

Gezielte Einstellung der Mahlungsbedingungen in der Gemischtmahlung von Zellstoffen durch ein Simulationswerkzeug

G. Meinel

Inhalt

1	Zusammenfassung	2
2	Abstract	3
3	Einleitung	4
4	Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens	5
5	Stand des Wissens und der Technik	6
5.1	Wesentliche Kennwerte der Mahlung.....	6
5.2	Mahlwirkung.....	8
5.3	Einfluss der fraktionellen Zusammensetzung auf den C-Faktor	11
5.4	Numerische Modelle für Papiereigenschaften	12
5.4.1	Charakterisierung von Faserstoffen	12
5.4.2	Vereinfachtes Strukturmodell für Fasernetzwerke in Papieren.....	13
6	Versuche und Ergebnisse zur Getrennt- und Gemischtmahlung	14
6.1	Versuche zur Getrennt- und Gemischtmahlung von Faserstoffen.....	14
6.2	Vergleich der Ergebnisse der Getrennt- und Gemischtmahlungen	16
7	Algorithmenentwicklung	23
7.1	Algorithmenentwicklung 1	23
7.1.1	Anteil der Faserfraktionen.....	24
7.1.2	Faserlänge, -durchmesser und –wanddicke in den Fraktionen	26
7.1.3	Faserflexibilität	26
7.1.4	WRV und Bindungsfestigkeit.....	28
7.1.5	Entwässerungswiderstand und spezifische Oberfläche.....	29
7.1.6	Lichtstreuoeffizient	32
7.2	Algorithmenentwicklung 2.....	32
7.3	Optimierungstool.....	36
7.4	Algorithmenvalidierung	42
8	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Ergebnisse	48
	Literatur	50

1 Zusammenfassung

Thema	Gezielte Einstellung der Mahlungsbedingungen in der Gemischtmahlung von Zellstoffen durch ein Simulationswerkzeug
Zielstellung	Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung der numerischen Grundlagen für eine rechnergestützte Simulation der Gemischtmahlung von Zellstoffen.
Ergebnisse	<p>Es steht ein umfassendes Algorithmenpaket zur Berechnung von Effekten der Mahlung zur Verfügung, welches, zusammen mit entsprechenden Softwarewerkzeugen zur Prognose von Effekten der Faserstoffmischung und der Blattbildung, eine detaillierte Simulation verschiedener Fahrweisen der Mahlung und eine Abschätzung resultierender Eigenschaftsveränderungen an Laborblättern ermöglicht. Alle Berechnungswerkzeuge liegen als Bausteine mit definierten Schnittstellen vor, sind variabel kombinierbar und können mittels verfügbarer Optimierungstools zum Zwecke der Prozess- und Produktoptimierung eingesetzt werden.</p>
Schlussfolgerung	<p>Eine vollständige Berechenbarkeit von Mahlergebnissen versetzt den Nutzer erstmals in die Lage, das Spannungsfeld "Faserstoff - Prozess - Papiereigenschaften" softwarebasiert zu beherrschen. Dies macht es in Zukunft möglich,</p> <ul style="list-style-type: none">• Papiereigenschaften auf der Basis der eingesetzten Faserstoffe frühzeitig zu prognostizieren,• veränderten Anforderungen an die Produkteigenschaften durch entsprechende Auswahl der Faserrohstoffe und Anpassung der Mahlungsbedingungen Rechnung zu tragen,• zweckmäßig auf Veränderungen von Rohstoffeigenschaften zu reagieren, um eine konstante Produktqualität zu gewährleisten• Faserstoffauswahl und Prozessbedingungen so zu optimieren, um Produkteigenschaften bei minimalen Kosten und geringem Energieeinsatz zu erreichen. <p>Eine softwaregestützte Anpassung der Mahlbedingungen ermöglicht unmittelbar Kosteneinsparungen von bis zu 3% (siehe Abschnitt 7.4).</p>
Danksagung	<p>Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Nr. IW 070061 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen und externen Industrieforschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm GmbH gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.</p> <p>Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.</p>

2 Abstract

Theme	Directed adjustment of the co-refining conditions for chemical pulps by a simulation tool
Project objective	The aim of the project is developing in addition of the already available numeric algorithms of the separate refining of chemical pulps also such for refining of mixed chemical pulps.
Results	<p>The algorithms of co-refining developed cover exactly the prediction of the change of the same fibrous material characteristics, as they are possible for single chemical pulps already. Thus the models which have been developed become linkable also with those algorithms, which permit a estimation of the change of paper properties.</p> <p>Experimental trials at PTS show, that there are clear differences in energy consumption of each fibre fraction when refined together and separately, even when refining conditions (fillings, specific edge load and net refining energy) are identical. The algorithms developed estimate the proportions of energy to be consumed by every pulp fraction, including a distinction between energy for fibre fibrillation and energy for fibre shortening.</p>
Conclusions	<p>This predictability puts users for the first time into the position to control the area of conflict "fibrous material - process - paper properties" software-supported. Thus it would be possible in the future by substantial reduction of the expenditure of experimental lab scale or pilot scale trials,</p> <ul style="list-style-type: none"> • to predict paper properties on the basis the raw materials at an early time, • to consider changed requirements to the paper properties by a careful selection of raw materials and an appropriate adjustment of refining conditions, • to react to changes regarding the raw material characteristics in order to ensure a constant quality of the produced paper, • to optimize pulp selection and refining conditions in order to achieve energetic goals as well as minimizing cost expenses. <p>By a software based adjustment of refining conditions cost reductions of 3% are possible (see chapter 7.4).</p>
Acknowledgement	<p>The research project IW 070061 was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi in the programme for the "Promotion of Research, Development and Innovation in Small and Medium-sized Enterprises and External Industrial Research Institutions in the New German Countries" and carried out under the umbrella of EuroNorm in Berlin. We would like to express our warm gratitude for this support.</p> <p>We would also like to express our thanks to the involved companies for providing proper samples as well as for supporting project performance.</p>

3 Einleitung

Bedeutung der Mahlung

Die Mahlung ist der zentrale Prozess der Stoffaufbereitung primärer Faserstoffe (Zell- und Holzstoffe). Ohne diesen Prozess gelingt es nicht, die Oberfläche der Einzelfasern in einer Art und Weise zu aktivieren, dass diese in der Papiermaschine ein stabiles Haufwerk bilden können und dem resultierenden Produkt die notwendige Festigkeit verleihen. Neben den mechanischen Eigenschaften beeinflusst die Mahlung aber auch optische Merkmale und das Permeabilitätsverhalten des Fertigproduktes. Somit ist davon ausgehen, dass neben der Faserstoffauswahl und der Verfügbarkeit einer zweckmäßigen Blattbildungsstrategie, d.h. der Papiermaschine, die Mahlung einer der wichtigsten Prozessabschnitte zum Einstellen der Gebrauchswerteigenschaften des Endproduktes ist.

Notwendigkeit der Unterstützung durch Simulationssoftware

Es ist somit von vitalem Interesse für jede Papierfabrik, die Mahlung geeignet auf die eingesetzten Faserstoffe sowie auf die über die Papiermaschine zu realisierenden Produkteigenschaften einzustellen. In der Vergangenheit erfolgte dies fast ausschließlich erfahrungsbasiert sowie mittels aufwändiger Vorversuche im Labor- und kleintechnischem Maßstab. In einer Zeit wachsenden Kostendrucks und angesichts stark schwankender Rohstoff- und Energiepreise ist diese Herangehensweise nicht mehr zeitgemäß. Es werden dringend rechenbare Methoden benötigt, welche computergestützte Prozess- und Eigenschaftssimulationen unterstützen, die letztendlich eine optimale wechselseitige Abstimmung von Faserstoffauswahl und Mahlstrategie ermöglichen.

Stand der Softwareentwicklung

Die mathematisch-physikalische Modellierung von Mahlprozessen hat etwa seit den 90er Jahren einen deutlichen Schub erhalten, bedingt durch die Entwicklung moderner Messtechniken zur morphologischen Analyse wässriger Suspensionen und die Verfügbarkeit leistungsfähiger Rechentechnik im Kleinmaßstab. Parallel werden neue Methoden bereitgestellt, das Multiskalenproblem der Verbindung der mikroskopischen Fasereigenschaften mit dem Makroverhalten von Fasernetzwerken, besser zu lösen. Darauf aufbauend sind Großunternehmen (z.B. ANDRITZ, SAPPi, STORA ENSO) bereits dazu übergegangen, für die strategische Planung von Mahlprozessen Softwarelösungen einzusetzen.

Kompetenz der PTS

Durch die Papiertechnische Stiftung (PTS) wird seit 2003 an der Entwicklung eines modularen Softwaresystems zur Simulation von Mahlprozessen an Zellstoffen und Altpapieren gearbeitet. Diese Tools setzt die PTS in ihrem Beratungsgeschäft ein, um auch kleinen und mittleren Unternehmen, die über keine Ressourcen zur Softwareentwicklung verfügen, diskriminierungsfrei einen Zugang zu Simulationswerkzeugen zu ermöglichen. Bei der Entwicklung der Software kann die PTS auf langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Niedrigkonsistenzmahlung, auf einen entwickelten Versuchsstand zur Durchführung von Mahlversuchen mit einem breiten Spektrum an Garnituren und Faserstoffen und auf eine entwickelte messtechnische Basis zurückgreifen.

4 Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Stand der PTS-Softwarewerkzeuge	<p>Die bislang an der PTS verfügbaren und an den internationalen Wissenstand sich anlehnenden Softwarewerkzeuge bei der Simulation der Effekte der Mahlung von Zellstoffen und Altpapieren berücksichtigten [1, 2]</p> <ul style="list-style-type: none"> • die wesentlichen geometrisch-morphologischen sowie suspensionsphysikalischen Eigenschaften von Einzelfaserstoffen, • den Einfluss von spezifischer Mahlenergie und spezifischer Kantenlast und • Wechselwirkungen zwischen Merkmalen des gemahlten Faserstoffes und Eigenschaften von Laborblättern.
Ziel des Vorhabens	<p>Das Ziel des Vorhabens bestand in der Weiterentwicklung der eingangs erwähnten Simulationswerkzeuge dahingehend, dass die durch Gemischtmahlung, d.h. durch den simultanen Einsatz mehrerer Faserstoffe resultierende zusätzliche Variabilität geometrisch-physikalischer Eigenschaften (statistische Verteilung der geometrischen Fasermerkmale) und daraus resultierende Unterschiede im per Simulation ermittelten Mahlergebnis Berücksichtigung finden.</p>
Weiterentwicklung der PTS-Softwarewerkzeuge	<p>Darüber hinaus sollten die bereits verfügbaren Simulationswerkzeuge (siehe [1, 2]) einer kritischen Revision unterzogen werden, um bislang vorhandene und mit Blick auf das Projektziel kritische Unzulänglichkeiten zu eliminieren. Zu den notwendigen Überarbeitungen gehören</p> <ul style="list-style-type: none"> • die Integration physikalischer Merkmale des Festigkeits- und Flexibilitätsverhaltens von Einzelfasern • die Entkopplung der Prognosealgorithmen von Klasseneinteilungen der verwendeten Faserstoffe, um die Allgemeingültigkeit der Prognosetools nachhaltig zu verbessern.
Kostenfaktoren	<p>Indem wesentliche Kostenfaktoren, d.h.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menge der eingesetzten Faserstoffe und deren Preise • Menge der aufgewandten Energie (Mahl- und Leelaufenergie) und deren Preise <p>berücksichtigt werden, sollte durch Integration geeigneter Lösungswerkzeuge für Optimierungsaufgaben anhand von Praxisbeispielen die Fähigkeit der zu entwickelnden Simulationstools nachgewiesen werden, ausgehend von definierten Produktspezifikationen und verfügbarer Mahltechnik kostenoptimale Mahlstrategien zu bestimmen.</p>

5 Stand des Wissens und der Technik

5.1 Wesentliche Kennwerte der Mahlung

Kennwerte der Faserstoff-suspension

Für die Mahlung liegt der Faserstoff in wässriger Suspension vor. Zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Mahlgut und Mahlanlage werden die in Tab. 1 zusammengefassten Kennwerte der Faserstoffsuspension verwendet.

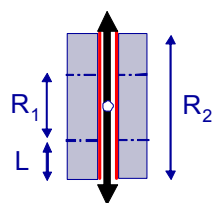
Tab. 1: Kennwerte der Faserstoffsuspension

Abkürzung	Maßeinheit	Bezeichnung
C_F	%	Stoffdichte der Suspension
ρ	g/cm^3	Dichte von Wasser
FL	μm	Mittlere Faserlänge
C_{FIB}	mg/m	Faser-Coarseness

Refinergeometrie

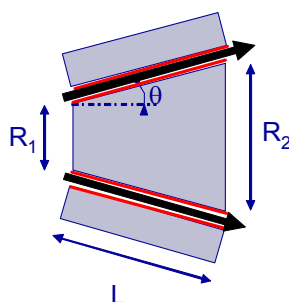
Industrielle Mahlanlagen, sog. Refiner, bestehen aus einem rotierenden (Rotor) und einem stehenden (Stator) Mahlwerkzeug, die als Scheibe, Kegel oder Zylinder ausgeprägt sein können und auf deren Oberfläche Messer angebracht sind. Die sich gegeneinander bewegenden Mahlwerkzeuge werden kontinuierlich von der Faserstoffsuspension durchströmt. Alle Refinergeometrien können durch einen einheitlichen Satz von 4 Parametern (R_1, R_2, L, θ) beschrieben werden (Abb. 1).

Scheibenrefiner



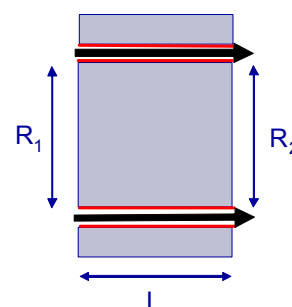
$$\theta=90^\circ, R_2>R_1$$

Kegelrefiner



$$0^\circ<\theta<90^\circ, R_2>R_1$$

Papillon-Refiner



$$\theta=0^\circ, R_2=R_1$$

Abb. 1: Typische Refinergeometrien (dicke schwarze Pfeile = Strömungsrichtung der Faserstoffsuspension)

Kennwerte der Mahlgarnitur

Da Rotor und Stator üblicherweise symmetrisch gestaltet sind, kann auf eine Unterscheidung in der Bezeichnung der Kennwerte verzichtet werden.

Tab. 2: Kennwerte der Mahlgarnitur

Abkürzung	Maßeinheit	Bezeichnung
G	mm	mittlere Nutbreite
D	mm	Nuttiefe
W	mm	Messerbreite
L_M	mm	mittlere Messerlänge ($L_M \geq R_2 - R_1$)
n_s		mittlere Messerzahl/Scheibe
R_1	mm	Innenradius der Mahlscheibe
R_2	mm	Außenradius der Mahlscheibe
θ	°	halber Öffnungswinkel
L	mm	Länge der Mahlzone
n	mm^{-1}	Mittlere Messerdichte
φ_r	°	Messerwinkel

Abhängigkeiten

Nicht alle Garniturparameter sind frei wählbar. Es gelten vielmehr folgende Zusammenhänge

$$R_2 - R_1 = L \cdot \sin \theta \quad (5-1)$$

$$n = \frac{n_s}{\pi(R_1 + R_2)} \quad (5-2)$$

$$\varphi_r = \arccos\left(\frac{L_M^2 + R_2^2 - R_1^2}{2 \cdot L_M \cdot R_2}\right) + \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{R_1^2 + R_2^2 - L_M^2}{2 \cdot R_1 \cdot R_2}\right) \quad (5-3)$$

Formel (5-3) gilt nur für Scheibenrefiner und gerade Messer.

Kennwerte des Energieeinsatzes

Tab. 3: Kennwerte des Energieeinsatzes

Abkürzung	Maßeinheit	Bezeichnung
ω	min^{-1}	Drehzahl
F	kg/s	Refinerdurchsatz (Faserstoff otro)
P_{NL}	kW	Leerlaufleistung
P_{eff}	kW	Effektive Mahlleistung
CEL	km/s	Sekundliche Schnittlänge
SEL	Ws/m	Spezifische Kantenlast
SRE	kWh/t	Spezifische Mahlenergie

Vereinfachte Charakterisierung der Mahlwirkung

BRECHT und SIEWERT [3] leiteten aus den Kennwerten des Energieeinsatzes (Tab. 3) nachfolgende Parameter ab, die eine zunächst stark vereinfachte einfache Charakterisierung der Mahlwirkung und eine Vergleichbarkeit von Mahlanlagen ermöglicht:

$$CEL = n_s^2 \cdot \omega \cdot L_M \cdot 10^{-6} \quad (5-4)$$

$$SEL = \frac{P_{eff}}{CEL} \quad (5-5)$$

$$SRE = \frac{P_{eff}}{F} \quad (5-6)$$

Weiterhin gilt in guter Näherung für die Leerlaufleistung bei Verwendung der in Tab. 2 und Tab. 3 vereinbarten Maßeinheiten [4]

$$P_{NL} = 12 * \left(\frac{\omega}{100}\right)^3 * \left(\frac{2R_2}{25400}\right)^{4,3} * \frac{G}{(G+W)} * D \quad (5-7)$$

5.2 Mahlwirkung**Elementarereignis der Mahlung**

Faser-Messer-Kontakt: Faser liegt zwischen zwei sich begegnenden Messern, wobei die Faserstruktur mechanisch verändert wird. Dabei wirken sowohl Scherkräfte, die die Fasern in Achsrichtung dehnen und stauchen als auch Kompressionskräfte senkrecht zur Faserachse.

Faserfibrillierung

Primäres Ziel der Mahlung ist es, durch Aufreißen der Primärschicht und der 1.Sekundärschicht S_1 der Faserwand, die bindungsaktiven, zellulosehaltigen Fibrillen der 2.Sekundärschicht S_2 zugänglich zu machen („fibrillierender“ Effekt der Mahlung). Scherkräfte bedingen vor allem eine **externe** Fibrillierung, die in einer Vergrößerung der hydrodynamisch wirksamen spezifischen Oberfläche SSA und einer Erhöhung des Entwässerungswiderstandes ihren Ausdruck finden. Kompressionskräfte fördern die **interne** Fibrillierung, welche gut mit dem WRV korreliert.

Faserkürzung

Ab einem gewissen Niveau der Scher- bzw. Kompressionskräfte werden die Fasern zerrissen bzw. durchtrennt. Die mittlere Faserlänge FL des Faseranteils geht deutlich zurück. Außerdem wird zunehmend Faserwandmaterial (sog. sekundärer Feinstoff) abgetrennt, die den Feinstoffanteil im Faserstoff erhöhen

Mahlwirkung

Die Mahlwirkung eines Refiners auf das Mahlgut ist abhängig von

- F : Refinerdurchsatz
- P_{eff} : Effektive Mahlleistung
- C - Faktor: Intensität der Energieübertragung auf Einzelfaser

Energiebilanz

Unter der Annahme, dass der Energieverbrauch I bei jedem Faser-Messer-Kontakt etwa konstant ist, gilt

$$SRE = N \cdot I \quad (5-8)$$

- N [kg^{-1}]: Anzahl der Faser-Messer-Kontakte / Masse
- I [kWh]: Energie je Faser-Messer –Kontakt

Daraus können abgeleitet werden:

- N^* : Anzahl Faser-Messer-Kontakte pro Faser

$$N^* = N \cdot FL \cdot c_{FIB} \quad (5-9)$$

- S [Ws/g]: spezifische Energie Faser-Messer –Kontakt

$$S = \frac{I}{FL \cdot c_{FIB}} \quad (5-10)$$

und es folgt

$$SRE = N^* \cdot S \quad (5-11)$$

C-Faktors nach KEREKES

KEREKES [5] definierte C als Anzahl der Faser-Messer-Kontakte je Zeiteinheit [1/s], d.h.

$$C = N \cdot F \quad (5-12)$$

Damit folgt aus (5-6) und (5-8)

$$I = \frac{P_{eff}}{C} \quad (5-13)$$

BRECHT/SIEWERT vs. KEREKES

Die sekundliche Schnittlänge CEL nach BRECHT und SIEWERT (5-4) ist also ein erster Entwurf eines C-Faktors und die spezifische Kantenlast SEL (5-5) kann als zugehörige Intensitätsmaß des Faser-Messer-Kontaktes betrachtet werden. Der C-Faktor von KEREKES zielt darauf, noch weitere Parameter der Garniturgeometrie, z.B. die Abmessungen der Messer sowie den Öffnungswinkel von Rotor und Stator, bei der Abschätzung der Mahlintensität zu berücksichtigen.

Messerdichte vs. Messeranzahl

Außerdem wird durch KEREKES eine konstante Messerdichte n statt einer konstanten Messeranzahl n_s angenommen. Tatsächlich ist die Konstanz sowohl von Messeranzahl als auch von Messerdichte in der Regel nur in einzelnen Zonen der Mahlgarnitur gültig. Die Berechnung einer mittleren Messeranzahl bzw. einer mittleren Messerdichte soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

C-Faktor

Auf Basis der Kennwerte in Tab. 1, Tab. 2 und Tab. 3 leitet KEREKES aus den Garniturkennwerten den C-Faktor wie folgt ab:

$$C = \frac{8\pi^2 * G * D * \rho * C_F * FL * n^3 \omega * (1 + 2 \tan \phi_r) * K}{C_{FIB} * (FL + D)} \quad (5-14)$$

Für den Kennwert K gilt

$$K = R_1^2 * L + L^2 * R_1 * \sin \vartheta + \frac{L^3}{3} * \sin^2 \theta \quad (5-15)$$

Für einen Scheibenrefiner vereinfacht sich die Berechnung von K gemäß:

$$K = \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{3} \quad (5-16)$$

Verweilzeit

Aus der Herleitung von KEREKES folgt für die Verweilzeit einer Einzelfaser in der Mahlzone

$$\tau = \frac{2\pi * D * \rho * \cos \phi_r * C_F}{F} \left(R_1 * L + \frac{L^2}{2} \sin \vartheta \right) \quad (5-17)$$

5.3 Einfluss der fraktionellen Zusammensetzung auf den C-Faktor

Einfluss der fraktionellen Zusammensetzung auf den C-Faktor

Aus der Definition (5-14) des C-Faktors folgt unmittelbar, dass für 2 verschiedene Faserfraktionen mit Faserlängen FL_1 und FL_2 , Coarseness $c_{FIB,1}$ und $c_{FIB,2}$ und zugehörigen Stoffdichten $C_{F,1}$ und $C_{F,2}$ bei ansonsten identischer Garniturgeometrie die zugehörigen C-Faktoren sich gemäß

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_{F,1}}{C_{F,2}} \cdot \frac{c_{FIB,2} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_2}\right)}{c_{FIB,1} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_1}\right)} \quad (5-18)$$

verhalten. Die Energie I , die ein einzelner Faser-Messer-Kontakt hingegen verbraucht, ist in einer homogenen Mischung von der Faserlänge unabhängig. Die Anteile $P_{eff,1}$ und $P_{eff,2}$ der effektiven Mahlleistung, die auf die beide Faserfraktionen FL_1 und FL_2 entfallen, stehen wegen (5-13) somit in folgender Relation

$$\frac{P_{eff,1}}{P_{eff,2}} = \frac{C_{F,1}}{C_{F,2}} \cdot \frac{c_{FIB,2} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_2}\right)}{c_{FIB,1} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_1}\right)} \quad (5-19)$$

Damit folgt für die spezifischen Mahlenergien SRE_1 bzw. SRE_2 , die auf die Fraktionen FL_1 bzw. FL_2 entfallen wegen

$$\frac{C_{F,1}}{F_1} = \frac{C_{F,2}}{F_2} = \frac{C_F}{F} \quad (5-20)$$

schließlich mit (5-6)

$$\frac{SRE_1}{SRE_2} = \frac{c_{FIB,2} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_2}\right)}{c_{FIB,1} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_1}\right)} \quad (5-21)$$

Aus (5-21) kann unmittelbar der für Gemischtmahlungen wichtige Schluß abgeleitet werden, dass mit zunehmender mittlerer Faserlänge einer Fraktion auch die je Masseinheit Fasern in dieser Fraktion verbrauchte Mahlenergie zunimmt. Die im Zuge von Gemischtmahlungen beobachtete Ungleichbehandlung von Fasern unterschiedlicher Faserlänge [6] kann damit quantifiziert werden.

5.4 Numerische Modelle für Papiereigenschaften

5.4.1 Charakterisierung von Faserstoffen

Tab. 4: Eigenschaften zur Charakterisierung von Faserstoffen

Gruppe	Messmethode	Eigenschaft	Bezeichnung [Einheit]
Morphologische Eigenschaften der organischen Faserstoffbestandteile	Geräte FIBERLAB und anschließende Datenreduktion (Methode PTS; 7)	Massegewichteter Anteil der Feinstofffraktion	FS [%]
		Mittlere Faserlänge der Feinstofffraktion	FL_{FS} [μm]
		Massegewichteter Anteil der Kurzfasernfraktion	KF [%]
		Mittlere Faserlänge der Kurzfasernfraktion	FL_{KF} [μm]
		Mittlerer Faserdurchmesser der Kurzfasernfraktion	WI_{KF} [μm]
		Mittlere Faserwandstärke der Kurzfasernfraktion	CWT_{KF} [μm]
		Massegewichteter Anteil der Langfasernfraktion	LF [%]
		Mittlere Faserlänge der Langfasernfraktion	FL_{LF} [μm]
		Mittlerer Faserdurchmesser der Langfasernfraktion	WI_{LF} [μm]
		Mittlere Faserwandstärke der Langfasernfraktion	CWT_{LF} [μm]
Anorganische Bestandteile	DIN 54730	Glührückstand (575°)	ASH_{575} [%]
Suspensionseigenschaften	DIN ISO 5267-1	SCHOPPER-RIEGLER-Wert	SR [°]
	ZM IV/33/57	Wasserrückhaltevermögen	WRV [%]
Mechanische Fasereigenschaften	Mittels scheinbarer Dichte und Zugversuch am Laborblatt via Struktur-Modell (siehe [12])	Fasersteifigkeit	δ [dimensionslos]
		Faserfestigkeit	F_Z [MPa]
		(Scher-)Festigkeit der Faserbindung	b [MPa]
Optische Fasereigenschaften	DIN 54500-86 (Gerät ELREPHO)	Spezifischer Lichtabsorptionskoeffizient	K_Y [m^2/kg]

5.4.2 Vereinfachtes Strukturmodell für Fasernetzwerke in Papieren

Ausgangssituation Zur Ableitung physikalischer Zusammenhänge zwischen Fasermerkmalen (Tab. 4) und Papiereigenschaften (eines Laborblattes) ist es zwingend notwendig, die räumliche Anordnung der Fasern in einem Fasernetzwerk geeignet zu berücksichtigen.

Modellannahmen Reale Fasernetzwerke in Papieren sind stochastisch angeordnet. Um bei der Verknüpfung von Faserstoff- mit Papiereigenschaften eine durchgehende Berechenbarkeit zu erreichen, werden bei der Modellierung der Fasernetzwerkstruktur eine Reihe von Vereinfachungen angenommen:

1. Alle Fasern sind gerade und haben einen konstanten rechteckigen Querschnitt (Höhe H , Breite D). Die Fasern sind vollständig kollabiert.
2. Alle Fasern sind in Lagen angeordnet. Innerhalb einer Lage sind die Fasern lückenlos hintereinander bzw. parallel mit einem Abstand d angeordnet.
3. Fasern benachbarte Lagen liegen zueinander rechtwinklig.
4. Fein- und Füllstoffe sind gleichmäßig in den Zwischenräumen des Fasernetzwerkes eingelagert. Das Fasernetzwerk selbst, d.h. dessen Armierung, besteht ausschließlich aus Fasern der Kurz- und Langfaserfraktion (siehe Tab. 4).

Wegen der Regelmäßigkeit des angenommenen Fasernetzwerkes (Abb. 2) kann dieses bereits durch die Angabe einer Elementarzelle (d : Länge und Tiefe der Zelle, $2H$: Höhe der Zelle) vollständig beschrieben werden.

Regelmäßiges Fasernetzwerkmodell

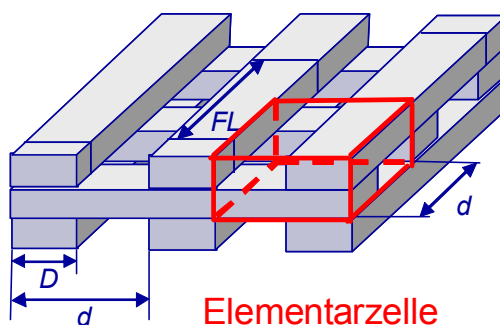


Abb. 2: Regelmäßiges Fasernetzwerkmodell mit Elementarzelle

Prognoseansätze für Papiereigenschaften

Alle auf dem vereinfachten Fasernetzwerkmodell Abb. 2 und den Fasermerkmalen (Tab. 4) basierenden Prognoseansätze für Papiereigenschaften werden ausführlich in [12] beschrieben.

6 Versuche und Ergebnisse zur Getrennt- und Gemischtmahlung

6.1 Versuche zur Getrennt- und Gemischtmahlung von Faserstoffen

Zielstellung Im Rahmen zweier umfangreicher Versuchsreihen sollte geklärt werden, in wie weit sich das Mahlergebnis unterscheidet, wenn Faserstoffe mit deutlich differenzierten Faserlängenverteilungen getrennt- und gemischt gemahlen werden.

Eingesetzte Faserstoffe

Tab. 5: Eingesetzte Faserstoffe

Code	Herkunft
ZS-KF2	Eucalyptus gl. (Südeuropa, ECF gebleicht)
ZS-KF3	Eucalyptus ni. (Südamerika, ECF gebleicht)
ZS-LF1	Nadelholz (Nordeuropa, ungebleicht)
ZS-LF2	Durch leichte trockenmechanische Kürzung aus ZS-LF1 erzeugt
ZS-LF3	Durch starke trockenmechanische Kürzung aus ZS-LF1 erzeugt
ZS-LF4	Nadelholz (Nordeuropa, ECF gebleicht)

Chemische Charakterisierung

Tab. 6: Ergebnisse der chemischen Charakterisierung der ausgewählten Zellstoffe

Code	Grenzviskositätszahl (DIN5351/1)	ASH ₅₇₅
	ml/g	%
ZS-KF2	918,00	0,20
ZS-KF3	782,00	0,10
ZS-LF1,2,3	900,00	0,77
ZS-LF4	605,00	0,34

Eine besondere technologische Herausforderung der Mahlversuche bestand darin, für alle Getrenntmahlungen wie auch für die Gemischtmahlung exakt dieselben Mahlbedingungen (gleiche mahlgarnitur, gleiche spezifische Kantenlast SEL) einzuhalten, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten.

Tab. 7: Kennwerte der in den Mahlversuchen verwendeten Mahlgarnitur

G	D	W	L_M	n_R/n_S	R_1	R_2	θ	φ_r	ω	P_{eff}
mm	mm	mm	mm		mm	mm	°	°	1/min	kW
8	3,5	5	55,7	45	94	145	90	30	1500	4,23

Versuchsreihe I Für die Gemischtmahlung wurden die Faserstoffe ZS-LF1, ZS-LF2 und ZS-LF3 jeweils paarweise im Verhältnis 50:50 gemischt und anschließend gemahlen (Mix-LF1/2, Mix-LF1/3, Mix-LF2/3). Für die Getrenntmahlung erfolgte zunächst die Mahlung der Einzelfaserstoffe und anschließend eine paarweise Mischung 50:50 der jeweils mit gleicher Mahlenergie behandelten Faserstoffe (Sep-LF1/2, Sep-LF1/3, Sep-LF2/3). Das Schema der Mahlversuche ist Abb. 3 zu entnehmen. Alle Mahlungen erfolgten

mit derselben Mahlgarnitur (siehe Eine besondere technologische Herausforderung der Mahlversuche bestand darin, für alle Getrenntmahlungen wie auch für die Gemischtmahlung exakt dieselben Mahlbedingungen (gleiche mahlgarnitur, gleiche spezifische Kantenlast SEL) einzuhalten, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten.

- Tab. 7)
- mit derselben spezifischen Kantenlast (SEL = 2Ws/m)

Schema der Mahlversuche

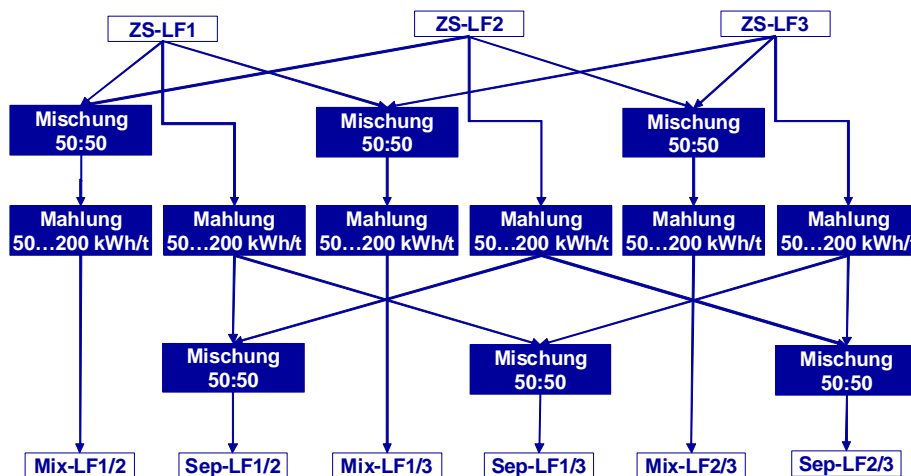


Abb. 3: Schema der Mahlversuche der Getrennt- und Gemischtmahlung in Versuchsreihe I

Versuchsreihe II Für die Mahlversuche in Versuchsreihe II wurden durch Abmischungen von ZS-LF4 mit ZS-KF2 (Mischungsverhältnisse 66:33 und 30:70) zwei weitere „Modell“-Faserstoffe ZS-LF5 und ZS-LF6 erzeugt. Mit den Faserstoffen ZS-LF4, ZS-LF5 und ZS-LF6 wurden schließlich durch paarweises Mischen die Ganzstoffe Mix-LF4/5a, Mix-LF4/5b, Mix-LF4/6a und Mix-LF4/6b erzeugt und gemahlen. Alternativ wurden die „Modell“-Faserstoffe erst gemahlen und dann entsprechend gemischt. Der vollständige Versuchsplan ist Abb. 4 zu entnehmen.

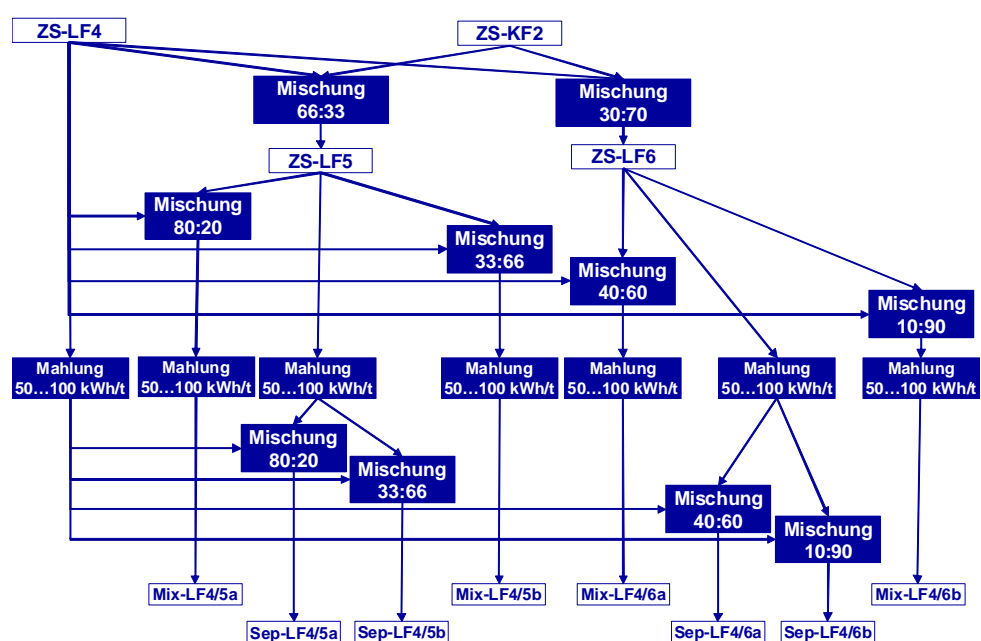
**Schema der
Mahlversuche**


Abb. 4: Schema der Mahlversuche der Getrennt- und Gemischtmahlung in AP5

**Differenzierung
der Mahlversu-
che**

Der wesentliche systematische Unterschied der Mahlversuche in AP5 gegenüber denen in AP2 besteht in der Mischung von Nadelholz- und Laubholzfaserstoffen. Darüber hinaus wurde die mittlere Faserlänge des Faseranteils in allen „Modell“-Faserstoffen auf über 650 µm eingestellt, wodurch dieselbe Langfaser-Mahlgarnitur PTS-LF wie in AP2 sinnvoll anwendbar ist und trotzdem ein breites Spektrum an Faserlängen für vergleichende Mahlversuche verfügbar ist. Die Mahlung erfolgte mit einer spezifischen Kantenlast SEL=1,5 Ws/m.

6.2 Vergleich der Ergebnisse der Getrennt- und Gemischtmahlungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus beiden Versuchsreihen in Bezug auf die Entwicklung der folgenden suspensions- und Papiereigenschaften gegenübergestellt:

- Feinstoffanteil
- Langfaseranteil
- SR-Wert
- WRV
- Tensile-Index
- Luftdurchlässigkeit (GURLEY)

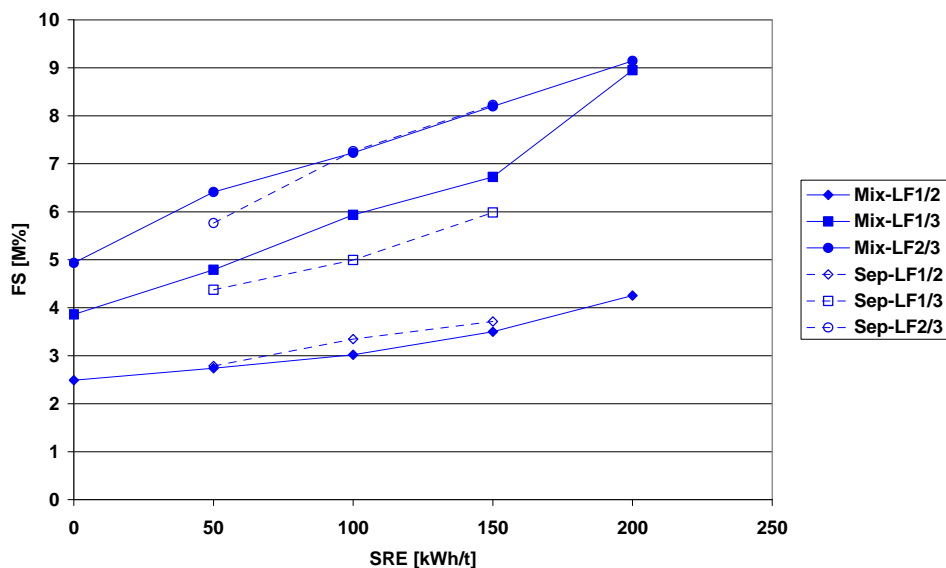


Abb. 5: Entwicklung des Feinstoffanteils bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe I)

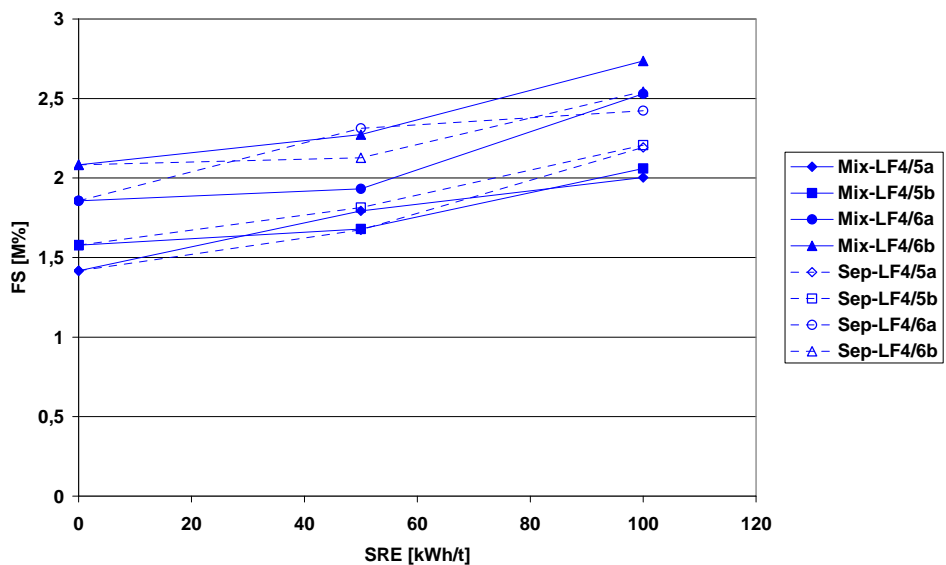


Abb. 6: Entwicklung des Feinstoffanteils bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe II)

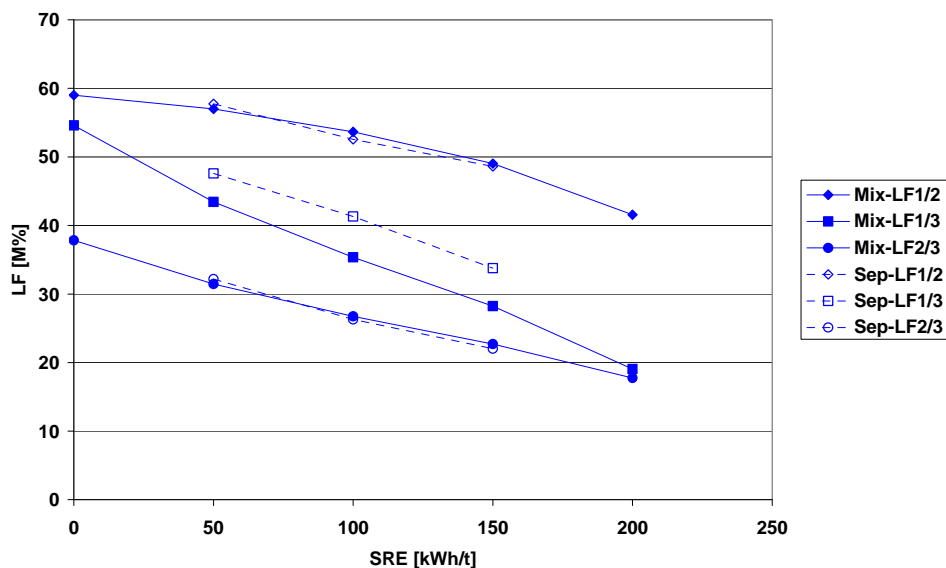


Abb. 7: Entwicklung des Langfaseranteils bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe I)

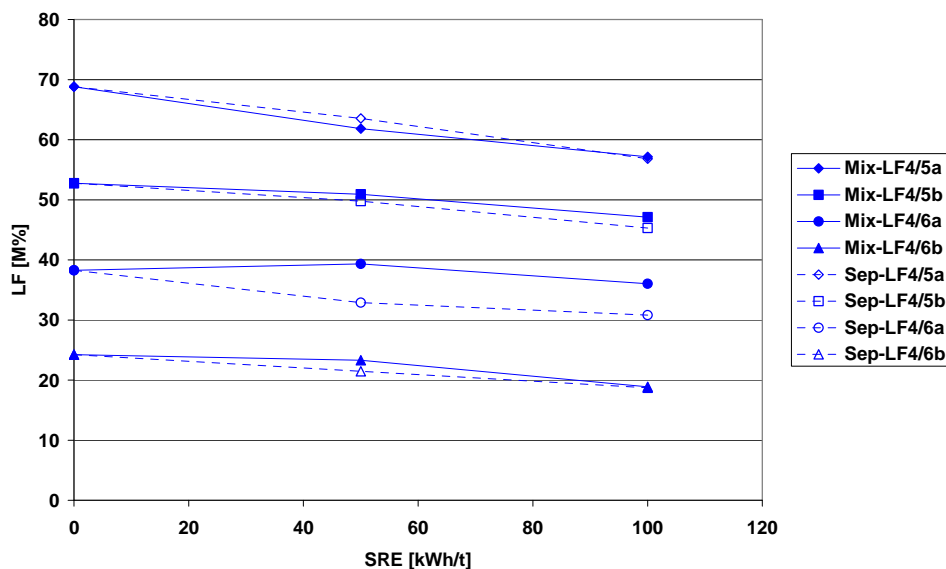


Abb. 8: Entwicklung des Langfaseranteils bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe II)

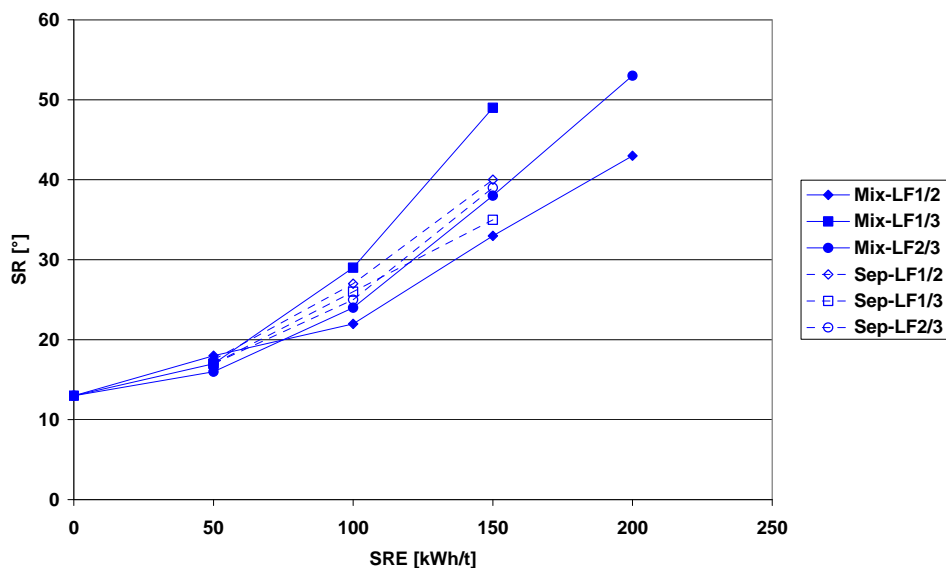


Abb. 9: Entwicklung SR-Wert bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe I)

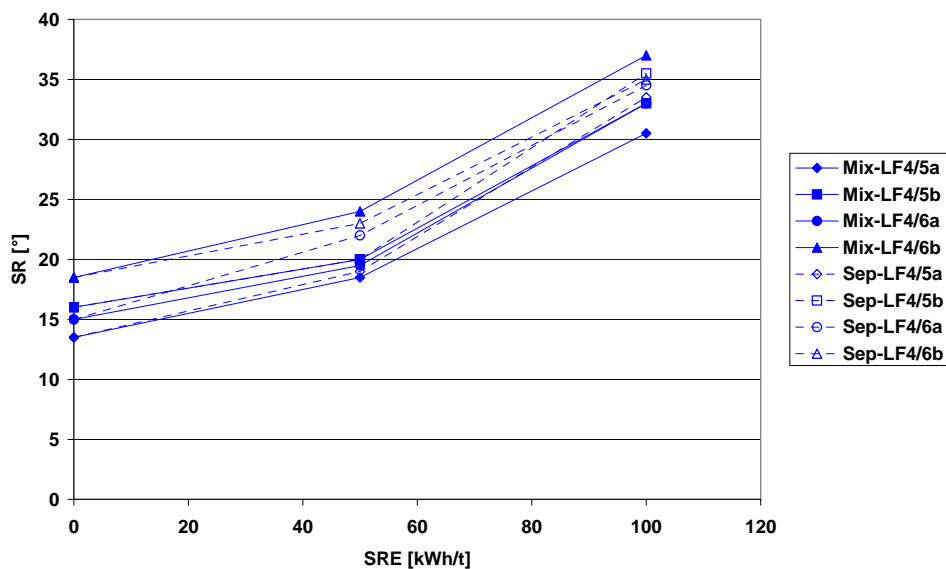


Abb. 10: Entwicklung SR-Wert bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe II)

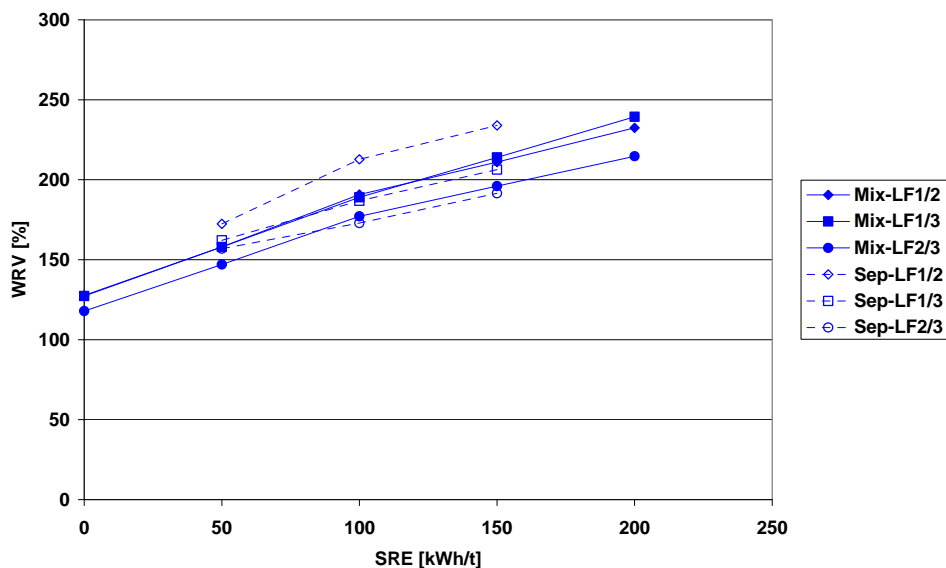


Abb. 11: Entwicklung des WRV bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe I)

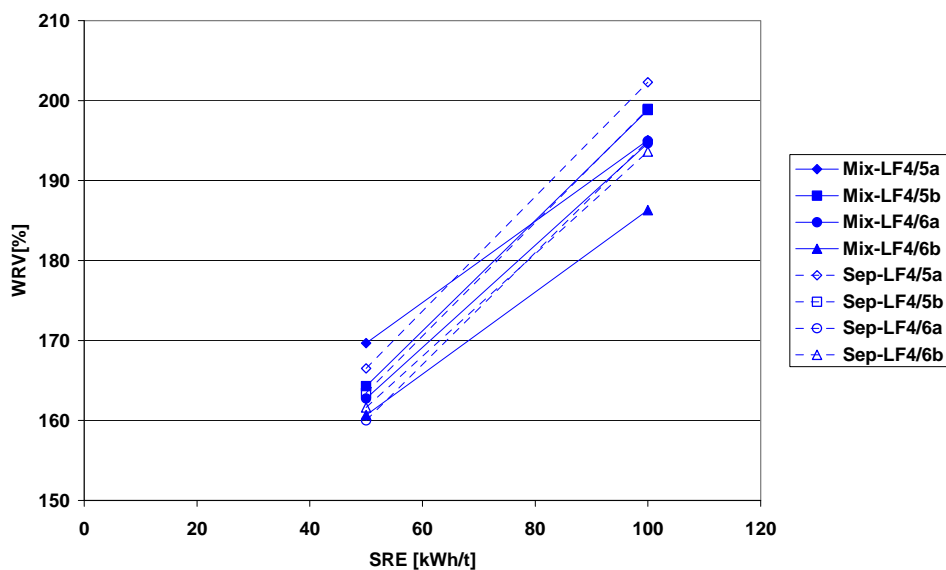


Abb. 12: Entwicklung des WRV bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe II)

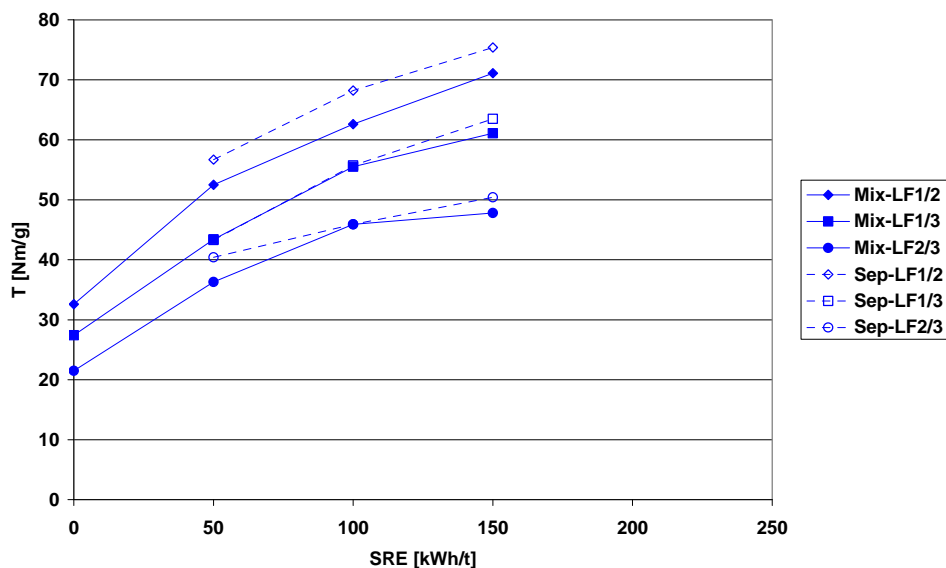


Abb. 13: Entwicklung des Tensile-Index bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe I)

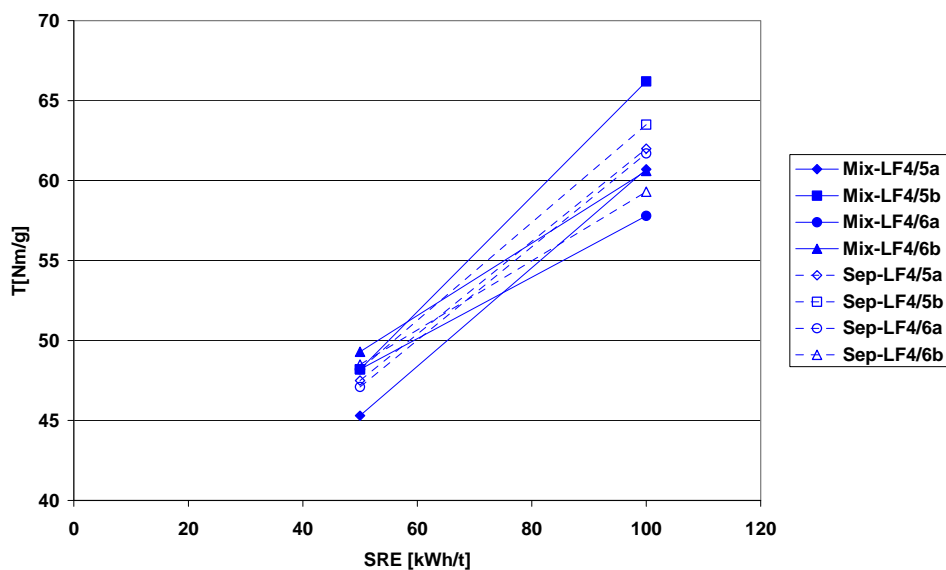


Abb. 14: Entwicklung des Tensile-Index bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe II)

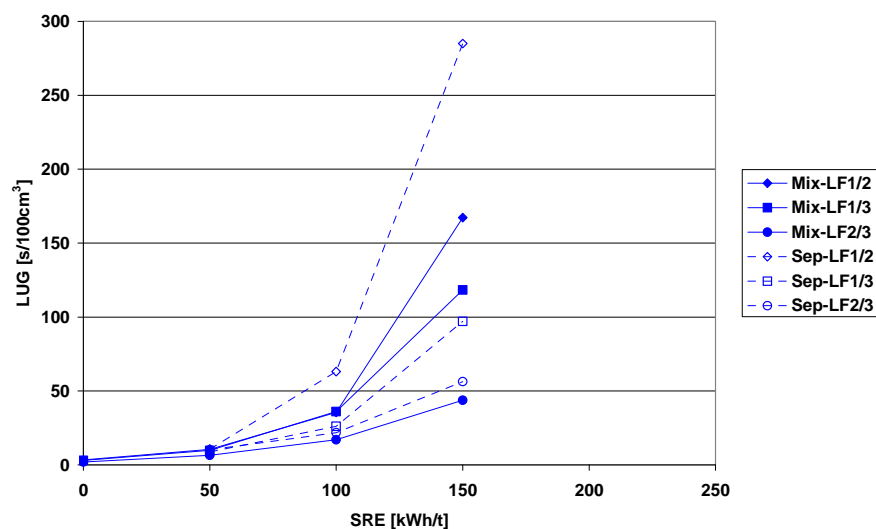


Abb. 15: Entwicklung der Luftdurchlässigkeit (Gurley) bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe I)

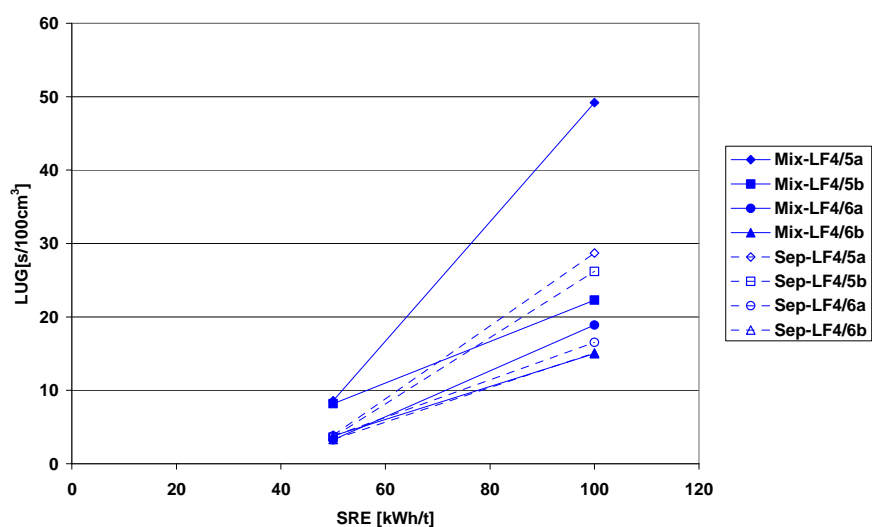


Abb.

16: Entwicklung der Luftdurchlässigkeit (Gurley) bei Gemischt- und Getrenntmahlung (Versuchsreihe II)

Schlussfolgerungen aus den Mahlversuchen

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen von Getrennt- und Gemischtmahlung in beiden Mahlreihen liefert bezüglich

- Faserlängenverteilung: keine signifikanten Unterschiede
- WRV und Festigkeit: im Allgemeinen stärkere Entwicklung der inneren Fibrillierung und damit der Bindungsfestigkeit bei Getrenntmahlung
- SR: bei Getrenntmahlung deutlich engerer Korridor der Eigenschaftsentwicklung als bei Gemischtmahlung
- Luftdurchlässigkeit: im Allgemeinen bei Getrenntmahlung höher als bei Gemischtmahlung

7 Algorithmenentwicklung

7.1 Algorithmenentwicklung 1

Ziel Die erste Stufe der Algorithmenentwicklung beinhaltet die Bereitstellung von Modellansätzen, welche den Einfluss der Faserlängenverteilung auf das Mahl-ergebnis abbilden. Erstmals standen dazu Rohdaten aus Mahlversuchen zur Verfügung, in denen die Faserlängenverteilung des Eingangsfaserstoffes in einem maximal möglichen Intervall variiert wurde, ohne sonstige Faserstoffkennwerte und Mahlbedingungen zu verändern.

Zusammenhangsmodelle *SRE* und Fasereigenschaften via *S*

Die funktionale Abhängigkeit zwischen der spezifischen Mahlenergie *SRE* und der Veränderung einer Fasereigenschaft (gemäß Tab. 4) ist maßgeblich vom Wert der spezifischen Kontaktenergie *S* des Systems Refiner-Faserstoff abhängig. Bei der Herleitung numerischer Modelle des Zusammenhangs zwischen *S* und den mahlungsbedingten Veränderungen von Fasereigenschaften wird folgende Vorgehensweise gewählt:

Auf Basis der Kennwerte der verwendeten Mahlgarnituren (Eine besondere technologische Herausforderung der Mahlversuche bestand darin, für alle Getrenntmahlungen wie auch für die Gemischtmahlung exakt dieselben Mahlbedingungen (gleiche Mahlgarnitur, gleiche spezifische Kantenlast *SEL*) einzuhalten, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten.

1. Tab. 7) und der Ergebnisse der fasermorphologischen Prüfung der ungemahlten Faserstoffe (Anhang 1) erfolgte die Berechnung der spezifischen Kontaktenergie *S* (Anhang 7) gemäß dem Kalkül von KEREKES (Kapitel 5.2).
2. Für den Zusammenhang zwischen Mahlenergie *SRE* und Änderung einer Fasereigenschaft eines gegebenen Faserstoffes (bei festem Wert *S* d.h. in einem definierten Refiner-Faserstoff-System) wird jeweils eine 1-parametrische Klasse von Funktionen bereitgestellt. Der beste Funktionsparameter wird durch Regression bestimmt.

Für jede Fasereigenschaft wird die optimal ausgleichende Funktion zwischen *S* und dem jeweiligen Funktionsparameter bestimmt.

7.1.1 Anteil der Faserfraktionen

„Wandern“ der Faserfraktionen

Infolge Faserkürzung, d.h. dem Zerreißen bzw. Zerschneiden von Fasern, und dem Abtrennen von Fibrillen „wandern“ Fasern aus der Langfaser- in die Kurz- faserfraktion bzw. aus der Kurz- faser- in die Feinstofffraktion (Abb. 17).

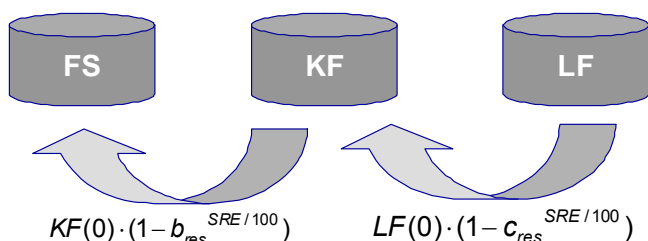


Abb. 17: Schema zur Dynamik der Masseveränderung der Faserfraktionen

Die Faktoren b_{res} und c_{res} , die aus einem Modell der schrittweisen Zerkleinerung (engl. Comminution) folgen, beschreiben die Resistenz der Fasern der Kurz- bzw. Langfaserfraktion gegenüber Kürzung, wobei Werte zwischen 1 (absolut mahlresistent) und 0 (keinerlei Mahlwiderrstand) angenommen werden können.

$$FS = FS(0) + KF(0) \cdot (1 - b_{res}^{SRE/100}) \tag{7-1}$$

$$KF = KF(0) \cdot b_{res}^{SRE/100} + LF(0) \cdot (1 - c_{res}^{SRE/100}) \tag{7-2}$$

$$LF = LF(0) \cdot c_{res}^{SRE/100} \tag{7-3}$$

**Regressionser-
gebnisse**

Tab. 8: Mittels Regression bestimmte Werte für b_{res} bzw. c_{res} der verschie-
denen Mahlreihen

Mahlreihe (Faserstoff)	S	S_{LF}	LF	b_{res}	c_{res}
ZS-LF1	24	8	0,72	0,97	0,83
ZS-LF2	58	15	0,48	0,963	0,7
ZS-LF3	98	25	0,26	0,96	0,65
Mix-LF1/2	40	10	0,59	0,982	0,88
Mix-LF1/3	58	12	0,55	0,95	0,65
Mix-LF2/3	77	18	0,38	0,96	0,7
ZS-LF4	19	6	0,76	0,96	0,55
ZS-LF5	36	16	0,45	0,985	0,9
ZS-LF6	48	32	0,20	0,995	0,8
Mix-LF4/5a	22	6	0,69	0,98	0,85
Mix-LF4/5b	29	9	0,53	0,99	0,9
Mix-LF4/6a	35	6	0,38	0,99	0,86
Mix-LF4/6b	43	13	0,24	0,992	0,8

b_{res} und c_{res} als Funktion von S und S_{LF}

Der Faktor b_{res} selbst ist eine Funktion des Langfaser-Anteils (vor der Mahlung) und der spezifischen Kontaktenergie S . Der Faktor c_{res} hingegen wird nur durch die spezifische Kontaktenergie S_{LF} beeinflusst. Folgende Ansätze werden verwendet:

$$b_{res} = (A_{FS} \cdot e^{B_{FS} \cdot S} + 1) \cdot \left(1 - \frac{LF}{C_{FS} \cdot LF + D_{FS}}\right) \tag{7-4}$$

$$c_{res} = 1 - A_{LF} \cdot e^{B_{LF} \cdot S_{LF}} \tag{7-5}$$

Mittels weiterer Regressionen wurden folgende beste Werte ermittelt:

- $A_{FS} = -0,03, B_{FS} = -0,06, C_{FS} = 20,0, D_{FS} = 1,2$
- $A_{LF} = -0,4, B_{LF} = -0,04$

Modellgüte b_{res}

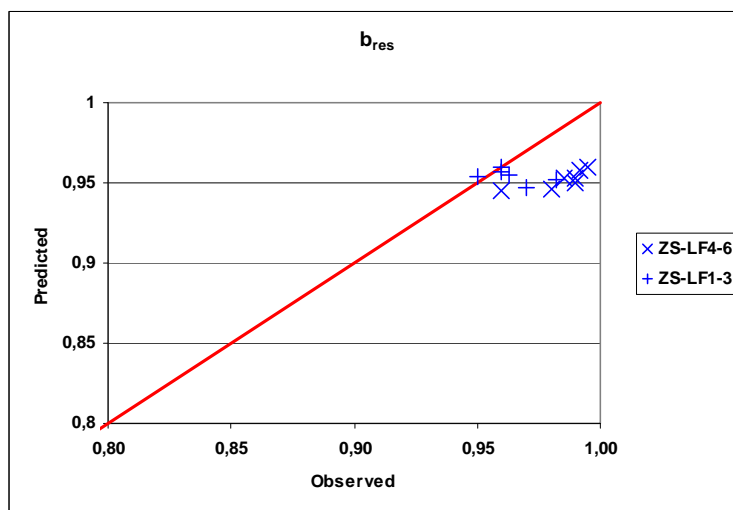


Abb. 18: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für b_{res}

Modellgüte c_{res}

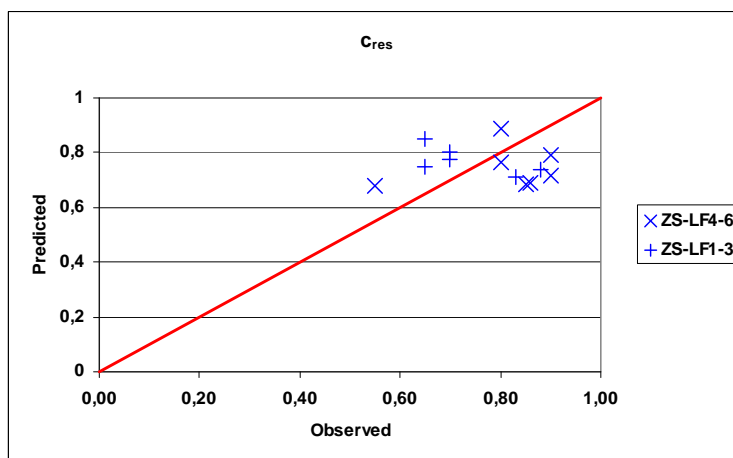


Abb. 19: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für c_{res}

Überschätzung b_{res}

Die teilweise systematische Überschätzung des Faktors b_{res} bei Verwendung von Formel (7-4) wird bewusst in Kauf genommen, da der Feinstoffanteil, und insbesondere der im Zuge der Mahlung neu gebildete sekundäre Feinstoff, bei Nutzung optischer Fasermessgeräte unterschätzt wird.

7.1.2 Faserlänge, -durchmesser und –wanddicke in den Fraktionen

Konstanz der Mittelwerte in den Fraktionen

Eine nähere Betrachtung der Faserfraktionen (siehe Anhang 1) zeigt, dass, bis auf die Langfaserfraktion und dort nur die mittlere Faserlänge, sich keiner der anderen Mittelwerte für Faserlänge, -durchmesser und –wandstärke innerhalb der Fraktionen signifikant im Zuge der Mahlung verändert. Deshalb können alle diese Mittelwerte als konstant während der Mahlung angenommen werden. Der Fehler, der sich aus dieser Annahme für die mittlere Faserlänge FL der Faserfraktion (d.h. Kurz- und Langfaserfraktion gemeinsam) ergibt, kann wegen

$$FL = \frac{\frac{KF}{FL_{KF}^{1,5}} FL_{KF} + \frac{LF}{FL_{LF}^{1,5}} FL_{LF}}{\frac{KF}{FL_{KF}^{1,5}} + \frac{LF}{FL_{LF}^{1,5}}} \tag{7-6}$$

als vernachlässigbar klein abgeleitet werden, wie ein Rechenbeispiel in Tab. 9 beweist:

Tab. 9: Einfluss der mittleren Faserlänge FL_{LF} der Langfaserfraktion LF auf die (numerische) mittlere Faserlänge FL der Faserfraktion

KF	FL_{KF}	LF	FL_{LF}	FL
%	μm	%	μm	μm
60	500	40	2000	615
60	500	40	1500	614

7.1.3 Faserflexibilität

Einfluss der Mahlung auf Faserflexibilität

Einschlägig bekannt ist die mahlungsbedingte Änderung der Faserflexibilität [8], die sich, insbesondere durch Reduktion des E-Moduls der Faserwand, wahrscheinlich ausgelöst durch Delaminierung einzelner Schichten, erhöht.

Wechselwirkung SRE - Fasersteifigkeit

Für die Änderung der (mittleren) Fasersteifigkeit in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlenergie wird folgende Funktion verwendet

$$\delta(SRE) = \delta(0) \cdot d_{res}^{SRE/100} \tag{7-7}$$

Singgemäß zu b_{res} und c_{res} kann auch d_{res} als Maß für den Widerstand der Fasern gegen Flexibilisierung betrachtet werden.

Ergebnisse der Regression

Tab. 10: Mittels Regression bestimmte Werte für d_{res}

Mahlreihe (Faserstoff)	S	LF	d_{res}
ZS-LF1	24	0,72	0,000
ZS-LF2	58	0,48	0,000
ZS-LF3	98	0,26	0,000
Mix-LF1/2	40	0,59	0,096
Mix-LF1/3	58	0,55	0,095
Mix-LF2/3	77	0,38	0,059
ZS-LF4	19	0,76	0,106
ZS-LF5	36	0,45	0,098
ZS-LF6	48	0,20	0,092
Mix-LF4/5a	22	0,69	0,117
Mix-LF4/5b	29	0,53	0,136
Mix-LF4/6a	35	0,38	0,039
Mix-LF4/6b	43	0,24	0,064

d_{res} als Funktion von S

Ebenfalls analog zu b_{res} und c_{res} ist auch d_{res} eine Funktion des Langfaser-Anteils (vor der Mahlung) und der spezifischen Kontaktenergie S und es wird ein ähnlicher Funktionsansatz verwendet:

$$d_{res} = \left(A_{\delta} \cdot e^{B_{\delta} \cdot S} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{LF}{C_{\delta} \cdot LF + D_{\delta}} \right) \tag{7-8}$$

Folgende beste Werte wurden mittels Regressionen ermittelt:

- $A_{\delta} = -0,12, B_{\delta} = 0,03, C_{\delta} = 12,0, D_{\delta} = 1,2$

Modellgüte d_{res}

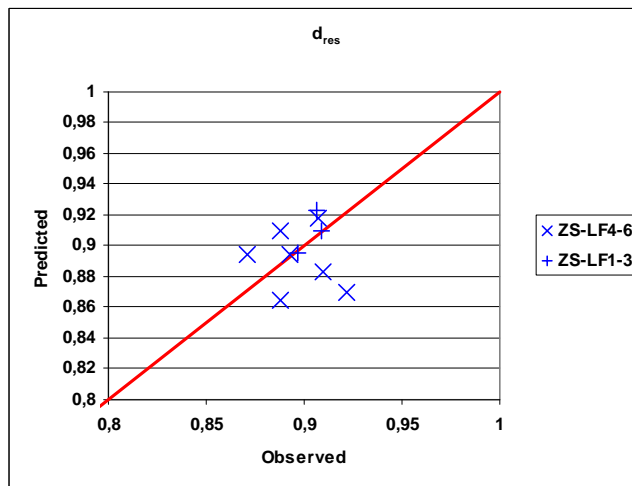


Abb. 20: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für d_{res}

7.1.4 WRV und Bindungsfestigkeit

WRV und Bindungsfestigkeit als Maß der inneren Fibrillierung

Das Wasserrückhaltevermögen wird gemein hin als Maß für die innere Fibrillierung betrachtet. Auch die Bindungsfestigkeit erhöht sich im Zuge der Mahlung vorzugsweise infolge innerer Fibrillierung, wie Ergebnisse von Mahlversuchen [9,10] zeigen. Die äußere Fibrillierung erweist sich für Festigkeitsentwicklungen als eher verzichtbar.

$$b(SRE) = b(0) + c_{IntFib} \cdot SRE \quad (7-9)$$

$$WRV(SRE) = WRV(0) + d_{IntFib} \cdot SRE / 100 \quad (7-10)$$

Ergebnisse der Regression

Tab. 11: Mittels Regression bestimmte Werte für c_{IntFib} und d_{IntFib}

Mahlreihe (Faserstoff)	S	LF	c_{IntFib}	d_{IntFib}
ZS-LF1	24	0,72		0,62
ZS-LF2	58	0,48		0,67
ZS-LF3	98	0,26		0,38
Mix-LF1/2	40	0,59	0,10	
Mix-LF1/3	58	0,55	0,10	
Mix-LF2/3	77	0,38	0,06	
ZS-LF4	19	0,76	0,11	0,78
ZS-LF5	36	0,45	0,10	0,72
ZS-LF6	48	0,20	0,09	0,65
Mix-LF4/5a	22	0,69	0,12	0,51
Mix-LF4/5b	29	0,53	0,14	0,69
Mix-LF4/6a	35	0,38	0,04	0,64
Mix-LF4/6b	43	0,24	0,06	0,51

c_{IntFib} und d_{IntFib} als Funktion von S

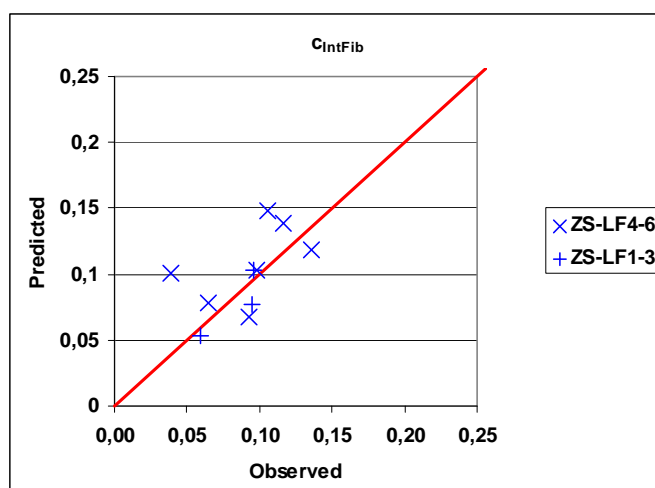
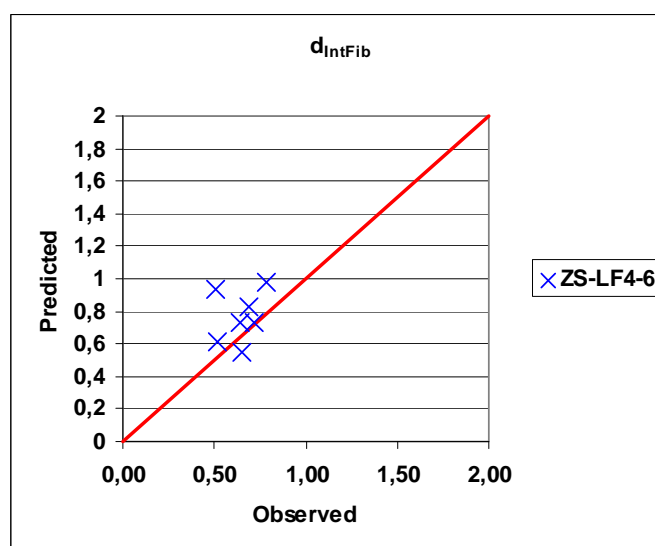
Es sind c_{IntFib} und d_{IntFib} eine Funktion des Langfaser-Anteils (vor der Mahlung) und der spezifischen Kontaktenergie S mit

$$c_{IntFib} = A_b \cdot e^{B_b \cdot S} \cdot \left(1 + \frac{LF}{C_b \cdot LF + D_b} \right) \quad (7-11)$$

$$d_{IntFib} = A_{WRV} \cdot e^{B_{WRV} \cdot S} \cdot \left(1 + \frac{LF}{C_{WRV} \cdot LF + D_{WRV}} \right) \quad (7-12)$$

Folgende beste Werte wurden mittels Regressionen ermittelt:

- $A_b = 0,05$, $B_b = -0,015$, $C_b = 0,26$, $D_b = 0,06$
- $A_{WRV} = 0,4$, $B_{WRV} = -0,015$, $C_{WRV} = 0,40$, $D_{WRV} = 0,03$

Modellgüte c_{int} Abb. 21: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für c_{IntFib} **Modellgüte d_{int}** Abb. 22: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für d_{IntFib} **7.1.5 Entwässerungswiderstand und spezifische Oberfläche****Bilanz der spezifischen Oberfläche**

Für die (hydrodynamisch wirksame) spezifische Oberfläche des Gesamtfaserstoffes gilt in guter Näherung

$$SSA = (FS + ASH_{575}) \cdot SSA_{FS} + (KF + LF) \cdot SSA_F \quad (7-13)$$

wobei $SSA_{FS} \sim 10 \text{ m}^2/\text{g}$ die mittlere spezifische Oberfläche der organischen und anorganischen Feinstoffe ist und SSA_F der Wert der spezifischen Oberfläche der Faserfraktion (d.h. Kurz- und Langfasern) ist.

Spezifische Oberfläche als Maß der äußeren Fibrillierung

Es wird angenommen, dass nur die spezifische Faseroberfläche der Kurz- und Langfasern sich im Zuge der Mahlung durch äußere Fibrillierung verändert, wobei die Gültigkeit von RITTINGER's Gesetz, d.h. die Proportionalität von spezifischer Energie zur neu gebildeten spezifischen Oberfläche angenommen wird.

$$SSA_{Fib}(SRE) = SSA_F(0) + c_{ExtFib} \cdot SRE \tag{7-14}$$

Der Faktor c_{ExtFib} ist also eine „Geschwindigkeit“ der äußeren Fibrillierung.

Ergebnisse der Regression

Tab. 12: Mittels Regression bestimmte Werte für d_{res}

Mahlreihe (Faserstoff)	S	LF	C_{ExtFib}
ZS-LF1	24	0,72	0,021
ZS-LF2	58	0,48	0,025
ZS-LF3	98	0,26	0,022
Mix-LF1/2	40	0,59	0,018
Mix-LF1/3	58	0,55	0,029
Mix-LF2/3	77	0,38	0,022
ZS-LF4	19	0,76	0,031
ZS-LF5	36	0,45	0,029
ZS-LF6	48	0,20	0,024
Mix-LF4/5a	22	0,69	0,031
Mix-LF4/5b	29	0,53	0,031
Mix-LF4/6a	35	0,38	0,032
Mix-LF4/6b	43	0,24	0,028

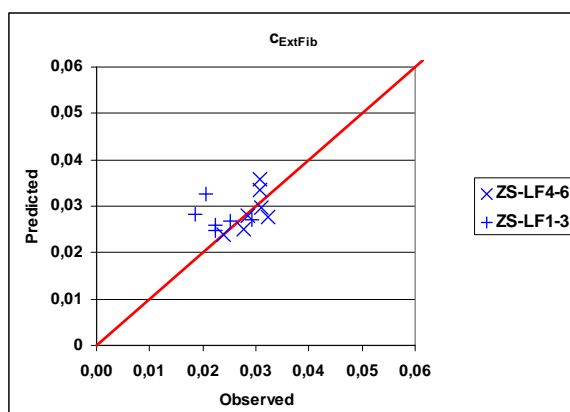
C_{ExtFib} als Funktion von S

Es sind C_{ExtFib} eine Funktion des Langfaser-Anteils (vor der Mahlung) und der spezifischen Kontaktenergie S mit

$$c_{ExtFib} = A_{SSA} \cdot (e^{B_{SSA} \cdot S} + E_{SSA}) \cdot \left(1 + \frac{LF}{C_{SSA} \cdot LF + D_{SSA}} \right) \tag{7-15}$$

In Abweichung von den anderen Modellen kann hier die Variabilität der abhängigen variablen C_{ExtFib} nur durch Hinzunahme eines fünften Koeffizienten E_{SSA} hinreichend erklärt werden. Folgende beste Werte wurden mittels Regressionen ermittelt:

- $A_{SSA} = 0,013, B_{SSA} = -0,1, C_{SSA} = 0,28, D_{SSA} = 0,02, E_{SSA} = 0,5$

Modellgüte c_{ExtFib} Abb. 23: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für c_{ExtFib}

„Glatte“ spezifische Oberfläche

Es ist zu berücksichtigen, dass neben der äußeren Fibrillierung auch die Faserdimensionen die spezifische Oberfläche beeinflussen. Für eine als Hohlzylinder angenommene Faser gilt für die äußere Oberfläche

$$A_{ext} = \pi \cdot (WI \cdot FL + 2CWT(WI - CWT)) \quad (7-16)$$

sowie für das Volumen der Faserwand

$$V_{CW} = \pi \cdot FL \cdot CWT \cdot (WI - CWT) \quad (7-17)$$

Somit folgt für deren „glatte“ spezifische Oberfläche

$$SSA_{glatt} = \frac{A_{ext}}{\rho_W \cdot V_{CW}} = \frac{(WI \cdot FL + 2CWT(WI - CWT))}{\rho_W \cdot FL \cdot CWT \cdot (WI - CWT)} \quad (7-18)$$

Für die Dichte des Zellwandmaterials ρ_W wird ein Wert von $1,5 \text{ g/cm}^3$ angenommen. Damit liegt der Wert der „glatte“ spezifische Oberfläche üblicher Fasern bei etwa $0,2 \text{ m}^2/\text{g}$, was etwa 5% des Wertes der hydrodynamisch wirksamen spezifischen Oberfläche üblicher Faserstoffe entspricht.

Zusammenhang SR-SSA

Zur Berechnung des Entwässerungswiderstandes SR nach SCHOPPER-RIEGLER wird folgende Umrechnungsvorschrift verwendet,

$$SSA = f_{SSA} \cdot LN\left(\frac{SR - 4}{100 - SR}\right) + g_{SSA} \text{ [m}^2/\text{g]} \quad (7-19)$$

bzw. umgekehrt

$$SR = 100 - \frac{96}{e^{\frac{SSA - g_{SSA}}{f_{SSA}}} + 1} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (7-20)$$

Mit $f_{SSA}=2 \text{ m}^2/\text{g}$ und $g_{SSA}=6 \text{ m}^2/\text{g}$.

7.1.6 Lichtstreuoeffizient

Lichtstreuoeffizient als Maß verfügbarer Faser-Luft-Grenzflächen

Der spezifische Lichtstreuoeffizient S nach KUBELKA und MUNK wird häufig als Maß der im Material verfügbaren Faser-Luft-Grenzflächen betrachtet. HASELTON [11] verwendete die mit der BET-Methode bestimmte spezifische Oberfläche eines Papiers und stellte eine gute Korrelation fest gemäß

$$S_Y = SSA_{BET} \cdot H_{BET} \quad (7-21)$$

wobei $H_{BET} \sim 22$. Identifiziert man SSA_{BET} mit der ungebundenen Oberfläche im vereinfachten Fasernetzwerk und bezieht sie auf das Gewicht erhält man

$$SSA_{BET} = \frac{A_T - A_B + A_G}{\rho_W \cdot (V_T - V_P)} \quad (7-22)$$

Der Korrekturterm A_G beschreibt durch die BET-Methode zusätzlich erfasste Grenzflächen, welche über die „glatte“ Oberfläche $A_T - A_B$ allein nicht berücksichtigt werden.

Ableitung Lichtstreuoeffizient aus Elementarzelleigenschaften

Mittels Regression kann gezeigt werden, dass A_G (in μm^2) über

$$A_G = 0,0467 \cdot (A_T - A_B)^{1,6505} \quad (7-23)$$

sehr gut abgeschätzt werden kann, womit schließlich

$$S_Y = \frac{A_T - A_B + 0,0467 \cdot (A_T - A_B)^{1,6505}}{\rho_W \cdot (V_T - V_P)} \cdot H \quad (7-24)$$

folgt.

7.2 Algorithmenentwicklung 2

Ziel

Schwerpunkt der zweiten Stufe der Algorithmenentwicklung bildet die Überprüfung der numerischen Mahlmodelle aus AP5 und insbesondere die Tragfähigkeit des aus dem C-Faktor-Kalkül von KEREKES abgeleiteten spezifischen Energieverbrauchs einzelner Faserfraktionen anhand beobachteter spezifischer Effekte der Getrennt- und Gemischtmahlung.

EXCEL-Simulationsmodell

Es wurde ein numerisches Simulationsmodell auf Basis verschiedener EXCEL-Berechnungsblöcke entwickelt (Abb. 24). Die Charakterisierung von Faser- und Ganzstoff erfolgte mittels eines Wertevektors entsprechend Tab. 4. Die Berechnung der Mahleffekte erfolgte auf Basis der in [12] sowie in Abschnitt 7.1 bereitgestellten Formeln. Die Mischung erfolgte entsprechend des in [12] abgeleiteten Formelapparates. Die Prognose der Laborblatteigenschaften von RK-Blättern erfolgte schließlich entsprechend Abschnitt 5.4.

Die Mahlungen 1, 2 und 3 erfolgen jeweils unter analogen Bedingungen, wobei durch Zuschaltung von Mahlung 1 und 2 sowie Abschaltung von Mahlung 3 eine Getrenntmahlung bzw. durch Abschaltung der Mahlungen 1 und 2 und Zuschaltung der Mahlung 3 eine Gemischtmahlung simuliert wird.

Prozessschema

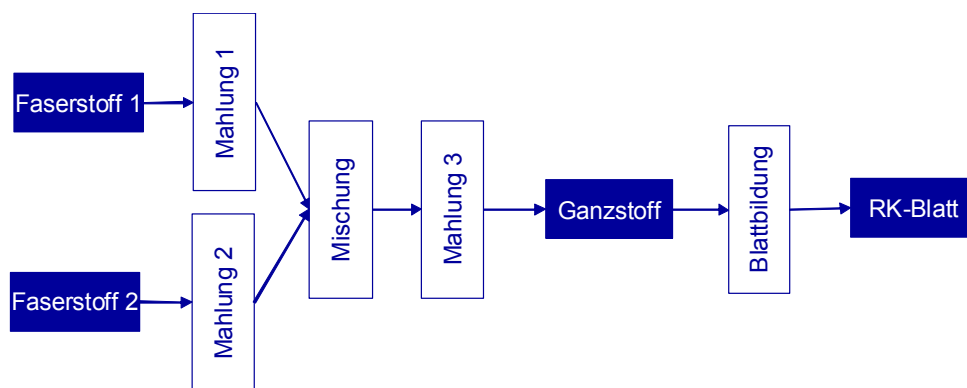


Abb. 24: Prozessschema zur Simulation von Getrennt- und Gemischtmahlung

Ein Vergleich der simulierten zu den beobachteten Mahlergebnissen soll durch Vergleich der relativen Änderungen bei Übergang von Getrennt- zu Gemischtmahlungen bei der spezifischen Mahlernergie $SRE=100\text{kWh/t}$ erfolgen (Abb. 25 bis Abb. 28). Die einzelnen Simulationsergebnisse sind Anhang 8 zu entnehmen.

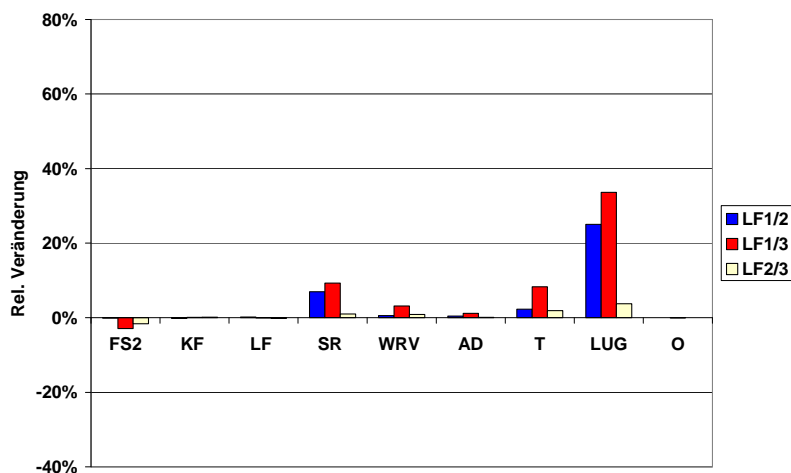


Abb. 25: Änderung simulierter Ganzstoff- und Papiereigenschaften bei Übergang Getrennt- zu Gemischtmahlung (AP2)

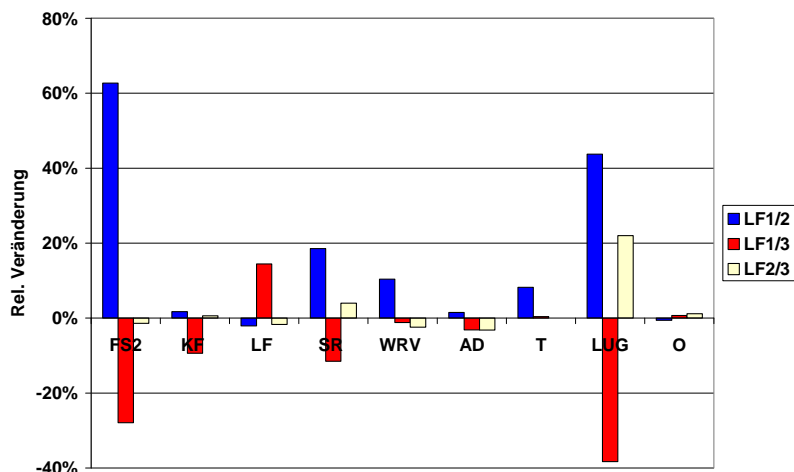


Abb. 26: Änderung beobachteter Ganzstoff- und Papiereigenschaften bei Übergang Getrennt- zu Gemischtmahlung (AP2)

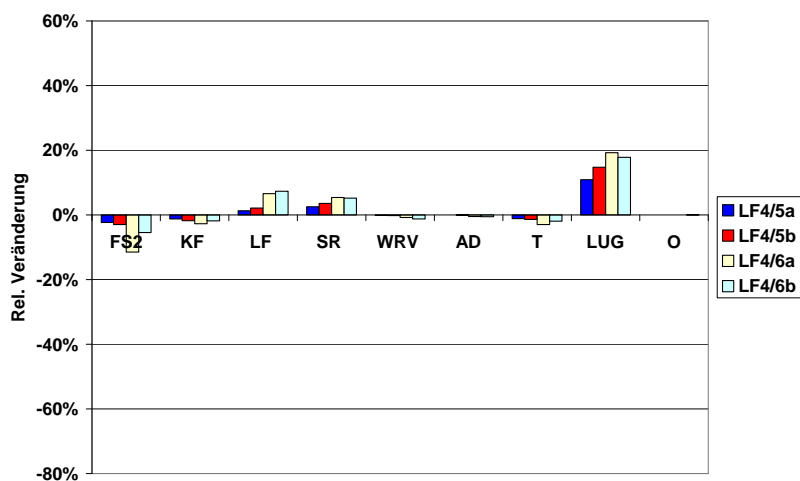


Abb. 27: Änderung simulierter Ganzstoff- und Papiereigenschaften bei Übergang Getrennt- zu Gemischtmahlung (AP5)

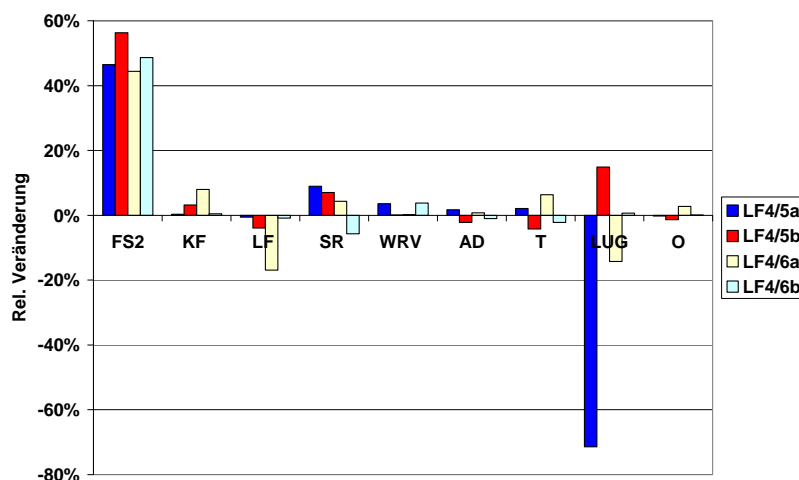


Abb. 28: Änderung beobachteter Ganzstoff- und Papiereigenschaften bei Übergang Getrennt- zu Gemischtmahlung (AP5)

Schlußfolgerung

Folgende Schlussfolgerungen können durch Vergleich von Abb. 25 mit Abb. 26 bzw. von Abb. 27 mit Abb. 28 gezogen werden:

1. Signifikante Unterschiede zwischen Getrennt- und Gemischtmahlung werden im Rahmen der Simulationen nur für den Entwässerungswiderstand *SR* und die Luftdurchlässigkeit (GURLEY) *LUG* prognostiziert. Genau dieses Verhalten wird durch die Versuche bestätigt, d.h. die Art und Weise der Veränderung der Oberflächenfeinstruktur der Fasern ist besonders empfindlich gegenüber der Auswahl der Mahlstrategie.
2. Für mechanische und optische Eigenschaften (scheinbare Dichte *AP*, Tensile-Index *T*, Opazität *O*) sowie für das Wasserrückhaltevermögen ist in Übereinstimmung von Simulation und Experiment keine signifikante Veränderung bei Wechsel zwischen Getrennt- und Gemischtmahlung zu erwarten.
3. Feinstoffe, die in ihrer Größe unterhalb von 10µm, d.h. unter der Auflösung optischer Fasermessgeräte liegen, können bis zu 50% des tatsächlichen Feinstoffanteils ausmachen [13,14]. Eine messtechnische Quantifizierung der Veränderung des Feinstoffanteils bei Wechsel zwischen Getrennt- und Gemischtmahlung ist per se unsicher. Entsprechend erklären sich die erheblichen Abweichungen für den sekundären Feinstoff *FS₂* zwischen Simulation und Beobachtung.
4. Die Simulationsmodelle können sowohl in ihrem Trendverhalten als auch in ihren absoluten Prognosen (siehe Anhang 8) als valide eingestuft werden. Genauigkeitsverbesserungen sind erst nach Verfügbarkeit genauerer Messmethoden (z.B. zur Feinstoffquantifizierung und zur Erfassung der Fasermikrostruktur) zu erwarten. Die Genauigkeit der Modelle ist aber ausreichend, um im Rahmen von Optimierungsaufgaben zu validen Empfehlungen der Gestaltung des Mahlprozesses zu gelangen.

7.3 Optimierungstool

Ziel	Das in Abschnitt 7.2 verwendete Simulationsmodell (Abb. 24) wurde ausgebaut, um anhand einer anwendungsnahen Aufgabenstellung seine Tauglichkeit als Optimierungstool zu überprüfen.
Ausgangssituation	<p>Für die Nachbildung der Stoffaufbereitung für eine definierte Papiersorte wurden die 3 Zellstoffe ZS-KF2, ZS-KF3 und ZS-LF4 im Verhältnis 6:3:1 (Mix-KF-LFa) eingesetzt und gemischt gemahlen, wobei die Kurzfasergarnitur PTS-KF1 (siehe Eine besondere technologische Herausforderung der Mahlversuche bestand darin, für alle Getrenntmahlungen wie auch für die Gemischtmahlung exakt dieselben Mahlbedingungen (gleiche mahlgarnitur, gleiche spezifische Kantenlast SEL) einzuhalten, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten.</p> <p>Tab. 7) bei einer Kantenlast $SEL=1Ws/m$ zum Einsatz kommt.</p>
Produktspezifikation	Aus dem gemahlenden Faserstoff Mix-KF-LFa wurden Laborblätter mit einem Flächengewicht von 80 g/m^2 gebildet. Die Eigenschaften Tensile-Index T_0 und die Luftdurchlässigkeit LUG_0 des Laborblattes bei einer spezifischen Mahlernergie $SRE=100kWh/t$ definieren die Produktspezifikation eines fiktiven Produktes, d.h. für den Tensile-Index bzw. für die Luftdurchlässigkeit wird gefordert $T \geq T_0$ bzw. $LUG \leq LUG_0$.
Aufgabenstellung	<p>Mittels einer Simulation sowie unter Verwendung des EXCEL-Solvers ist zu überprüfen:</p> <ol style="list-style-type: none">I. Welche Vorteile bietet eine Getrenntmahlung des Langfaserzellstoffes ZS-LF4 mit der Mahlgarnitur PTS-LF und bei einer spezifischen Kantenlast $SEL=1,5Ws/m$ gegenüber der Ausgangssituation, wenn Lang- und Kurzfasierzellstoffe mit identischen Mahlergien gemahlen werden.II. Wie können Mahlernergie und Mischungsverhältnis zweckmäßig optimiert werden, um kostengünstiger (bez. Rohstoffeinsatz und Mahlernergie) die Produktspezifikation zu erreichen, sofern eine Toleranz von 1,5% akzeptiert wird und der Anteil des Langfaserzellstoffes ZS-LF4 konstant bei 10% gehalten wird.

Ausbau des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell (Abb. 24) wurde ausgebaut, um den simultanen Einsatz von 3 Faserstoffen und deren Behandlung in 2 Mahlstraßen zu simulieren. Zu diesem Zweck wurde in die zweite Mahlstraße ein weiterer Mischungsblock eingebaut, der den simultanen Einsatz von 2 Faserstoffen in dieser Mahlstraße nachbildet.

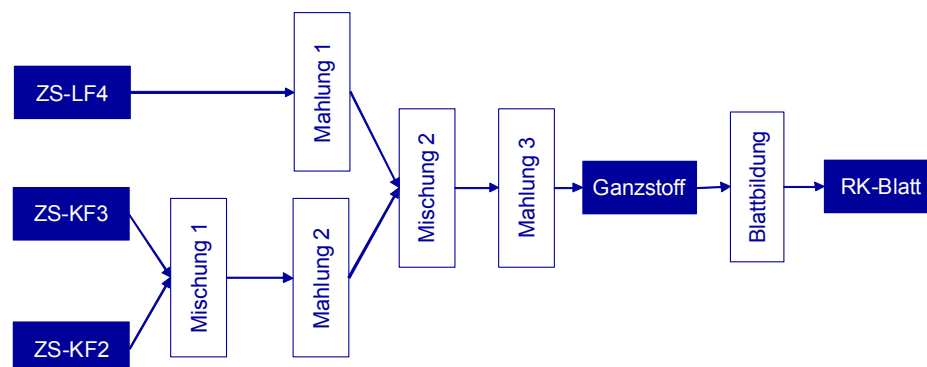


Abb. 29: Prozessschema zur Simulation von Getrennt- und Gemischtmahlung bei simultanem Einsatz von 3 verschiedenen Zellstoffen

Lösung Aufgabe I.

Zur Lösung von Aufgabe I. wurde unter Verwendung des Simulationsmodells (Abb. 29)

- für die Ausgangssituation die Gemischtmahlung simuliert, indem die Mahlungen 1 und 2 ausgeschaltet und die Mahlung 3 (Garnitur PTS-KF1, $SEL=1$ Ws/m) zugeschaltet wurde und
- für die zugehörige Getrenntmahlung die Mahlung 3 ausgeschaltet und die Mahlungen 1 (Garnitur PTS-KF1, $SEL=1$ Ws/m) und 2 (Garnitur PTS-LF, $SEL=1,5$ Ws/m) zugeschaltet.

Die spezifischen Mahlenergien in der Simulation wurden zwischen 0 und 100 kWh/t variiert, wobei die Mahlenergie in jedem Mahlstrang identisch eingestellt wurde (Abb. 30).

Neben der Gemischtmahlung von Mix-KF-LFa wurde am Laborrefiner eine Getrenntmahlung gemäß Aufgabenstellung I. durchgeführt. Nach der Mischung der Faserstoffe erfolgten Laborblattbildungen an einem RK-Blattbildner (Abb. 31).

**Simulation Ge-
trenntmahlung
vs. Gemischt-
mahlung**

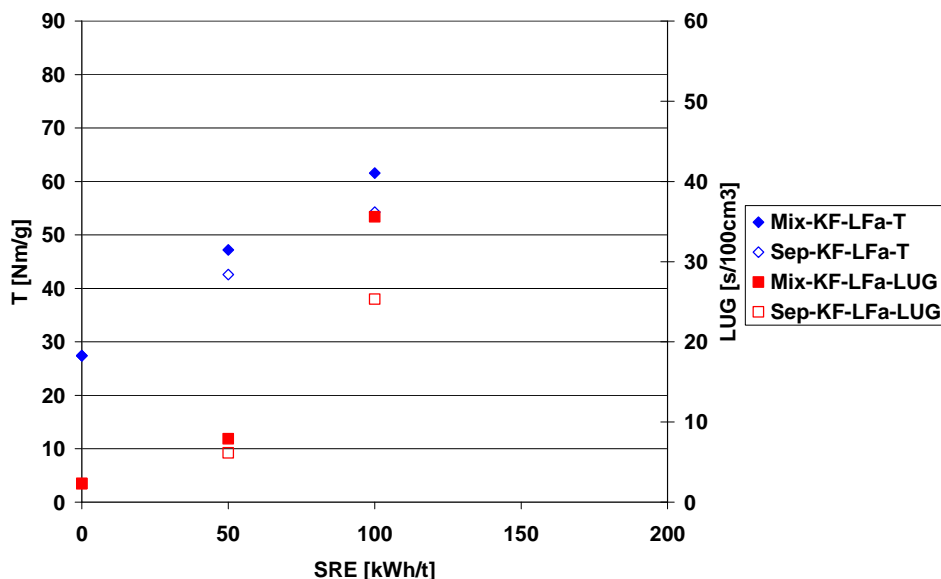


Abb. 30: Simulation von Tensile-Index und Luftdurchlässigkeit bei Getrenntmahlung und Gemischtmahlung der Rezeptur Mix-KF-LFa

**Getrenntmahlung
vs. Gemischt-
mahlung (beobachtet)**

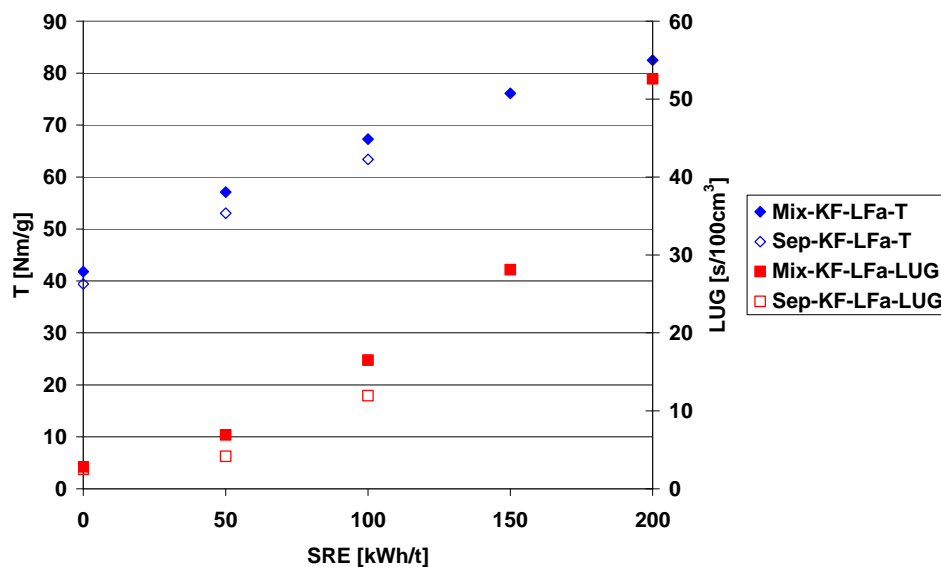


Abb. 31: Gemessene Papiereigenschaften (Tensile-Index und Luftdurchlässigkeit) an Laborblättern nach Getrennt- und Gemischtmahlung der Rezeptur Mix-KF-LFa

Lösung Aufgabe II. Für die angenommene Ist-Situation der Gemischtmahlung des Ganzstoffes Mix-KF-LFa werden bei einer spezifischen Mahlernergie $SRE=100\text{kWh/t}$ folgende Werte für Laborblätter prognostiziert (siehe Abb. 30):

- Tensile-Index: $T_0=61,6\text{ Nm/g}$
- Luftdurchlässigkeit (GURLEY): $LUG_0=36\text{ s/100cm}^3$

Bei einer Toleranz von 1,5% sind folgende Papiereigenschaften noch zulässig:

- Tensile-Index: $T_1=60,5\text{ Nm/g}$
- Luftdurchlässigkeit (GURLEY): $LUG_1=36,5\text{ s/100cm}^3$

Kostenfunktion Im Simulationsmodell werden spezifische Kosten je Papierfläche auf Basis folgender Kostenfaktoren berechnet:

- Menge der eingesetzten Faserrohstoffe: w_{ZS-KF2} , w_{ZS-KF3} und w_{ZS-LF4}
- Spezifische Mahlernergie der Mahlungen 1 bis 3: SRE_i
- Leerlaufleistung der Mahlungen 1 bis 3: $P_{NL,i}$

$$Cost_{spez} = \sum w_i \cdot Cost_{ZS,i} + \sum w_i \cdot SRE_i \cdot Cost_{Ref} + \sum w_i \cdot \frac{P_{NL,i}}{P_{eff,i}} \cdot SRE_i \cdot Cost_{Ref} \quad (7-25)$$

Die für die Simulation angenommenen Preise sind Tab. 13 zu entnehmen. Entsprechend (7-25) ergeben sich die

- spezifischen Kosten für die Ist-Situation: $Cost_{spez,Ist}=4,37\text{ ct/m}^2$

Preise

Tab. 13: Für die Simulation verwendete Rohstoff- und Energiepreise [15,16]

Kostenart	$Cost_{ZS,KF2}$ [€/t]	$Cost_{ZS,KF3}$ [€/t]	$Cost_{ZS,LF}$ [€/t]	$Cost_{Ref}$ [ct/kWh]
Preis	530	503	600	8

Optimierung

Unter Nutzung des EXCEL-Solvers wird folgendes (Kosten-)Optimum berechnet, bei dem die Toleranzwerte T_1 und LUG_1 exakt eingehalten werden:

- $w_{ZS-KF2}=18\text{ g/m}^2$
- $w_{ZS-KF3}=54\text{ g/m}^2$
- $w_{ZS-LF4}=8\text{ g/m}^2$
- $SRE=101,7\text{ kWh/t}$
- spezifische Kosten: $Cost_{spez,Opt}=4,29\text{ ct/m}^2$

d.h. durch die berechnete teilweise Substitution von ZS-KF2 durch ZS-KF-3 kann eine Kostenersparnis von $0,08\text{ ct/m}^2$ d.h. um ca. 2% erzielt werden. Die mittels obiger Optimierung bestimmte Rezeptur wird im Weiteren mit Mix-KF-LFc bezeichnet.

Validierung

Mit der Faserstoffrezeptur Mix-KF-LFc erfolgte analog zur Rezeptur Mix-KF-LFa in Teilaufgabe I. eine Gemischtmahlung am Laborrefiner. Aus den zu den Mahlenergien $SRE=0, 50, 100, 150$ und 200 kWh/t erhaltenen Ganzstoffen wurden Laborblätter gebildet und geprüft.

Simulation der Gemischtmahlungen mit den Rezepturen Mix-LF-KFa und Mix-LF-KFc

Abb. 32 enthält ein Schaubild der simulierten Mahlkurven für Mix-LF-KFa und Mix-LF-KFc in einem Tensile-Luftdurchlässigkeits-Diagramm..

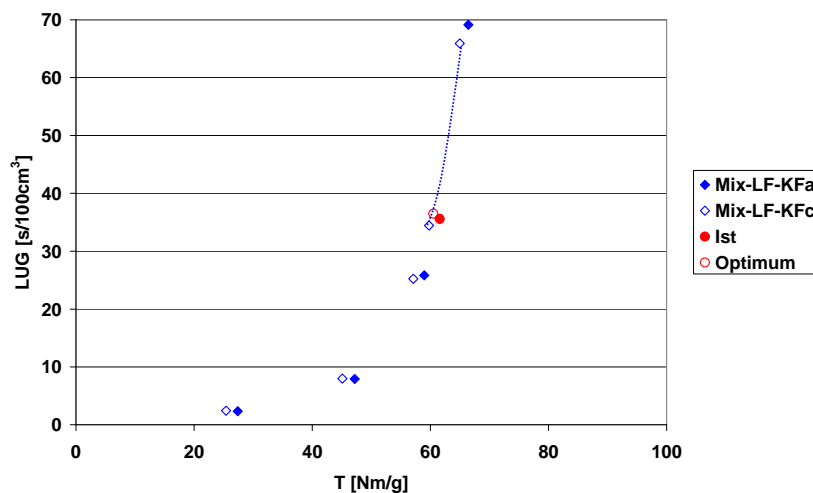


Abb. 32: Tensile-Luftdurchlässigkeits-Diagramm der prognostizierten Mahlkurven Mix-KF-LFa und Mix-KF-LFc. Das prognostizierte Optimum auf der Mahlcurve für Mix-KF-LFc liegt zwischen $SRE=100$ und 120 kWh/t (punktierter Kurve).

Gemessene Eigenschaften der Laborblätter nach der Gemischtmahlungen mit den Rezepturen Mix-LF-KFa und Mix-LF-KFc

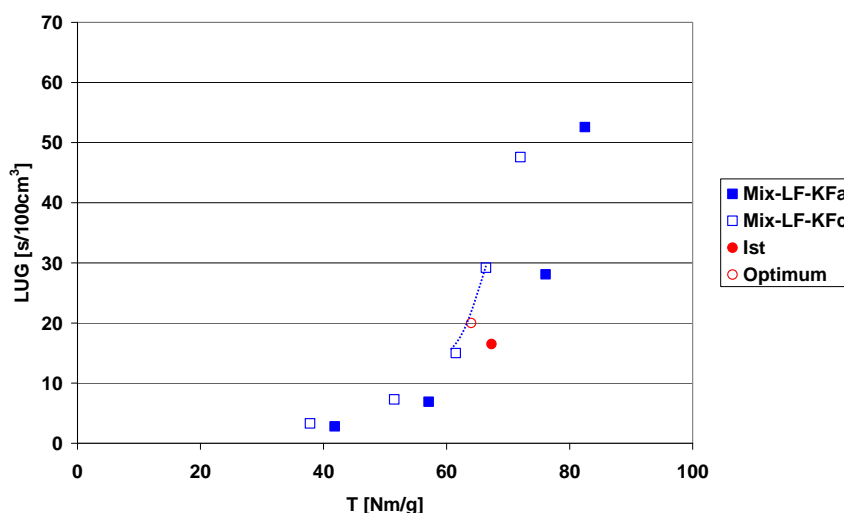


Abb. 33: Tensile-Luftdurchlässigkeits-Diagramm der gemessenen Papiereigenschaften nach den Gemischtmahlungen der Rezepturen Mix-KF-LFa und Mix-KF-LFc. Das tatsächliche Optimum auf der Mahlkurve für Mix-KF-LFc liegt zwischen $SRE=100$ und 150 kWh/t (punktierte Kurve)

Ergebnis Teilaufgabe I.

Auf Basis der Prognose (Abb. 30) ist der Schluss zu ziehen, dass eine Getrenntmahlung der Langfaserzellstoffes ZS-LF-4 keine Vorteile bringt, da bei gleichem Energieeinsatz der Tensile-Index um etwa 10% schlechter sind als bei einer Gemischtmahlung. Genau dieses Verhalten wurde auch im Rahmen einer experimentellen Getrenntmahlung (Abb. 31) nachgewiesen.

Ergebnis Teilaufgabe II.

Sowohl hinsichtlich zu wählender optimaler Rezeptur als auch der einzustellenden spezifischen Mahlenergien lieferten Simulation (Abb. 32) und Experiment (Abb. 33) korrespondierende Aussagen, d.h.

- durch eine Erhöhung des Anteil des preiswerteren Zellstoffes ZS-KF3 von 30 auf 70% und
- durch eine moderate Erhöhung der spezifischen Mahlenergie der Gemischtmahlung

kann eine Kostenreduzierung bei tolerierbarer Veränderung der Zieleigenschaften erreicht werden.

Schlussfolgerung

Für beide Teilaufgaben lieferten Simulation und Experiment im Rahmen der erreichbaren Messgenauigkeit übereinstimmende Ergebnisse. Das verwendete Simulationsmodell wurde nicht auf den Ist-Zustand kalibriert wodurch geringfügige wertmäßige Differenzen zwischen Prognose und Messung zu verzeichnen sind. Trotzdem sind sehr gute Übereinstimmungen bezüglich prognostizierter und tatsächlich beobachteter relativer Werteveränderungen festzustellen. Die verwendeten Simulationsmodelle sind somit als robust und physikalisch fundiert einzuordnen.

7.4 Algorithmenvalidierung

Ziel Für zwei Papierfabriken (nachfolgend A und B genannt) wurde der dortige Mahlprozess mittels der verfügbaren Simulationsmodelle nachgebildet. Ausgehend vom Ist-Zustand werden Vorschläge für eine Veränderung der Mahlstrategie mit dem Ziel abgeleitet, definierte Produkteigenschaften mit geringeren Kosten (Rohstoff, Energie) sicherzustellen. Im Unterschied zu AP8 erfolgen die Untersuchungen an Mahlanlagen, die sich in Ihrer Auslegung deutlich vom Versuchs-Refiner der PTS unterscheiden.

Modellannahme 1

Papiereigenschaften der Produktspezifikation sind nachfolgend grundsätzlich nur Eigenschaften eines Laborblattes, das aus dem gemahlten Ganzstoff gebildet wird. Weitere spezifische Prozesse der Stoffaufbereitung sowie spezifische Effekte der Papiermaschine (z.B. Anisotropie) sind nicht Gegenstand der Optimierung und werden als konstant betrachtet.

Modellannahme 2

Als Prozessmodell für beide betrachteten Papierfabriken (Abb. 34) kann im Wesentlichen die bereits in AP8 unterstellte Struktur (Abb. 29) verwendet werden, wobei der Ist-Zustand sich dadurch auszeichnet, dass zunächst keine Mahlungen 1 und 2 vorhanden sind. Mahlung 3 zerfällt in beiden Papierfabriken in mehrere Mahlstufen mit teilweise vorhandenen Stoffrückführungen. Im Simulationsmodell werden diese Mahlstufen zu einer einzigen energetisch äquivalenten Mahlung zusammengefasst. Die sich daraus ergebenden Parameter der Mahlgarnituren bzw. Mahlaggregate sind Tab. 14 zu entnehmen. Tab. 14 enthält darüber hinaus Garniturdaten einer üblichen Low-Intensity-Garnitur, wie sie zur Mahlung von Kurzfaserstoffen verwendet wird.

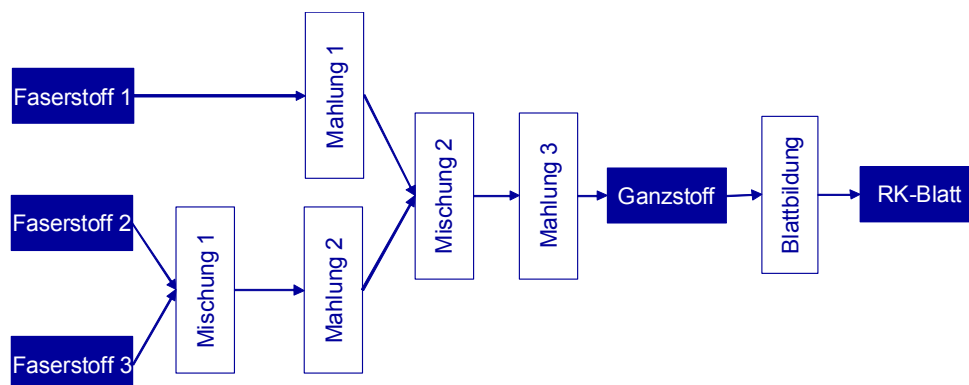


Abb. 34: Allgemeines Prozessschema der Mahlung für die Papierfabriken A und B

Kennwerte der verwendeten Mahlgarnituren

Tab. 14: Kennwerte der verwendeten Mahlgarnituren

	Einheit	A	B	LI
G	[mm]	6,4	5	3
D	[mm]	4	3,9	5
W	[mm]	3	4	2
L_M	[mm]	150	250	200
$n_R = n_S$		100	150	500
R_1	[mm]	120	204	120
R_2	[mm]	240	290	270
θ	[°]	90	30	55
φ_r	[°]	40	18	30
ω	[1/min]	1200	990	1200
P_{eff}	[kW]	40,00	14,00	14,00
SEL	Ws/m	1,8	1,0	0,5

Eingesetzte Faserstoffe

Betrieb A setzt zwei Langfaserzellstoffe, ZS-LF7 (65%) und ZS-LF8 (17%) sowie den BCTMP HS-KF3 (18%) ein, die bis zu einem hohen SR-Wert gemischt gemahlen werden. Papierfabrik B verwendet den Langfaserzellstoff ZS-LF8 (80%) und den Kurzfaserszellstoff ZS-KF3 (20%), die nur gering angemahlen werden. Holzarten und Aufbereitung der Faserstoffe enthält Tab. 15. Die Ergebnisse der Prüfung der ungemahlenen Faserstoffe ist Anhang 9 zu entnehmen.

Tab. 15: Eingesetzte Faserstoffe

Code	Herkunft	Aufschluss	Mill	Faserstoff
HS-KF3	Aspe/NE	BCTMP	A	1
ZS-LF7	Nadelholz/NE	Sulfat, TCF gebleicht		2
ZS-LF8	Nadelholz/NE	Sulfit, ECF gebleicht		3
ZS-LF9	Nadelholz/NE	Sulfat, ECF gebleicht	B	1
ZS-KF3	Eukalyptus/SA	Sulfat		2

Überprüfung des Simulationsmodells

Zur Überprüfung des Simulationsmodells lagen für beide Papierfabriken aus Probenahmen vor und nach den jeweiligen Mahlstufen Suspensions- und Papiereigenschaften zugehöriger Laborblätter vor, die als Werte entlang einer Mahlreihe (bei Summation der jeweiligen Energieeinträge in den Stufen) interpretiert werden können und mit den Werten des Simulationsmodells des Ist-Zustandes für entsprechende Energieeinträge abgeglichen werden können (Abb. 35 und Abb. 36).

Validierung Papierfabrik A

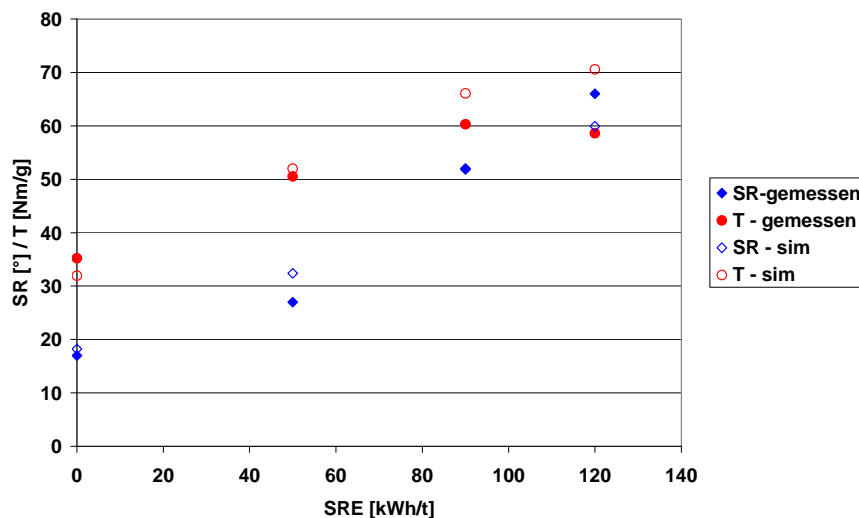


Abb. 35: Vergleich gemessener und simulierter Werte für SR-Wert und Tensile-Index für die Papierfabrik A

Validierung Papierfabrik B

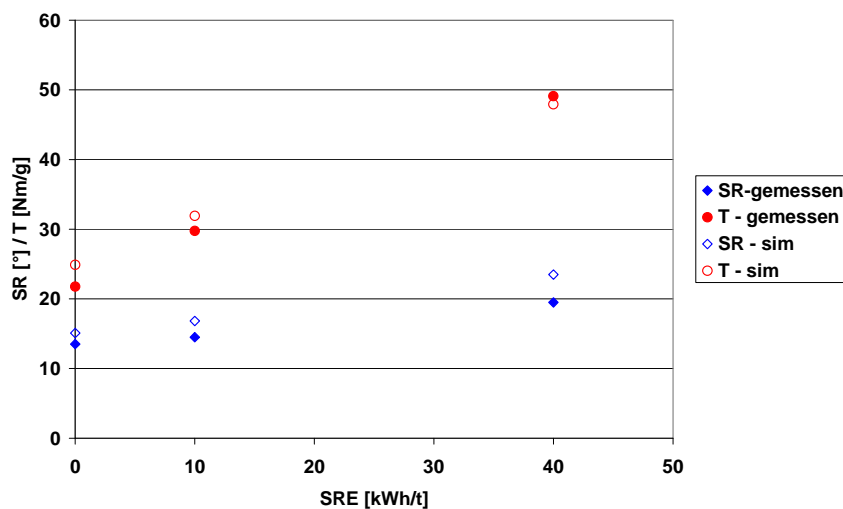


Abb. 36: Vergleich gemessener und simulierter Werte für SR-Wert und Tensile-Index für die Papierfabrik B

Wertung der Modellvalidierung

Ein Vergleich von Messung und Simulation liefert für beide Papierfabriken gute Übereinstimmungen (Abb. 35 und Abb. 36 sowie Anhang 10 und 11). Beobachtete Abweichungen können toleriert werden, da diese in den üblichen Schwankungsbereichen industrieller Probenahmen liegen [17]. Die verwendeten Simulationsmodelle für den Ist-Zustand der Mahlanlagen können als Basis verwendet werden.

Zielstellung der Optimierung für Papierfabrik A

Papierfabrik A produziert eine Papiersorte mit einem Flächengewicht von 50g/m^2 , für die eine hohe Dichte und Festigkeit gefordert wird. Durch eine Optimierung der Mahlung sind die spezifischen Kosten zu reduzieren, wobei scheinbare Dichte AD und Tensile-Index T konstant zu halten sind.

Optimierung des Faserstoffeinsatzes in Papierfabrik A

Tab. 16: Rohstoffeinsatz vor und nach der Optimierung (Papierfabrik A)

Faserstoff	Ist (g/m^2)	Optimum (g/m^2)
1	9,00	13,75
2	32,50	23,75
3	8,50	12,50
Summe	50,00	50,00

Optimierung der Mahlung in Papierfabrik A

Tab. 17: Fahrweise der Mahlung vor und nach der Optimierung (Papierfabrik A)

Mahlung	Parameter	Einheit	Ist	Optimum
1	Garnitur	-	-	LI
	SEL	Ws/m	-	0,50
	SRE	kWh/t	-	40,00
2	Garnitur	-	-	A
	SEL	Ws/m	-	1,80
	SRE	kWh/t	-	130,00
3	Garnitur	-	A	A
	SEL	Ws/m	1,80	1,80
	SRE	kWh/t	120,00	20,00

Ergebnisse der Optimierung in Papierfabrik A

Tab. 18: Papiereigenschaften und spezifische Kosten vor und nach der Optimierung (Papierfabrik A)

Eigenschaft	Einheit	Ist	Optimum
SR	°	59,92	63,56
AD	g/cm^3	0,70	0,72
T	Nm/g	70,57	70,45
$Cost_{spez}$	ct/m^2	2,96	2,87

Wertung der Optimierungsergebnisse in Papierfabrik A

Durch eine Getrenntmahlung der Lang- und Kurzfaserstoffe kann das Potenzial der Rohstoffe besser genutzt werden. Durch Energieeinsparung und verstärkten Einsatz des preiswerteren Rohstoffe HS-KF3 ist eine Kostenreduktion bei den spezifischen Kosten um 3% (0,09 ct/m²) möglich. Scheinbare Dichte und Tensile-Index bleiben durch die Optimierung nahezu unverändert. Der Entwässerungswiderstand erhöht sich geringfügig.

Zielstellung der Optimierung für Papierfabrik B

Papierfabrik B produziert eine Papiersorte mit einem Flächengewicht von 30g/m², für die eine hohe Festigkeit bei niedriger Luftdurchlässigkeit gefordert wird. Durch eine Optimierung der Mahlung sind die spezifischen Kosten zu reduzieren, wobei die Luftdurchlässigkeit (GURLEY) *LUG* und der Tensile-Index *T* konstant zu halten sind.

Optimierung des Faserstoffeinsatzes in Papierfabrik B

Tab. 19: Rohstoffeinsatz vor und nach der Optimierung (Papierfabrik B)

Faserstoff	Ist (g/m ²)	Optimum (g/m ²)
1	6	10
2	24	20
Summe	30	30

Optimierung der Mahlung in Papierfabrik B

Tab. 20: Fahrweise der Mahlung vor und nach der Optimierung (Papierfabrik B)

Mahlung	Parameter	Einheit	Ist	Optimum
1	Garnitur	-	-	LI
	SEL	Ws/m	-	1,00
	SRE	kWh/t	-	10,00
2	Garnitur	-	-	B
	SEL	Ws/m	-	1,80
	SRE	kWh/t	-	60,24
3	Garnitur	-	B	-
	SEL	Ws/m	1,00	-
	SRE	kWh/t	40,00	-

Ergebnisse der Optimierung in Papierfabrik B

Tab. 21: Papiereigenschaften und spezifische Kosten vor und nach der Optimierung (Papierfabrik B)

Eigenschaft	Einheit	Ist	Optimum
<i>SR</i>	°	23,48	22,85
<i>T</i>	g/cm ³	47,93	47,72
<i>LUG</i> ¹	Nm/g	7,6	7,3
<i>Cost_{spez}</i>	ct/m ²	1,78	1,74

¹ bei einem Flächengewicht von 80g/m²
Wertung der Optimierungsergebnisse in Papierfabrik B

Auch in der Papierfabrik B kann durch eine Getrenntmahlung sowie veränderten Rohstoffeinsatz eine Kosteneinsparung bei den variablen spezifischen Kosten um etwa 2% (0,02 ct/m²) erreicht werden. Der Entwässerungswiderstand wird sogar leicht reduziert, was die Runnability der Papiermaschine verbessert.

8 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Ergebnisse

Gesamtergebnis	Im Ergebnis des Projektes steht eine ausgebaute Modellbibliothek zur Verfügung, mit deren Hilfe unterschiedlichste Strategien der Mahlung simuliert werden können. Durch Integration in entsprechende Kalkulationsanwendungen (exemplarisch für Microsoft EXCEL vorgeführt) und Nutzung der dort vorhandenen Solver können Mahlprozesse in Unternehmen softwaregestützt mit einem Minimum an kleintechnischem Aufwand optimiert werden.
Gemischtmahlung vs. Getrenntmahlung	Es wurde im Rahmen der experimentellen Forschungsarbeiten erstmalig und systematisch nachgewiesen, dass die Unterschiede einer Gemischtmahlung und einer Getrenntmahlung (<u>bei identischen Mahlbedingungen und analogen Mischungsverhältnissen nach der Mahlung</u>) in Bezug auf die meisten Suspensions- und Papiereigenschaften gering sind. Deutliche Abweichungen sind nur für die Luftdurchlässigkeit nachgewiesen worden.
Einfluss der Faserlängenverteilung	Ausgehend von dem Kalkulus von KEREKES zur Abschätzung der Mahlintensität konnte abgeleitet werden, dass die auf die Behandlung der einzelnen Faserfraktionen entfallenden Anteile der Mahlergie außer vom Masseanteil der Fraktion auch von deren mittlerer Faserlänge abhängig ist. Dies hebt erneut die Bedeutung der präzisen Erfassung der Verteilung der Faserlängen in einem Faserstoff für eine Simulation von Mahleffekten und damit die verlässliche Prognose von Produkteigenschaften hervor. Prozesse der Stoffaufbereitung, die die Faserlängenverteilung verändern (z.B. Fraktionierstufen) zwingen in nachfolgenden Prozessschritten der Mahlung zu differenzierte Mahlstrategien, wenn man die zusätzlich verfügbaren Freiheitsgrade optimal ausnutzen will.
Multiskalenproblem	Anhand einer breiten Variabilität von geometrischen und physikalischen Eigenschaften gemahlener Faserstoffe wurde die Robustheit der verwendeten Verfahren zur Prognose von Papiereigenschaften nachgewiesen. Neben der zweckmäßigen Übertragung der Gleichung von PAGE auf den Tensile-Index wurde für weitere Papiereigenschaften (Scheinbare Dichte, Luftdurchlässigkeit, Tear-Index, Lichtstreuoeffizient) in physikalischer oder semi-physikalischer Weise das Multiskalenproblem der Verbindung mikroskopischer Fasermerkmale mit makroskopischen Papiereigenschaften befriedigend für den Nachweis spezifischer Effekte der Getrennt- und Gemischtmahlung gelöst. Die Weiterentwicklung und Verfeinerung der Modelle hinsichtlich der Einbeziehung von Eigenschaften der Einzelfasern und Wechselwirkungen mit Prozesseinflüssen (z.B. Wet-End) ist Gegenstand weiterer Forschungsaktivitäten an der PTS.
Einspareffekte	Anhand ausgewählter Praxisbeispiele (AP8) wurde nachgewiesen, dass unter Nutzung des Simulationstools und der dort integrierten neuen Erkenntnisse zur Wirkungsweise der Mahlung eine Kostenreduktion von 3% alleine durch Optimierung der Mahlstrategie möglich ist, indem kostenintensive Faserstoffe substituiert und Mahlergie reduziert wird.

**Investitionssi-
cherheit**

Im Zuge der Planung der Mahlstrategie können die verfügbaren Simulationswerkzeuge den Unternehmen der Papierindustrie helfen, Fehlinvestitionen zu vermeiden. Die Abwägung von Vor- und Nachteilen von Getrennt- und Gemischtmahlung ist a priori nicht möglich sondern erfordert eine ganzheitliche Sichtweise unter Berücksichtigung aktueller Preisstrukturen für Rohstoffe und Energie sowie der beabsichtigten Produktqualität. Umstellung und Neuerrichtung von Mahlstraßen stellen für Unternehmen erhebliche technische und finanzielle Risiken dar. Die verfügbaren Simulationstools können diese Risiken erheblich reduzieren. Exemplarisch wurde in AP7 der Nachweis geführt, dass bereits per Simulation der Vorteil einer Mahlstrategie (dort die Gemischtmahlung) entschieden werden kann.

**Reduzierung von
Aufwendungen
für Test- und
Laborversuche**

Softwaregestützte Simulationen reduzieren per se notwendige Aufwendungen für kleintechnische Versuche oder Experimente im Labormaßstab. Die Erprobung verschiedener Mahlstrategien in laufenden Prozessen einer Papierfabrik ist angesichts nicht zu vermeidender Produktionsausfälle oder Bindung immenser Ressourcen nur eingeschränkt möglich. Mittels detaillierter Simulation können verschiedene Versionen der Mahlstrategie virtuell erprobt werden. Die besten Varianten werden unter kleintechnischen Bedingungen nachgebildet (die PTS bietet hierzu ideale Voraussetzungen) aber auch hier kann der Aufwand reduziert werden, indem wenig erfolgversprechende Strategien mit hoher Sicherheit von Anfang an ausgeschlossen werden.

Dr. Gert Meinl
Tel. 03529/551-630
gert.meinl@ptspaper.de

Sven Altmann
Tel. 03529/551-634
sven.altmann@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau
Tel.: 03529 / 551-60
Fax: 03529 / 551-899
e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau
Tel.: 03529 / 551-60
Fax: 03529 / 551-899
e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Literatur

- 1 BÄR G., MEINL G.:
Entwicklung von Algorithmen zur Prognose des Mahlungsverhaltens morphologisch unterschiedlicher Zellstoffe.
PTS-Forschungsbericht 2005
http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/AiF_13478.pdf
- 2 MEINL G.:
Computerunterstützte Prognose optischer Eigenschaften holzfreier Papiere aus Eigenschaften der Faserstoffkomponenten.
PTS-Forschungsbericht 2005
http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/AiF_13476.pdf
- 3 BRECHT W., SIEWERT W.:
Zur theoretisch-technischen Beurteilung des Mahlprozesses moderner Mahlmaschinen.
Das Papier, Nr.2/1966.
- 4 N.N.:
Introduction to Stock Prep Refining.
FineBar, Version 2001-1.
www.finebar.com
- 5 KERÉKES R.J.:
Characterization of pulp refiners by a C-factor.
Nordic Pulp and Paper Research J., Nr.1/1990, S. 3-8.
- 6 KOSKENHELY K., ÄMMÄLÄ A., JOKINEN H., PAULAPURO H.:
Refining characteristics of softwood fibre fractions.
13th Fundamental Research Symposium Cambridge 2005, S, 427 -456
- 7 KUNTZSCH T., MEINL G.:
Beschreibung der Gleichmäßigkeit sowie des Mahl- und Fraktionierverhaltens von Faserstoffen mittels eines Softsensors.
Proc. Faserstoffsymposium, Dresden, 2007.
- 8 SAMUELSON L.G.:
Stiffness of pulp fibers (II).
Svensk papperstidning Nr.23/1964, S.943 - 946g
- 9 LOSSADA A.A., FORMENTO J.C., PINO A.L.:
Refining selected actions on chemical pulps in a PFI mill. Part 1: Effects of radial compression stresses.
Paperii ja Puu, Nr. 4/2001, S.326 – 331.
- 10 DEKKER J., BOUMA H., HOOIMEIJER A.:
Compression Refining: the Energy Saving Breakthrough in Papermaking Technology.
Pulp and Paper Conf. Espoo, 2007.
- 11 HASELTON W.R.:
An Investigation of the Adsorption of gases by Wood and its Components and of gas Adsorption Techniques as a Means of Studying the Area and Structure of Pulp and Paper.
Diss. Inst. of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, 1953.
- 12 MEINL G.:
Senkung der Rohstoffeinstandskosten durch angepasste Mischung von Faserstoffen ohne nachteilige Einflüsse auf Erzeugungsprozess und Produktqualität.
http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/AiF_14694.pdf

- 13 MEYERS J., NANKO H.:
Effects of Fines on the Fibre Length and Coarseness Values Measured by the Fiber Quality Analyzer (FQA).
TAPPI Technical Conf., 2005.
- 14 HEINEMANN S.:
Moderne Analytik zur Faserstoffbewertung.
Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr.17/2006
- 15 N.N.:
EUWID – Zellstoff und Papier, Nr.45/2008.
- 16 [http://www.eva.ac.at/\(de\)/enz/preise/evp-eli.htm](http://www.eva.ac.at/(de)/enz/preise/evp-eli.htm)
- 17 KUNTZSCH T.:
Validierung und Kalibrierung von Modellen zur Prognose von Stoffsuspensions- und Papiereigenschaften in Unternehmen der Papierindustrie.
http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/IW_061084.pdf