad (4.7)$$

$$g = \frac{m_G}{m_A} \quad (4.8)$$

$$m_{A,G,F}(l) = m_{A,G,F} * q_{A,G,F}(l) = m_{A,G,F} * \frac{dQ_{A,G,F}(l)}{dl} \quad (4.9)$$

Aus Gleichungen 4.3, 4.8 und 4.9 kann man g berechnen:

$$g = \int_0^1 T(l) dQ_A \quad (4.10)$$

Damit wird die Massenbilanz zu:

$$\begin{aligned} m_A * g_{16} &= m_{G16} \\ (m_A - m_{G16}) * g_{30} &= m_{G30} \\ (m_A - m_{G16} - m_{G30}) * g_{50} &= m_{G50} \\ (m_A - m_{G16} - m_{G30} - m_{G50}) * g_{200} &= m_{G200} \\ m_A - m_{G16} - m_{G30} - m_{G50} &= m_{F200} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Die Massen $m_{G16-F200}$ sind äquivalent mit den Massenanteilen der Bauer McNett Fraktionierung. Es wurden wie in der Methode der Gewichtsfaktoren 39 Druckschliff Längen-Breitenverteilungen simuliert.

Ergebnis der Simulation

Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Auf der Abszisse sind die berechneten Massenanteile dieses Modells aufgetragen und auf der Ordinate die Massenanteile der Laborfraktionierung. Die einzelnen Fraktionen der Bauer McNett Fraktionierung korrelieren gut mit den berechneten Werten. Die breiteste Streuung hat die P_{200} Fraktion. Diese lässt sich nur teilweise mit der Problematik der Feinstoffdetektion erklären, da dieser Wert nicht mittels Trennfunktion ermittelt, sondern aus der Massenbilanz errechnet wurde. In ihm summieren sich die Fehler der vorangegangenen Berechnungen auf.

Tabelle 4.6: Bestimmtheitsmaß des Modells mit Trennfunktion

Fraktion	R^2
Gesamt [-]	0,97
R_{16} [-]	0,44
R_{30} [-]	0,77
R_{50} [-]	0,14
R_{200} [-]	0,05
D_{200} [-]	0,47

Tabelle 4.7: Konfidenzintervall Bauer McNett und PulpExpertTM

Fraktion	Labor [%]	PulpExpert TM [%]
R_{16}	± 0,10	± 0,60
R_{30}	± 0,10	± 1,03
R_{50}	± 0,15	± 0,43
R_{200}	± 0,13	± 0,61
P_{200}	± 0,28	± 1,26

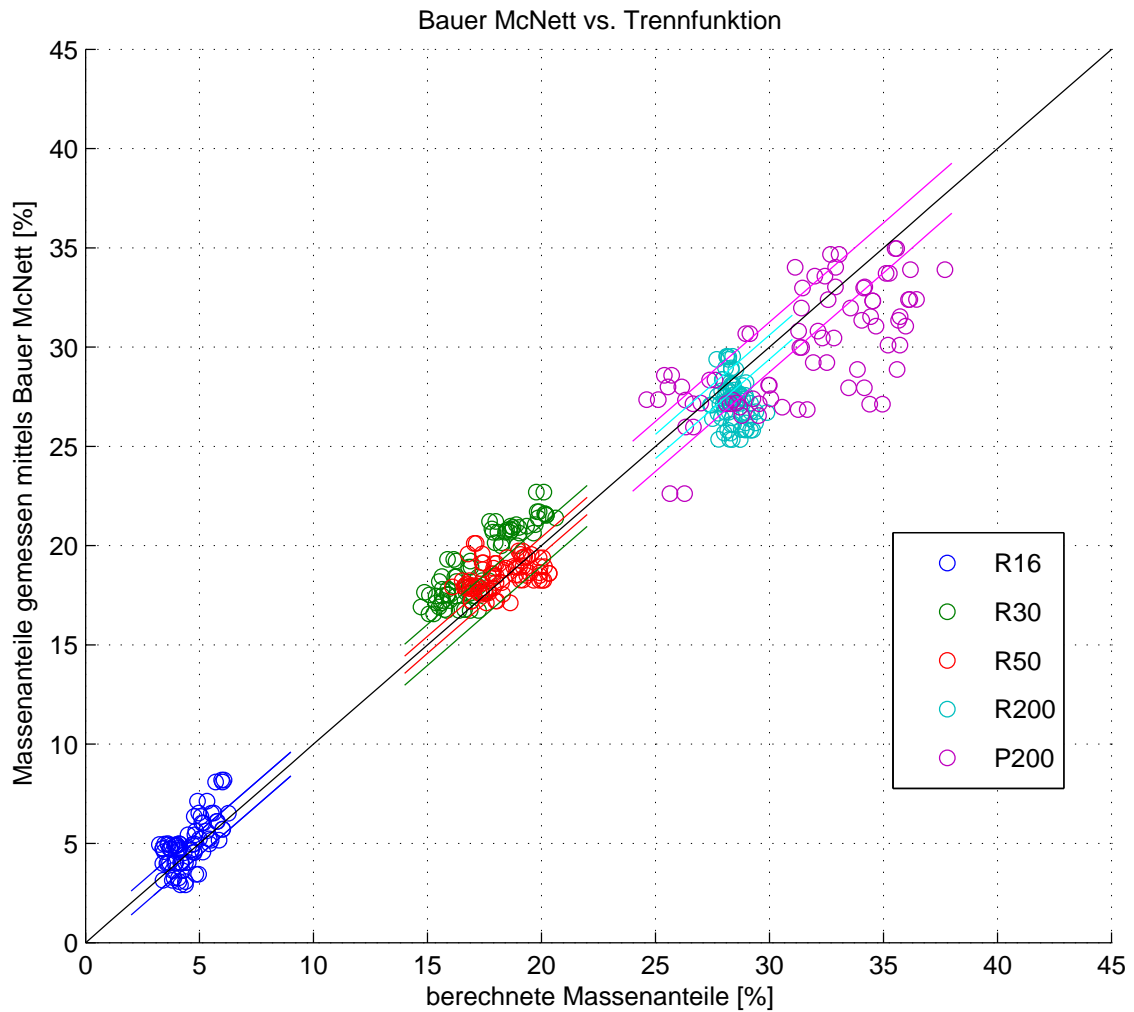


Abbildung 4.13: Vergleich der Bauer McNett Laborfraktionierung mit der Simulation mittels Trennfunktion

Der quadrierte Korrelationskoeffizient R^2 dient als erste Beurteilung der Qualität der Korrelation der gesamten Simulation sowie für die einzelnen Fraktionen (Tabelle 4.6). Wie bereits beim Modell mit Gewichtsfaktoren ist die Aussagekraft des Bestimmtheitsmaßes limitiert. Zum Beispiel für die Fraktion R_{30} . Der hohe R^2 Wert bestätigt eine gute lineare Korrelation, aber bei Betrachtung der absoluten Werte ist erkennbar, dass die Korrelation oberhalb der 45° Linie (Laborwert entspricht Berechnungswert) verläuft. Das bedeutet, dass die Simulation zwar korreliert, aber die Massenberechnung einen negativen Einfluss auf die Absolutwerte hat.

Auch bei diesem Modell ist es von Interesse, die Schwankungsbreite der Fraktionierung nach Bauer McNett und der optischen Analyse mittels Konfidenzintervall zu betrachten. Die Berechnung des Konfidenzintervalls erfolgt nach derselben Methodik, wie in Abschnitt 4.2.1. Die Werte für das Konfidenzintervall des PulpExpertTM weichen von jenen in Abschnitt 4.2.1, Tabelle 4.3 ab, da auch das Simulationsmodell zur Berechnung der Werte eine andere ist (Tabelle 4.7). Damit ist eine Beurteilung der Streuung bei idealer Korrelation möglich. Abbildung 4.13 lässt erkennen, dass die Konfidenzintervalle nicht sehr breit, die Streuung einiger Werte hingegen hoch ist. Die R_{30} Fraktion würde zwar innerhalb der Schwankungsbreite liegen, die Simulation berechnet aber immer ein wenig zu hohe Werte. Das bestätigt den Verdacht, dass die angenommene Massenverteilung und die reale Massenverteilung nicht ganz übereinstimmen. Die R_{200} streut sehr eng um die Ideallinie, zeigt jedoch senkrechten Trend. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass einige Einflüsse auf die Simulation modellbedingt sind.

Modellbedingte Einflüsse auf die Simulation sind die Annahme des geometrischen Modells für die Faser und die beiden Parameter λ und β . Das Modell des Hohlzylinders trifft, wie auf Seite 45 erwähnt, nicht auf alle Fasern zu. Die zur Verfügung stehende Dichte ist ein Richtwert. Denn der PulpExpertTM analysiert nicht nur Druckschliff, sondern auch andere Stoffe wie Zellstoff und Recycling Stoff; es kann aber nur ein Dichtewert angegeben werden. Es kommt darauf an, welche Dichte für die Berechnung verwendet wird. Die Rohdichte, welche auch das Porenvolumen miteinbezieht, ist geringer als die Reindichte, welche ohne Porenvolumen gemessen wird. Die verwendete Dichte von 400 kg m^{-3} liegt im Bereich der Rohdichte der meisten Holzarten (330 kg m^{-3} bis 600 kg m^{-3}). Die Reindichte ist nicht mehr so stark von der Holzsorte abhängig und liegt im Bereich von 1480 kg m^{-3} bis 1500 kg m^{-3} [8].

Die Vorgabe, dass die beiden Parameter λ und β nur vom verwendeten Sieb abhängig sind, ist nur bedingt gegeben. Da die berechnete Masse nicht exakt der tatsächlichen Masse entspricht, werden die entstehenden Abweichungen von den beiden Parametern aufgenommen. Die simulierten Werte streuen, bis auf die D_{200} Fraktion nicht sehr stark, das bedeutet, dass die Simulation bei idealer Massenberechnung eine bessere Korrelation liefern kann.

4.3 Vergleich der Modelle

Zu einem Vergleich können nur zwei der drei erstellten Modelle herangezogen werden: die Methode der Gewichtsfaktoren und das Trenngradmodell einer Bauer McNett Fraktio-

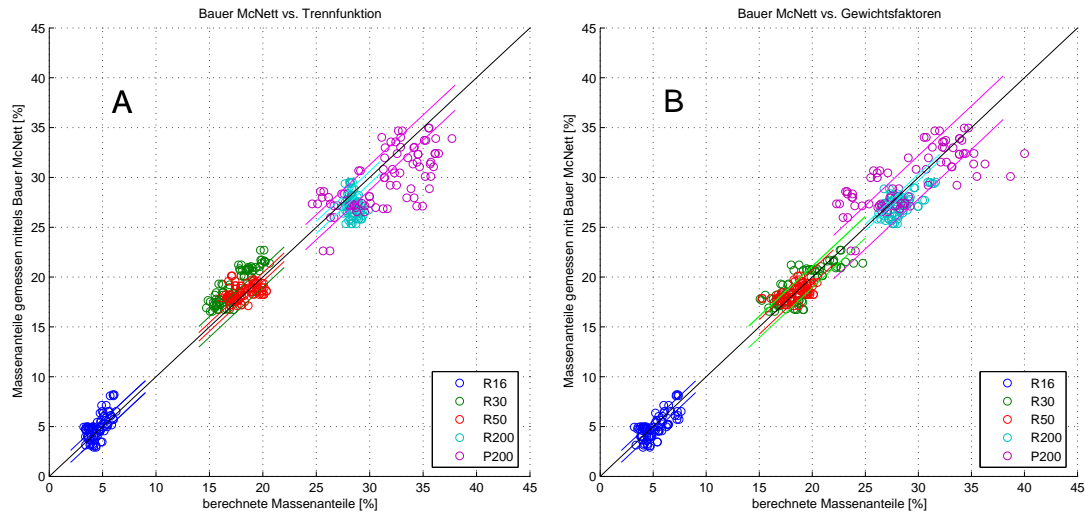


Abbildung 4.14: Vergleich der Korrelationen, des Trenngradmodells (A) mit der Methode der Gewichtsfaktoren (B)

nierung. Die Multikomponentenanalyse ergab für die durchgeführten Berechnungen keine zulässige Lösung.

Der Vergleich der Korrelationen zeigt (Abbildung 4.14), dass beide Modell ähnlich streuen, obwohl das Konfidenzintervall der D_{200} Fraktion in (A) enger ist, als in (B). Der Trend des Trenngradmodells der R_{30} Fraktion in Abbildung 4.14 (A) verläuft oberhalb der 45° Linie. Das bedeutet, dass die simulierten Werte zu niedrig sind. Das wirkt sich infolge des Lösens der Massenbilanz (siehe Gleichung 4.9) auf die D_{200} Fraktion aus, die zu hohe Werte anzeigt. Diesem Einfluss auf die simulierten Massenanteile unterliegt die Methode der Gewichtsfaktoren nicht. Dafür fließen die Probleme der Feinstoffdetektion in diese Methode mit ein. Das ist aus dem breiten Konfidenzintervall und der hohen Streuung der D_{200} Werte in Abbildung 4.14 (B) ablesbar. Bis auf die letzte Fraktion verlaufen alle anderen Fraktionen in geringer Streuung um die Idealachse. Nichtsdestoweniger geben beide Modelle die Trends der Fraktionierung gut erkennbar wider. Niedrige Bauer McNett Laborwerte entsprechen niedrigen Simulationswerten und umgekehrt.

In Abbildung 4.15 sind die Massenanteile über den Mittelwerten der Fraktionen der 39 Fraktionierungen aufgetragen. Die Konfidenzintervalle sind diejenigen, die auch in den Vergleichen der Korrelation verwendet wurden (vgl. Tabelle 4.3 und Tabelle 4.7). Die Erkenntnis, dass die R_{30} Fraktion der Methode des Trenngradmodells zu geringe Werte darstellt, zeigt sich auch in Abbildung 4.15. Die gleichmäßige Streuung der D_{200} Werte der Methode

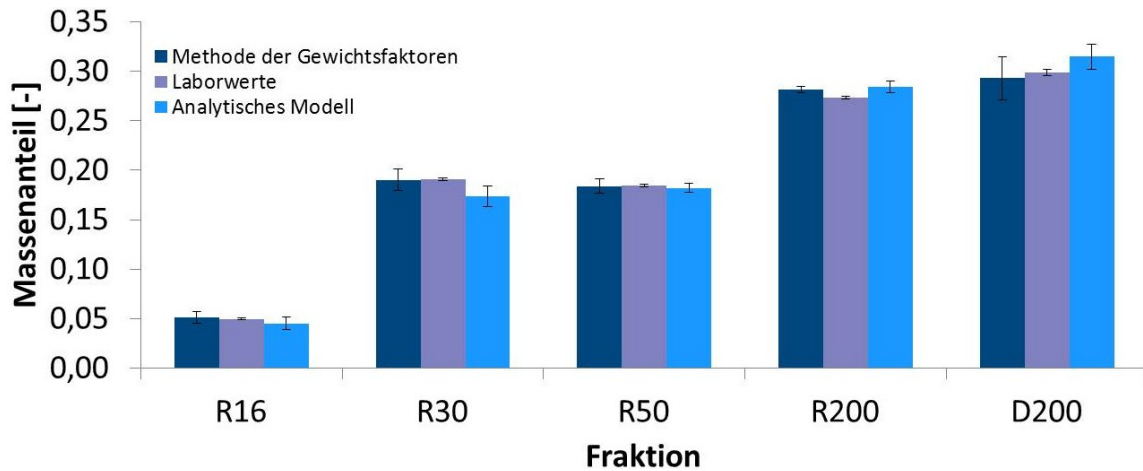


Abbildung 4.15: Vergleich der Mittelwerte der gesammelten Bauer McNett Fraktionen mit Simulationen der beiden Modelle

der Gewichtsfaktoren um die 45° Linie bestätigt sich durch einen Mittelwert, der dem der Laborwerte fast gleich ist. Weiters kann man in Abbildung 4.15 erkennen, dass die Methode der Gewichtsfaktoren den Anforderungen, die Langfaserfraktionen (i.e. R_{16-50}) wie die Bauer McNett Fraktionierung zu differenzieren, gerecht wird.

Beim Vergleich der Prinzipien der beiden Methoden erkennt man grundlegende Unterschiede. Die Trenngradmethode versucht den Trennvorgang selbst zu beschreiben, wohingegen die Gewichtsfaktoren eine einfache Korrelation darstellen. Das Trenngradmodell, als physikalisches Modell enthält Parameter, die theoretisch stoffunabhängig sind und nur das Trennaggregat definieren. Das empirische Modell dagegen, kennzeichnet mit seinen Gewichtsfaktoren den Faserstoff und den Ort der Probenahme und ist somit auch nur auf diese Stoffklasse begrenzt gültig. Ideal für eine Anwendung ist ersteres Modell, weil es grundsätzlich auf unterschiedliche Faserstoffe ohne vorherige Anpassung des Modells angewandt werden kann. Dieses Modell weist jedoch Schwächen in der Massenberechnung auf, und damit sind die beiden verwendeten Parameter nicht mehr stoffunabhängig. Aus diesem Grund, der Einfachheit und der Anpassungsfähigkeit der Methode der Gewichtsfaktoren, ist eben dieses Modell zu verwenden. Am Standort *Norske Skog Bruck an der Mur* wurden beide Modelle in den PulpExpertTM implementiert.

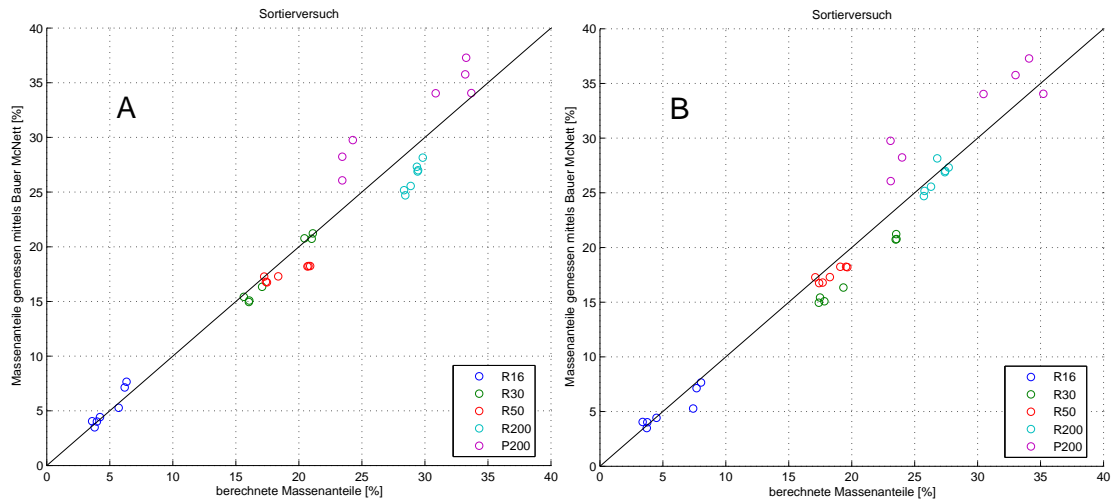


Abbildung 4.16: Gegenüberstellung der beiden Modelle anhand eines Sortierversuchs (A)... Trenngradmodell, (B)... Methode der Gewichtsfaktoren

4.4 Anwendung in einem Sortierversuch

Im Zuge eines Sortierversuchs, der sich über die gesamte Schleiferei erstreckte, wurden beide Modelle auf ihre Anwendbarkeit getestet. Die Bauer McNett Laborfraktionierungen umfassten alle Akzept- und Rejektströme der Sortierer aus der Schleiferei. Die Fraktionierungen wurde nicht persönlich, sondern vom dafür zuständige Laborpersonal durchgeführt. Die Bauer McNett Laborwerte sind keine Mittelwerte, sondern Werte, die aus einer Fraktionierung stammen. Für die Simulation von Interesse waren nur die Werte des Akzepts, da in diesen der Splittergehalt vernachlässigbar klein war. Die simulierten Werte wurden aus Doppelproben bestimmt. Das heißt, der zu untersuchende Faserstoff wurde zweimal im pulpexpertSHIVE Modul analysiert und daraus der Mittelwert berechnet.

Da keine Referenzwerte für die einzelnen Sortierer existierten, konnten die Gewichtsfaktoren auch nicht angepasst werden. Daher wurden für alle Simulationen dieselben Gewichtsfaktoren herangezogen. Für das Trenngradmodell wurden ebenfalls keine Anpassungen vorgenommen.

Abbildung 4.16 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen der beiden Modelle. Auf den jeweiligen Abszissen sind die simulierten Werte dargestellt und auf den Ordinaten die Werte der Laborfraktionierungen. Beide Modelle zeigen sehr gute Korrelationen. Das Trenngradmodell (Abbildung 4.16 (A)) simuliert die Trends und die wichtigen Langfaserfraktionen

Tabelle 4.8: Quadrierter Korrelationskoeffizient R^2

Fraktion	Trenngradmodell [-]	Modell der Gewichtungsfaktoren [-]
R_{16}	0,89	0,84
R_{30}	0,98	0,98
R_{50}	0,92	0,81
R_{200}	0,95	0,65
P_{200}	0,89	0,84

ausreichend genau. Die Schwäche, wie in Abschnitt 4.2.3 angesprochen, ist die D_{200} Fraktion. Da die simulierten Werte der R_{200} Fraktion zu geringe Werte ergeben, muss die D_{200} Fraktion aufgrund der Massenbilanz zu hohe Werte ausgeben.

Das Modell der Gewichtungsfaktoren beschreibt die Trends ebenfalls sehr gut. Die Absolutwerte weichen jedoch ein wenig von der Ideallinie ab (z.B.: R_{30} Fraktion in Abbildung 4.16 (B)). Das kann darauf zurückgeführt werden, dass keine Anpassung der Gewichtungsfaktoren vorgenommen wurde. Weiters erkennt man in (B) das Problem der Feinstoffdetektion.

Die Beurteilung mittels Bestimmtheitsmaß ist zwar wie in Kapitel 4.2 beschrieben, limitiert, zeigt jedoch, wie gut die Trends (Linearität) der Modelle widergegeben werden (vgl. Tabelle 4.8). Betrachtet man die niedrige Korrelation der R_{200} Fraktion des Modells der Gewichtungsfaktoren und vergleicht es mit Abbildung 4.16 (B), so ist zu erkennen, dass die R_{200} Fraktion sich auf der Ideallinie befindet. Das Bestimmtheitsmaß der beiden R_{30} Fraktionen ist sehr hoch. Beim Vergleich mit den Abbildungen 4.16 (A) und (B) ist ersichtlich warum dies der Fall ist. Förderlich für diesen hohen Wert ist, dass zwei Datengruppen entsprechend weit auseinander liegen.

Trotz einiger negativer Einflüsse liefern beide Modelle verwertbare Ergebnisse. Mit angepassten Gewichtungsfaktoren respektive mit optimaler Massenberechnung würden die Ergebnisse noch exakter. Der Sortiersuch ist ein gutes Beispiel für die Möglichkeiten, welche die Modelle bieten.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Die Bauer McNett Fraktionierung ist nach wie vor eine in der Industrie häufig eingesetzte Methode, einen Faserstoff zu bewerten. Diese Labormethode wird dem Wunsch gerecht, einen Faserstoff anhand weniger Werte zu kategorisieren. Es gibt automatisierte Faseranalysatoren, diese zeigen Faserlängenverteilungen an, die für eine Beurteilung jedoch sehr unhandlich sind. Der PulpExpertTM liefert zusätzlich zu den Faserlängenverteilungen auch deren arithmetische und gewichtete Mittelwerte. Diese Mittelwerte sind zwar einfach zu handhaben, sind aber nicht so stark in der Anwendung etabliert wie die Werte der Bauer McNett Fraktionierung

Ziel dieser Arbeit war es, Möglichkeiten zu finden, die Werte der zeitintensiven Messung gemäß der Bauer McNett Laborfraktionierung auf eine andere Art und Weise zu generieren. Im Zuge der Literaturrecherche wurden vier Modelle gefunden, die es ermöglichten, mithilfe einer Faserlängenverteilung die Bauer McNett Fraktionierung zu simulieren. Die Funktionsweise der Modelle ist zum Teil sehr unterschiedlich. Ein Modell beschreibt eine einfache Korrelation, das andere ist über einen mathematischen Ansatz definiert und ein weiteres simuliert die Fraktionierung anhand des Trenngrades der Bauer McNett Siebe. Nicht alle Methoden gelangten zur praktischen Umsetzung.

Zwei Modelle, die Methode der Gewichtungsfaktoren und das Trenngradmodell, erwiesen sich als applikabel. Ersteres ist ein einfach anzupassendes Korrelationsmodell, das beliebig oft abgeändert werden kann. Das zweite Modell beschreibt den Bauer McNett Apparat als Trennaggregat und definiert für jedes Bauer McNett Sieb eigene Trenngrade und deren zugehörige Parameter. Einziger Nachteil der Methode ist die noch nicht optimale Massenberechnung. Dieses Modell existiert bereits in ähnlicher Form und wird kommerziell eingesetzt. Vom derzeitigen Standpunkt aus ist die Methode der Gewichtungsfaktoren zu bevorzugen, da hier keine Unklarheiten durch etwaige Modellvorstellungen einer Faser bestehen.

Beide Modelle sind bereits in den PulpExpertTM implementiert und liefern simulierte Bauer McNett Werte. Die Anwendung der Methoden zeigt, wie vielseitig die Faserlängenverteilungen eines automatisierten Faseranalysators einsetzbar sind. Eine verbesserte Massenberechnung würde die Möglichkeiten zur Auswertung der Faserlängenverteilung erweitern. Eine Option die Massenberechnung zu verbessern, wäre das geometrische Modell anzupassen. Für verschiedene Längensklassen unterschiedliche Modelle zu verwenden, würde die Tatsache berücksichtigen, dass kurze Fasern und Feinstoff anders aufgebaut sind als lange Fasern. Eine weitere Möglichkeit ist es, den Einfluss der Dichte zu beachten. Weiters sollte eine Berücksichtigung des Splittergehalts überdacht werden, damit auch diese in die Berechnung miteinfließen können.

Literaturverzeichnis

- [1] AGMcontainer. Particle Size - US Sieve Series and Tyler Mesh . Internet, 11 2011. http://www.agmcontainer.com/desiccantcity/pdfs/Mesh_Size_Equivalents.pdf.
- [2] Gerard J.F. Ring and Aric J. Bacon. Multiple component analysis of fiber length distributions. *Tappi Journal*, 80(1):224–231, January 1997.
- [3] Hans-Jochen Barsch. *Taschenbuch mathematischer Formeln*. 18 th edition, 1999. S.597.
- [4] J. Khinast. VO Skript Partikelverfahrenstechnik 1. *TU Graz, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik*, SS 2008.
- [5] J. Levlin. On the suitability of the McNett classifier for the fibre-length classification of pulps. *Paperi ja Puu*, (4):213–217, 1982.
- [6] J. Niinimäki and O. Dahl and A. Ämmälä and J. Rintala and U. Kortela and T. Stoor. Simulation of Bauer-McNett Fractionatin from optically analysed fiber length distribution. *Proc. IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control*, pages 220–222, 1999.
- [7] James. A. Olson. Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening, Slotted Screen Plates. *Journal of Pulp and Paper Science*, 27(8):255–261, August 2001.
- [8] Jan-Erik Levlin and Liva Söderbjelm. *Pulp and Paper Testing*. Number 17. Fapet Oy, 1999.
- [9] J.d’A. Clark. *Pulp Technology and Treatment for Paper*. Miller Freeman Publications , Second edition, 1985.
- [10] J.d’A. Clark. Some thoughts on fiber classification and length. *Tappi Journal*, 68(8):119–121, August 1985.
- [11] Marc J. Sabourin and John Ayer. New methods for fiber analysis using optical fiber length and width measurement. *Appita General Conference*, 47:677–684, 1993.

- [12] Marko Kauppinen. Fiber Dimensions - Their Effect on Paper Properties & Required Measuring Accuracy. *Kajaani Research*, 03 1997.
- [13] Marko Kauppinen and Pekka Lehtikoski and Timo Riippa and Antti Salopuro. kajaaniPulpExpert, an on-line automatic laboratory with revolutionary new fibre and shive measurement. *Appita Journal*, 59(2):90–96, March 2006.
- [14] Metso Automation. pulpexpertSHIVE module. Metso Automation Report, 2004.
- [15] Norske Skog Bruck an der Mur. Durchführung der Faserfraktionierung und Bestimmung der Splitter. Arbeitsanweisung, 03 2011.
- [16] Olle Andersson. An Investigation of the Hillbom and Bauer McNett Fibre Classifier. *Svensk Papperstidning*, (18):704–709, September 1953.
- [17] Paul G. Hoel. *Introduction to Mathematical Statistics*. John Wiley & Sons, third edition, 1962. S. 70ff.
- [18] R.G. Bentley and P. Scudamore and J.S. Jack. A comparison between fibre length measurement methods. *Pulp and Paper Canada*, 95(4):41–45, 1994.
- [19] R.W. Gooding and J.A. Olson. Fractionation in a Bauer-McNett Classifier. *Journal of Pulp and Paper Science*, 27(12):423–427, December 2001.
- [20] T. Kuntzsch. Effektive Bewertung von Trennprozessen in der Stoffaufbereitung durch moderne fasermorphologische Messverfahren. PTS-Forschungsbericht, April 2007.
- [21] The MathWorks Inc. MATLAB Help. Version 7.0.019920(R14), May 06,2004.
- [22] Ulrich Hirn and Wolfgang Bauer. A review of image analysis based methods to evaluate fiber properties. *Lenzinger Berichte*, 86:96–105, 2006.
- [23] Yalçım Çöpür and Hannu Makkonen. Precision and Accuracy Studies with Kajaani Fiber length Analyzers. *Journal of Applied Sciences*, 7:1043–1047, 2007.

Anhang A

Matlab Codes

Matlab Code für das Analytische Modell einer Bauer McNett Fraktionierung

```
1 function ModellAnalytisch
2 %Diese Funktion berechnet aus der Anzahl-Längen-Breitenverteilung eine
   Massenhäufigkeits-Längenverteilung mit gegebener Dichte unter der
   Annahme eines Hohlzylinders.
3 %Lambda und Beta aus .txt File importieren:
4 LambdaBeta=importdata('LambdaBeta.txt');
5 lambda=LambdaBeta.data(1,:);
6 beta=LambdaBeta.data(2,:);
7 %Länge und Breite für die Massenverteilung definieren:
8 width=(1:2:80);
9 width=width*10-3;
10 width=width';
11 length=(0.025:0.05:7.2);
12 Dichte=0.4*10-4; % in [g/mm3]
13 %Massenberechnung unter Annahme eines Hohlzylinders mit einer Wandstärke von
   1/10 der Faserbreite:
14 Masse=((width.^2)/4)*(length)*Dichte*pi*(19/100) ; % in [g]
15 %Laden der Längen-Breitenverteilung aus .txt File:
16 load('Exenorm.txt');
17 Aufgabe=Exenorm;
18 %Normieren der Verteilung:
19 for i=1:1:40
20     for j=1:1:144;
21         Aufgabenorm(i,j)=Aufgabe(i,j)/sum(sum(Aufgabe));
22     end
23 end
24 Aufgabe=Aufgabenorm;
25 %Massenverteilung mit Häufigkeitsverteilung multiplizieren:
26 ManteileAufgabe=Aufgabe.*Masse;
27 %Normieren:
```

```

28 MvertAufgabe=sum(ManteileAufgabe);
29 for i=1:1:144;
30 MvertAufgabenorm(i)=MvertAufgabe(i)/sum(MvertAufgabe);
31 end
32 AufgabeetLabFrak=[MvertAufgabenorm'];
33 QA=MvertAufgabenorm';
34
35 %Berechnung aller Verteilungen:
36 for j=1:1:4;
37     for i=1:1:144;
38         T(i,j)=1-exp(-(length(i)/lambda(j))^beta(j));
39         g(i,j)=QA(i,j)*T(i,j);
40     end
41     for i=1:1:144;
42         %Das nächste Aufgabegut ist das Feingut, aus dieser Berechnung:
43         %Erklärung in Arbeit unter Analytisches Modell
44         QA(i,j+1)=(1-T(i,j))/(1-sum(g(:,j)))*QA(i,j);
45         QG(i,j)=(QA(i,j)*T(i,j))/sum(g(:,j));
46     end
47 end
48 %Berechnung der Summenhäufigkeit:
49 for j=1:1:4;
50     for i=2:1:144;
51         cdfQG(1,j)=QG(1,j);
52         cdfQG(i,j)=QG(i,j)+cdfQG(i-1,j);
53     end
54 end
55 G=sum(g);
56 %Lösen der Massenbilanz und Berechnung der Massenanteile:
57 mA=1;
58 mG16=mA*G(1);
59 mG30=G(2)*(mA-mG16);
60 mG50=G(3)*(mA-mG30-mG16);
61 mG200=G(4)*(mA-mG50-mG30-mG16);
62 mF200=mA-mG16-mG30-mG50-mG200;
63 mG=[mG16;mG30;mG50;mG200;mF200];
64 %Textfile für berechnete Werte schreiben
65 dlmwrite('BMcWerteGooding.txt', mG, 'delimiter','t');
66 end

```

Matlab Code für die Berechnung der Gewichtsfaktoren

```

1 function Wcalc2
2 %Das File berechnet aus den vorgegebenen Fraktionen und der L/B Verteilung
   die Korellationsfaktoren W
3 %Importieren der Bauer McNett Werte aus der Laborfraktionierung:
4 Lab=importdata('Laborfraktionierung.txt');
5 Rm=Lab.data;
6 num=[];
7 W=[];
8 Mittel=[];
9 A=[];
10 z=1; %Zähler für Spalten in W
11 %Laden der Längen-Breitenverteilung
12 load('Exenorm.txt');
13 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14 % L/B Verteilung normieren:
15 num=Exenorm;
16 s=size(num);
17 normnum=[];
18 for i=1:1:s(1)
19     for j=1:1:s(2);
20         normnum(i,j)=num(i,j)/sum(sum(num));
21     end
22 end
23 num=normnum*100;
24 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%--HOLZSTOFF--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%--Intervall--%aus intervall.txt importiert%%%
26 intervall=importdata('Intervall.txt');
27 N16=num(intervall.data(1,1):intervall.data(1,2),intervall.data(1,3):
   intervall.data(1,4));
28 N30=num(intervall.data(2,1):intervall.data(2,2),intervall.data(2,3):
   intervall.data(2,4));
29 N50=num(intervall.data(3,1):intervall.data(3,2),intervall.data(3,3):
   intervall.data(3,4));
30 N200=num(intervall.data(4,1):intervall.data(4,2),intervall.data(4,3):
   intervall.data(4,4));
31 NP200=num(intervall.data(5,1):intervall.data(5,2),intervall.data(5,3):
   intervall.data(5,4));
32 %Aufsummieren der Bereiche
33 N=[sum(sum(N16));sum(sum(N30));sum(sum(N50));sum(sum(N200));sum(sum(NP200))
   ];
34
35 %Matrix erstellen--> Ni*Wi/Summe(Ni*Wi)=Ri
36 %umgeformt auf Ni*Wi-Ri(Ni*Wi+...N5*W5)-->
37 %ergibt (1-R1)*N1*W1-R2*N2*W2.....-R5*N5*W5=0

```



```
38 %W wird mit lsqlin minimiert
39
40 Rv=Rm(:,z); %holt aus Rm-Matrix die zugehörigen Fraktionen
41 for i=1:1:5;
42     for j=1:1:5;
43         if i==j;
44             A(i,j)=(Rv(i)-1)*N(j);
45         else
46             A(i,j)=Rv(i)*N(j);
47         end
48     end
49 end
50 end
51 %Berechnung der Gewichtungsfaktoren mittels lsqlin:
52 x0=ones(5,1); %x0= Vektor für Startwerte
53 d=zeros(5,1); %d= Störvektor
54 W(:,z)=lsqlin(A,d,[],[],[],[],x0);
55 z=z+1;
56 Mittel=[mean(W(1,:));mean(W(2,:));mean(W(3,:));mean(W(4,:));mean(W(5,:))]
57 Mittel=Mittel';
58 %Ausgabe der Gewichtungsfaktoren in .txt File
59 dlmwrite ('Gewichtungsfaktoren.txt', Mittel, 'delimiter', '\t');
60 end
```

Matlab Code für Berechnung der Bauer McNett Fraktionierung mittels Methode der Gewichtungsfaktoren

```

1 function MethodeGewichtsfaktoren
2 %Diese Funktion berechnet mithilfe der Gewichtungsfaktoren und der Längen-
   Breitenverteilung die Bauer McNett Fraktionen
3 %Laden der Gewichtungsfaktoren die mithilfe der Funktion Wcalc2 berechnet
   wurden:
4 W=load('Gewichtungsfaktoren.txt');
5 W=W';
6 num=[];
7 RCalc=[];
8 RQF=[];
9 %Laden der Längen-Breitenverteilung für die die Bauer McNett Werte berechnet
   werden sollen:
10 load('Exenorm.txt');
11 num=Exenorm;
12 s=size(num);
13 normnum=[];
14 for y=1:1:s(1)
15     for j=1:1:s(2);
16         normnum(y,j)=num(y,j)/sum(sum(num));
17     end
18 end
19 num=normnum*100;
20 %Laden des Intervalls, dass auch für die Berechnung der Gewichtungsfaktoren
   verwendet wurde:
21 intervall=importdata('Intervall.txt');
22 N16=num(intervall.data(1,1):intervall.data(1,2),intervall.data(1,3):
   intervall.data(1,4));
23 N30=num(intervall.data(2,1):intervall.data(2,2),intervall.data(2,3):
   intervall.data(2,4));
24 N50=num(intervall.data(3,1):intervall.data(3,2),intervall.data(3,3):
   intervall.data(3,4));
25 N200=num(intervall.data(4,1):intervall.data(4,2),intervall.data(4,3):
   intervall.data(4,4));
26 NP200=num(intervall.data(5,1):intervall.data(5,2),intervall.data(5,3):
   intervall.data(5,4));
27 N=[sum(sum(N16));sum(sum(N30));sum(sum(N50));sum(sum(N200));sum(sum(NP200))
   ];
28 %Berechnung der Gewichtungsfaktoren nach Formel aus Arbeit (in "Methode der
   Gewichtungsfaktoren"):
29 for j=1:1:5;
30     RCalc(j)=N(j)*W(j)/sum(N.*W);
31 end

```

```
32 RCalc=RCalc';  
33 %Ausgabe der berechneten Bauer McNett Werte in .txt File:  
34 dlmwrite ('BMcWerte.txt', RCalc, 'delimiter', 't');  
35 end
```