

Titel**REDUZIERUNG DER ENERGIEKOSTEN UND VERBESSERUNG DER FASERSTOFFEIGENSCHAFTEN DURCH LOW-INTENSITY-REFINIG**

Constanze Seidemann, Dr. Gert Meinl

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	Low-Intensity-Refining	6
5.2	C-Faktor nach KEREKES.....	6
5.2.1	Grundlagen	6
5.2.2	Verbindung des C-Faktor-Modells mit Scher- und Kompressionskräften.....	8
5.2.3	Einfluss der fraktionellen Zusammensetzung auf den C-Faktor	9
6	Versuche und Ergebnisse der Mahlung der Kurzfasierzellstoffen mit unterschiedlicher Mahlintensität	9
6.1	Kennwerte der im PTS-Technikumsrefiner eingesetzten Mahlgarnituren	9
6.2	Mahluntersuchungen mit dem PTS-Technikumsrefiner.....	10
6.3	Energiebedarf bei Mahlung unter Standard- und Low-Intensity-Bedingungen.....	17
7	Weiterentwicklungen numerischer Mahlmodelle	20
7.1	Modellierung des Zusammenhanges zwischen S und den primären Mahleffekten	20
7.1.1	Anteil der Faserfraktionen.....	21
7.1.2	Faserlänge, -durchmesser und –wanddicke in den Fraktionen	23
7.1.3	Faserflexibilität	24
7.1.4	WRV und Bindungsfestigkeit.....	25
7.1.5	Entwässerungswiderstand und spezifische Oberfläche.....	26
7.1.6	Lichtstreuoeffizient	28
7.2	Bewertung der Modellgüte bezüglich Mahlungen am PTS-Versuchsrefiner (Validierung 1) .	28
7.3	Bewertung der Modellgüte bezüglich Mahlungen an industriellen Mahlanlagen (Validierung 2).....	33
7.3.1	Unternehmen D	36
7.3.2	Unternehmen E.....	38
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	40
	Literatur	43

1 Zusammenfassung

Zielstellung

Das Forschungsprojekt verfolgte folgende Ziele:

- verbesserte Nutzung der Möglichkeiten des Low-Intensity-Refinings in Bezug auf
 - die Senkung der Energiekosten und
 - die verbesserte Nutzung des Faserpotenzials von Faserstoffen mit geringer Mahlresistenz und Faserlänge.
- Adaption der von an der PTS für höhere Mahlintensitäten entwickelten mathematischen Mahlmodelle an den Mahlbereich des Low-Intensity-Refinings unter Nutzung von garniturspezifischen Kennwerten.

Ergebnisse

Im Ergebnis von Untersuchungen mit einem Technikumsrefiner konnte die unter Low-Intensity-Mahlbedingungen verbesserte Entwicklung der Zug- und Durchreißfestigkeit bei Kurzfasernachgewiesen werden. Die unter diesen Mahlbedingungen verstärkte Feinstoffbildung bedingt gleichzeitig eine im Vergleich zur Standardmahlung starken Anstieg des Entwässerungswiderstandes. Die Bereitstellung numerischer Modelle zur Berechnung von Effekten der Mahlung unter Berücksichtigung von Garniturgeometrie, Energieeinsatz und Stoffeigenschaften vor der Mahlung ermöglicht die Prognose der papiertechnologischen Eigenschaften von Laborblättern. Anhand von Demonstrationsbeispielen aus der industriellen Praxis wird die Eignung des Wertes für die Kontaktenergie S zur Beschreibung der Einwirkung des Mahlvorganges auf den Faserstoff belegt. Die an Praxismahlanlagen vorgenommene Modellvalidierung zeigte eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen den mittels numerischer Simulation prognostizierten Werten und realen Messwerten.

Durch eine Umstellung einer Mahlanlage für Kurzfasernachstoffe auf Prozessparameter im Low-Intensity-Bereich wurde trotz des Anstiegs der Refinerleerlaufleistung eine Reduzierung des Gesamtenergieverbrauches für die Mahlung bestimmt.

Schlussfolgerung

Durch umfangreiche Technikumsversuche konnte nachgewiesen werden, dass durch Low-Intensity-Mahlung von Kurzfasernachstoffen im Vergleich zur Mahlung unter konventionellen Bedingungen höhere Festigkeitseigenschaften erreichbar sind. Ein weiterer Vorteil dieses Mahlverfahrens ist der im Vergleich zu einer Standardmahlung niedrigerer Energieverbrauch der Mahlanlage.

Durch Einbeziehung von Garnitur- und Faserstoffkennwerten in die numerischen Modelle ist gegenüber der Kenngröße SEL eine Prognose über die Eigenschaftskennwerte des gemahlten Faserstoffes sowie die Parameter des Mahlprozesses möglich.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens IW 070063 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.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.

2 Abstract

Project objective

The targets of the project were:

1. enhanced utilization of the opportunities of Low-Intensity refining in respect to
 - a. reducing energy costs and
 - b. improving the use of the fibre potential of pulps with reduced beating resistance and fibre length.
 2. Adaption of those mathematical models, which have been developed for high intensity refining for parameter ranges typical for low intensity refining by use of refiner fillings.
-

Results

As a result of experimental trials with a lab scale refiner the enhanced development of tensile and tear strength of hardwood pulps when refined with low intensity fillings was confirmed. The increased production of fines raised the dewatering resistance in a more stronger way than under standard refining conditions.

The allocation of numerical models for calculation of refining effects considering the geometry of the fillings, the consumption of energy and the pulp characteristics enables the prediction of lab sheet properties. Be means of examples from paper mills the suitability of the contact energy value S for describing the fiber behaviour during fiber-cutting edge interactions was confirmed. The modell validation under industrial conditions illustrate the good accordance of simulated and measured values.

By use of Low-Intensity filling when beating hardwood pulps it was shown that the whole energy consumption was reduced although the no laod power increased.

Conclusions

By adaption of suitable low intensity refining conditions a higher level of strength properties of lab sheets made from hardwood pulps is available in contrast to conventional refining strategies. An additional advantage of Low-Intensity refining is the reduced consumption of total energy.

Including all major parameters of refiner filling, pulp suspension and refining operation the predictability of paper properties by the new numerical models was advanced compared to results when only using the specific edge load as a marker for refining intensity.

Acknowledgement

The research project IW 070063 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.

We would also like to express our thanks to the involved companies for providing proper samples as well as for supporting project performance.

3 Einleitung

Low-Intensity-Refining

Die Mahlung von Faserstoffen wird mit dem Ziel betrieben, die Faseroberfläche durch Fibrillierung zu aktivieren, wobei eine Faserkürzung weitestgehend vermieden werden soll. Diese Anforderung kann für Laubholzzellstoffe und Sekundärfaserstoffe durch eine Reduzierung der spezifischen Kantenbelastung umgesetzt werden. Um den Mahlprozess unter niedrigen spezifischen Kantenbelastungen durchzuführen, stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl:

- Die Reduzierung der Mahlleistung
- Eine Erhöhung der wirksamen Messerlänge

Die Reduzierung der Mahlleistung bewirkt, dass zur Erzielung eines bestimmten Mahlergebnisses ein höherer Energieverbrauch notwendig ist. Dieser Mehrverbrauch ist in der erforderlichen größeren Refineranzahl und des damit verbundenen erhöhten Anteils an Leerlaufleistung begründet. Der bessere Weg ist deshalb die Erhöhung der Kantenlänge der Mahlgarnituren. Eine Möglichkeit zur Realisierung ist die Anwendung von Mahlgarnituren mit schmälere Messer- und/oder Nutbreiten. Diese Garnituren stellen höhere Anforderungen an das Messermaterial und die Fertigungstechnologie.

Low-Intensity-Refinig und technologische Faserstoffeigenschaften

Sekundärfaserstoffe besitzen eine geringe Mahlresistenz und bedingen zur Herausarbeitung des papiertechnologischen Faserpotentials eine fibrillierende Mahlungswirkung mit der geringst möglichen Faserkürzung. Untersuchungen bei der Herstellung von Zeitungsdruckpapierherstellung, bei der mit Mahlintensitäten zwischen 0,3 und 0,4 Ws/m gemahlen wurde, zeigten sich beträchtliche Steigerungen bei Reißlänge und Berstfestigkeit bei gegenüber konventioneller Mahlung wesentlich geringerem Verlust an Weiterreißfestigkeit [1, 2].

Implementierung des C-Faktors in Simulationssoftware

Die bisher verfügbaren numerischen Modelle zur Prognose des Mahlungsverhaltens von Faserstoffen berücksichtigen als wesentliche physikalische Einflussgröße die spezifische Mahlarbeit. Weitere Kenngrößen wie die spezifische Kantenbelastung als Intensitätskennwert sowie den Schnitt- und den Öffnungswinkel der Mahlgarnitur waren bislang nur im Rahmen statistischer Ansätze in die Modelle integriert. Mit dem C-Faktor-Kalkül steht nunmehr eine geschlossene, physikalisch fundierte Berechnungsvorschrift zur Verfügung. Die Anwendung des C-Faktors zur Charakterisierung der Mahlungsintensität bei der Mahlung von Zellstoffen hat in der Praxis zu einer höheren Korrelation zwischen Festigkeitsentwicklung und Spezifischer Energie pro Impact (S) geführt als konventionelle Methoden.

Kompetenz der PTS

In den letzten Jahren sind an der PTS eine Reihe numerischer Modelle zur Simulation des Mahlverhaltens von Faserstoffen mit dem Ziel der Prognose von optischen, strukturellen und Festigkeitseigenschaften von Papieren entwickelt worden. Die Modelle wurden auf der Grundlage einer Vielzahl an Mahlreihen für verschiedenste Zellstoffgruppen im Niedrigkonsistenzbereich unter Verwendung des kleintechnischen Refiners im Technikum der PTS validiert. Diese Simulationstools werden systematisch in die Beratungstätigkeit der PTS integriert, so dass auch kleine und mittlere Unternehmen von den Vorteilen dieser kosten- und zeitsparenden Möglichkeit zur Planung von Mahlprozessen profitieren.

4 Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Ziele des Vorhabens

Das Projekt verfolgte folgende Ziele:

- verbesserte Nutzung der Möglichkeiten des Low-Intensity-Refinings in Bezug auf
 - die Senkung der Energiekosten und
 - die verbesserte Nutzung des Faserpotenzials von Faserstoffen mit geringer Mahlresistenz und Faserlänge.
- Adaption der von an der PTS für höhere Mahlintensitäten entwickelten mathematischen Mahlmodelle an den Mahlbereich des Low-Intensity-Refinings unter Nutzung von garniturspezifischen Kennwerten und Validierung der entwickelten Modelle an Praxisanlagen.

papiertechnologische Eigenschaften und Energieeinsatz

Durch systematische Mahluntersuchungen im kleintechnischen Maßstab wurde unter Standard- und unter Low-Intensity-Bedingungen die Entwicklung der papiertechnologischen Eigenschaften von Kurzfasierzellstoffe und der dazu erforderliche Bedarf an elektrischer Energie ermittelt und bewertet. Darüber hinaus sollte der zur Erzielung bestimmter Zieleigenschaften erforderliche Energieeinsatz für Garnituren mit unterschiedlichen Messerkantenlängen bestimmt werden.

Weiterentwicklung der PTS-Simulationsmodelle

Die Implementierung des C-Faktors in das numerische Modell soll einen Beitrag zur genaueren Beschreibung des Mahlprozesses, insbesondere der Kenngröße Mahlungsintensität, leisten. Damit können die Modelle zur Prognose des Mahlungsverhaltens erweitert, besser kalibriert und die Prognosesicherheit verbessert werden.

5 Stand des Wissens und der Technik

5.1 Low-Intensity-Refining

technologische Faserstoffeigenschaften

Ergebnisse von Mahlversuchen von Metso mit einem konischen Refiner haben bei der Mahlung von Eukalyptus grandis, Akazie und Birke gezeigt, dass ein bestimmter SR-Wert bei niedriger spezifischer Kantenbelastung mit weniger Energie erreicht wird. Andersherum werden bei vergleichbarem Energieeinsatz höhere Festigkeiten bei weitgehendem Erhalt der Faserlänge und teilweise geringerem Entwässerungswiderstand erzielt.

Untersuchungen von Voith haben darüber hinaus gezeigt, dass das Mahlergebnis bei der Mahlung von kurzen Fasern mit geringer Mahlungsintensität nicht nur von der verfügbaren Kantenlänge, sondern auch vom Schnittwinkel der übereinander gleitenden Messer sowie der Messerbreite abhängt [7]. Man ist sich darüber einig, dass Kurzfasierzellstoffe zukünftig durch Mahlung bei Kantenbelastungen unter 0,5 J/m auf das Festigkeitsniveau von Langfaserzellstoffen zu entwickeln sind.

technische Umsetzung

Die technische Umsetzung einer Low-Intensity-Mahlung erfolgt überwiegend durch Einsatz von Garnituren erhöhter Messerlänge. Die verfügbare Mahlgarnituroberfläche ist dabei der limitierende Faktor für den Durchsatz des Refiners. Eine Garnitur, die für sehr niedrige Kantenbelastungen unter 0,6 J/m ausgelegt wird erfordert ein sehr feines Muster mit schmalen Messern und Nuten. Enge Nuten reduzieren die offene Fläche der Garnitur und damit die hydraulische Kapazität des Refiners. Wie schmal diese Nuten gestaltet werden können, ohne dass es zu Verstopfungen und Messerkontakt kommen kann, hängt von der Faserlänge des Mahlgutes, der Mahlkonsistenz und dem Durchsatz ab. Durch die höhere Anzahl an schmalen Messern werden auch höhere Anforderungen an das Messermaterial und die Fertigungstechnologie gestellt. Zur Sicherung eines hohen Durchsatzes müssen die Messer nicht nur schmal sondern auch möglichst hoch sein. Eine weitere Methode zur Steigerung der wirksamen Messerlänge ist die Vergrößerung der Mahlfläche durch Erhöhung des Scheibendurchmessers. Diese so genannten Overhang Plates können in Scheibenrefinern eingesetzt werden, wenn die Gehäuseabmessungen es zulassen.

5.2 C-Faktor nach KEREKES

5.2.1 Grundlagen

Theorie des C-Faktors nach Kerekes

Idee von KEREKES [3] – Definition C als Anzahl der Faser-Messer-Kontakte je Zeiteinheit [1/s], d.h.

$$C := N \cdot F \quad (5-1)$$

Damit folgt:

$$I = \frac{P_{eff}}{C} \quad (5-2)$$

Die sekundliche Schnittlänge CEL nach BRECHT und SIEWERT

$$CEL = n_s^2 \cdot \omega \cdot L_M \cdot 10^{-6} \quad (5-3)$$

ist also ein erster Entwurf eines C-Faktors und die zugehörige spezifische Kantenlast SEL

$$SEL = \frac{P_{eff}}{CEL} \quad (5-4)$$

kann als Intensitätsmaß 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 zunächst nicht weiter ausgeführt werden.

Auf Basis von Suspensionskennwerten sowie Kennwerten des Energieeinsatzes und der Mahlgarnitur berechnet KEREKES den C-Faktor wie folgt:

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

Für den Kennwert K gilt

$$K = R_1^2 * L + L^2 * R_1 * \sin \vartheta + \frac{L^3}{3} * \sin^2 \theta \quad (5-6)$$

Für einen Scheibenrefiner vereinfacht sich die Berechnung von K gemäß:

$$K = \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{3} \quad (5-7)$$

Verweilzeit in der Mahlzone

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

$$\tau = \frac{2\pi * D * \rho * \cos \varphi_r * C_F}{F} \left(R_1 * L + \frac{L^2}{2} \sin \vartheta \right) \quad (5-8)$$

5.2.2 Verbindung des C-Faktor-Modells mit Scher- und Kompressionskräften

Der spezifischen Energie S eines Faser-Messer-Kontaktes entspricht eine mittlere Kraft \vec{F} , die auf die Faser wirkt und in Komponenten parallel bzw. senkrecht zur Faserachse, der Scherkraft \vec{F}_S und Kompressionskraft \vec{F}_K zerlegt werden kann (Abb. 1), so dass

$$\vec{F} = \vec{F}_S + \vec{F}_K \quad (5-9)$$

Wie bereits ausgeführt, bedeuten große Werte für S hohe Scher- und Kompressionskräfte, die während eines Faser-Messer-Kontaktes wirken und vor allem Faserkürzungen infolge Zerschneiden oder Zerreißen der Fasern zur Folge haben. Kleine Werte für S hingegen bedeuten moderate Scher- und Kompressionskräfte, welche eher eine innere oder äußere Fibrillierung nach sich ziehen, je nach Verhältnis der Kräfteanteile.

SRE const.

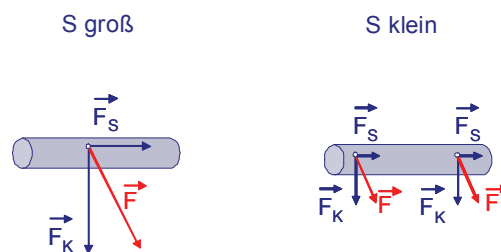


Abb. 1: Aufteilung von Scher- und Kompressionskräften entlang einer Faser bei hohen und niedrigen spezifischen Energien je Faser

Quantitative Abschätzungen des Zusammenhanges zwischen S und der Größe der Scher- und Kompressionskräfte sind nicht bekannt. Unter Verwendung eines geeigneten Sensors wurden von PRAIRIE ET AL. [4] für verschiedene spezifische Kantenlasten an einem Kegelrefiner Scher- und Kompressionskräfte gemessen. Die Ergebnisse lassen sich dabei wie folgt zusammenfassen:

- Das Verhältnis aus (mittlerer) Scher- und Kompressionskraft bei spezifischen Kantenlasten zwischen 0,3 und 0,5 Ws/m schwankte zwischen 0,155 und 0,135, d.h. blieb relativ konstant.
- Die Kompressionskräfte vergrößerten sich im selben Intervall von 3N auf 5,5N, d.h. die Kompressionskraft ist nahezu direkt proportional zur spezifischen Kantenlast.

Die Ergebnisse von PRAIRIE ET AL. können wie folgt auf die spezifische Energie S übertragen werden:

- Das Verhältnis von Scher- und Kompressionskräften ist unabhängig von S und wird durch die Geometrie der Mahlaggregate definiert. Für übliche Geometrien dominieren Kompressionskräfte (vgl. auch NISSAN). Im Falle der PFI-Mühle [5] und für die Kompressionsmahlung [6] sind die Scherkräfte vernachlässigbar. Es sind insbesondere die durch Kompressionskräfte erzeugten internen Fibrillierungen, welche feste Faserbindungen gewährleisten.
- Der Betrag der Scher- und Kompressionskräfte korreliert eng mit der spezifischen Energie.

5.2.3 Einfluss der fraktionellen Zusammensetzung auf den C-Faktor

Aus der Definition (5-5) 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

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_{F,1}}{C_{F,2}} \cdot \frac{C_{FIB,2} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_2}\right)}{C_{FIB,1} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_1}\right)} \quad (5-10)$$

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 (5-2) somit in folgender Relation

$$\frac{P_{eff,1}}{P_{eff,2}} = \frac{C_{F,1}}{C_{F,2}} \cdot \frac{C_{FIB,2} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_2}\right)}{C_{FIB,1} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_1}\right)} \quad (5-11)$$

Damit folgt für spezifischen Mahlenergien SRE_1 bzw. SRE_2 , die auf die Fraktionen FL_1 bzw. FL_2 entfallen mit $C_{F,1} \cdot F_1 = C_{F,2} \cdot F_2 = C_F \cdot F$

$$\frac{SRE_1}{SRE_2} = \frac{C_{FIB,2} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_2}\right)}{C_{FIB,1} \cdot \left(1 + \frac{D}{FL_1}\right)} \quad (5-12)$$

Aus (5-12) kann unmittelbar der für Gemischtmahlungen wichtige Schluss abgeleitet werden, dass mit zunehmender mittlerer Faserlänge einer Fraktion, der Anteil der von ihr verbrauchten spezifischen Mahlenergie zunimmt.

6 Versuche und Ergebnisse der Mahlung der Kurzfasernstoffstoffen mit unterschiedlicher Mahlintensität

6.1 Kennwerte der im PTS-Technikumsrefiner eingesetzten Mahlgarnituren

Festlegung Garniturdaten

Die Tabelle 1 zeigt zusammenfassend alle relevanten Parameter für die drei in den Versuchen am PTS- Refiner zum Einsatz gebrachten Garnituren KF 1, KF 2 und KF 3 sowie als Vergleich die Daten einer Langfasergarnitur LF.

Die Garnitur KF 1 ist die Referenzgarnitur, mit der die bei den derzeitigen Standardmahlbedingungen üblich hohe Mahlkantenbelastung von 1 J/m eingestellt werden kann.

Die für die Low-Intensity-Mahlung angefertigte Mahlgarnitur KF 2 besitzt im Vergleich zur Referenzgarnitur eine um das 2,6 fache erhöhte sekundliche Schnittlänge. Die Erhöhung der sekundlichen Schnittlänge bei der Garnitur KF 2 erfolgte ausschließlich durch eine Vergrößerung der Anzahl der Messer bei gleichbleibender Garniturfläche.

Die Garnitur KF 3 wurde mit einer noch einmal erhöhten sekundlichen Schnittlänge gefertigt, so dass hiermit eine Mahlkantenbelastung von 0,1 J/m realisiert werden kann. Die Nuttiefe ist identisch mit der der Referenzgarnitur. Die erhöhte Messeranzahl wird bei dieser Garnitur neben einer weiteren Reduzierung der Messer- und Nutbreite auch durch eine Vergrößerung der Garniturfläche um ca. 17 % realisiert. Die Parameter Nuttiefe und Garniturfläche beeinflussen jeweils die Verweilzeit des Faserstoffes in der Mahlgarnitur.

Garniturparameter

Tabelle 1: Parameter der Garnituren des PTS-Refiners

		Einheit	PTS-KF1	PTS-KF2	PTS-KF3	PTS-LF
Nutbreite	G	[mm]	5,3	3,65	2,7	8
Nuttiefe	D	[mm]	3,4	4,1	3,5	3,5
Messerbreite	W	[mm]	3	2,5	1,5	5
mittlere Messerlänge ($L_M \geq R_2 - R_1$)	L_M	[mm]	55,7	68	79,5	55,7
mittlere Messerzahl/Scheibe	$n_R = n_S$		70	105	132	45
Radius innen	R_1	[mm]	94	93,5	82,5	94
Radius außen	R_2	[mm]	145	145	145	145
halber Öffnungswinkel	θ	[°]	90	90	90	90
Messerwinkel	φ_r	[°]	30	30	30	30
Drehzahl	ω	[1/min]	1500	1500	1500	1500
Effektive Mahlleistung	P_{eff}	[kW]	6,82	5,62	3,46	4,23

6.2 Mahluntersuchungen mit dem PTS-Technikumsrefiner

spezifische Mahlkantenbelastung und die morphologischen Kennwerte der Zellstoffe

Der Einfluss der spezifischen Mahlkantenbelastung auf die Faserlängenentwicklung ist in Abb. 2 für eine Mahlbehandlung mit einer spezifischen Mahlarbeit von 100 kWh/t dargestellt. Anhand dieser Daten ist jedoch eine tendenziell größere Faserkürzung bei den Mahlversuchen unter Low-Intensity-Bedingungen gegenüber dem Vergleichsversuch festzustellen.

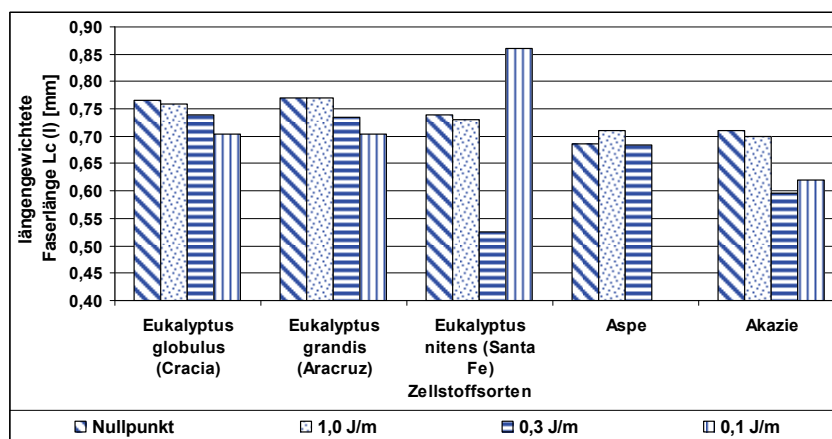


Abb. 2: Entwicklung der längengewichteten mittleren Faserlänge in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlantenbelastung

Eine zusätzliche Betrachtung der Faserlängenentwicklung unter variierten Einträgen an spezifischer Mahlarbeit zeigt Abb. 3. Deutlich ist zu erkennen, dass der Wert für die längengewichtete Faserlänge bei allen untersuchten Variationen der spezifischen Mahlarbeit mit fallender Mahlintensität um jeweils ca. 0,03 mm abnimmt

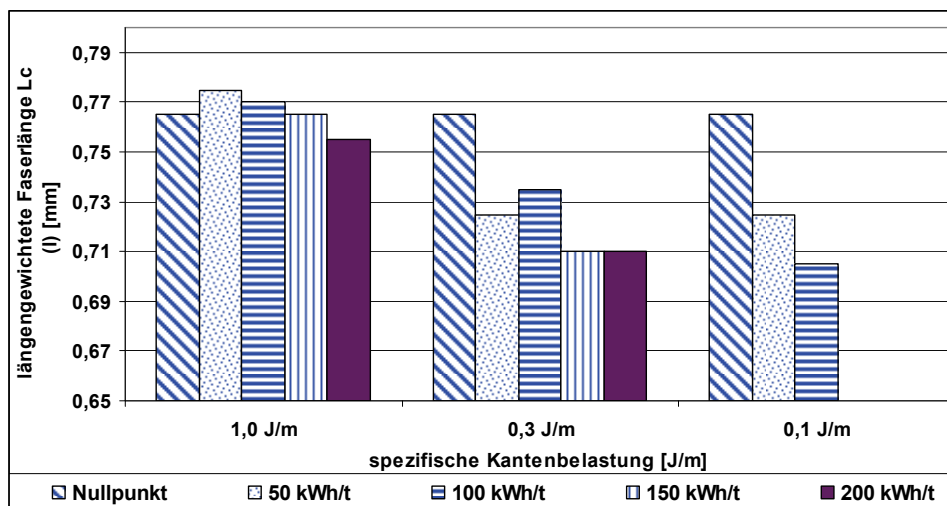


Abb. 3: Entwicklung der längengewichteten mittleren Faserlänge in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlantenbelastung und der spezifischen Mahlarbeit (Zellstoff: Eukalyptus grandis (Aracruz))

Eine Verringerung des numerischen Faserlängenwertes kann durch eine Faserkürzung und/oder eine Erhöhung des Feinstoffanteils bewirkt werden. Durch den Mahlprozess werden beide Parameter verändert, wobei durch die Gestaltung der Prozessparameter eine Verschiebung des Wirkungsschwerpunktes in die eine oder die andere Richtung erfolgen kann. Eine Betrachtung der Feinstoffentwicklung in den Abb. 2 und Abb. 3 zeigt ein zur Entwicklung der längengewichteten mittleren Faserlänge umgekehrt proportionales Verhalten.

Durch eine Low-Intensity-Mahlung mit 0,1 J/m spezifischer Kantenbelastung wurde eine Zunahme des Feinstoffgehaltes bei den untersuchten Zellstoffen von absolut 2 – 8 % gegenüber einer konventionellen Mahlung mit 1,0 J/m spezifischer Kantenbelastung ermittelt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die geringfügige Verringerung der ermittelten Faserlängenwerte im Wesentlichen durch den Anstieg des Feinstoffgehaltes bewirkt wird. Gestützt wird diese Aussage durch den in Abb. 4 dargestellten Verlauf der Durchreißfestigkeit in Abhängigkeit von der ermittelten Faserlänge. Bei einer Mahlung mit einer spezifischen Mahlarbeit von 150 kWh/t wird unter Low-Intensity-Mahlungbedingungen – trotz einer um ca. 7 % geringeren Faserlänge - ein um ca. 18 % höherer Durchreißwiderstand gegenüber einer konventionellen Mahlung erreicht.

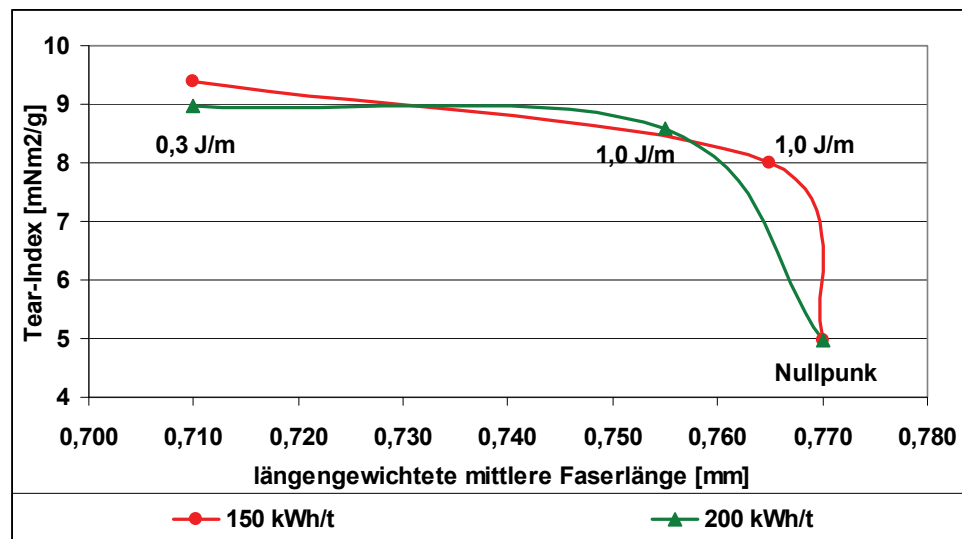


Abb. 4: Entwicklung der längengewichteten mittleren Faserlänge und des Tear-Index für den Zellstoff Eukalyptus grandis (Aracruz) in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlarbeit und der spezifischen Kantenbelastung

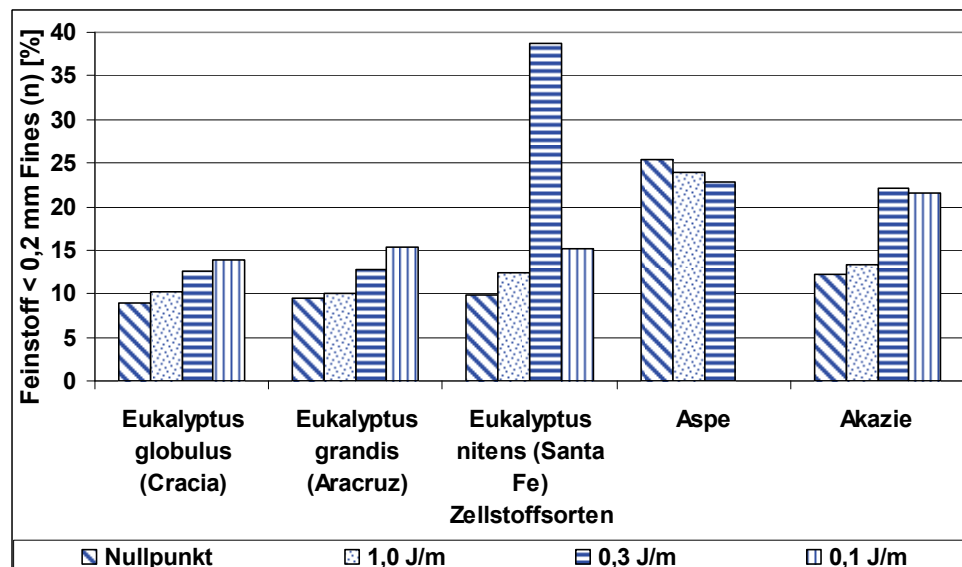


Abb. 5: Entwicklung des Feinstoffanteils der untersuchten Zellstoffe in Abhängigkeit von der spezifischen Kantenbelastung bei einem Eintrag an spezifischer Mahlarbeit von 100 kWh/t

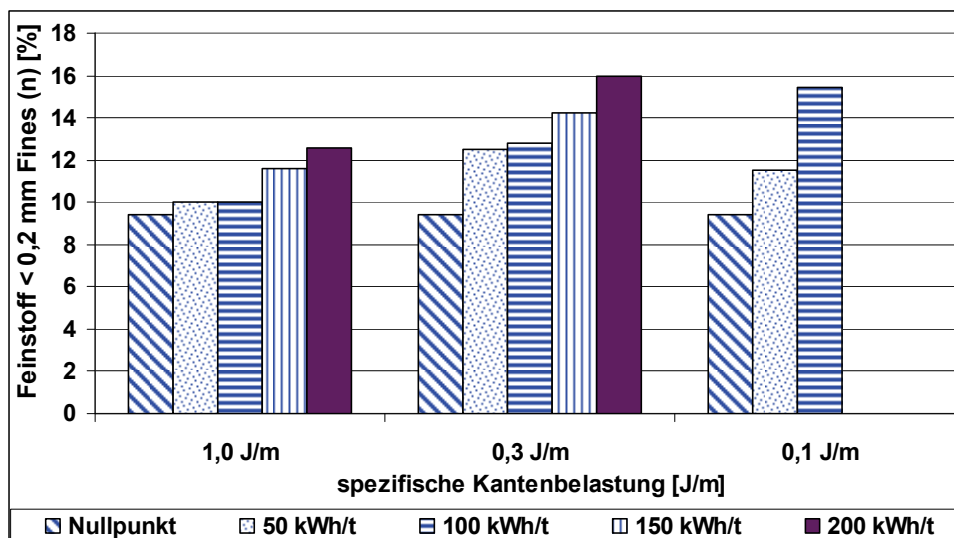


Abb. 6: Entwicklung des Feinstoffanteils für den Zellstoff Eukalyptus grandis (Aracruz) in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlarbeit und der spezifischen Kantenbelastung

Einfluss der spezifischen Mahlkantenbelastung auf das Entwässerungsverhalten

Die durch eine Absenkung der spezifischen Mahlkantenbelastung bewirkte Veränderung des Entwässerungswiderstandes ist für die untersuchten Kurzfasernzellstoffe bei unterschiedlichen spezifischen Mahlarbeiten in Abb. 7 dargestellt. Alle fünf Zellstoffe zeigen einen mit abnehmender spezifischer Kantenbelastung einhergehenden erheblichen Anstieg des Entwässerungswiderstandes im Bereich von 54 bis 78 % bei W_{spez} von 100 kWh/t und SEL von 0,1 J/m. Dieses Verhalten zeigt die deutlich stärker fibrillierende und feinstoffbildende Wirkung einer Low-Intensity-Mahlung gegenüber einer Mahlung mit den üblichen hohen Mahlkantenbelastungen.

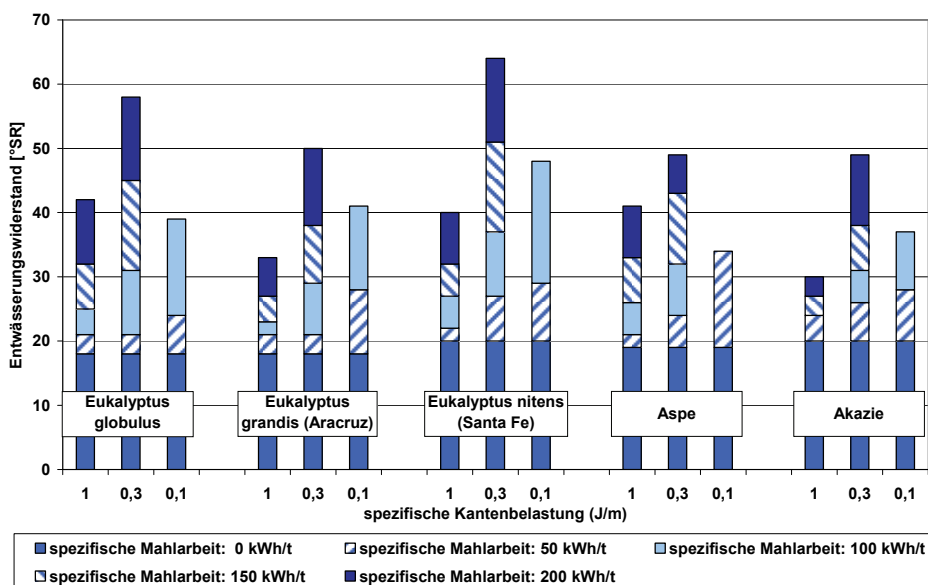


Abb. 7: Entwicklung des Entwässerungswiderstandes der untersuchten Zellstoffe in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlarbeit und der spezifischen Kantenbelastung

**Einfluss der spezifischen Mahl-
kantenbelastung
auf die Zugfestigkeit**

Die Zugfestigkeit ist in starkem Maße von der Ausbildung der Faser-Faser-Bindung abhängig und kann durch eine fibrillierende Mahlung deutlich gesteigert werden. In der nachfolgenden Abb. 8 ist sehr schön der positive Einfluss der Low-Intensity-Mahlung auf die Faserbindung an dem mit der Reduzierung der Kantenbelastung einhergehenden Anstieg der Zugfestigkeit zu erkennen. Die Verbesserung gegenüber der Standardbetriebsweise lag unter den Prozessparametern $W_{spez} = 100 \text{ kWh/t}$ und $SEL = 0,1 \text{ J/m}$ im Bereich von 15 bis 50 %.

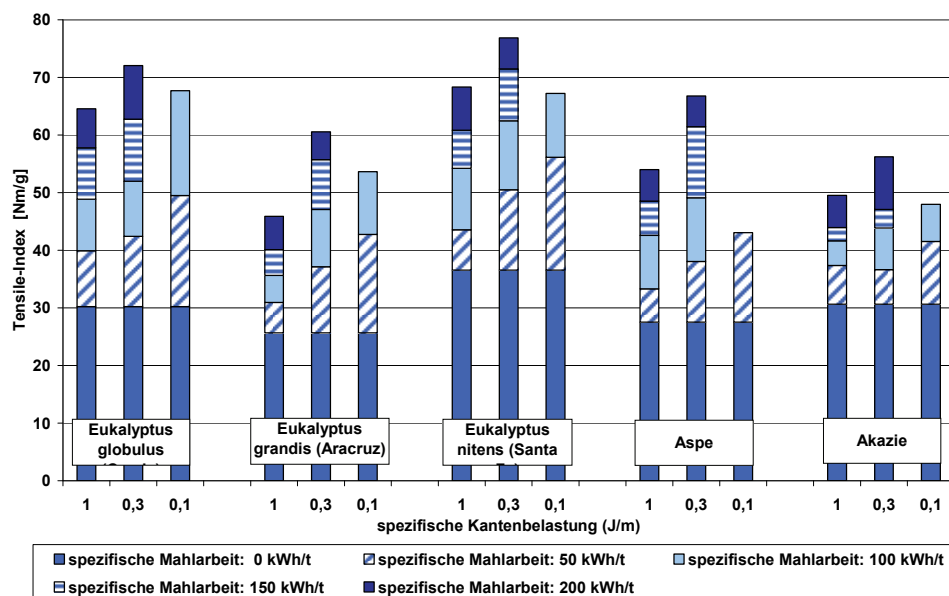


Abb. 8 : Entwicklung des Tensile- Index der untersuchten Zellstoffe in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlarbeit und der spezifischen Kantenbelastung

**Einfluss der spezifischen Mahl-
kantenbelastung
auf die Durch-
rei ßfestigkeit**

Eine starke kürzende Mahlung wirkt sich negativ auf die Durchrei ßfestigkeit aus. Deren Entwicklung ist für den Zellstoff Eukalyptus grandis (Aracruz) in Abb. 9 als Funktion der spezifischen Mahlarbeit für unterschiedliche Mahl- kantenbelastungen dargestellt.

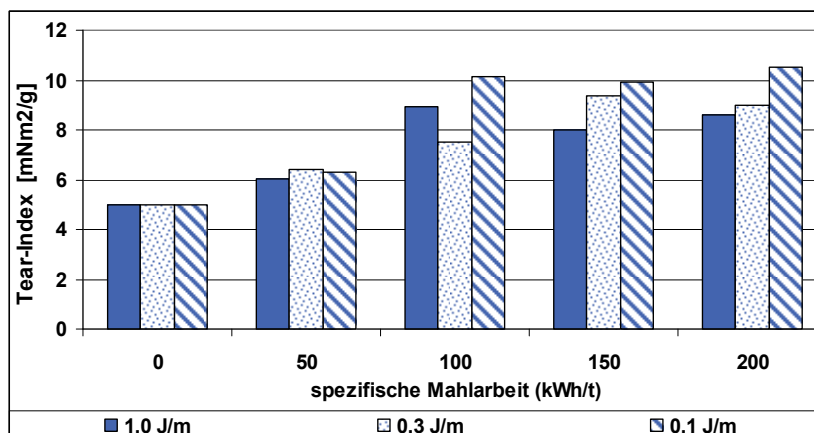


Abb. 9: Entwicklung des Tear-Index für den Zellstoff Eukalyptus grandis (Aracruz) in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlarbeit und der spezifischen Kantenbelastung

Bei der üblichen Mahlkantenbelastung von 1 J/m überwiegt bis zu einer spezifischen Mahlarbeit von 100 kWh/t der festigkeitssteigernde Effekten durch eine bessere Faser-Faser-Bindung. Bei Einsatz höherer spezifischer Mahlarbeiten ist ein Abfall der Durchreißfestigkeit aufgrund einer verstärkten Faserkürzung festzustellen, welche durch eine verbesserte Faserbindung nicht mehr kompensiert werden kann. Im Gegensatz dazu wurde bei Anwendung einer Low-Intensity-Garnitur kein Abfall der Durchreißfestigkeit im untersuchten Mahlarbeitsbereich bestimmt. Diese Aussage wird durch die Abb.13 verdeutlicht, bei der die mahlarbeitsabhängige Entwicklung der Durchreißfestigkeit für alle fünf untersuchten Zellstoffe bei einer Low-Intensity-Mahlung mit 0,1 J/m spezifischer Mahlkantenbelastung dargestellt ist. Bei allen Zellstoffen war auch bei einem relativ hohen Eintrag an Mahlarbeit von 200 kWh/t keine Abnahme der Durchreißfestigkeit festzustellen.

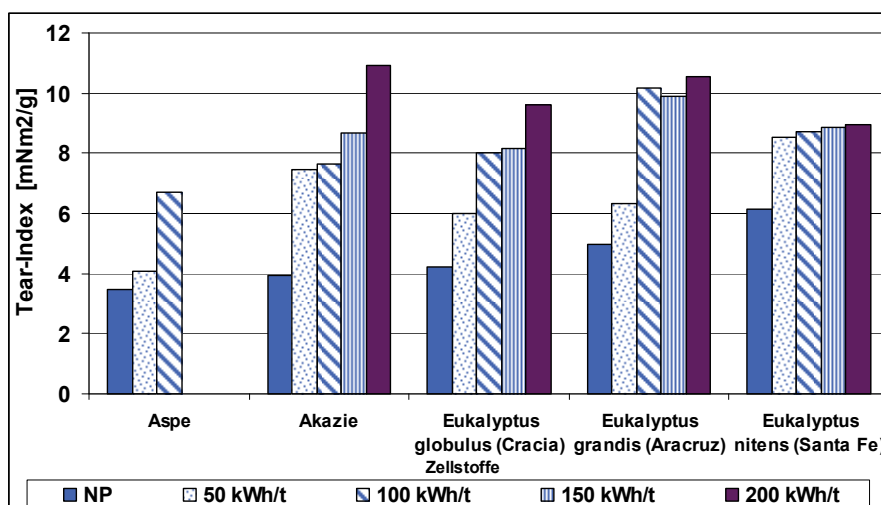


Abb. 10: Entwicklung des Tear-Index für unterschiedliche Einträgen von spezifischer Mahlarbeit mit einer spezifischen Kantenbelastung von 0,1 J/m

Einfluss der spezifischen Mahlkantenbelastung auf die Luftdurchlässigkeit der Zellstoffe

Die Abb. 11 zeigt den Einfluss der Low-Intensity-Mahlung auf die Luftdurchlässigkeit. Die Luftdurchlässigkeit ist bei grafischen Papieren ein wichtiger Parameter zur Sicherung eines guten Farbwegschlagverhaltens. Die Mahlung mit verringerter Kantenbelastung führt durch die verstärkte Fibrillierung und Feinstoffentwicklung zu einer deutlich verminderten Luftdurchlässigkeit.

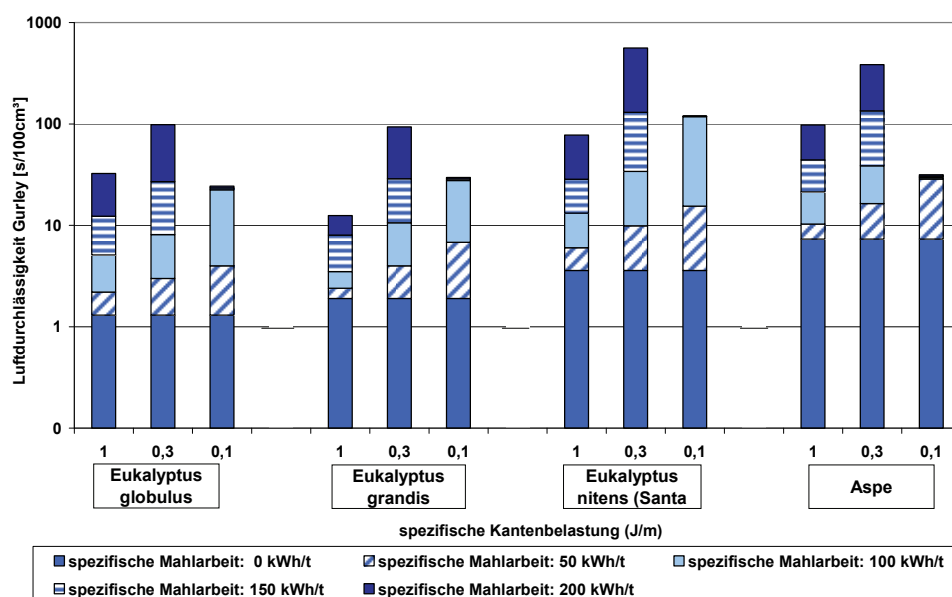


Abb. 11: Entwicklung der Luftdurchlässigkeit der untersuchten Zellstoffe in Abhängigkeit von der spezifischen Mahlarbeit und der spezifischen Kantenbelastung

Zusammenfassung zur Veränderung der Eigenschaftskennwerte der Zellstoffe

Die Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die sich durch eine Mahlung mit geringer Mahlintensität gegenüber einer Standardmahlung mit einer spezifischen Kantenbelastung von 1 J/m ergebenden prozentualen Veränderungen von Eigenschaftskennwerten bei einem Eintrag an spezifischer Mahlarbeit von 100 kWh/t. Hervorzuheben ist der insbesondere bei der Mahlung mit einer sehr geringen spezifischen Kantenbelastung von 0,1 J/m sich um 54 bis 78 % erhöhende Entwässerungswiderstand. Andererseits sind bei den dynamischen und statischen Festigkeitseigenschaften die höchsten Steigerungsraten bei der Einstellung mit SEL= 0,1 J/m zu verzeichnen. Diese liegen für den Tensile-Index im Bereich von 15 bis 50 % und für den Tear-Index im Bereich von 16 bis 67 %.

Tabelle 2: Prozentuale Veränderung von papiertechnologischen Eigenschaftskennwerten durch Low-Intensity-Mahlung gegenüber einer Mahlung mit einer spezifischen Kantenbelastung von 1,0 J/m

Faserstoff	spezifische Kantenbelastung	spez. Mahlarbeit	Entwässerungswiderstand	Lc (l)	Fines (n)	Rohdichte	Bruchdehnung	Tensile-Index	Tear-Index	Luftdurchlässigkeit Gurley
	[J/m]	[kWh/t]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Eukalyptus globulus (Cracia)	0,3	100	24	-2,6	22,8	2,6	-13,5	6,4	2,2	59
	0,1		56	-7,2	35,5	12,2	10,0	38,6	21,7	
Eukalyptus grandis (Aracruz)	0,3	100	26	-4,5	27,4	6,9	-2,5	32,1	-15,9	203
	0,1		78	-8,4	53,6	18,5	18,6	50,5	18,0	
Eukalyptus nitens (Santa Fe)	0,3	100	37	-28,1	210,5	6,2	-2,9	15,2	3,5	158
	0,1		78	17,8	21,9	13,4	1,0	24,0	15,9	
Akazie	0,3	100	29	-15,0	65,7	8,3	34,1	5,4	61,1	
	0,1		54	-11,4	60,3	11,7	-14,2	15,2	67,5	

Veränderung der Eigenschaftskennwerte der Altpapiere

Die untersuchten Altpapiersorten 1.02 und 1.11 sind in Bezug auf die Entwicklung der Eigenschaftskennwerte im Zuge des Mahlprozesses sehr ähnlich. Bei beiden Altpapieren ist bereits bei einem Eintrag an Mahlarbeit von 50 kWh/t ein Abfall der Durchreißfestigkeit festzustellen. Demgegenüber steigt die Zugfestigkeit bis zu einem spezifischen Energieeintag von 150 kWh/t stetig an. Der mit ca. 20 % höchste Anstieg der Zugfestigkeit wurde bei dem Mahlpunkt mit 50 kWh/t erreicht. Diese Festigkeitsverbesserung ist mit einer Erhöhung des Entwässerungswiderstandes um 10°SR verbunden.

Altpapier-Sorte	spez. Kantenbelastung	spez. Mahlarbeit	SR-Wert	Feinstoffanteil < 0,2 mm	Rohdichte	Luftdurchlässigkeit (Gurley)	Tensile-Index	Tear-Index
	[J/m]	[kWh/t]	[SR]	[%]	[g/cm³]	[s/100cm³]	[Nm/g]	[mNm²/g]
Altpapiersorte 1.02 - gemischtes Altpapier	0,3	0	55	33,0	0,56	30	31,9	6,89
	0,3	50	67	33,9	0,62	100	38,6	5,97
	0,3	100	76	38,3	0,64	299	43,0	4,51
	0,3	150	79	39,1	0,69	635	44,2	3,95
Altpapiersorte 1.11 - Deinking-Ware	0,3	0	62	35,9	0,54	49	31,0	6,32
	0,3	50	72	36,9	0,62	154	36,2	5,33
	0,3	100	78	38,3	0,55	360	39,5	4,33
	0,3	150	80	40,9	0,63	657	41,9	3,44

Tab. 3: Eigenschaftskennwerte der unter Low-Intensity-Bedingungen gemahlten Altpapiersorten 1.02 und 1.11

6.3 Energiebedarf bei Mahlung unter Standard- und Low-Intensity-Bedingungen

Die Beschreibung der Mahlintensität erfolgt mittels der auch als S-Faktor bezeichneten Kenngröße „Specific Energy per Impact“. Mittels des S-Faktors erfolgt in den im Arbeitspaket 4 entwickelten CAPD-Mahlmodellen die Bestimmung des für ein Mahlaggregat optimalen Arbeitsfensters, z.B. in Bezug auf den erforderlichen Energieeintrag.

Die Abb. 12 zeigt die mit Low Intensity-Garnituren erzielte Aufteilung der eingebrachten Mahlenergie in eine große Anzahl an energiearmen Messer-Faser – Kontakten. Diese große Anzahl mit geringer Kraftereinwirkung erfolgenden Zusammenstöße zwischen Fasern und Messer führen weniger zu einer Faserkürzung sondern begünstigen eine interne und externe Fibrillierung sowie die Bildung von Feinstoff. Daraus begründen sich eine Verbesserung der Festigkeitseigenschaften der Faserstoffe und die Erhöhung des Entwässerungswiderstandes.

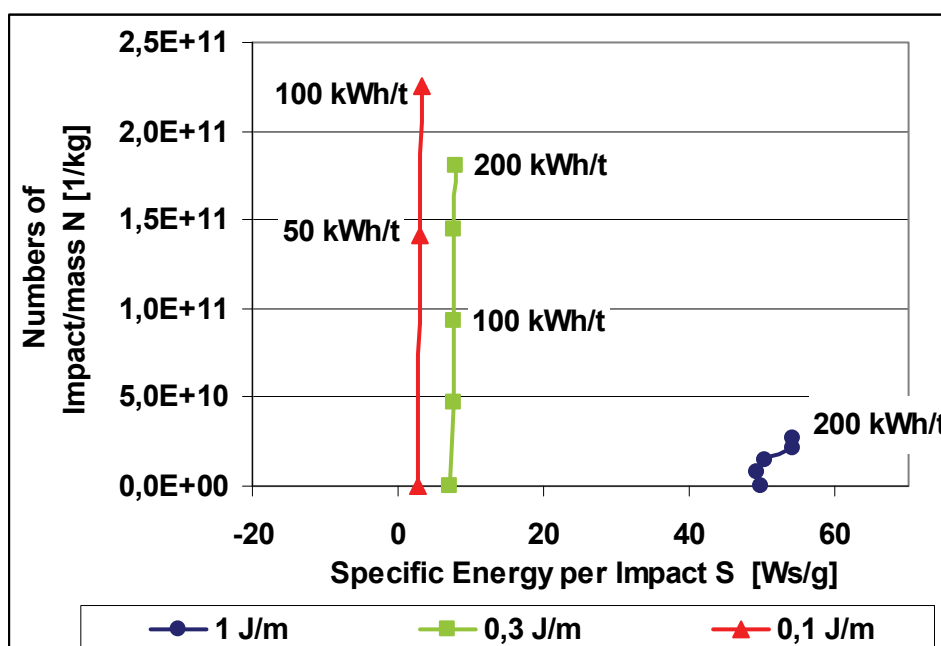


Abb. 12: Zusammenhang der intensitätskennwerte Numbers of Impact/mass N und Spezifische Energie pro Impact S bei unterschiedlichen Spezifischen Kantenbelastungen SEL und Mahlarbeiten W_{spez} .

Neben den positiven Einflüssen der Anwendung von Low-Intensity-Garnituren auf die papiertechnologischen Faserstoffkennwerte muss bei einer ganzheitlichen Beurteilung der Low-intensity-Mahlung die erforderliche effektive Mahlleistung und das Verhalten der Leerlaufleistung des Refiners mit betrachtet werden. Die nachfolgende Abb. 32 zeigt das Verhalten des elektrischen Wirkungsgrades des PTS-Technikumsrefiners bei der mit unterschiedlichen Mahlgarnituren vorgenommenen Einstellung von unterschiedlichen Mahlkantenbelastungen. Sehr schön ist erkennbar, dass unter Mahlbedingungen mit geringer spezifischer Kantenbelastung sich der Refinerwirkungsgrad deutlich verringert. So wurde bei Einstellung einer spezifischen Kantenbelastung von 0,1 J/m eine Reduzierung des elektrischen Wirkungsgrades um ca. 58 % festgestellt.

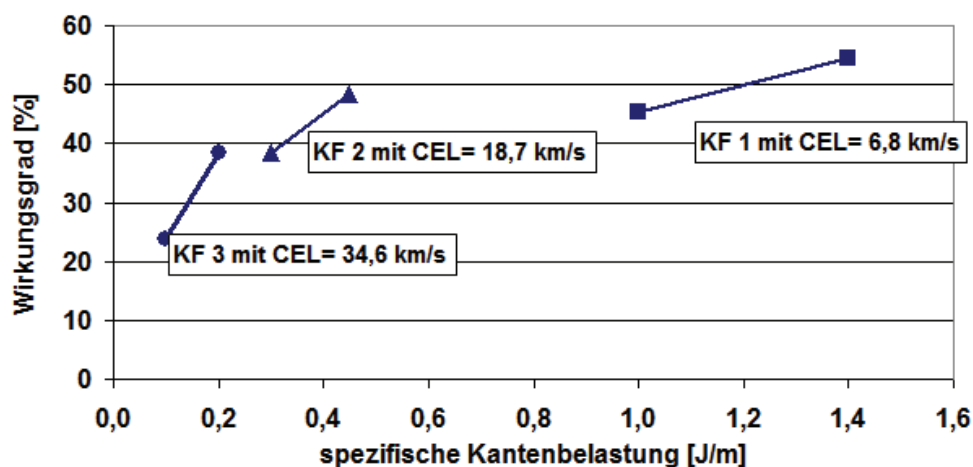


Abb. 13: Elektrischer Wirkungsgrad des PTS-Technikumsrefiners in Abhängigkeit von spezifischen Kantenbelastung

Um an einem Faserstoff bestimmte papiertechnologische Eigenschaftskennwerte zu entwickeln, ist bei einer Mahlung mit geringer Kantenbelastung im Vergleich zur Mahlung unter Standardbedingungen weniger Mahlergie erforderlich (Abb. 14 und Abb. 15).

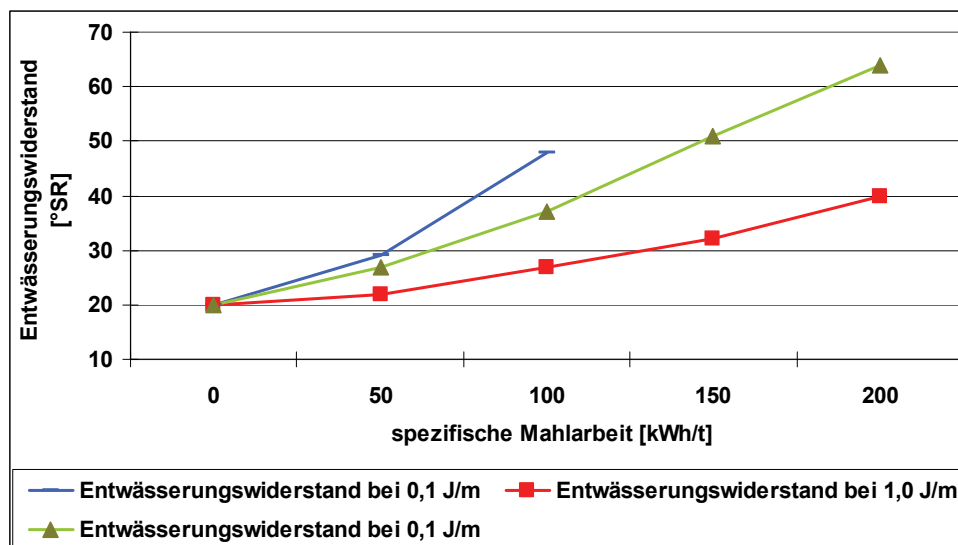


Abb. 14: Erforderliche spezifische Mahlarbeit zur Erzielung eines bestimmten Entwässerungswiderstandes bei unterschiedlichen spezifischen Kantenbelastungen (Eukalyptuszellstoff Santa Fe)

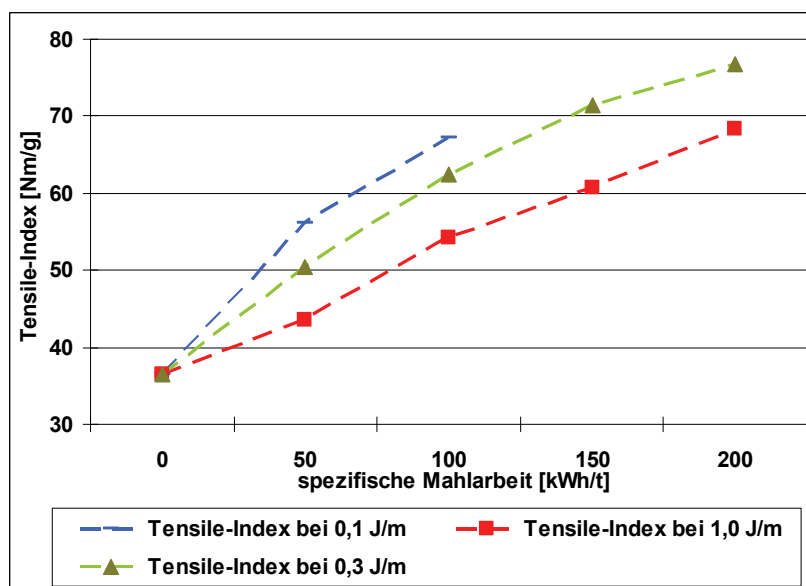


Abb. 15: Erforderliche spezifische Mahlarbeit zur Erzielung eines bestimmten Tensile-Indexwertes bei unterschiedlichen spezifischen Kantenbelastungen (Eukalyptuszellstoff Santa Fe)

Anhand der mit dem PTS-Technikumsrefiner aufgenommenen Mahlkurven und Prozessparameter wurde der Energieverbrauch des Refiners zur Erreichung eines bestimmten Zielwertes für den Tensile-Index bestimmt. In der Tab. 4 sind diese Energieverbrauchsdaten – hochgerechnet auf einen Faserstoffdurchsatz von einer Tonne pro Stunde - zusammengestellt. So kann in diesem Beispiel bereits bei einer Umstellung der Mahlkantenbelastung von 1,0 auf 0,3 J/m der Gesamtenergiebedarf der Mahlanlage um fast 28 % verringert werden.

Tab. 4: Beispiel für den Energieverbrauch in einer industriellen Mahlanlage bei Betriebsweisen mit unterschiedlichen spezifischen Kantenbelastungen

Zielwert:		Tensile-Index von 50 Nm/g		
Garnitur		KF 3	KF 2	KF 1
spezifische Kantenbelastung:	J/m	0,1	0,3	1
erforderliche spezifische Mahlarbeit	kWh/t	40	50	85
Leerlaufleistung des Refiners	kW	128	80	100
Gesamtleistung des Refiners	kW	168	130	185

7 Weiterentwicklungen numerischer Mahlmodelle

7.1 Modellierung des Zusammenhanges zwischen S und den primären Mahleffekten

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

1. Auf Basis der Kennwerte der verwendeten Mahlgarnituren und der Ergebnisse der fasermorphologischen Prüfung der ungemahlene Faserstoffe erfolgte die Berechnung der spezifischen Kontaktenergie S 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 auf Basis physikalischer Modellansätze eine mehrparametrische Klasse von Funktionen bereitgestellt. Die Funktionsparameter werden mittels Regression bestimmt.
3. Der Zusammenhang zwischen Funktionsparameter und Kontaktenergie S wird schließlich ebenfalls über eine mehrparametrische Funktion hergestellt, in die (neben S) weitere Kenngrößen des eingesetzten Faserstoffes eingehen.

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. 16).

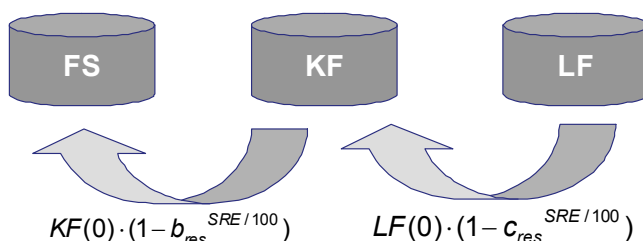


Abb. 16: Schema zur Dynamik der Masseveränderung der Faserfraktionen

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 mahlfest) und 0 (keinerlei Mahlwiderstand) angenommen werden können.

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

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

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

Die Parameter b_{res} und c_{res} können mit Methoden der nichtlinearen Regression berechnet werden. Stellt man zu den spezifischen Kontaktenergien S bzw. S_{LF} die Werte von b_{res} und c_{res} gegenüber, so fällt auf, dass die AP-Stoffe trotz des relativ hohen Anteils an anorganischen Bestandteilen bezüglich der Dynamik der Veränderung von Feinstoff- und Langfaseranteil kein signifikant anderes Mahlverhalten zeigen als Langfaserzellstoffe (Abb. 17 und Abb. 18) ohne anorganische Bestandteile.

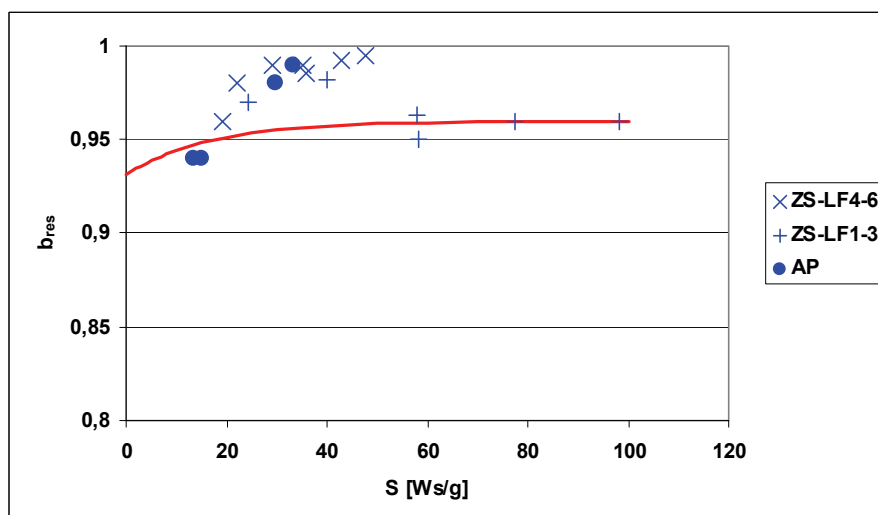


Abb. 17: Zusammenhang zwischen spezifischer Kontaktenergie S und b_{res} (rote Kurve: durch das Modell (7-4) prognostizierte Abhängigkeit bei $LF=30\%$)

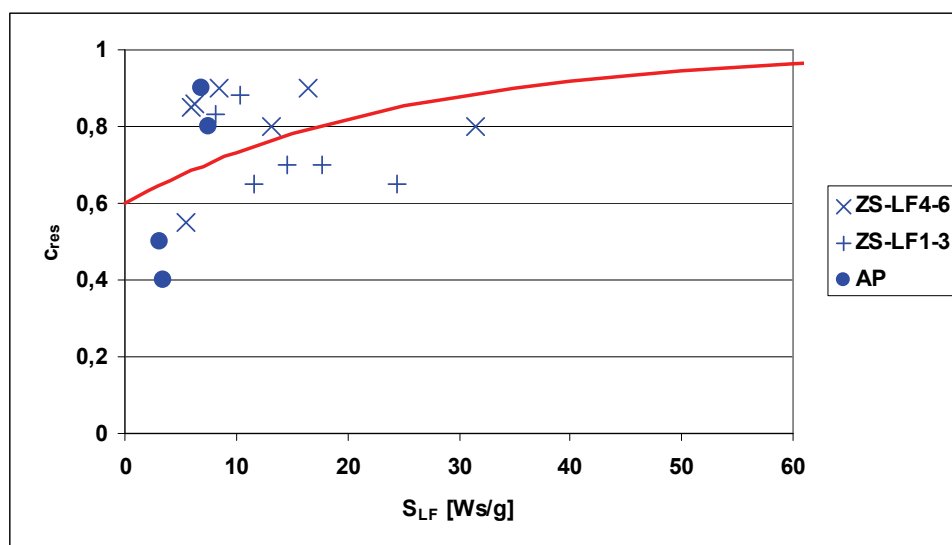


Abb. 18: Zusammenhang zwischen spezifischer Kontaktenergie S_{LF} und c_{res} für Faserstoffe mit einem hohen Langfaseranteil (rote Kurve: durch das Modell (7-5) prognostizierte Abhängigkeit)

Der Faktor b_{res} selbst ist also nur 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:

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

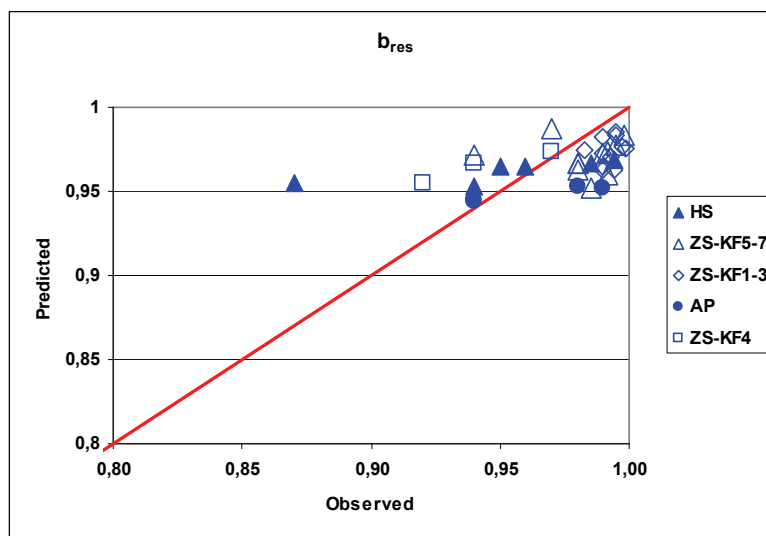


Abb. 19: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für b_{res}

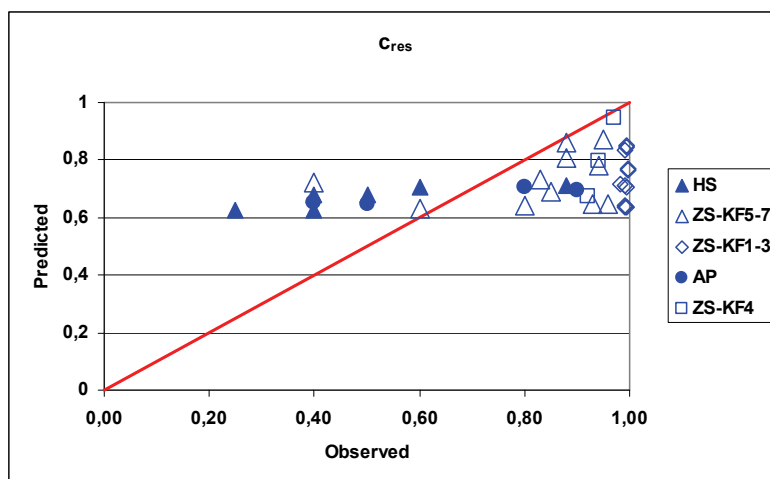


Abb. 20: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für c_{res}

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

Eine nähere Betrachtung der Faserfraktionen 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 sollen alle diese Mittelwerte als konstant während der Mahlung angenommen werden. Der Fehler, der sich aus dieser Annahme für die mittlere Faserlänge der Faserfraktion (d.h. Kurz- und Langfaserfraktion gemeinsam) ergibt, kann unter Verwendung von Formel

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

als vernachlässigbar klein abgeleitet werden:

Tabelle 5: Einfluss der mittleren Faserlänge FL_{LF} der Langfaserfraktion LF auf die (numerische) mittlere Faserlänge FL von Lang- und Kurzfasern

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

7.1.3 Faserflexibilität

Bereits lange bekannt ist die Wirkung der Mahlung auf die Faserflexibilität [7]. Insbesondere durch Reduktion des E-Moduls der Faserwand, wahrscheinlich ausgelöst durch Delaminierung einzelner Schichten, erhöht sich die Faserflexibilität.

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

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

Sinngemäß zu b_{res} und c_{res} kann auch d_{res} als Maß für den Widerstand der Fasern gegen Flexibilisierung betrachtet werden. In Anhang 1 sind durch Regression geschätzte Werte d_{res} für alle Mahlreihen zusammengefasst.

Ebenfalls analog zu b_{res} und c_{res} ist auch d_{res} eine Funktion des Langfaseranteils (vor der Mahlung) und der spezifischen Kontaktenergie S . Darüber hinaus ist aber auch eine Abhängigkeit vom Anteil anorganischer Bestandteile ASH575 zu beobachten. Der in (7-4) und (7-5) verwendete Funktionsansatz wird in modifizierter Form gemäß (7-8) verwendet

$$d_{res} = \left(\frac{A_{\delta}}{1 + E_{\delta} \cdot ASH_{575}} \cdot e^{B_{\delta} \cdot S} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{LF}{C_{\delta} \cdot LF + D_{\delta}} \right) \quad (7-8)$$

Folgende beste Werte wurden mittels Regressionen ermittelt:

- $A_{\delta} = -0,12$, $B_{\delta} = 0,03$, $C_{\delta} = 12,0$, $D_{\delta} = 1,2$, $E_{\delta} = 100$

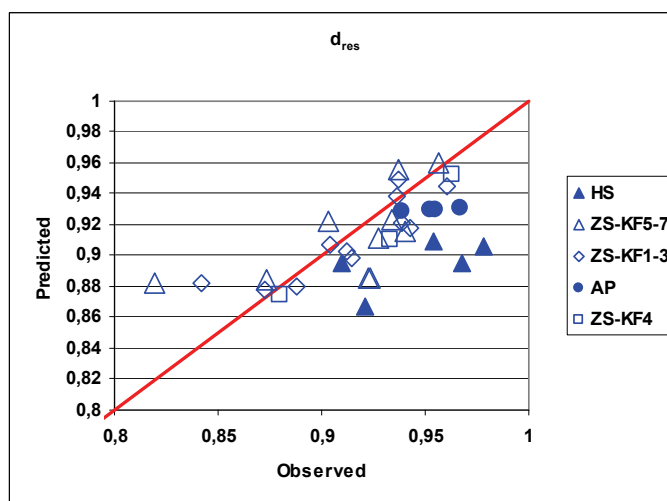


Abb. 21: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für d_{res}

7.1.4 WRV und Bindungsfestigkeit

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 zeigen. Eine direkte Proportionalität zwischen der aufgewandten spezifischen Mahlenergie SRE und der resultierenden Änderung von Bindungsfestigkeit b und Wasserrückhaltevermögen WRV ist naheliegend. Es werden deshalb die Modellansätze (7-9) und (7-10) verwendet.

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

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

Die mittels Regression für alle Mahlreihen geschätzten Parameter c_{IntFib} und d_{IntFib} sind Anhang 1 zu entnehmen.

Es sind c_b und c_{WRV} eine Funktion des Langfaser-Anteils (vor der Mahlung), der spezifischen Kontaktenergie S und des Anteils anorganischer Bestandteile ASH_{575} mit

$$c_{IntFib} = \frac{A_b}{1 + E_b \cdot ASH_{575}} \cdot e^{B_b \cdot S} \cdot \left(1 + \frac{LF}{C_b \cdot LF + D_b} \right) \quad (7-11)$$

$$d_{IntFib} = \frac{A_{WRV}}{1 + E_{WRV} \cdot ASH_{575}} \cdot e^{B_{WRV} \cdot S} \cdot \left(1 + \frac{LF}{C_{WRV} \cdot LF + D_{WRV}} \right) \quad (7-12)$$

Folgende beste Werte wurden mittels Regressionen ermittelt:

- $A_b = 0,05$, $B_b = -0,015$, $C_b = 0,26$, $D_b = 0,06$, $E_b = 10$
- $A_{WRV} = 0,4$, $B_{WRV} = -0,015$, $C_{WRV} = 0,40$, $D_{WRV} = 0,03$, $E_{WRV} = 10$

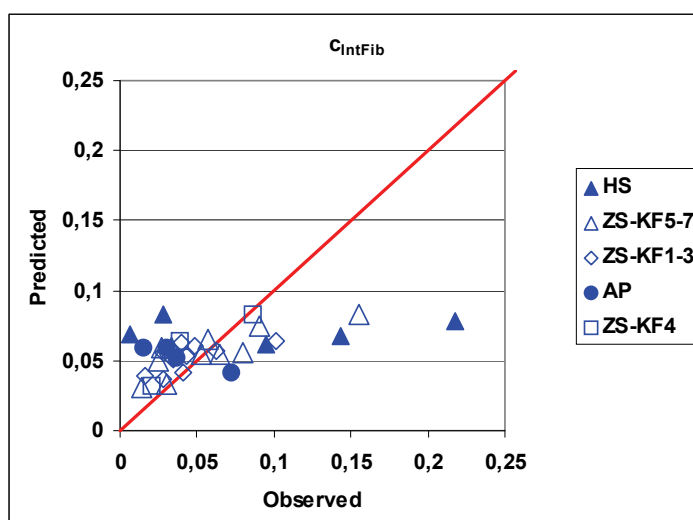


Abb. 22: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für c_{IntFib}

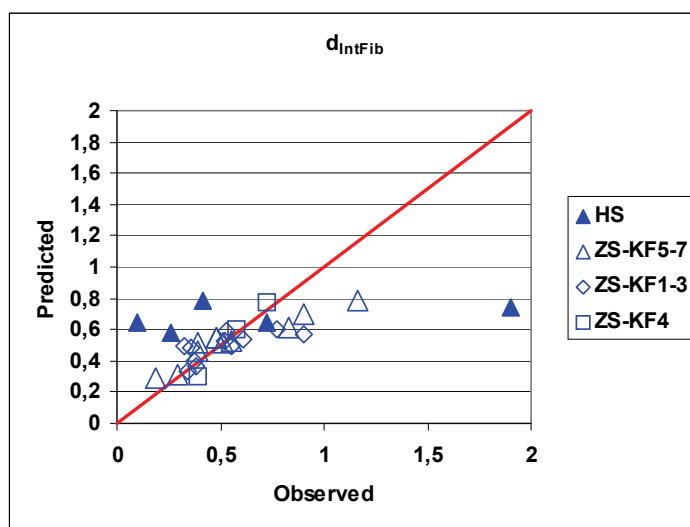


Abb. 23: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für d_{IntFib}

7.1.5 Entwässerungswiderstand und spezifische Oberfläche

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

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

wobei $SSA_{FS} \sim 10m^2/g$ 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.

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 ein Maß für die „Geschwindigkeit“ der äußeren Fibrillierung. Die für alle Mahltreihen mittels Regression geschätzten Werte für c_{ExtFib} sind in Anhang 1 zusammengefasst.

Es sind c_{ExtFib} eine Funktion des Langfaser-Anteils (vor der Mahlung), der spezifischen Kontaktenergie S und des Anteil anorganischer Bestandteile ASH_{575} mit

$$c_{ExtFib} = \frac{A_{SSA}}{1 + F_{SSA} \cdot ASH_{575}} \cdot (e^{B_{SSA} \cdot S} + E_{SSA}) \cdot \left(1 + \frac{LF}{C_{SSA} \cdot LF + D_{SSA}} \right) \tag{7-15}$$

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

- $A_{SSA}= 0,013, B_{SSA} = -0,1, C_{SSA}= 0,28, D_{SSA} = 0,02, E_{SSA}= 0,5, F_{SSA}= 10$

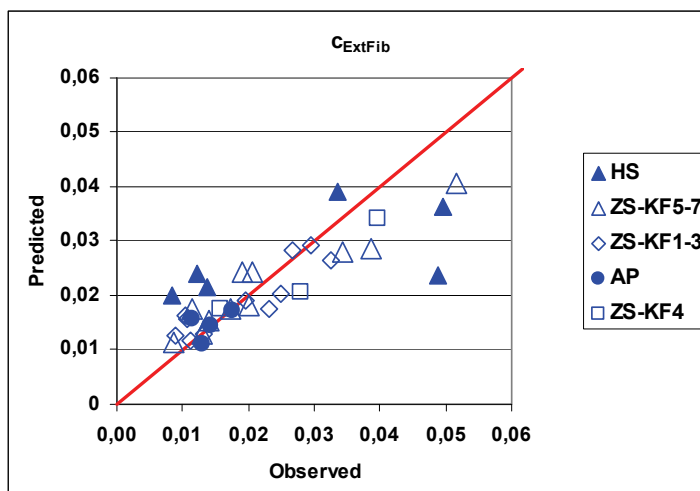


Abb. 24: Vergleich der beobachteten und prognostizierten Werte für c_{ExtFib}

Es ist zu berücksichtigen, dass neben der äußeren Fibrillierung auch die Faserdimensionen die spezifische Oberfläche beeinflussen.

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

sowie für das Volumen der Faserwand

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

Somit folgt für deren „glatte“ spezifische Oberfläche

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

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.

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

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

bzw. umgekehrt

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

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

7.1.6 Lichtstreckoeffizient

Der spezifische Lichtstreckoeffizient S nach KUBELKA und MUNK wird häufig als Maß der im Material verfügbaren Faser-Luft-Grenzflächen betrachtet. HASELTON [8] 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.

Für eine als Hohlzylinder angenommene Faser gilt für die äußere Oberfläche-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 Bewertung der Modellgüte bezüglich Mahlungen am PTS-Versuchsrefiner (Validierung 1)

Tabelle 6: Morphologische Eigenschaften der Ausgangsfaserstoffe für die Validierung 1

	Feinstoff			Kurzfaserfraktion				Langfaserfraktion			
	FS_1	FS_2	FL	KF	FL	WI	CWT	LF	FL	WI	CWT
	%	%	μm	%	μm	μm	μm	%	μm	μm	μm
ZS-KF3	3,2	0,0	183	94,5	636	16,1	3,2	2,2	808	16,7	3,6
HS-KF1	3,2	3,2	113	88,9	606	23,6	5,1	4,8	902	26,7	6,5

Tabelle 7: Chemische und Physikalische Eigenschaften der Ausgangsfaserstoffe für die Validierung 1

	ASH_{575}	SR	WRV	δ	FZ	b	KY
	%	°	%		MPa	MPa	m^2/kg
ZS-KF3	3,2	0,0	183	94,5	636	16,1	3,2
HS-KF1	3,2	3,2	113	88,9	606	23,6	5,1

SR für ZS-KF3

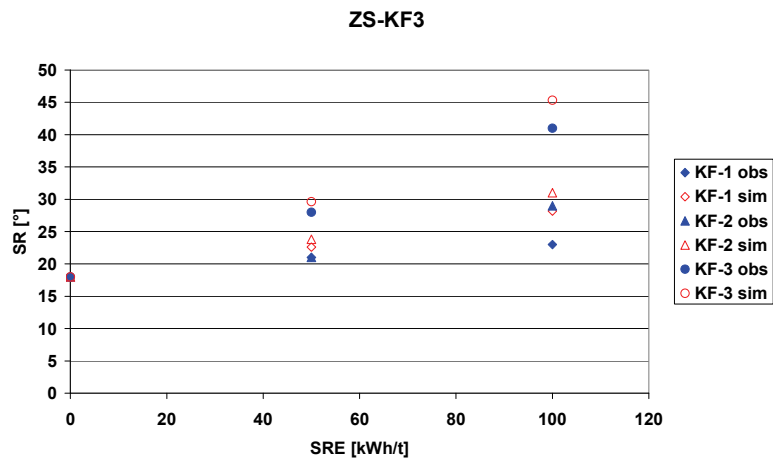


Abb. 25: Entwicklung des SR-Wertes für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

WRV für ZS-KF3

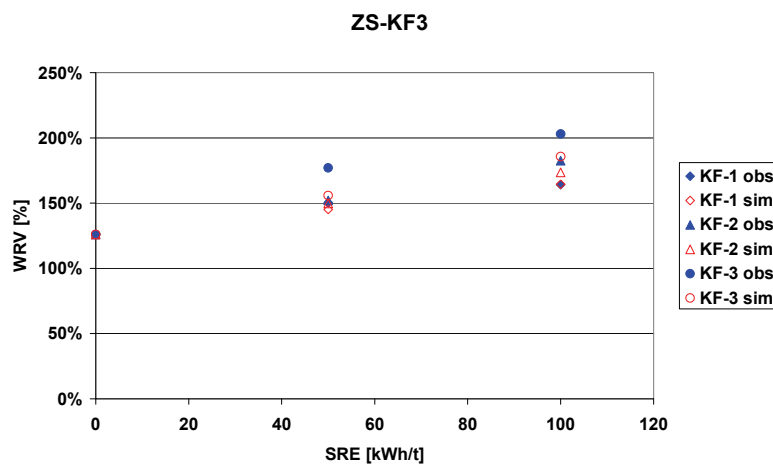


Abb. 26: Entwicklung des WRV für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

Scheinbare Dichte für ZS-KF3

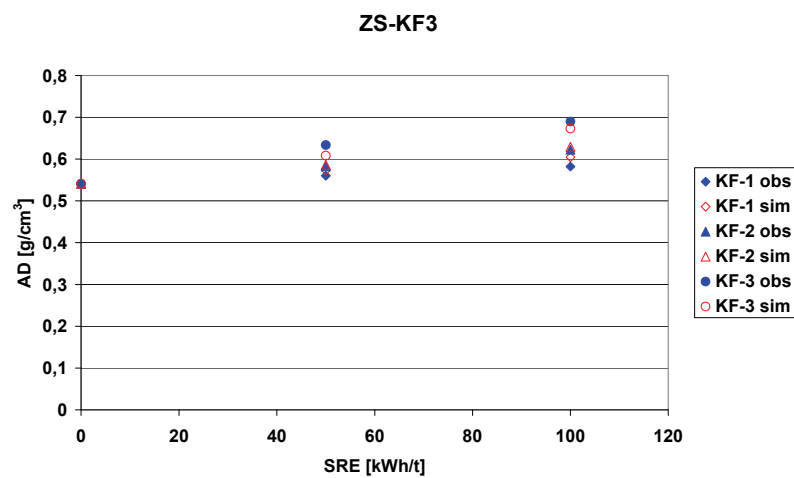


Abb. 27: Entwicklung der scheinbaren Dichte für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

Tensile-Index für ZS-KF3

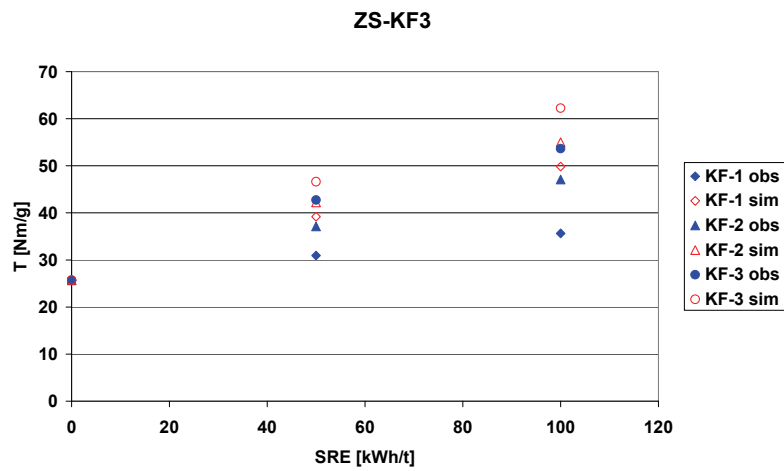


Abb. 28: Entwicklung der Tensile-Index für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

Opazität für ZS-KF3

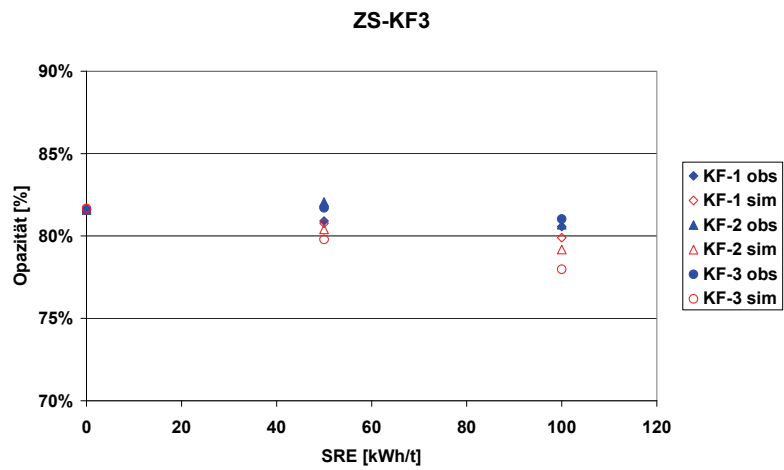


Abb. 29: Entwicklung der Opazität für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

Luftdurchlässigkeit für ZS-KF3

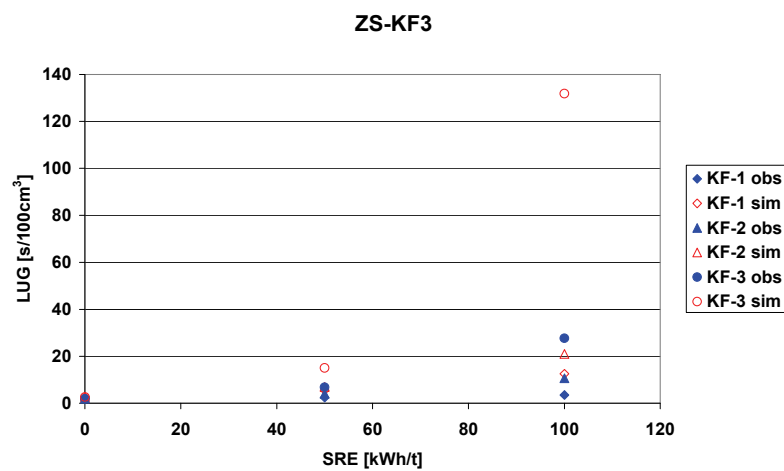


Abb. 30: Entwicklung der Luftdurchlässigkeit (GURLEY) für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

SR für HS-KF1

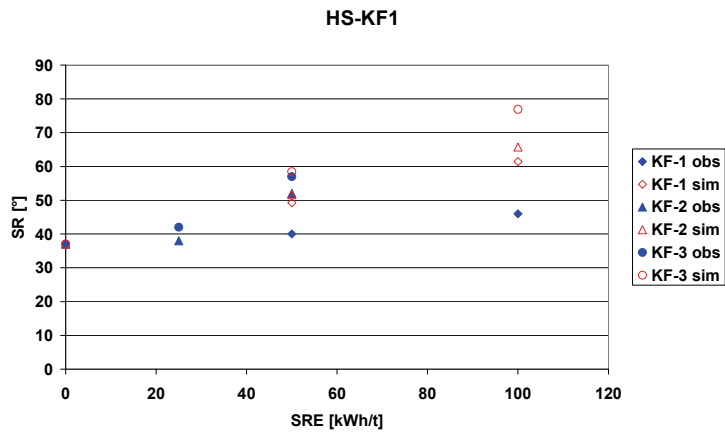


Abb. 31: Entwicklung des SR-Wertes für HS-KF1 (beobachtet vs. simuliert)

WRV für HS-KF1

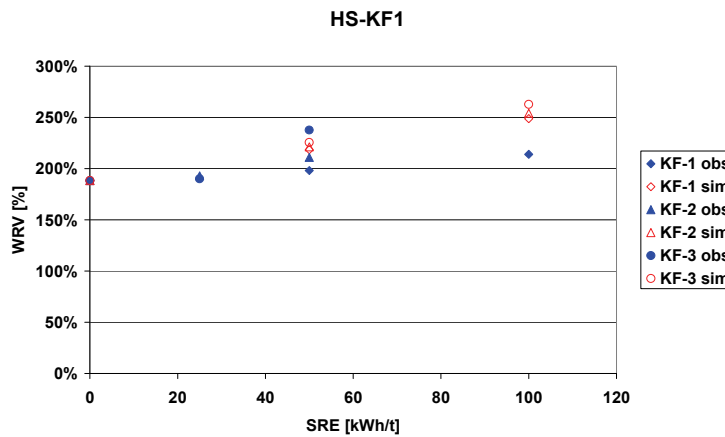


Abb. 32: Entwicklung des WRV für HS-KF1 (beobachtet vs. simuliert)

Scheinbare Dichte für HS-KF1

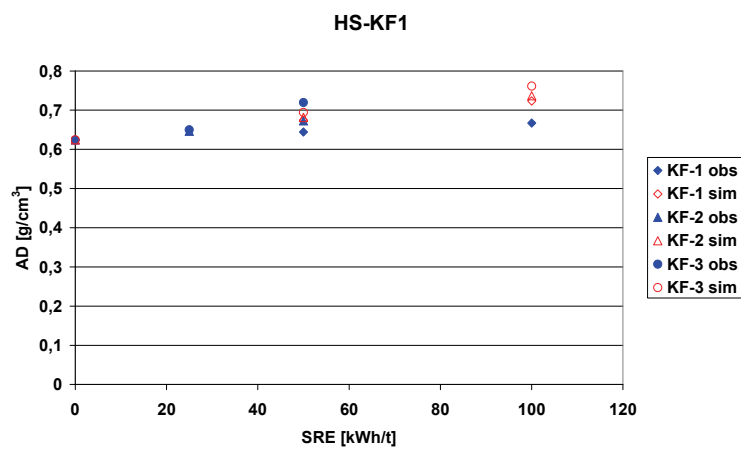


Abb. 33: Entwicklung der scheinbaren Dichte für HS-KF1 (beobachtet vs. simuliert)

Tensile-Index für HS-KF1

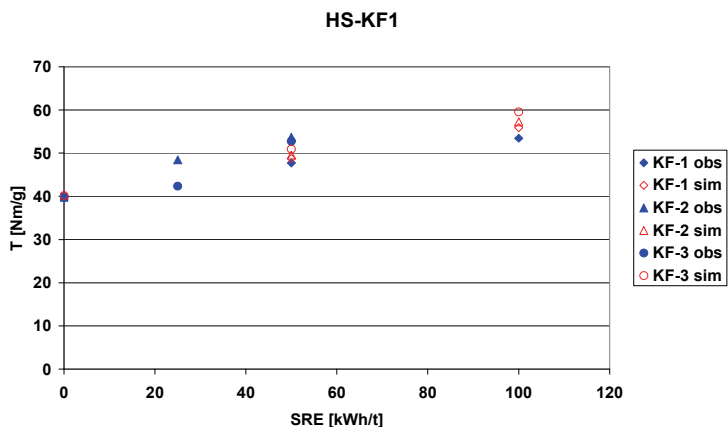


Abb. 34: Entwicklung des Tensile-Index für HS-KF1 (beobachtet vs. simuliert)

Opazität für HS-KF1

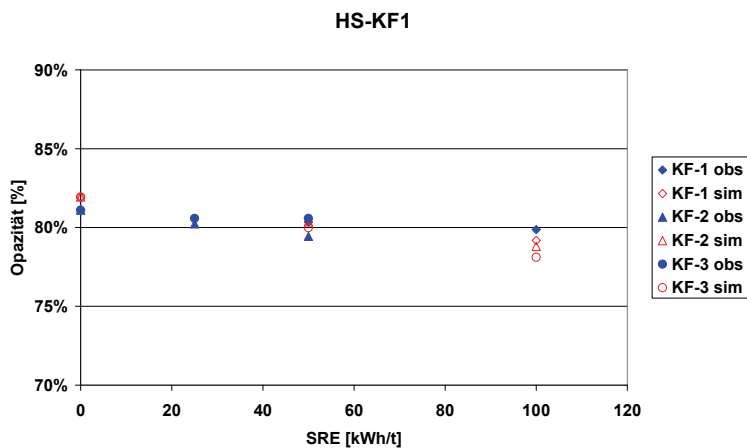


Abb. 35: Entwicklung der Opazität für HS-KF1 (beobachtet vs. simuliert)

Luftdurchlässigkeit für HS-KF1

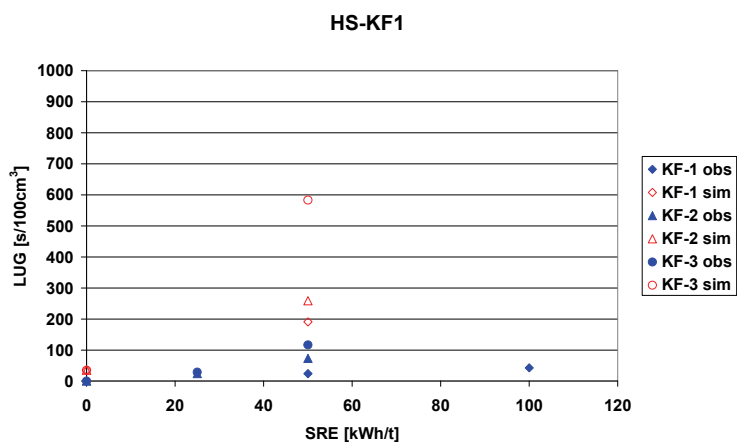


Abb. 36: Entwicklung der Luftdurchlässigkeit (GURLEY) für HS-KF1 (beobachtet vs. simuliert)

Bewertung des Trendverhaltens

Für beide in der Validierung 1 verwendeten Faserstoffsorten stimmt das Trendverhalten bei Variation der spezifischen Mahlenergie und der Mahlgarnitur zwischen Prognose und Beobachtung über alle beobachteten Suspensions- und Papiereigenschaften vollständig überein. Eine Einschätzung systematischer Abweichungen zwischen Prognose und Beobachtung der einzelnen Mahlreihen enthält Tabelle 8

Bewertung systematischer Abweichungen

Tabelle 8: Bewertung systematischer Abweichungen

Eigenschaft	Bemerkung
SR-Wert (Abb. 25, Abb. 31)	Systematische Überschätzung um ca. 10%
WRV (Abb. 26, Abb. 32)	Spreizung der prognostizierten Werte bei Variation der Mahlgarnitur geringer als beobachtet
Scheinbare Dichte (Abb. 27, Abb. 33)	Spreizung der prognostizierten Werte bei Variation der Mahlgarnitur in der Prognose geringer als beobachtet
Tensile-Index (Abb. 28, Abb. 34)	Systematische Überschätzung um ca. 15% nur für ZS-KF3;
Opazität (Abb. 29, Abb. 35)	Systematische Unterschätzung um ca. 5% für nur für ZS-KF3
Luftdurchlässigkeit (Abb. 30, Abb. 36)	Systematische Überschätzung

7.3 Bewertung der Modellgüte bezüglich Mahlungen an industriellen Mahlanlagen (Validierung 2)

Zur Überprüfung der Modellgüte unter Praxisbedingungen liegen Vergleichsdaten zur Mahlung aus zwei Unternehmen (nachfolgend mit D und E bezeichnet) vor. Unternehmen E produziert Wellpappenrohapiere auf Basis 100% Altpapiereinsatz. Unternehmen D verwendet den Zellstoff ZS-KF3 zur Erzeugung von Spezialpapieren.

Charakterisierung der Mahlstrategie

Für vergleichende Untersuchungen wurde in den Unternehmen ein Prozessabschnitt der Gesamtmahlung ausgewählt, der sich durch die Hintereinanderschaltung zweier Refiner (Abb. 37) auszeichnet. In dem Unternehmen E wird diese Schaltungsvariante für die Stoffaufbereitung der Deckschicht des Wellpappenrohapiers verwendet. In Unternehmen D werden 3 solcher Refiner-Paare parallel verwendet.

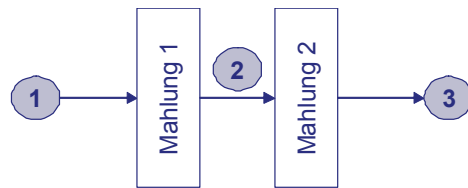


Abb. 37: Refinerschaltung und zugehörige Messstellen

Charakterisierung der verwendeten Mahlgarnituren

Tabelle 9: Kennwerte der in den Unternehmen D und E eingesetzten Mahlgarnituren

	Einheit	4	5	6	7
G	[mm]	4	4	3	4
D	[mm]	6	6	6	6
W	[mm]	2	2	2	3
L_M	[mm]	348	336	348	348
$n_R = n_S$		300	300	508	340
R_1	[mm]	170	170	170	170
R_2	[mm]	457	457	457	457
θ	[°]	90	90	90	90
φ_r	[°]	2	2	20	30

Die Werte für L_M , n_r , n_s und R_1 wurden auf Basis verfügbarer Angaben der sekundlichen Schnittlänge CEL geschätzt.

Fahrweisen der Mahlung

Das Unternehmen D nutzt für die Mahlung zwei verschiedene Mahlgarnituren: für die Mahlung 1 die Garnitur Nr.4 und für die Mahlung 2 die Garnitur Nr.5. Die Bezeichnung dieser Betriebsvarianten erfolgt im Rahmen dieser Arbeit als **Fahrweise D1**.

Das Unternehmen E setzt ebenfalls zwei verschiedene Mahlgarnituren – für die Mahlung 1 kommt die Garnitur Nr.6 und für die Mahlung 2 die Garnitur Nr.7 – zum Einsatz. Diese Schaltung wird mit **Fahrweise E1** bezeichnet.

Angaben zu Mengen und Energieeinsätzen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Mengen und Energieeinsätze

Tabelle 10: Mengen und Energieeinsätze im Rahmen der untersuchten Fahrweisen der Refiner

Fahrweise		D1	E1
Garnitur		4/5	6/7
c_F	%	5,4	4,5
V	l/min	1400	3000
F	t/h	4,5	8,7
P_{NL}	kW	100 / 60	135 / 135
P_{eff}	kW	360 / 100	315 / 315
SRE	kWh/t	100,3 / 34,7	45 / 45
SEL	Ws/m	1,46 / 0,41	0,44 / 0,98
CEL	km/s	243 / 234	718 / 322
ω	min ⁻¹	465 / 465	480 / 480

Morphologische Eigenschaften der Ausgangsfaserstoffe

Tabelle 11: Morphologische Eigenschaften der Ausgangsfaserstoffe für die Validierung 2

	Feinstoff			Kurzfaserfraktion				Langfaserfraktion			
	$FS1$	$FS2$	FL	KF	FL	WI	CWT	LF	FL	WI	CWT
	%	%	μm	%	μm	μm	μm	%	μm	μm	μm
ZS-KF3	3,2	0,0	183	94,5	636	16,1	3,2	2,2	808	16,7	3,6
AP3	3,7	0,0	135	49,8	480	19,5	4,5	28,4	1350	26,8	6,6
AP4	3,8	0,0	134	52,2	538	20,9	4,8	18,6	1069	24,9	6,1

Chemische und Physikalische Eigenschaften der Ausgangsfaserstoffe

Tabelle 12: Chemische und Physikalische Eigenschaften der Ausgangsfaserstoffe für die Validierung 2

	ASH_{575}	SR	WRV	δ	FZ	b	KY
	%	°	%		MPa	MPa	m ² /kg
ZS-KF3		18,0	126,0	0,65	596,4	4,1	0,07
AP3	18,0	25,0	150,0	0,69	400,0	16,4	10,50
AP4	25,5	50,0	180,0	0,67	500,0	19,3	2,70

7.3.1 Unternehmen D

Ergebnisse Unternehmen D

Aus den Abbildungen Abb. 38 bis Abb. 42 ist ersichtlich, dass für das Unternehmen D (Fahrweise D1) sehr gute Übereinstimmungen zwischen Messungen vor Ort und mittels Simulation prognostizierter Werte festzustellen sind. Kleine systematische Abweichungen sind eventuell darauf zurückzuführen, dass die durch das Unternehmen D verwendete Charge des Zellstoffes ZS-KF3 leicht abweichende Eigenschaften gegenüber den in AP2 verwendeten Zellstoff der gleichen Marke besitzt (Tabelle 11 und Tabelle 12).

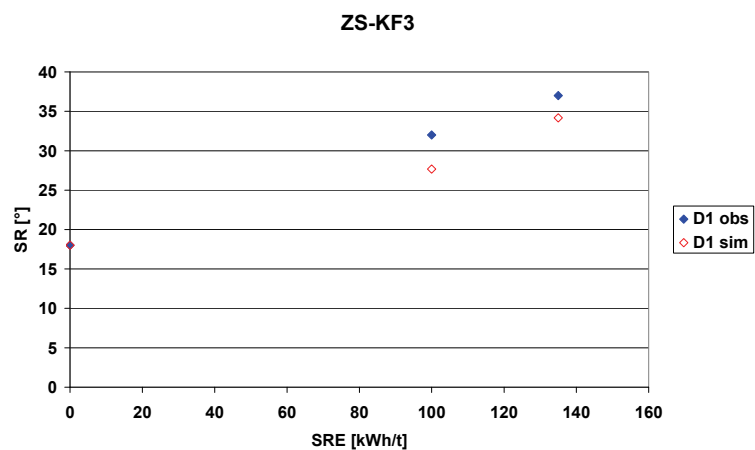


Abb. 38: Entwicklung des SR-Wertes für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

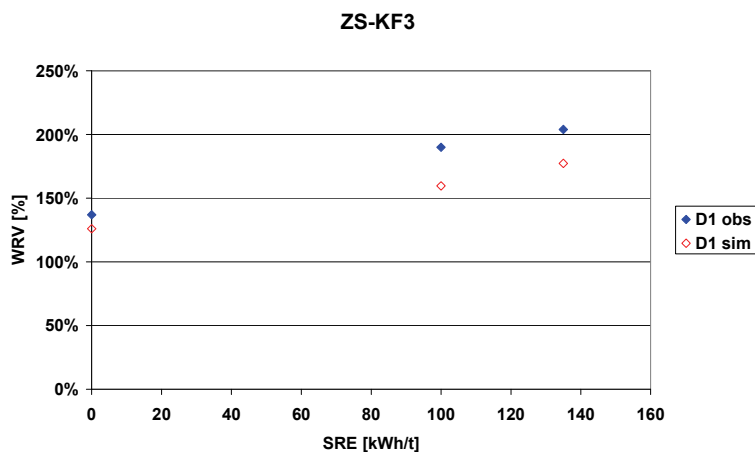


Abb. 39: Entwicklung des WRV für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

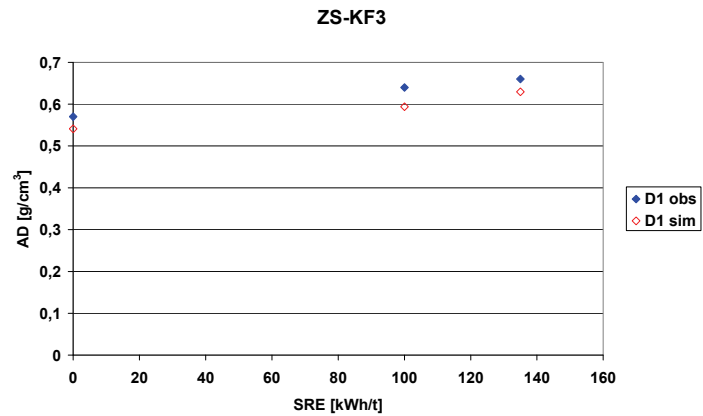


Abb. 40: Entwicklung der scheinbaren Dichte für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

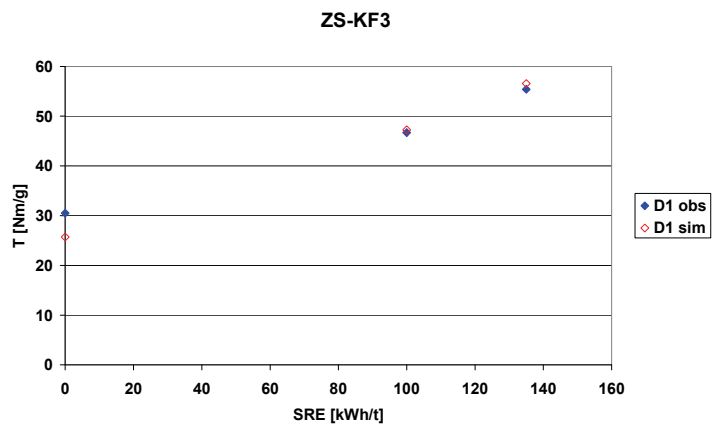


Abb. 41: Entwicklung des Tensile-Index für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

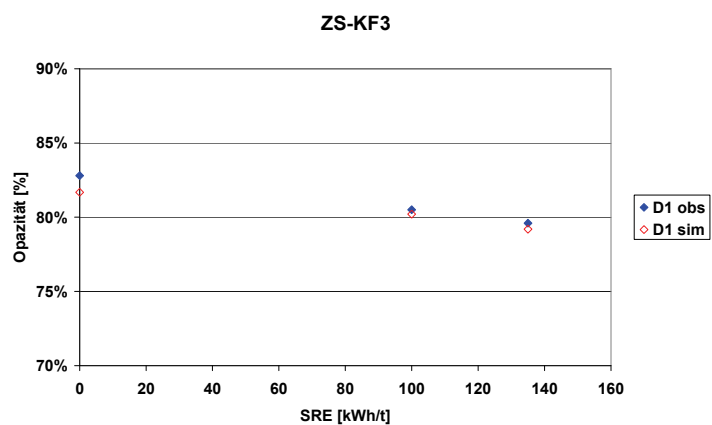


Abb. 42: Entwicklung der Opazität für ZS-KF3 (beobachtet vs. simuliert)

7.3.2 Unternehmen E

Ergebnisse Unternehmen E

Die Abbildungen Abb. 43 bis Abb. 46 belegen, dass mit dem auf Basis der Mahlversuche an der PTS abgeleiteten Mahlmodells auch das Mahlverhalten des Faserstoffes AP4 im Rahmen der Refinerfahrweise E1 des Unternehmens E nachgebildet werden kann.

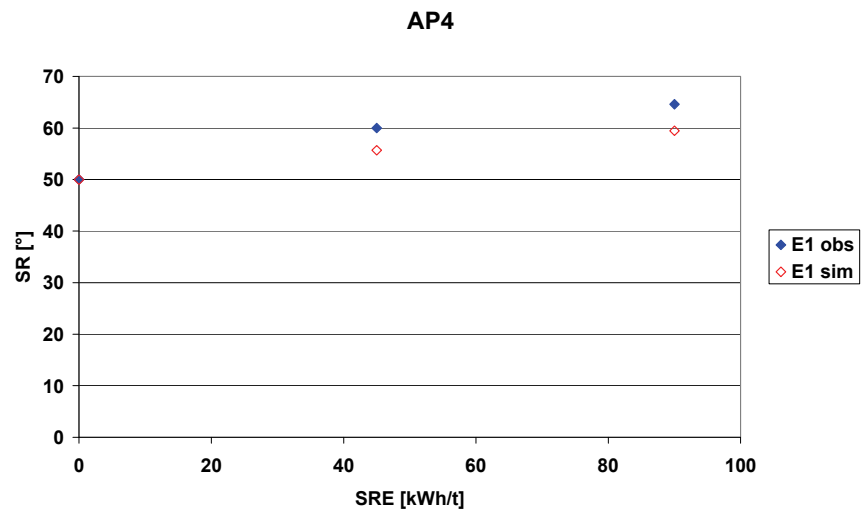


Abb. 43: Entwicklung des SR-Wertes für AP4 (beobachtet vs. simuliert)

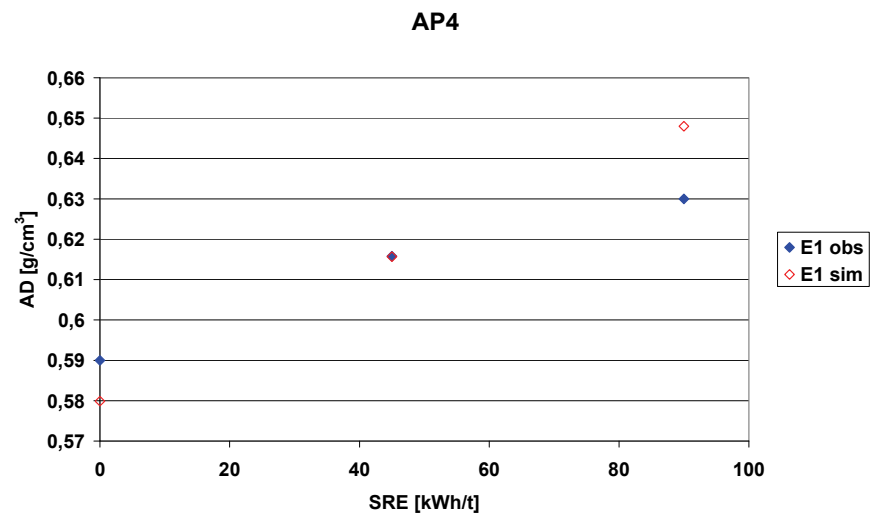


Abb. 44: Entwicklung der scheinbaren Dichte für AP4 (beobachtet vs. simuliert)

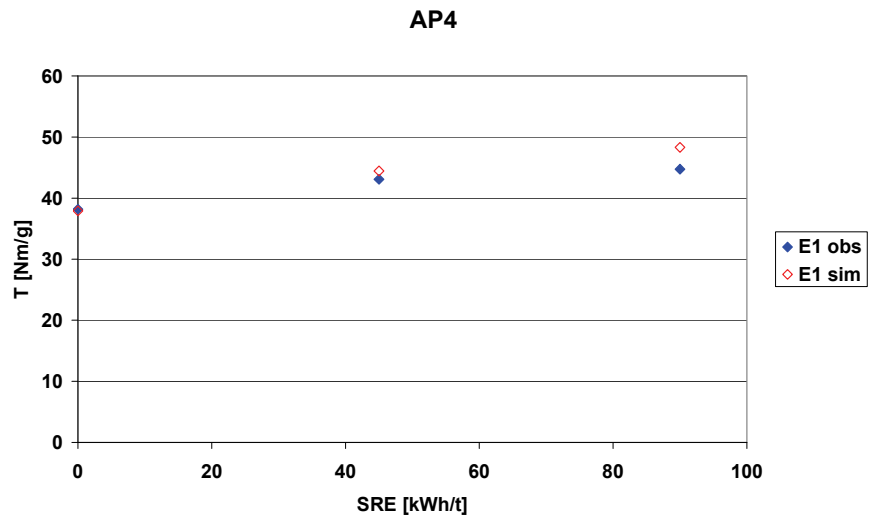


Abb. 45: Entwicklung des Tensile-Index für AP4 (beobachtet vs. simuliert)

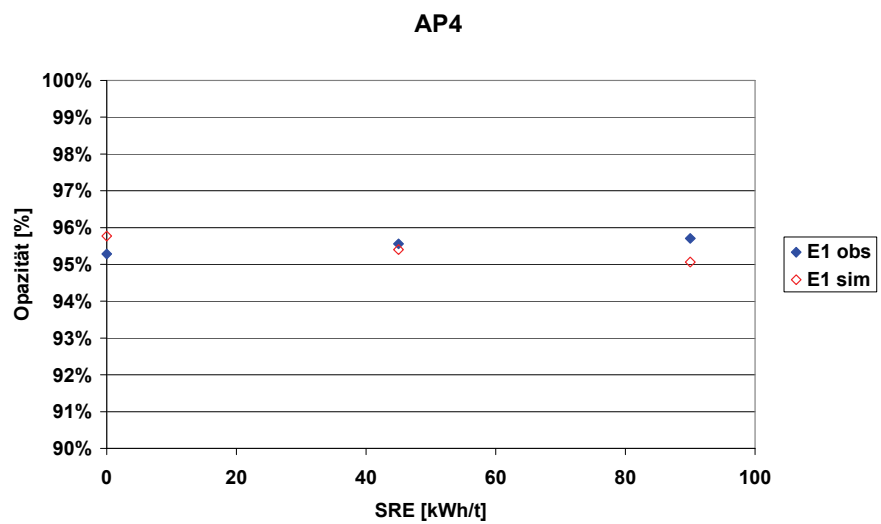


Abb. 46: Entwicklung der Opazität für AP4 (beobachtet vs. simuliert)

Kontakt:

Dr. Gert Meinel
Tel. 03529/551-630
gert.meinel@ptspaper.de

Constance Seidemann
Tel. 03529/551-636
constance.seidemann@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

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Symbol [Maßeinheit]	Bedeutung
λ	Parameter der Pull-Out-Wahrscheinlichkeit
η	Viskosität
ε	Porosität
α_F [%]	Anteil zerrissener Fasern (Fracture-Wahrscheinlichkeit)
α_N [%]	Anteil freier Faserenden
α_P [%]	Anteil herausgezogener Fasern (Pull-Out-Wahrscheinlichkeit)
ρ_W [g/cm ³]	Dichte des Faserwandmaterials (Zellulose)
$2mga$	doppelt massegewichtete Mischungsregel
A_B [μm ²]	gebundene Faseroberfläche einer Elementarzelle
AD [g/cm ³]	Scheinbare Blattdichte
AD_o [g/cm ³]	Scheinbare Blattdichte (Feinstofffrei)
AP	Arbeitspaket
ASH [%]	Anteil anorganischer Stoffe (am Gesamtfaserstoff)
ASH_{ret} [%]	Anteil retendierte anorganischer Stoffe (am Gesamtfaserstoff)
A_T [μm ²]	Gesamtfaseroberfläche einer Elementarzelle
b [MPa]	mittlere Bindungsfestigkeit der Fasern
CWT_{KF} [μm]	mittlere Faserwanddicke der Langfaser-Fraktion
CWT_{LF} [μm]	mittlere Faserwanddicke der Langfaser-Fraktion
d [μm]	mittlere Faserabstand im Fasernetzwerk
D [μm]	mittlerer Durchmesser einer kollabierten Faser
DIP	De-inked Pulp
E	Papiereigenschaft
e	Fasermerkmal
FL_{FS} [μm]	mittlere Faserlänge der Feinstoff-Fraktion
FL_{KF} [μm]	mittlere Faserlänge der Langfaser-Fraktion
FL_{LF} [μm]	mittlere Faserlänge der Langfaser-Fraktion
FS [%]	Feinstoffanteil (am Gesamtfaserstoff)
FS_{ret} [%]	Anteil retendierter organischer Feinstoffe (am Gesamtfaserstoff)
F_z [MPa]	mittlere Zugfestigkeit der Fasern
H [μm]	mittlere Höhe einer kollabierten Faser
KF [%]	Kurzfasernanteil (am Gesamtfaserstoff)
K_x, K_y, K_z	(spektrale) Lichtabsorptionskoeffizienten

Glossar (Fortsetzung)	L^*, a^*, b^*	CIE-Farbkoordinaten
	LF [%]	Langfaseranteil (am Gesamtfaserstoff)
	LWC	Light weight coated
	LUG	Luftdurchlässigkeit (nach GURLEY)
	m_{Faser}	(mittlere) Masse einer Faser
	mga	einfache massegewichtete Mischungsregel
	$n.m.$	nicht messbar
	$NBSK$	Northern Bleached Softwood Kraft Pulp
	O [%]	Opazität
	P [μm]	mittlerer Umfang einer kollabierten Faser
	PCC	Precipitated calcium carbonate (gefälltes Calciumcarbonat)
	PLS	Partial Least Squares (Methode der kleinsten Fehlerquadrate)
	R_{457} [%]	Weißgrad
	SC	Super calendered (satiniert; super-kalandriert)
	SEL [Ws/m]	spezifische Mahlkantenbelastung
	SR [$^\circ$]	Entwässerungswiderstand (nach SCHOPPER-RIEGLER)
	SSA [m^2/g]	massebezogene spezifische Faseroberfläche
	SSA_V [m^2/m^3]	volumenbezogene spezifische Faseroberfläche
	S_x, S_y, S_z	(spektrale) Lichtstreuoeffizienten
	T [Nm/g]	Tensile-Index
	TI [mNm^2/g]	Tear-Index
	V_P [μm^3]	Porenvolumen einer Elementarzelle
	V_T [μm^3]	Gesamtvolumen einer Elementarzelle
	w [%]	Gewichte
	W_F	mittlere Fracture-Arbeit für Einzelfaser
	W_{KF} [μm]	mittlerer Faserdurchmesser der Langfaser-Fraktion
	W_{LF} [μm]	mittlerer Faserdurchmesser der Langfaser-Fraktion
	W_P	mittlere Pull-Out-Arbeit für Einzelfaser
	WRV [%]	Wasserrückhaltevermögen
	X, Y, Z	Normfarbwerte
ZI [Nm/g]	Zerospan-Tensile-Index	
ZS	Zellstoff	

Literatur

- 1 WILD, M.L.
Festigkeitsentwicklung von Holz- und Deinkstoff aus Zeitungsdruckpapier mit niedriger spezifischer Kantenbelastung
Wochenblatt für Papierfabrikation 126, (1998) Nr. 23/24, S. 1218 – 1222
- 2 DEMLER, C. und SILVERI; L.
Low intensity refining of mechanical and deinked newsprint pulps
Appita Journal 49, (1996) Nr. 2, S. 87 – 89
- 3 KEREKES R.J.:
Characterization of pulp refiners by a C-factor.
Nordic Pulp and Paper Research J., Nr.1/1990, S. 3-8.
- 4 PRAIRIE B., WILD P., BYRNES P., OLENDER D., FRANCIS W., QUELLET D.:
Forces during Bar-Passing Events in Low-Consistency Refining: Distributions and Relationships to Specific Edge Load.
Journal of Pulp and Paper Science 34, 1-8 (2008) Nr.1
- 5 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.
- 6 DEKKER J., BOUMA H., HOOIMEIJER A.:
Compression Refining: the Energy Saving Breakthrough in Papermaking Technology.
Pulp and Paper Conf. Espoo, 2007.
- 7 SAMUELSON L.G.:
Stiffness of pulp fibers (II).
Svensk papperstidnin Nr.23/1964, S.943 - 946g
- 8 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.