

Entwicklung von Algorithmen zur Prognose des Mahlungsverhaltens morphologisch unterschiedlicher Zellstoffe

G. Bär, G. Meinl

Zusammenfassung

Die Mahlung nimmt innerhalb der Stoffaufbereitung von Zellstoffen eine bedeutende Rolle ein. In keinem anderen Prozessabschnitt werden die Eigenschaften der Fasern in solch erheblicher Weise verändert. Durch Fibrillierung und Flexibilisierung der Fasern wird ein Gefüge mit vielen Bindungsflächen geschaffen, welches Papier die notwendige Festigkeit verleiht. Die Struktur des Fasernetzwerkes und die Beschaffenheit der Faseroberflächen steuern wiederum optische und strukturelle Papiereigenschaften.

Die Komplexität des Mahlprozesses mit seinen vielfältigen und teilweise gegenläufigen Konsequenzen für die Gebrauchswerteigenschaften des Papiers machen es dem Papiermacher schwer, angesichts der Vielfalt verfügbarer Faserstoffe und Mahlgarnituren die betriebsökonomisch und technologisch beste Lösung zu finden, um eine geforderte Endqualität zu erzielen. Meistens basiert die Entscheidungsfindung auf einer Vielzahl aufwändiger Vorversuche in kleintechnischen Maßstab. Das verfügbare Zeitvolumen sowie der Kostenrahmen limitieren die Testphase. Einzig und allein langjährige Erfahrungen des Bedienpersonals garantieren die Identifikation geeigneter Zellstoffe und akzeptabler Prozessbedingungen.

Die Papiertechnische Stiftung (PTS) hat damit begonnen, Einzelprozesse der Papierherstellung durch Bereitstellung rechnergestützter Tools simulativ beherrschbar zu machen. Ziel ist der Aufbau eines modularen Systems von Algorithmen und Methoden, mit deren Hilfe jeder Papierhersteller in seiner konkreten Prozessumgebung wesentliche Abhängigkeiten zwischen Endeigenschaften des Papiers und den Parametern der verwendeten Zellstoffe sowie der angewandten Verfahren in Form eines computergestützten numerischen Modells abbilden kann.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF 13478 wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) Köln mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

Abstract

Refining takes an important role within the stock preparation of chemical pulps. In no other process section the characteristics of the fibres are changed in such substantial way. A structure with many connection surfaces is created by fibrillation and making the fibres flexible, which paper gives the necessary strength. The structure of the fibre network and the condition of the fibre surfaces do also affect optical and structural paper properties.

The complexity of the refining process with its various and partial opposite consequences for the usage properties of paper make it difficult for paper maker to find in view of the varieties of available fibrous materials and refiner fillings those operating economically and technologically best solution in order to obtain a demanded final quality. Decision making is mostly based on a variety of expensive preliminary lab scale tests. The available time and cost frame limits the test phase. Only and alone experiences of many years of the service personnel guarantee the identification of suitable chemical pulps and acceptable process conditions.

The Papiertechnische Stiftung (PTS) began to make single processes of paper manufacture simulative accessible by supply of computer-aided tools. The target is a modular system of algorithms and methods, with whose assistance each paper manufacturer in its concrete process environment can generate substantial dependencies between final characteristics of

the paper and the parameters of the used pulps as well as the applied procedures in form of a computer-assisted numeric model.

Acknowledgement

The research project AiF 13478 was funded by the German Federal Ministry of Economics and Labour.

1 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Ausgangssituation

Die Mahlung beeinflusst maßgeblich die Qualität der aus den Faserstoffen hergestellten Produkte Papier, Karton und Pappe. Sie nimmt sowohl innerhalb der Stoffaufbereitung als auch im gesamten Prozess der Papierherstellung eine bedeutende Rolle ein, da durch sie das gewünschte papiertechnologische Potenzial in Abhängigkeit von den morphologischen Fasereigenschaften entwickelt wird. Das Ziel der Mahlung besteht darin, die Eigenschaften der Einzelfaser so zu verändern, dass sie den Anforderungen, die an die oben genannten Produkte gestellt werden, genügen. Dabei geht es in erster Linie darum, die geforderten Festigkeiten, Oberflächeneigenschaften und optischen Merkmale mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand zu erzielen. Erreicht wird das durch die Flexibilisierung und Fibrillierung der Fasern d.h. durch die Schaffung eines Gefüges mit vielen Faserbindungsflächen und durch die Vergleichmäßigung der Fasern durch Reduzierung der Faserlänge zum Erhalt einer regelmäßigen Haufwerksstruktur.

Infolge der Mahlbehandlung verändern sich zunächst die Eigenschaften des Faserstoffs wie zum Beispiel die Faserlänge, die Faserbreite, die Faserflexibilität, das Wasserrückhaltevermögen und der Entwässerungswiderstand der Suspension. Dabei handelt es sich um morphologische Grundeigenschaften oder davon unmittelbar abhängige Charakteristika, die heute größtenteils automatisiert und teilweise sogar online erfassbar sind. Auf dem Markt befinden sich dazu Geräte verschiedener Anbieter aus Skandinavien (FIBERLAB, FIBERMASTER), aus Frankreich (MORPHI) und aus Übersee (FIBEREXPERT, FIBER QUALITY ANALYSER). Diese Geräte können zur Kontrolle der Fasereigenschaften nach der Mahlung herangezogen werden.

Den Unternehmen der Papierindustrie ist wohl bewusst, dass über eine geeignete Steuerung der Fasereigenschaften durch die Mahlung das Laufverhalten der Papiermaschine und die resultierenden Papiereigenschaften optimal eingestellt werden können. Unter Verwendung der im Zuge der Prozesskontrolle anfallenden Massendaten zu Stoff- und Prozessparametern und durch Vergleich mit Ergebnissen der physikalischen Endkontrolle des Papiers wurden in einzelnen Unternehmen mittels Methoden der Neuronalen Netze und der Hauptkomponentenanalyse (PCA) Prozesssteuerstrategien umgesetzt. Diese Methoden sind im Rahmen einer langfristig konstanten Stoff- und Mahlprozessumgebung ausgesprochen zweckmäßig, versagen aber beim Wechsel der Faserstoffsorte oder bei veränderten Mahlbedingungen. Dies sind jedoch gerade Bedingungen unter denen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen ihre relativ große Palette häufig wechselnder Produkte in kleinen Losgrößen herstellen.

Der Wechsel der Faserstoffsorte oder veränderte Anforderungen an die Produktqualität zwingen immer noch zu aufwändigen Vorversuchen im Labor- oder Technikumsmaßstab, um Faserstoffsorte und Mahltechnik zweckmäßig aufeinander abzustimmen. Bei Verfügbarkeit geeigneter softwaregestützter Simulationstools könnten diese Prozesse wesentlich kürzer und risikoärmer gestaltet werden. Grundvoraussetzung ist die Verfügbarkeit geeigneter und für alle marktüblichen Zellstoffe gültiger Algorithmen, welche eine Abschätzung der Änderung wesentlicher Faser- und Suspensionseigenschaften in Abhängigkeit von Prozessparametern der Stoffaufbereitung erlauben und eine darauf basierte Prognose der Papiereigenschaften gestatten.

Unter der Bezeichnung Computer Assisted Paper Design (CAPD) hat die Papiertechnische Stiftung (PTS) mit der systematischen Entwicklung solcher Algorithmen begonnen. Insbesondere die detaillierte Kenntnis der stofflichen Eigenschaften und des papiertechnischen Potenzials nahezu aller auf dem Markt befindlicher Zellstoffe sowie der Prozesse der Stoffaufbereitung verleiht der PTS die Kompetenz, mit der Umsetzung des modular angesetzten Konzeptes einer durchgehenden simulationsbasierten Beherrschung der Prozesse der Stoffaufbereitung zu beginnen.

Gegenwärtig werden die algorithmischen Grundlagen für 3 Module entwickelt (**Abb. 1**), die als Bausteine helfen sollen, typische Probleme im Umfeld der Mahlung und der faserstoffbasierten Prognose von Papiereigenschaften simulativ zu lösen:

- Modul „Mahlung“ (Änderung von Zellstoffeigenschaften im Ergebnis von Mahlprozessen)
- Modul „Festigkeit“ (Ableitung von Festigkeitseigenschaften von Papieren aus den Eigenschaften [gemahlener] Zellstoffe)
- Modul „Optik“ (Ableitung von optischen Eigenschaften von Papieren aus den Eigenschaften [gemahlener] Zellstoffe)

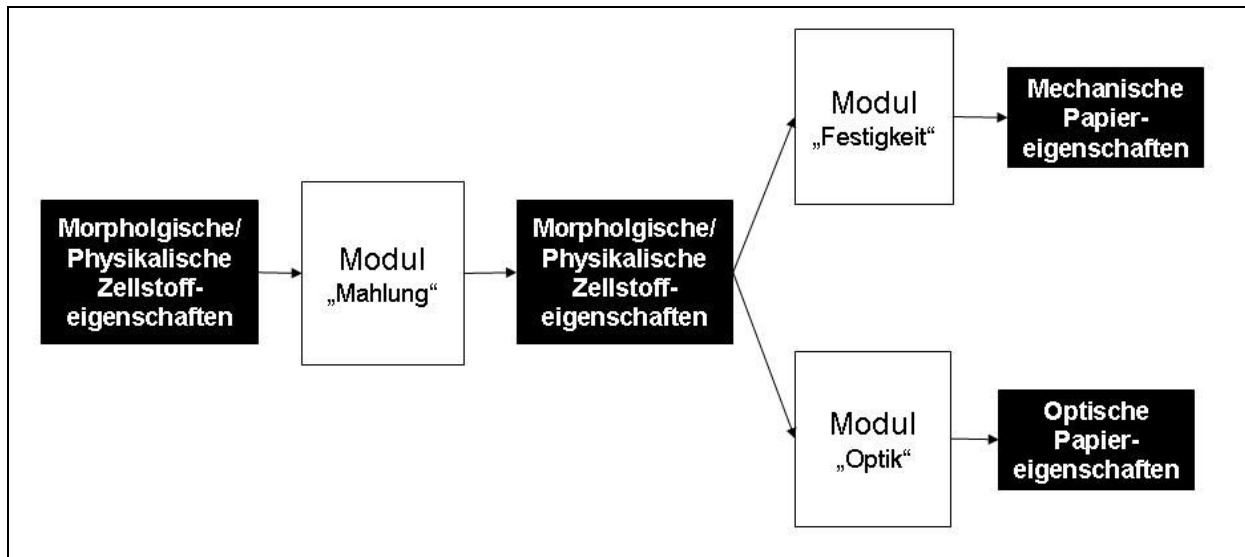


Abb. 1 Einordnung des Moduls „Mahlung“ in ein Gesamtsystem zur Simulation grundlegender Prozesse der Papiererzeugung

2 Forschungsziel

Das zentrale Ziel der Forschungsaktivitäten bestand in der Entwicklung von Algorithmen, welche die Mahltätigkeit industriell üblicher Refiner hinsichtlich ihrer Wirkung auf fasermorphologische und physikalische Zellstoffeigenschaften nachbilden. Die Algorithmen sollen in der Lage sein, geometrisch-morphologische und physikalische Eigenschaften des gemahlener Zellstoffes unter Berücksichtigung von wesentlichen Prozess- und Garniturparametern zu prognostizieren.

Die von den Algorithmen bereitgestellten Prognosen zur Entwicklung der Eigenschaften gemahlener Zellstoffe sollen eine Schnittstelle zu weiteren Modulen bilden, welche anhand dieser Eigenschaften der gemahlener Zellstoffe optische und mechanische Eigenschaften von Laborblättern vorhersagen

3 Lösungsweg und Ergebnisse

3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Entwicklung der Algorithmen basiert maßgeblich auf Versuchsmahlungen am PTS-Refiner. Es wird dabei eine Datenbasis aufgebaut, in die Ergebnisse der fasermorphologischen Prüfung mit dem Messgerät FIBERLAB 3.0 einfließen. Erstmals sind somit die Wirkungen unterschiedlicher Mahlbedingungen auf wesentliche Fasereigenschaften wie

- Faserdurchmesser,
- Faserwandstärke und
- Faserkrümmung

genau beobachtbar. Die Messgenauigkeit von 10 µm in der Faserlänge erlaubt es weiterhin, den Feinstoffanteil vollständiger zu erfassen, als es mit der bisherigen optischen Messtechnik möglich war.

Durch zweckmäßige Abstimmung der durchzuführenden Mahlversuche sowie der physikalischen Zellstoff- und Papierprüfung mit den Aktivitäten im Rahmen des gleichzeitig bearbeiteten Projektes „Computerunterstützte Prognose optischer Eigenschaften holzfreier Papiere aus Eigenschaften der Faserstoffkomponenten“ (AiF 13476) wird eine Datenbasis gebildet, die

- a) repräsentativ die wesentlichen auf dem Markt befindlichen Zellstoffklassen erfasst,
- b) Kombinationen unterschiedlichster Mahlbedingungen berücksichtigt und
- c) durch ein vollständiges Spektrum optischer und mechanischer Blattprüfungen die gleichzeitige bzw. zukünftige Entwicklung von Algorithmen zur Prognose von Produkteigenschaften ermöglicht, ohne zusätzliche Mahlversuche durchführen zu müssen.

3.2 Methodik

3.2.1 Klassifikation der Zellstoffe

Basierend auf Erfahrungen der PTS erfolgte eine Klassifizierung der Zellstoffe gemäß dem Schlüssel in **Tab. 1**.

Tab. 1 Klassifikation der Zellstoffe (Auszug)

Fasertyp	regionale Herkunft	Aufschlussverfahren	Bleichtyp
<ul style="list-style-type: none"> • Nh: Nadelholz • Lh: Laubholz (ohne Eukalyptus) • Eu: Eukalyptus • Ei: Einjahrespflanzen • Li: Linters 	<ul style="list-style-type: none"> • NA: Nordamerika • SA: Südamerika • NE: Nord- und Mitteleuropa • SE: Südeuropa/ Mittelmeergebiet • AA: Nordafrika /Vorderasien/ Mittelasien 	<ul style="list-style-type: none"> • Sa: Sulfat • Si: Sulfit 	<ul style="list-style-type: none"> • Unbl: Ungebleicht • ECF: Elementarchlorfrei • TCF: Totalchlorfrei

Im Rahmen der Algorithmenentwicklung werden die Modellparameter innerhalb der Zellstoffklassen durch Regressionen bestimmt.

Es wird Gegenstand der zukünftigen Forschungstätigkeit sein, die Gültigkeit der durchgeführten Klassierung zu überprüfen und sie fallweise zu ergänzen bzw. zu verfeinern. Neue Zellstoffklassen sind insbesondere dann einzuführen wenn alternative Faserstoffe, Aufschlussverfahren oder Bleichtechnologien verfügbar sind. Eine Verfeinerung der Klasseneinteilung wird dann notwendig, wenn eine geschlossene Modellentwicklung für alle Faserstoffe derselben Klasse nicht mehr möglich ist, bzw. die bislang postulierte stoffliche Identität nicht mehr gewährleistet ist. Ergebnisse der chemischen Prüfung (**Tab. 2**) können dabei als Benchmark der Zugehörigkeit zu einer Zellstoffklasse herangezogen werden.

Tab. 2 Chemische Kennwerte der im Rahmen der Mahlreihen geprüften Zellstoffe

Zellstofftyp				Chemische Kennwerte								
				Kappa	L16	L5	Asche (575°C)	Gesamt-ladung	CED/ GVZ	DCM	Restlignin	Oberflächen-ladung
				#	%	%	%	mmol/kg	ml/g	%	%	mmol/kg
Nh	NA	Sa	unbl	28,57	10,61	7,34	0,33	79,5	1019			
Nh	NE	Sa	TCF	2,574	2,614	8,328	0,266	55,935	633,5	0,09	0,15	28
Nh	NE	Sa	ECF	1,662	2,36	7,61	0,32	56,816	769	0,05	0,17	25
Nh	NA	Sa	ECF			7,43	0,74	39,84	842			
Nh	SA	Sa	ECF			7,46	0,61	48,07	646			
Nh	NE	Si	unbl.	29,35	11,92	8,57	0,76	107,4	1178			
Nh	NE	Si	TCF	1,9		5,1	0,4	40		0,18	0,1	21
Lh	NE	Sa	ECF	1,4	1,662	18,122	0,566	96	748,5	0,06	0,7	37
Eu	SE	Sa	ECF	0,54		11,4	0,15	62		0,05	0,25	30
Eu	SA	Sa	ECF	0,612	1,34	11,628	0,516	0	746			34
Li	AA	Sa	ECF	< 0,3		0,7	0,03	9		0,01	0,23	8

3.2.2 Morphologische Charakterisierung der Zellstoffe

Fasermorphologische Eigenschaften sind eine der beiden wesentlichen Gruppen von Fasermerkmalen, deren Änderung im Zuge der Mahlung durch mathematische Modelle beschrieben werden sollen. Aus nahe liegenden Gründen wurden genau jene Faserkenngrößen berücksichtigt, die vom verwendeten Fasermessgerät FIBERLAB 3.0 erfasst werden, d.h.

- Faserlänge,
- Faserdurchmesser,
- Faserwandstärke und
- Faserkrümmung.

Das Fasermessgerät FIBERLAB 3.0 gestattet eine kombinierte optische Erfassung und bildanalytische Auswertung (**Abb. 2**) von ca. 10.000 Fasern innerhalb von 15 Minuten. Die Ergebnisse liegen geräteintern als Einzelfasermessdaten vor und können in Form von Häufigkeitsverteilungen zusammengefasst werden. Durch Standardroutinen werden geeignet gewichtete Mittelwerte berechnet und dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Im Zuge dieser Mit-

telwertbildung gehen zwangsläufig Informationen zur Struktur der statistischen Verteilungen (**Abb. 3**) verloren, die für die Modellierung von erheblichem Interesse sind, z.B.

- zur Asymmetrie der Verteilung und
- zum Vorhandensein mehrerer Peaks.

Es wurde deshalb unabhängig von der geräteinternen Datenauswertung unter Verwendung des so genannten EM-Algorithmus ein Tool entwickelt und angewandt, welches diese spezifischen Verteilungsmerkmale berechnet.

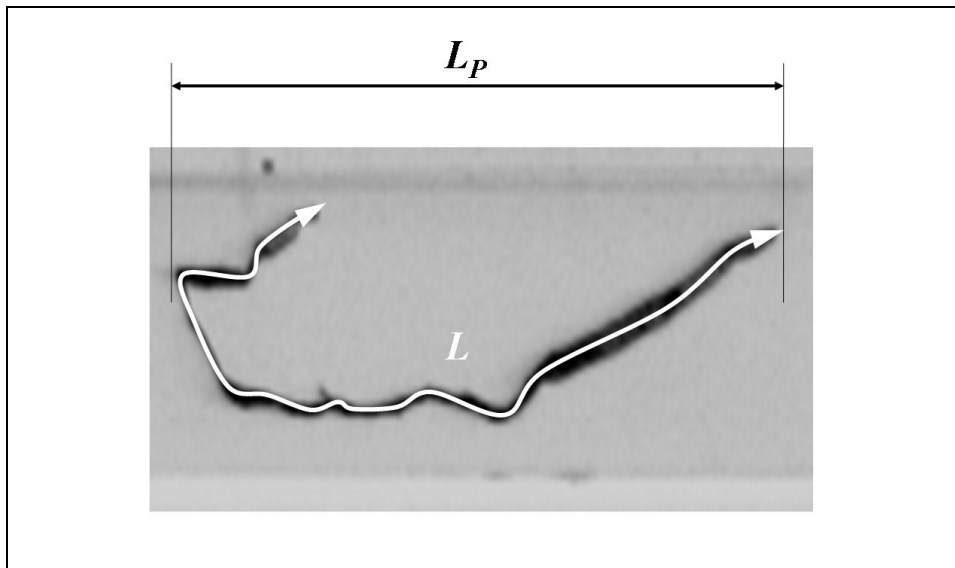


Abb. 2 Einzelfaseraufnahme des FIBERLAB (Projizierte Faserlänge L_P , tatsächliche Faserlänge L)

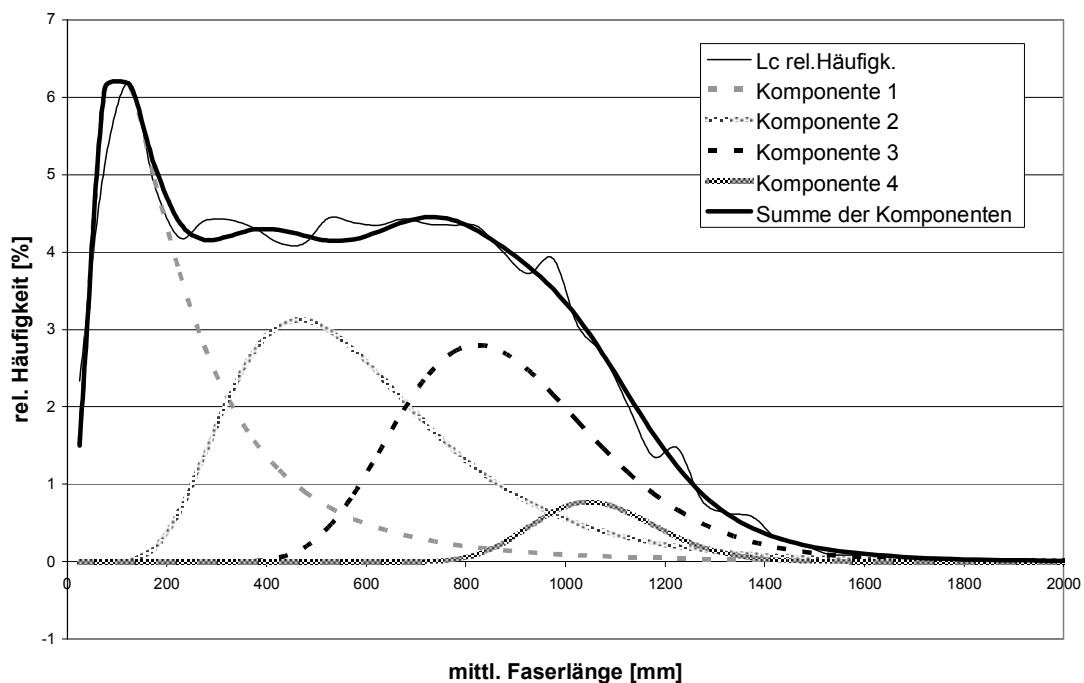


Abb. 3 Gemessene Faserlängenverteilung („Lc rel. Häufigkeit“) eines Laubholz Zellstoffes durch das FIBERLAB 3.0 und berechnete beste Approximation als Summe von 4 lognormalverteilten Einzelkomponenten mit Hilfe de EM-Algorithmus

Ausgangspunkt ist eine erstmals in [1] publizierte, auf Grund verschiedener Unzulänglichkeiten aber zunächst nicht weiterverfolgte Methode, Faserlängenverteilungen eines (reinen)

Zellstoffes als Überlagerung von bis zu 4 einzelnen Lognormalverteilungen anzusprechen. Faserpopulationen setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen (Feinstoff, Faserstoff). Es kann postuliert werden, dass innerhalb jeder Komponente die Messgröße x (Faserlänge, Faserdurchmesser, Faserwandstärke oder Faserkrümmung) lognormalverteilt ist, d.h. die Verteilung der Messgröße genügt einer Dichtefunktion der Form

$$f(x; \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

Dabei entsprechen μ bzw. σ dem Mittelwert bzw. der Streuung der durch Logarithmisierung der Messgröße x entstehenden normalverteilten Häufigkeitsverteilung. Daraus ergeben sich Mittelwert und Streuung der (lognormalverteilten) Messgrößen selbst zu

$$\mu_L = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (3-2)$$

$$\sigma_L = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (3-3)$$

Durch gewichtete Addition der Dichtefunktionen der Komponenten ergibt sich die Gesamtdichtefunktion der Mischverteilung.

$$f(x) = \sum \gamma_i f(x, \mu_i, \sigma_i) \quad \text{mit} \quad \sum \gamma_i = 1 \quad (3-4)$$

Die Parameter γ_i heißen anzahlbezogene relative Gewichte. Durch eine zusätzliche Wichtung über die Faserlänge können massebezogene relative Gewichte berechnet werden:

$$g_i = \frac{\gamma_i L_i}{\sum \gamma_j L_j} \quad (3-5)$$

Eine verfahrenstechnische Besonderheit des FIBERLAB 3.0 besteht darin, dass zunächst die Länge einer Faser als projizierte Länge L_P auf eine CCD-Zeile bestimmt wird. Ist diese Faserlänge größer als 200 μm werden mittels weiterer Bilder und einer anschließenden Bildverarbeitung die tatsächliche Faserlänge L (= Länge der Mittellinie), der Faserdurchmesser D und die Faserwanddicke d bestimmt. Die Faserkrümmung (Curl) wird gemäß

$$CU = \left(\frac{L}{L_P} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3-6)$$

berechnet. Für Fasern mit einer projizierten Länge $L_P < 200 \mu\text{m}$ (das ist im Wesentlichen die Feinstoffkomponente) erfolgt keine Bestimmung der übrigen Faserabmessungen. Es werden in diesem Fall $L_P = L$ und die übrigen Parameter zu Null gesetzt.

Insgesamt liefern die mit dem EM-Algorithmus aufbereiteten Verteilungen des FIBERLAB 3.0 die in **Tab. 3** zusammengefassten Ergebnisse. Dabei werden für jeden Zellstoff zwischen einer Feinstoffkomponente und bis zu 3 Faserstoffkomponenten unterschieden.

Tab. 3: Komplettes Schema der Verteilungsparameter der fasermorphologischen Kenngrößen eines Zellstoffes

Komponente	Relatives Gewicht		Mittelwerte der Komponente			
	anzahl-bezogen	masse-bezogen	Faserlänge (Mittenlinie)	Faserdurchmesser	Faserwanddicke	Faserkrümmung (Curl)
Feinstoff	γ_0	g_0	L_0			
Faserstoff 1	γ_1	g_1	L_1	D_1	FWT_1	CU_1
Faserstoff 2	γ_2	g_2	L_2	D_2	FWT_2	CU_2
Faserstoff 3 ¹	γ_3	g_3	L_3	D_3	FWT_3	CU_3

3.2.3 Physikalische Charakterisierung der Faseroberfläche bzw. des Entwässerungsverhaltens

Neben Veränderungen morphologischer Fasermerkmale bewirkt die Mahlung ein deutlich verändertes Bindungsverhalten der Einzelfasern. Ursache ist eine erhebliche Veränderung der Feinstruktur der Faseroberfläche bzw. der Faserwand. Direkt sind solche Effekte nur mittels hoch auflösender optischer Messverfahren beobachtbar. Allerdings steht eine Reihe indirekter Parameter zur Verfügung, welche im Rahmen des Messprogramms aufgenommen wurden, nämlich

- der Entwässerungswiderstand (SR-Wert) und
- das Wasserrückhaltevermögen (WRV).

Für ausgewählte Mahlreihen erfolgte weiterhin die Bestimmung

- der hydrodynamisch wirksamen spezifischen Faseroberfläche (SSA),
- der Grenzviskositätszahl und
- der Gesamtladung.

Alle genannten Kennwerte sind Summenparameter für die untersuchten Faserstoffe oder Faserstofffraktionen und für Einzelfasern nicht verfügbar.

3.2.4 Klassifikation der verwendeten Mahlgarnituren und Mahlbedingungen

Für die Mahlungsuntersuchungen wurde der in das Faserstoff-Technikum integrierte Laborrefiner der Forschungsstelle genutzt (**Abb. 4**).

Zur Vorbereitung der Stoffe für die Mahlung wurden die Zellstoffbögen zerrissen, in Wasser suspendiert und 10 min in einem Technikumpulper bei 5 % Stoffdichte aufgeschlagen. Unmittelbar danach wurde die Zellstoffsuspension in den Aufgabebehälter des Refiners überführt und auf eine Stoffdichte von 4 % eingestellt. Anschließend wurde die Steuerung für den Mahlversuch mit den Zielparametern Mahlkantenbelastung und Energieeinsatz bis zur Probenahme programmiert und die Leerlaufleistung des Refiners in einem so genannten Nulldurchgang bei einem Mahlspalt von 2 mm bestimmt. Sie wurde im Programm immer von der Gesamtleistungsaufnahme abgezogen, so dass sich alle folgenden Angaben zur spezifischen Mahlarbeit auf die effektive Mahlleistung des Refiners beziehen. Im Anschluss wurde der Mahlprozess gestartet

¹ Nur für Zellstoffe der Typen Lh (Laubholz ohne Eukalyptus) und Eu (Eukalyptus) definiert. Für die übrigen Zellstoffe sind die Gewichte $\gamma_3=0$ bzw. $g_3=0$



Abb. 4: PTS-Laborrefiner

Die Probenahmen erfolgten automatisch nach Erreichen der im Programm vorgegebenen Energieeinträge. Nach Beendigung des Mahlversuches wurden die Faserstoffproben aus den Probenahmebehältern entnommen, die vorgegebenen Suspensionskennwerte ermittelt und über einen BRK-Blattbildner 80 g/m² Standard-Prüfblätter hergestellt.

Bei der Wahl der spezifischen Mahlkantenbelastung wurde der zu erwartenden Mahlresistenz der Faserstoffe im Mahlprozess Rechnung getragen. Für die Kurzfasierzellstoffe erstreckte sich der Bereich der Belastung von 0,4 bis 1,0 Ws/m, bei den Langfasierzellstoffen von 1,0 bis 2,0 Ws/m.

Im Verlauf der Untersuchungen kamen vier verschiedene Scheiben- und zwei Kegeln garnituren mit unterschiedlicher Messeranordnung und Geometrie zum Einsatz. Die wesentlichen Garniturparameter gehen aus **Tab. 4** hervor.

Tab. 4: Daten der eingesetzten Mahlgarnituren

Bezeichnung	Scheibe 60°		Scheibe 10°		Scheibe 60° (KF)		Scheibe 10° (KF)		Flachkegel		Steilkegel	
	Rotor	Stator	Rotor	Stator	Rotor	Stator	Rotor	Stator	Rotor	Stator	Rotor	Stator
Messeranzahl	45	45	40	40	70	70	70	70	50	60	35	45
Messerränge [mm]	55,7	55,7	50,2	50,2	55,7	55,7	50,2	50,2	110	95	85	70
Messerwinkel [°]	30	30	5	5	30	30	5	5	30	0	30	0
Halber Öffnungswinkel [°]	-	-	-	-	-	-	-	-	20	20	30	30
Garniturkonstante k [km]	0,1128		0,0803		0,2729		0,2460		0,2850		0,1103	
Messermaterial	Chromstahl 1.4571		Chromstahl 1.4571		17/4 PH		17/4 PH		17/4 PH		Chromstahl 1.4571	
Sekundliche Schnittlänge (bei 1500 min ⁻¹) [km/s]	2,82		2,01		6,82		6,15		7,12		2,76	
Schnittwinkel [°]	60		10		60		10		30		30	

Für eine durchgehende Parametrisierung ist es zweckmäßig, die klassische Unterscheidung zwischen Kegel- und Scheibenrefiner aufzugeben und Scheibengarnituren als Kegeln garnituren mit einem halben Öffnungswinkel von 90° zu betrachten.

Beispielhaft sind in **Abb. 5** und **Abb. 6** die Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel und die Kegeln garnitur mit einem halben Öffnungswinkel von 20° sowie einem Schnittwinkel von 30° dargestellt.



Abb. 5: Scheibengarnitur mit einem Schnittwinkel von 60°

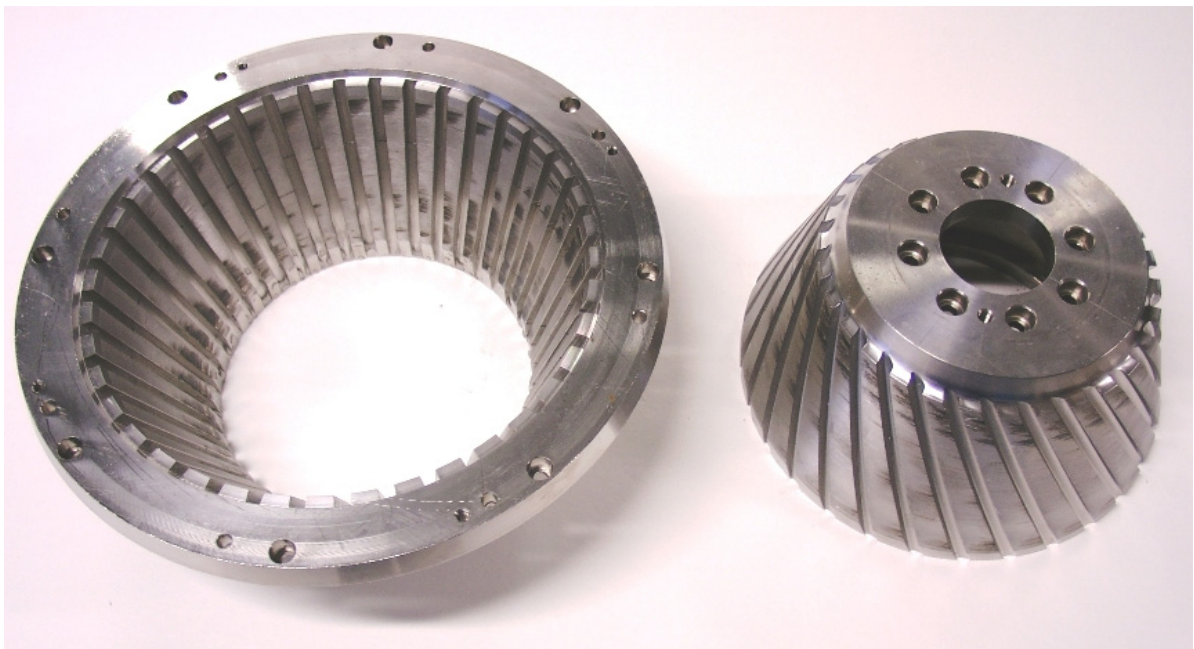


Abb. 6: Kegलगarnitur mit einem halben Öffnungswinkel von 20° (Flachkegel) und einem Schnittwinkel von 30°

3.3 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

In **Tab. 5** ist das Schema aller realisierten Mahlversuche dargestellt.

Tab. 5: *Planung der Mahlreihen*

Mahlreihe	Nh	Nh	Nh	Nh	Nh	Nh	Nh	Lh	Eu	Eu	Li	Garnitur/ Schnitt- winkel / °	Garnitur- konstante km	Spez. Kanten- last Ws/m
	NA	NE	NE	NA	SA	NE	NE	NE	SE	SA	AA			
	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Si	Si	Sa	Sa	Sa	Sa			
	unbl	TCF	ECF	ECF	ECF	unbl	TCF	ECF	ECF	ECF	ECF			
1	X											Scheibe 60	0,1128	2,0
2		X										Scheibe 60	0,1128	2,0
3			X									Scheibe 60	0,1128	2,0
4						X						Scheibe 60	0,1128	2,0
5							X					Scheibe 60	0,1128	2,0
6					X							Scheibe 60	0,1128	2,5
7											X	Scheibe 60	0,1128	2,0
8							X					Scheibe 60	0,1128	1,0
9	X											Scheibe 10	0,0803	2,0
10								X				Scheibe 10	0,2460	1,0
11										X		Scheibe 10	0,2460	1,0
12											X	Scheibe 10	0,0803	1,0
13	X											Flach 30	0,2850	2,0
14								X				Flach 30	0,2850	1,0
15									X			Flach 30	0,2850	1,0
16		X										Scheibe 60	0,1128	2,5
17			X									Scheibe 60	0,1128	2,0
18								X				Scheibe 60	0,2729	1,0
19										X		Scheibe 60	0,2729	1,0
20				X								Scheibe 60	0,1128	2,5
21	X											Steil 30	0,1103	2,0
22								X				Steil 30	0,1103	1,0
23											X	Steil 30	0,1103	1,5
24											X	Steil 30	0,1103	3,0
25								X				Scheibe 60	0,2729	1,0
26										X		Scheibe 10	0,2460	0,7
27										X		Scheibe 10	0,2460	1,3
28		X						X				Scheibe 60	0,2729	1,0
29		X										Scheibe 60	0,1128	1,0
30								X				Scheibe 60	0,1128	1,0
31		X						X				Mischung 29/30 nach Mahlung		
32			X						X			Steil 30	0,1103	1,0
33			X									Steil 30	0,1103	1,0
34									X			Steil 30	0,1103	1,0
35			X						X			Mischung 33/34 nach Mahlung		
36										X		Scheibe 60	0,2729	0,4
37										X		Scheibe 60	0,2729	0,7
38										X		Scheibe 60	0,2729	1,0
39			X									Scheibe 60	0,1128	1,0
40									X			Scheibe 60	0,2729	2,0
41		X										Scheibe 60	0,1128	2,0
42					X							Scheibe 60	0,1128	2,0
43									X			Scheibe 60	0,2729	1,0
44			X									Scheibe 60	0,1128	2,5
45					X							Scheibe 60	0,1128	2,5

Jede Mahlreihe umfasst den Nullpunkt und 4 Mahlpunkte (in der Regel in den Abstufungen 50, 100, 150, 200 kWh/t). Die Zuordnung von Faserstoffen und Mahlbedingungen erfolgte dabei in Abstimmung mit den Mahlversuchen des Forschungsprojektes „Computerunterstütz-

te Prognose optischer Eigenschaften holzfreier Papiere aus Eigenschaften der Faserstoffkomponenten“ (AiF 13476), um weitere Messergebnisse zugänglich zu machen. Dadurch konnten die Datenbasen beider Projekte erheblich ausgebaut werden, was eine wesentlich systematischere Untersuchung aller relevanten Einflussfaktoren ermöglicht. Das aus der Zusammenlegung der Mahlversuche resultierende Cluster stellt eines der umfangreichsten Versuchsprogramme am Laborrefiner der PTS dar, das jemals im Rahmen eines Forschungsprojektes in Angriff genommen wurde.

3.4 Modelle

In den nachfolgenden Abschnitten werden für die wesentlichen Faserstoffeigenschaften mathematische Modelle des Einflusses der Mahlparameter zusammengefasst. Je Zellstofftyp und je verwendeter Mahlkonfiguration, charakterisiert durch spezifische Kantenlast (SEL), Schnittwinkel (SW) und halben Öffnungswinkel (HÖW) der Mahlgarnitur wird die Abhängigkeit der Änderung einer Faserstoffeigenschaft von der spezifischen Mahlenergie (SRE) durch Funktionen der Form.

$$F = f(SRE, a, b, c, d) \quad (3-7)$$

beschrieben. Dabei ist F der Wert einer Eigenschaft des Faserstoffes nach der Mahlung sowie a , b , c und d Modellparameter. Insbesondere ist

$$a = f(0, a, b, c, d) \quad (3-8)$$

der Wert der Fasereigenschaft im ungemahlten Zustand. Als Einheit der spezifischen Mahlenergie SRE wird 100 kWh/t verwendet.

Die Abhängigkeit der Modellparameter b , c und d von den Kennwerten SEL , SW und $HÖW$ der Mahlung wird über Relationen der Form

$$\begin{aligned} b &= b_0 + b_1 \cdot SEL + b_2 \cdot SW + b_3 \cdot HÖW \\ c &= c_0 + c_1 \cdot SEL + c_2 \cdot SW + c_3 \cdot HÖW \\ d &= d_0 + d_1 \cdot SEL + d_2 \cdot SW + d_3 \cdot HÖW \end{aligned} \quad (3-9)$$

beschrieben. Die Koeffizienten b_i , c_i , d_i dieser linearen multivariaten Ansätze sind für alle Einflussgrößen SEL , SW und $HÖW$ im Rahmen eines Bereiches gültig, der durch entsprechende Mahlversuche abgedeckt wurde.

Wurde einer Einflussgröße für einen Zellstofftyp nicht variiert, sind die zugehörigen Koeffizienten Null und die Wirkung der Einflussgröße geht in b_0 , c_0 , d_0 ein.

3.4.1 Feinstoff

Bei konstantem Zellstofftyp und identischer Mahlgarnitur besteht zwischen der eingesetzten Mahlenergie und dem Masseanteil der Feinstoffkomponente eine lineare Beziehung (vgl. **Abb. 7**)

$$g_0 = a + SRE \cdot b \quad (3-10)$$

In Einzelfällen (z.B. bei Sulfitzellstoffen, **Abb. 8**) wird bei hohen Energieeinträgen ein Rückgang des (sichtbaren) Anteils der Feinstoffkomponente beobachtet. Hierbei ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Anteil der Feinstoffpartikel kleiner als 10µm ist und somit durch das Messgerät nicht detektiert wurde.

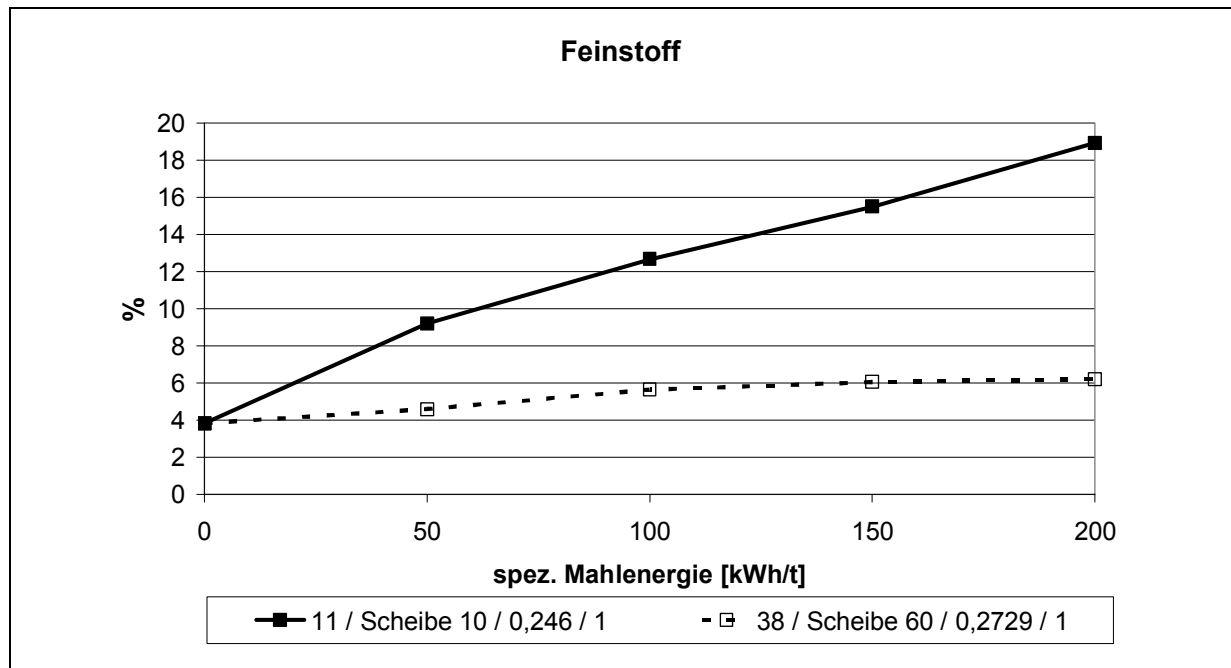


Abb. 7: Abhängigkeit des Feinstoffanteils (Mahlreihen 11 und 38, Eu – SA – Sa - ECF) von der spezifischen Mahlenergie für 2 Scheibengarnituren mit unterschiedlichen Messerschnittwinkeln (10° und 60°)

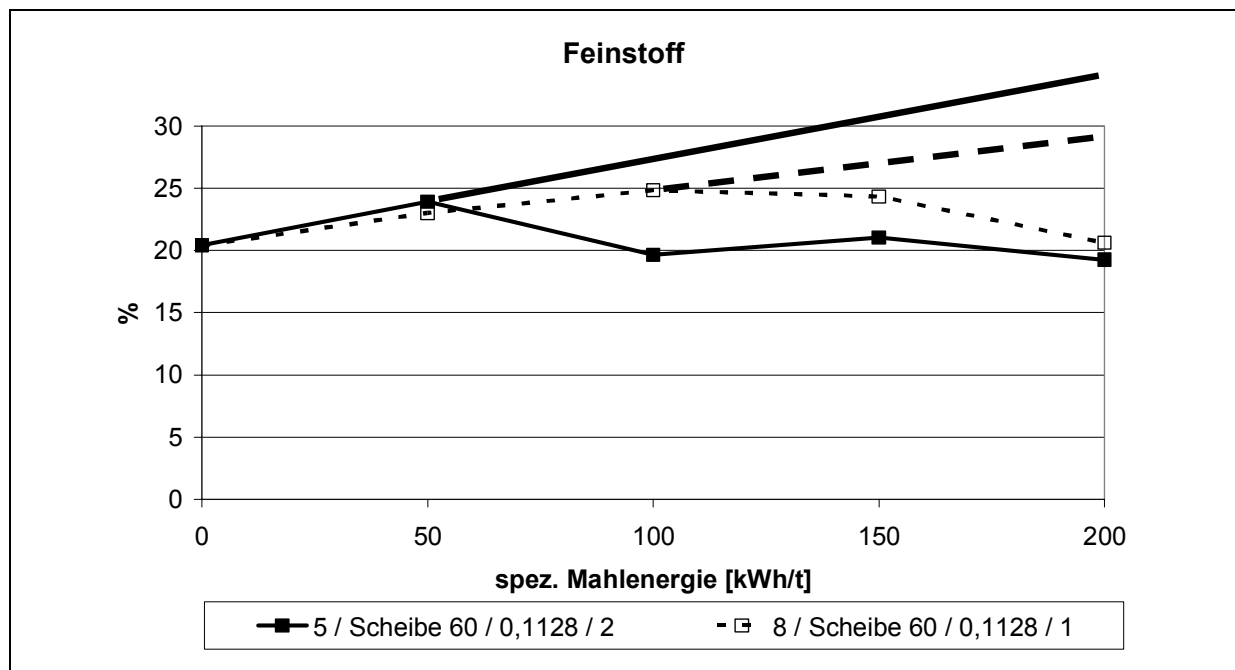


Abb. 8: Abhängigkeit des (sichtbaren) Feinstoffanteils eines Sulfitzellstoffes (Mahlreihen 5 und 8, Nh – NE – Si - TCF) von der spezifischen Mahlenergie bei unterschiedlicher spezifischer Mahlantenbelastung (1 und 2 Ws/m). Die dickeren Linien deuten die angenommene Entwicklung des Feinstoffanteils bei zusätzlicher Berücksichtigung optisch nicht detektierbarer Feinstoffpartikel (<10µm) an.

Als Beispiel sind die Wirkungen der Einflussgrößen auf den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl in **Tab. 6** zusammengefasst.

Tab. 6: *Wirkungen der Einflussgrößen SEL, SW und HÖW auf den Feinstoffanteil des Zellstoffs Nh-NA-Sa-unbl*

Typ			Gültigkeitsbereich			Feinstoff [%]				
			SEL	SW	HÖW		SEL	SW	HÖW	
			Ws/m	o	o		Ws/m	o	o	
						a	b1	b2	b3	b0
Nh (NA)	Sa	unbl.	2	10-60	20-90	9,08		-0,15	0,12	5,51

3.4.2 Faserlänge des Faseranteils

Als mittlere Länge des Faseranteils wird der anzahlgewichtete Mittelwert

$$L = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} (\gamma_1 L_1 + \gamma_2 L_2 + \gamma_3 L_3) \quad (3-11)$$

verwendet. Analog zu den beobachteten Effekten des spezifischen Energieeinsatzes für den Feinstoffanteil wird auch für die Faserlänge je Faserstofftyp und Garniturparametersatz (**Abb. 9**) eine im Wesentlichen lineare Abhängigkeit der Form

$$L = a + SRE \cdot b \quad (3-12)$$

beobachtet. Die Effekte von spezifischer Kantenlast, Schnittwinkel und halben Öffnungswinkel der Mahlgarnitur auf den Anstieg b sind für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl in **Tab. 7** zusammengefasst.

In Einzelfällen (z.B. die amerikanischen Nadelhölzer Nh – NA – Sa - ECF und Nh – SA – Sa - ECF) ist sogar eine geringfügige Zunahme der Faserlänge festzustellen. Dieses Phänomen der Faserlängenänderung resultiert aus Effekten der Fibrillierung.

Tab. 7: *Wirkungen der Einflussgrößen SEL, SW und HÖW auf die mittlere Länge des Faseranteils für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl*

Typ			Gültigkeitsbereich			Faserlänge [μm]				
			SEL	SW	HÖW		SEL	SW	HÖW	
			Ws/m	o	o		Ws/m	o	o	
						a	b1	b2	b3	b0
Nh (NA)	Sa	unbl.	2	10-60	20-90	2100,00		15,19	-5,79	-396,69

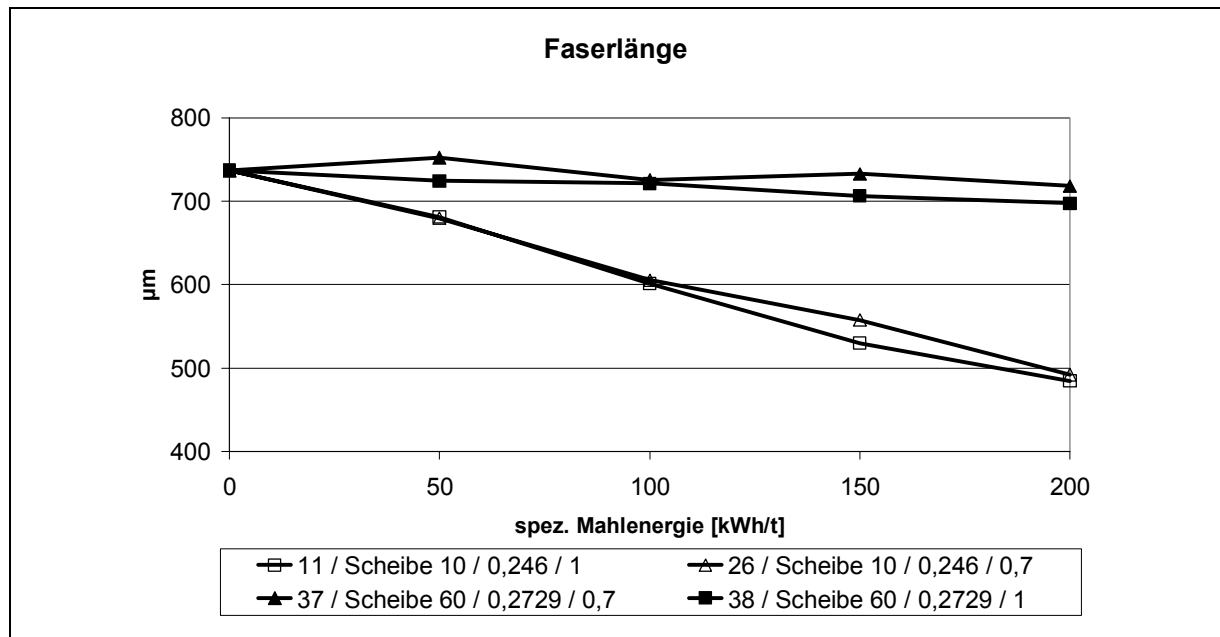


Abb. 9: Abhängigkeit der mittleren Länge des Faseranteils (Mahlreihen 11, 26, 37 und 38, Eu – Sa – Sa – ECF) von der spezifischen Mahlenergie für 2 Scheibengarnituren mit unterschiedlichen Schnittwinkeln (10° und 60°) und unterschiedlichen spezifischen Kantenlasten (0,7 und 1 Ws/m)

3.4.3 Faserdurchmesser

Als mittlerer Faserdurchmesser des Faseranteils wird der anzahlgewichtete Mittelwert

$$D = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} (\gamma_1 D_1 + \gamma_2 D_2 + \gamma_3 D_3) \quad (3-13)$$

verwendet. Bei Variation der Mahlenergie ist bei allen Faserstoffen ein deutlich nichtlineares Verhalten festzustellen. Der Faserdurchmesser wächst bis zum Erreichen eines definierten spezifischen Energieeintrages und fällt anschließend. Ursache dieses Verhaltens sind sehr wahrscheinlich zwei gegenläufige Prozesse. Bei niedrigem spezifischem Energieeintrag dominiert die Faserfibrillierung, die eine Zunahme des Faserdurchmessers vortäuscht, während mit wachsendem Energieeintrag Fasermaterial von der Faserwand abgetragen wird. In einigen Fällen (siehe **Abb. 10**) ist ein deutlicher Übergang vom konvexen zum konkaven Verhalten festzustellen. Als zweckmäßiges Modell für den Einfluss der spezifischen Mahlenergie auf den Faserdurchmesser erweist sich deshalb ein kubischer Ansatz

$$D = a + b \cdot SRE + c \cdot SRE^2 + d \cdot SRE^3 \quad (3-14)$$

Die Effekte von spezifischer Kantenlast, Schnittwinkel und halben Öffnungswinkel der Mahl-garnitur auf die Parameter b , c und d sind exemplarisch für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl in **Tab. 8** zusammengefasst.

Tab. 8: Wirkungen der Einflussgrößen SEL, SW und HÖW auf den mittleren Durchmesser des Faseranteils für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl

Typ			Faserdurchmesser [μm]												
			SEL				SW			HÖW					
			Ws/m				o			o					
			a	b1	c1	d1	b2	c2	d2	b3	c3	d3	b0	c0	d0
Nh (NA)	Sa	unbl.	26,20				0,027	0,017	0,002	0,002	0,010	0,002	-1,91	1,87	-0,57

Die zu beobachtenden Schwankungen des Faserdurchmessers liegen im Allgemeinen bei etwa $1\mu\text{m}$ und bewegen sich somit an der Grenze der Detektierbarkeit des FIBERLAB-Messgerätes. Der Stichprobenumfang von ca. 5.000 Fasern bei der Durchmesserbestimmung sichert aber die notwendige Güte des Mittelwertes (3-13) ab.

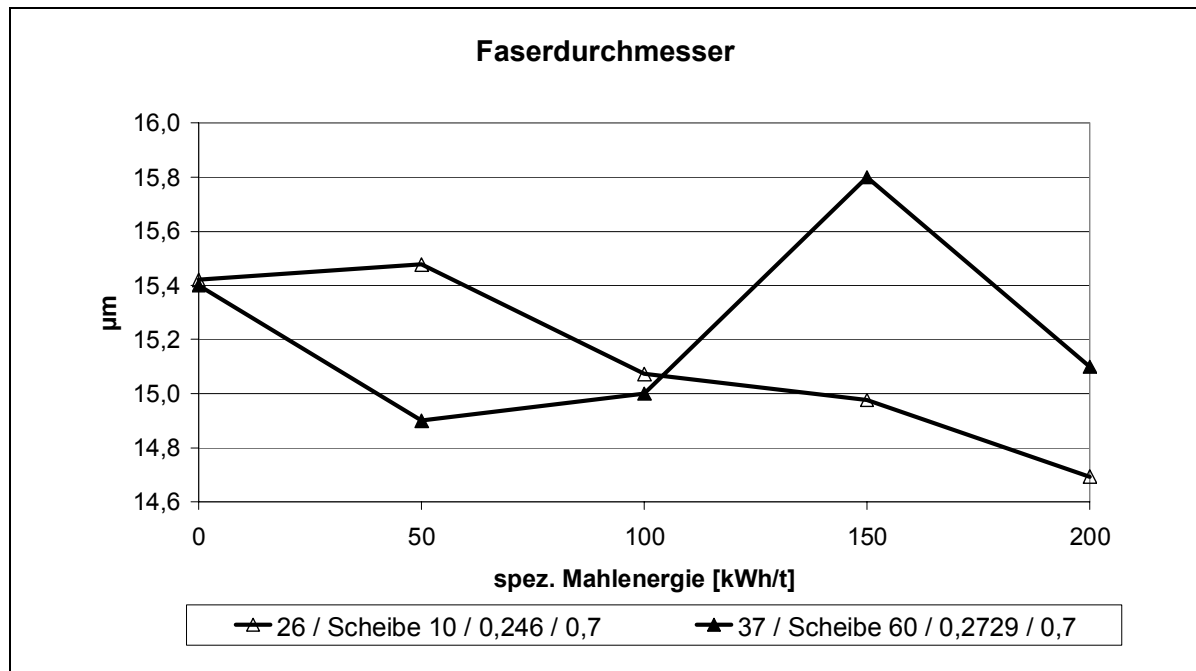


Abb. 10: *Abhängigkeit des mittleren Durchmessers des Faseranteils (Mahlreihen 26 und 37, Eu – SA – Sa - ECF) von der spezifischen Mahlergie für 2 Scheibengarnituren mit unterschiedlichen Schnittwinkeln (10° und 60°) bei einer spezifischen Kantenlast von $0,7 \text{ Ws/m}$*

3.4.4 Faserwanddicke

Als mittlere Faserwanddicke des Faseranteils wird der anzahlgewichtete Mittelwert

$$FWT = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} (\gamma_1 FWT_1 + \gamma_2 FWT_2 + \gamma_3 FWT_3) \quad (3-15)$$

verwendet.

Für die mittlere Faserwanddicke ist qualitativ ein ähnliches Verhalten wie für den mittleren Faserdurchmesser zu erwarten. Änderungen der Faserwanddicke sind auch als Änderungen des Faserdurchmessers zu beobachten und umgekehrt. Eine für jeden Zellstofftyp. durchgeführte Korrelationsanalyse zwischen Faserdurchmesser und Faserwandstärke bestätigt die lineare Abhängigkeit

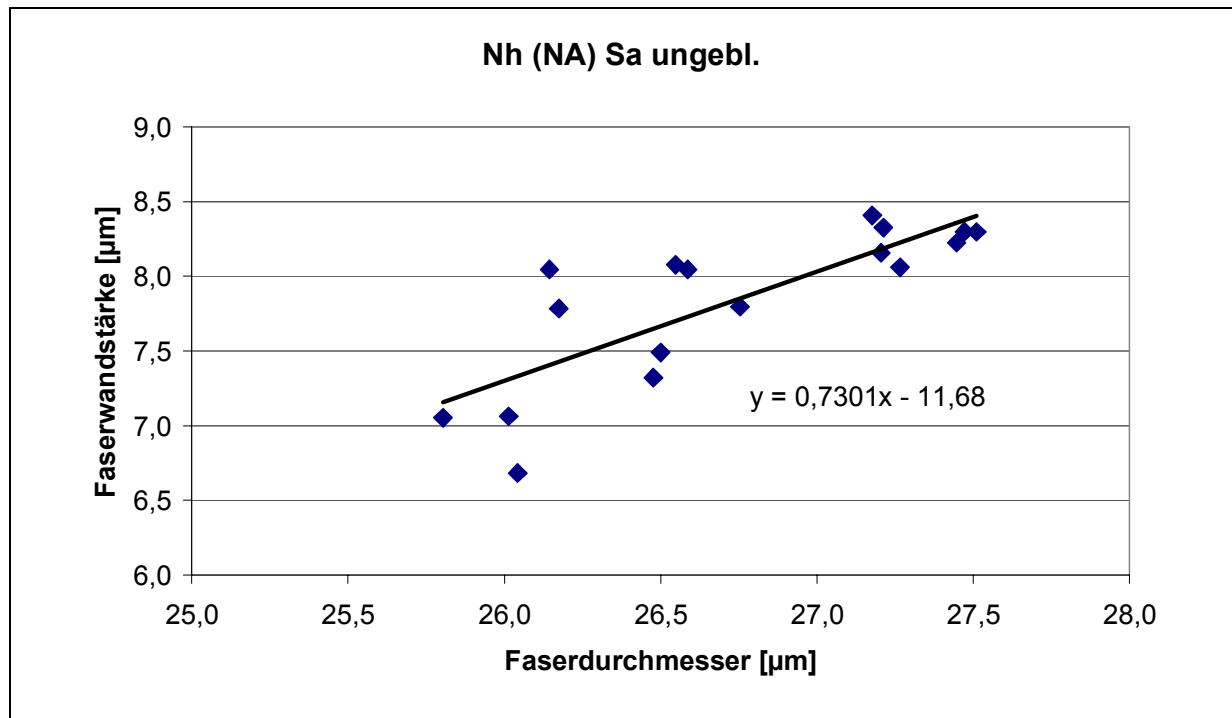


Abb. 11: Lineare Abhängigkeit zwischen Faserdurchmesser und Faserwandstärke für einen nordamerikanischen Nadelholzzellstoff (Nh – NA – Sa - ungebl)

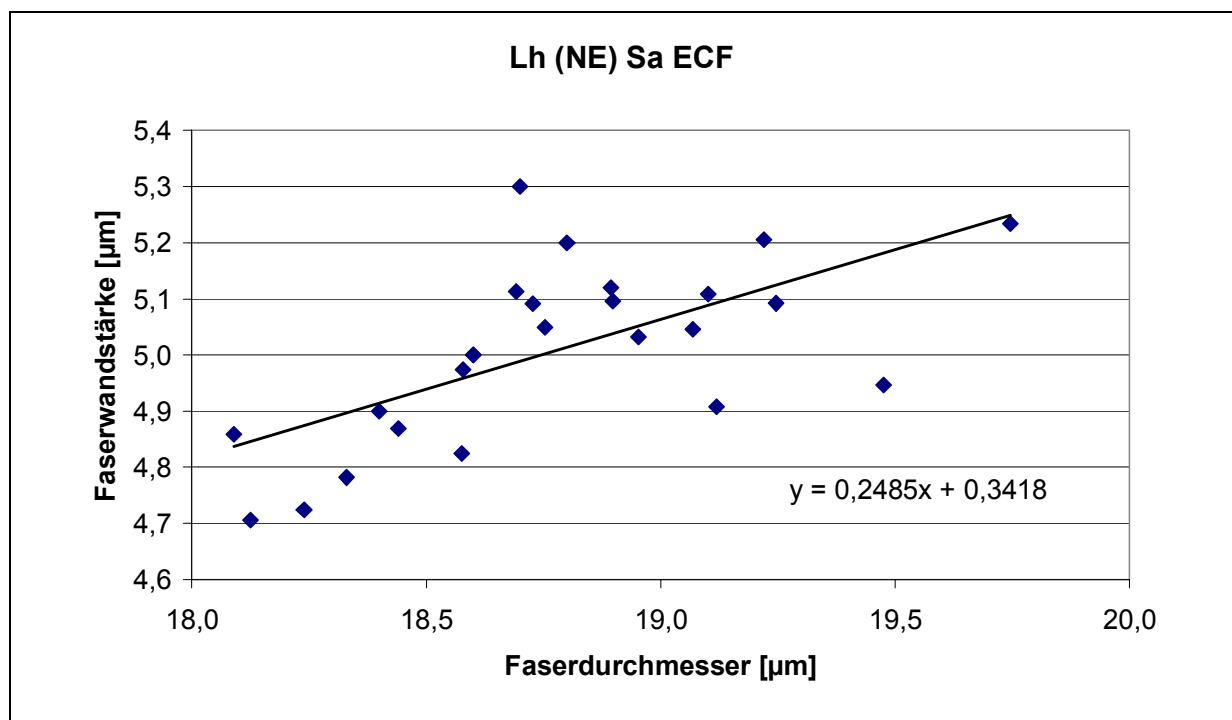


Abb. 12: Lineare Abhängigkeit zwischen Faserdurchmesser und Faserwandstärke für einen nordeuropäischen Laubholzzellstoff (Lh – NE - Sa - ECF)

Anhand der linearen Regressionskoeffizienten in **Tab. 9** können die in 3.4.3 bereitgestellten Formeln für den Faserdurchmesser unmittelbar auf die Faserwanddicke übertragen werden gemäß

$$FWT = a + b \cdot D \quad (3-16)$$

Tab. 9: Ergebnisse der linearen Regression zwischen Faserwanddicke und Faserdurchmesser für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl

Typ			Gültigkeitsbereich			FWT [μm]	
			SEL	SW	HÖW	a	b
			Ws/m	o	o		
Nh (NA)	Sa	unbl.	2	10-60	20-90	-11,68	0,73

3.4.5 Faserkrümmung (Curl)

Auch für die mittlere Faserkrümmung

$$CU = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3} (\gamma_1 CU_1 + \gamma_2 CU_2 + \gamma_3 CU_3) \quad (3-17)$$

des Faseranteils eines Zellstoffes wird bei variierender spezifischer Mahlergie eine kubische Abhängigkeit

$$CU = a + b \cdot SRE + c \cdot SRE^2 + d \cdot SRE^3 \quad (3-18)$$

festgestellt (**Abb. 13**). Da Faserdurchmesser und Faserwandstärke wesentlich die Faserflexibilität beeinflussen, ist die Verwendung ähnlicher polynomialer Ansätze sinnvoll.

In **Tab. 10** sind die Wirkungen von spezifischer Kantenlast, Schnittwinkel und Öffnungswinkel auf die energieabhängige Entwicklung der Faserkrümmung des Zellstoffes Nh-NA-Sa-unbl zusammengefasst. Der grundsätzlich zu beobachtenden Reduzierung der Faserkrümmung bei wachsendem spezifischem Energieeinsatz werden die Modelle dadurch gerecht, indem der Faktor d in (3-18) negativ gewählt wird.

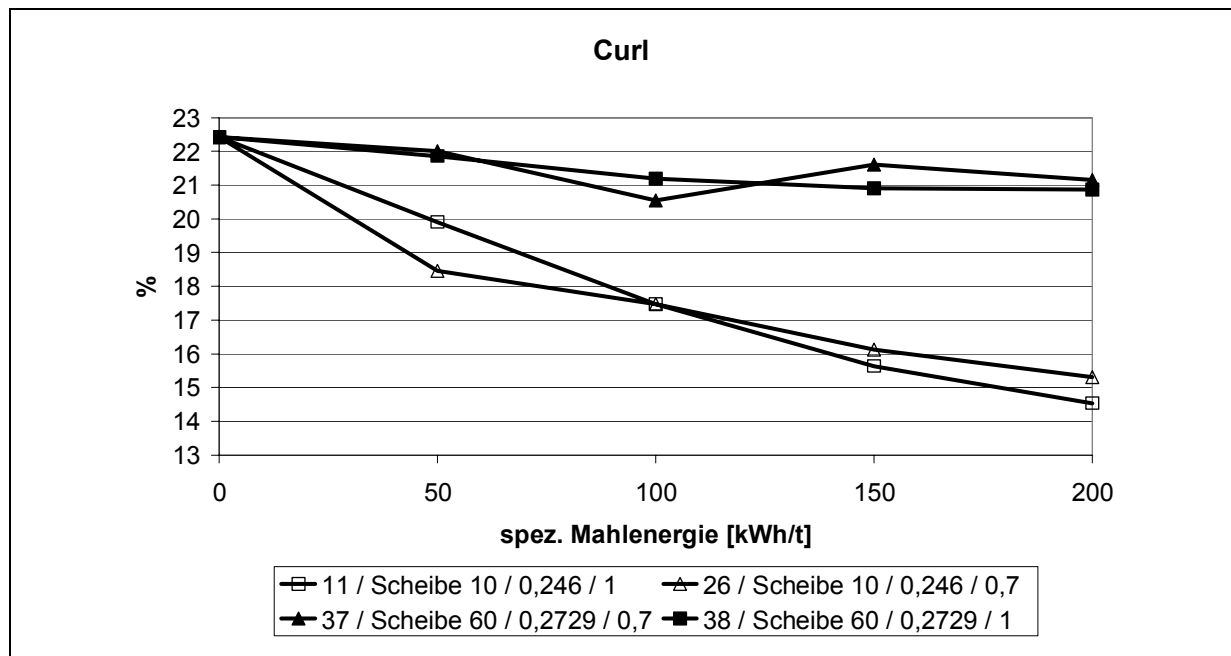


Abb. 13: Abhängigkeit der mittleren Krümmung des Faseranteils (Eu – SA – Sa - ECF) von der spezifischen Mahlergie für 2 Scheibengarnituren mit unterschiedlichen Messerschnittwinkeln (10° und 60°) und unterschiedlichen spezifischen Kantenlasten (0,7 und 1 Ws/m)

Tab. 10: Wirkungen der Einflussgrößen SEL, SW und HÖW auf die mittlere Krümmung des Faseranteils für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl

Typ			Curl [%]												
			SEL				SW			HÖW					
			Ws/m				o			o					
			a	b1	c1	d1	b2	c2	d2	b3	c3	d3	b0	c0	d0
Nh (NA)	Sa	unbl.	24,00				0,30	-0,21	0,05	-0,15	0,09	-0,01	-5,6	5,3	-1,7

3.4.6 Entwässerungswiderstand

Der Schopper-Regler-Wert als Maß des Entwässerungswiderstandes steigt bekanntlich mit wachsendem Energieeintrag bei der Mahlung, wobei für niedrige Energieeinträge sogar ein umso stärkerer Anstieg des SR-Wertes festgestellt wird, je mehr Mahlergie eingesetzt wird. Allerdings ist der SR-Wert nach oben beschränkt. In Konsequenz muss ein Wendepunkt existieren, welcher bei einer Reihe von Mahlversuchen auch identifiziert wurde. Als zweckmäßiges mathematisches Modell für dieses Verhalten erweist sich wiederum ein kubisches Polynom der Form

$$SR = a + b \cdot SRE + c \cdot SRE^2 + d \cdot SRE^3 \quad (3-19)$$

und zwar mit negativen Koeffizienten d. Dies entspricht der Nebenbedingung, dass nach Durchlaufen des Wendepunktes der Funktionswert des Polynoms für wachsende Energieeinträge ein Maximum nicht überschreitet.

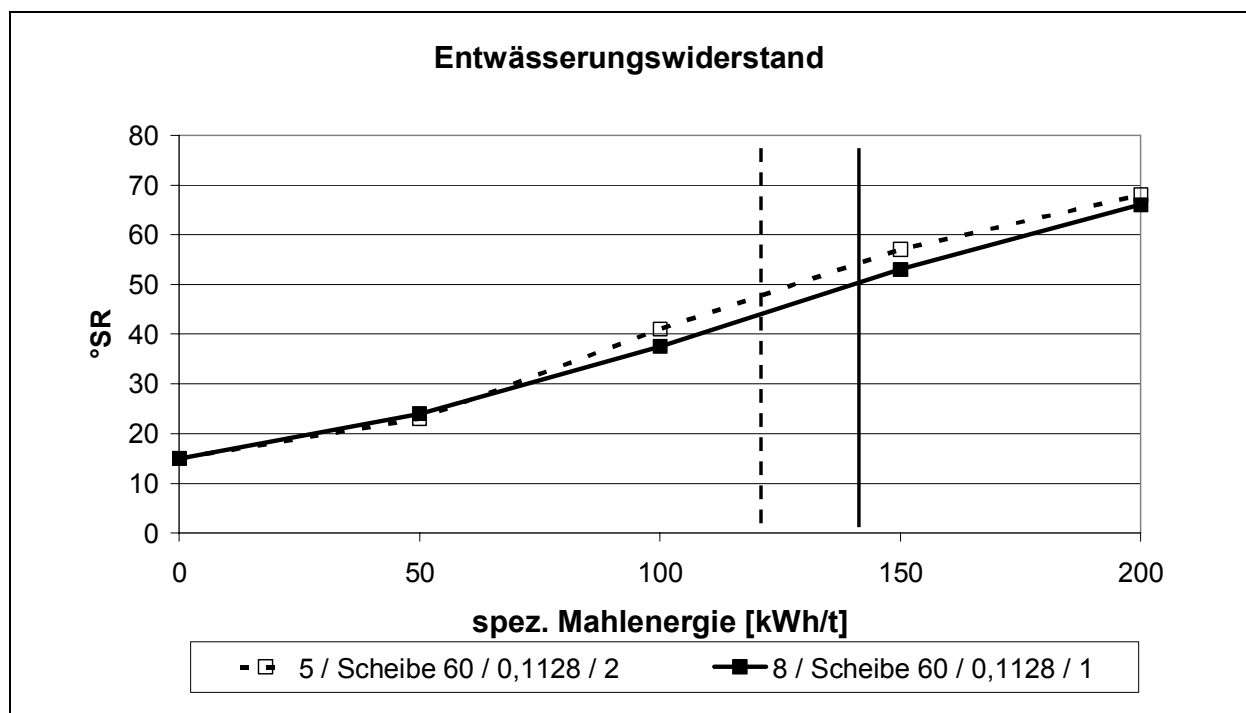


Abb. 14: Abhängigkeit des SR-Wertes (Mahlreihen 5 und 8, Nh - NE - Si - TCF) von der spezifischen Mahlergie für eine Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel bei 2 unterschiedlichen spezifischen Kantenlasten (1 und 2 Ws/m). Die Lage der Wendepunkte ist durch senkrechte Linien angedeutet.

Tab. 11: Wirkungen der Einflussgrößen SEL, SW und HÖW auf den SR-Wert für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl

Typ			SR [°]												
			SEL			SW			HÖW						
			Ws/m			o			o						
			a	b1	c1	d1	b2	c2	d2	b3	c3	d3	b0	c0	d0
Nh (NA)	Sa	unbl.	14,00				-0,21	-0,25	0,09	0,04	0,19	-0,05	5,1	8,8	-2,0

3.4.7 Wasserrückhaltevermögen

Das Wasserrückhaltevermögen entwickelt sich in Abhängigkeit von der eingesetzten Mahlenergie für alle Faserstoffe in nahezu ideal linearer Weise gemäß

$$WRV = a + b \cdot SRE \tag{3-20}$$

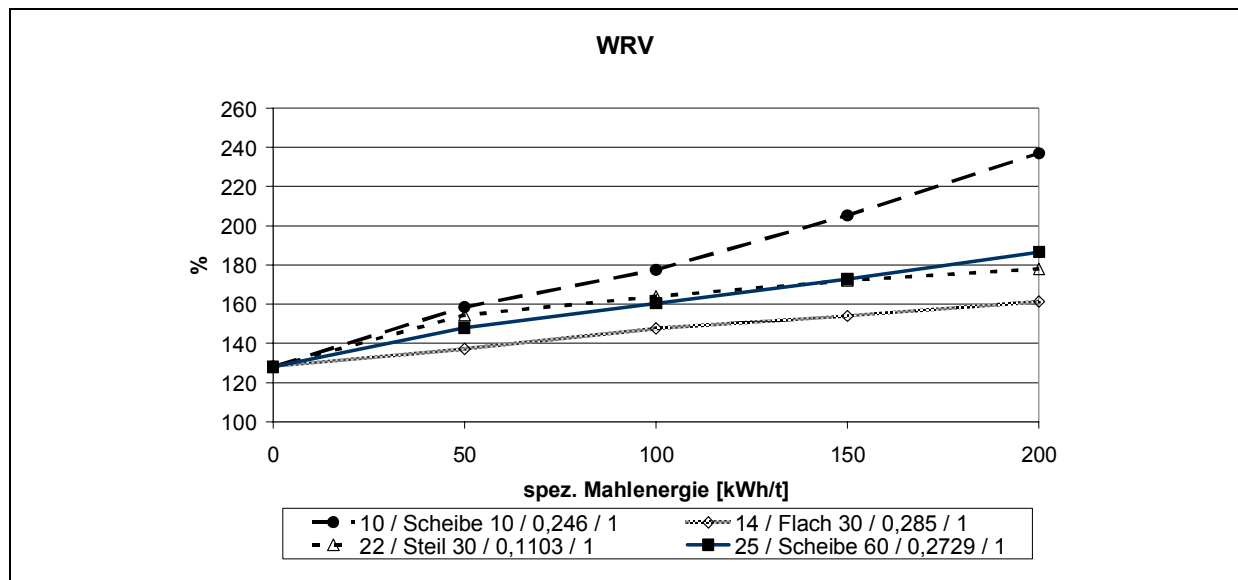


Abb. 15: Abhängigkeit des WRV-Wertes (Mahlreihen 10, 14, 22 und 25, Lh - NE - Sa - ECF) von der spezifischen Mahlenergie für unterschiedliche Mahlgarnituren (SEL:1 Ws/m)

Tab. 12: Wirkungen der Einflussgrößen SEL, SW und HÖW auf den WRV-Wert für den Zellstoff Nh-NA-Sa-unbl

Typ			Gültigkeitsbereich			WRV [%]				
			SEL	SW	HÖW		SEL	SW	HÖW	
			Ws/m	o	o		Ws/m	o	o	
						a	b1	b2	b3	b0
Nh (NA)	Sa	unbl.	2	10-60	20-90	138		-0,08	0,19	25,09

3.4.8 Spezifische Faseroberfläche

Die (hydrodynamisch wirksame) massespezifische Oberfläche (SSA) liefert unmittelbar Informationen über den Grad der mahlungsbedingten Aktivierung der Faseroberfläche. Leider sind Messverfahren zur SSA-Bestimmung extrem aufwändig und liefern nur eingeschränkt reproduzierbare Ergebnisse. In (Abb. 16) wurden zu Daten einer Analyse am Dynamic Drai-

nage Analyser (DDA) der Mahlreihen 39 (Nh – NE – Sa – ECF) und 40 (Eu – SE – Sa – ECF) weitere Ergebnisse aus Permeabilitätsversuchen von ERHARD/FIEDLER [2] und BLECHSCHMIDT/STRUNZ [3] ergänzt. Wie in den Mahlreihen 39 und 40 handelt es sich um verschiedene ECF- und TCF-gebleichte, gemahlene, teilweise fraktionierte Nadel- und Laubholz Zellstoffe (einschließlich Eukalyptus). Es ist deutlich zu erkennen, dass trotz der Vielfältigkeit der Faserstoffe ein starker linearer Zusammenhang zwischen dem Entwässerungswiderstand und der (hydrodynamisch wirksamen) massespezifischen Oberfläche vorliegt. Für die Daten in (Abb. 16) wurde über eine lineare Regression für die Ausgleichgerade die Gleichung

$$SSA[m^2/g] = 0,1627 \cdot SR[^\circ] - 0,8163 \quad (3-21)$$

bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9189$ ermittelt.

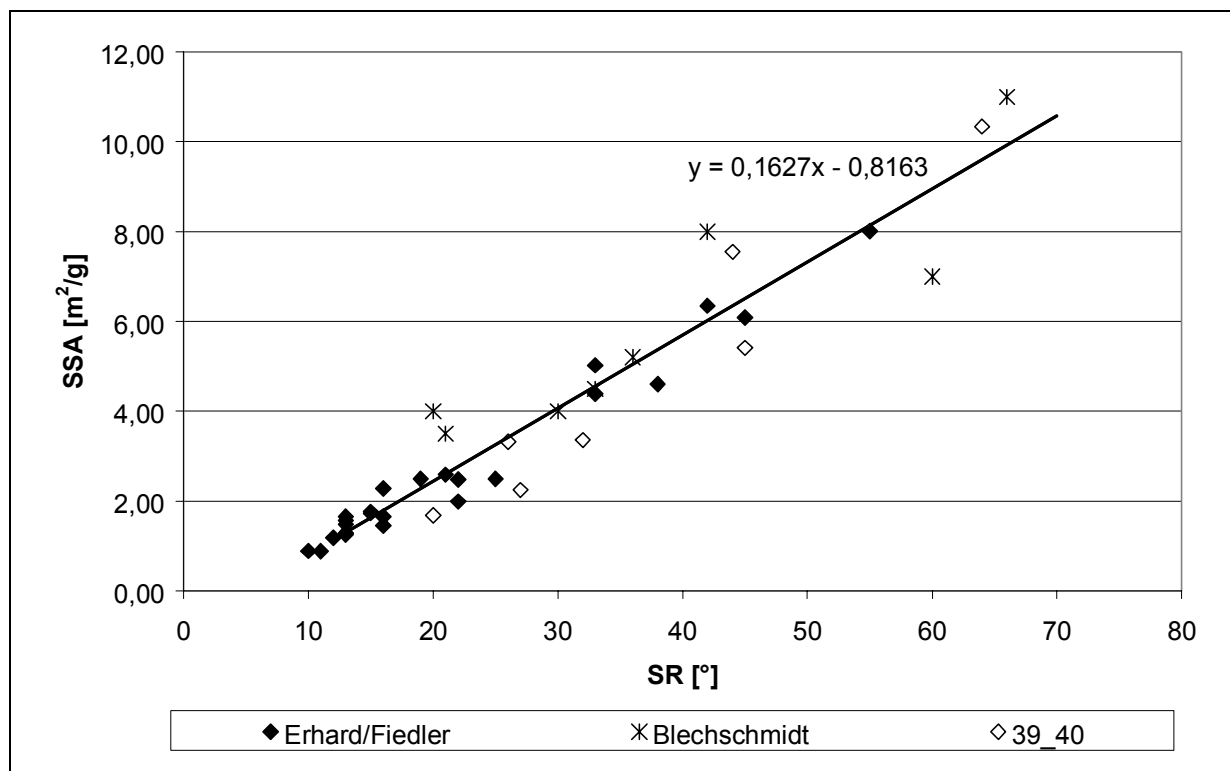


Abb. 16: Abhängigkeit der (hydrodynamisch wirksamen) massespezifischen Oberfläche (SSA) vom SR-Grad für Messergebnisse verschiedener Autoren.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für alle Zellstoffe unabhängig vom Mahlzustand allein aus dem Entwässerungswiderstand anhand Gleichung (3-21) mit hoher Verlässlichkeit auf die spezifische Faseroberfläche geschlossen werden kann.

3.5 Implementierung und Beispiele

Alle im Rahmen des Abschnittes 3.4 bereitgestellten Formeln erfordern keine spezielle mathematische Software, sondern können in übliche Standardsoftware integriert werden. Die Umsetzung soll am Beispiel einer Simulation der Wirkung verschiedener Mahlparameter für ungebleichte Zellstoffe auf Basis nordamerikanischer Nadelhölzer (Sulfataufschluss, ungebleicht) demonstriert werden.

Schritt 1:

Aus den Tabellen **Tab. 6** bis **Tab. 12** sind die Wirkungen der Einflussgrößen spezifische Kantenlast (*SEL*), Schnittwinkel (*SW*) und halber Öffnungswinkel (*HÖW*) für die Zellstoffklasse Nh – NA – Sa - unbl zu importieren.

Tab. 13: Wirkungen der Garniturparameter für die Zellstoffklasse Nh – NA – Sa - unbl

Eigenschaft	SEL				SW			HÖW					
	a	b1	c1	d1	b2	c2	d2	b3	c3	d3	b0	c0	d0
Feinstoff	9				-0,15			0,12			5,51		
Faserlänge	2100				15,1			-5,79			397		
Faserdurchmesser	26,2				0,03	-0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	-1,91	1,87	-0,57
Curl	24,0				0,30	-0,21	0,05	-0,15	0,09	-0,01	-5,64	5,29	-1,68
WRV	138		-		0,08			0,19			25		
SR	14,0				-0,21	-0,25	0,09	0,04	0,19	-0,05	5,07	8,78	-1,96

Schritt 2:

Es sind Werte für die zu simulierenden Einflussgrößen innerhalb der Gültigkeitsbereiche vorzugeben. Anhand derer werden die Koeffizienten a, b, c und d in den SRE-Gleichungen berechnet. Im Beispiel sollen folgende Fälle simuliert werden:

- SW = 60°, HÖW = 90°
- SW = 30°, HÖW = 90°
- SW = 30°, HÖW = 30°

Tab. 14: Koeffizienten der SRE-Funktionen

Eigenschaft (SRE-Gleichung)	Bei- spiel	a) SEL:2 SW:60 HÖW:90				b) SEL:2 SW:30 HÖW:90				c) SEL:2 SW:30 HÖW:30			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
Feinstoff (g1) (3-10)	%	9	7,183			9	11,55			9	4,615		
Faserlänge (L) (3-12)	µm	2100	-6,31			2100	-462			2100	-115		
Faserdurchmesser (D) (3-14)	µm	26,2	1,42	-0,12	-0,06	26,2	0,625	0,391	-0,12	26,2	0,739	-0,21	0,002
Curl (CU) (3-18)	%	24,0	-1,05	1,182	-0,21	24,0	-10,1	7,382	-1,57	24,0	-1,1	1,852	-0,74
WRV (3-20)	%	138	37,31			138	39,59			138	28,41		
SR (3-19)	°	14,0	-3,5	11,44	-1,54	14,0	2,698	18,79	-4,11	14,0	0,149	7,216	-0,96

Die Beispiele a) und c) entsprechen den in den Mahlreihen 1 und 21 verwendeten Mahlgarnituren. Fall b) simuliert eine hypothetische Steilkegelgarnitur. Für bestimmte Einflussgrößen ist der Gültigkeitsbereich auf Grund der für die Modellbildung verfügbaren Messdaten nur auf einen Festwert beschränkt. Varianten dieser Einflussgröße können nicht simuliert werden. Entsprechende Einträge von Wirkungen der Einflussgröße bleiben in **Tab. 13** frei. Im vorliegenden Beispiel (Zellstoffklasse Nh-NA-Sa-unbl) kann deshalb die spezifischer Kantenlast $SEL = 2 \text{ Ws/m}$ nicht variiert werden

Für die Faserwanddicke ergibt sich aus (3-16) mit den Koeffizienten aus *Tab. 9* unmittelbar

$$FWT = -11,68 + 0,73 \cdot D$$

Schritt 3:

Mit Hilfe der SRE-Gleichungen kann für jede Konfiguration der Mahlbedingungen der Einfluss des spezifischen Energieeintrages SRE simuliert werden. Wie zu Beginn des Abschnitts 3.4 festgelegt wurde, beziehen sich die Koeffizienten in allen SRE-Gleichungen auf 100 kWh/t als Grundeinheit, d.h. der reale Energieeintrag (in kWh/t) ist vor der Simulation durch 100 zu dividieren.

In den Abbildungen **Abb. 17** bis **Abb. 19** sind die Ergebnisse der Simulation visualisiert.

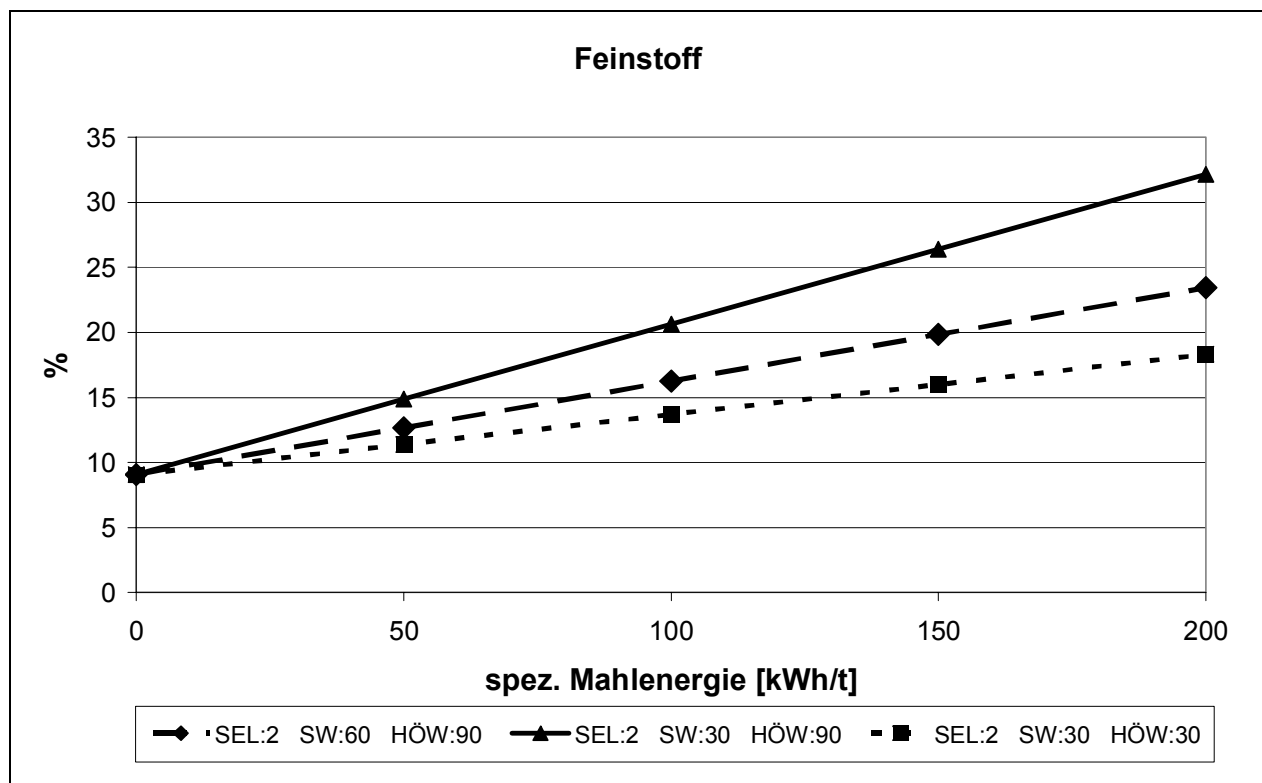


Abb. 17: Simulation der Entwicklung des Feinstoffanteils

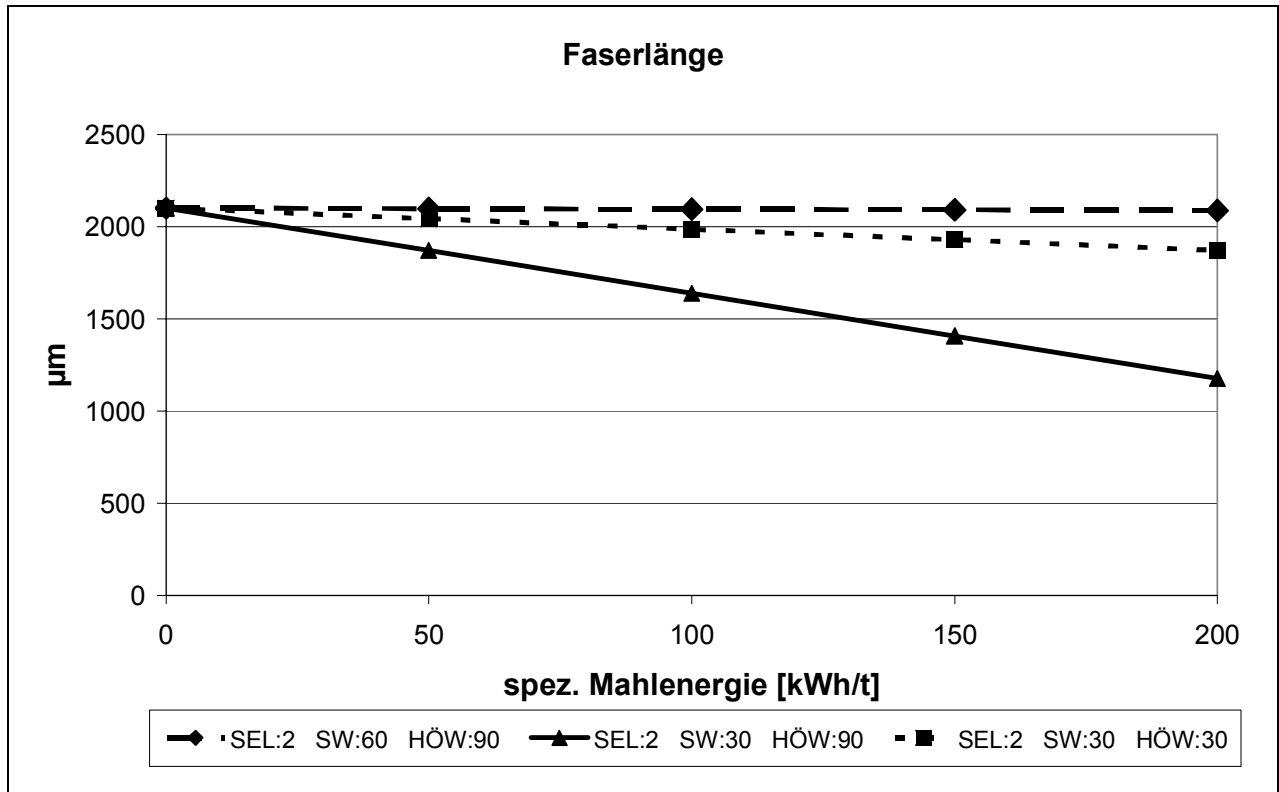


Abb. 18: Simulation der Entwicklung der Faserlänge

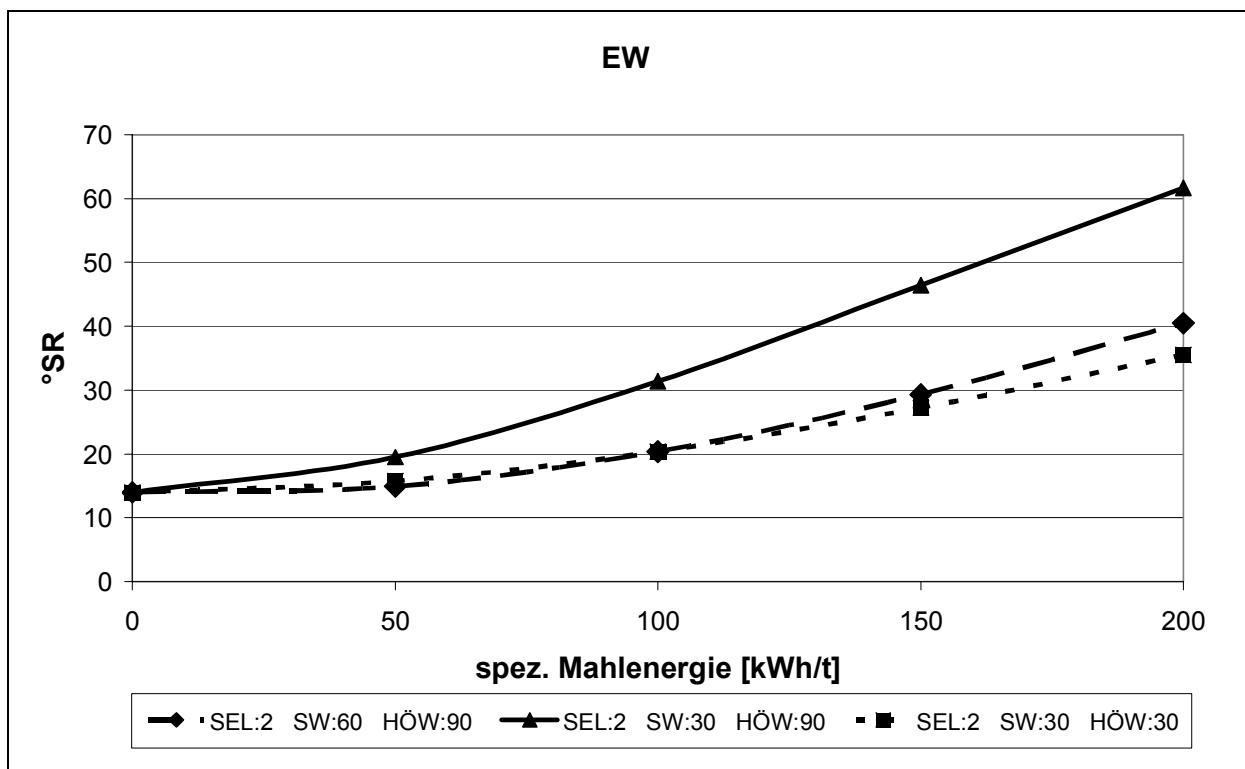


Abb. 19: Simulation der Entwicklung des Entwässerungswiderstands

Weitere Informationen: g.meinel@ptspaper.de, g.baer@ptspaper.de.

Autoren:

Dipl.-Ing. Gert Bär, Dr. Gert Meinel

PTS Heidenau

Pirnaer Str. 37

01809 Heidenau/Sa.

Tel. 03529 - 551688

Fax 03529 - 551899

4 **Literatur**

- 1 TORNBERG J., PAAVILAINEN L., LOHIKOSKI R.:
Mathematical Analysis of Fibre Length Distributions. Applications to Papermaking.
TAPPI Int. Paper Physics Conf. 1991.
- 2 ERHARD K., FIEDLER M:
Der Einfluss der spezifischen Oberfläche von Faserstoffen auf die Wirkungswiese von
chemischen Additiven und auf wesentliche Papiereigenschaften.
Abschlussbericht, PTS-FB 23/03.
- 3 BLECHSCHMIDT J., STRUNZ A.:
Spezifische Eigenschaften von ECF- und TCF-gebleichten Zellstoffen.
PTS-Manuskripte, PTS-MS 13/95.