

M. Fiedler, S. Tech, M. Lindner:

SCHAFFUNG VON WERTSCHÖPFUNGSKETTEN FÜR DEN EINSATZ VON  
MISCANTHUSFASERN AUS NACHHALTIG BEWIRTSCHAFTETEN GRENZFLÄCHEN UND  
BERGBAUFOLGEFLÄCHEN (MiscanValue)

Juli 2023  
Papiertechnische Stiftung (PTS)  
Pirnaer Straße 37  
01809 Heidenau  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

Download-Information:

Diese Studie steht auf der Homepage der  
PTS zum Download bereit:

[Veröffentlichungen 2023 | PTS Website](#)  
([ptspaper.de](http://ptspaper.de))

Ansprechpartner:

Manuela Fiedler  
Tel. (03529) 551-620  
[manuela.fiedler@ptspaper.de](mailto:manuela.fiedler@ptspaper.de)

Sören Tech  
Tel. (0351) 463-38108  
[soeren.tech@tu-dresden.de](mailto:soeren.tech@tu-dresden.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Pirnaer Straße 37  
01809 Heidenau

Technische Universität Dresden/ Institut für  
Naturstofftechnik/ Professur für Holztechnik  
und Faserwerkstofftechnik (HFT)  
01062 Dresden

Mirko Lindner  
Tel. (0351) 39793  
[mirko.lindner1@tu-dresden.de](mailto:mirko.lindner1@tu-dresden.de)

Technische Universität Dresden/ Institut  
für Naturstofftechnik/ Professur für  
Agrarsystemtechnik (AST)  
01062 Dresden

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Forschungsvorhaben IGF 283 EBR der AiF-Forschungs-  
vereinigung PTS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom  
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines  
Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an  
dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen für die  
Probenbereitstellung und für die freundliche Unterstützung bei der  
Projektdurchführung.



Industrielle  
Gemeinschaftsforschung

# Inhalt

Zusammenfassung .....	2
1 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	3
2 Forschungsziel .....	6
3 Material und Methoden .....	7
4 Ergebnisse .....	14
4.1 Ernte, Transport, Umschlag und Lagerung .....	14
4.2 Charakterisierung .....	14
4.3 Herstellung .....	19
4.4 Eigenschaften .....	24
5 Ökonomische und Ökologische Betrachtung .....	48
6 Schlussfolgerungen .....	50
7 Durchführende Forschungsstellen .....	51
8 Literaturverzeichnis .....	52

# Zusammenfassung

## *Zielstellung*

Ziel des Projekts ist die Bereitstellung einer vollständigen Wertschöpfungskette für die Herstellung von Papier- und Faserprodukten aus Biomasse von marginalen Miscanthusanbauflächen. Die Kette umfasst die Bodenvorbereitung, den Pflanzenanbau, die Ernte und Lagerung sowie von der Materialverarbeitung und der Umwandlung von Rückständen in nachhaltige Energie und Biokohle. An der Lösung arbeiteten Forschungsorganisationen in der Tschechischen Republik und in Sachsen zusammen. Die Bearbeitung ist in verschiedene Arbeitspakete aufgeteilt. In diesem Bericht sind nur die Ergebnisse der deutschen Projektpartner (Papiertechnische Stiftung Institut für Zellstoff und Papier PTS-IZP, TU Dresden Institut für Naturstofftechnik: Professur für Agrarsystemtechnik AST und Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik HAST) aufgeführt. In Abb. 1 ist der Zusammenhang zwischen den einzelnen Arbeitspaketen detailliert dargestellt.

## *Überblick wesentlicher Ergebnisse*

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojektes konnten die unterschiedlich aufgeschlossenen Miscanthus-Faserstoffe (TMP, CTMP, Zellstoff) für den Einsatz in Dämmstoffen, Partikelwerkstoffen sowie für die Papier- und Kartonherstellung untersucht werden.

Dazu wurde Ernte, Transport, Umschlag und Lagerung in der gesamten Verfahrenskette untersucht und dokumentiert. Dadurch konnten Materialparameter unter verschiedenen Aspekten verglichen werden (Ernteverfahren, Lagerart, Umschlagmittel) und eine Optimierung nach Wirtschaftlichkeit oder Materialeigenschaften abgeleitet werden. Zusätzliche Maßnahmen (Siebung zur Abscheidung von Feinanteilen und Übergrößen) wurden versuchsweise hinzugezogen. Der Aufwand der Siebung verbesserte das Spektrum der Hauptfraktion wesentlich, ist aber in aller Regel wirtschaftlich nicht zu empfehlen.

Im Verbundprojekt wurden unterschiedliche Dämmstoffvarianten aus Miscanthusfasern von Pflanzen mit unterschiedlichen Standortbedingungen hergestellt. Dabei wurden die Rohdichte ( $110 \text{ kg/m}^3$  und  $160 \text{ kg/m}^3$ ) sowie der Mahlsplitt im Refiner (0,5; 0,35 und 0,14 mm) variiert.

In weiteren Untersuchungen wurden zwei TMP-Faserstoffe im Labor getestet. Aufgrund des Herstellungsverfahrens enthielten die TMP-Faserstoffe noch viele Splitter (TMP 0,2 mm) und sehr viel Feinstoff (TMP 0,02 mm). Der TMP 0,2 mm wurde in der PFI-Mühle gemahlen und bis zu 40 % einem Wellenstoff zugesetzt, Laborblätter gebildet und die physikalischen Eigenschaften ermittelt. Bis zu einer Zugabe von 20 % Miscanthus-TMP zeigten sich keine Änderungen auf die physikalischen Eigenschaften.

In einem weiteren Schritt konnten verschiedene CTMP aus Miscanthus hergestellt werden. Auch diese Faserstoffe enthielten noch relativ viele Stippen und wurden deshalb ebenfalls in der PFI-Mühle gemahlen, Laborblätter erzeugt und die physikalischen Eigenschaften bestimmt. Die so erzeugten Laborblätter erzielten physikalische Eigenschaften wie typische Laubholzzellstoffe.

Um Miscanthus als Zellstoff im Labor aufzuschließen wurde das Acetosolverfahren ausgewählt, verschiedene Aufschlussbedingungen getestet und chemische, morphologische und physikalische Eigenschaften der erzeugten Zellstoffe bestimmt. Die erzeugten Laborblätter können gute statische Festigkeiten ausbilden, die aber mit einem deutlich höheren Entwässerungswiderstand als z.B. NBSK oder Laubholzzellstoffe einhergehen. Der hohe SR-Wert wirkt sich negativ auf die Entwässerung an der Papiermaschine aus, d.h. es

muss mehr Energie zur Trocknung aufgewendet werden. Die dynamischen Festigkeiten sind deutlich niedriger als bei herkömmlich verfügbaren Zellstoffen. Durch Optimierungen der Aufschlussbedingungen könnte dem entgegengewirkt werden.

Für die Validierung des Einsatzes von Miscanthus-Faserstoff im Technikumsmaßstab war es erforderlich größere Menge an Faserstoff bereitzustellen. An der TU Dresden konnten in einem Technikumskocher größere Mengen an Miscanthuszellstoff nach dem Soda-Verfahren hergestellt werden. Auf der Versuchspapiermaschine wurde ein Wellpappenrohpaper und ein Duplexpapier mit 30 % Miscanthus erzeugt. Nach Prüfung der physikalischen Eigenschaften kann gesagt werden, dass Miscanthus durchaus Potential besitzt in diesen Papierersortimenten eingesetzt zu werden. In den Papiermaschinenveruchen bestätigt sich, dass Miscanthus die dynamischen Festigkeiten positiv beeinflusst.

### *Resümee*

Ernte, Transport, Umschlag und Lagerung definieren die Eingangsparameter für die darauffolgenden Verarbeitungsschritte und werden in der Regel durch landwirtschaftliche Betriebe durchgeführt. Ist die Art der Weiterverarbeitung bereits zum Erntezeitpunkt bekannt, konnte positiv auf bestimmte Parameter (Häcksellänge, Wassergehalt, Masseanteil an Blättern) bereits bei der Ernte eingewirkt werden. Eine Absprache zwischen landwirtschaftlichen und verarbeitenden Unternehmen sowie die Dokumentation produktionsbegleitender Informationen sind zu empfehlen.

Das Verbundprojekt brachte einen deutlichen Erkenntnisgewinn für den Einsatz von unterschiedlich aufgeschlossenen Miscanthus-Faserstoffen für die Dämmstoff- und Papiererzeugung.

Durch eine Optimierung von Aufschlussbedingungen von Miscanthus ergibt sich ein erfolgversprechendes Potential in der Erzeugung von Dämmstoffen und Verpackungspapieren.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse können als Basis für eine weiterführende Forschungsarbeit zum Einsatz von Miscanthus in der Baustoffindustrie und in der Papierindustrie genutzt werden.

## **1 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung**

### *Forstwirtschaftliche Nutzung*

In den letzten 20 Jahren wurden deutschlandweit 22.000 ha Braunkohletagebaue für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung zur Verfügung gestellt, jährlich kommen etwa 1.000 ha hinzu. In Südsachsen befinden sich einige kontaminierte Bergbaufolgelandschaften, auf denen derzeit Futterpflanzen angebaut werden. Auch ehemalige Truppenübungsplätze werden als Biotop belassen und stehen für die landwirtschaftliche Nutzung nicht zur Verfügung. Es besteht ein großer Bedarf an der Rekultivierung dieser ungenutzten Flächen.

### *Nachwachsende Rohstoffe*

Die überregionale Bedeutung von nachwachsenden Rohstoffen hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Neben Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit stehen die Potenziale der aufstrebenden Märkte im Vordergrund. Materialien aus regional verfügbaren Pflanzen

sind aufgrund der Nutzung nachwachsender Rohstoffe, der temporären Bindung von klimaaktivem CO<sub>2</sub> und kurzer Transportwege unverzichtbar. Natürliche Miscanthusfasern können als Ergänzung in der Papierindustrie oder in der naturfaserverarbeitenden Industrie eingesetzt werden.

Ernte, Transport Umschlag und Lagerung von Miscanthus wird in der Regel mit üblichen landwirtschaftlichen Maschinen wirtschaftlich günstig durchgeführt. Daraus resultieren für nachfolgende Verarbeitungsprozesse jedoch vorgegebene Parameter, die zu berücksichtigen sind und sich vor- aber auch nachteilig auf Produkteigenschaften auswirken können. Mögliche zusätzliche Schritte (absetziges Ernteverfahren, Absiebung von Feinanteilen/ Übergrößen, Bestimmung des idealen Erntezeitpunktes anhand des Wassergehaltes) wurden hierbei untersucht und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Da Miscanthus als Dauerkultur eine extensive Bewirtschaftung mit geringem Input erlaubt, kommen daher auch Splitterflächen und Grenzertragsstandorten für den Anbau in Frage, die für konventionelle Landwirtschaft bisher unterhalb der Wirtschaftlichkeit lagen.

Im Rahmen des MiscanValue-Projekts wurden mechanisch und chemo-thermomechanisch aufgeschlossene Faserstoffe und Miscanthus-Zellstoffe als Alternative zu typischen holzbasierten Rohstoffen eingesetzt. Ein zunehmender Anteil von Nicht-Holz-Materialien ist im Rahmen der EU-Bioökonomie-Strategie gefordert, die die Produktion von nachwachsenden biologischen Rohstoffen und die Verarbeitung zu Produkten und Bioenergie fördert [1].

Zellstoff für die Papierherstellung wird in drei Hauptkategorien unterteilt [2]: Holzfasern, sonstige Fasern und Altpapier mit einem Anteil von 19 %, 0,4 % bzw. 68 %. Die Verwendung von Nicht-Holz-Rohstoffen geht auf die Ursprünge der Papierindustrie zurück [3]. und hat als vierte Rohstoffsäule durchaus ein relevantes Nutzungspotenzial [4], da die Waldressourcen begrenzt sind und die Abschwächung des Klimawandels gefordert wird. Dabei ist die Nutzung mehrjähriger Energiepflanzen eine der Prioritäten [5]. Der Zellstoff aus mehrjährigen Gräsern kann dem Holzrohstoff beigemischt werden oder einzeln verarbeitet werden [6].

In der Holzwerkstoffindustrie werden zu unterschiedlichen Anteilen Industrierundholz aus dem Forst sowie Koppelprodukte aus der Sageindustrie und geeignete Gebrauchtholzsortimente stofflich verarbeitet. Auch in diesen Industrieberichen nimmt der Wettbewerb um die Ressource Holz weiter zu. Es werden daher Alternativen aus Landwirtschaftsflächen zunehmend genutzt. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen haben in Deutschland einen vergleichsweise niedrigen Marktanteil von ca. 10 %. Im Jahre 2019 betrug das Absatzvolumen 3,5 Mio. m<sup>3</sup>. [7]

#### *Verpackungen aus Papier als Wachstumsmarkt*

Die Papier- und Kartonproduktion der Tschechischen Republik und Deutschlands beläuft sich auf 0,8 bzw. 23,1 Millionen Tonnen [3][8]. Rund 58 % davon sind Verpackungspapiere. Die Anzahl der Papierfabriken in der Tschechischen Republik und Deutschland beträgt 20 bzw. 184 [3][9]. MiscanValue zielte auf die Herstellung und den Einsatz eines alternativen Miscanthus-Zellstoffs ab, der kompetitive Festigkeitseigenschaften ermöglicht und die Biegesteifigkeit des Papiers erhöht, um teurere Frischfaser- und Recyclingqualitäten zu ersetzen. Papierhersteller, die an diesen neuen Zellstoffsorten besonders interessiert sind, sind Hersteller von Verpackungspapieren sowie von Spezialpapieren auf Recyclingfaserbasis, wie z.B. Umschlagpapier oder Briefpapier. Das Konzept richtet sich an flexible KMU, die in der Nähe der landwirtschaftlichen Rohstoffquellen angesiedelt sind und/oder Nischenmärkte mit spezifischen Papierprodukten bedienen können.

Standardverpackungspapiere werden aus Altpapier hergestellt. Der Anstieg der Faserkosten und die abnehmende Qualität des Altpapiers führen jedoch zu einem beträchtlichen Forschungsinteresse an der Verwendung von Nicht-Holz-Pflanzen als Faserrohstoffe, einschließlich Miscanthus. Mehrere Studien zeigen, dass Miscanthusmaterial die Zugfestigkeit und Steifigkeit von Recyclingkarton verbessern kann [10][11].

#### *Dämmstoffe aus Miscanthus als Wachstumsmarkt*

Die Herstellung von Dämmmaterialien sind als loses Material, Platten und flexiblen Matten möglich. Die Basis werden bisher Rundholz, Hackschnitzel und Hobel-/Sägespäne sein sowie Koppelprodukte aus der Holzbearbeitung verwendet. Die deutsche Fertigungsbauindustrie ist auf Wachstumskurs. Lag der Fertigungsbauanteil bei den Ein- und Zweifamilienhäusern um die Jahrtausendwende noch bei rund 13%, so hat dieser im Jahr 2019 erstmals die Marke von 20% überschritten [22]. Auch wenn umweltfreundliche Dämmstoffe weiter zunehmen, wird voraussichtlich nicht Holz das größte Wachstum verzeichnen, sondern Zellulose mit 8,2 % im Jahr 2021 und durchschnittlich erwarteten 8,4 % pro Jahr bis 2024 [23]. Der zunehmende Wettbewerb auf dem Rohstoffmarkt macht die Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe für Dämmstoffe eher unattraktiv. Hier gilt es alternative Rohstoffsportimente aus der Agrarwirtschaft zu etablieren.

#### *Wertschöpfungskette*

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist die Schaffung einer vollständigen Wertschöpfungskette für Miscanthus, einschließlich Anbau, Lagerung und Verarbeitung der in Bergbaufolgelandschaften und Randgebieten erzeugten Biomasse für die kaskadische Nutzung als Faser, Zellstoff, Papier und Fasermaterial. Eine weitere Innovation ist die Verarbeitung von Miscanthus-Nebenprodukten zu alternativer Energie und Biokohle im Sinne eines Zero-Waste-Ansatzes. Die weitere Innovation ist die Verwendung von Biokohle, die aus Miscanthusabfällen hergestellt wird, als Bodenverbesserungsmittel zur weiteren Verbesserung der Erträge. Alle Innovationen werden die Wertschöpfung aufrechterhalten und die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft voll erfüllen.

Die Nutzung von Miscanthus-Biomasse für Faserstoffe, Zellstoff und Papier wird die Palette der Rohstoffe für die Industrie bereichern und die Umweltbelastung durch den erneuerbaren Charakter von Miscanthus verringern, der als mehrjähriges Gras 20 bis 25 Jahre lang geerntet werden kann, ohne dass eine Neuanpflanzung erforderlich ist. Durch die Verwendung von Miscanthus-Biomasse wird ein Beitrag geleistet, den mehrjährigen Rohstoffmarkt zu stabilisieren und der Kaskadenprozess gewinnt durch die Verarbeitung von Nebenprodukten an Stabilität.

#### *Weitere Nutzungsmöglichkeiten*

Der Einsatz verschiedener Faserfraktionen (Kurz-, Langfasern, Holzteile, Mischungen) aus der Miscanthuspflanze wurde für Dämm- und Faserstoffe sowie für verschiedene Papiersorten getestet. Dieser Ansatz ist innovativ in der Papierindustrie. Verschiedene Fasermorphologien und die daraus resultierenden Materialeigenschaften (z.B. Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit) wurden untersucht – ebenso wie Materialkombinationen und die teilweise Substitution von Holz sowie die Prozessanforderungen für die industrielle Umsetzung. Eine Spanplatte mit einer Kernschicht aus Miscanthusfasern kann als innovativer Ansatz für die Möbel-, Innenausbau- und Automobilindustrie gesehen werden. Der gezielte Aufschluss von Miscanthus-Rohstoffen führt zu kosteneffizienten Faserstoffen, die sich für die Erfüllung verschiedener Funktionen in Verpackungspapiersorten eignen. Die Papierherstellung wird als kontinuierlicher Pilotprozess demonstriert.

### *Herstellung*

Das Verfahren zur Herstellung von Miscanthus-Fasern ist technisch ähnlich wie die Verarbeitung von Holzwerkstoffen. Die getrockneten Späne oder Fasern werden mit Bindemittel und Zusatzstoffen versehen. Die verleimten Späne, Stränge oder Fasern werden zu Vliesen geformt, verdichtet und heiß zu Platten oder flexiblen Matten zugeschnitten und gepresst. Nach dem Abkühlen werden die Platten besäumt, geschliffen und geschnitten. Anschließend kann eine Beschichtung aufgebracht oder eine weitere Verarbeitung vorgenommen werden [13]. Mit einem experimentellen Ansatz soll das technologische Potenzial von Miscanthus-Rohstoffen für die Papierherstellung bewertet werden. Die Untersuchungen zeigten Korrelationen zwischen den Eigenschaften des Rohmaterials, der Papierherstellungsfähigkeit und den Produkteigenschaften auf. Die chemische Zusammensetzung, die morphologische Struktur und die mikroskopischen Merkmale der Faserstoffe wurden untersucht und mit Holz und anderen Einjahrespflanzenmaterialien verglichen.

## **2 Forschungsziel**

Das Hauptziel der vorgeschlagenen Projektidee ist die Erarbeitung einer vollständigen Wertschöpfungskette von der nachhaltigen Landbewirtschaftung über den Anbau, die Ernte, die Lagerung und die Verarbeitung bis hin zur Produktion von Biomaterialien und der energetischen Verwertung von Abfällen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen verschiedene Anforderungen erfüllt werden, wie z. B. die Steigerung der Erträge, die kontinuierliche Versorgung mit Rohstoffen oder die Gewährleistung sicherer Produkte.

Die Übersicht über das Gesamtverfahren für die einzelnen Arbeitspakete ist in Abb. 1 dargestellt. Folgende Abkürzungen wurden für die Forschungsorganisationen aus der Tschechischen Republik verwendet:

- UJEP: Jan Evangelista Purkyně University, Ústí nad Labem
- VSB-TUO: VSB-Technical University, Ostrava
- UCT: University of Chemistry and Technology, Prague
- WASTen: Cluster "WASTen", Ústí nad Labem

Und für die deutschen Forschungsorganisationen diese Abkürzungen:

- PTS-IZP: Papiertechnische Stiftung – Institut für Zellstoff und Papier, Heidenau
- TUD-AST: Technische Universität Dresden, Professur Agrarsystemtechnik
- TUD-HFT: Technische Universität Dresden, Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik

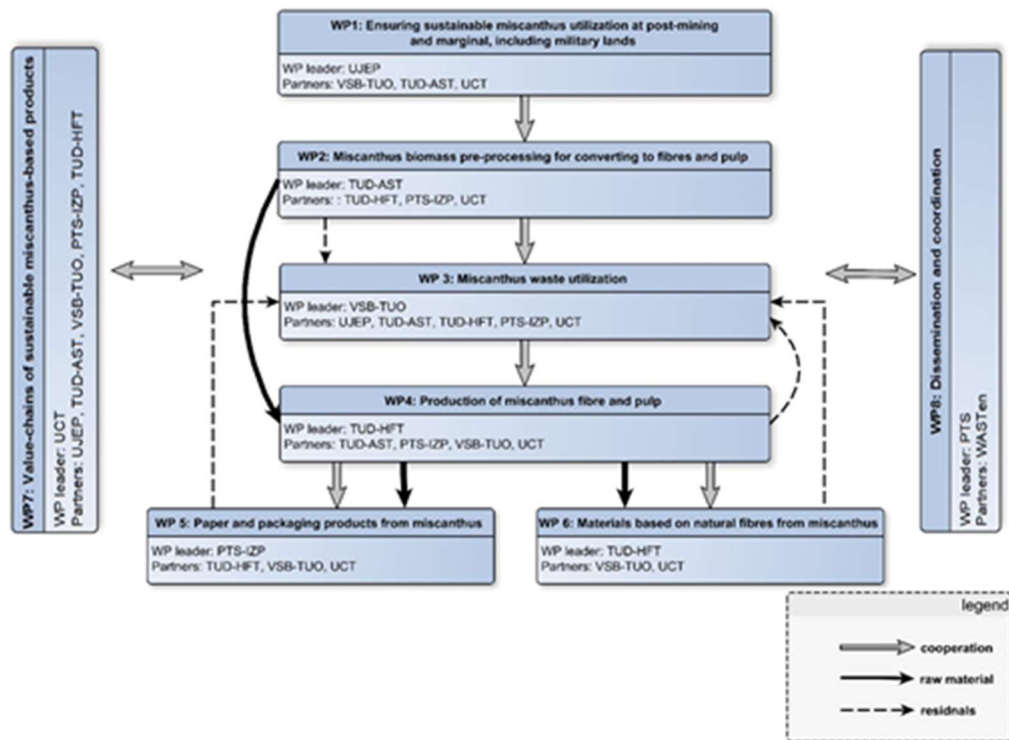


Abb. 1 Übersicht der Arbeitspakete

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit arbeitsteilig von PTS-IZP, der TUD-AST, TUD-HFT sowie den tschechischen Projektpartnern VSB-TUO, UCT und UJEP bearbeitet.

Die PTS-IZP brachte umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Faserstoffaufbereitung und deren Charakterisierung sowie die Papiererzeugung und deren Papierprüfungen ein. Durch die TUD-AST und TUD-HFT wurde Rohmaterial aus Miscanthus zur Verfügung gestellt, aufbereitet und zu Fasern, Faserstoffen und entsprechenden Werkstoffen weiterverarbeitet.

### 3 Material und Methoden

#### Miscanthus

Der Rohstoff Miscanthus wurde auf unterschiedlichen Feldern der tschechischen Projektpartner angebaut. Zusätzlich kamen Rohstoffe aus Deutschland, Kroatien und der Ukraine in die Versuchsreihen. Hintergrund waren unterschiedliche Voraussetzungen der Böden. Der Miscanthus wurde auf ertragreichen Ackerflächen, Grenzertragsflächen sowie kontaminierten Böden angebaut. Dabei wurde der langfristige Ertrag sowie der Einfluss als Bodenverbesserer untersucht. Die Ernten erfolgten im Herbst und im Frühling (green harvest / brown harvest). Die Charakterisierung der gewonnenen Biomasse konzentrierte sich auf mögliche Unterschiede in der Verarbeitung und der Beeinflussung mechanischer Kennwerte von Produkten mit Miscanthus als Rohstoff.

#### Ernte, Transport, Umschlag und Lagerung

Die Ernte erfolgte fast ausschließlich mit Feldhäckslern. Loses Schüttgut wurde vom Feld im Parallelverfahren direkt vom Feldhäckslern auf landwirtschaftliche Traktor-Anhänger-Gespanne übergeben und in der Regel bis 15 km zur Einlagerung auf Betriebshöfen gefahren.



### *Partikel*

Die Herstellung von Spänen erfolgte mit unterschiedlichen Zerkleinerungsaggregaten (Messerringzerspaner, Schlagkreuzmühle). Unterschiedliche Späne für die Deck- bzw. Mittelschichten von Faserwerkstoffen wurden hergestellt und zu Partikelwerkstoffen verarbeitet. Verfahrensbedingt kommt es beim Zerkleinern des Pflanzenmaterials mit Feldhäckslern neben der Hauptfraktion zu unerwünschten Feinanteilen als auch Überlängen. Der Feinanteil erhöhte sich während der folgenden Prozesse (Transport, Umschlag, Lagerung) kontinuierlich durch schüttgutbedingtem Abrieb.

### *Thermomechanischer Aufschluss (TMP, CTMP)*

Das TMP-Verfahren (Thermo Mechanical Pulping) eignet sich für die Herstellung von Holzfaserstoff. Hierbei wurden die vorzerkleinerten Partikel (4 – 10 mm) im Kocher bei 140 °C und 6 bar plastifiziert. Der Mahlscheibenabstand betrug 0,02; 0,2; 0,3; 0,5 und 1,0 mm. Es werden Ausbeuten von über 90 % erreicht. Durch die mechanische-chemische Zerkleinerung bleibt die chemische Zusammensetzung der Hauptkomponenten (Lignin, Cellulose, Hemicellulosen) des Ausgangstoffes weitestgehend erhalten.

Das CTMP-Verfahren (Chemi-Thermo Mechanical Pulping) eignet sich für die Herstellung von Zellstoff. Es ähnelt dem TMP-Verfahren, jedoch werden zusätzlich 2 % einer NaOH – Lösung (50 %ig), dem zerkleinerten Miscanthus-Material zugemischt. Die Kochdauer lag bei 140 °C 6 Minuten und der Mahlspalt zwischen den Scheiben wurde auf 0,3 mm eingestellt.

### *Acetosolv Aufschluss*

Das Acetosolv-Verfahren gehört zu der Gruppe der Organosolv-Verfahren, bei denen organische Lösungsmittel zum Aufschließen des Lignins verwendet werden. Diese Verfahren befinden sich zurzeit noch in der Entwicklung und werden nicht großtechnisch angewendet. Bei dem Acetosolv-Verfahren wird mit Essigsäure und einer anorganischen Säure gearbeitet. Durch die Verwendung der Essigsäure wird das hydrophobe Lignin teilweise acetyliert und dadurch besser wasserlöslich. Bei gleichzeitiger Anwendung von Wasserstoffperoxid bildet sich mit der Essigsäure Peroxyessigsäure aus, welche zu einem gleichzeitigen Bleichen des Faserstoffes führt. Die anorganische Säure dient als Katalysator, um den pH-Wert der Reaktionslösung zu verringern.

### *Soda-Aufschluss*

Der Aufschluss von Miscanthus erfolgte in einer kleintechnischen Anlage (30 l Kocher) an der TU Dresden, Institut für Pflanzen- und Holzchemie. Folgende Versuchsbedingungen (Tab. 1) wurden für die Kochung angewendet:

Tab. 1: Versuchsbedingungen Soda-Aufschluss

<b>Bezeichnung</b>	<b>Parameter</b>
Temperatur	160 °C
Laugenkonzentration NaOH	3 %
Ziel H-Faktor	1000
Ist H-Faktor	986

### Faserstoffe (TMP- Referenz)

Folgende Faserstoffe wurden für die Untersuchungen eingesetzt:

Tab. 2: Eingesetzte Faserstoffe (TMP-Referenz)

Bezeichnung	Beschreibung
TMP 0,02 mm	Aufschlussbedingungen: 140 °C, 4 bar, Mahlscheibenabstand 0,02 mm
TMP 0,2 mm	Aufschlussbedingungen: 140 °C, 4 bar, Mahlscheibenabstand 0,2 mm

Tab. 3: hergestellte Faserstoffe und Papiere

Bezeichnung	Beschreibung
Acetosolv 1 - 4	Aufschluss Acetosolv: TMP 0,2 mm
Acetosolv Ausgangsstoff	Miscanthus Rohmaterial
Miscanthus Zellstoff	Aufschluss Soda
Referenz WPR	100 % Wellenstoff, 1% Stärke
30% Miscanthus WPR	70 % Wellenstoff, 30 % Miscanthus Zellstoff, 1% Stärke
Referenz Duplex	Unterbahn: 100 % Wellenstoff, 1% Stärke Oberbahn: 50% Fichte Kiefer, 50 % Eukalyptus
30% Miscanthus Duplex	Unterbahn: 70 % Wellenstoff, 30 % Miscanthus Zellstoff, 1 % Stärke Oberbahn: 50% Fichte Kiefer, 50 % Eukalyptus

### Bindemittel und Additive

Für die Herstellung von Dämmplatten und Spanplatten wurden unterschiedliche Bindemittel und Additive (BASF Kaurit 345 UF, polymeric methylene diphenyl diisocyanate - PMDI und Sasol Hydrowax) mit variierenden Anteilen verwendet.

### Heißpresse

Die Verdichtung der Dämm- und Spanplatten erfolgte mit einer Siempelkamp Laborpresse. Hier wurden je nach Werkstoff unterschiedliche Temperaturen (140 – 190 °C) sowie variabel Presszeiten (90 – 300 sec.) verwendet.

### Siebfraktionierung

Für die Charakterisierung der trockenen Partikel wurden unterschiedliche Maschenweiten im RETSCH-200 Aggregat verwendet (Ø 6,3 mm, 4 mm, 2 mm, 1,6 mm, 1 mm, 0,63 mm, 0,315 mm und 0,1 mm). Diese Prüfung verschaffte einen Überblick über die morphologischen Eigenschaften der im Versuch verwendeten Fasern und Späne. Der Feinanteil im Partikelgemisch wurde im Alpine Luftstrahlsieb bestimmt.

### *Mechanische Festigkeit*

Die Biegefestigkeit wurde in Anlehnung an die DIN EN 310 bestimmt. Abhängig von der stofflichen Zusammensetzung ist die durchschnittliche Biegefestigkeit (in Bruchmodul MOR und Elastizitätsmodul MOE) von der Dichte (Bestimmung nach DIN EN 1602) der Werkstoffe abhängig. Bei Dämmstoffen die mechanische Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung in Anlehnung an die DIN EN 826 bestimmt.

### *Wärmeleitfähigkeit*

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte im Normklima (23 °C und 50 %) an einem Einplattengerät in Anlehnung an DIN EN 12667. Die Proben wurden zunächst in einem Trockenofen bei Umluft bei 70 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Anschließend wurden die Proben in Folie gepackt und im Wärmeleitprüfgerät gemessen.

### *Lebenszyklusanalyse (LCA)*

Die Ergebnisse von Ökobilanzen (life cycle assessments, LCA) können zur umweltgerechten Prozessbewertung ermittelt werden. Dazu wurden grundsätzliche Prozessdaten wie z. B. Wasserverbrauch, Energie- und Materialeinsatz der Produktspezifischen Herstellungsfahren ermittelt. Die erhobenen Labordaten wurden an den tschechischen Projektpartner UCT zur Auswertung übermittelt.

### *Ligningehalt*

Die Materialien wurden zerfasert und mittels Dichlormethan (DCM) extrahiert und anschließend an der Luft getrocknet. Von den luftgetrockneten Mustern wurde der Trockengehalt nach EN ISO 638-1 ermittelt.

Die Ligninbestimmung wurde nach TAPPI T 222 durchgeführt. Diese Methode (auch Klason-Lignin genannt) beschreibt ein Verfahren, das für die Bestimmung von säureunlöslichem Lignin in Holz und in allen Arten von ungebleichtem Zellstoff verwendet werden kann.

Die direkte Ligninbestimmungsmethode basiert auf der gravimetrischen Ligninbestimmung nach Totalhydrolyse der kohlenhydratischen Faserbestandteile. Die Bestimmung des Ligningehaltes erfolgte gravimetrisch durch Hydrolyse mit 72 %iger Schwefelsäure. Damit wurden die kohlenhydratischen Bestandteile hydrolysiert und wasserlöslich gemacht. Das im Säuregemisch ungelöste Lignin wurde mittels Filtration aus dem Hydrolysat abgetrennt und gravimetrisch bestimmt.

### *Glührückstand*

Die Bestimmung des Glührückstandes (GR) erfolgte in Anlehnung an ISO 1762:2019-07 und ISO 2144:2019-06 mit Hilfe des thermogravimetrischen Analysegerätes prepAsh 219 der Fa. Precisa. Der Glührückstand gibt den prozentualen Masseanteil an anorganischen Füllstoffen in Papier, Pappe bzw. zellulosebasierten Materialien an.

Die Probe wurde in einem thermogravimetrischen Muffelofen bei 525 °C und 900 °C bis zur Massekonstanz verascht. Während des Veraschungsprozesses wurde die Probenmasse in Abhängigkeit der Temperatur und/oder Zeit automatisiert registriert, der Mittelwert berechnet (Doppelbestimmung) und in % angegeben.

### *Extraktgehalt*

Die Bestimmung des Extraktgehaltes wurde mit dem Lösemittel Dichlormethan (DCM) in einer Soxhlet-Apparatur durchgeführt.

Mit diesem Verfahren können die löslichen Bestandteile in Zellstoff oder Papier ermittelt werden. Der Extraktgehalt ist ein Summenparameter für den Gehalt an Holz-Extraktivstoffen (z.B. Harz) und wird gravimetrisch ermittelt.

### *Oberflächenladung*

Die Bestimmung der Oberflächenladung erfolgte nach der PTS-Methode RH-102/2009. Unter dem Begriff „Oberflächenladung“ versteht man die Gesamtheit der Ladungsträger an der Oberfläche von Faserstoffen, Füllstoffen und Mikrokolloiden, die polymeren Verbindungen zugänglich sind. Die Ladungsträger sind bei einem Faserstoff hauptsächlich Carboxyl- und Sulfonsäuregruppen.

Bei der Prüfmethode handelt es sich um eine Polyelektrolyt-Rücktitration. Die zu untersuchende Probe wird mit einem Überschuss eines kationischen Polyelektrolyten umgesetzt. Anschließend wird der Feststoff der Probe abgetrennt und die nicht verbrauchte Menge des kationischen Polyelektrolyten mit einer Lösung eines anionischen Polyelektrolyten im Partikelladungsdetektor (PCD) zurücktitriert und die Oberflächenladung ermittelt.

### *Gesamtladung*

Die Bestimmung der Gesamtladung erfolgte nach der Methode von Katz. Die Carboxylgruppen (-COOH) sind Säuregruppen, die an den Celluloseketten gebunden sind und im Wesentlichen durch Oxidation der Cellulose beim Aufschluss- und Bleichprozess gebildet werden. Ein weiterer Anteil der Carboxylgruppen ist auch mit der Hemicellulose assoziiert.

Die Carboxylgruppenbestimmung erfolgte konduktometrisch durch eine direkte Säure-Base-Titration einer Suspension des Zellstoffes.

### *Grenzviskositätszahl (GVZ)*

Die Bestimmung der Grenzviskositätszahl (GVZ) erfolgte nach ISO 5351.

Aus der Probe wurde die entsprechende Menge gemäß Norm eingewogen, in CUEN-Lösung bis zur vollständigen Lösung der Probe geschüttelt, temperiert und mittels Ubbelohde-Viskosimeter vermessen. Anhand der Auslaufzeiten wurden die Grenzviskositätszahlen errechnet.

### *Wasserrückhaltevermögen (WRV)*

Das Wasserrückhaltevermögen (WRV) wurde nach ISO 23714 bestimmt. Das WRV ist das Verhältnis der Masse des Wassers einer nassen Zellstoffprobe nach Zentrifugation unter festgelegten Bedingungen (30 min bei 3.000 g) zu der ofentrockenen Masse derselben Zellstoffprobe.

Das WRV lässt Rückschlüsse zur Entwässerung des Faserstoffes auf der Papiermaschine zu. Umso höher das WRV, umso mehr Energie ist notwendig, um den Faserstoff zu entwässern und zu trocknen.

### *morphologische Kenngrößen*

Die fasermorphologischen Untersuchungen der Proben wurden unter Verwendung des „Field-Flow-Fractionators“ der Fa. Valmet durchgeführt.

Das Messprinzip des Fraktionators beruht auf der Feld-Fluss-Fraktionierung und der anschließenden kamera- und rechnergestützten Analyse bzw. Auswertung. Die suspendierte Faserstoffprobe wird dem Wasserstrom einer 100 m langen Röhre injiziert. Im Strömungsfeld der Fraktionierspule erfolgt die physikalische Auftrennung der Fasersuspension in ihre Einzelfractionen entsprechend des Strömungsregimes in der Trennröhre als auch des Strömungswiderstands der einzelnen Partikel bzw. Fasern. Aufgrund der größten Strömungsgeschwindigkeit im Zentrum der Röhre, werden hier vorrangig größere Partikel und Fasern transportiert, die diese auch als erstes verlassen.

Von den zu untersuchenden Proben wurden Suspensionen mit einer Konsistenz von 0,3 wt% vorbereitet und bei 25 °C gemessen. Je Muster wurden 2 Messungen durchgeführt und ein Mittelwert errechnet.

### *Stippengehalt*

Der Stippengehalt beschreibt den Anteil an nicht gelösten Faserbündel, den Stippen, im Faserstoff nach dem ZELLCHEMING-Merkblatt ZM V/18/62. Die Fraktionierung erfolgte mit einem Brecht-Holl-Fraktionator und einer Loch-platte von 0,7 mm. Die auf der Lochplatte zurückbleibenden Stippen wurden getrocknet und die Masse gravimetrisch ermittelt.

### *Laborblattbildung*

Laborblätter wurden nach dem Rapid-Köthen Verfahren gemäß DIN ISO 5269-2 gebildet. Die Aufbereitung des Faserstoffs erfolgte nach ISO 5263. Laborblätter wurden mit einer flächenbezogenen Masse von 80 g/m<sup>2</sup> gebildet.

### *Entwässerungswiderstand (SR)*

Der Mahlgrad Schopper Riegler in SR ist ein Maß für die Entwässerungsgeschwindigkeit einer verdünnten Faserstoffsuspension bei einer Temperatur von 20°C. Der SR Wert wird nach DIN EN ISO 5267-1 bestimmt.

### *Physikalische Eigenschaften*

Die erzeugten Laborblätter wurden auf ihre physikalischen Eigenschaften, wie in Tab. 4 aufgeführt, getestet.

Tab. 4: Prüfungen der physikalischen Eigenschaften

<b>Papiereigenschaft</b>	<b>Prüfvorschrift</b>
Flächenmasse	DIN EN ISO 536
Dicke, Rohdichte	DIN EN 20 534
Zugversuch	DIN EN ISO 1924 - 2
Nullreißlänge	TAPPI T231 cm-96

Durchreißwiderstand (Elmendorf)	DIN EN ISO 1974
Berstfestigkeit	DIN EN ISO 2758
SCT	DIN 54518
Biegesteifigkeit	DIN 53 121
Weißgrad	DIN 53 145 – 1
Opazität	DIN 53 146
Farbort L*, a*, b*	ISO 5631

### Lichtmikroskopie

Die Aufnahmen erfolgten mittels Lichtmikroskop BX-51 der Fa. Olympus bei 40- und 100-facher Vergrößerung im Durchlicht.

### PFI-Mahlung

Die PFI-Mahlung erfolgte nach DIN EN ISO 5264-2. Für die PFI-Mahlung wurden 30 g atro Faserstoffes desintegriert, entwässert und anschließend bei unterschiedlichen Umdrehungszahlen (1000 bis 5000 Umdrehungen) in der PFI-Mühle gemahlen.

### Versuchspapiermaschine

Auf der Versuchspapiermaschine wurde zwei verschiedene Papiere (Wellpappenrohpapier und Duplex-Papier) mit Miscanthusfaserstoff hergestellt. Ein Prinzipschema der Papiermaschine in Duplexfahrweise ist in Abb. 1 dargestellt. Das Duplex Papier wurde mit 10 kN/m in einem Maschinenglättwerk behandelt. Bei der Herstellung von Wellpappenrohpapier fällt die Bütte zur Oberbahn weg und das Papier wurde nicht geglättet.

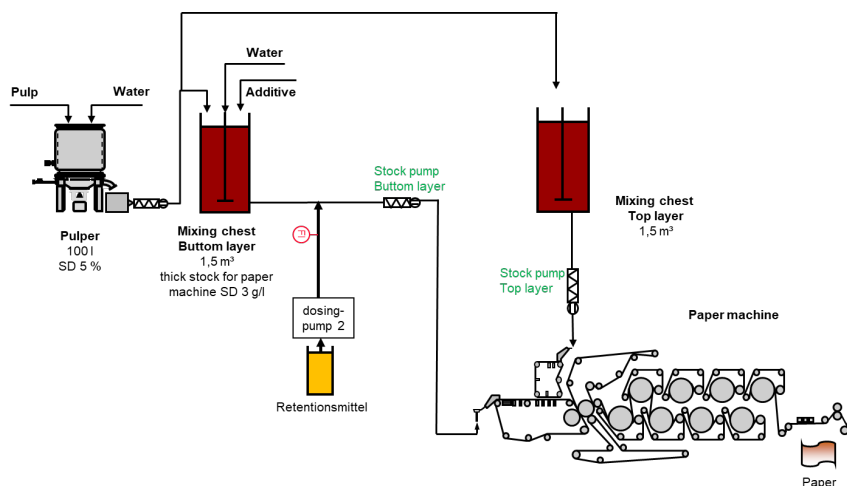


Abb. 1: Versuchspapiermaschine an der PTS-IZP

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Ernte, Transport, Umschlag und Lagerung

Das erzeugte Schüttgut besitzt eine relativ geringe Dichte ( $120 \text{ kg/m}^3$ , Schnittlänge: 1 - 10 cm). Großpackenpressen werden regulär zur Herstellung von Großballen verwendet, die eine doppelt so hohe Dichte wie Schüttgut aufweisen ( $240 \text{ kg/m}^3$ , Schnittlänge: 10 - 20 cm oder ungeschnitten). Von einem Standort (Kroatien) wurde Langmaterial in Form von Rundballen geerntet. Diese Ernte erfolgte zweistufig und absetzig (Mähen und Pressen), brachte also einen höheren Ernteaufwand mit sich.

Das Schüttgut hatte wesentliche logistische Vorteile im Kurzstreckentransport als auch im Umschlag größerer Mengen. Die erzeugten, gepressten Rundballen hingegen waren für Transportentfernungen  $> 50 \text{ km}$  vorteilhaft, wodurch beim Lkw-Transport Ladkapazität effektiver ausgenutzt werden konnte. Die Umschlagsverluste waren zwar geringer, der Stückgutumschlag hingegen aufwändiger.

Die Einlagerung von Schüttgut erfolgte auf den begleiteten Betriebshöfen meistens diskontinuierlich mittels Radlader, die in der Landwirtschaft stark verbreitet sind. Der Einsatz von Stetigförderern für Schüttgut in der Landwirtschaft (Band- und Schneckenförderer) ist bekannt und verbreitet, konnte aber nur indirekt dokumentiert werden (Ukraine). Biomasseverluste während TUL-Prozessen wurden ebenso wie der Biomasseabbau während einer Lagerperiode nach Möglichkeiten ermittelt.

### 4.2 Charakterisierung

#### *Pflanzenbestandteile*

Für den Verarbeitungsprozess als auch die späteren Produkteigenschaften ist der Masseanteil einzelner Pflanzenbestandteile von Bedeutung. So können Blätter im Gemisch zu Qualitätsminderungen in Faserwerkstoffen führen. Die makroskopischen Pflanzenbestandteile der untersuchten Miscanthuspflanzen liegen bei, Stängel 58 %, Hüllblätter: 7,6 %, Blätter: 5,6 % und Spitzenblätter 27,3 % (Abb. 2).



Abb. 2: *Miscanthus*, fraktioniert nach Pflanzenbestandteilen

#### *Siebfraktionierung*

Die Charakterisierung der erzeugten Faserstoffe erfolgte mittels Siebfraktionierung. Dabei kann eine Verteilung der Faserlängen Aussagen zur Qualität und der Eignung für nachfolgende Anwendungen liefern.

Die Siebfraktionierung zeigt Unterschiede im Grad der Fasermahlung und der Fasermorphologie. Als Vergleich ist der im Labor hergestellte TMP-Faserstoff aus *Miscanthus*, ein im Labor hergestellter Holzfasernstoff (Kiefer) und ein industriell hergestellter Faserstoff (Fichte) dargestellt (Siebkennlinien verschiedener Faserstoffe). Da die Verteilungskurven nahe beieinanderliegen, kann von einer prinzipiellen Eignung des *Miscanthus*fasern ausgegangen werden.

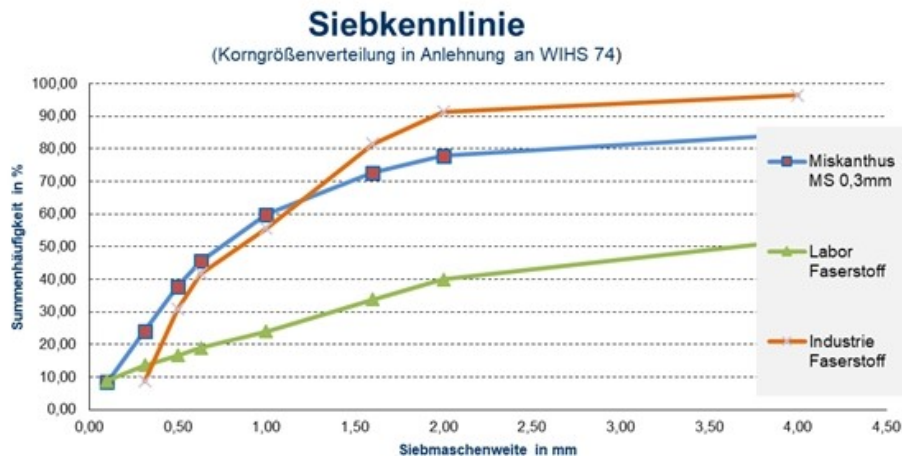


Abb. 3: Siebkennlinien verschiedener Faserstoffe

Exemplarisch sind in der Abb. 3 unterschiedliche Faserstoffe (bei MS 0,3) gegenübergestellt.

### Chemische Zusammensetzung der Pflanzen

Die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Hölzer oder verholzten Gewebe ist sehr unterschiedlich, beeinflusst aber die Verarbeitung der Rohmaterialien zu Faserstoffen. Je nach dem Anwendungszweck können entsprechende Prozesse und Bedingungen ausgewählt und angewendet werden. Als Ausgangsbasis wurde im Projekt eine umfassende Grundcharakterisierung vorgenommen. In Tab. 5 wird Miscanthus mit anderen ausgewählten ein- und mehrjährigen Pflanzen, Nadel- und Laubholz verglichen.

Tab. 5: Vergleich von Miscanthus mit ausgewählten einjährigen und mehrjährigen Pflanzen

Pflanze	Miscanthus			Weizenstroh	Baumwolle		Nadelholz	Laubholz	Bagasse
	PTS	[15]			[17], [18]	[17], [18]			
Quelle	PTS	[15]		[16], [17], [18]	[17], [18]	[17], [18]	[17], [18]	[17], [18]	[17], [18]
Cellulose in %	-	51	53,3	29-35	80-90	95-97; 90-91 (Linters)	57	38-49	55
Lignin in %	23	21,7	25,5	16-21	3-3,5	3 (Linters)	26-34	23-30	18-24
Hemicellulose in %	-	25,2	-	26-32	-	-	7-29	19-26	27-32
Asche in %	0,94	3,2	1,71	2,5-10	1-1,2	-	<1	<1	1,5-5
Silicat-Anteil in %	-	-	-	3-7	<1	-	<1	<1	0,7-3
Faser Typ	kurz	-	-	kurz	lang	-	lang	kurz	kurz

### Cellulose

Für den Aufschluss von Holz und Pflanzen spielt die Zusammensetzung der Hauptkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin eine wichtige Rolle. Der Gehalt an



Cellulose ist für die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen und damit der Festigkeit im Papier verantwortlich.

Miscanthus weist einen Cellulose-Anteil von ca. 51 % auf [14], Dieser ist deutlich höher als bei Strohsorten, wie Weizen und Reis (29-35 % und 28-36 %) [15]. Im Vergleich zu anderen Pflanzen, wie Bambus (52-68 %) [16][17] und Schilf (42-50 %) [15], ist der Cellulose-Gehalt von Miscanthus in derselben Größenordnung einzuordnen. Nadelhölzer haben einen Cellulose-Anteil von ca. 57 % [16][17].

### *Lignin*

Lignin ist ein aromatisches vernetztes Polymer, das amorph ist. Es umhüllt die Fibrillen der Cellulose und Hemicellulosen und gibt ihnen die notwendige Steifigkeit, indem eine Vielzahl der Fibrillen verkittet werden. Dadurch ergibt sich die hohe Druckfestigkeit. Lignin wirkt hydrophobierend und schützt den Baum gegen Pilzbefall.

Laubhölzer enthalten durchschnittlich weniger Lignin (ca. 21 %) als Nadelhölzer (ca. 27 %). Der Anteil des Lignins ist von Pflanze zu Pflanze sehr unterschiedlich. Dies wird auch aus Tab. 5 ersichtlich. Miscanthus weist ähnliche Ligningehalte wie z. B. Laubholz, Bagasse und Stroh auf.

### *Glührückstand (Asche)*

Der Glührückstand, auch als Asche bezeichnet, ist der Probenanteil der nach vollständigem Verbrennen einer Probe in einem Gefäß und Glühen des Rückstandes unter festgelegten Bedingungen bis zur Massekonstanz vorliegt. Er ist ein Summenparameter von anorganischen Anteilen in Faserstoffen und Papieren.

Der Aschegehalt von Nadel- und Laubholz ist in der Regel < 1%. Deutlich höher ist der Anteil bei ein- und mehrjährigen Pflanzen, insbesondere bei Stroh, die auch einen hohen Anteil an silicatischen Bestandteilen enthalten.

### *chemische Charakterisierung*

An der PTS erfolgten chemisch Untersuchungen am TMP 0,02 mm. Der Faserstoff wurde hinsichtlich seiner Ladungseigenschaften (Oberflächenladung und Carboxylgruppengehalt), Extraktstoffe, Ligningehalt und Grenzviskositätszahl (GVZ) untersucht.

Vergleichend dazu sind in der Tab. 6 ein Fichten-/Kiefern-Zellstoff NBSK und ein Eukalyptus-Zellstoff (Sulfatverfahren) aufgeführt.

Tab. 6: Chemische Eigenschaften des TMP im Vergleich zu einem Fichten-/ Kiefern-Zellstoff (NBSK) und Eukalyptus

Parameter	Referenz TMP 0,02 mm	NBSK (Kiefer/Fichte)	Eukalyptus
WRV in g/g	1,04	1,05	1,07
Grenzviskosität in ml/g	449	883	790
Extrahierbare Anteile (DCM) in %	3,7	-	-

Lignin-Gehalt in %	23	<1	<1
Asche 525 °C in %	0,94	0,23	0,25
Oberflächenladung in µeg/g	45,5	22,7	27,9
Gesamtladung in mmol/kg	-107,0	-40,4	-65,2

Vergleicht man die chem. Eigenschaften vom Miscanthus mit NBSK und Eukalyptus, wird deutlich, dass der NBSK und Eukalyptus eine deutlich höhere GVZ und einen niedrigeren Ligningehalt aufweisen. Dagegen sind die Oberflächen- und Gesamtladung deutlich niedriger als bei Miscanthus. Die hohe Ladung des Miscanthus resultiert aus dem hohen Anteil an Lignin.

Der Extraktgehalt (DCM) mit 3,7 % ist sehr hoch. Zellstoffe weisen in der Regel einen Extraktgehalt von <1 % auf.

Aufgrund der höheren Grenzviskosität und dem niedrigen Ligningehalt sollte der NBSK und Eukalyptus deutlich höhere Festigkeiten im Papier als der Miscanthus-TMP ausbilden.

#### *Wasserlösliche organische Substanzen*

Für die Ermittlung der wasserlöslichen organischen Bestandteile wurde eine definierte Menge an Miscanthus-TMP desintergiert, filtriert und anschließend der pH-Wert, die Leitfähigkeit, der CSB und die spezifische Ladung gemessen (siehe Tab. 7). Die wasserlöslichen organischen Substanzen z.B. der CSB mit 54 g/kg ist relativ hoch. Zellstoffe liegen in der Regel eine Zehnerpotenz niedriger.

Tab. 7: Filtratuntersuchungen des Miscanthus-TMP

Parameter	Referenz TMP 0,02 mm
pH-Wert	5,3
LF in µS/cm	103,7
CSB in g/kg	54,4
spez. Ladung in meq/kg	-4,38

#### *Morphologische Eigenschaften*

Durch die TMP-Erzeugung mit einem Mahlsplatt von 0,02 mm wird sehr viel Feinstoff erzeugt. Dies wird in der Verteilung der Faserlängenfraktionen < 1,2 mm von ca. 90 % ersichtlich (siehe Abb. 8).

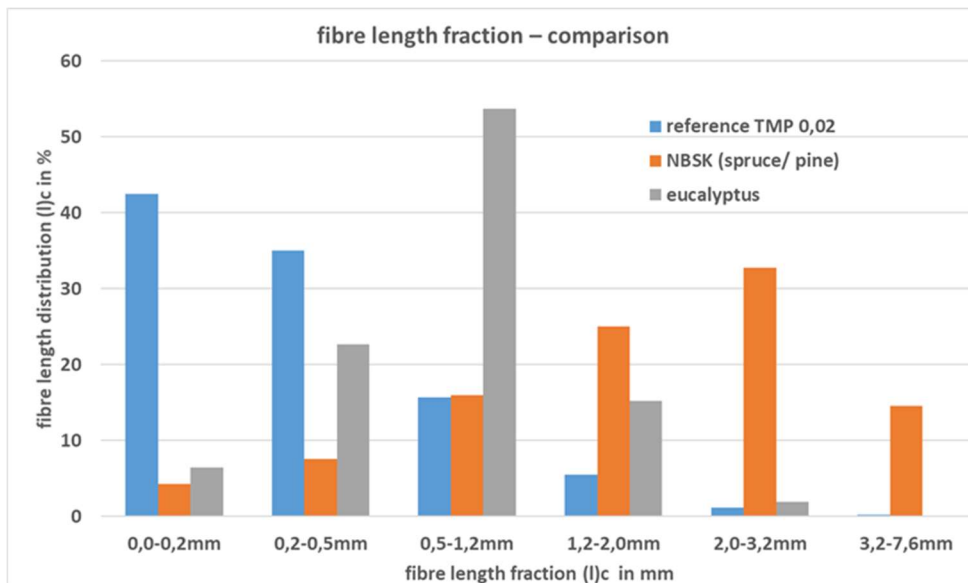


Abb. 4: Faserlängenfraktionen Referenz TMP, NBSK und Eukalyptus

Der TMP 0,02 mm weist eine Faserlänge  $L(l)$  von 0,47 mm auf und ist dadurch den Kurzfaserszellstoffen (Laubholz) zuzuordnen. Vergleichend zum TMP 0,02 mm sind in Tab. 8 die morphologischen Kenngrößen von Fichte/Kiefer und Eukalyptus dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass der TMP 0,02 mm einen sehr hohen Anteil an Feinstoff aufweist. Die Fibrillierung des TMP ist durch die Behandlung im Refiner (TMP-Erzeugung) deutlich höher als bei den Zellstoffen.

Tab. 8. Morphologische Kenngrößen TMP im Vergleich zu NBSK und Eukalyptus

Parameter	TMP 0,02 mm	NBSK (Kiefer/Fichte)	Eukalyptus
$L(n)$ c in mm	0,20	0,98	0,56
$L(l)$ c in mm	0,47	2,01	0,85
$L(w)$ c in mm	0,95	2,65	1,08
Feinstoffe (B) in %	19,83	8,60	15,53
Faserdicke in $\mu\text{m}$	18,84	19,53	13,14
Fibrillierung in %	2,32	0,90	1,84
Optische Coarseness in mg/m	0,14	0,13	0,06

Die Messung der morphologischen Kenngrößen des TMP 0,2 mm konnte nicht erfolgen, da dieser zu viel Splitter enthielt.

### Mikroskopische Aufnahmen

Auch in den mikroskopischen Aufnahmen (Abb. 5): links 4-fach Vergrößerung, rechts 10-fach Vergrößerung) wird ersichtlich, dass viel Feinstoff aber auch lange, breite Fasern bzw. Faserbündel vorhanden sind.

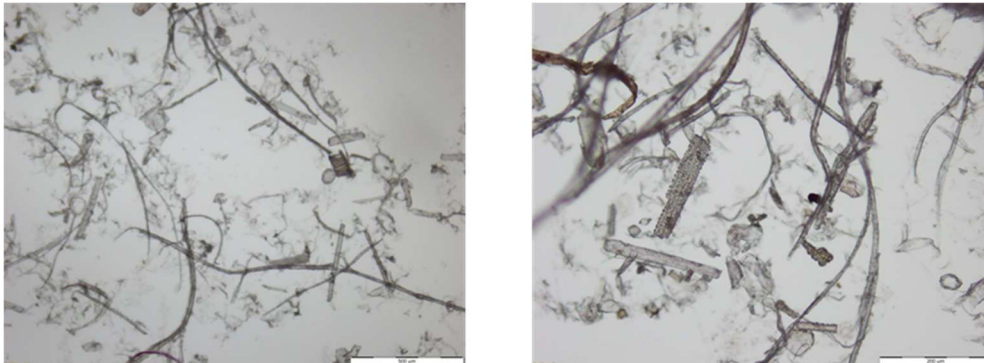


Abb. 5: Mikroskopische Aufnahmen der Referenz TMP 0,02 mm

### Stippengehalt

Beide TMP-Faserstoffe (0,2 mm und 0,02 mm) weisen grobe Splitter auf (Tab. 9, Abb. 6). Aus diesem Grunde wurde der Stippengehalt der TMP-Faserstoffe ermittelt.

Tab. 9. Stippengehalt nach Brecht Holl

Parameter	TMP 0,2 mm	TMP 0,02 mm
Stippengehalt Brecht Holl in %	54,6	9,7



Abb. 6: TMP Miscanthus 0,2 mm links und TMP Miscanthus 0,02 mm rechts

Durch den hohen Anteil an Stippen beim TMP 0,2 mm ist es nicht möglich den Faserstoff direkt für die Laborblattbildung einzusetzen. Für weitere Arbeiten wurde dieser TMP daher in der PFI-Mühle nachgemahlen.

## 4.3 Herstellung

### Partikelwerkstoff

Im Projektverlauf wurden Partikelwerksstoffe mit zwei unterschiedlichen Spänefraktionen und mit einer Dichte von  $700 \text{ kg/m}^3$  mit unterschiedlichen Anteilen von Miscanthus- und

Holzspänen hergestellt. Dazu wurden die langen Stängel auf eine Länge von 4 bis 35 mm vorzerkleinert und im Messerringzerspaner weiterverarbeitet (siehe Abb. 7).



Abb. 7. Miscanthus nach Verarbeitung mit Messerringzerspaner, Fa. Jähmlich (4 bis 35 mm)

Für die Spanplatten mit einer Rohdichte von  $700 \text{ kg/m}^3$  wurde ein UF-Hart als Bindemittel (UF Kaurit 345) in den Anteilen von 10 und 12 % verwendet. Ein Hydrophobierungsmittel (Sasol Hydrowax Pro A18) wurde den Spänen mit Anteil von 1 % zugegeben. Die beleimten Späne wurden gestreut und in einer Heißpresse bei  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  und 170 Sekunden verdichtet. Der Anteil der Miscanthus zu Holz wurde in der Deck- und Mittelschicht variiert.

### Übersicht Aufschlussverfahren

Das Ziel des Aufschlusses von Holz und Pflanzen ist die Vereinzelung der Fasern aus dem Holzgefüge des Fasermaterials. Dies erfolgt durch das Erweichen und/oder die Entfernung des vorhandenen Lignins aus dem Fasermaterial. Die Vereinzelung der Fasern aus dem Gefüge kann durch thermische, mechanische und oder chemische Behandlung erreicht werden. Die Aufschlussverfahren werden in vier Oberbereiche unterteilt, die sich entsprechend weiter untergliedern (siehe Abb. 8).

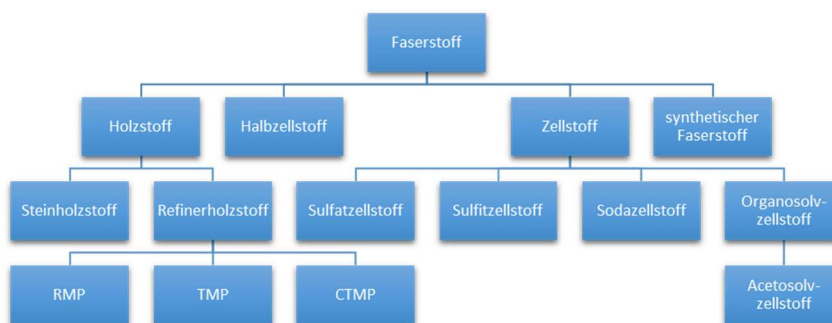


Abb. 8. Aufschlussverfahren von Holz und Pflanzen

### Acetosolv Aufschluss

Für den Acetosolv Aufschluss wurde das Miscanthus Rohmaterials (Acetosolv 4) und der TMP 0,2 mm (Acetosolv 1 bis 4) eingesetzt. Die Durchführung orientierte sich an der Arbeit von Barth [18]. Die Zusammensetzung der Kochlösungen sind in der Abb. 9 dargestellt. Der erzeugte Faserstoff wurde anschließend chemikalienfrei gewaschen und entsprechend charakterisiert.

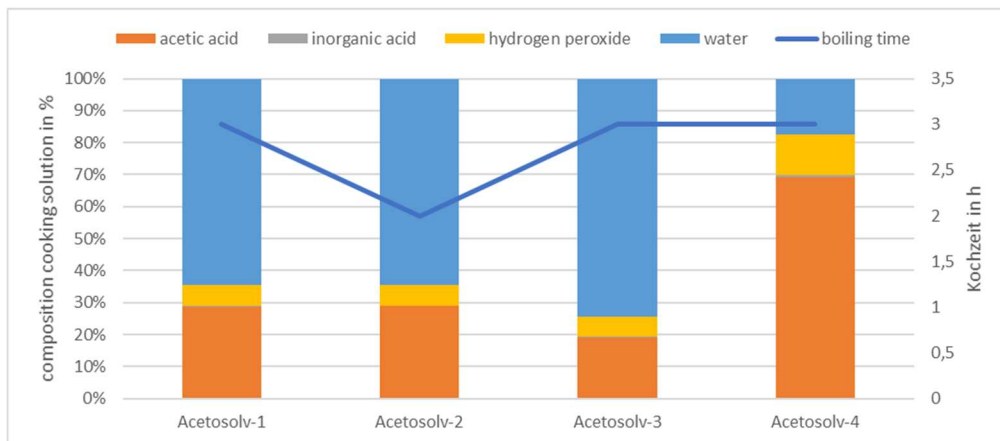


Abb. 9: Zusammensetzung der Kochlösung für den Acetosolv-Aufschluss

### Soda-Aufschluss

Das Miscanthus-Rohmaterial wird in einem Siebkorb in den Kocher gegeben und 3 %ige Natronlauge in den Kocher eingetragen. Mit Hilfe einer Umwälzpumpe wird die Kochlauge am Boden des Reaktors abgesaugt und über einen Filter (50 µm) wieder seitlich, unterhalb des Deckels, in den Reaktor zugeführt. Die Temperatur wird während des Kochens automatisch geregelt. Die Kochlauge wird nach Abbruch der Reaktion in einem Wärmeaustauscher abgekühlt. Als Abbruchgröße wurde der H-Faktor benutzt. Dadurch kann der Kochprozess über die Kochtemperatur und Kochdauer bewertet werden, d.h. der H-Faktor kann als Integral der Reaktionsgeschwindigkeit über die Zeit berechnet werden.

Die Kochung wurde dreimal durchgeführt um eine entsprechende Menge an Faserstoff für die Technikumsversuche aufzuschließen. Bei Erreichen des H-Faktors wurde die Kochung beendet, die Schwarzlauge abgepumpt, der Zellstoff neutral gewaschen, zentrifugiert und bei ca. 60 °C im Trockenschrank getrocknet.

### Chemisch- thermischer Aufschluss (CTMP)

Aus Miscanthus-Rohmaterial wurden unterschiedliche CTMP-Faserstoffe erzeugt:

Tab. 10: CTMP-Faserstoffe

Bezeichnung	Prozessbedingungen		
	2% NaOH Zugabe	Temperatur in °C	Mahlscheibenabstand in mm
CTMP V I	Ohne	140	0,3
CTMP V II	5 min mit NaOH vor Refiner behandelt	140	0,3
CTMP V III	60 min mit NaOH vor Refiner behandelt	140	0,3
CTMP V IV	NaOH Zugabe im Refiner	140	0,3

Da die erzeugten CTMP-Faserstoffe noch sehr viele Stippen enthielten, konnten diese nicht für die Laborblattbildung eingesetzt werden (siehe Abb. 10).





Abb. 10: CTMP-Faserstoffe

#### Laborblattbildung TMP Faserstoff

Der TMP- Faserstoff 0,02 mm wurde zu einem Wellenstoff mit 5, 10 und 20 % zugemischt, Laborblätter mit einer Flächenmasse von 80 g/m<sup>2</sup> erzeugt und die physikalischen Eigenschaften ermittelt.

Durch die PFI-Nachmahlung des TMP 0,2 mm sollten die Stippen zerkleinert, Fasern gekürzt und eine einheitlichere Faserlängenverteilung erzielt werden und anschließend Laborblätter gebildet werden.

#### Laborblattbildung – Acetosolv Faserstoff

Mit den erzeugten Acetosolv-Faserstoffen wurden Laborblätter mit einer Flächenmasse von 80 g/m<sup>2</sup> erzeugt (Abb. 11).



Abb. 11: Laborblätter von rechts nach links: Actosolv 1 – 4, Acetosolv 4-Ausgangsmaterial

Durch die Variation der Versuchsbedingungen, insbesondere der Wasserstoffperoxidkonzentration, unterscheiden sich die erzeugten Faserstoffe und somit die Laborblätter in ihrer Farbe. Das Wasserstoffperoxid wirkt beim Aufschluss wie ein Bleichmittel und verändert deshalb die Farbe des Faserstoffes. Gemessen werden kann dies mit Hilfe des Farbortes (L\*, a\*, b\*) und ist in Tab. 11 aufgeführt.

Tab. 11: Farbort der Laborblätter Acetosolv-Faserstoffe

Probe	Farbort		
	L*	A*	B*

Acetosolv-1	78,6	3,9	23,3
Acetosolv-2	77,1	4,5	24,3
Acetosolv-3	76,7	4,7	24,2
Acetosolv-4	90,3	-1,5	7,5
Acetosolv-4- Ausgangsstoff	81,5	1,5	14,5

### *Papiermaschinenversuche*

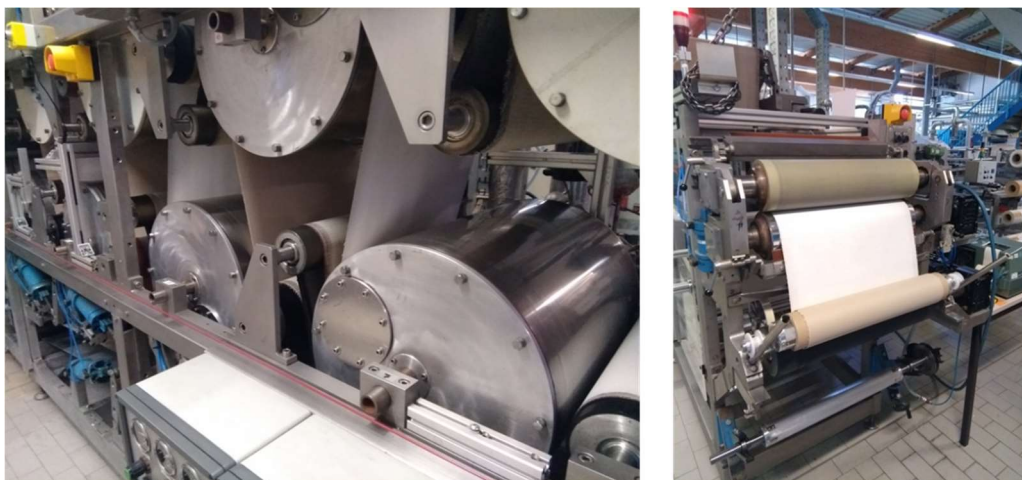
Auf der Versuchspapiermaschine im Technikum an der PTS wurden ein Wellpappenrohpaper und ein Duplexpapier erzeugt. Die dafür eingesetzten Rohstoffe sind in Tab. 3 aufgeführt und das Schema zur Herstellung auf der Papiermaschine ist in Abb. 1 dargestellt.

In Abb. 12 ist der Stoffauflauf für das Duplex- und Wellpappenrohpaper abgebildet. Es wurden 30 % des Wellenstoffes bei beiden Papiersorten durch Miscanthus-Zellstoff ersetzt.



*Abb. 12: rechts: Stoffauflauf Duplex Papier; links: Stoffauflauf Wellpappenrohpaper*

Die Ober- und Unterbahn wird vergautscht, durchläuft die Trockenpartie und wird zum Schluss über ein Glättwerk geführt und aufgerollt (Abb. 13). Das Papier wird zugeschnitten und kann auf seine physikalischen Eigenschaften geprüft werden.



*Abb. 13: Links: Trockenpartie; rechts: Glättwerk mit Aufrollung Duplex Papier*



### *Dämmstoffe*

Im Labormaßstab wurden feste Dämmstoffe (300 x 300 x 60 mm) mit einem Bindemittelanteil von 4 % PMDI (Polymeres Diphenylmethandiisocyanat) und einer Ziehlrohdichte von 110 und 160 kg/m<sup>3</sup> hergestellt. Dabei wurden unterschiedliche Sortimente von unterschiedlichen Standorten und Aufschlussgraden (MS 0,14; 0,3; 0,5 mm) verwendet. Weiterhin wurden den Dämmplatten unterschiedlicher Anteile (30, 70, 100 %) an industriell hergestellten Holzfasern (Fichte, Kiefer, Tanne) untergemischt. (Abb. 14)



*Abb. 14: Miscanthus, Dämmplatten und Fasermaterial*

## 4.4 Eigenschaften

### *Ernte, Transport, Umschlag und Lagerung*

Eine technische Trocknung entfällt, wenn die Ernte spät im Frühjahr erfolgt. Der Wassergehalt liegt dann meist < 20 %, so dass Lagerstabilität gegeben ist. Für die Weiterverarbeitung wird eine Fraktionierung empfohlen.

Durch den Einsatz von Feldhäckslern wird das geerntete Material in der Hauptfraktion auf Schnittlängen zwischen 10 bis 30 mm zerkleinert. Die Schnittlänge hängt hierbei von Anzahl der Messer, Drehzahl der Häckslertrommel und der Zuführungsgeschwindigkeit der Vorpresswalzen ab. Diese Prozessparameter sind bei allen Häckslersfabrikaten veränderbar und können demzufolge vom Anwender in bestimmten Bandbreiten eingestellt werden. Durch den ursprünglichen Einsatz von Feldhäckslern für die Maisernte wurde mit einem zusätzlich einschaltbaren Modul im Feldhäckslers (sog. CornCracker) auch Miscanthusmaterial versuchsweise aufgeschlossen. Der höhere Energieaufwand (+ 25 %) und eine Erhöhung des Feinanteils (+ 5 bis + 15 %) sind jedoch als wesentlicher Nachteil zu sehen und werden daher nicht empfohlen. Der Wassergehalt zum Erntezeitpunkt ist für alle darauffolgenden landwirtschaftlichen Prozesse bedeutend und wirkt sich im Wesentlichen auf Schüttdichte (transportrelevant) und Lagerstabilität aus. Um eine (mikro-)biologische Aktivität bei der Lagerung auszuschließen, muss der Wassergehalt unter 20...30 % gehalten werden. Alternativ kann eine technische Trocknung erfolgen, die aufgrund des hohen Energieaufwandes (bis zu 20...30 % des Heizwertes) allerdings zu vermeiden ist und unwirtschaftlich sein kann. Die Bestimmung des Wassergehaltes ist daher für den Erntebeginn entscheidend, da ansonsten starke Schwankungen von 10 ...50 % möglich sind (Abb. 16).

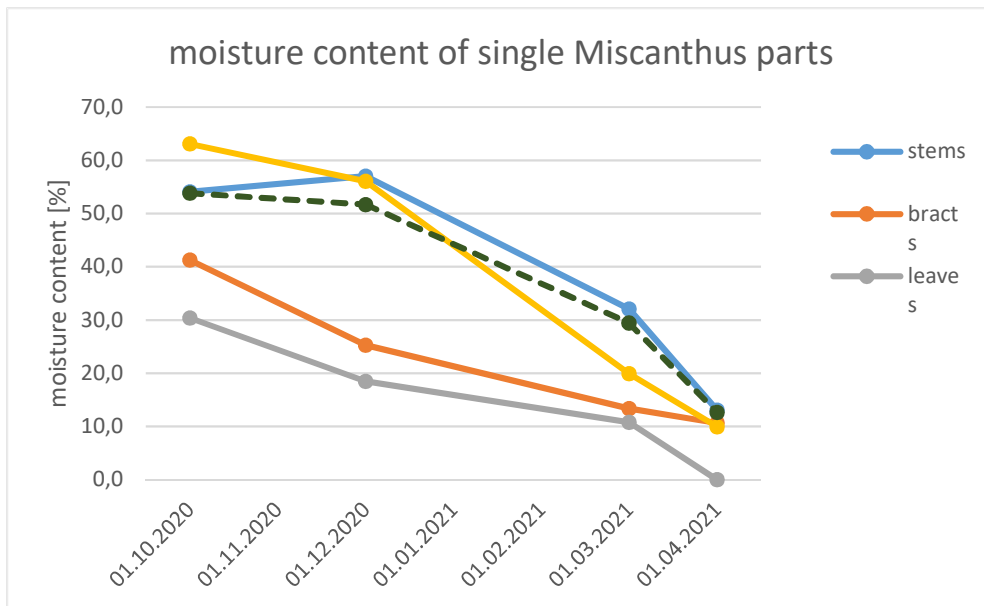


Abb. 15 Wassergehalt einzelner Pflanzenbestandteile im Erntezeitraum

### Laborblatt TMP Faserstoff

Der TMP Faserstoff 0,2 mm wurde mit einer Umdrehungszahl von 1000, 2000, 3000, 4000 und 5000 gemahlen (PFI-Mahlung). Betrachtet man die Faserlängenverteilung der gemahlene Faserstoffe kommt es erwartungsgemäß mit zunehmender Umdrehungszahl zur Faserkürzung und Erhöhung des Feinstoffanteils (Abb. 16).

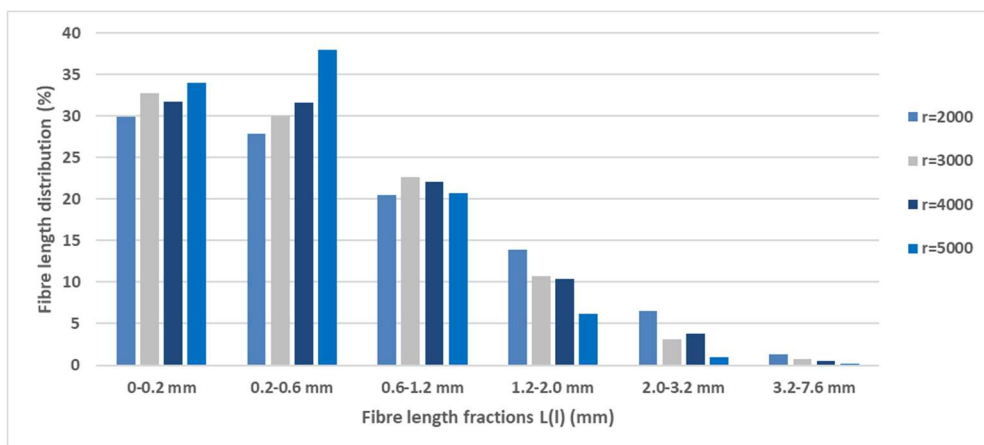


Abb. 16: Faserlängenverteilung TMP 0,2 mm nach PFI-Mahlung

### spezifisches Volumen - Laborblatt

Durch die Zugabe von TMP 0,02 mm und dem gemahlene TMP 0,2 mm in Wellenstoff wurde das spezifische Volumen der Laborblätter im Vergleich zu 100 % Wellenstoff erhöht (Abb. 17). Die Zugabe des gemahlene TMP 0,2 mm bei 4000 U steigerte das Volumen um bis zu 50 % von 1,79 cm<sup>3</sup>/g auf 2,71 cm<sup>3</sup>/g.

Miscanthus-TMP Faserstoffe wären deshalb gut geeignet diese zur Erhöhung des spezifischen Volumens wie z.B. in der Innenlage eines Karton einzusetzen.

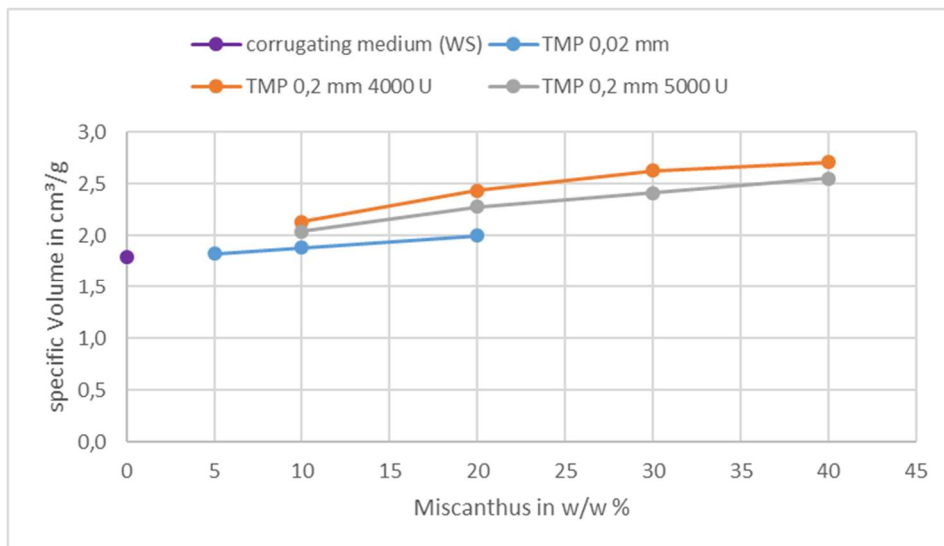


Abb. 17: Spezifisches Volumen der erzeugten Laborblätter mit TMP

### Tensile-Index - TMP Faserstoff

Der Tensile-Index (Abb. 18) nahm durch die Zugabe von mehr als 10 % TMP 0,02 mm um ca. 17 % von 34,9 Nm/g auf 28,9 Nm/g ab. Für den TMP 0,2 bei 4000 U und 5000 U ist die Senkung des Tensile-Index deutlich höher, dieser fällt von 30,9 Nm/ bzw 34,0 Nm/g um 37% bzw. 40 % ab. Der Anstieg des Tensile-Index bei Zumischung von 5 % des TMP 0,02 mm und bei 10 % des TMP 0,2 mm ist auf Grund der großen Standardabweichung nicht signifikant. Die Abnahme der Zugfestigkeit der Papiere mit steigender TMP-Zugabe ist auf den hohen Anteil des vorhandenen Lignins (hydrophob) im TMP zurückzuführen (hohe Steifigkeit -> geringere Festigkeit). Dadurch können zwischen der Cellulose weniger Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet werden und die Zugfestigkeit sinkt ab.

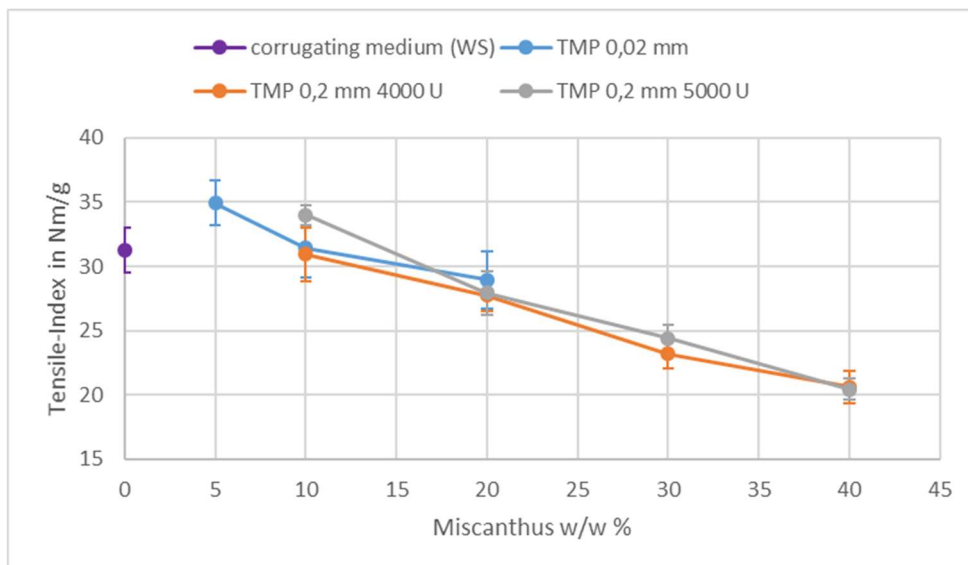


Abb. 18: Tensile-Index der erzeugten Laborblätter mit TMP

### SCT (Short Crush Test) - TMP Faserstoff

Der SCT-Wert beschreibt den Stauchwiderstand einer Papierprobe, der die Druckfestigkeit von Papier in einer Ebene angibt. Der Streifenstauchwiderstand (SCT) entspricht der auf die Probenbreite (15 mm) bezogenen maximalen Stauchbruchkraft, welche die Probe einer

festgelegten Stauchung in der Probenebene entgegengesetzt. Nach [25] unterscheidet man zwischen leichtgewichtigen Wellenstoffen (Flächenmasse von 80 g/m<sup>2</sup>) und höhergewichtigen Wellenstoffen (Flächenmasse > 80 g/m<sup>2</sup>).

Die Laborblätter der eingesetzten TMP Faserstoffe liegen im Bereich wie leichtgewichtige Wellenstoffe. Bei einer Zugabe von 5 % und 10 % des TMP ist ein Anstieg des SCT Wertes um bis zu 11 % zu verzeichnen. Mit steigendem Anteil an Miscanthus sinkt der SCT um ca. 80 % vom Ausgangswert des Wellenstoffes wieder ab. Alle TMP Mischungen lagen über dem angegebenen minimalen SCT-Index von 1,15 kN/m für leichtgewichtige Wellenstoffe.

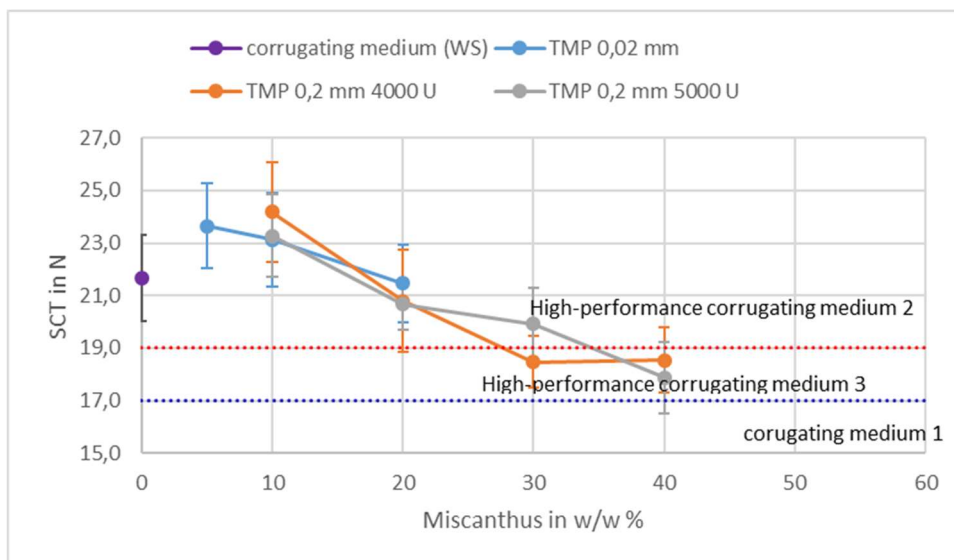


Abb. 19: SCT der Laborblätter aus TMP-Faserstoff mit Einteilung leichtgewichtiger und hochgewichtiger Wellenstoff [12]

Auch die Anforderungen für höhergewichtige Wellenstoffe konnten die hergestellten Papiere aus Miscanthus-TMP einhalten. Der eingesetzte Wellenstoff und die Mischungen mit 5 % bis 20 % Miscanthus-TMP 0,02 mm liegen über den Werten von 19 N [25] in der Kategorie für Hochleistungs-Wellenstoffe 2 (Abb. 19). Bei dem Vergleich muss jedoch beachtet werden, dass es sich um Werte von erzeugten Laborblättern und technischen Papieren handelt. Laborblätter weisen keine Maschinenaufrichtung auf und können sich bei Ausrichtung anders verhalten.

#### Berst-Index - TMP Faserstoff

Bei der Berstfestigkeit wird die Probe durch einen sich aufwölbenden Gummiball zum Bersten gebracht, das heißt, die Berstfestigkeit P entspricht dem größten, gleichmäßig verteilt, senkrecht auf die Papieroberfläche aufgewandten Druck, welcher zum Einreißen der Papierfläche führt. Der Berst-Index errechnet sich indem die Berstfestigkeit durch die Flächenmasse geteilt wird.

Mit der steigenden Zugabe an Miscanthus-TMP nimmt der Berst-Index analog dem Tensile-Index ab. Die unterschiedlich aufbereiteten TMP Faserstoffe verhalten sich ähnlich (Abb. 20). Mit einer Zugabe von 40 % Miscanthus sinkt der Berst-Index bis auf die Hälfte des Wellenstoffes ab. Bei einer Zugabe von bis zu 10 % TMP wurde der Berst-Index max. um 5 % reduziert. Die Abnahme der Festigkeit ist hier, wie beim Tensile-Index erläutert, auf den hohen Anteil an Lignin zurückzuführen. Das Fasergefüge kann weniger Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden und die Festigkeiten werden reduziert.

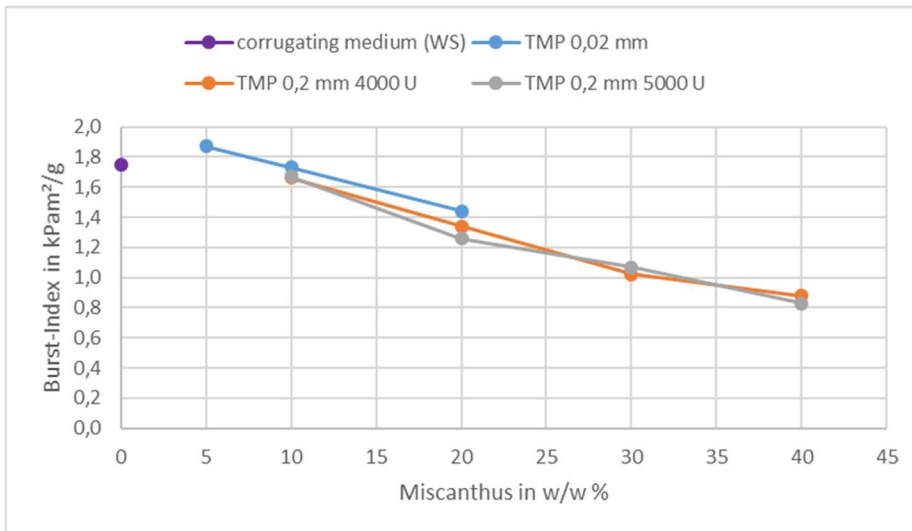


Abb. 20: Berst-Index der Laborblätter aus TMP-Faserstoff

### Biegesteifigkeit, Papier - TMP Faserstoff

Die Biegesteifigkeit (Papier) gibt an, wie biegesteif ein Material gegen eine darauf wirkende Kraft und Auslenkung (Biegewinkel) ist. Mit dem Begriff der Biegesteifigkeit wird ein Material bezüglich seiner Steifigkeit und damit hinsichtlich seiner Eignung zur Weiterverarbeitung (z.B. Herstellung von Verpackungen, Weiterverarbeitung in Druckmaschinen etc.) beschrieben.

In der Abb. 21 ist die Biegesteifigkeit der erzeugten Laborblätter aus einer Mischung an Wellenstoff und TMP dargestellt. Tendenziell wird erkennbar, dass mit steigendem Anteil an TMP die Biegesteifigkeit zunimmt. Durch den hohen Anteil an Lignin im TMP, welches eine gute Steifigkeit besitzt, wird die Biegesteifigkeit erhöht bzw. bleibt gleich. Die größte Steigerung erzielte der TMP 0,02 mm bei einer Zugabe von 20% TMP zum Wellenstoff von 0,40 Nmm auf 0,56 Nmm.

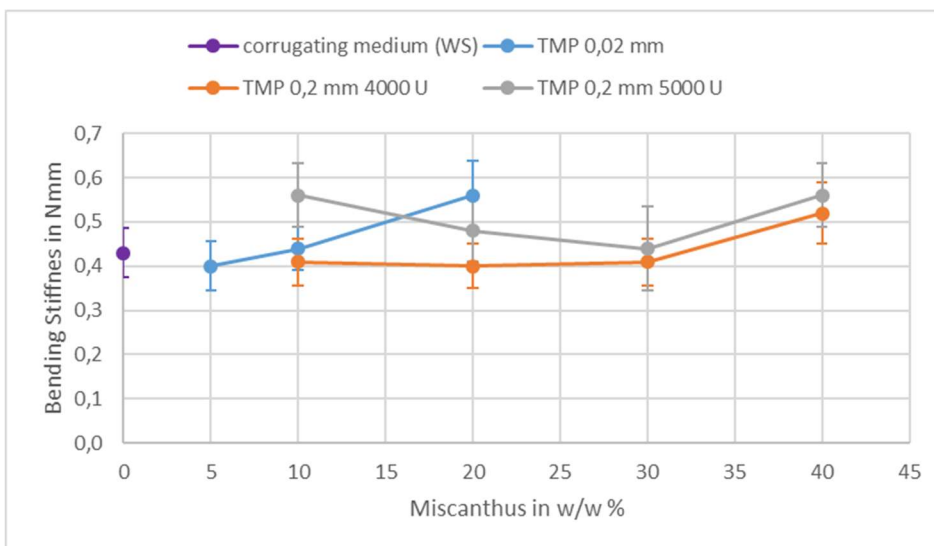


Abb. 21: Biegesteifigkeit der Laborblätter aus TMP-Faserstoff

### Nullreißlänge - TMP Faserstoff

Bei der Messung der Nullreißlänge sind die Klemmen so nah angeordnet, dass zum Zeitpunkt des Bruchversagens jede Faser in der Bruchzone von beiden Klemmen fixiert ist. Deshalb kann man über die gemessene Nullbruchkraft unmittelbar auf die Bruchkraft der Einzelfasern in Längsrichtung zurückschließen. Achtung: Die gemessene Nullbruchkraft und Bruchkraft der Einzelfaser sind aber nicht identisch.

Die Nullreißlänge von Zellstoffen ist um bis zum dreifachen Wert höher als die Nullreißlänge der Laborblätter mit TMP (Abb. 22). Alle mit TMP erzeugten Laborblätter führen zu einer Steigerung der Nullreißlänge um bis zu 27% auf max. 3.46 kN/m. Mit Erhöhung des TMP Anteils (max. 40 %) sinkt die Nullreißlänge um 26 % auf wieder 2,49 kN/m ab. Wie schon beim Tensile-Index erklärt beruht dies auf dem hohen Anteil an Ligin der im TMP vorliegt und somit eine steife weniger feste Faser vorliegt. Der Festigkeitsverlust ist bei der Nullreißlänge von 27 % deutlich niedriger als beim Tensile mit 40 %.

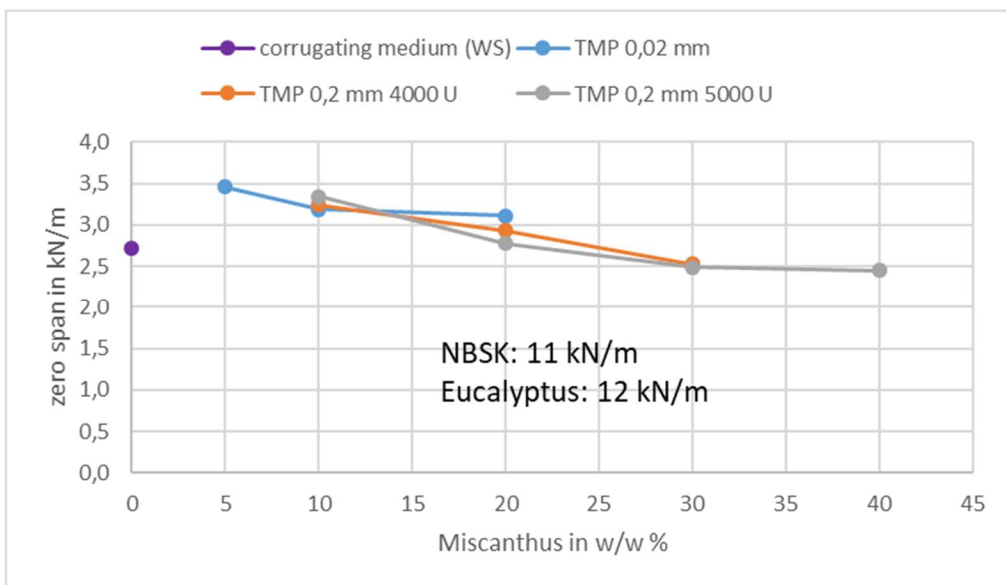
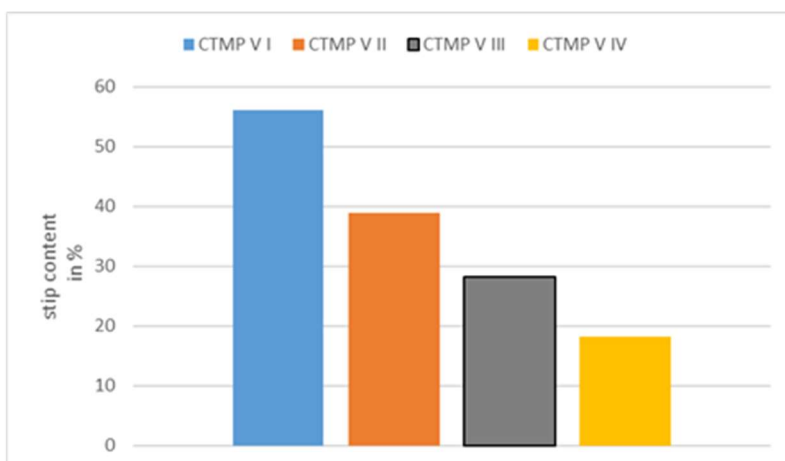


Abb. 22: Nullreißlänge der Laborblätter aus TMP

### Stippengehalt – CTMP - Faserstoffe

Nach Bestimmung des Stippengehaltes wird deutlich, dass die CTMP-Faserstoffe einen Anteil an Stippen zwischen 20 bis 56 % aufweisen. Für die Bildung von Laborblättern ist es deshalb notwendig, diese mit der PFI-Mühle zu mahlen. (Abb. 23)



**Morphologische Eigenschaften – CTMP - Faserstoffe**

Die morphologischen Kenngrößen können durch den hohen Anteil an Stippen für die Muster CTMP VIII und CTMP IV nicht im Valmet-Fraktionator untersucht werden. Die CTMP-Faserstoffe V I und V II konnten vermessen werden und sind im Vergleich zum TMP, NBSK und Eukalyptus in Tab. 8 dargestellt. Anhand der gemessenen Daten wird deutlich, dass die erzeugten CTMP-Faserstoffe längere Faserlängen als der TMP aufweisen. Der Feinstoffanteil der CTMPs ist jedoch immer noch deutlich höher als der der Zellstoffe.

Tab. 12: Morphologische Kenngrößen der CTMP-Faserstoffe im Vergleich zu TMP, NBSK und Eukalyptus

Parameter	CTMP V I	CTMP VII	TMP 0,02 mm	NBSK (Kiefer/Fichte)	Eukalyptus
L(n) c in mm	0,21	0,26	0,20	0,98	0,56
L(l) c in mm	0,58	0,67	0,47	2,01	0,85
L(w) c in mm	1,35	1,28	0,95	2,65	1,08
Feinstoffe (B) in %	24,22	35,38	19,83	8,60	15,53
Faserdicke in Åµm	21,21	16,55	18,84	19,53	13,14
Fibrillierung in %	1,62	1,64	2,32	0,90	1,84
Optische Coarseness in mg/m	0,176	0,109	0,14	0,13	0,06

**PFI-Mahlung - CTMP – Faserstoffe**

Mit den CTMP-Faserstoffen V I und V II konnten Laborblätter erzeugt werden aber die Fasergefüge der Laborblätter sind durch den hohen vorhandenen Anteil an Stippen sehr inhomogen. Deshalb wurde der CTMP V III mit einer Umdrehungszahl von 2000, 4000 und 6000 in der PFI-Mühle gemahlen. (Abb. 24, Abb. 25)

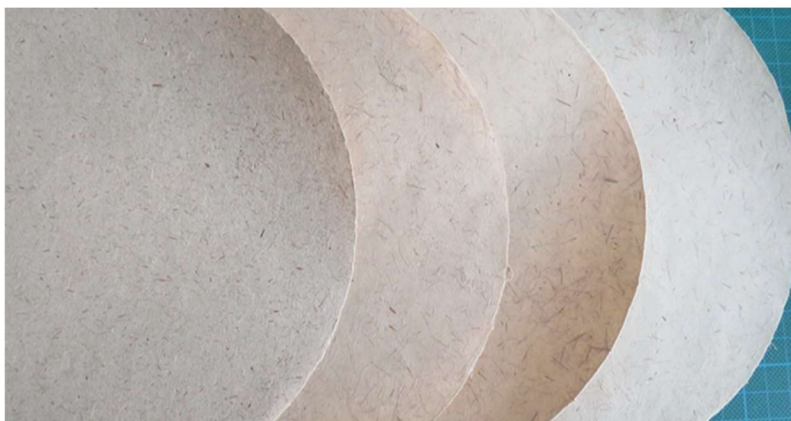


Abb. 24: Laborblätter CTMP von links nach rechts: CTMP V I bis V IV





Abb. 25: Laborblätter CTMP V III PFI Mühle von links nach rechts: ungemahlen, 2000 U, 4000 U und 6000 U

### Morphologische Eigenschaften, CTMP – Faserstoffe. PFI-Mahlung

In der Faserlängenverteilung (Abb. 26) wird deutlich, dass es bei den gemahlten Faserstoffen nur geringfügig mit zunehmender Umdrehungszahl zur Faserkürzung und Erhöhung des Feinstoffanteils kommt. Durch die Mahlung des CTMP kommt es zu einer Erhöhung der Fibrillierung der Fasern (Tab. 13).

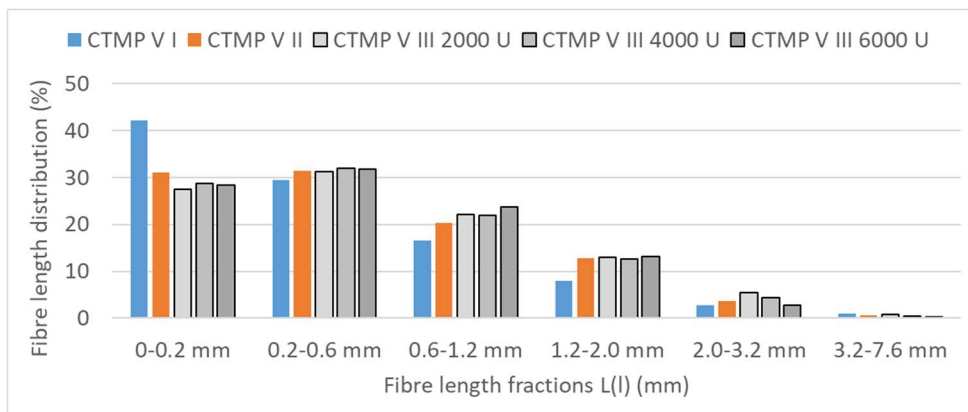


Abb. 26: Faserlängenverteilung CTMP

Tab. 13: Fibrillierung der CTMP-Faserstoffe

Bezeichnung	Fibrillierung in %
CTMP V I	1,62
CTMP V II	1,64
CTMP V III 2000 U	1,97
CTMP V III 4000 U	2,20
CTMP V III 6000 U	2,26

### WRV - CTMP – Faserstoffe

Auf Grund des hohen Feinstoffgehaltes würde man erwarten, dass das WRV sehr hoch ist. Wie in Abb. 27 dargestellt, ist dies jedoch nicht der Fall. Durch den hohen Anteil an Stippen (56 %) ist der WRV des CTMP V I deutlich niedriger als bei den anderen CTMPs. Durch die PFI-Mahlung steigt der WRV des CTMP V III von 1,47 g/g bis 2,39 g/g beim CTMP V III 6000



U um ca. 60 % an. Durch die Mahlung wird die Fibrillierung der Fasern (Tab. 13) erhöht und es steigt somit die spezifische Oberfläche an und damit das WRV und der SR-Wert der Faserstoffe.

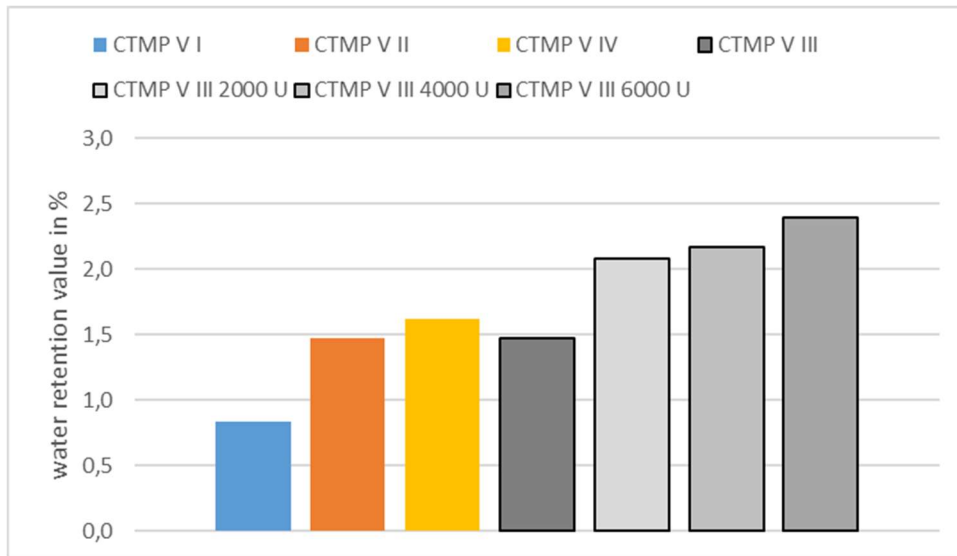


Abb. 27: WRV der CTMP-Proben

#### SR-Wert - CTMP – Faserstoffe

Ein ähnliches Bild wie beim WRV zeigt sich beim Entwässerungswiderstand SR (Abb. 28). Durch die PFI-Mahlung steigt der SR-Wert von 27 ungemahlen auf einen SR-Wert von 74 bei 6000 Umdrehungen an.

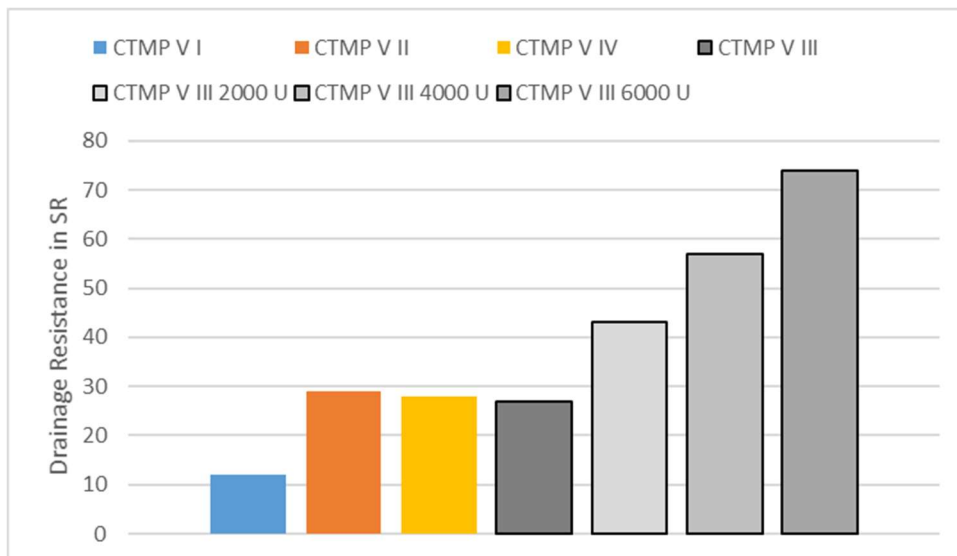


Abb. 28: Entwässerungswiderstand der CTMP-Faserstoffe

#### Chemische Eigenschaften - CTMP – Faserstoffe

In der Tab. 14 sind die chemischen Eigenschaften des CTMP V III aufgeführt. Die bestimmten chemischen Eigenschaften liegen alle in dem Bereich wie beim TMP ermittelt. Auch bei der CTMP-Herstellung wird wenig Lignin herausgelöst (Ligningehalt 19,2 %, TMP 23,0 %).

Tab. 14: Chemische Eigenschaften des CTMP V III

Parameter	CTMP V III
Grenzviskosität in ml/g	-
Lignin-Gehalt in %	19,2
Asche 525 °C in %	< 1
Oberflächenladung in µeg/g	58,2
Gesamtladung in mmol/kg	- 98,3

### Spezifische Volumen

Das spezifische Volumen berechnet sich aus der gemessenen Dicke und flächenbezogenen Masse eines Papiers. Werden Papiere aus groben steifen Fasern erzeugt werden größere Schwankungen in der Blattdicke und der Flächenmasse eines Papierblattes gemessen. Vor allem durch die Dickenunterschiede im Papierblatt kommt es an diesen Stellen zum Bruch des Fasergefüges wie z.B. bei der Messung einer Zug- oder Durchreißfestigkeit. Deshalb ist es notwendig, bei der Herstellung von Papieren, ein möglichst gleichmäßige das Fasergefüge zu erreichen. Dies kann z.B. durch Mahlung erreicht werden und ist in der Abb. 29 dargestellt. Das spezifische Volumen sinkt mit der Vereinheitlichung des Fasergefüges durch die Mahlung ab.

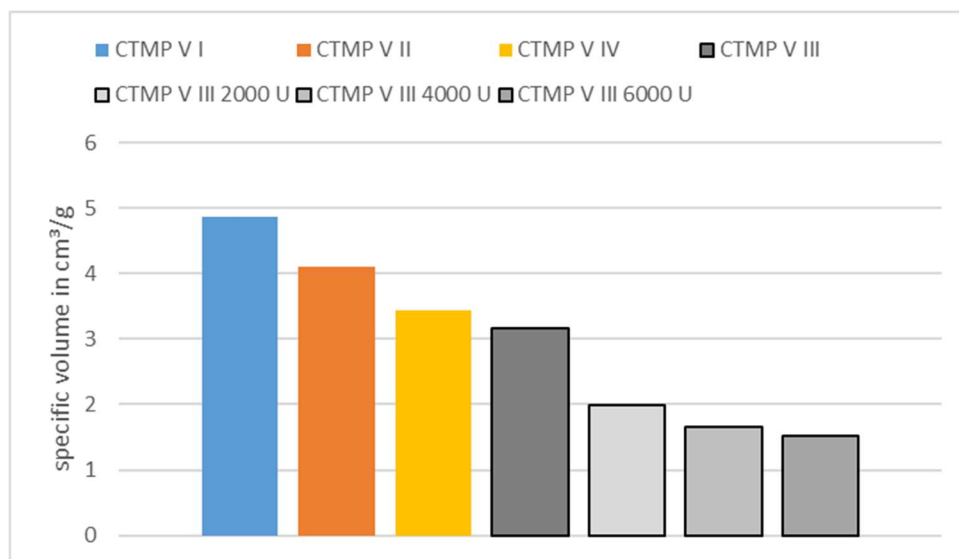


Abb. 29. Spezifisches Volumen der CTMP-Faserstoffe

### Tensile-Index - CTMP – Faserstoffe

Da sich die CTMP-Faserstoffe ungemahlen nur geringfügig unterscheiden, werden in den nachfolgenden Eigenschaften nur noch die CTMP V III-Faserstoffe dargestellt.

In Abb. 30 ist der Tensile-Index dargestellt. Der Tensile-Index der ungemahlenen CTMP-Faserstoffe ist sehr gering bzw. von den erzeugten Laborblättern mit dem CTMP V I war eine Messung gar nicht möglich, da an den Stippen des Blattes dieses sofort gerissen ist.

Durch die PFI-Mahlung des CTMP V III konnte der Tensile-Index von 25,8 Nm/g auf bis zu 70,4 Nm/g erhöht werden. Diese Werte liegen in dem Bereich eines gemahlene NBSK von 2000 U bei ca. 74 Nm/g. Wie die Laubholz Zellstoffe kann der gemahlene CTMP den Tensile Index im ähnlichen Bereich entwickeln.

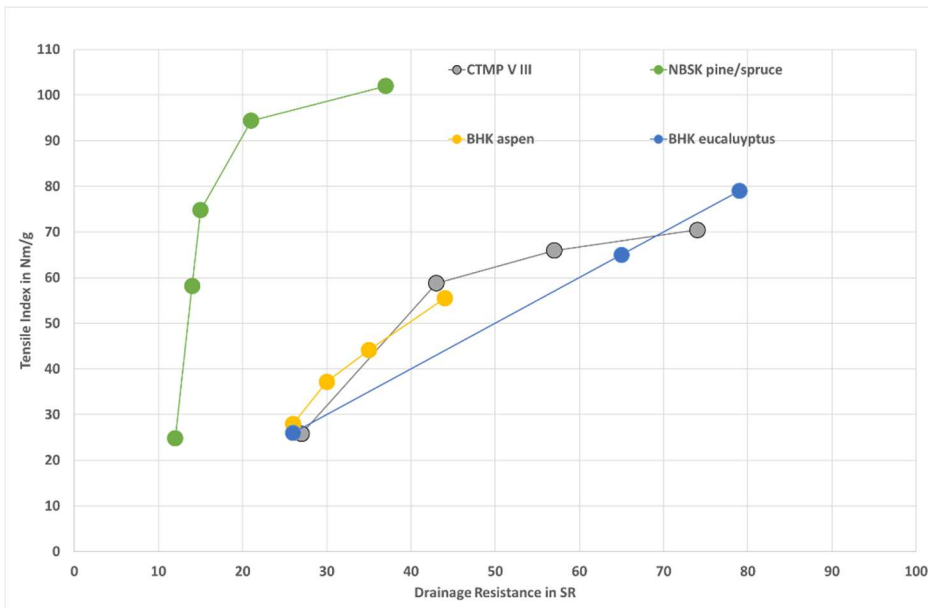


Abb. 30: Tensile-Index der CTMP-Faserstoffe

Der Tear-Index ist die dynamische Festigkeit von Papieren und gibt an welche Kraft die Papiere beim Durchreißen entgegenseetzen. In der Abb. 31 ist der Tear-Index der CTMP-Faserstoffe dargestellt. Der Tear-Index des CTMP sinkt durch die Mahlung von 6,6 mNm<sup>2</sup>/g auf 4,5 mNm<sup>2</sup>/g ab.

Der Tear-Index von einem NBSK ist dreimal so hoch wie der vom CTMP und sinkt durch die Mahlung von 19,3 mNm<sup>2</sup>/g auf 11,1 mNm<sup>2</sup>/g ab, d.h. die Einzelfaserfestigkeit sinkt durch die Mahlung. Bei den Laubholz Zellstoffen (Aspe und Eukalyptus) ist kein Abfall des Tear-Index zu beobachten.

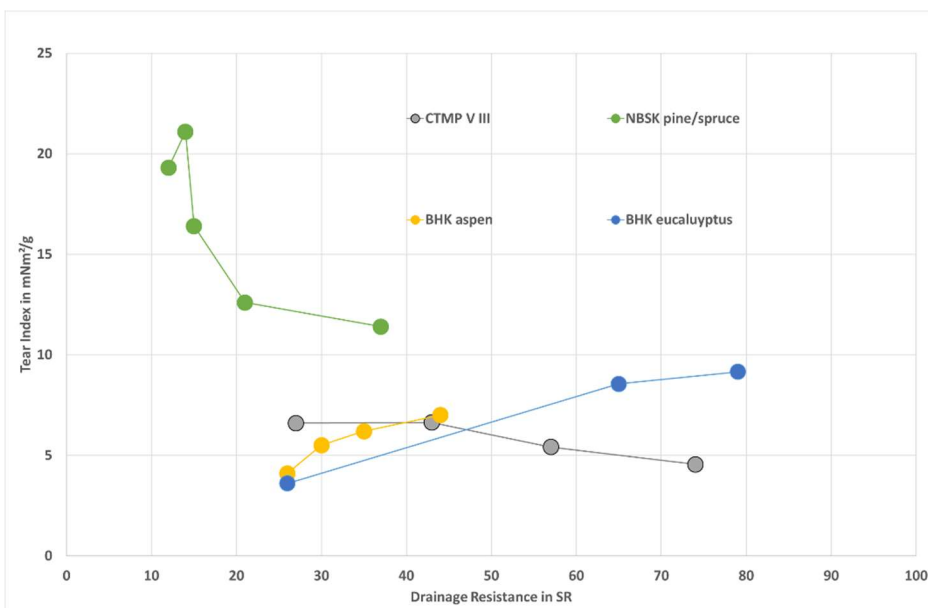


Abb. 31. Tear-Index der CTMP-Faserstoffe

### SCT (Short Crush Test) - CTMP-Faserstoffe

Der Stauchwiderstand SCT wird, wie schon in 7.1.3 erwähnt, zwischen leichtgewichtigen (Flächenmasse von 80 g/m<sup>2</sup>) und höhergewichtigen Wellenstoffen (Flächenmasse > 80 g/m<sup>2</sup>) unterschieden.

Die Laborblätter aus CTMP liegen im Bereich wie leichtgewichtige Wellenstoffe mit einem SCT-Wert von 1,15 kN/m. Auch die Werte von höhergewichtigen Wellenstoffen von 17 bis 19 N erreichen die CTMP-Faserstoffe V III und V IV. Deutlich höher liegen dann die CTMP-Werte, die in der PFI Mühle gemahlen wurden. Diese sind doppelt so hoch wie die SCT-Werte der TMP-Faserstoffe (siehe Abb. 32).

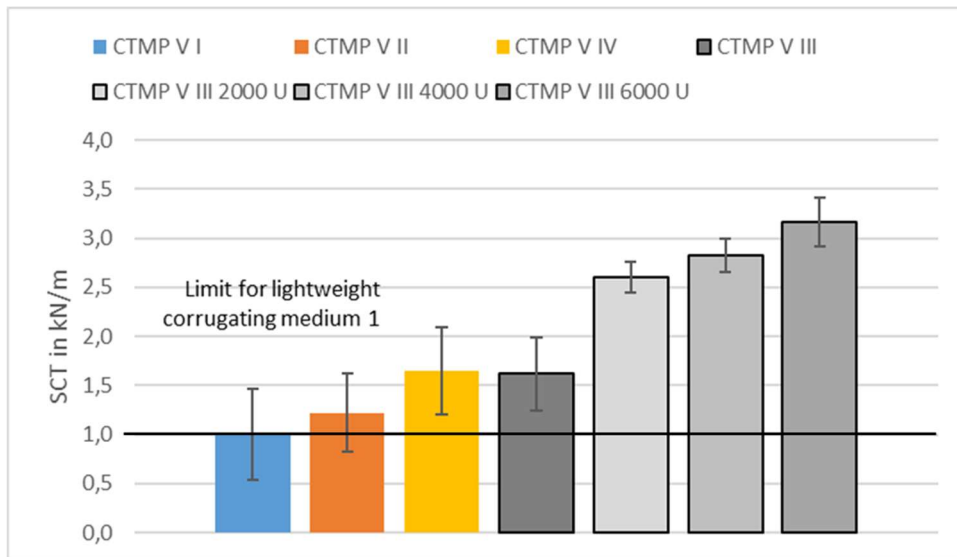


Abb. 32: SCT-Werte der CTMP-Faserstoffe

### Berst-Index - CTMP-Faserstoffe

Die hergestellten Laborblätter aus CTMP (Abb. 33) weisen ähnliche Berst-Indizes, wie die mit TMP hergestellten Laborblätter zwischen 0,8 kPam<sup>2</sup>/g bis 1,8 kPam<sup>2</sup>/g (Abb. 20) auf. Die gemahlene CTMP V III weisen ähnliche Werte wie die Laubholz Zellstoffe auf. Erwartungsgemäß weist der NBSK deutlich höhere Werte auf, da dieser höheren Faserlängen als der Miscanthus und die BHK Zellstoffe mitbringt. Die so erzeugten Laborblätter sollten auf Grund ihrer hohen Festigkeit, SCT und Berst-Index gut für Verpackungspapiere geeignet sein.

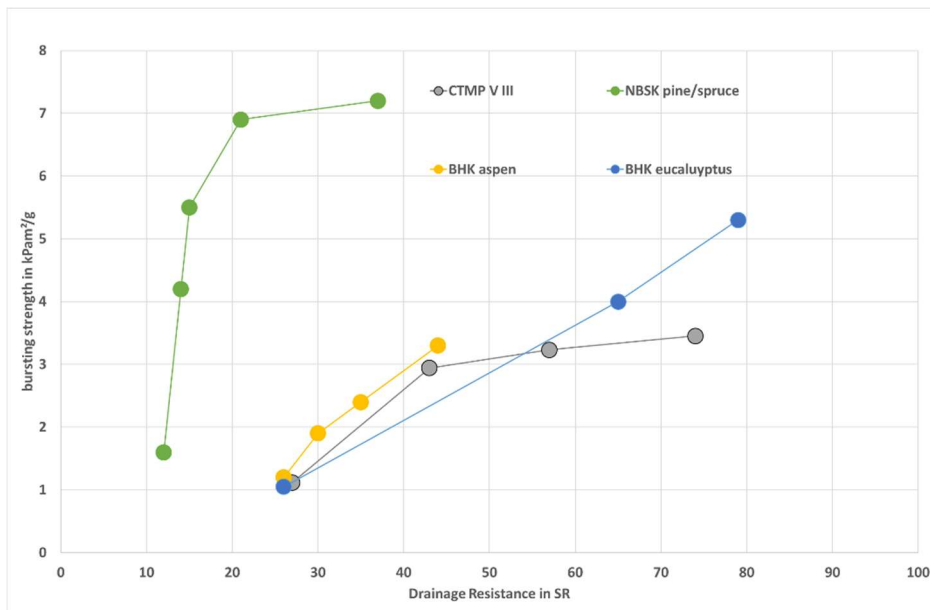


Abb. 33: Berstindex der CTMP-Faserstoffe

### Biegesteifigkeit - CTMP-Faserstoffe

Die Biegesteifigkeit (Laborblatt) gibt, an, wie biegesteif ein Material gegen eine darauf wirkende Kraft und Auslenkung (Biegewinkel) ist. Mit dem Begriff der Biegesteifigkeit wird ein Material bezüglich seiner Steifigkeit und damit hinsichtlich seiner Eignung zur Weiterverarbeitung z.B. der Herstellung von Verpackungen, Weiterverarbeitung in Druckmaschinen usw. beschrieben.

Die Werte der Biegesteifigkeit von den erzeugten Laborblättern mit CTMP (Abb. 34) und TMP (Abb. 21) liegen zwischen 0,9 Nmm und 0,4 Nmm. Die Werte der Biegesteifigkeit sind relativ niedrig. Ein valider Vergleich mit anderen Papier oder Karton ist schwierig, da die Materialzusammensetzung der Papiere eine große Rolle spielen.

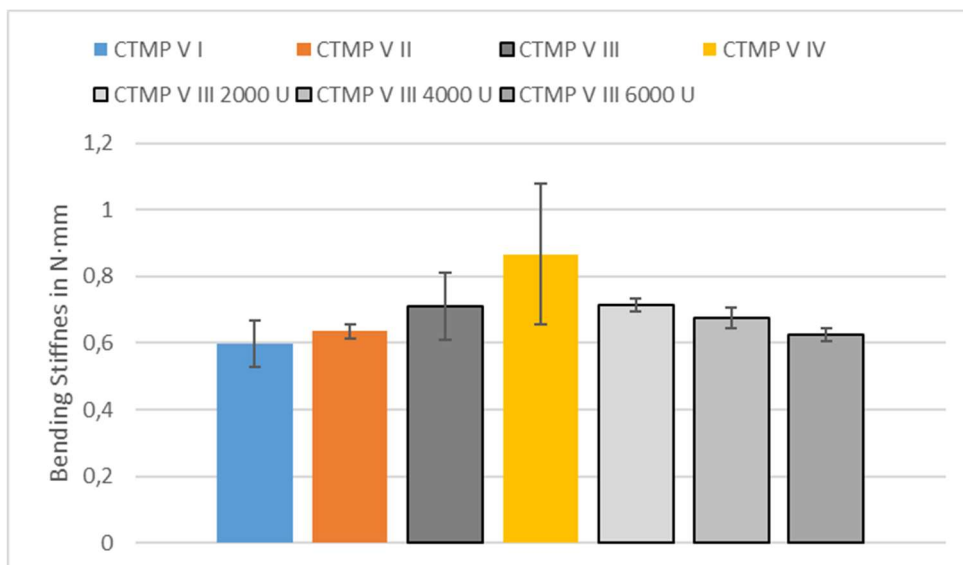


Abb. 34: Biegesteifigkeit der CTMP-Faserstoffe

### **Nullreißlänge - CTMP-Faserstoffe**

Die Nullreißlänge des gemahlene CTMP V III (6,4 kN/m) ist deutlich höher als die der mit TMP (max. 3,5 kN/m) erzeugten Laborblätter (Abb. 35). Zellstoffe liegen bei ca. 10 kN/m.

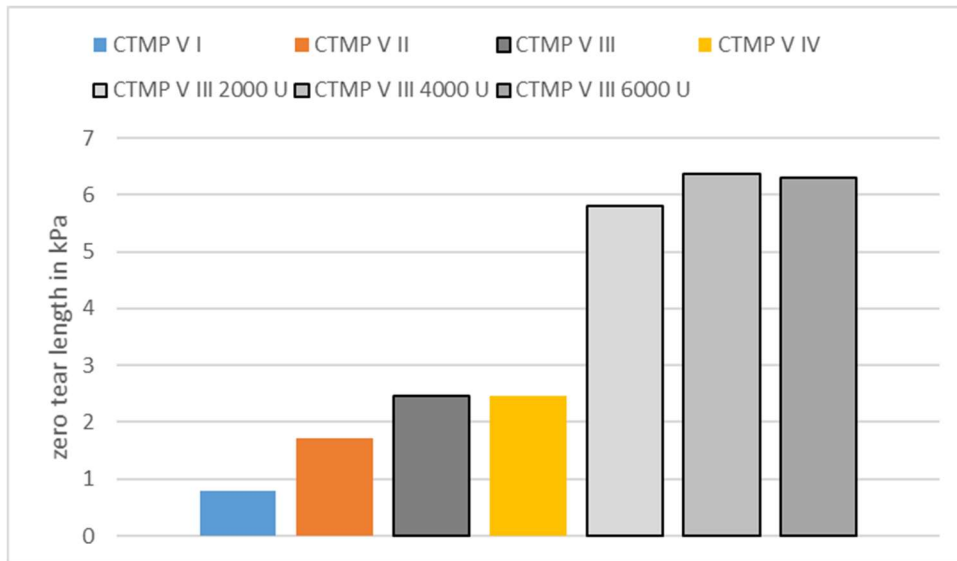


Abb. 35: Nullreißlänge der CTMP-Faserstoffe

### **Weißgrad - CTMP-Faserstoffe**

Erzeugungsbedingt liegt der Weißgrad für CTMP sehr niedrig (Abb. 36). Für den Einsatz in Verpackungspapieren ist dies jedoch vollkommen ausreichend.

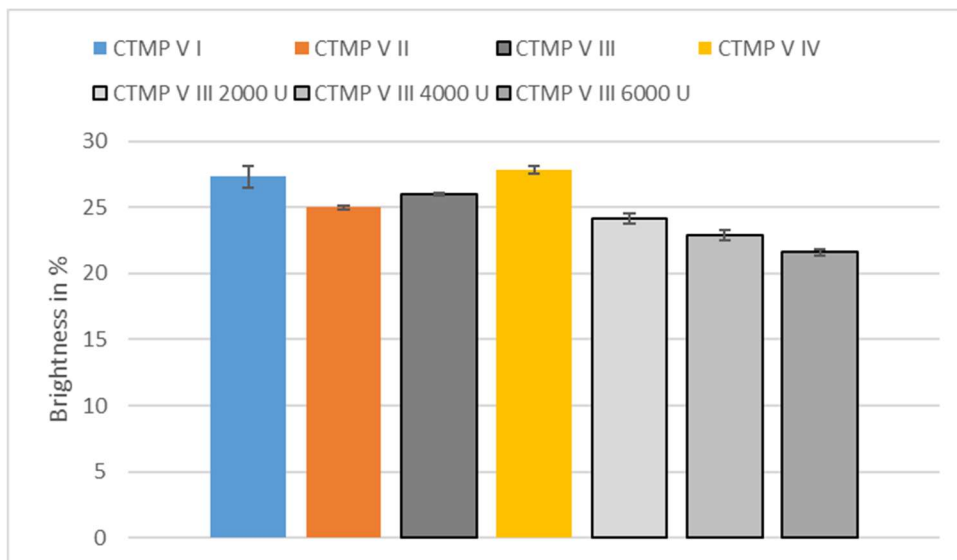


Abb. 36: Weißgrad der CTMP-Faserstoffe

### **Ausbeute - Acetosolv-Aufschluss**

Um die Eignung von Miscanthus in einem Zellstoffaufschluss zu bewerten wurde der Miscanthus nach dem Acetosolv-Verfahren im Labormaßstab aufgeschlossen.

Der Aufschluss nach dem Acetosolv-Verfahren mit Miscanthus-TMP 0,2 mm und dem Miscanthus Ausgangsstoff, waren erfolversprechend. Die Ausbeuten der je nach Versuchsbedingung (Tab. 1) hergestellten Faserstoffe sind in Tab. 15 aufgeführt. Acetosolv-

1 lieferte eine Ausbeute von 61 %. Die milderen Aufschlussbedingungen von Acetosolv-2 und Acetosolv-3 führten zu höheren Ausbeuten von fast 70 %. Die erhöhte Essigsäure- und Wasserstoffperoxidkonzentration bei Acetosolv-4 hatte zur Folge, dass die Ausbeute nur bei 53 % lag. Vermutlich werden dadurch mehr Hemicellulosen und Anteile an Cellulose herausgelöst. Die Ausbeute der Acetosolv Aufschlüsse ist mit anderen chemischen Aufschlussverfahren für die Zellstoffherstellung wie z.B. dem Sulfat- oder Sulfitverfahren vergleichbar (50% – 55 %).

#### *Chemische Eigenschaften - Acetosolv-Aufschluss*

Die chemischen Eigenschaften der Acetosolv-Faserstoffe sind in Tab. 15 im Vergleich mit einem NBSK und Eukalyptus dargestellt.

Die Grenzviskosität der Acetosolv-Faserstoffe ist deutlich niedriger als der NBSK- und des Eukalyptus-Zellstoffes, d.h. die Faserstoffe besitzen deutlich kürzere Celluloseketten und sollten deutlich geringere Festigkeiten ausbilden.

Die Delignifizierung des Faserstoffes ist von den gewählten Aufschlussparametern, wie der Zugabemenge der eingesetzten Chemikalien und der Kochzeit, abhängig. Acetosolv-1 wies einen Ligningehalt von 8,0 % auf. Die Verringerung der Kochzeit bei Acetosolv-2 und die Verringerung der Essigsäure-konzentration bei Acetosolv-3 führten zu einer schlechteren Entfernung des Lignins. Durch die Erhöhung des Zugabemenge an Essigsäure und Wasserstoffperoxid bei Acetosolv-4 erfolgte die stärkste Delignifizierung bis zu einem Ligninanteil von 1,4 %. Großtechnisch hergestellte Zellstoffe weisen ähnliche Größenordnungen auf.

Die Ladungseigenschaften der Acetosolv-Faserstoffe sind deutlich höher als die der TMP-Faserstoffe, des NBSK und dem Eukalyptus. Die höchste Oberflächenladung wiesen Acetosolv-1 und Acetosolv-4 mit 65,2 µeq/g auf. Die Acetosolv-Faserstoffe erreichten das zwei- bis deifache der Oberflächenladung des NBSK und Eukalyptus. In der Gesamtladung wird der Unterschied noch größer. Der Acetosolv-1 weist die größte Gesamtladung von 210,8 mmol/kg auf. Die hohe Gesamtladung ist auf die Acetylierung der Fasern zurückzuführen. Durch die hohe Ladung sollten die Faserstoffe sehr gut in der Lage sein, Additive bei der Papierherstellung an die Fasern zu adsorbieren.

Tab. 15: Chemische Eigenschaften der Acetosolv-Faserstoffe im Vergleich zu NBSK und Eukalyptus

<b>Parameter</b>	<b>Aceto- solv 1</b>	<b>Aceto- solv 2</b>	<b>Aceto- solv 3</b>	<b>Aceto- solv 4</b>	<b>NBSK (Fichte/Kiefer)</b>	<b>Euka- lyptus</b>
Ausbeute in %	61,4	68,7	67,5	52,5	-	-
Grenzviskosität in ml/g	263	263	208	317	883	790
Lignin-Gehalt in %	8,0	13,2	15,9	1,4	<1	<1
Oberflächenladung in µeq/g	65,2	59,3	43,7	65,2	22,7	27,9
Gesamtladung in mmol/kg	-210,8	-204,4	-191,6	-104,7	-40,4	-65,2

#### *Stippengehalt - Acetosolv-Aufschluss*

Nach dem Acetosolv-Aufschluss enthielten bis auf den Acetosolv 4 noch alle Faserstoffe Stippen. Deshalb wurde von den Faserstoffen der Stippengehalt bestimmt. Wie in Abb. 37



ersichtlich, spielt die Rolle des Aufschlusses und der Aufschlussbedingungen eine entscheidende Rolle. Vermutlich stammen die Stippen in den Faserstoffen aus dem Rindengewebe der Stängel.

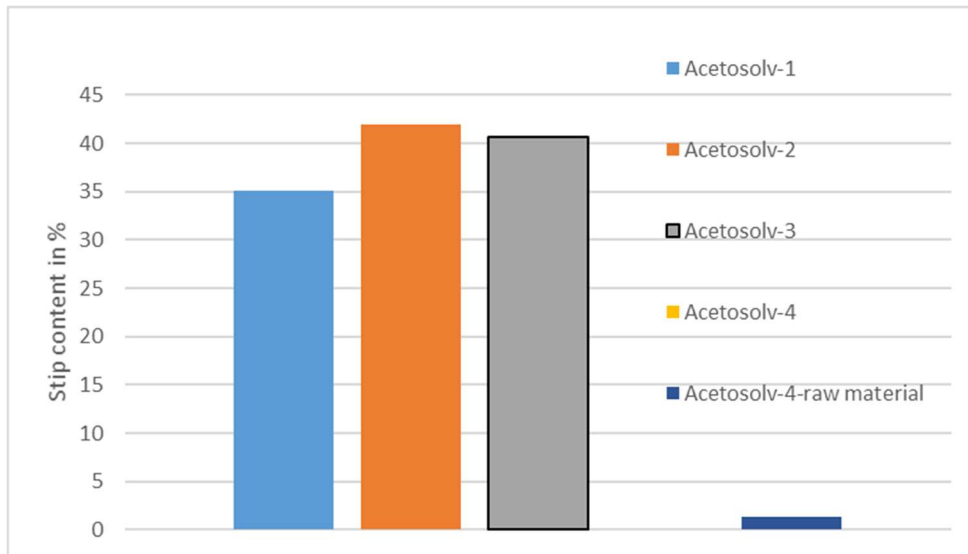


Abb. 37: Stippengehalt der Acetosolv-Faserstoffe

#### Morphologische Kenngrößen - Acetosolv-Aufschluss

Die morphologischen Kenngrößen der Acetosolv-Faserstoffe, des NBSK und Eukalyptus sind in Tab. 16 aufgeführt. Daraus wird ersichtlich, dass die Faserlängen der Acetosolv-Stoffe in einem ähnlichen Bereich wie die der Eukalyptus liegen. Die Anteile an Feinstoff sind natürlich deutlich höher als die der Holzzellstoffe, was auf das Aufschlussverfahren zurückzuführen ist. Durch die Variation der Aufschlussbedingungen ändert sich entsprechend die Faserwanddicke und die Coarseness. Mit Erhöhung der Kochzeit bzw. der Essigsäurekonzentration bei Acetosolv-1 (A-1) sinkt die Faserwandstärke auf 16,4 µm. Eine weitere Erhöhung der Konzentration der Aufschlusschemikalien bei Acetosolv-4 (A-4) führte zu einer Reduzierung auf 14,4 µm.

Tab. 16: Morphologische Kenngrößen der Acetosolv-Faserstoffe im Vergleich zu NBSK und Eukalyptus

Parameter	A-1	A-2	A-3	A-4	A-4-A	NBSK	Euka
WRV in g/g	1,69	1,55	1,52	1,97	1,90	1,05	
L(n) c in mm	0,29	0,23	0,26	0,33	0,27	0,98	0,56
L(l) c in mm	0,83	0,68	0,77	0,80	0,73	2,01	0,85
L(w) c in mm	1,51	1,48	1,62	1,40	1,42	2,65	1,08
Feinstoffe (A) in %	36,47	43,04	38,85	31,46	37,42	8,60	15,53
Faserdicke in µm	16,4	20,6	20,1	14,4	14,6	19,53	13,14
Fibrillierung in %	1,83	1,36	1,36	2,93	3,43	0,90	1,84

optische Coarseness in mg/m	0,11	0,17	0,16	0,07	0,08	0,127	0,060
-----------------------------	------	------	------	------	------	-------	-------

Der hohe Anteil an Feinstoff spiegelt sich dann auch in den Faserlängen-fractionen der Acetosolv-Faserstoffe wider. Aufgrund des hohen Anteils an Feinstoffen sind die WRV-Werte der Acetosolv-Faserstoffe auch deutlich höher als beim NBSK und Eukalyptus

#### *Spezifisches Volumen - Laborblatt Acetosolv Faserstoff*

Wie schon im Vorfeld erläutert, ist das spezifische Volumen stark von groben dickwandigen Fasern und dementsprechend vom Stippengehalt (siehe Abb. 38) abhängig. In der Abb. 40 wird deutlich, dass durch die Aufschlussbedingungen der Anteil an Stippen beeinflusst werden kann. Deshalb ist das spezifische Volumen der Acetosolv-Faserstoffe höher als bei dem NBSK.

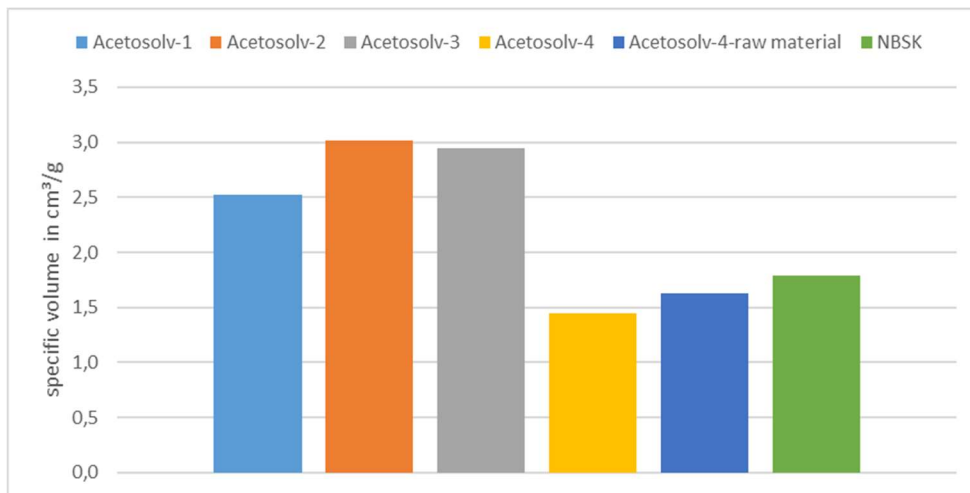


Abb. 38: Spezifisches Volumen der Acetosolv-Faserstoffe im Vergleich mit einem NBSK

#### *Tensile-Index Laborblatt Acetosolv Faserstoff*

Der Faserstoff Acetosolv 4-Ausgangsmaterial weist ungemahlen einen Tensile-Index von 58 Nm/g auf. Gemahlene Laubholzzellstoffe und der Fichten-Kiefern-Zellstoff können höhere Tensile-Indizes bei deutlich niedrigeren SR-Werten ausbilden. Die hohen SR-Werte sind auf den hohen Anteil an Feinstoff zurückzuführen und spiegeln sich auch in dem deutlich höheren WRV der Acetosolv-Faserstoffe (Tab. 8) wieder.

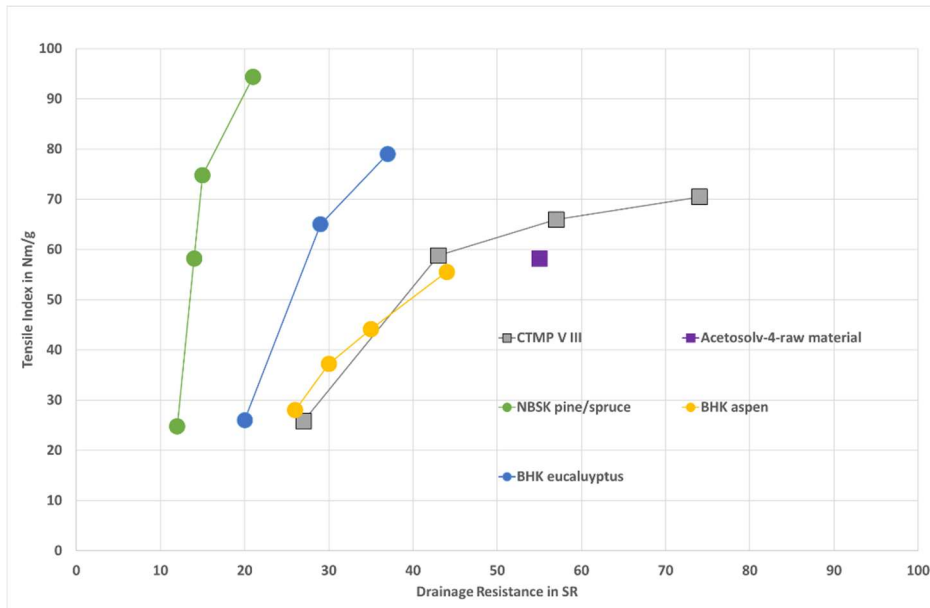


Abb. 39: Tensile-Index Acetosolv-Faserstoff im Vergleich zu CTMP, NBSK und Laubholzzellstoffen

#### Vergleich physikalische Eigenschaften, Acetosolv-Faserstoffe - Industriefaser

In dem nachfolgenden Diagramm (Abb. 40) die wichtigsten physikalischen Eigenschaften der Acetosolv-Faserstoffe im Vergleich zum Industrie *Northern bleached softwood* kraft Faserstoff (NBSK) dargestellt. Je nach Papiersortiment werden an das Papier unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Für Verpackungspapiere sind die Eigenschaften wie Berst-Index, Biegesteifigkeit oder SCT wichtig, da diese auch Aufschluss über deren Verarbeitbarkeit in weiterführenden Prozessschritten geben. Diese Eigenschaften sind aber sehr stark von der Materialzusammensetzung und deren Grundeigenschaften wie z.B. Faserlänge, Dicke und Flächenmasse abhängig. Für den NBSK liegen keine Werte für die Biegesteifigkeit und den SCT vor. Diese werden üblicherweise nicht in den Datenblättern für Zellstoffe angegeben.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufschlussbedingungen zeigen sich deutliche Unterschiede in allen Eigenschaften. D.h. dass bei Einsatz von Faserstoffen nach dem Acetosolv-Aufschluss der Aufschluss optimiert werden muss. Durch einen zielgerichteten Aufschlussprozess wird es möglich sein, die Eigenschaften zu verbessern. Anhand der Werte des NBSK wird deutlich, dass Faserstoffe mit einer größeren Faserlänge einen deutlich höheren Durchreißwiderstand erzielen können. Auch die Zugfestigkeiten sind höher bei deutlich niedrigeren Entwässerungswiderständen.

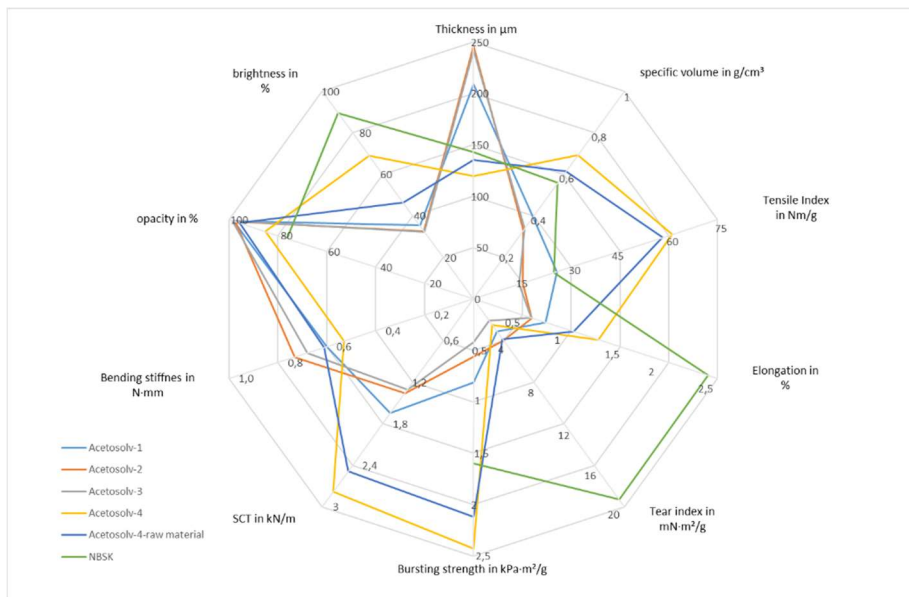


Abb. 40. Physikalische Eigenschaften der Acetosolv-Faserstoffe im Vergleich zu einem NBSK

### Chemisch- morphologische Eigenschaften - Soda-Aufschluss

Der nach dem Soda-Aufschluss erzeugte Miscanthus-Zellstoff wurde auf seine morphologisch-chemischen Eigenschaften hin charakterisiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 17 dargestellt.

Tab. 17: morphologische Eigenschaften - Soda-Aufschluss

Parameter	Miscanthus Zellstoff (Soda-Aufschluss)	NBSK	Eukalyptus
Glührückstand 525 °C in %	1,00	0,23	0,25
WRV in g/g	1,04	1,05	1,07
Grenzviskosität in ml/g	1141	883	790
Lignin-Gehalt in %	1,28	< 1,0	< 1,0
Oberflächenladung in µeg/g	23,0	22,7	27,
Gesamtladung in mmol/kg	-27,8	40,4	65,2
Faserlänge in mm		2,01	0,85
Feinstoffgehalt in %		8,6	15,5

### Spez. Volumen - Papiermaschinenversuche

In der Abb. 41 ist das spezifische Volumen des erzeugten Wellpappenrohspapiers (WPR) und des Duplexpapiers auf der Versuchspapiermaschine dargestellt. Es sind keine signifikanten Änderungen durch den Einsatz von Miscanthus-Zellstoff zu erkennen.

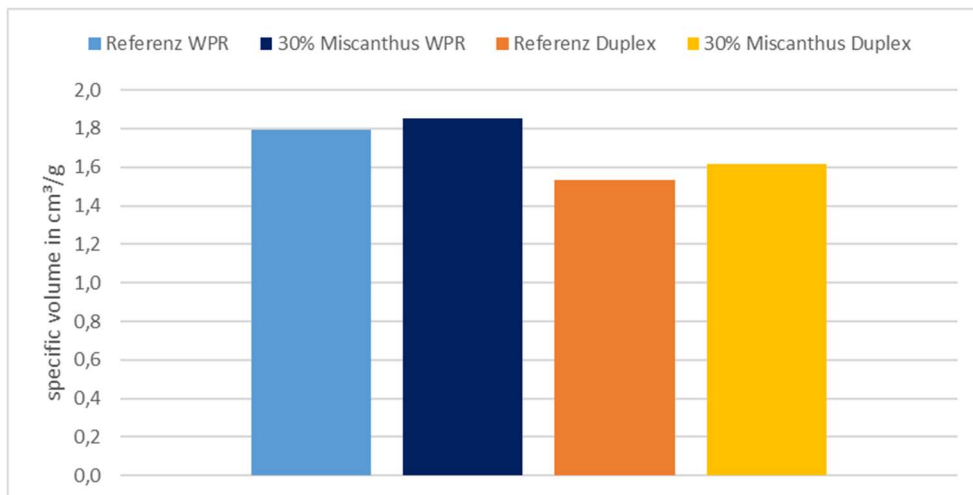


Abb. 41: Spez. Volumen des Wellpappenrohropapiers und des Duplexpapiers

### Burst Index - Papiermaschinenversuche

Durch den Zusatz von Miscanthus ist kaum ein Unterschied im Burst-Index bei beiden hergestellten Papieren erkennbar (Abb. 42). Die Standardabweichung beim Duplex ist deutlich höher als beim WPR was sicher auf die Herstellung der Zweilagigkeit zurückzuführen ist.

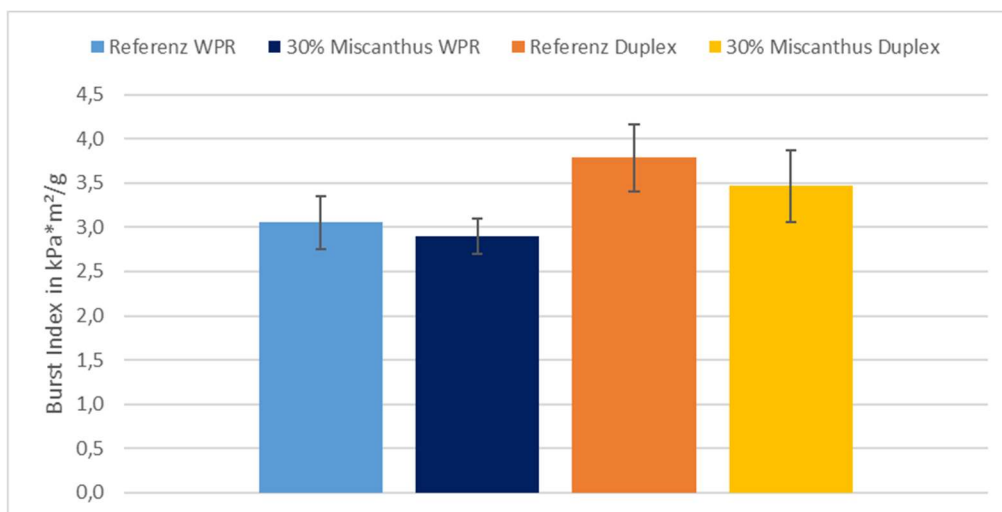


Abb. 42: Burst-Index des Wellpappenrohropapiers und Duplexpapiers

### Nullreißlänge - Papiermaschinenversuche

Wie schon beim Burst-Index zeigen sich auch bei der Nullreißlänge keine Unterschiede bei den hergestellten Papieren durch den Zusatz von Miscanthus (Abb. 43).

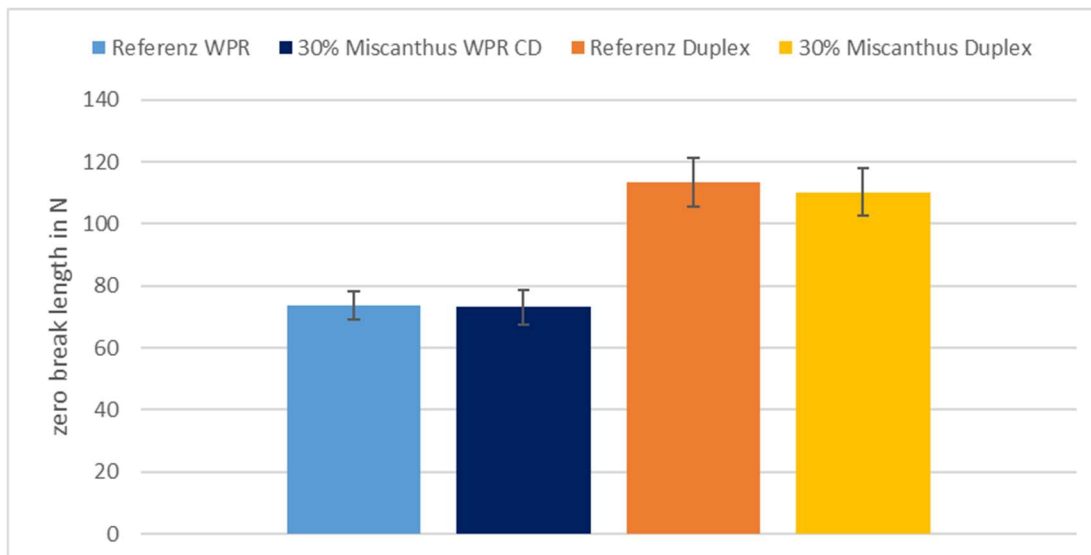


Abb. 43: Nullreißlänge des Wellpappenrohropapieres und Duplexpapieres

#### SCT Wellpappenrohropapier - - Papiermaschinenversuche

Der SCT ist eine typische Eigenschaft für Wellpappenrohropapier und wurde deshalb nur an diesem vermessen. Wie aus der Abb. 44 ersichtlich, sind durch die Zumischung von 30 % Miscanthus-Zellstoff keine signifikanten Unterschiede ersichtlich.

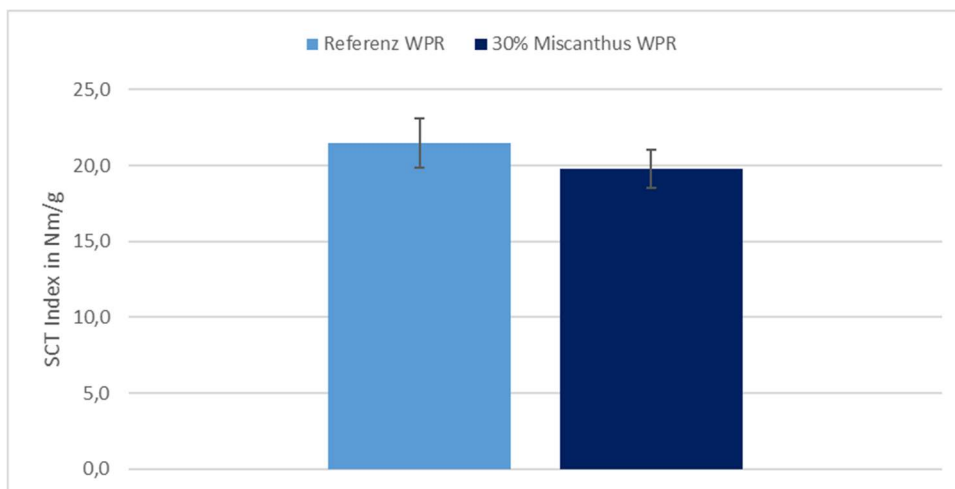


Abb. 44: SCT des Wellpappenrohropapieres

#### Tensile-Index - Papiermaschinenversuche

Wie bei Maschinenpapieren üblich, erfolgt eine Ausrichtung der Fasern in Maschinenlaufrichtung (MD). Deshalb sind die Eigenschaften in MD höher als in CD (Querrichtung). Auch in Abb. 45 wird deutlich, dass durch 30 % Miscanthus keine Reduzierung des Tensile-Index erfolgt.

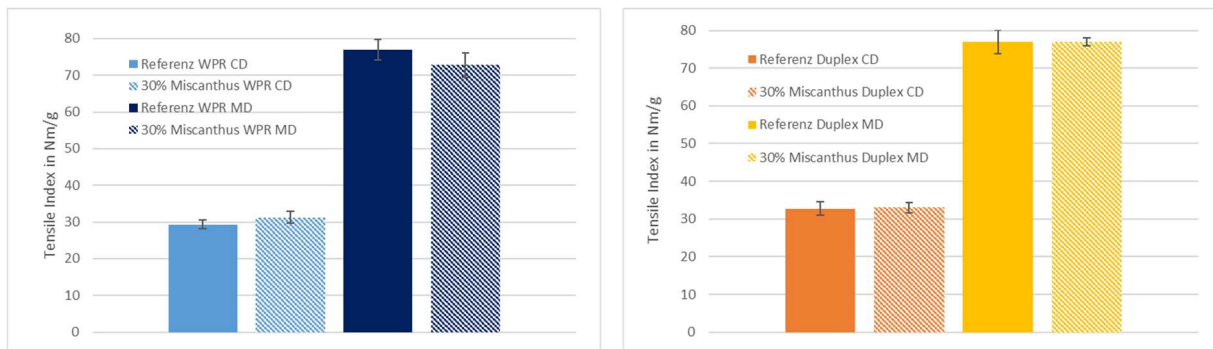


Abb. 45: Tensile-Indizes Wellpappenrohpaper und Duplexpapier

### Tear-Index - Papiermaschinenversuche

Durch die Zugabe von 30 % Miscanthus wird der Tear-Index bei WPR in CD um 11%, MD um 19 % und beim Duplex CD um 13 % und MD um 16 % erhöht (Abb. 46).

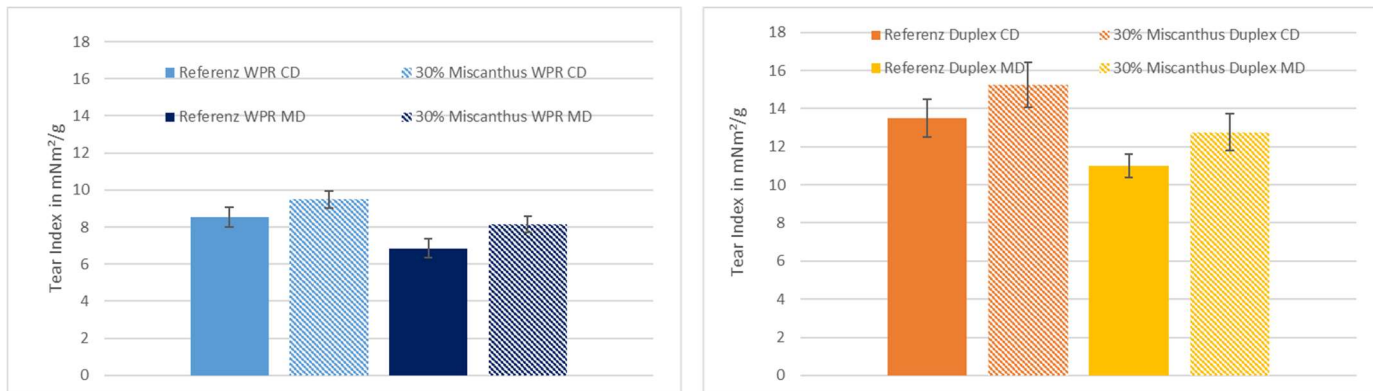


Abb. 46: Tear-Index Wellpappenrohpaper und Duplexpapier

### Biegesteifigkeit, Wellenpapier - Papiermaschinenversuche

In der Biegesteifigkeit (Wellenpapier) gibt es beim WPR keine signifikanten Änderungen. Beim Duplexpapier sind die Standardabweichungen relativ hoch und in MD sinkt die Biegesteifigkeit von 9,7 Nmm auf 8,9 Nmm ab (Abb. 47).

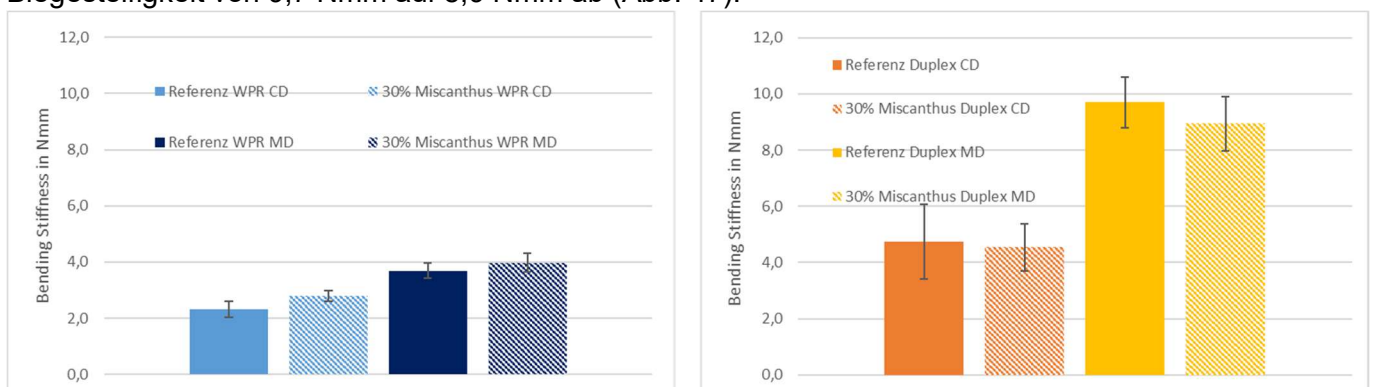


Abb. 47: Biegesteifigkeit Wellpappenrohpaper und Duplexpapier

### Zusammenfassung - Faseraufschluss

Mit Hilfe der verschiedenen Aufschlüsse von Miscanthus, ob TMP, CTMP oder Zellstoffaufschlüsse, konnte nachgewiesen werden, dass Miscanthus in entsprechenden

Papiersortimenten ohne Probleme eingesetzt werden kann. Durch die Zugabe von Miscanthus kommt es zu keiner Verschlechterung der phys. Eigenschaften. Die Zumischung von Miscanthus wirkt sich insbesondere auf die Durchreißfestigkeit positiv aus.

Durch eine Optimierung von Aufschlussbedingungen von Miscanthus erschließen sich neue Potentiale von Verpackungspapieren.

### *Biegesteifigkeit, Partikelwerkstoff*

In Abbildung Abb. 48 die durchschnittliche Biegefestigkeit (in Bruchmodul MOR und Elastizitätsmodul MOE) und die Dichte der Proben jeder Variante dargestellt. Eine hohe Biegefestigkeit ist bei Spanplatten erwünscht. Der erforderliche Mindestwert für die Biegefestigkeit MOR beträgt 11 MPa und 1800 MPa für die MOE (DIN EN 310; P2) bei Spanplatten mit einer Dicke von 10 mm bis 13 mm. Dieser Dickenbereich entspricht der Zieldicke der in diesem Versuch hergestellten Platten (10 mm).

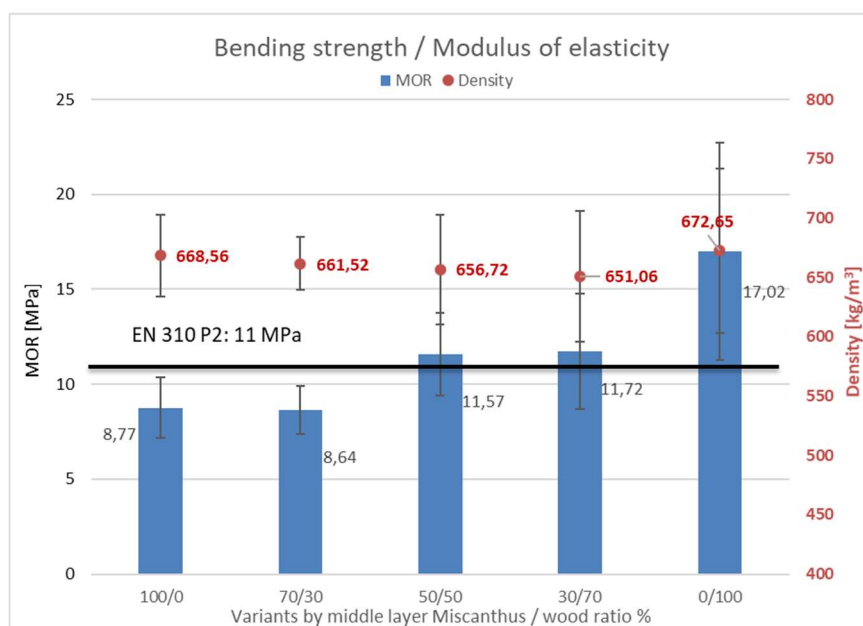


Abb. 48 Eigenschaften der Biegefestigkeit von Miscanthus Partikelboard

Die Abbildung Abb. 48 zeigt, dass der MOR-Wert mit zunehmender Holzzusammensetzung in der Spanplatte ansteigt. Tatsächlich wies die Variante aus 100 % Holz (0/100) den höchsten MOR-Wert auf, der fast doppelt so hoch war wie der der Variante aus 100 % Miscanthus (100/0) in der Mittelschicht. Um normgerechte Spanplatten herzustellen ist eine Zumischung von 50 % Miscanthus notwendig.

### *Wärmeleitfähigkeit - Dämmplatten*

Die Herstellung von Dämmstoffen aus Miscanthus lieferte bei einem Refiner-Mahlspalt von 0,35 mm optimale Eigenschaften. (Abb. 49)



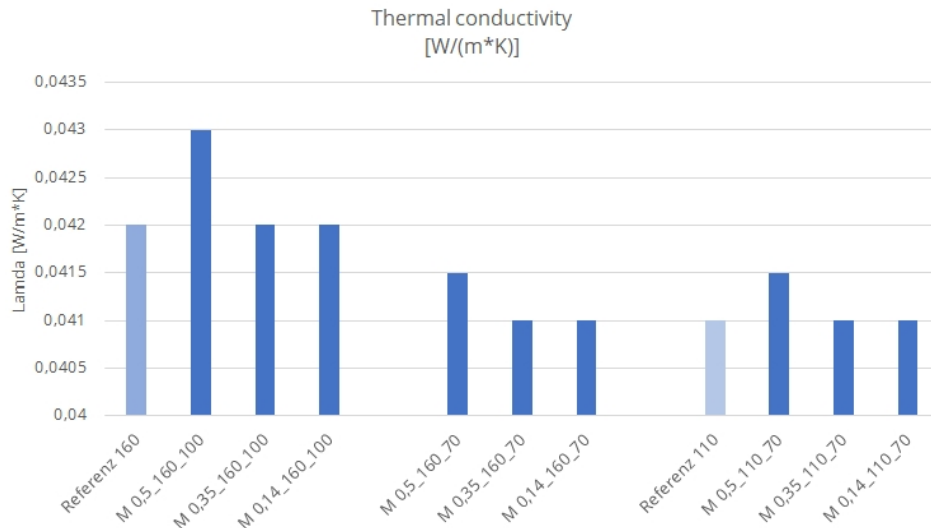


Abb. 49: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Im Projekt wurden physikalisch grundlegende Eigenschaften der hergestellten Dämmstoffe aus Miscanthus ermittelt und bewertet. Für die Wärmeleitfähigkeit (Abb. 50) sind die Temperaturleitfähigkeit, Dichten und Dichteprofile, Fasergrößen und Ausrichtung der Fasern sowie das verwendete Bindemittel von Bedeutung.

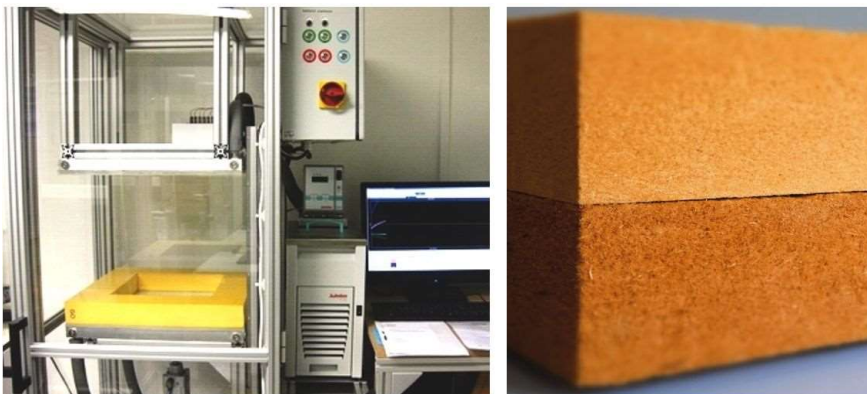


Abb. 50: Wärmeleitmessgerät, Dämmstoff

Die hergestellten Dämmplatten eignen sich für den Einsatz im Wand- und Dachbereich, und können mit Nut- und Feder leicht verarbeitet werden.

#### **Druckfestigkeit – Dämmstoffe**

Für die Ermittlung der Eigenschaften der Dämmstoffe wurde die mechanischen Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung geprüft (DIN EN 826).

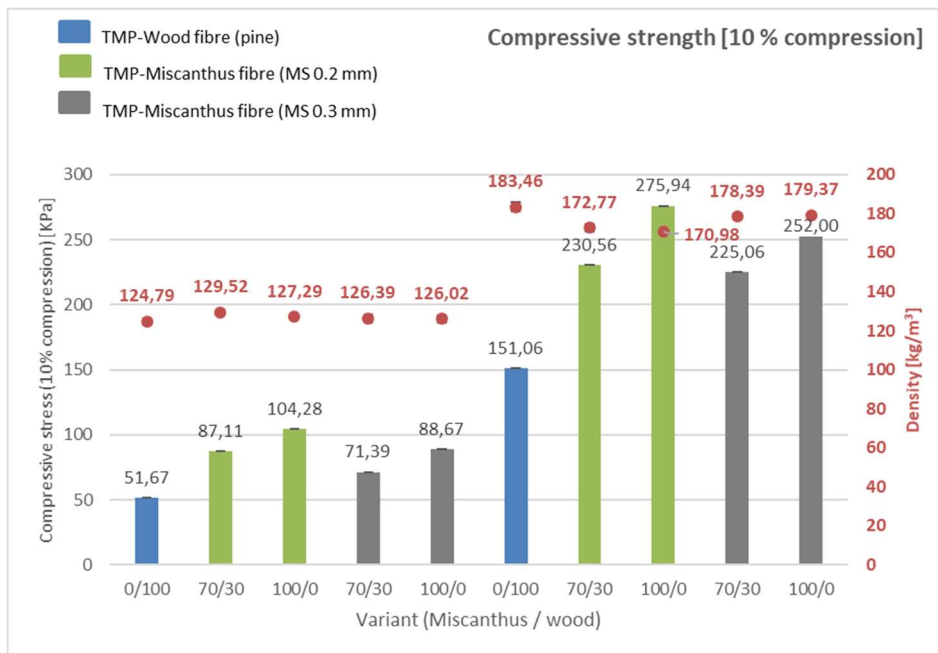


Abb. 51: Druckfestigkeit von Dämmstoffen mit Miscanthus Anteilen.

Als Ergebnis der Prüfung der Druckfestigkeit von Dämmstoffen bei 10 % Stauchung kann von einer Verbesserung mit zunehmenden Anteil von Miscanthusfasern ausgegangen werden. Die Tendenz ist bei beiden Varianten des Mahlpaltes (Faserfeinheit) zu beobachten. Dies gilt ebenso für die ausgewählten Dichten der Dämmstoffe. Dabei zeigt Abb. 51, dass die Druckspannung direkt proportional zur Dichte ist, d. h. je dichter die Faserplatte ist, desto höher ist ihre Druckspannung.

## 5 Ökonomische und Ökologische Betrachtung

### Ernte

Im Projektzeitraum konnte auf den begleiteten landwirtschaftlichen Versuchsflächen durchschnittlich 10 t Trockenmasse/ ha x a (ca. 11,5 t Frischmasse) geerntet werden. Witterungsbedingt traten entweder Wuchsdepressionen bereits in der Vegetationszeit durch Wassermangel auf oder Biomasse-Verluste waren in der Vegetationsruhe durch Wetterereignisse (Sturm, Hagel) zu verzeichnen. Hierbei betrug der Masseverlust bis zu 20 % von der eigentlichen Pflanze durch Windbruch der Stengelspitzen und Verlust der nahezu gesamten Blattmasse an exponierten Standorten. Während der Ernte mit Feldhäckslern traten einerseits Verluste am Erntevorsatz und beim Materialeinzug auf sowie durch das Überblasen des Häckselmaterials auf Traktor-Anhänger-Gespanne (windabhängig) ist ein zusätzlicher Verlust in Summe von 1...10 % von der Frischmasse zu verzeichnen. Transportverluste waren in der Regel unter 0,5 % der transportierten Frischmasse, meistens verursacht durch nicht abgedeckte Ladung und Wind. Die Notwendigkeit einer technischen Trocknung war im Versuchszeitraum nicht gegeben, kann aber aus Literaturwerten für ähnlich halmartige landwirtschaftliche Güter verglichen werden. Je nach Wassergehalt kann der Energieaufwand auf bis zu 20 % des Heizwertes beziffert werden und wird daher von Landwirten möglichst vermieden. Bei der Einlagerung von Miscanthus lagen die Umschlagverluste unter 0,1 %. Der spezif. Energieaufwand durch mobile Arbeitsmaschinen lag durchschnittlich in Summe bei 8...10 kWh/ t (bezogen auf Frischmasse).

Ökologisch zeigte sich der Anbau von Miscanthus durch die extensive Bewirtschaftung unterjährig nahezu CO<sub>2</sub>-frei (außer Etablierung und Ernte) und leistet einen Beitrag zum

Humusaufbau und C-Speicherung im Boden durch verbleibende Pflanzenteile auf der Ackerfläche.

### Energiebilanzierung

Zur Abschätzung der ökonomischen und ökologischen Sinnhaftigkeit der Erzeugung von Papieren aus Miscanthus wurde eine abschätzende Energiebilanzierung vorgenommen. Für die Bilanzierung wurden zwei Szenarien zugrunde gelegt:

Szenario 1: Miscanthus-Papier, Szenario 2: Kraft-Papier

Für den Miscanthus-Aufschluss werden zur jetzigen Zeit eine Energiesumme (Elektrische- und Wärmeenergie) von 3.878 kWh/t und für den Holz-Sulfat-Aufschluss 920 kWh/t benötigt. Das ist deutlich mehr Energie als für den konventionellen Holz-Sulfat Aufschluss. Dies ist jedoch auf den noch nicht im technischen Maßstab optimierten Prozess zurückzuführen, da im Moment der Aufschluss nur im Labormaßstab durchgeführt und diese Daten für die Bilanzierung angesetzt wurden (Abb. 52).

Der Kraft-Zellstoff-Aufschluss ist ein industrieller Aufschluss mit optimiertem Energie- und Chemikalienverbrauch, denn bei diesem Aufschluss wird ein Großteil der pflanzlichen Substanz (ca. 50 %) in der Schwarzlauge gelöst. Diese wiederum wird verbrannt und in Energie umgewandelt, somit werden alle Reststoffe energetisch genutzt bzw. werden Chemikalien regeneriert.

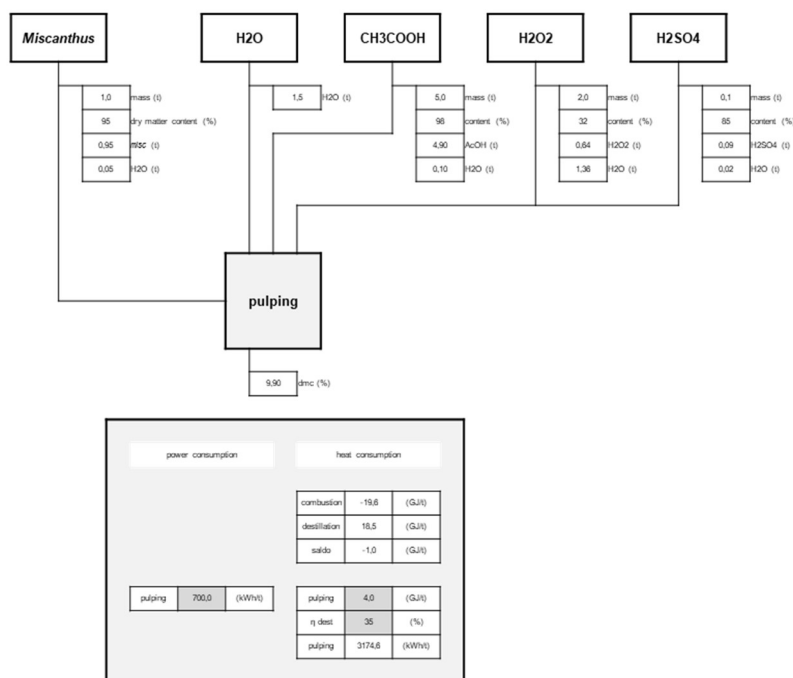


Abb. 52: Energiebilanzierung für die Herstellung von Miscanthus Zellstoff nach dem Acetosolv Verfahren

Der Aufschluss von Miscanthus in Essigsäure ist noch nicht optimiert, die Verdünnung ist sehr hoch und es muss sehr viel Wasser verdampft werden, was sehr energieintensiv ist. Daher ist die Energiebilanz im Moment negativ. Durch eine Optimierung des Aufschlussverfahrens und oder Anwendung von anderen Verfahren für den Aufschluss von Miscanthus kann dies zu einem effizienteren Prozess führen und damit einem deutlich niedrigeren Energieverbrauch.

## 6 Schlussfolgerungen

### *Überblick wesentlicher Ergebnisse*

Durch den Einsatz von Feldhäckslern wird das geerntete Material in der Hauptfraktion auf Schnittlängen zwischen 10 bis 30 mm zerkleinert. Die Schnittlänge hängt hierbei von Anzahl der Messer, Drehzahl der Häckslertrommel und der Zuführgeschwindigkeit der Vorpresswalzen ab. Eine technische Trocknung entfällt, wenn die Ernte spät im Frühjahr erfolgt. Der Wassergehalt liegt dann meist < 20 %, so dass Lagerstabilität gegeben ist. Für die Weiterverarbeitung wird eine Fraktionierung empfohlen.

Der Einsatz von Miscanthus, ob als TMP, CTMP oder Zellstoff, ist grundsätzlich möglich.

Die Herstellung von Dämmstoffen kann durch einen optimierten Faseraufschluss mit den Eigenschaften herkömmlicher Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen verglichen werden. Eine Zumischung von Miscanthus bei Partikelwerkstoffen ist ebenso möglich.

Bei Einsatz von TMP für die Papierherstellung spielt die Erzeugung eine wichtige Rolle, d.h. sind viele Stippen und Feinstoff enthalten. Dadurch wird die Papiererzeugung beeinträchtigt (Stippen -> Sollbruchstellen, Entwässerung). Aber auch der hohe Ligninanteil ist von Nachteil, da dieser einer Ausbildung von Wasserstoffbrückenbildung zwischen den Cellulosefasern entgegenwirkt und die Festigkeiten im Papier herabsetzt. Durch zusätzliche Mahlung des TMP und Zumischung zu einem Wellenstoff konnten die physikalischen Eigenschaften bis 20% gewährleistet werden.

Ähnliche Probleme traten beim Einsatz von CTMP auf. Hier kann aber gezielt durch die Optimierung des Aufschlusses entgegengewirkt werden. Durch Mahlung des CTMP konnten Eigenschaften wie von Laubholzzellstoffen erreicht werden.

Im Zellstoffaufschluss nach dem Acetosolv-Verfahren sind noch keine systematischen Untersuchungen zur Verfahrensführung durchgeführt worden. Dadurch enthält auch dieser Faserstoff viel Feinstoff, was sich bei der Papierherstellung negativ auswirkt, da viel mehr Energie im Trocknungsprozess aufgewendet werden muss. Beim Soda-Aufschluss von Miscanthus traten diese Probleme nicht auf. Die Anwendbarkeit des Einsatzes von Miscanthus Soda-Zellstoff konnte am Beispiel eines Wellpappenrohpapieres und eines Duplex-Papieres gezeigt werden. Die Herstellung erfolgte im kleintechnischen Maßstab auf der Versuchspapiermaschine an der PTS. Die Ergebnisse der geprüften Papiere zeigten, geringe statische Festigkeitsverluste und deutlich bessere dynamische Festigkeiten als die Referenzpapiere ohne Miscanthus.

### *Resümee*

Durch die Vielzahl an Untersuchungen in dem Projekt konnte aufgezeigt werden das die Ernte, Lagerung und Verarbeitung von unterschiedlich aufbereiteten Miscanthus Faserstoff unter optimierten Voraussetzungen für unterschiedliche Anwendungen möglich ist. Es konnte eine Wertschöpfungskette von der Bereitstellung bis hin zur Herstellung von Dämmstoffen und Papier- und Faserprodukten aus Miscanthus aufgezeigt werden.

## 7 Durchführende Forschungsstellen

### *Forschungsstelle 1*

Papiertechnische Stiftung  
Institut für Zellstoff und Papier – PTS-IZP, Heidenau  
Pirnaer Straße 37  
01809 Heidenau  
Leiter der Forschungsstelle: Dr. Thorsten Voß  
Projektleiter: Dr. Martin Zahel

### *Forschungsstelle 2*

Technische Universität Dresden  
Institut für Naturstofftechnik, Professur für Agrarsystemtechnik (AST)  
01062 Dresden  
Leiter: Prof. Dr. Ursula M. Staudinger  
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius

### *Forschungsstelle 3*

Technische Universität Dresden  
Institut für Naturstofftechnik, Professur für Holztechnik und  
Faserwerkstofftechnik (HFT)  
01062 Dresden  
Leiter: Prof. Dr. Ursula M. Staudinger  
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ

Laufzeit 01.07.2020 – 31.12.2022

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] [https://ec.europa.eu/commission/news/new-bioeconomy-strategy-sustainable-europe-2018-oct-11-0\\_en](https://ec.europa.eu/commission/news/new-bioeconomy-strategy-sustainable-europe-2018-oct-11-0_en)
- [2] Liu Z., Wang H., Hui L., 2018. Pulping and papermaking of non-wood fibers. In: "Pulp and paper processing", IntechOpen, pp. 1-30.
- [3] "Papier 2021 - Ein Leistungsbericht", 2021. VDP.
- [4] Ververis G., Georghion K., Christodoularis N., Santas P., Santas R., 2004. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops and Products*, 19: 245-254.
- [5] Bocianowski J., Fabicial E., Joachimiak K., Wojech R., Wojciak A., 2019. *Miscanthusxgi-ganteus* as an auxiliary raw material in NSSC pulp production. *Cell. Chem. Technol.*, 53 (3-4): 1-9.
- [6] Danielewicz D., Dybka-Stepien K., Surma-Slusarska B., 2018. Processing of *Miscanthusxgiganteus* stalks into various soda and kraft pulps. Part1: Chemical composition, types of cells and pulping effects. *Cellulose*, 25: 6731-6744.
- [7] Absatzvolumen Dämmstoffe DE 2019 (<https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/biobasierte-produkte/holzprodukte-und-baustoffe/absatzvolumen-von-daemmstoffen-in-deutschland.html>) – Zugriff 15.06.2023
- [8] Panorama of the manufacturing industry of the Czech Republic 2016, MIT, 2017.
- [9] [www.acpp.cz/about-association](http://www.acpp.cz/about-association), retrieved 18.09.2018.
- [10] Cappelletto P., Mongardini F., Barberi B., Sannibale M., Brizzi M., Pignatelli V., 2000. Papermaking pulps from the fibrous fraction of *Miscanthus x giganteus*. *Industrial Crops Production*, 11: 205-210.
- [11] Marín F., Sánchez J.L., Arauzo J., Fuertes R., Gonzalo A., 2009.
- [12] pulp and paper properties, *Bio-res. Technol.*, 100: 3933-3940.
- [13] Mondschein A., Stottmeister U., Tech S., 2015. EAGLE-Starthilfe. Nutzung nachwachsender Rohstoffe: Stärken – Chancen – Risiken, Taschenbuch, 12:9.
- [14] Marín, F., Sánchez, J., Arauzo, J., Fuertes, R. & Gonzalo, A. (2009). Semichemical pulping of *Miscanthus giganteus*. Effect of pulping conditions on some pulp and paper properties. *Bioresource Technology*, 100(17), 3933–3940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.011>
- [15] Liu, Z., Wang, H. & Hui, L. (2018). Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers. *Pulp and Paper Processing*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79017>
- [16] Pande, H. (1998, Januar). Non-wood fibre and global fibre supply. University of Toronto Faculty of Forestry, Toronto Ontario Canada.
- [17] Kinsella, S. (2004, August). The Environmental Paper Listening Study: Chapter Four: Tree Free Paper. *Fiber Futures*. Abgerufen am 24. September.2021 <http://www.conservatree.org/paperlisteningstudy/TreeFreePaperLS.pdf>
- [18] Barth, W. (2020, November). Herstellung von Zellstoffen nach dem Acetosolv-Verfahren (Belegarbeit). Technische Universität Dresden.
- [19] Cepi ContainerBoard. (2015, August). Liste der Europäischen Wellpappen-Papiere (Auflage 5).
- [20] [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/\\_inhalt.html#260618](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/_inhalt.html#260618), Abgerufen am 17. Juli.2023
- [21] <https://www.bundestag.de/resource/blob/515432/797921cd2aa03f9e8abe2d63ef9419c1/WD-5-052-17-pdf-data.pdf>, Abgerufen am 17. Juli.2023

- [22] Baulinks und Bauletter 2021,  
<https://www.baulinks.de/webplugin/2021/0300.php4> – Zugriff 03.12.2021
- [23] Dämmstoffe Studie Europa,  
<https://www.baulinks.de/webplugin/2021/1562.php4> Zugriff 14.07.2023
- [24] Statistisches BA 2020, <https://www.destatis.de> – Zugriff 03.12.2021
- [25] Cepi ContainerBoard. (2015, August). *Liste der Europäischen Wellpappen Papiere* (Auflage 5).