

## **Deckung des Kurzfasernbedarfs in Spezialpapieren durch alternative Laubholz- zellstoffe**

M. Fiedler, S. Schramm, G. Meinl u. K. Erhard

### **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Einfluss der Mahlung auf die Suspensions- und Papiereigenschaften</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Steuerung der Papiereigenschaften durch funktionale Additive</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Optimierungswerkzeug zur Faserstoffsubstitution</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Werkzeuge zur Berechnung von Papiereigenschaften</b>	<b>16</b>
<b>9</b>	<b>Richtlinien zur Substitution von Kurzfasernzellstoffen in Spezialpapieren</b>	<b>19</b>
<b>10</b>	<b>Validierung der Ergebnisse im Technikum</b>	<b>23</b>
<b>11</b>	<b>Anwendung auf einen Praxisfall</b>	<b>25</b>
<b>12</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>26</b>
<b>13</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>27</b>

## 1 Zusammenfassung

---

<b>Thema</b>	Deckung des Kurzfasernbedarfs in Spezialpapieren durch alternative Laubholzzellstoffe.
<b>Zielstellung</b>	<p>Ziel des Forschungsvorhabens war die Substitution von Ahorn- und Birkenzellstoffen durch Eucalyptus nitens-, Akazien-, Aspenzellstoff oder BCTMP-Stoffe in technischen Spezialpapieren und hochwertigen graphischen Papieren, um die Versorgung mit Kurzfasernstoffen zu sichern sowie Rohstoffkosten und Mahlungenergie einzusparen. Dabei galt es ein Optimierungswerkzeug bereitzustellen, das die spezifischen Mahlungsbedingungen der genannten Kurzfasernstoffe berücksichtigt und Festigkeit steigernde Additiven sowie CMC-modifizierte Fasernstoffen einbezieht, ohne die angestrebte Papiereigenschaften nachteilig zu beeinflussen.</p>
<b>Ergebnisse</b>	<p>Ausgehend von einer Auswahl typischer Laubholz (LH)-Zellstoffe der gemäßigten Breiten sowie Laubholz-BCTMP's, deren chemisch-morphologischer Charakteristik und ihres grundsätzlichen Mahlungsverhaltens erfolgte ein Eigenschaftsvergleich, der Defizite und Vorteile der bekannten Fasernstoffe gegenüber den jetzt verfügbaren aufzeigte.</p> <p>Um die Eigenschaften der neuen Zellstofftypen an die bekannten Zellstoffe der gemäßigten Breiten anzupassen, bestand die Herausforderung darin, folgende drei Eigenschaftsfelder gegeneinander abzugleichen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Unterschiede in der Fasermorphologie (Fasernlänge, Verhältnis von Fasernbreite zur Fasernwanddicke und spezifische Fasernanzahl),</li><li>• Unterschiede im Hemicellulosegehalt und Ladungscharakter</li><li>• Unterschiede in Gestalt und Gehalt der Gefäßzellen.</li></ul> <p>Es konnte gezeigt werden, dass bei Einsatz neuer Mahlgarnituren, die mit sehr niedriger spezifischer Kantenlast arbeiten, für Eucalyptus- und Akazienzellstoff Eigenschaften entwickelt werden konnten, die sonst nur für Birken- oder Ahornzellstoffe bekannt waren. Hierbei wurde deutlich, dass insbesondere der Zellstoff aus Eucalyptus nitens das Potenzial besitzt, Eigenschaften typischer Birkenzellstoffe auszubilden und Eucalyptus grandis sowie Akazienzellstoff und Ahornzellstoff ersetzen kann. Dies gelang, indem die sekundliche Schnittlänge der Mahlgarnituren konstruktiv variiert wurde, und so spezifische Mahlkantenbelastungen (SEL) im Bereich von 0,1 und 0,3 J/m im Vergleich zur herkömmlich angewandten Kantenlast von 1,0 J/m zur Anwendung kamen. Es wurde festgestellt, dass aufgrund der großen aktiven Messeroberfläche die Anzahl der im Mahlsplatt behandelten Fasern dadurch ansteigt, wobei die einzelne Faser in geringerem Umfang mechanisch umgeformt oder geschädigt wurde. Die Folge hiervon war, dass bei geringer Mahlkantenbelastung der Entwässerungswiderstand sowie der WRV rascher ansteigt und mehr D 200-Feinstoff erzeugt wurden. Bei Einsatz dieser Garnituren gelang es, optimale Festigkeits-, Oberflächen- und optische Eigenschaften bei niedrigen spezifischen Energieeinträgen zu erzielen und so</p>

---

die Grundlage für die Substitution zu legen.

Auf dieser Datengrundlage wurde ein Optimierungswerkzeug entwickelt, das es ermöglicht, unter Berücksichtigung mehrerer Zieleigenschaften im Papier die Mahlungsbedingungen für den Ersatzfaserstoff optimal anzupassen.

In diesen Untersuchungen wurde auch der Mahlungseinfluss auf Fasern und Gefäßzellen mikroskopisch verfolgt. Es wurde erkannt, dass Mahlgarnituren mit großer aktiver Messeroberfläche Faserstoffe stärker fibrillieren und Feinstoffe bilden. Während in der herkömmlichen Mahlung die Gefäßzellen nur wenig beeinflusst wurden, wurden diese entweder bei geringer Mahlungsintensität flexibilisiert oder in Fragmente, die schadlos in die Papierstruktur einbaubar sein sollten, zertrümmert. So konnte gezeigt werden, dass die Gefäßzellen mittels Hydrozyklonbehandlung anreicherbar waren und durch nachfolgende Mahlung bei geringer Mahlungsintensität unschädlich gemacht werden konnten.

Unterstützt man die durch Mahlung erreichten Ergebnisse gezielt durch Trockenfestmittel, z. B. kationische Stärke, so können Nachteile, die sich aus dem Hemicellulosegehalt und –zusammensetzung ergeben, ausgeglichen werden.

---

**Schlussfolgerung**

Typische Zellstoffsortimente aus Laubhölzern der gemäßigten Breiten sind durch bereits bekannte und neue Zellstofftypen auf Basis von Eucalyptus globulus, E. grandis und E. nitens sowie Akazienzellstoff substituierbar. Mit Hilfe der entwickelten Optimierungswerkzeuge ist es möglich den Austausch der herkömmlichen Laubholzsortimente gegen neue beratend zu begleiten. Dabei ist es möglich, neben der angestrebten Zieleigenschaft des Papiers, die Entwicklung weiterer Papiereigenschaften ergänzend mitzuverfolgen, um angestrebte Papiereigenschaften zu erreichen. Ergebnisse zeigten, dass Birkezellstoff z. B. durch Zellstoff aus E. nitens und E. globulus oder Ahornzellstoff gegen Zellstoff aus Aspe, E. grandis oder Akazie unter Beachtung von Randbedingungen austauschbar sind. Durch Anwendung der entwickelten Werkzeuge wird der finanzielle Aufwand für die Faserstoffsubstitution und das Risiko reduziert. Mit dem Austausch und der Anwendung neuer Mahlungsbedingungen werden Rohstoff- und Energiekosten eingespart. Damit helfen die Projektergebnisse, die Wettbewerbsfähigkeit von kmU-Unternehmen zu steigern.

---

**Danksagung**

Das Forschungsvorhaben IGF 14811 BRder Forschungsvereinigung PTS wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung“ (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

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

---

## 2 Abstract

---

**Topic** Using alternative hardwood pulps to meet the short fibre demand of specialty papers

---

**Objective** Aim of this research project was the substitution of eucalyptus nitens, acacia and aspen or BCTMP pulps for maple and birch pulps in technical specialty papers and high-quality graphic papers, to ensure adequate supply of short fibres, save raw material costs and refining energy. This required the provision of an optimisation tool which takes into account the specific refining conditions of these short fibre pulps and includes also strength-enhancing additives as well as CMC modified pulps without adverse effects on the desired paper properties.

---

**Results** A selection of typical hardwood pulps from temperate zones as well as hardwood BCTM pulps were compared with regard to their chemical-morphological characteristics and basic refining behaviours to reveal the shortcomings and advantages of known pulps as compared to those available today.

The challenge of adapting the properties of the new pulp types to those of known temperate-zone pulps referred to three property groups:

- differences in fibre morphology (fibre length, ratio between fibre width and fibre wall thickness and specific number of fibres),
- differences in hemicellulose content and charge character,
- differences in shape and content of the vessel cells.

By means of new refiner fillings working at very low specific edge loads, it was possible to develop properties in eucalyptus and acacia pulps which had only been known from birch or maple pulps before. In this connection, it became apparent that especially fibres obtained from eucalyptus nitens are potentially capable of developing characteristics of typical birch pulps; and that they can be substituted for eucalyptus grandis, acacia and maple pulps. This was achieved by varying the cutting length per second of refiner fillings design-wise, thus permitting specific edge loads of around 0,1 and 0,3 J/m as compared to the conventionally used 1,0 J/m. Because of the large active surface of the refiner bars, the number of fibres treated in the refiner gap was increased, with single fibres being less mechanically deformed or damaged. As a result, drainage resistance and WRV increased more rapidly at reduced refiner edge loads, and more D 200 fines were produced. The new fillings permit optimum strength, surface and optical characteristics to be achieved at low specific energy inputs, thus paving the way for the envisaged substitution.

Based on these results, an optimisation tool was developed which makes it possible to optimally adjust the refining conditions of substitute pulps with a view to several different target properties of paper.

Another part of the project work was microscopic studies monitoring the refining effects on fibres and vessel cells. Fillings with large active bar surface were found to cause stronger fibrillation and fines formation. While vessel cells tend to

---

---

remain largely unchanged in conventional refining, they were either made more flexible at low refining intensity or chopped into fragments which should be incorporable into the paper structure without causing any damage. Hydrocyclone treatment could be shown to concentrate the vessel cells so that they could be rendered harmless by subsequent low-intensity refining.

Drawbacks resulting from hemicellulose content and -composition can be offset by using dry strength agents such as cationic starch to systematically support the refining results.

---

## **Conclusions**

It is possible to substitute new or already known pulp types based on eucalyptus globulus, -grandis and -nitens as well as acacia pulps for typical hardwood pulps from moderate climatic zones. The optimisation tools developed here can be used for consulting services to assist with the substitution of new for conventional hardwood pulps. The tools will enable papermakers to monitor the development of further paper properties in addition to the envisaged target characteristic, in order to achieve the desired paper quality. Results have shown that it is possible to replace birch pulp by eucalyptus nitens or -globulus, for example, or maple pulps by aspen, eucalyptus grandis or acacia pulps, provided that certain boundary conditions are being observed. Applying the tools developed here will reduce the cost of and risk of substitution; changed and new refining conditions will save raw material- and energy costs. Thus, the results of this project will help increase the competitiveness of SME.

---

## **Acknowledgement**

The IGF 14811 BR research project of the research association PTS was funded within the programme of promoting "pre-competitive joint research (IGF)" by the German Federal Ministry of Economics and Technology BMWi and carried out under the umbrella of the German Federation of Industrial Co-operative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our warm gratitude for this support.

Last but not least, we would like to thank the companies of the paper and supply sectors involved in this project for their valuable support.

---

### 3 Einleitung

#### **Einsatz von Kurzfasern**

Der Einsatz von Kurzfasern wächst seit geraumer Zeit kontinuierlich. Das betrifft sowohl den Markt der höherwertigen graphischen Papiere als auch Spezialpapiere. Dieser Anstieg ist dabei eng mit der Einführung von Eukalyptuszellstoff ab etwa Mitte der 70er Jahre verbunden, indem sich in Südamerika und in Südeuropa sowie in Teilen Südafrikas und Südostasiens sowie in Australien und Neuseeland eine durch Plantagenwirtschaft begründete Zellstoffindustrie entwickelte. Dabei schaffte die Kultivierung der schnellwüchsigen Eukalyptusarten *E. globulus* und *E. grandis* die Voraussetzung, ausreichend Kurzfasern für die Zellstoffherstellung bereitzustellen. Die kurzen Umtriebszeiten dieser Hölzer, *E. globulus* kann im subtropischen Klima Südeuropas nach ca. 16 bis 19 Jahren und *E. grandis* im tropischen Südamerika heute nach etwa 6 bis 9 Jahren geerntet werden, ermöglichen auf dieser Basis eine äußerst wirtschaftliche Erzeugung von Kurzfasern. Diese Wettbewerbsbedingungen konnten und können die traditionell eingesetzten Laubhölzer der nördlichen Breiten in Europa und Nordamerika nur wenig entgegensetzen. Durch die langen Umtriebszeiten dieser Hölzer müssen die daraus gefertigten Zellstoffe zwangsläufig höhere Preise aufweisen als dies für schnellwüchsige Eukalyptussortimente der Fall ist. Diese Entwicklung führte dazu, dass die hauptsächlich davon betroffenen Birken- und Ahornzellstoffe aus dem Sektor der graphischen Massenpapiere verdrängt wurden und nur noch in hochwertigen graphischen sowie Spezialpapieren eingesetzt wurden.

#### **Verfügbarkeit der Kurzfasern**

Gleichzeitig verringerte sich die Verfügbarkeit dieser herkömmlichen Kurzfasern aus Birke und Ahorn in den letzten Jahren. Diese Entwicklung resultiert einerseits aus mangelnden Investitionen in unrentablen und veraltete Zellstoffanlagen und den damit verbundenen Produktionsschließungen in Nordamerika sowie der begrenzten Verfügbarkeit von Birkenfasern in Europa. Andererseits trug auch die wachsende Nachfrage nach diesen Kurzfasern und die Installation neuer Erzeugungskapazitäten für Feinpapier in Asien zu dieser Entwicklung bei [1]. So liegen heute die Preise für gebleichten, nördlichen Kurzfaser-sulfat (NBHKP) bei ca. 540 € und für Eukalyptuszellstoff bei ca. 520 €. Gebleichter nördlich Langfaser-sulfat (NBSK) liegt vergleichsweise bei etwa 900 US\$ (ca. 580 €) [2]. Ein Vergleich der Preise zeigt, dass Kurzfasern aus Nordamerika und Kanada um 20 -30 % teurer ist als Kurzfasern aus Finnland bzw. Portugal. Noch preiswerter sind die Kurzfasern aus Südamerika wie Brasilien, Chile und Uruguay. Sie sind beispielsweise um 10 – 30 % kostengünstiger als Birkenzellstoff aus Finnland. Diese Preisentwicklung wurde möglich, da die neu installierten Zellstoffherstellungskapazitäten für Eukalyptus etwa ein unteres Niveau von 2000 t/d aufweisen [3].

#### **Entwicklung des Kurzfasernmarktes**

Diese Entwicklung auf dem Kurzfasernmarkt ist dabei stellvertretend für die insgesamt zu beobachtende Entwicklung: Immer größere Zellstoffherstellungskapazitäten stellen dann wirtschaftlich Zellstoff her, wenn es sich um commodity-Qualitäten handelt, d. h. sie arbeiten dann wirtschaftlich, wenn Zellstoff eines Qualitätsniveaus erzeugt wird. Für den Papierhersteller heißt dies, dass er zwar Zellstoffe relativ hoher Qualitätskonstanz beziehen kann, deren papiertechnologische Eigenschaften in der Rezeptur aber durch Mischen entsprechender Sortimente und deren Aufbereitung mittels Mahlung selbst so

---

vornehmen muss, dass die gewünschten Papiereigenschaften erreicht werden. Dabei ist es in vielen Fällen zusätzlich notwendig, unterstützend funktionale Additive einzusetzen.

---

**Problemstellung** Es ist abzusehen, dass diese vorgezeichnete Entwicklung anhält. Aus Zellstoffen, die kostengünstig aus schnellwüchsigen Holzarten erzeugt werden, muss es dann gelingen, all die Papiersortimente zu erzeugen, die heute noch unter Anwendung von Ahorn- und Birkenzellstoff hergestellt werden. Natürlich ist bekannt, dass dazu die Eukalyptuszellstoffe aus *E. globulus* und *E. grandis* nur begrenzt geeignet sind, selbst wenn diese unter zielstrebigem Variation der Mahlungsbedingungen aufbereitet wurden.

Diese sich auftuende Lücke in den Papiereigenschaften sollen neue Zellstofftypen schließen, die durch Kultivierung von Akazie (*Acacia magnium*), Aspe (*Populus tremula*), einer weiteren Eukalyptusart, dem *E. nitens* und durch Nutzung von Aspen-BCTMP-Stoffen (bleached chemo-thermo-mechanical pulp), die in den nächsten Jahren verstärkt auf dem globalen Markt zur Verfügung stehen werden und die Ahorn- und Birkenzellstoffe weiter in den Hintergrund drängen. Für diese neuen Faserstoffe existieren jedoch nur unzureichende Kenntnisse ihrer papiertechnologischen Eigenschaften und wie sie aufbereitet und vor allem gemahlen werden müssen, um die bisher mit Ahorn- und Birkenzellstoffen erreichten Papiereigenschaften einzustellen. Besonders kleine und mittlere Unternehmen werden gezwungen sein, diesen Schritt zu gehen, wenn sie weiterhin im Wettbewerb bestehen wollen. Nur durch ihren Einsatz wird es gelingen, die Herstellungskosten betroffener Papiersortimente auf kleineren und langsameren Papiermaschinen wirtschaftlich zu gestalten [4].

---

**Forschungsziel** Ziel des Forschungsvorhabens war die Substitution von Ahorn- und Birkenzellstoffen durch *Eucalyptus nitens*-, Akazien-, Aspenzellstoff oder BCTMP, vor allem in technischen Spezialpapieren und hochwertigen graphischen Papieren. Um insbesondere auf die aktuelle Entwicklung von Verfügbarkeit und Preis zu reagieren, wurde als ein Sonderfall die Substitution von iberischen Eukalyptuszellstoffen (*E. globulus*) durch südamerikanische *E. grandis*-Zellstoffe in die Untersuchungen einbezogen. Dabei war zu sichern, dass die angestrebte Produktqualität durch die Substitution nicht nachteilig beeinflusst wird.

---

## 4 Versuchsdurchführung

---

### Übersicht Faserstoffe

Aus der Vielzahl der für Spezialpapiere eingesetzten Kurzfasern wurden in **Tab. 1** aufgeführten Faserstoffe, die sich hinsichtlich Holzart und geografischer Herkunft unterschieden, für die Untersuchungen ausgewählt.

**Tab. 1:** Übersicht der eingesetzten Faserstoffe

Faserstoff	Rohstoff, Erzeugung	Bemerkungen
Birke	Birkenzellstoff, ECF-gebleicht	KF-Zellstoff zur Steigerung der Spaltfestigkeit
Eucalyptus globulus	Eucalyptus globulus (Europa)	In Südeuropa angebaute Eukalyptus-Klon zeigt morphologische Abweichungen zu dem in Südamerika angebaute Klon; meist verwendete LH-Zellstoffe in der Papiererzeugung
Eucalyptus grandis	Eucalyptus grandis (Südamerika)	
Ahorn	div. Acer Spezies	Spezialzellstoff mit hohem Primärfeinstoffgehalt und starkem Abbaugrad: speziell zur Sicherung von Blattdichte und hervorragenden Oberflächeneigenschaften erzeugt
Eucalyptus nitens	Eucalyptus nitens	Neu eingeführter Eukalyptus-Klon
Akazie	Acacia magnium	In Asien und Australien angebaute Klon
Aspe	Populus tremula	Nordamerika, Anbau in Plantagen, Ersatz für Ahorn
BCTMP	Bleached chemo thermo mechanical pulp	Gebleichter Aspen-CTMP, Nordamerika (BCTMP Volumen und Festigkeit)

Diese Faserstoffe wurden hinsichtlich ihrer morphologischen und chemischen Eigenschaften sowie ihrer Zusammensetzung untersucht.

Nach der Mahlung der Faserstoffe mit den verschiedenen Mahlgarnituren wurden die Suspensions- und Papiereigenschaften bestimmt.

---



## 5 Einfluss der Mahlung auf die Suspensions- und Papiereigenschaften

---

### Vorgehen

Damit Papiereigenschaften mittels Mahlung genauer eingestellt werden können, war es erforderlich, für die neuen Laubholzzellstoffe konstruktiv angepasste Garnituren einzusetzen. Deshalb wurden für die Untersuchungen Garnituren genutzt, welche es erlaubten, Mahlversuche mit niedrigen spezifischen Kantenbelastungen, angepasst an die Faserfeinheit und geringe Mahlungsresistenz der zu untersuchenden Faserstoffe, durchzuführen. Variiert zu diesem Zweck wurde die sekundliche Schnittlänge (Messeranzahl, Messerbreite). Konstant gehalten wurden das Material sowie Grunddesign der Garnituren.

Diese Betriebsart der Refiner in der Mahlung wird auch als „Low-Intensity-Refining“ bezeichnet, insbesondere dann, wenn die spezifische Kantenlast im Bereich von 0,1 Ws/m und darunter erreicht wird. Durch niedrige Kantenlast und optimalen Schnittwinkel können Festigkeiten, Oberflächen- und optische Eigenschaften bei niedrigeren spezifischen Energieeinträgen erzielt werden. Es werden mehr Fasern in der Mahlung erreicht. Durch den Einsatz neuer Mahlgarnituren mit großer aktiver Messeroberfläche wurde es möglich die Fasern schonender zu mahlen, so dass mittels geringen Mahlungsintensitäten bessere statische Festigkeiten erreichbar sind.

---

### Mahlungsbedingungen

Die Mahlung der Faserstoffe erfolgte im Refiner des PTS-Technikums. Zur Anwendung kamen drei verschiedene Scheiben-Garnituren mit spezifischer Bemessung. Die Garnitur 1 ist die Garnitur, die bis in die Gegenwart üblicherweise für Kurzfasierzellstoffe eingesetzt wird. Garnitur 2 und 3 wurden konstruktiv angepasst, um niedrige Kantenbelastungen zu realisieren. Folgende Mahlkantenbelastungen wurden für die Garnituren angewandt:

Garnitur 1: 1,0 Ws/m (von 0,5 bis 1,5 Ws/m einsetzbar)

Garnitur 2: 0,3 Ws/m (von 0,15 bis 0,6 Ws/m einsetzbar)

Garnitur 3: 0,1 Ws/m (von 0,1 bis 0,25 Ws/m einsetzbar)

Der Schnittwinkel der Garnituren betrug 60°.

Die spezifische Mahlarbeit wurde faserstoff- und garniturspezifisch festgelegt.

Die BCTMP-Stoffe wurden mit der Mahlgarnitur 1 mit einer Mahlkantenbelastung von 0,5 Ws/m gemahlen.

---

### Substitutionsmöglichkeiten Birke vs Eucalyptus nitens

Auf Grund der ähnlichen chemischen und morphologischen Eigenschaften bietet es sich an, Birke durch Eucalyptus nitens zu ersetzen. Beispielhaft ist dies am Tensile-Index in **Abb. 1** dargestellt. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass der Zellstoff aus Eucalyptus nitens mit der Mahlgarnitur 2 (0,3 Ws/m) ähnliche Festigkeitseigenschaften erreicht wie der aus Birkenzellstoff mit der Mahlgarnitur 1 (1 Ws/m). Für die Substitution von Birke in einer speziellen Papierrezeptur müssen aber alle einzustellenden Eigenschaften berücksichtigt werden und entsprechend die Mahlbedingungen angepasst werden. Zum Auffinden passender Mahlparameter wurde ein Optimierungswerkzeug entwickelt, auf dessen Arbeitsweise noch eingegangen wird.

---

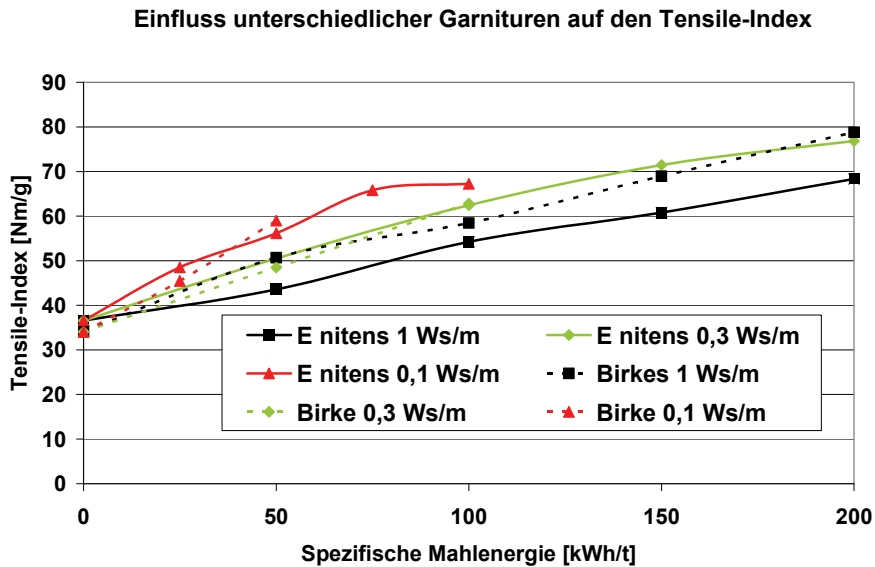


Abb. 1 Entwicklung der Tensile Indizes in der Mahlung in Abhängigkeit vom Energieeintrag für die drei Mahlgarnituren bei Birken vs. Eucalyptus nitens

Substitutionsmöglichkeiten  
Ahorn vs Aspe

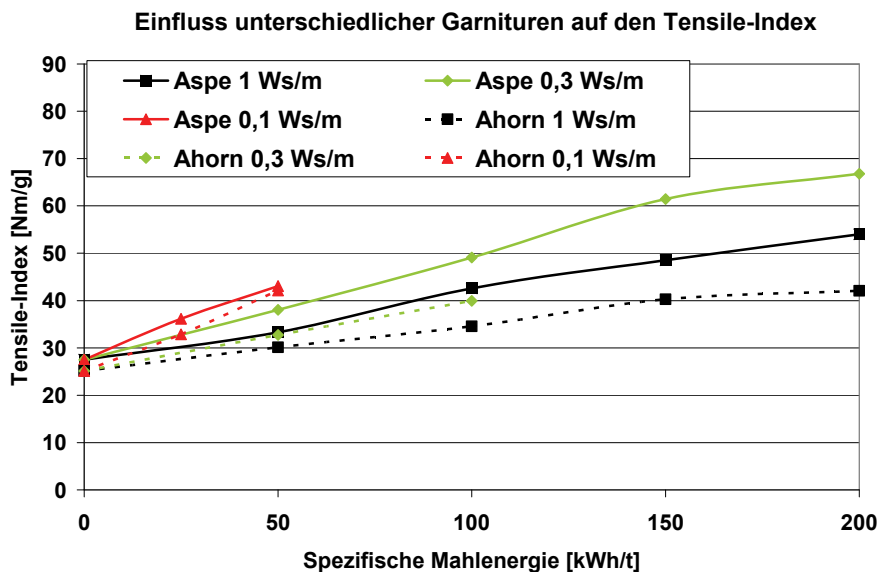
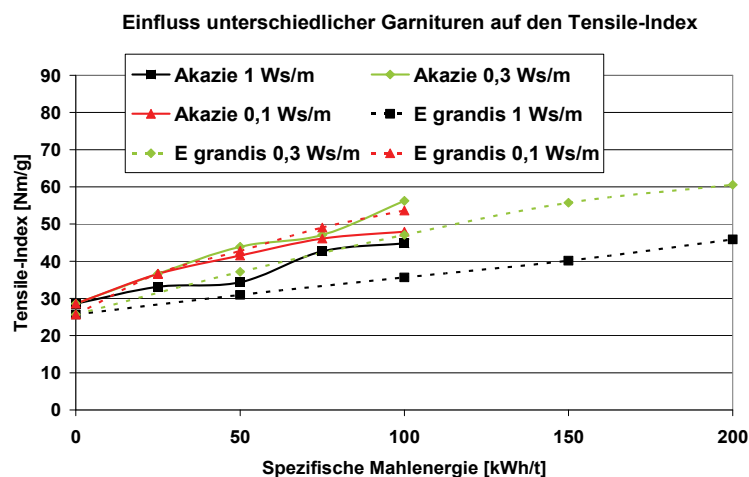


Abb. 2 Entwicklung der Tensile Indizes in der Mahlung in Abhängigkeit vom Energieeintrag für die drei Mahlgarnituren bei Ahorn- vs. Aspenzellstoff

Die sehr speziellen Eigenschaften des Ahornzellstoffs, wie der hohe Feinstoffgehalt, werden genutzt um dichte Papiere mit guten Oberflächeneigenschaften zu erzeugen. Der gewählte Aspenzellstoff besitzt auch einen hohen Anteil an Feinstoff und sollte dadurch in der Lage sein, diesen speziellen Ahornzellstoff zu ersetzen. Aus der Abb. 2 ist erkennbar, dass sich die Festigkeiten des Aspenzellstoffs ähnliche denen des Ahornzellstoffs entwickeln.

### Substitutionsmöglichkeiten Eucalyptus globulus vs Akazie

Wie aus **Abb. 3** ersichtlich wird, ist der Akaziezellstoff in der Lage ähnliche Festigkeiten in der Mahlung wie der Eucalyptus globulus auszubilden. Um die Substitutionsmöglichkeit für ein bestimmtes Papiersortiment auszuloten, müssen Untersuchungen durchgeführt werden, um genau das Substitutionsziel zu erreichen.



**Abb. 3** Entwicklung der Tensile Indizes in der Mahlung in Abhängigkeit vom Energieeintrag für die drei Mahlgarnituren bei Eucalyptus globulus- vs. Akazienzellstoff

### Fazit

Die Ergebnisse zeigten, dass durch Einsatz von Garnituren mit großer aktiver Messeroberfläche gleiche Festigkeitseigenschaften mit geringer spezifischer Mahlenergie erzielt werden. Die Auswahl der Garnitur und die Mahlbedingungen sind dabei abhängig von der Zellstoffsorte. Durch Interpolation der zu erreichenden Eigenschaft kann im einfachsten Falle die optimale Garnitur und der spezifische Energieeintrag festgelegt werden. Substituiert werden können so z.B. Birke durch E. nitens, Ahorn durch Aspe oder E.globulus durch Akazie. Wendet man aber das im Projekt entwickelte Optimierungswerkzeug an, so berücksichtigt dies mehrere Papiereigenschaften, um die Mahlparameter bei Substitution optimal an diese anzupassen.

Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten eine deutlich bessere Fibrillierung der Fasern bei Mahlung mit geringerer Kantenlast. Offensichtlich werden durch geringere Kantenbelastung und größerer wirksamer Mahloberfläche mehr Fasern behandelt als dies in der konventionellen Mahlung der Fall ist [5].

## 6 Steuerung der Papiereigenschaften durch funktionale Additive

### Vorgehen

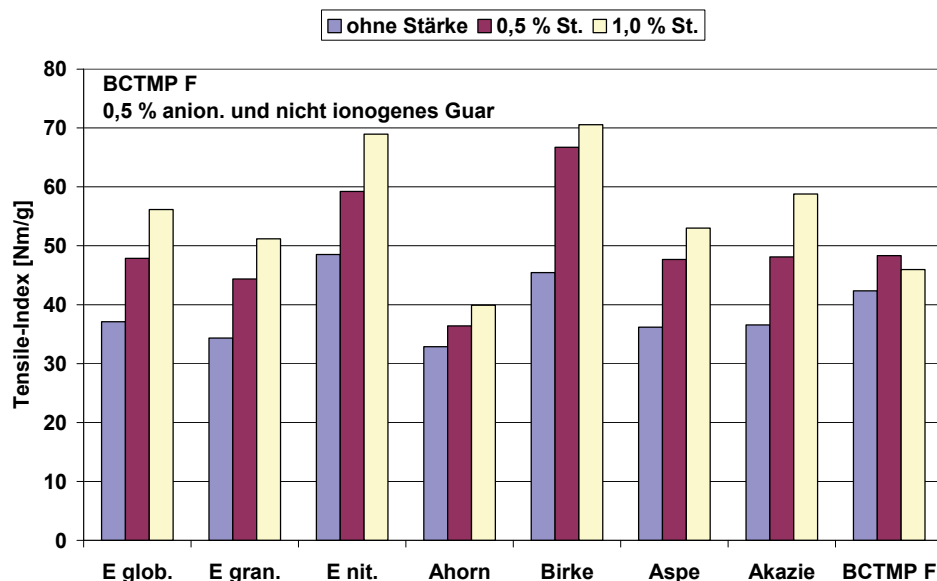
Die Untersuchungen machten aber auch deutlich, dass durch alleinige Anpassung der Mahlungsbedingungen die Substitution schwer durchführbar ist. Neben den morphologischen Unterschieden betrifft dies insbesondere den Gehalt und die Zusammensetzung der Hemicellulosen mit Auswirkungen auf die Ladungseigenschaften. Um Defizite hier ausgleichen zu können, wurde die Reaktivität der gemahlten Faserstoffe gegenüber Stärke, Guar und CMC ermittelt. Die Untersuchungen erfolgten an einem Mahlpunkt von ca. 25 SR vor und nach der Mahlung unter Anwendung von zwei Dosierstufen an Stärke und Guar.

Die Anwendung von CMC erfolgte in einem getrennten MC-Modifizierungsschritt unter Nutzung des Bleichreaktors, wobei CMC in zwei Konzentrationen zugesetzt wurde.

Die sich ergebenden Papiereigenschaften wurden an Laborblättern ermittelt.

### Zugabe von Stärke (Guar bei BCTMP)

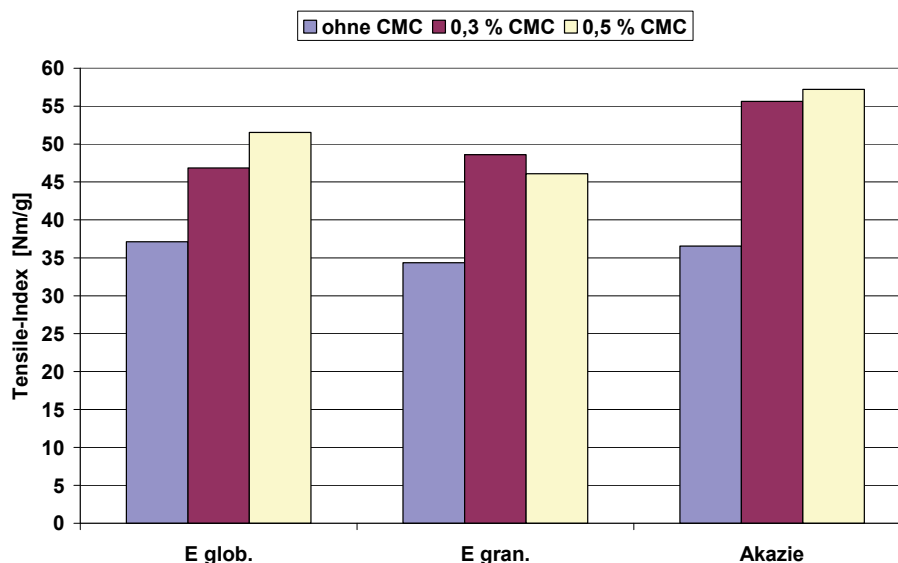
Durch die Zugabe von 1 % Stärke zum Birkenzellstoff konnte ein Tensile-Index von ca. 70 Nm/g erreicht werden, der sonst nur für Langfaserzellstoffe ein Zielkriterium darstellt. Eine ähnlich hohe Festigkeit konnte nur noch von Eucalyptus nitens erreicht werden. Für den Ahornzellstoff und den BCTMP F (F-Festigkeitstyp) (mit Guar) konnten Festigkeitssteigerungen zwischen 10 und 20 % erzielt werden, so dass sie Tensile-Indizes von ca. 40 und 50 Nm/g erreichten.



**Abb. 4** Tensile-Indizes in Abhängigkeit der Zugabe von Stärke und Guar

Durch den Einsatz von Stärke wurden die optischen Eigenschaften negativ beeinflusst. Der Weißgrad reduzierte sich um ca. 3 %. Die Nassdehnung und Trockenschumpfung erfuhren keine signifikanten Änderungen.

Die Steigerung der Tensile-Indizes durch Fasermodifizierung mittels CMC im Vergleich zu Stärke betrug nur 30 bis 50 % der bei Stärke beobachteten Zugfestigkeitssteigerung.



**Abb. 5** Tensile-Indizes in Abhängigkeit der CMC-Modifizierung

Im Gegensatz zu Stärke wurden hierbei die optischen Eigenschaften kaum verändert. Das Nassdehnungsverhalten wurde durch CMC-Anlagerung deutlich verschlechtert.

#### Entwässerungsverhalten

Das Entwässerungsverhalten wurde durch Zugabe von Stärke nicht wesentlich beeinträchtigt. Durch Zugabe von Guar steigt der Entwässerungswiderstand um ca. 10 % an. Um dies zu vermeiden wird laut Hersteller, Retentionsmittel zugesetzt.

Die Modifizierung mit CMC zeigte den höchsten Anstieg des Entwässerungsverhaltens (5 bis 20 SR). Ob dies durch Einsatz von kationischen Additiven kompensiert werden kann, ohne den Festigkeitsanstieg nachteilig zu beeinflussen, wurde nicht untersucht.

#### Fazit

Durch Einsatz von Stärke, Guar oder CMC können die Festigkeitseigenschaften gesteigert werden. Dieser Effekt kann bei Substitution von Faserstoffen ausgenutzt werden, um einen Festigkeitsverlust zu kompensieren, der nicht durch Mahlung erreichbar ist. Dabei ist zu beachten, dass die dabei eintretenden Steigerungen des Entwässerungswiderstandes eingegrenzt werden, um Produktivitätsnachteile zu vermeiden.

## 7 Optimierungswerkzeug zur Faserstoffsubstitution

#### Ziel

Um eine effektive Faserstoffsubstitution durchzuführen ist es notwendig, die Mahlungsbedingungen sowie den Additivzusatz an das Substitutionsziel, d. h. die anzustrebende Papiereigenschaft anzupassen, ohne andere Papiereigenschaften nachteilig zu beeinflussen oder diese innerhalb tolerierbarer Schranken einzustellen. Mit empirischen Mitteln ist dies kaum möglich. Die Komplexität der Aufgabe zwingt zur Anwendung geeigneter mathematischer Modelle, die die

---

experimentell ermittelten Ergebnisse als Grundlage nutzen.

---

**Datenbasis und Struktur der Daten**

Als Datenbasis fungiert eine Datenbank, um mit Hilfe von Regressionsrechnungen freie Parameter in den numerischen Modellen zu belegen und für die Simulationsrechnungen notwendiger Daten der verwendeten Faserstoffe zur Initialisierung bereitzustellen. Dazu wurden die Daten folgendermaßen strukturiert:

- I. Klassifikatoren der eingesetzten Ausgangsfaserstoffe (Holzart, Herkunft)
- II. Parameter des Mahlprozesses und der gewählten Mahlgarnitur
- III. Fasermorphologische und physikalische Eigenschaften des Mahlergebnisses (Suspension)
- IV. Ergebnisse der physikalischen Prüfung an Laborblättern
- V. Abgeleitete Kenngrößen (fraktionelle Zusammensetzung gemäß [6, 7, Faserflexibilität und Festigkeit der Faserbindung gemäß [11]) entsprechend der gewählten numerischen Modelle

Alle Relationen wurden in einer einzelnen EXCEL-Tabelle gehalten. Die Nutzung eines relationalen Datenbanksystems war nicht zwingend erforderlich.

Die gewählte Struktur der Datenbank sollte es ermöglichen, unter Verwendung der in EXCEL verfügbaren Funktionalitäten (Sortierung, Filterung) für Regressionsrechnungen zusammengehörende Datensätze (z.B. die einer Mahlreihe) schnell und effektiv zusammenzuführen.

---

**Bestimmung der Parameter für die Faserstofffraktionen**

Um den Informationsumfang der Verteilungsfunktionen für die morphologischen Eigenschaften der Faserstoffe möglichst verlustfrei und handhabbar zur Verfügung zu haben, erfolgte die Berechnung der fraktionellen Zusammensetzung der Faserstoffe auf der Grundlage des von KUNTZSCH und MEINL in [6,7] beschriebenen Verfahrens. Die dabei zum Einsatz kommenden Trennfunktionen entsprechen im Wesentlichen den unabhängig von LHOTTA et al. [8] verwendeten Membership-Funktionen, sodass die Ergebnisse beider Methoden trotz eigenständigen Informationsgehaltes vergleichbar sind.

---

**Primäre und sekundäre Feinstoffe**

Eine Unterscheidung zwischen dem vor und während der Mahlung gebildetem Feinstoff (primären Feinstoff  $FS_1$ , sekundärer Feinstoff  $FS_2$ ) ist sinnvoll, da eine Reihe wesentlicher Kennwerte (Entwässerungswiderstand, Festigkeiten) von beiden Feinstofffraktionen in unterschiedlicher Weise gesteuert werden. Für die Berechnungen wurde weiterhin angenommen, dass 50% der Feinstoffe beider Feinstofffraktionen im Papier retendieren.

---

**Datenbank –  
hinterlegte  
Faserstoff-  
merkmale**

Für die Charakterisierung der Faserstoffe (ungemahlen und gemahlen) werden folgende Merkmale in der Datenbank hinterlegt:

**Tab. 2:** Faserstoffmerkmale zur Charakterisierung der Suspension

Gruppe	Eigenschaft	Bezeichnung [Einheit]
Morphologische Eigenschaften der organischen Faserstoffbe- standteile	Massegewichteter Anteil der Feinstofffraktion	$FS$ [%]
	Mittlere Faserlänge der Feinstofffraktion	$FL_{FS}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Massegewichteter Anteil der Kurzfasernfraktion	$KF$ [%]
	Mittlere Faserlänge der Kurzfasernfraktion	$FL_{KF}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Mittlerer Faserdurchmesser der Kurzfasernfraktion	$WL_{KF}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Mittlere Faserwandstärke der Kurzfasernfraktion	$CWT_{KF}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Massegewichteter Anteil der Kurzfasernfraktion	$LF$ [%]
	Mittlere Faserlänge der Kurzfasernfraktion	$FL_{LF}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Mittlerer Faserdurchmesser der Kurzfasernfraktion	$WL_{LF}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Mittlere Faserwandstärke der Kurzfasernfraktion	$CWT_{LF}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Suspensionsei- genschaften	SCHOPPER-RIEGLER-Wert	$SR$ [ $^{\circ}$ ]
	Spezifische Faseroberfläche	$SSA$ [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]
	Wasserrückhaltevermögen	$WRV$ [%]
Mechanische Fasereigenschaf- ten	Faserflexibilität	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Faserfestigkeit	$FZ$ [MPa]
	(Scher-)Festigkeit der Faserbindung	$b$ [MPa]
Optische Fasereigenschaf- ten	Spektraler Lichtstreuoeffizient (Y-Bereich)	$S_Y$ [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]
	Spektraler Lichtabsorptionskoeffizient(Y-Bereich)	$K_Y$ [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]

Zur Ableitung der genannten Fasereigenschaften aus Standardprüfverfahren werden nachfolgend die verwendeten Methoden vorgestellt.

**Schätzung der spezifischen Oberfläche**

Von HEINEMANN [9] sowie ERHARD et al. [10] sind eine Reihe experimenteller Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen dem Entwässerungswiderstand SCHOPPER-RIEGLER und der spezifischen Oberfläche bekannt. Basierend auf diesen Ergebnissen liefert folgende Relation, ausgehend vom Entwässerungswiderstand, eine gute Schätzung der (hydrodynamisch wirksamen) spezifischen Faseroberfläche: SSA im m<sup>2</sup>/g

$$SSA = 2 \cdot \ln\left(\frac{SR - 4}{100 - SR}\right) + 6 \quad (7-1)$$

bzw. umgekehrt

$$SR = 100 - \frac{96}{1 + \exp\left(\frac{SSA - 6}{2}\right)} \quad (7-2)$$

**Wichtige Fasereigenschaften**

Eine einfache Prüfung physikalischer Fasereigenschaften wie z.B. deren Flexibilität, deren Festigkeit und deren Bindungsfestigkeit ist zurzeit nicht möglich. Eine Charakterisierung dieser Größen erfolgt in der Regel über die Prüfung der scheinbaren Dichte, der Nullreißlänge bzw. der Reißlänge an zugehörigen Laborblättern, wobei aber die Fasereigenschaften immer zusammen mit anderen Eigenschaften integral eingehen. Um trotzdem sinnvolle Werte für diese wichtigen Fasereigenschaften ableiten zu können, werden von MEINL physikalische Modellansätze, u.a. die Gleichung von PAGE, verwendet, um über ein vereinfachtes Strukturmodell aus den Blatteigenschaften die Fasereigenschaften zu bestimmen. Zu Details der Vorgehensweise sei auf [11] verwiesen. Für den Zero-Span-Tensile-Index wurden dabei Ergebnisse aus systematischen Untersuchungen in [12] und [13] übernommen.

**8 Werkzeuge zur Berechnung von Papiereigenschaften****Bereitstellung numerischer Modelle**

Die Simulation wichtiger Produkteigenschaften von Papieren aus Laubholzcellulosestoffen sowie deren Steuerung über die Rezeptur und die Mahlung erfordert die Bereitstellung numerischer Modelle aus bereits entwickelten Werkzeugen auf Basis von Laborblatt-Eigenschaften (CAPD-Prognose-Tools<sup>1</sup>):

- I. Modelle der Wechselwirkung zwischen Parametern der Mahlung und Fasereigenschaften (CAPD-Tool Mahlung) - [14]
- II. Modelle der Mischung von Fasereigenschaften (CAPD-Tool Mischung) - [11]
- III. Modelle der Abhängigkeit mechanischer Papiereigenschaften von Fasermerkmalen (CAPD-Tool Festigkeit)
- IV. Modelle der Abhängigkeit optischer Papiereigenschaften von Fasermerkmalen (CAPD-Tool Optik)
- V. Modelle der Abhängigkeit struktureller Papiereigenschaften von Faser-

<sup>1</sup> CAPD – Computer Assisted Paper Design



merkmalen (CAPD-Tool Struktur)

**Allgemeiner Modellansatz für Mahleffekte**

Für eine Eigenschaft  $F$  aus **Tab. 2** gilt in der Regel ein Ansatz der Form

$$F(SRE, SEL) = F_0 + f_F(SEL) \cdot SRE \quad (8-1)$$

wobei  $F_0$  der Wert der Fasereigenschaft vor der Mahlung,  $SRE$  die spezifische Mahlergie (in kWh/t) und  $SEL$  die spezifische Kantenlast sind. Ein deutlich von diesem linearen Trend abweichendes Verhalten ist nur für den Entwässerungswiderstand  $SR$  zu beobachten, was sich aber über (7-1) und einen unterstellten linearen Trend für die spezifische Oberfläche  $SSA$  unmittelbar erklärt. Im Rahmen der üblichen Mahlergien bleiben die Mittelwerte für Faserlänge, -durchmesser und -wandstärke der Faserfraktionen nahezu konstant. Für die Änderung der Gewichte der Fraktionen legen OLSON et al. [15] zwar einen exponentiellen Trend nah, jedoch unterscheidet sich dieser in normalen Mahlbereichen ebenfalls nicht signifikant von einem linearen Trend.

**Einfluss der spezifischen Kantenlast und der Garniturgeometrie**

Der Einfluss der spezifischen Kantenlast und der Garniturgeometrie wird über eine Funktion  $f_F$ , die für jede Fasereigenschaft sehr verschieden sein kann, beschrieben. Mit dem sogenannten C-Faktor bietet KERKES [16] ein geeignetes Konzept an, die Vielzahl möglicher Einflüsse der Garniturgeometrie in einem vergleichbaren Faktor zu bündeln. Die Modellierung des Zusammenhanges zwischen C-Faktor und den Funktionen  $f_F$ , steht noch aus. Ersatzweise wurden empirisch Ansätze der Form  $f_F(SEL) = a_F \cdot SEL + b_F$  bzw.  $f_F(SEL) = a_F / SEL + b_F$  gewählt. **Tab. 3** enthält im Überblick für alle Fasereigenschaften die jeweiligen Ansätze und die durch Regression bestimmten Faktoren  $a_F$  und  $b_F$

**Funktionen für Fasereigenschaften**

**Tab. 3:** Funktionen  $f_F$  für verschiedene Fasereigenschaften

Fasereigenschaft ( $F$ )	Einheit	$f_F(SEL)$	$a_F$	$b_F$
Sec. Fines	%	$a_F \cdot SEL + b_F$	-0,016	0,028
Short Fibres	%	$a_F \cdot SEL + b_F$	-0,007	-0,001
Long Fibres	%	$a_F \cdot SEL + b_F$	0,010	-0,017
Distance	µm	$a_F / SEL + b_F$	-0,004	-0,011
Fibre strength	MPa	const.		
Bonding strength	MPa	$a_F \cdot SEL + b_F$	-0,031	0,065
SSA_	m <sup>2</sup> /g	$a_F / SEL + b_F$	0,002	0,013
WRV	%	$a_F / SEL + b_F$	0,042	0,327
SY	m <sup>2</sup> /kg	$a_F \cdot SEL + b_F$	0,022	-0,064
KY	m <sup>2</sup> /kg	$a_F \cdot SEL + b_F$	-0,001	0,001

**CAPD-Tool  
Festigkeit**

Die für eine Implementation verfügbaren Formeln zur Prognose von

- Tensile-Index  $T$  [Nm/g]
- Bruchdehnung  $BS$  [%]
- Tear-Index  $TI$  [mNm<sup>2</sup>/g]

sind entsprechend der Bezeichnungsweise aus **Tab. 2** in [11] ausführlich beschrieben. Nachfolgend soll deshalb nur auf einige weitere, im Rahmen der Projektlaufzeit neu entwickelte Relationen detaillierter eingegangen werden.

**Spaltfestigkeit**

Die Mechanismen der Spaltfestigkeit sind ähnlich der Zugfestigkeit. Bei homogener Papierformation in z-Richtung ist die Spaltfestigkeit allerdings unabhängig von der Flächenmasse. Somit erklärt sich eine starke Korrelation zwischen der Spaltfestigkeit und dem Tensile-Index. In weitaus stärkeren Maße als für den Tensile-Index fördert der Feinstoffgehalt in Zellstoffen die Spaltfestigkeit, wie Ergebnisse in [17] zeigen. Dies wird auch durch die Versuche mit Kurzfasierzellstoffen und BCTMP bestätigt. Letztere liefern, bedingt durch einen nahezu dreifachen Feinstoffgehalt, bei gleichem Tensile-Index eine deutlich höhere Spaltfestigkeit. In Auswertung der Versuchsergebnisse wurde folgender Ansatz für die Spaltfestigkeit verwendet

$$PB = 0,14 \cdot T_0^2 + 4,04 \cdot (FS_1^{ret} + FS_2^{ret})^2 \quad (8-2)$$

wobei  $T_0$  [in Nm/g] dem Tensile-Index ohne retendiertem Feinstoff entspricht und  $FS_1^{ret}$  bzw.  $FS_2^{ret}$  [jeweils in %] die Feinstoffmengen primären und sekundären Feinstoffes (bezogen auf den Gesamtstoffgehalt in der Suspension) sind, die im Blatt retendieren.

**Elastizitätsmodul**

Alle im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche zeigen eine starke lineare Korrelation zwischen dem Tensile-Index und dem Elastizitätsmodul. Als Konsequenz wird für den Elastizitätsmodul  $E$  [in MPa] der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebene Zusammenhang verwendet, welcher mittels linearer Regression aus den Versuchsdaten abgeleitet wurde.

$$E = 87,4 \cdot T \quad (8-3)$$

**CAPD-Tool Optik**

Die dem CAPD-Tool Optik zugrunde liegenden numerischen Relationen wurden ausführlich in [18] und [11] beschrieben. Für die Implementation erfolgte eine Beschränkung auf die Prognosealgorithmen für

- Opazität  $O$  [%] und

Helligkeit  $WH$  [%].

**CAPD-Tool  
Struktur**

Für die Prognose der strukturellen Papiereigenschaften

- Scheinbare Dichte AD [ $\text{g/cm}^3$ ]
- Luftdurchlässigkeit nach GURLEY LUG [ $\text{s}/100\text{cm}^3$ ]

werden die in [11] bereitgestellten Gleichungen verwendet. Die dort verwendete Relation für die Luftdurchlässigkeit (GURLEY)

$$LUG_{80} = a_{EXP} * EXP\left(a_{SR} * SR + a_P \frac{d}{d-D}\right) \quad (8-4)$$

mit

$$a_{EXP} = 0,0001$$

$$a_{SR} = 0,1$$

$$a_{FP} = 5,417$$

ist nur für Blätter mit einem Flächengewicht von  $80\text{g/m}^2$  gültig. Basierend auf Testversuchen für Kurz- und Langfaserzellstoffe wurde folgende empirische Näherung der Luftdurchlässigkeit an Blättern mit variablem Flächengewicht abgeleitet.

$$LUG = LUG_{80} \cdot \left(\frac{m_A}{80}\right)^{2,75} \quad (8-5)$$

## 9 Richtlinien zur Substitution von Kurzfasern in Spezialpapieren

**Allgemeines  
Vorgehen**

Unter Verwendung der CAPD-Prognose-Tools sollten für die Kurzfasern Substitutionsmöglichkeiten ermittelt werden. Dabei sollten weder der Tensile-Index noch die Luftdurchlässigkeit negativ beeinflusst werden. Als Referenzwerte wurden die prognostizierten Eigenschaften für den Tensile-Index und die Luftdurchlässigkeit von Laborblättern (Flächengewicht  $80\text{g/m}^2$ ) verwendet (gemahlen mit einer spezifischen Mahlenergie von  $100\text{ kWh/t}$  bei einer spezifischen Kantenlast von  $1\text{Ws/m}$ )

**Beste  
Substitution  
durch  
Einzelzellstoff**

Eine Option der Faserstoffsubstitution besteht im vollständigen Ersatz des Referenzzellstoffes durch einen alternativen Zellstoff. Unter Verwendung des EXCEL-Solvers wurden für alle Faserstoffe aus **Tab. 1** basierend auf dem dargestellten Formelapparat Lösungen folgender Optimierungsaufgabe

- Nebenbedingungen:  $LUG_{Sub} \leq LUG_{Ref}$ ,  $m_{Sub} = 80\text{ [g/m}^2\text{]}$
- Zielfunktion:  $T \rightarrow \max$ .
- Freie Parameter:  $SRE_{Sub}$ ,  $SEL_{Sub}$

bestimmt. Jene Faserstoffe (einschließlich zugehöriger Mahlbedingungen), die einen höheren Tensile-Index als der Ausgangsfaserstoff lieferten, wurden als „beste“ Substitution bezeichnet.

**Substitution durch einen Zellstoff-BCTMP-Mix**

Sofern keine Anforderungen an die zu produzierende Papiersorte hinsichtlich Lichteinheit gestellt werden, kann durch Zumischung von Aspen-BCTMP (High Tensile) ein Preisvorteil erzielt werden. Für jede der besten Substitutionen wurden deshalb wiederum mit dem EXCEL-Solver Lösungen folgender Optimierungsaufgabe bestimmt:

- Nebenbedingungen:  
 $T_{Mix} \geq T_{Ref}$ ,  $LUG_{Mix} \leq LUG_{Ref}$ ;  $m_{Sub} + m_{As-HT} = 80$  [g/m<sup>2</sup>]
- Zielfunktion:  $m_{As-HT} \rightarrow \max$ .
- Freie Parameter:  $SRE_{As-HT}$ ,  $SEL_{As-HT}$

**Faserstoffkosten**

Zur Abschätzung zu erwartender Kosteneinsparungen wurden folgende spezifischen Rohstoffpreise  $C_{Pulp}$  verwendet:

**Tab. 4** Rohstoffpreise der eingesetzten Faserstoffe

Faserstoff	Preis (€/t)	Quelle
Ah (Ahorn)	600	Euwid [2]
Ak (Akazie)	500	Euwid [2]
As (Aspe)	478	Euwid [2]
As-HT (Aspen BCTMP)	465	Euwid [2]
Bi (Birke)	530	Euwid [2]
Eu gl (Eucalyptus globulus)	530	Euwid [2]
Eu gr (Eucalyptus grandis)	503	Euwid [2]
Eu ni (Eucalyptus nitens)	503	Euwid [2]

**Energiekosten**

Es wird ein mittlerer Preis für Elektroenergie von  $C_E = 6$  ct/kWh angenommen. Bei der Abschätzung der Kosten für die Mahlung wird nur der Aufwand für die spezifische Mahlenergie berücksichtigt, während die übrigen Energieaufwände für die Mahlung (Leerlauf des Refiners) vernachlässigt, d.h. für alle Mahlgarnituren als konstant angenommen werden. Letzteres führt zwangsläufig zu Ungenauigkeiten, weil bekannt ist, dass beim Übergang von Mahlgarnitur 1 zu 2 und 3 die Leerlaufleistung zunimmt. Allerdings ist der Kostenanteil für Mahlenergie gegenüber den Rohstoffkosten (noch) sehr gering (<2%) so dass der durch die Vereinfachung bedingte Fehler beim Vergleich der Ergebnisse nicht weiter ins Gewicht fällt.

**Gesamtkosten**

Die ausgewiesenen flächenspezifischen Gesamtkosten (in ct/m<sup>2</sup>)  $C_1$  setzen sich aus den Kosten für die spezifische Mahlenergie und den Rohstoffkosten zusammen, d.h. bei Einsatz von  $N$  verschiedenen Faserstoffen mit einem jeweiligen Flächengewicht  $m_i$  gilt

$$C_1 = \sum_{i=1}^N m_i \cdot C_{Pulp}^i + SRE_i \cdot C_{Energy}^i \quad (9-1)$$

Die gewichtsspezifischen Gesamtkosten  $C_2$  sind

$$C_2 = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot C_{Pulp}^i + SRE_i \cdot C_{Energy}^i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (9-2)$$

wobei in den gerechneten Beispielen die Summe im Nenner immer konstant 80 [g/m<sup>2</sup>] beträgt.

**Substitution von Birke durch Einzelzellstoff**

**Tab. 5:** Beste vollständige Substitutionen eines Birken-Zellstoffes durch einen alternativen Zellstoff

		Pulp 1	Bi	Eu ni.	Eu gl.
			Reference	Substitute	Substitute
	Property	Unit			
Pulp 1	Grammage $m_1$	g/m <sup>2</sup>	80,00	80,00	80,00
	SRE	kWh/t	100,00	80,01	128,71
	SEL	Ws/m	1,00	0,47	0,45
BCTMP	Grammage $m_2$	g/m <sup>2</sup>			
	SRE	kWh/t			
	SEL	Ws/m			
Predicted	SR	°	29,10	31,03	36,42
	WRV	%	185,39	197,54	188,30
	Apparent Density	g/cm <sup>3</sup>	0,66	0,64	0,59
	Tensile Index	Nm/g	52,02	59,41	61,43
	Tear Index	mNm <sup>2</sup> /g	10,86	9,48	12,08
	Ply Bond Strength	J/m <sup>2</sup>	351,32	461,82	478,05
	Breaking strain	%	2,81	2,77	2,92
	Elastic Modulus	MPa	4546,61	5192,33	5369,08
	Opacity	%	77,03	81,13	80,68
	Whiteness	%	91,40	91,64	89,08
	Air Perm. (G.)	s/100cm <sup>3</sup>	26,92	26,92	26,92
	Grammage	g/m <sup>2</sup>	80,00	80,00	80,00
	Costs $C_2$	€/t	530	503	530

**Fazit**

Wie aus **Tab. 5** ersichtlich wird, ist es möglich Birke durch Eucalyptus nitens zu ersetzen. Im Prognose-Tool wurden Optimierungsrechnungen z.B. für Birke ein Tensile-Index von 52 Nm/g und eine Luftdurchlässigkeit von 26,9 s/100 cm<sup>3</sup>

festgelegt. Als möglicher Substituent wurde Eucalyptus nitens der mit einer spezifischen Mahlkantenbelastung von 0,47 Ws/m zu mahlen ist prognostiziert. Auch der Eucalyptus globulus käme als möglicher Substituent laut Modell in Frage. Was in der Praxis zu überprüfen wäre.

**Substitution von Birke durch Zellstoff-BCTMP-Mix**

**Tab. 6:** Vollständige Substitutionen eines Birken-Zellstoffes durch einen Zellstoff-BCTMP-Mix

		Pulp 1	Bi	Eu ni.	Eu gl.
			Referen- ce	Substitu- te	Substitu- te
	Property	Unit			
Pulp 1	Grammage $m_1$	$\text{g/m}^2$	80,00	53,73	53,70
	SRE	$\text{kWh/t}$	100,00	55,85	73,34
	SEL	$\text{Ws/m}$	1,00	0,22	0,20
BCTMP	Grammage $m_2$	$\text{g/m}^2$		26,27	26,30
	SRE	$\text{kWh/t}$		55,85	73,34
	SEL	$\text{Ws/m}$		0,22	0,20
Predicted	SR	$^\circ$	29,10	35,90	38,55
	WRV	%	185,39	200,88	191,49
	Apparent Density	$\text{g/cm}^3$	0,66	0,60	0,57
	Tensile Index	$\text{Nm/g}$	52,02	52,23	52,02
	Tear Index	$\text{mNm}^2/\text{g}$	10,86	7,81	8,98
	Ply Bond Strength	$\text{J/m}^2$	351,32	368,75	356,34
	Breaking strain	%	2,81	2,85	2,92
	Elastic Modulus	MPa	4546,61	4565,21	4546,69
	Opacity	%	77,03	81,33	81,20
	Whiteness	%	91,40	90,54	89,14
	Air Perm. (G.)	$\text{s}/100\text{cm}_3$	26,92	26,92	26,92
	Grammage	$\text{g/m}^2$	80,00	80,00	80,00
	Costs $C_2$	€/t	530	491	509

**Fazit**

In diesem Beispiel wurde die Zumischung von BCTMP-Stoff (**Tab. 6**) überprüft. Wieder wurden der Tensile-Index und die Luftdurchlässigkeit von Birke festgelegt (grau markiert). Mit Hilfe des Modells wurde als möglicher Substituent Eucalyptus nitens 53,7 g/m<sup>2</sup> und BCTMP 26,3 g/m<sup>2</sup> als Gemischtmahlung ermittelt. Durch die Zumischung von BCTMP-Stoff ist zu beachten, dass der Entwässerungswiderstand um ca. 7 SR erhöht wird.

**10 Validierung der Ergebnisse im Technikum****Vorgehen**

Im Rahmen von Technikumsversuchen wurden die Faserstoffe (90% KF- und 10% LF-Zellstoff) mit der Mahlgarnitur 3 gemahlen. Als Referenz wurde der Eucalyptus globulus (90%) mit 10% LF-Zellstoff mit der Mahlgarnitur 1 gemahlen. Die so behandelten Faserstoffe wurden zum fertigen Papier verarbeitet. Dabei wurde den Faserstoffmischungen Stärke oder Guar und Füllstoff zugesetzt. Die hergestellten Papiere wurden auf ihre Papiereigenschaften und Suspensionseigenschaften geprüft.

Bei Durchführung der Validierungsversuche wurden die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Erkenntnisse genutzt und zur Validierung herangezogen.

**Mahlungsbedingungen**

Die spezifische Mahlarbeit wurde für Faserstoffe wie in **Tab. 7** aufgeführt faserstoffspezifisch festgelegt und gemischt gemahlen.

**Tab. 7:** Mahlbedingungen in den Technikumsversuchen

Faserstoff	Mahlkanten-belastung	spez. Mahlenergie
	[Ws/m]	[kWh/t]
90 % Euc. globulus / 10% LF	1,0	150
90 % Euc. globulus / 10% LF	0,1	75
90 % Euc. globulus / 10% LF	0,1	50
90 % Euc. grandis / 10% LF	0,1	50
90 % Euc. nitens / 10% LF	0,1	50
90 % Ahorn / 10% LF	0,1	25
90 % Birke / 10% LF	0,1	25
90 % Aspe / 10% LF	0,1	25
90 % Akazie / 10% LF	0,1	50
85 % Euc. nitens / 10% LF / 5 % BCTMP F	0,1	25
86 % Euc. nitens / 10% LF / 5 % BCTMP V	0,1	25

**Eingesetzte Additive**

Folgende kamen Additive zum Einsatz:

- kationische Kartoffelstärke (DS: 0,03 – 0,04): 0,5 und 1%
- Guar (Galaktomannan):
  - nicht ionogen: 0,5%
  - anionisch: 0,5%
- Füllstoff (CaCO<sub>3</sub>): 20 %

---

**Faserlänge,  
Feinstoff,  
Entwässerungs-  
widerstand**

Durch die Zumischung von 10 % -LF-Stoff wurden die Faserlänge, der Feinstoffgehalt und der Entwässerungswiderstand erwartungsgemäß erhöht.

Wie schon in den Mahlungsuntersuchungen beobachtet, unterscheiden sich die eingesetzten Faserstoffe aus den Technikumsversuchen je nach Art und Herkunft und weisen ähnliche Tendenzen auf.

Der Eucalyptus globulus-Zellstoff, gemahlen mit 1 Ws/m (Mahlgarnitur 1), wurde als Referenz festgelegt. Vergleicht man den Eucalyptus globulus-Zellstoff (0,1 Ws/m, 75 kWh/t), der mit der Mahlgarnitur 3 (0,1 Ws/m) und gemischt gemahlen mit 10 % LF-Zellstoff, wird erkennbar, dass der Feinstoffgehalt um bis zu 61 % und der Entwässerungswiderstand bis zu 45 % ansteigt. Dies resultiert aus der Gemischtmahlung mit LF-Zellstoff, denn dieser wird durch die Messergeometrie der Garnitur (höhere sekundliche Schnittlänge) stärker gekürzt und es wird mehr Feinstoff erzeugt.

Bei allen anderen Faserstoffen kann die gleiche Tendenz beobachtet werden. Durch den Zusatz von 5% BCTMP zu 85% Eucalyptus nitens und 10% LF-Zellstoff wird der Feinstoffgehalt und Entwässerungswiderstand nur geringfügig erhöht.

---

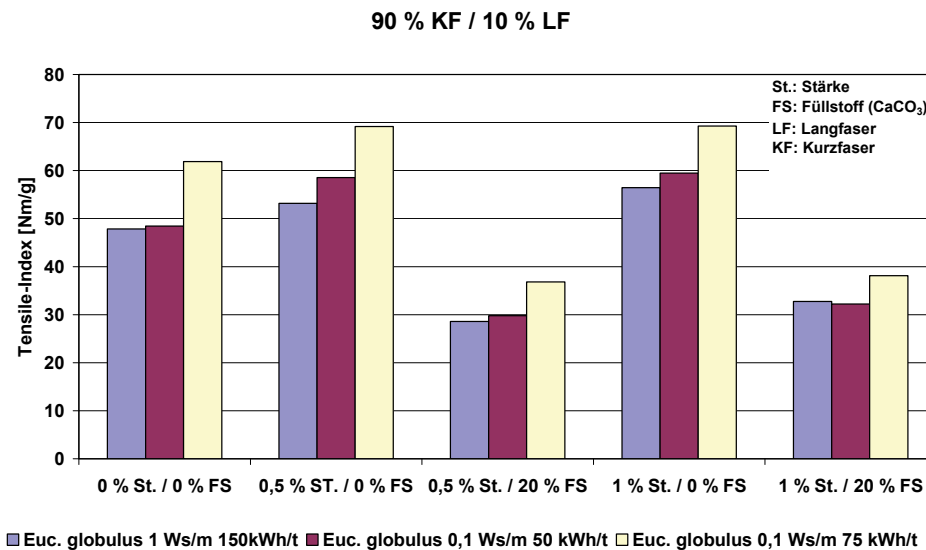
**WRV, Gesamt-  
und Oberflächen-  
ladung (OFL)**

Mit der Erhöhung des Feinstoffgehaltes nehmen zwangsläufig der WRV und die Oberflächenladung (OFL) zu. Der größte Anstieg wurde bei Birke und Aspe beobachtet. Der Vergleich von Eucalyptus globulus-Zellstoff, mit 0,1 Ws/m bei 50 und 75 kWh/t gemahlen, zeigt deutlich, wie sich der höhere Mahlenergieeintrag in einer gesteigerten Feinstoffbildung niederschlägt und wie dadurch der WRV um 16 % und die OFL um 13 % erhöht wurde.

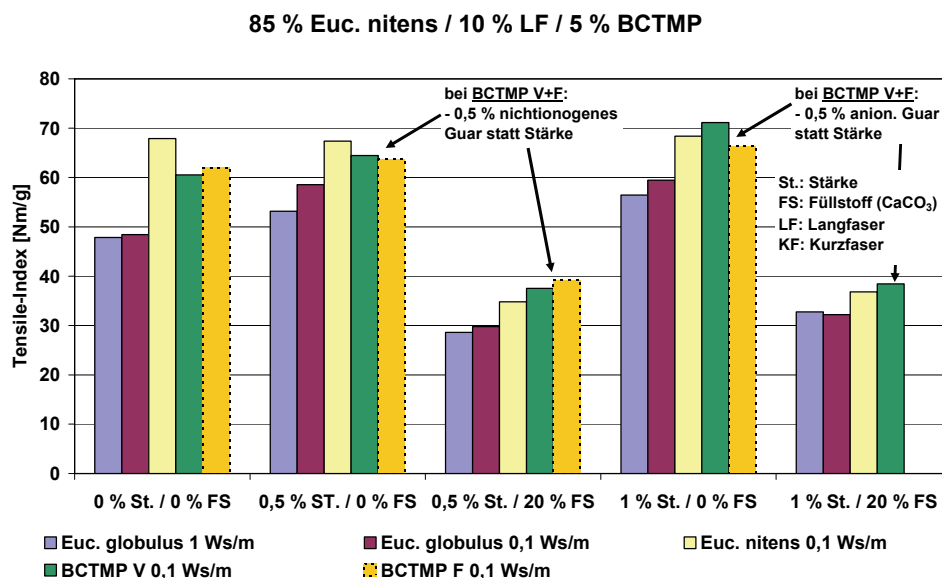
**Tensile-Index**

Auch in der Gemischtmahlung mit Eucalyptus globulus-Zellstoff, 1 Ws/m und 0,1 Ws/m, wird erkennbar, dass der Tensile-Index von 50 Nm/g mit der niedrigen Kantenbelastung erreicht werden kann. Durch Erhöhung der Mahlenergie konnte der Index um ca. 10 Nm/g gesteigert werden. Eine weitere Festigkeitssteigerung konnte durch Zugabe von Stärke erzielt werden. Erwartungsgemäß fällt der Tensile-Index durch Füllstoff um ca. 20 Nm/g ab, wovon aber durch Stärkezugabe ca. 10 Nm/g kompensiert werden. Alle anderen Faserstoffe weisen ähnliche Tendenzen auf.





**Abb. 6** Abhängigkeit der Tensile-Indizes durch Zugabe von Stärke und Füllstoff  
 Papiere aus der Faserstoffmischung 85 % Eucalyptus nitens, 5 % BCTMP und 10 % LF-Zellstoff weisen ähnliche Festigkeiten wie der Eucalyptus nitens / LF-Zellstoff auf, durch die Zugabe von Stärke bzw. Guar wurden die Festigkeiten weiter erhöht.



**Abb. 7** Abhängigkeit der Tensile-Indizes durch Zugabe von Stärke, Guar (BCTMP) und Füllstoff

## 11 Anwendung auf einen Praxisfall

### Vorgehen

Auf Grundlage der im Labor und im Technikum erreichten Ergebnisse wurden Vergleiche mit Faserstoffen aus der Stoffaufbereitung einer Papierfabrik durchgeführt. Es wurde nach der Mahlung ein Eucalyptus grandis und ein Ahorn-

Zellstoff entnommen und analog wie in den Laborversuchen Stärke zugesetzt und mit CMC modifiziert.

Es wurden die Suspensionseigenschaften und nach Laborblattbildung die Papiereigenschaften auf einem vergleichbaren Niveau untersucht.

---

**Fazit**

Die vergleichenden Untersuchungen zwischen Faserstoffen, die im Technikum und in der Praxis gemahlen wurden, zeigen bei gleicher Vorgehensweise Unterschiede in ihren Papiereigenschaften. Diese Ergebnisse sind auf die unterschiedliche Mahlung zurückzuführen.

Anders verhält sich der Eucalyptus grandis. Durch die schonende fibrillierende Mahlung im Technikum können bessere Festigkeitseigenschaften erreicht werden, da die Fasern nicht so stark gekürzt wurden. Auch durch Zusatz von Stärke und CMC zeigt der Eucalyptus grandis bessere Festigkeitswerte als der Eucalyptus grandis aus der Praxis obwohl die Oberflächenladung des Praxisstoffes deutlich höher ist und damit eine höhere Reaktivität gegenüber Stärke aufweisen sollte.

---

## 12 Schlussfolgerung

---

**Allgemeine Aspekte**

Die Untersuchungen zeigten, dass durch Einsatz von Garnituren mit großer aktiver Messeroberfläche eine größere Variabilität zur Steuerung der Suspensions- und Papiereigenschaften ermöglicht wurde.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen sowie bereits entwickelter Modellansätze und Algorithmen konnten Werkzeuge bereitgestellt werden, die es beispielhaft unter Berücksichtigung mehrere Papiereigenschaften ermöglichten, die Mahlbedingungen bei Substitution optimal anzupassen.

---

**Mögliche Substitutionen**

Für Faserstoffe mit ähnlichen chemischen und morphologischen Eigenschaften wurde es möglich, diese zu ersetzen. Die vergleichenden Untersuchungen zeigten, dass der Eucalyptus nitens ähnliche Festigkeiten wie die Birke erreichen kann. Auch der Akazienzellstoff war durchaus in der Lage, ähnliche Eigenschaften wie der Eucalyptus globulus oder Eucalyptus grandis auszubilden.

---

**Anwendung**

Die Forschungsergebnisse schufen Grundlagen, die es ermöglichen sollten, zukünftig eine Realisierung in der industriellen Praxis in Aussicht zu stellen.

Um die Substitution für ein bestimmtes Papiersortiment in der industriellen Praxis auszuführen, müssen Untersuchungen zur Validierung durchgeführt werden, um die geforderten Zieleigenschaften zu erreichen. Der dabei notwendige Aufwand wird durch Anwendung der hier entwickelten Werkzeuge auf die wesentlichen Parameter eingegrenzt und reduziert dadurch den finanziellen Aufwand und das Risiko einer Faserstoffsubstitution.

---

### 13 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

#### Nutzen für Papiererzeuger

Die wirtschaftliche Bedeutung dieses Projektes lag in einer angestrebten Reduzierung der Erzeugungskosten von Papiersortimenten durch die Substitution von konventionellen Laubholz Zellstoffen durch Einsatz von Zellstoffen aus schnellwüchsigen tropischen Laubhölzern. Damit unterstützen die Forschungsergebnisse die Substitution kostenintensiver Zellstoffe und sichern Wettbewerbsfähigkeit.

Die wirtschaftliche Bedeutung dieses Projektes liegt einerseits in einer angestrebten Reduzierung der Erzeugungskosten von Spezialpapieren und hochwertigen Druckpapieren durch Einsatz kostengünstiger Laubholz Zellstoffsportimente, die aus schnellwüchsigen, tropischen Laubhölzern erzeugt wurden. Ihre Preise liegen dabei etwa 30 – 130 € unter dem Preis der Laubholz Zellstoffe Ahorn und Birke (**Tab. 4**). Andererseits nimmt die nachhaltige Verfügbarkeit von Laubholz Zellstoffen der gemäßigten Breiten ab, so dass für Papiererzeuger die nachhaltige Versorgung mit diesen Zellstoffen zukünftig nicht mehr gewährleistet sein wird.

Durch das rückläufige Angebot bei steigender Nachfrage nach Laubholz Zellstoffen der gemäßigten Breiten sind für sie weiter steigende Preise zu erwarten, so dass diese nur noch dort einsetzbar sind, wo eine hohe Wertschöpfung gesichert ist und die spezifischen Eigenschaften dieser Zellstoffe unverzichtbar sind.

---

#### Kostenbeispiel: Zellstoffsubstitution

Durch vollständige die Substitution von Birke (530 €/t) durch Eucalyptus nitens (503 €/t) könnten 27 €/t Rohstoffkosten eingespart werden (**Tab. 4**). Bei einem täglichen Rohstoffbedarf von 50 t Zellstoff bedeutet dies Einsparungen in Höhe von 1.350 €/d bzw. 500 T€/a.

Sollte nur ein teilweiser Austausch möglich sein, ergeben sich entsprechend anteilige Einsparungen. Hierzu liefert das entwickelte Werkzeug die sich ergebenden Kostenvorteile, wenn die Energiekosten und der jeweilige spezifische Zellstoffpreis bekannt sind. In diesem Fall kann die Kalkulation verschiedener Szenarien helfen, den Rahmen der Kosteneinsparungen abzuschätzen, wobei gleichzeitig die Spielräume für Qualitätskompromisse deutlich werden (**Tab. 4**).

---

#### Kostenbeispiel: Mahlungsenergiebedarf

Aus den Eigenschaften des verwendeten Faserrohstoffs leiten sich die Kosten der Zellstoffmahlung sowie Kosten für notwendige Dosiermengen von Papieraditiven ab. Wie aus z.B. aus **Tab. 6** hervorgeht, werden in Abhängigkeit des verwendeten Faserstoffes gleiche Zugfestigkeits- und gleiche Luftdurchlässigkeitskennwerte bei deutlich unterschiedlichem Mahlenergieaufwand erreicht.

Ausgehend von einem spezifischen Energiepreis von 0,10 €/kWh führt die Einsparung von 40 kWh Mahlenergie je t Faserrohstoff zu einer Mahlenergieeinsparung von 4 €/t Faserrohstoff. Bei einem täglichen Rohstoffbedarf von 50 t Zellstoff bedeutet dies Einsparungen in Höhe von 200 €/d bzw. 70 T€/a bei 350 Produktionstagen.

Der Minderbedarf an Mahlungsenergie erhöht zudem die Standzeit der Mahlgeräten (bezogen auf die Durchsatzmenge) oder es kann ggf. kann die Anzahl der installierten Mahlstufen reduziert werden.

---

**Ansprechpartner für weitere Informationen:**

Dr. Klaus Erhard  
Tel. 03529/551-627  
Klaus.Erhard@ptspaper.de

Dipl.-Ing. (FH) Manuela Fiedler  
Tel. 03529/551-620  
Manuela.Fiedler@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](http://www.ptspaper.de)

**Literaturverzeichnis**

- 1 Hoppe J., Eikens B.  
Zellstoff – ein Rohstoff mit glänzender Perspektive  
Das Papier -, 35-40 (2001), Nr. 10
- 2 N.N. EUWID  
Papier und Zellstoff Nr. 15 v. 09.04.2008
- 3 Paavialinen L.  
Quality-competitiveness of Asian short-fibre raw materials in different paper grades  
Paperi ja Puu 82, 156 – 161 (2000) Nr. 3
- 4 Winter A. G., Risterberger A.  
Technische Möglichkeiten mit Aspenzellstoff  
Zellstoff und Papier 42, 213-218 (1993), Nr.10
- 5 Eckert R.  
Beurteilung des Schädigungsgrades von Zellstofffasern anhand deren Quellverhalten in  
Kupferethyldiamin  
Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik Graz, Diplomarbeit November 2004
- 6 Kuntzsch, T.  
Effektive Bewertung von Trennprozessen in der Stoffaufbereitung durch moderne  
fasermorphologische Messverfahren  
Forschungsbericht IW 050280, PTS Heidenau, 2006  
[http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/2/IW\\_05028046382fec1230d.pdf](http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/2/IW_05028046382fec1230d.pdf)
- 7 Kuntzsch, T.; Meinel, G.  
Beschreibung der Gleichmäßigkeit sowie des Mahl- und Fraktionierverhaltens von Faserstoffen  
mittels eines Softsensors,  
Proc. PTS Faserstoffsymposium, Dresden 2007.
- 8 Lhotta T., Villforth K., S. Schabel  
Fibre Classification - Advanced Fibre Analysis for Quality Control and Process Optimisation in  
Stock Preparation.  
ipw, Nr.3/2007
- 9 HEINEMANN S.  
Beitrag zur Bewertung der massespezifischen Oberfläche und ihres Einflusses auf das  
Festigkeitsverhalten von Papierfaserstoffen.  
Dissertation, TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, 1984.
- 10 ERHARD K., FIEDLER M., M. PIRGER  
Der Einfluss der spezifischen Oberfläche von Faserstoffen auf die Wirkungsweise chemischer  
Additive und auf wesentliche Papiereigenschaften  
Forschungsbericht AiF 13023, PTS Heidenau, 2004  
[http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/73/AiF\\_1302340d7da208d9b2.pdf](http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/73/AiF_1302340d7da208d9b2.pdf)
- 11 MEINL G.  
Senkung der Rohstoffeinstandskosten durch angepasste Mischung von Faserstoffen ohne  
nachteilige Einflüsse auf Erzeugungsprozess und Produktqualität.  
Forschungsbericht IGF 14694 BR, PTS Heidenau, 2008  
[http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/18/AiF\\_146944857c06d94108.pdf](http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/18/AiF_146944857c06d94108.pdf)

- 12 Nanko H., Button A., Hillman D.  
The World of market Pulp.  
WOMP LLC., Appleton, Wisconsin, 2005.
- 13 Hicks C.C., Clark N.B.  
Pulpwood quality of 13 eucalypt species.  
RIRDC Publications, 2001  
<http://www.rirdc.gov.au/reports/AFT/01-164.pdf>.
- 14 Bär G., Meinel G.  
Entwicklung von Algorithmen zur Prognose des Mahlungsverhaltens morphologisch unterschiedlicher Zellstoffe.  
Forschungsbericht AiF 13478, PTS Heidenau, 2005.  
[http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/13/AiF\\_13478432152791a315.pdf](http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/13/AiF_13478432152791a315.pdf)
- 15 Olson J.A., Drozdiak J., Martinez M., Garner R., Robertson A.G., Kerekes R.  
Characterizing fibre shortening in low-consistency refining using a comminution model.  
Powder Technol. 129 (1-3):122 - 129 (2003)
- 16 Kerekes R.J.  
Characterization of pulp refineres by a C-factor.  
Nordic Pulp and Paper Research Journal, Nr.1/1990.
- 17 Dekker J.C., Westenbroek A.P.H.  
Small partiles in recovered paper: Effects on processing and paper properties.  
Proc. CTP/PTS Packaging Paper & Board Recycling Symp., Grenoble, 2001
- 18 Meinel G.  
Computerunterstützte Prognose optischer Eigenschaften holzfreier Papiere aus Eigenschaften der Faserstoffkomponenten  
Forschungsbericht AiF AiF 13476, PTS Heidenau, 2005.  
[http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/5/AiF\\_134764326ae0871e13.pdf](http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/5/AiF_134764326ae0871e13.pdf)